

شبیه‌سازی عددی اثر نسبت سوخت به هوا در کاهش آلاینده NO در یک محفظه احتراق توربین گاز با مشعل دو پیچشی

محمدحسن صدقی^۱، محمدحسن نوبختی^{۲*} و مسعود زارع^۳

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، mohamadhasan7.sedghi@gmail.com

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، m.nobakhti@srbiau.ac.ir

۳- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، m.zareh@srbiau.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۶، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۰/۰۲/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۳۰)

چکیده: هدف از این پژوهش بررسی تأثیر نسبت سوخت به هوا بر روی مشخصات جریان و آلاینده NO درون یک محفظه احتراق دوپیچشی با هندسه مدل است. هوا در این محفظه احتراق به صورت معکوس از درون لوله شعله می‌گذرد. در این پژوهش با تعریف شرایط مرزی و تولید شبکه کافی شبیه‌سازی احتراق با استفاده از مدل استاندارد k-ε برای سوخت متان انجام شده است. شبیه‌سازی‌ها در چهار نسبت هم‌ارزی مختلف، که تمامی آن‌ها برای فاز رقیق از سوخت‌اند، انجام گرفته است. فیزیک جریان درون محفظه نشان داد که در نسبت‌های هم‌ارزی بالاتر از ۱، دبی ورودی هوا برای حفظ برای ایجاد جریان بازگشتی و پایداری شعله کافی نیست. با بررسی گردابه و میزان قدرت هر جریان بازگشتی درون محفظه، نتایج نشان می‌دهد که کاهش نسبت هم‌ارزی باعث افزایش شدت گردابه موجود در محفظه می‌شود. در بحث دمای شعله، مشخص شد که کاهش نسبت هم‌ارزی نه تنها باعث کاهش بیشینه دمای شعله می‌شود، بلکه می‌تواند طول شعله را تا حدودی کاهش دهد. در نهایت، با مطالعه تغییرات NO در طول محفظه، این نتیجه حاصل شد که رفتار تولید NO بسیار به دمای سیال بستگی دارد و نتیجه حاصل از آن تأثیر مثبت و چشمگیر کاهش نسبت هم‌ارزی بر روی کاهش تولید آلاینده NO احتراق است.

کلیدواژگان: اثر نسبت سوخت به هوا، شبیه‌سازی سه‌بعدی، محفظه احتراق دوپیچشی، کاهش آلاینده NO

مقدمه

مصرف منابع تجدیدناپذیر سوخت‌ها از دیرباز به منظور تولید انرژی ساکنین کره زمین استفاده شده است. کشور ما، ایران، در گذر از مسیر توسعه برای تولید انرژی از این قاعده مستثنی نیست. در ایران، در چند سال اخیر، آلاینده‌ها تأثیر برجسته‌ای بر کیفیت هوای پاک داشته‌اند [۱]. از طرف دیگر، پژوهش‌های به‌عمل‌آمده بیانگر اهمیت مطالعه و بازنگری فرایند احتراق و افزایش بهره‌وری آن است. پژوهش‌ها نشان می‌دهد تا سال ۲۰۴۰ تنها کمتر از ۲۰ درصد از تولید انرژی دنیا از منابع تجدیدپذیر تولید می‌شود و مابقی انرژی از منابع تجدیدناپذیر تولید خواهد شد [۲]. موتورهای توربینی به‌عنوان یکی از زیربخش‌های یک سیستم احتراقی نقش برجسته‌ای در تامین انرژی در صنایع مختلف دارند. اساس کار این موتورها تبدیل انرژی شیمیایی به انرژی حرارتی و تولید انرژی مکانیکی است. این مطلب بیانگر اهمیت نقش سیستم‌های احتراقی در تولید آلاینده‌هاست. بنابراین، تلاش‌ها برای طراحی و بهینه‌سازی تکنولوژی‌های احتراقی، به‌منظور کاهش میزان تولید آلاینده‌ها، بی‌وقفه ادامه خواهد داشت. محفظه احتراق توربین گاز بین کمپرسور و توربین قرار دارد و در مجموع به‌عنوان یک موتور برای سوزاندن سوخت و افزایش فشار و دمای هوای ورودی، به‌منظور ایجاد نیروی پیشران، شناخته می‌شود. احتراق تقریباً در یک فشار ثابت انجام می‌شود. تمام محفظه‌های احتراق توربین‌های گاز دمای گازها با فشار بالا را افزایش می‌دهند. محفظه احتراق

توربین‌های گازی درصد کمی از هوای ورودی را برای احتراق استفاده می‌کند. بیشتر هوای ورودی برای خنک‌کاری و اختلاط مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳]. محفظه‌های احتراق موتورهای توربینی به سه دسته اصلی استوانه‌ای، حلقوی و استوانه‌ای-حلقوی تقسیم می‌شوند که با توجه به نیازمندی مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳]. طراحی و بهینه‌سازی محفظه احتراق فرایندی بسیار پیچیده است که در آن ارتقا پارامترها اغلب به‌طور هم‌زمان ممکن نیست. به‌منظور بهره‌وری بیشتر، پایداری شعله، کاهش دمای شعله و دمای خروجی از محفظه احتراق و متعاقب آن کاهش تولید آلاینده‌ها و غیره، اجزای تشکیل‌دهنده محفظه احتراق به‌صورت مداوم بهینه‌سازی می‌شوند.

جریان پیچشی برای آشفته‌کردن جریان و پایداری شعله یکی از مباحث مهم است. چرخاننده‌ها^۱ یک نمونه رایج استفاده‌شده برای ایجاد یک جریان چرخشی و ایجاد یک گردابه از محصولات داغ احتراق، به‌منظور ایجاد جرقه دائمی در ورودی سوخت و هوایند. این الگوی جریان هوا با استفاده از چرخاننده‌های پیچشی و گرم‌کردن جریان باعث اختلاط سوخت و هوای باکیفیت می‌شود. گردابه بازگشتی^۲ یک پدیده شناخته‌شده در جریان‌های پیچشی است. در اعداد پیچش بالا، این پدیده باعث برگشت جریان حول محور مرکزی می‌شود. این ویژگی‌های جریان بازگشتی، به‌دلیل ایجاد یک لایه برشی قوی، آشفستگی بالا و نرخ ترکیب سریع توسط چرخاننده‌های هوا، باعث مخلوط‌شدن بهتر سوخت و هوا می‌شوند. این ویژگی‌های جریان‌های بازگشتی باعث استفاده گسترده این ساختار در محفظه احتراق، به‌منظور کنترل پایداری و همچنین اندازه و شکل شعله، شده است [۳]. جریان پیچشی منجر به بروز ویژگی‌های خاص در میدان جریان محفظه، مانند گردابه مرکزی پیش‌رونده^۳، می‌شود [۴]. یکی از ساختارهای دیگر جریان‌های پیچشی ساختاری به نام ناحیه چرخش داخلی^۴ و خارجی^۵ است. این پدیده از گردابه بازگشتی منتج می‌شود. جریان پیچشی باعث ایجاد نیروی گریز از مرکز می‌شود و این نیرو جریان را به سمت دیواره‌ها متمایل می‌کند [۵]. از دیگر پدیده‌های بسیار مهم موجود در جریان پیچشی با درجه پیچش بالا گردابه مرکزی پیش‌رونده است. این پدیده دارای حرکت مارپیچ حول محور اصلی شعله است. با توجه به آنچه ذکر شد، در اثر گردابه مرکزی پیش‌رونده و همچنین تقابل جریان تازه ورودی با جریان بازگشتی ناشی از ناحیه چرخش داخلی، نقاط سکونی در میدان جریان پدید می‌آید. این نقاط دارای نرخ واکنش بالایی بوده و به‌عنوان یک منبع انفجار برای ترکیب سوخت و هوای ورودی عمل می‌کند و موجب پایداری شعله می‌شود [۶، ۷]. در پژوهش‌های همکاران، یک محفظه احتراق دوپیچشی به‌وسیله نرم‌افزار فلونت، با استفاده از مدل آشفستگی استاندارد k-ε، مدل‌سازی شده است. نتیجه این مدل‌سازی دست‌یافتن به زاویه بهینه چرخاننده‌ها برای کاهش آلاینده‌ها است [۸]. در پژوهش دیگری، مدل‌سازی محفظه احتراق با سوخت LPG^۶ و به‌همراه چرخاننده‌های بیرونی و حلقوی با یک نازل سوخت مرکزی انجام شده است و به مطالعه مشخصات شعله، پایداری شعله و کاهش مقدار گونه NO پرداخته شده است. الگوی پایداری شعله بیانگر این نتیجه است که سوخت LPG در محفظه احتراق حلقوی و با نازل پاشش سوخت مرکزی مشخصات شعله پایدارتری را عرضه می‌کند [۹]. در مطالعه دیگر، از مدل آشفستگی استاندارد K-ε و اتلاف گردابی^۷ در واکنش‌های احتراقی در مدل‌سازی فلونت استفاده شده است. در این مدل خاص، از محفظه‌های احتراق با تکنولوژی پیش‌گرم و با استفاده از مخلوط سوخت و هوای رقیق برای کاهش آلودگی NO_x استفاده شده است. این مطالعه عددی سه‌بعدی به‌منظور بررسی تاثیر چرخاننده‌های ورودی و دما در تولید NO_x حرارتی در یک محفظه احتراق حلقوی با چرخاننده‌های دوپیچشی است.

1. Swirlers
2. Vortex breakdown
3. Processing vortex core (PVC)
4. Inner recirculation zone (IRZ)
5. Outer recirculation zone (ORZ)
6. Liquefied petroleum gas
7. Eddy dissipation

در سال ۲۰۱۷، مدل‌سازی فلوئنت یک محفظه احتراق دوپیشگی با تمرکز بر مقایسه زاویه چرخاننده‌ها انجام شده است. در این پژوهش، علاوه بر مطالعه پارامترهای موثر در محفظه احتراق، به مطالعه تاثیر تقابل پارامترها و رسیدن به یک هم‌افزایی مناسب برای ایجاد و پایداری شعله پرداخته شده است. از مدل استاندارد $k-\epsilon$ برای مدل‌سازی آشفته‌گی استفاده شده است. نتایج این شبیه‌سازی‌ها با نتایج آزمایشگاهی پیشین این محفظه احتراق مقایسه شده است. نتیجه دست‌یافتن به زاویه بهینه چرخاننده‌ها برای کاهش آلاینده‌گی است [۱۱]. در مطالعه دیگر، به بررسی ویژگی شعله‌های چرخشی غیرمخلوط درون یک محفظه احتراق با تمرکز بر پایداری شعله و کاهش آلاینده‌ها پرداخته شده است. پیکربندی محفظه احتراق متشکل از دو لوله هم‌مرکز، به همراه یک چرخاننده است. نتایج بیانگر پایداری شعله و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن با افزایش اکسیژن و افزایش جریان معکوس است. همچنین، افزایش اکسیژن به هوا (در حالی که ثابت سرعت جریان اکسیدکننده یکسان است) و افزایش مقدار چرخش جریان، مقدار NO_x را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. همین‌طور، مشخص می‌شود که افزایش اکسیژن باعث کاهش اندازه شعله می‌شود. اگرچه در حال حاضر مطالعات زیادی بر روی کاهش آلاینده‌گی‌های توربین گاز انجام شده است، اما بیشتر آن‌ها به نوع سوخت، تزریق گاز و سرعت ورودی متمرکز شده‌اند و زمینه‌هایی مانند تاثیر استفاده از ترکیب چرخاننده‌ها و دمای گاز ورودی کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۱۲]. پریتز و گابی در مطالعه دیگر به شبیه‌سازی عددی جریان آشفته دارای چرخش در یک محفظه احتراق پرداخته‌اند و نتایج حل عددی به کمک دو مدل $k-\omega$ و $k-\epsilon$ با مقادیر تجربی مقایسه شده‌اند. در این مقاله، سرعت محوری^۱ و سرعت زاویه‌ای^۲ در محل خاصی درون گردابه اصلی برحسب شعاع بررسی شده است. مشاهده شده است که مدل $k-\epsilon$ نتایج نزدیک‌تری به مقادیر تجربی تولید کرده و لذا این مدل نسبت به مدل $k-\omega$ در شبیه‌سازی جریان آشفته گردابه‌ای در محفظه احتراق کارآمدتر است [۱۳].

هندسه و شرایط عملکردی محفظه احتراق مدل

هدف از انجام این پژوهش بررسی تاثیر کاهش نسبت هم‌ارزی (افزایش دبی جرمی هوای ورودی به لوله شعله^۳) بر روی نسبت جرمی آلاینده درون یک محفظه احتراق دوپیشگی با هندسه خاص است. هوا در این محفظه احتراق به صورت معکوس از درون یک لوله شعله عبور می‌کند و در انتهای محفظه وارد چرخاننده‌ها می‌شود، اما در مسیر عبور خود تا رسیدن به چرخاننده‌ها بخشی از دبی جرمی آن به ترتیب از طریق سوراخ‌های ثانویه و اولیه وارد محفظه احتراق می‌شود. محل این سوراخ‌ها به نحوی تعبیه شده است که به فرایند رقیق‌سازی در ناحیه ثانویه و ایجاد جریان برگشتی در ناحیه اولیه کمک کند. درصد هوای ورودی به سوراخ‌های اولیه و ثانویه نقش مؤثری بر فیزیک جریان درون محفظه احتراق می‌گذارد.

روش مدل‌سازی عددی

پس از شبکه‌بندی فیزیک محفظه احتراق در تنظیمات نرم‌افزار فلوئنت از حلگر مبتنی بر فشار متناسب با فرض جریان‌های تراکم‌ناپذیر استفاده می‌شود. جریان به صورت گذرا مدل‌سازی شده است، اگرچه به حلی پایا منتهی می‌شود. محفظه احتراق به صورت سه‌بعدی مدل شده است. معادلات به صورت کوپل حل می‌شوند. جریان اغتشاشی برپایه مدل استاندارد $k-\epsilon$ شبیه‌سازی شده است. از مدل انتقال گونه‌های شیمیایی^۴ برای محاسبه اثر تقابلات تلاطم شیمیایی استفاده شده است. فرم واکنش تک‌معادله واکنشی-احتراقی برای شبیه‌سازی گاز متان در نظر گرفته شده است. برای مطالعه شبکه با توجه به فیزیک پیچیده هندسه از چهار شبکه مختلف استفاده شده است. شکل ۱ بررسی اثر شبکه بر روی توزیع فشار در محفظه احتراق دوپیشگی را نشان می‌دهد.

1. Axial Velocity
2. Circumferential Velocity
3. liner
4. Species transport

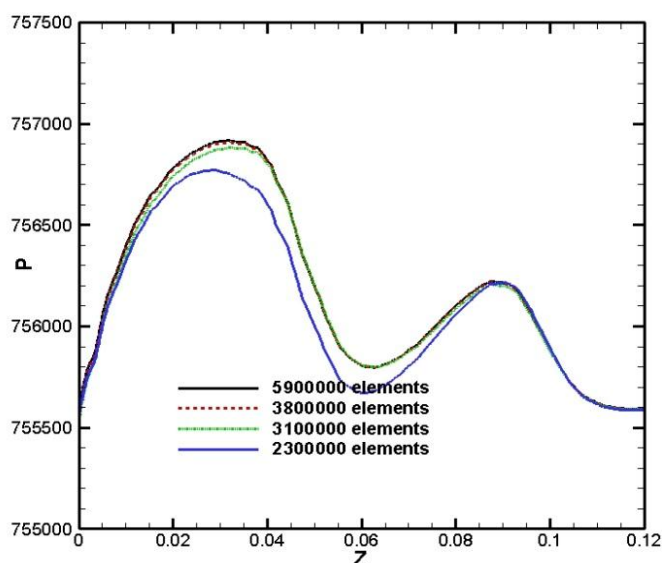


Figure 1- Investigation the effect of mesh on pressure distribution in double combustion chamber

شکل ۱- بررسی اثر شبکه بر روی توزیع فشار در محفظه احتراق دوپیشگی

این شبکه‌ها تقریباً شامل ۲۳۰۰۰۰۰، ۳۱۰۰۰۰۰، ۳۸۰۰۰۰۰ و ۵۹۰۰۰۰۰ شبکه محاسباتی‌اند. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه توزیع فشار با افزایش تعداد کل المان‌ها از ۲/۳ میلیون به ۳/۱ میلیون تغییر می‌کند، ولی از ۳/۱ میلیون به ۳/۸ میلیون خیلی تغییر نکرده است. همچنین، قابل مشاهده است که نمودار تغییرات فشار در طول شعاع محفظه برای دو شبکه ۳/۸ و ۵/۹ تغییر محسوسی نکرده است و روی یکدیگر قرار گرفته‌اند. همچنین، بیشینه دما برای $\phi = 0.72$ نیز برای این چهار شبکه در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- اثر شبکه روی بیشینه دما درون محفظه احتراق برای $\phi = 0.72$

Table 1- Mesh's Effect on maximum temperature in combustion chamber for $\phi = 0.72$

Mesh	2300000	3100000	3800000	5100000
maximum temperature (K)	2543	2791	2847	2853

اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی روش حل، هندسه فیزیک مرجع [۱۴] با روش این پژوهش دوباره حل شده است. در شکل ۲ هندسه این محفظه احتراق مشاهده می‌شود.

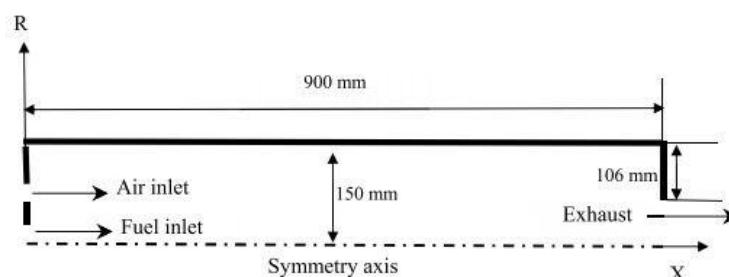


Figure 2- Geometry used for validation [14]

شکل ۲- هندسه مورد استفاده برای اعتبارسنجی [۱۴]

همان طور که در شکل های ۳ و ۴ مشاهده می شود کانتور توزیع دما و نمودار تغییر دما تقریباً یکسان بوده و شبیه سازی حاضر با دقت مناسبی توزیع دما را به دست آورده است. در شکل ۵ مقایسه خطوط جریان نمایش داده شده است. ذکر این نکته لازم است که مرجع [۱۴] اعتبارسنجی پژوهش خود را با نتایج آزمایشگاهی پیشین ارزیابی و اعتبارسنجی کرده است.

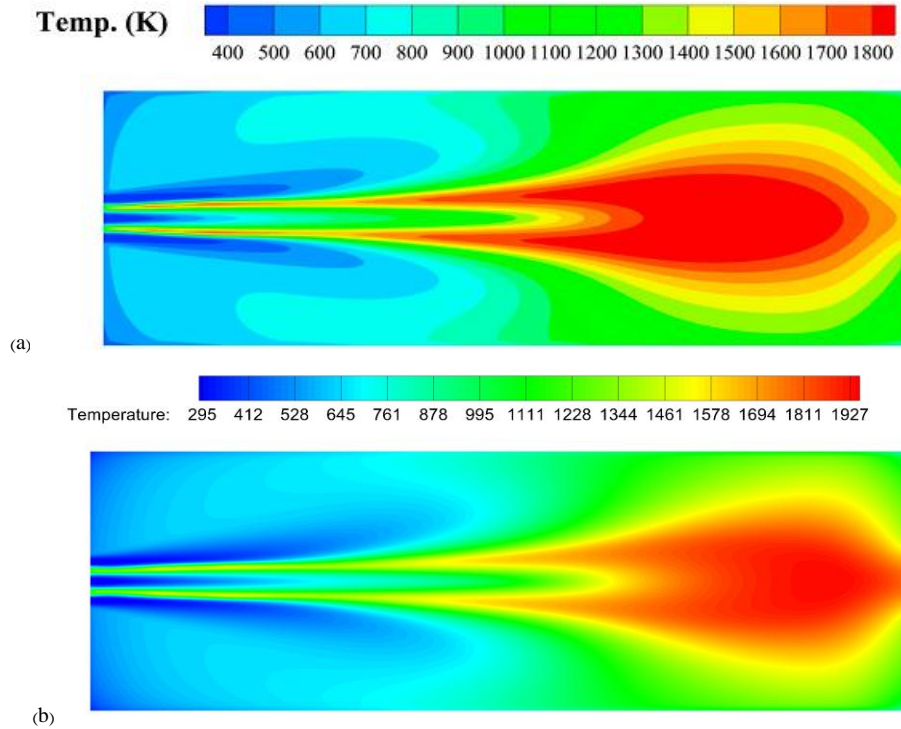


Figure 3- (a) Temperature (Kelvin) distribution contour from reference [14], (b) Temperature (Kelvin) distribution contour by this study

شکل ۳- الف) کانتور توزیع دما (کلوین) [۱۴] و ب) کانتور توزیع دما (کلوین) با روش این پژوهش

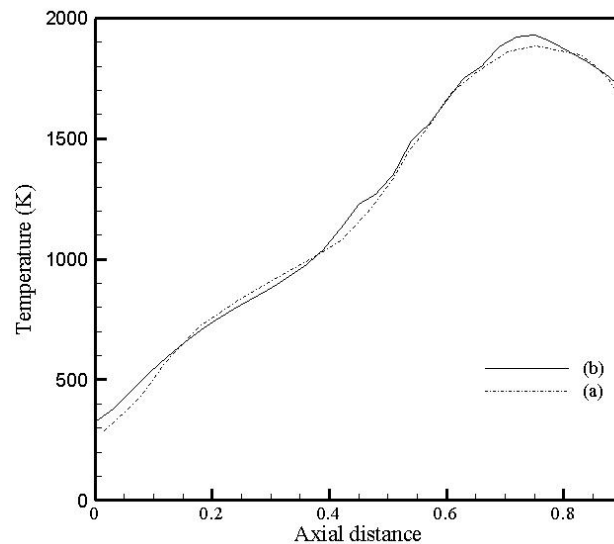


Figure 4- (a) Variation of axial temperature (Kelvin) [14], (b) Variation of axial temperature (Kelvin) by this study

شکل ۴- الف) تغییرات دما (کلوین) [۱۴] و ب) تغییرات دما (کلوین) با روش این پژوهش

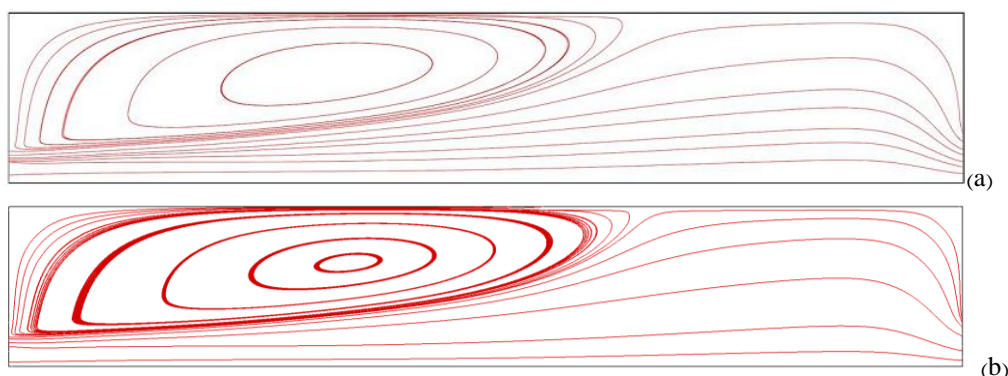


Figure 5- (a) Stream lines [14], (b) Stream lines by this study
 شکل ۵- مقایسه الف) خطوط جریان [۱۴] و ب) خطوط جریان با روش این پژوهش

یافته‌ها

نتایج حاصل از حل

همان‌طور که اشاره شد، در این پژوهش هدف مطالعه تأثیر کاهش نسبت هم‌ارزی بر روی پارامترهای مختلف درون محفظه احتراق است. بدین‌منظور، با ثابت نگه‌داشتن میزان دبی جرمی سوخت ($\dot{m}_{f_{in}}$) در هر شبیه‌سازی، نسبت هم‌ارزی با افزایش مقدار دبی جرمی هوای ورودی ($\dot{m}_{a_{in}}$) به لوله شعله کاهش پیدا کرده است. در این پژوهش، شبیه‌سازی‌ها در چهار نسبت هم‌ارزی مختلف انجام گرفته است. نسبت هم‌ارزی نیز به شکل نسبت سوخت به هوای واقعی به سوخت به هوای استوکیومتری تعریف می‌شود [۱۵].

$$\phi = \frac{(F/A)_a}{(F/A)_{st}} \quad (1)$$

میزان دبی جرمی هوای ورودی به لوله شعله برای هر چهار مورد شبیه‌سازی در جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲- مقدار دبی هوای ورودی در لوله شعله برای هر مورد شبیه‌سازی

Table 2- Amount of inlet air flow in the liner for each simulation

Case	$\dot{m}_{f_{in}}$ (kg/s)	$\dot{m}_{a_{in}}$ (kg/s)
1	0.02	0.24
2	0.02	0.30
3	0.02	0.37
4	0.02	0.48

همان‌طور که اشاره شد، در مسیر عبور هوا در لوله شعله تعدادی سوراخ به‌نحوی تعبیه شده است که بخشی از هوا قبل از رسیدن به چرخاننده‌ها به‌طور مستقیم وارد محفظه می‌شود. بنابراین، بایستی درصد هوای ورودی به هر سوراخ محاسبه شود که براساس آن بتوان دبی جرمی ورودی به نازل و در نتیجه نسبت هم‌ارزی سوخت و هوا را محاسبه کرد. با توجه به شکل ۶، تمام هوای ورودی از مقطع عرضی Z/D برابر با ۲/۶ وارد لوله شعله می‌شود. سپس، بخشی از هوا از طریق سوراخ‌های اول وارد محفظه احتراق شده و مابقی آن از مقطع عرضی Z/D برابر با ۱/۸ عبور می‌کند. در ادامه، هوا به سوراخ‌های مربوط به ناحیه ثانویه می‌رسد و دوباره مقدار قابل‌توجهی از آن وارد محفظه می‌شود. با عبور از مقطع عرضی Z/D برابر با ۱ هوا به سوراخ مربوط به ناحیه اولیه می‌رسد. هوای عبوری از مقطع عرضی Z/D برابر با ۰/۷ معادل با هوایی است که به‌طور کامل در واکنش احتراقی شرکت می‌کند. بنابراین، با محاسبه دبی جرمی هوای عبوری از مقطع عرضی ۰/۷ می‌توان اندازه نسبت هم‌ارزی سوخت و هوا را محاسبه کرد. جدول ۳ مقدار دبی جرمی هوای عبوری در لوله شعله در هر مقطع را برای چهار مورد شبیه‌سازی، که در جدول ۲ مشخص شده است، نشان می‌دهد. همچنین، مقدار نسبت هم‌ارزی مربوط به هر مورد شبیه‌سازی در جدول ۳ نمایش

داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، با افزایش دبی جرمی هوای ورودی، مقدار نسبت هم‌ارزی کاهش پیدا می کند. میزان نسبت هم‌ارزی برای هر چهار مورد شبیه‌سازی کمتر از عدد یک است؛ یعنی در هر چهار مورد مخلوط سوخت و هوا رقیق از سوخت است. علت این پدیده در بخش مربوط به تحلیل جریان درون محفظه احتراق و در شکل‌های ۷ و ۸ بررسی خواهد شد، اما، به‌طور خلاصه، باید اشاره کرد که شعله در نسبت‌های هم‌ارزی بیشتر از یک در محفظه احتراق پایدار نمی‌شود. علت این پدیده عدم تشکیل جریان بازگشتی در انتهای شعله در ناحیه ثانویه است.

جدول ۳- مقدار دبی جرمی هوای عبوری در لوله شعله در مقاطع عرضی مشخص شده برحسب کیلوگرم بر ثانیه

Case	Z/D = 2.6	Z/D = 1.8	Z/D = 1	Z/D = 0.7	ϕ
1	0.24	0.21	0.08	0.04	0.72
2	0.30	0.24	0.09	0.05	0.063
3	0.37	0.31	0.11	0.07	0.43
4	0.48	0.42	0.15	0.09	0.35

همان طور که مشاهده می شود، میزان دبی جرمی هوا در عبور از لوله شعله تا رسیدن به نازل به مقدار قاب توجهی در هر مورد شبیه‌سازی کاهش پیدا می کند. با توجه به جدول ۳، می‌توان متوجه شد که در هر نسبت هم‌ارزی هوا با عبور از مقطع عرضی ۲/۶ به ۱/۸، حدود ۱۴ درصد از کل دبی جرمی آن از سوراخ‌های اول وارد محفظه احتراق می‌شود. این مقدار کم از هوا تنها برای رقیق‌سازی محصولات احتراق مورد استفاده قرار می‌گیرد. با عبور از سوراخ‌های ثانویه و رسیدن به مقطع عرضی ۱، حدود ۵۵ درصد دیگر از دبی جرمی هوا وارد محفظه احتراق می‌شود تا به پایداری شعله کمک کند. در عبور از سوراخ اولیه و رسیدن به مقطع عرضی ۰/۷، حدود ۱۲ درصد دیگر از هوا وارد محفظه احتراق می‌شود و به تشکیل جریان برگشتی و پایداری شعله کمک می‌کند. بنابراین، حدود ۸۱ درصد کل هوای ورودی به لوله شعله، قبل از رسیدن به نازل، وارد محفظه احتراق می‌شود. برای درک بهتر، این پدیده در شکل ۶ نمایش داده شده است.

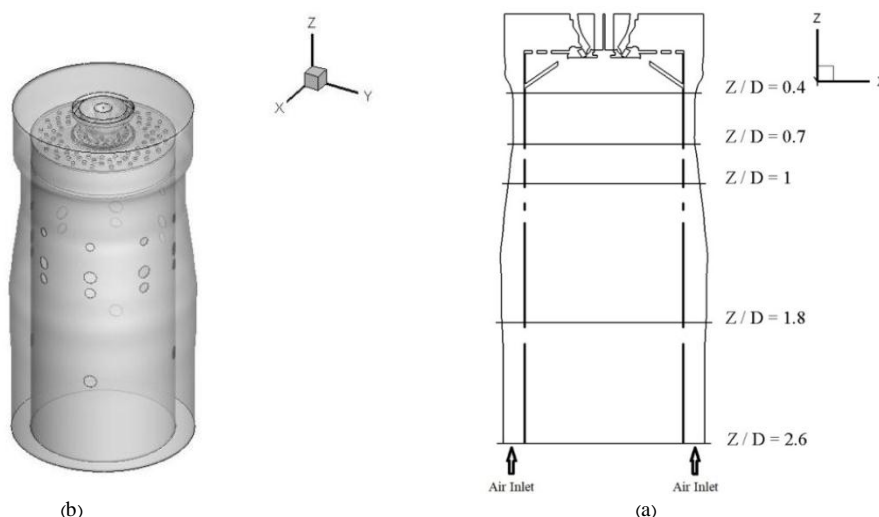


Figure 6- a) The percentage of air entering the chamber at each cross section, b) Combustion chamber geometry
شکل ۶- الف) نمایش میزان درصد هوای ورودی به محفظه در هر سطح مقطع و ب) هندسه محفظه احتراق

تحلیل خطوط جریان در هر سطح مقطع

با رسم خطوط جریان درون محفظه احتراق می‌توان به ساختار کلی شعله پی برد. برای این منظور، خطوط جریان در راستای سطح مقطع محوری برای دو مورد شبیه‌سازی با مقدار هم‌ارزی ۰/۷۲ و ۰/۳۵ در شکل ۷ نمایش داده شده است. با توجه به

شکل، می‌توان متوجه شد که جریان‌های برگشتی شکل‌گرفته در ابتدا محفظه نقش مؤثری در پایداری شعله ایفا می‌کنند. در مقطع عرضی Z/D برابر با $0/4$ در دو طرف دیواره محفظه احتراق، دو جریان برگشتی به‌علت عبور هوا از درون چرخاننده‌ها ایجاد شده است. در واقع، این دو جریان برگشتی پایداری شعله در عرض محفظه احتراق را تضمین می‌کنند. مرز شعله نیز از مرز این دو جریان برگشتی قابل‌تفکیک است. در نتیجه، نقش چرخاننده‌ها در پایداری عرضی شعله اجتناب‌ناپذیر است. از طرف دیگر، در مقطع عرضی Z/D برابر با $0/7$ می‌توان مشاهده کرد که هوا با ورود از سوراخ‌های اولیه باعث ایجاد دو جریان بازگشتی دیگر در انتها شعله شده و پایداری محوری آن را تضمین کرده است. نکته‌ای که وجود دارد این است که با کاهش نسبت هم‌ارزی (افزایش دبی جرمی هوای ورودی)، شدت جریان‌های برگشتی افزایش پیدا کرده است. این مطلب را می‌توان با مطالعه شدت گردابه در بخش بعد بررسی کرد. با در نظر گرفتن سطح مقطع عرضی Z/D برابر با 1 می‌توان مشاهده کرد که هوا با ورود از طریق سوراخ‌های ثانویه باعث ایجاد یک سری جریان بازگشتی دقیقاً چسبیده به انتهای شعله شده است. این جریان‌های بازگشتی مانند یک ترمز عمل می‌کنند و مانع از فرار شعله و خاموش شدن آن می‌شوند. دوباره با کاهش نسبت هم‌ارزی شدت این جریان‌های بازگشتی افزایش پیدا می‌کند.

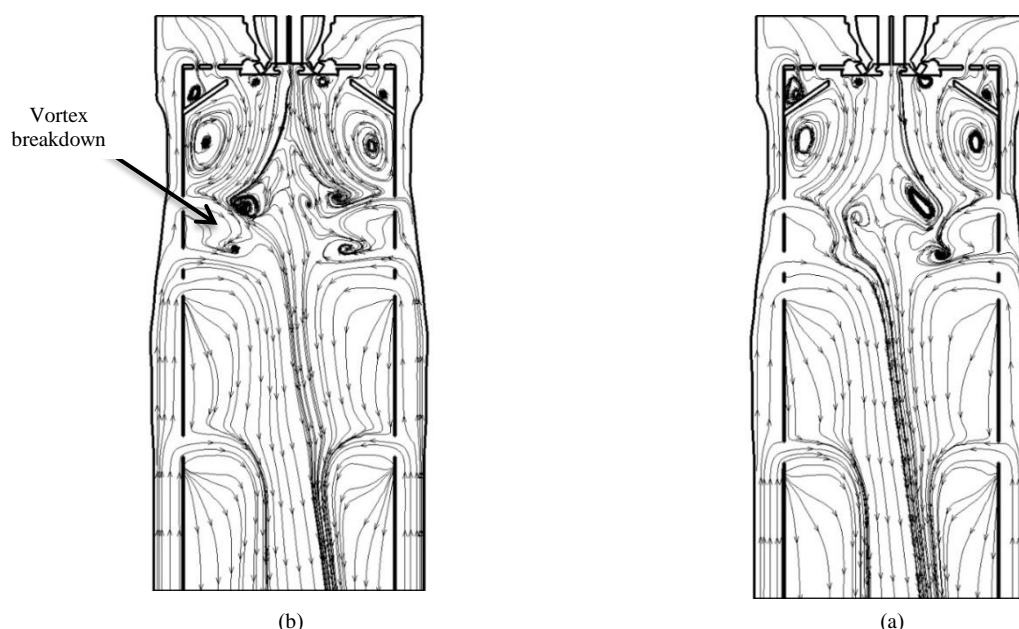


Figure 7- Streamlines inside the combustion chamber along the axial cross section, a) equivalence ratio 0.72 b) equivalence ratio 0.35
 شکل ۷- خطوط جریان درون محفظه احتراق در راستای سطح مقطع محوری، الف) نسبت هم‌ارزی $0/72$ و ب) نسبت هم‌ارزی $0/35$

برای درک بهتر، خطوط جریان در یک سطح مقطع محوری با شبیه‌سازی نسبت هم‌ارزی برابر با $1/14$ در شکل ۸ نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۸، در نسبت‌های هم‌ارزی بالاتر از 1 ، به‌علت کم‌بودن دبی جرمی هوا و کاهش تکانه، جریان بازگشتی ثانویه زیر شعله شکل نمی‌گیرد و در نتیجه شعله ناپایدار می‌شود. به همین علت، تمام شبیه‌سازی‌ها در نسبت‌های هم‌ارزی کمتر از 1 انجام شده است.

شکل ۹ برای شبیه‌سازی با نسبت هم‌ارزی $0/46$ نمایش داده شده است. با توجه به شکل، می‌توان متوجه شد که جریان سوخت و هوا با عبور از چرخاننده‌ها از همان ابتدای محفظه تا انتهای آن چرخشی است، اما شدت گردابه در هر سطح بسته به میزان هوای ورودی از سوراخ‌های اولیه و ثانویه متغیر است.

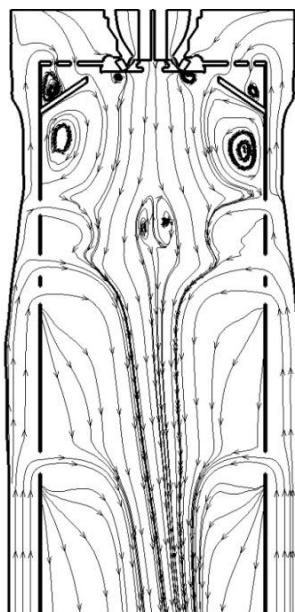


Figure 8- Streamlines inside the combustion chamber along the axial cross section for the equivalence ratio equal to 1.14
 شکل ۸ - خطوط جریان درون محفظه احتراق در راستای سطح مقطع محوری برای نسبت هم‌ارزی معادل با ۱/۱۴

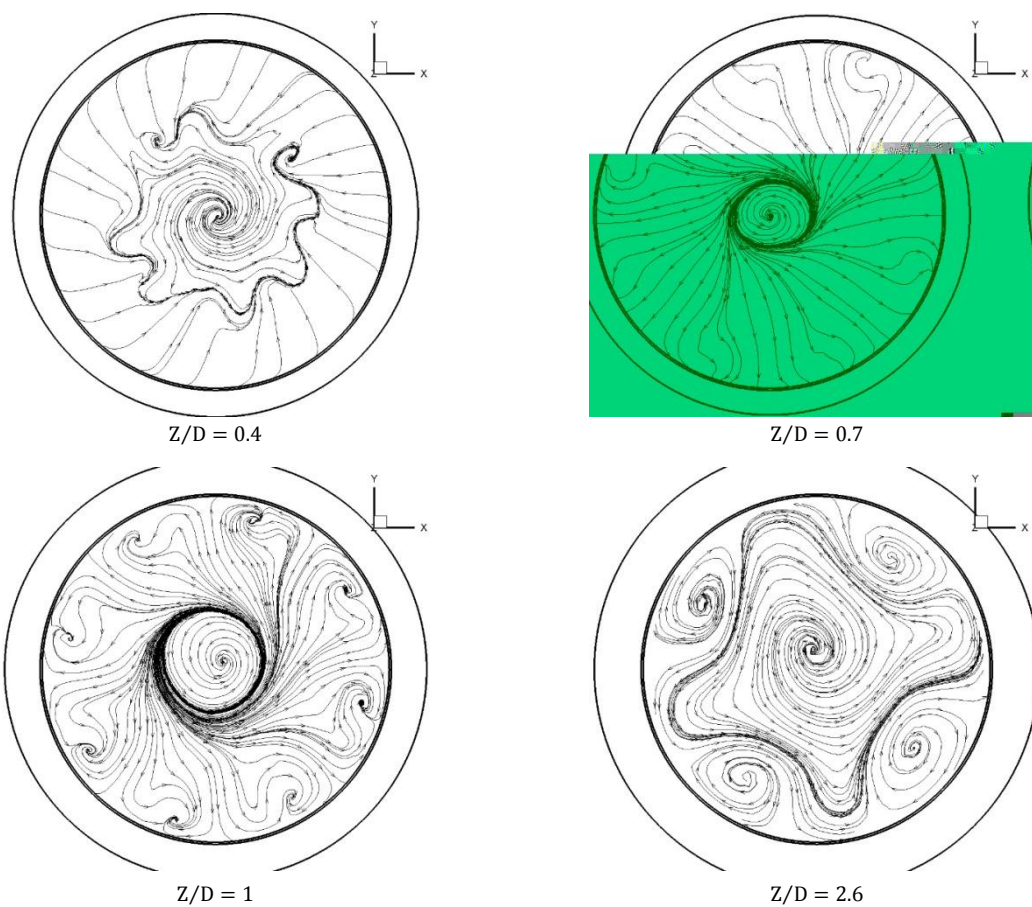


Figure 9- Flow lines in cross-sectional area for simulation with equivalence ratio equal to 0.46
 شکل ۹ - نمایش خطوط جریان در سطح مقطع‌های عرضی با نسبت هم‌ارزی معادل با ۰/۴۶

شکل ۱۰ کانتور شدت گردابه ($1/S$) در سطح مقطع محوری محفظه را نشان می‌دهد. مطابق شکل، می‌توان متوجه شد که در مکان‌هایی که جریان بازگشتی تشکیل شده، شدت گردابه بیشتر است. با توجه به کانتور، شدت گردابه در دهانه ورودی سوخت و هوا، که به شکل پیچشی وارد محفظه می‌شوند، بیشینه است. همچنین، شدت گردابه هوا در ورود به محفظه از طریق سوراخ‌های اولیه و ثانویه افزایش پیدا کرده است.

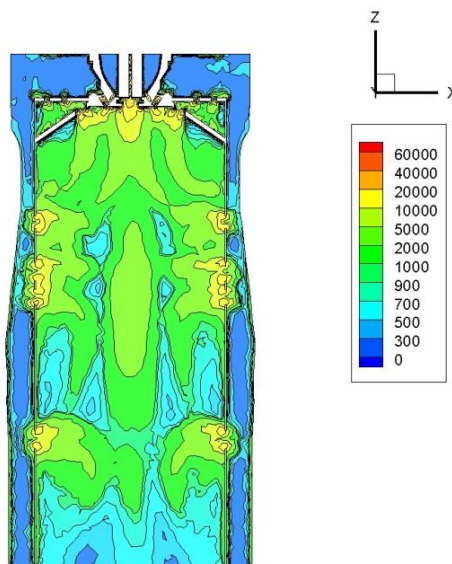


Figure 10- Vorticity magnitude ($1/S$) contour on an axial cross section of the combustion chamber at equivalence ratio equal to 0.35
شکل ۱۰- کانتور شدت گردابه ($1/S$) در یک سطح مقطع محوری از محفظه احتراق در نسبت هم‌ارزی معادل با 0.35

برای درک بهتر، لازم است که نمودار گردابه در هر سطح مقطع عرضی بر روی قطر آن رسم شود. با توجه به نمودار شکل ۱۱، شدت گردابه بر روی قطر روی سطح مقطع Z/D برابر با 0.4 دارای سه بیشینه است. بیشینه وسط مربوط به جریان پیچشی ناشی از ورود سوخت و اکسید در مرکز استوانه است و دو تقعر دیگر مربوط به جریان‌های پیچشی تشکیل شده در اطراف شعله‌اند.

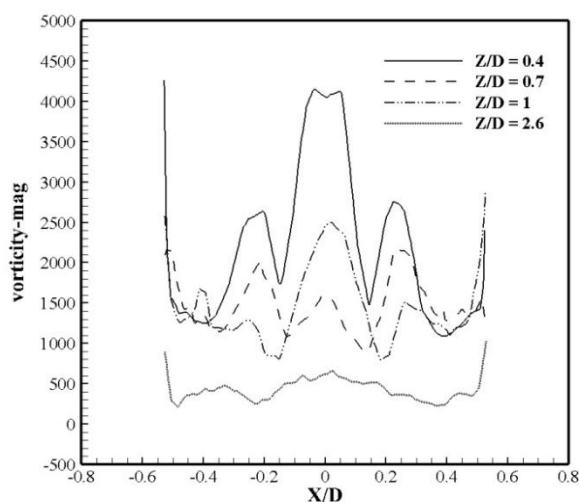


Figure 11- Graph of magnitude ($1/S$) the vortex on the diameter of several cross sections in the equivalence ratio equal to 0.35
شکل ۱۱- نمودار تغییرات شدت گردابه ($1/S$) بر روی قطر چند مقطع عرضی در نسبت هم‌ارزی معادل با 0.35

با عبور از سطح مقطع ۰/۴ به ۰/۷ به علت اتلاف انرژی از شدت گردابه کاسته می‌شود. اما، در سطح مقطع Z/D برابر با ۱، به علت ورود هوا از سوراخ‌های ثانویه، به انرژی گردابه افزوده شده و بیشینه آن در مرکز استوانه افزایش پیدا می‌کند. در انتهای محفظه در مقطع خروجی Z/D برابر با ۲/۶ با افزایش میزان اتلاف انرژی، شدت گردابه به طرز قابل توجهی کاهش می‌یابد. مقایسه تغییر شدت گردابه در رژیم‌های مختلف با نسبت‌های هم‌ارزی متفاوت می‌تواند مفید باشد. شکل ۱۲ نمودار تغییرات اندازه گردابه بر روی قطر سطح مقطع عرضی Z/D برابر با ۱ را در سه نسبت هم‌ارزی متفاوت نشان می‌دهد. با توجه به شکل، می‌توان مشاهده کرد که افزایش دبی جرمی هوا که منجر به کاهش نسبت هم‌ارزی می‌شود، باعث تقویت و افزایش گردابه شده و شدت جریان‌های بازگشتی را افزایش می‌دهد. این مسئله خود به پایداری بیشتر شعله کمک می‌کند.

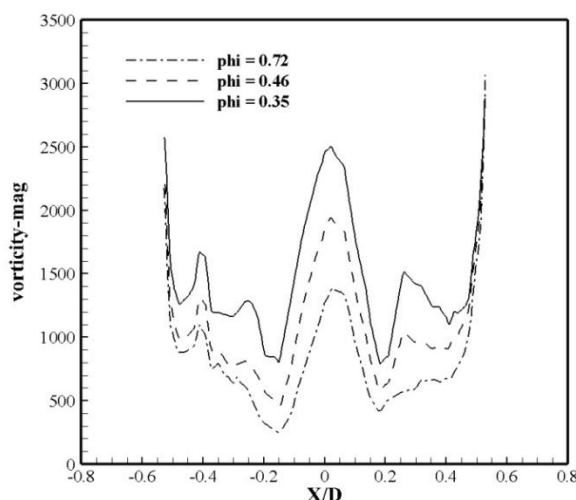


Figure 12- Comparison of the vortex magnitude (1/S) on the cross-sectional diameter of Z/D equal to one in three different equivalence ratios

شکل ۱۲ - مقایسه تغییر شدت گردابه (1/S) بر روی قطر سطح مقطع Z/D برابر با یک در سه نسبت هم‌ارزی متفاوت

از طرف دیگر، همان‌طور که مشاهده شد، شدت گردابه در طول استوانه در هر سطح مقطع کاهش پیدا می‌کند. برای درک بهتر این موضوع، می‌توان نمودار شدت گردابه را در طول مرکز استوانه رسم کرد. این مطلب برای سه نسبت هم‌ارزی متفاوت در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. مطابق شکل به دو نکته می‌توان پی‌برد. در ابتدا، می‌توان متوجه شد که در هر نسبت هم‌ارزی، شدت گردابه در ورودی محفظه احتراق به علت پیچشی بودن جریان ورودی به مقدار قابل توجهی زیاد است. سپس، این شدت گردابه مطابق انتظار از نتایج مربوط به سطح مقطع‌های عرضی، در طول محور استوانه کاهش پیدا می‌کند، اما دوباره، به علت ورود جریان هوا از سوراخ‌های اولیه، شدت گردابه افزایش می‌یابد و دوباره روند نزولی خود را تا دهانه خروجی افزایش می‌دهد. همچنین، نتیجه دیگری که از شکل حاضر می‌توان گرفت، این است که افزایش شدت گردابه با کاهش نسبت هم‌ارزی همراه است. به همین علت، جریان با نسبت هم‌ارزی کمتر دارای جریان‌های بازگشتی قوی‌تری نسبت به جریان با نسبت هم‌ارزی بیشتر است.

شکل ۱۴ در راستای بررسی فیزیک جریان درون محفظه، برای تکمیل شناخت روند ترکیب سوخت و اکسید درون محفظه، تغییرات مؤلفه‌های سرعت شعاعی از ابتدا تا انتهای استوانه را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن یک نسبت هم‌ارزی ثابت، پروفیل سرعت شعاعی در ابتدای محفظه در سطح مقطع Z/D برابر با ۰/۷، به علت وجود دو جریان بازگشتی در اطراف شعله، دارای دو مقدار بیشینه است. در مرکز استوانه مقدار شعاعی کمینه است. با عبور از سطح مقطع ۰/۷ به سمت ۱، مشاهده می‌شود که پروفیل سرعت مشابه پروفیل آن در سطح مقطع قبلی است، با این تفاوت که اندازه آن به علت تلفات انرژی در راستای طول محفظه کاهش پیدا کرده است.

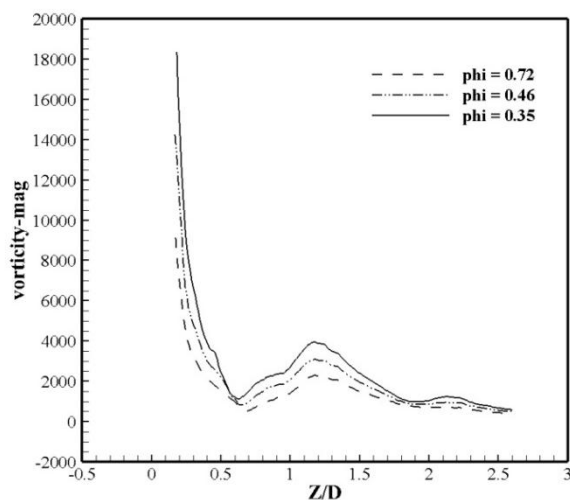


Figure 13- Graph of changes in the size of the vortex at the center of the length of the cylinder at different equivalence ratios
 شکل ۱۳- نمودار تغییرات شدت گردابه (1/S) در مرکز طول استوانه در نسبت هم‌آزایی‌های مختلف

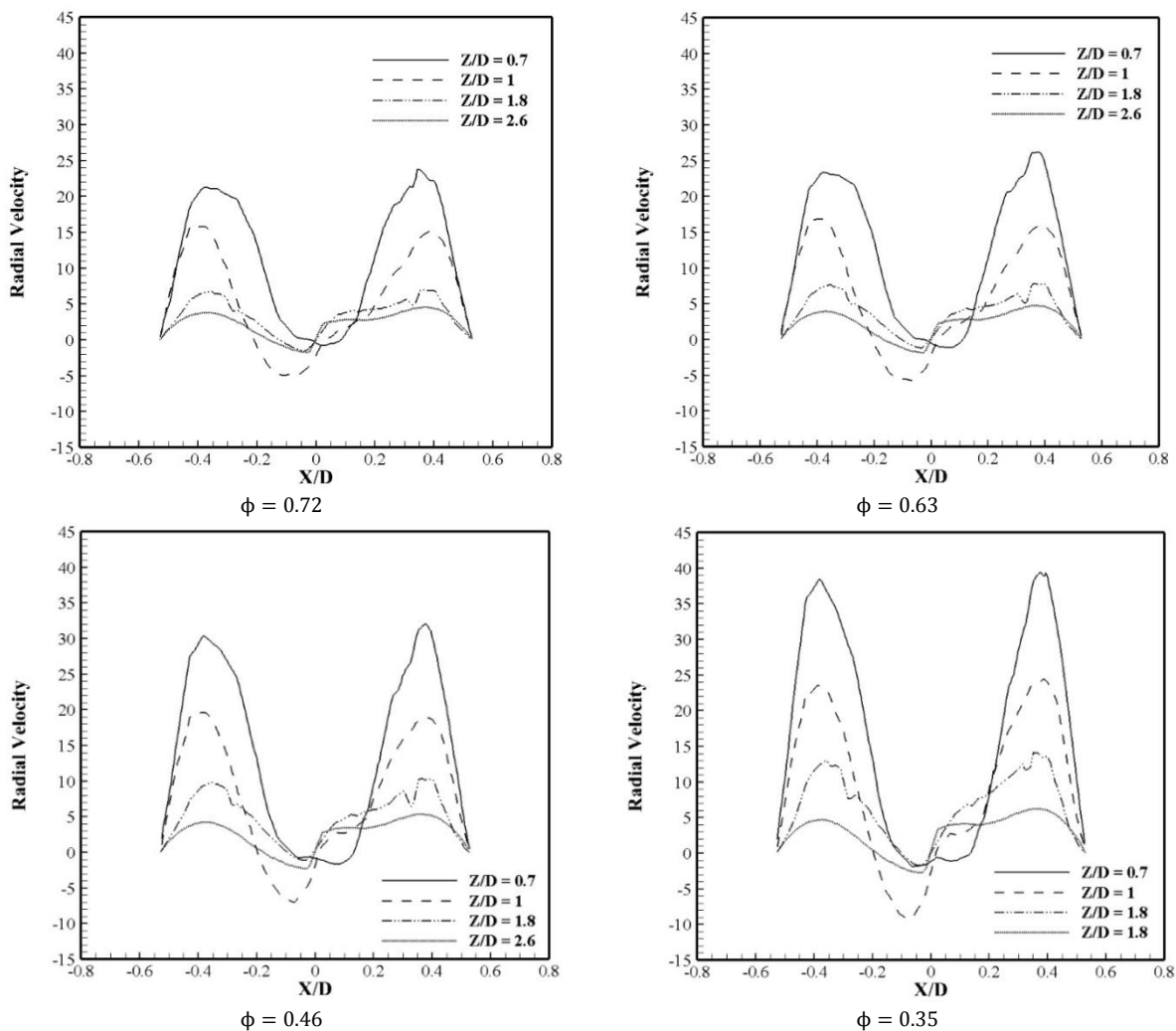


Figure 14- Graph of radial velocity change (m/s) on the diameter of four cross-sections in different equivalence ratios
 شکل ۱۴- نمودار تغییر سرعت شعاعی (بر حسب متر بر ثانیه) بر روی قطر چهار سطح مقطع عرضی در نسبت هم‌آزایی‌های متفاوت

در ادامه، با عبور جریان به سمت خروجی محفظه، می‌توان مشاهده کرد که پروفیل سرعت شعاعی تا حدودی تخت می‌شود و اندازه آن کاهش می‌یابد. این نتیجه نشان می‌دهد که قدرت جریان‌های پیچشی در انتهای محفظه کاهش یافته است. نکته قابل توجه دیگر افزایش اندازه سرعت شعاعی با کاهش نسبت هم‌ارزی است. با توجه به شکل می‌توان مشاهده کرد که افزایش دبی جرمی هوا منجر به افزایش اندازه سرعت شعاعی در هر مقطع از محفظه می‌شود، اما در تمامی نسبت‌های هم‌ارزی پروفیل سرعت در مقطع خروجی به‌طور تقریبی یکسان و مشابه است. این مسئله نشان می‌دهد که فارغ از دبی جرمی ورودی، جریان سیال در انتهای محفظه در نهایت انرژی خود را از دست می‌دهد و پروفیل سرعت به سمت تخت شدن میل می‌کند. شکل ۱۵، نمودار پروفیل سرعت مماسی بر روی قطر چهار سطح مقطع عرضی در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف را نشان می‌دهد. مطابق شکل در یک نسبت هم‌ارزی ثابت می‌توان مشاهده کرده اندازه و پروفیل سرعت شعاعی در تمامی مقاطع به جز سطح مقطع عرضی Z/D برابر با ۱ به‌طور تقریبی یکسان و مشابه است. اما اندازه سرعت شعاعی در سطح مقطع عرضی Z/D برابر با ۱ به‌طور محسوسی افزایش پیدا کرده است.

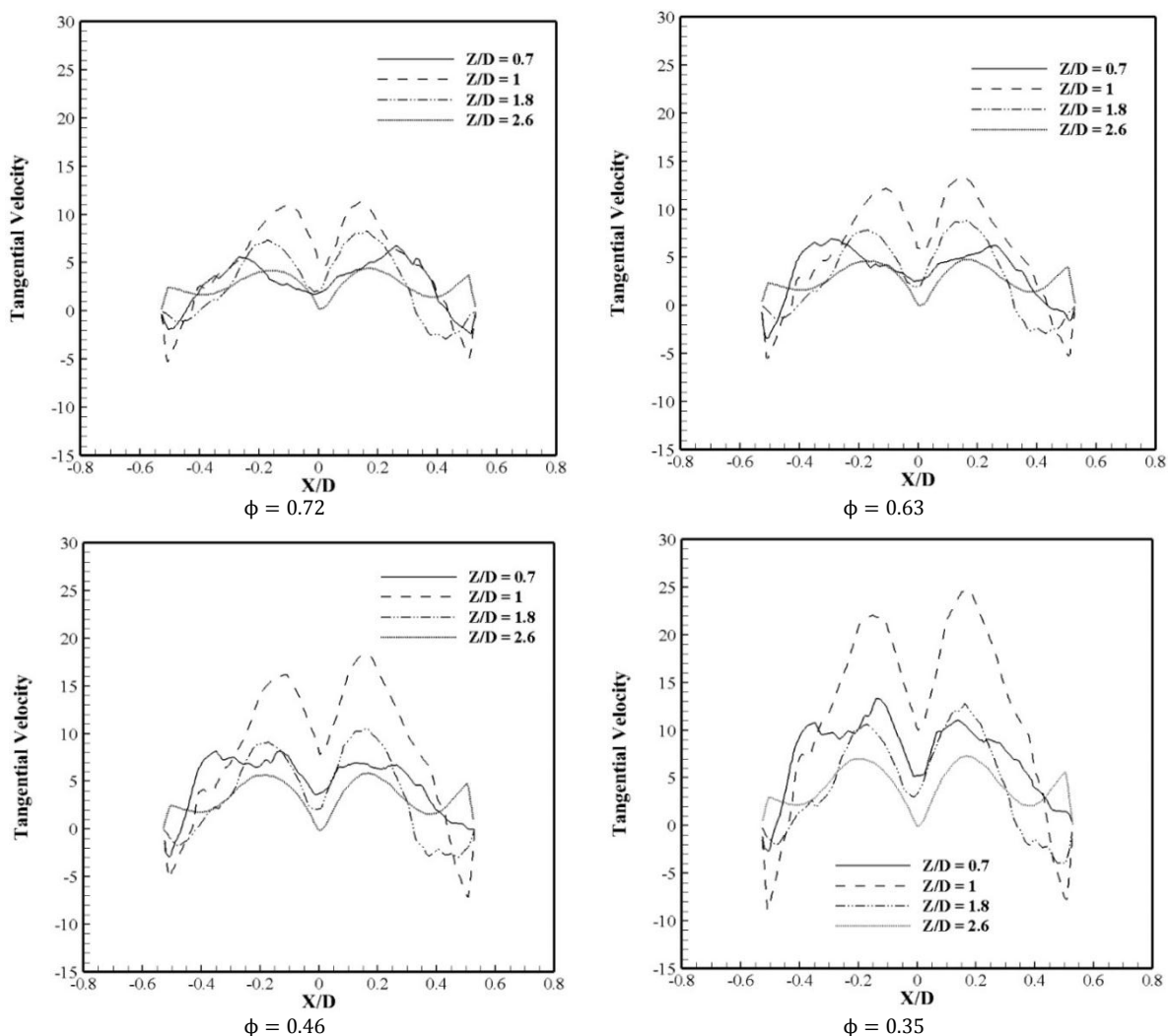


Figure 15- Diagram of tangential velocity change (m/s) on the diameter of four transverse cross-sections at different equivalence ratios

شکل ۱۵- نمودار تغییر سرعت مماسی (برحسب متر بر ثانیه) بر روی قطر چهار سطح مقطع عرضی در نسبت هم‌ارزی‌های متفاوت

همان‌طور که ذکر شد، سطح مقطع عرضی ۱ محل ورود هوا از سوراخ‌های ثانویه را نشان می‌دهد. از طرف دیگر در بخش‌های قبل اثبات شد که بیشترین درصد هوا ورودی به محفظه مربوط به عبور آن از درون سوراخ‌های ثانویه است. در نتیجه تکانه هوای ورودی برای ایجاد یک جریان عرضی درون محفظه افزایش پیدا می‌کند و منجر به افزایش اندازه سرعت شعاعی در سطح مقطع عرضی Z/D برابر با ۱ می‌شود. نکته قابل توجه دیگر متقارن شدن پروفیل سرعت مماسی و حفظ تقارن آن تا خروجی محفظه است. حال اگر به اثر کاهش نسبت هم‌ارزی توجه شود می‌توان مشاهده کرد که با افزایش دبی جرمی هوای ورودی به محفظه، اندازه سرعت شعاعی، علی‌الخصوص در مقطع عرضی Z/D برابر با ۱، افزایش پیدا می‌کند. علت آن نیز همان‌طور که ذکر شد به دلیل افزایش تکانه عرضی جریان ورودی از سوراخ‌های اولیه و ثانویه است. پروفیل سرعت شعاعی در مقطع خروجی محفظه نیز به سمت تخت شدن میل پیدا می‌کند.

تغییر سرعت محوری در طول محفظه و تفسیر طول شعله با توجه به آن

شکل ۱۶ نمودار تغییرات سرعت محوری در طول محفظه برای چند نسبت هم‌ارزی را نشان می‌دهد. مطابق شکل، سرعت محوری جریان در ابتدا محفظه، جایی که سوخت و هوا باهم ترکیب می‌شوند، افزایش می‌یابد تا به بیشینه مقدار خود برسد. سپس، به علت ایجاد جریان‌های بازگشتی ایجادشده درون خود شعله و زیر شعله که ناشی از ورود هوا از سوراخ‌های ثانویه است، سرعت محوری شروع به کاهش یافتن می‌کند تا جایی که بعد از توقف کامل، حتی اندازه آن نیز ممکن است منفی شود. این نشان می‌دهد که بخشی از جریان در انتهای شعله بازگشتی شده است. در واقع، طول شعله را می‌توان از روی مکانی که سرعت محوری در آن به کمینه مقدار خود رسیده و منفی شده است مشخص کرد. مطابق شکل، طول شعله بسته به مقدار نسبت هم‌ارزی جریان بین سطح مقطع عرضی Z/D برابر با $0/4$ و $0/7$ قرار گرفته است. همچنین، می‌توان مشاهده کرد که کاهش نسبت هم‌ارزی منجر به کاهش طول شعله شده است.

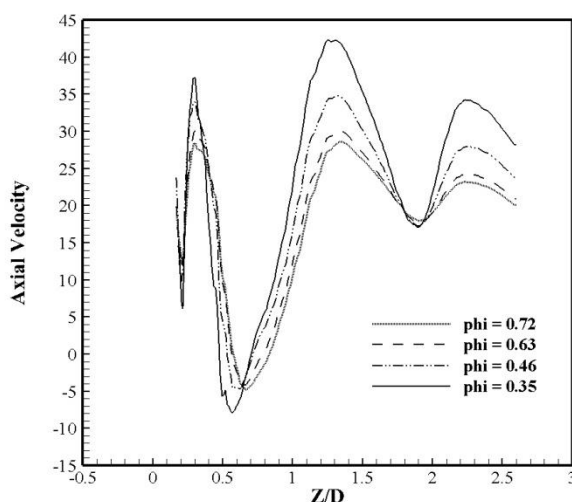


Figure 16- Diagram of axial velocity changes (m/s) along the center of the chamber for several different equivalence ratios
شکل ۱۶- نمودار تغییرات سرعت محوری (بر حسب متر بر ثانیه) در طول مرکز محفظه برای چند نسبت هم‌ارزی مختلف

دمای شعله

شکل ۱۷ کانتور توزیع دما در سطح مقطع محوری از استوانه در چهار نسبت هم‌ارزی مختلف را نمایش می‌دهد. با در نظر گرفتن یک نسبت هم‌ارزی ثابت، می‌توان متوجه شد که دمای سیال در محل شکل‌گیری شعله زیاد می‌شود. اما با توجه به کانتورها، می‌توان متوجه شد که تا قبل از ورود هوا از طریق سوراخ‌های ثانویه به محفظه (در مقطع عرضی Z/D برابر با $0/7$) دمای گاز

اطراف شعله و در نتیجه دمای دیوار محفظه احتراق بسیار بالا رفته است. همچنین، به علت کوتاه شدن طول شعله، که خود یک مزیت محسوب می شود، خود شعله به نازل ورودی سوخت و هوا نزدیک شده و باعث بالا رفتن دمای دیوار آن شده است که این خود یکی از محدودیتهای شعله های پیچشی است. با وارد شدن هوا از طریق سوراخ های ثانویه به محفظه، می توان مشاهده کرد که دمای گاز درون محفظه به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا کرده و در نتیجه موجب کاهش دمای دیواره محفظه شده است.

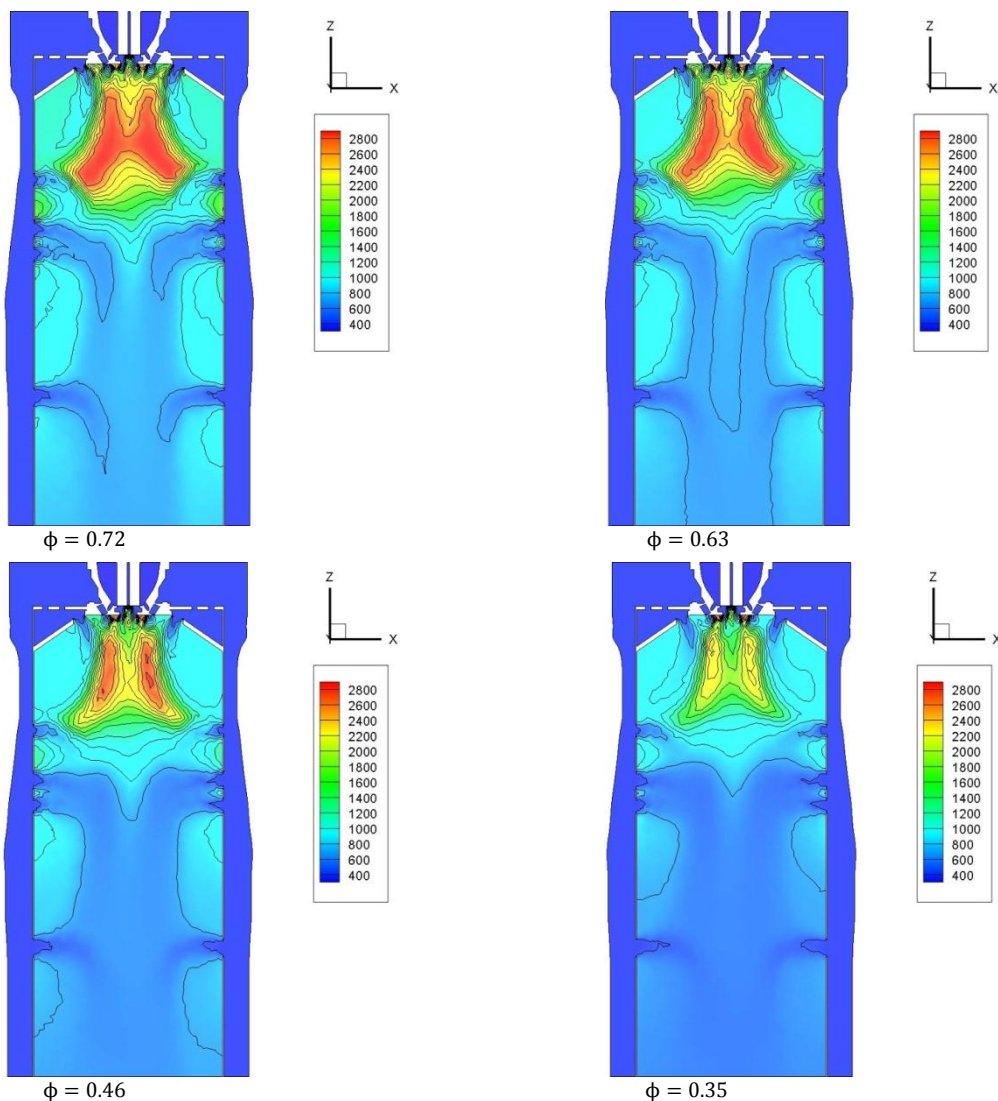


Figure 17- Contour of the temperature (Kelvin) distribution at the axial cross section of the chamber in four different equivalence ratios

شکل ۱۷- کانتور توزیع دما (کلوین) در سطح مقطع محوری محفظه در چهار نسبت هم‌ارزی مختلف

نکته دیگر که می توان متوجه شد، کاهش بیشینه دمای شعله با افزایش دبی جرمی هوای ورودی یا به عبارت دیگر کاهش نسبت هم‌ارزی است. در واقع، کاهش دمای شعله با کاهش نسبت هم‌ارزی می تواند نقش بسیار مؤثری در خنک کاری دیواره محفظه هم در قسمت نازل و هم در سطح استوانه داشته باشد. اما، این کاهش دما منجر به کاهش دمای گازهای خروجی از استوانه می شود که این مسئله خود می تواند باعث کاهش بازده کار توربین گاز شود. بنابراین، با توجه به کاربرد محفظه احتراق و همچنین حد تحمل دمای سازه محفظه و پره های توربین بایستی یک انتخاب مناسب در تعیین نسبت هم‌ارزی داشت.

حال، برای درک بهتر از بحث قبل، جا دارد که توزیع دمای سیال در مرکز طول استوانه را برای هر چهار نسبت هم‌ارزی رسم کرد. این مورد در شکل ۱۸ نمایش داده شده است. با توجه به شکل، می‌توان متوجه شد که از همان ابتدای ورود سوخت و هوا به محفظه با تشکیل شعله دمای سیال افزایش پیدا می‌کند. بیشینه دمای شعله بسته به مقدار نسبت هم‌ارزی، در مکانی بین Z/D برابر با ۰/۵ تا ۰/۷ رخ می‌دهد. سپس، دمای سیال در هنگام خارج شدن از شعله شروع به کاهش یافتن می‌کند تا جایی که بعد از ورود هوا از تمامی سوراخ‌ها شیب کم شدن دما به شدت کاهش می‌یابد و به‌طور تقریبی ثابت می‌شود. همان‌طور که ذکر شد، کاهش نسبت هم‌ارزی موجب کاهش دما در هر مقطع از محفظه می‌شود.

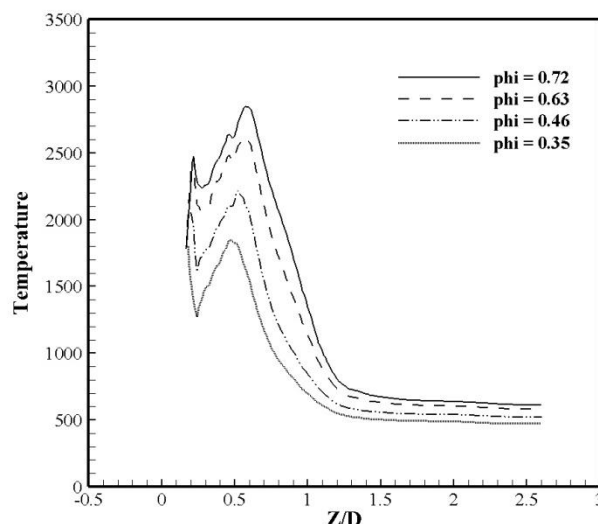


Figure 18- Fluid temperature changes (Kelvin) at the center of the chamber length in four different equivalence ratios

شکل ۱۸- تغییرات دمای سیال (برحسب کلوین) در مرکز طول محفظه در چهار نسبت هم‌ارزی مختلف

در نهایت، رسم پروفیل دما در چند سطح مقطع عرضی از استوانه می‌تواند اطلاعات مفیدی در اختیار قرار دهد. بدین منظور، شکل ۱۹ پروفیل دمای گاز را بر روی قطر پنج سطح مقطع عرضی از محفظه در چهار نسبت هم‌ارزی مختلف نشان می‌دهد. مطابق شکل، با در نظر گرفتن یک نسبت هم‌ارزی ثابت می‌توان مشاهده کرد که در سطح مقطع عرضی Z/D برابر با ۰/۴ دمای شعله فقط بین مکان X/D برابر با ۰/۳- و ۰/۳+ بیشینه می‌شود و دمای اطراف دیواره هنوز به اندازه بیشینه مقدار دمای شعله بالا نرفته است. توجه شود که در ناحیه تشکیل شعله، دیواره تنها از طریق عبور هوا از کانال لوله شعله به شکل هدایتی خنک می‌شود. بنابراین، انتظار می‌رود که دمای دیواره تا نزدیک حد تحمل سازه آن افزایش پیدا کند. در سطح مقطع Z/D برابر با ۰/۷، گاز ناشی از احتراق با نفوذ عرضی به محیط اطراف پخش می‌شود و باعث افزایش تدریجی دما در ناحیه X/D برابر با ۰/۳ و ۰/۶ (و همچنین ۰/۳- و ۰/۶-) می‌شود. در سطح مقطع عرضی Z/D برابر با ۱، محصولات احتراق از شعله خارج شده و با جریان هوای ورودی به محفظه از طریق سوراخ‌های ثانویه ترکیب شده‌اند. بنابراین، دمای گاز به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. اما، نکته مورد توجه این است که در مقطع ذکر شده، دمای گاز در اطراف دیواره همچنان بالاتر از مرکز استوانه است و در این مقطع هوای ورودی به محفظه همچنان فرصت خنک کردن دمای اطراف دیواره را پیدا نکرده است. همان‌طور که از پروفیل دما در دو مقطع Z/D برابر با ۱/۸ و ۲/۶ پیداست، دمای گاز در عبور از طول استوانه به اندازه کافی کاهش پیدا کرده و پروفیل آن تخت شده است. حتی، قبل از رسیدن به اولین سوراخ‌های دیواره در مقطع Z/D برابر با ۱/۸، پروفیل دما ثابت شده و سوراخ‌های ذکر شده دیگر تأثیری در خنک‌کاری گاز ندارند. تأثیر کاهش نسبت هم‌ارزی بر کاهش دما در هر سطح مقطع نیز مشخص است. اما، نکته مهم کاهش قابل توجه دما در سطح مقطع عرضی Z/D برابر با ۰/۷ در رژیم‌های با نسبت هم‌ارزی کمتر است. با

توجه به این مقطع، می‌توان مشاهده کرد که با کاهش نسبت هم‌ارزی، ناحیه دما بالای شعله به مقدار قابل توجهی کوتاه‌تر و محدودتر شده است. علت این پدیده در نفوذ بیشتر جریان‌های بازگشتی به درون شعله و در نتیجه کاهش محدوده دمای بالای آن در محفظه است.

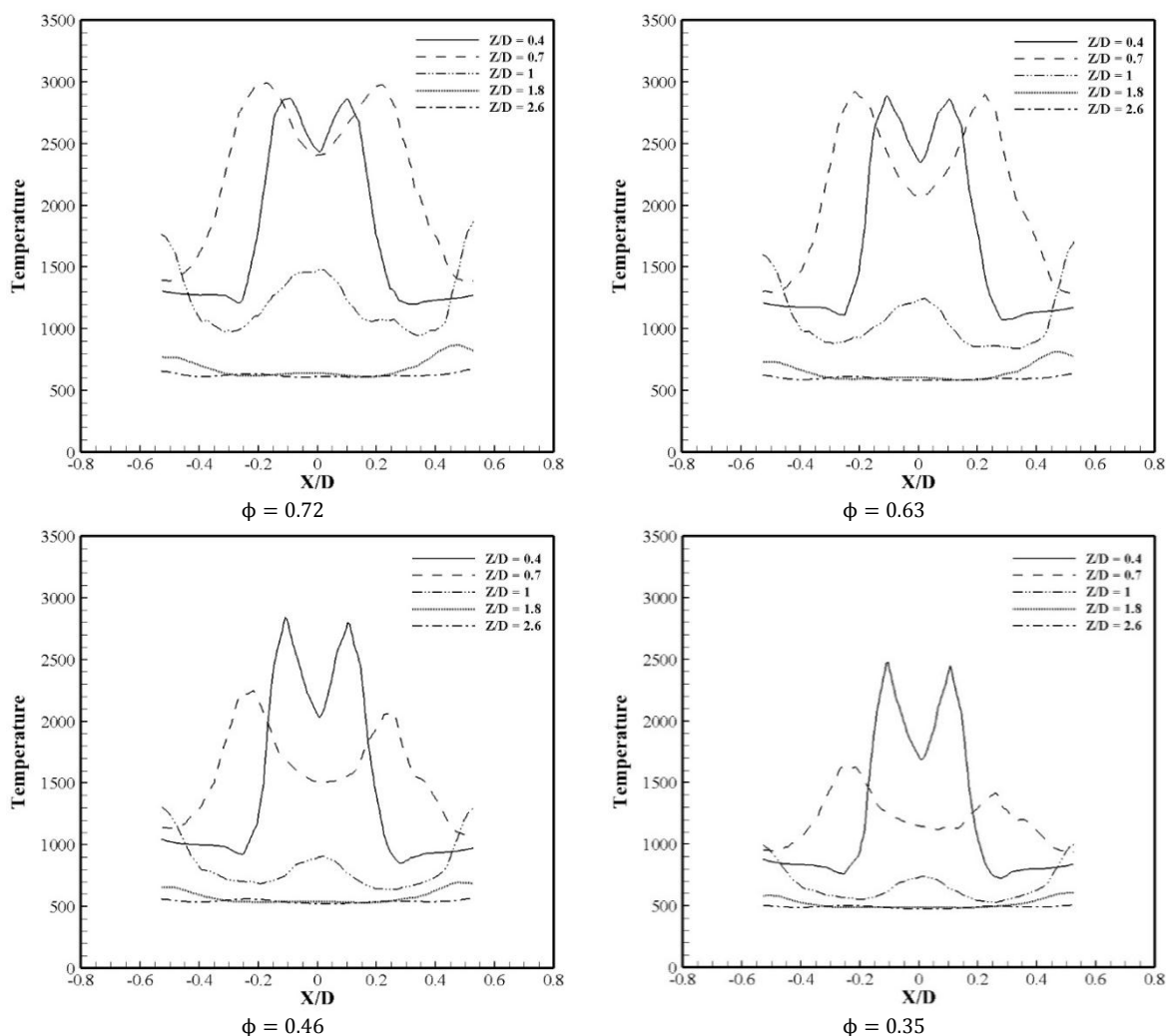


Figure 19- Temperature changes (Kelvin) on the diameter of five cross-sections of the chamber in four different equivalence ratios

شکل ۱۹- تغییرات دما (برحسب کلوین) بر روی قطر پنج سطح مقطع عرضی از محفظه در چهار نسبت هم‌ارزی مختلف

عدد ماخ

اهمیت اندازه‌گیری عدد ماخ برای کنترل کردن فرض تراکم‌ناپذیری سیال در فرایند شبیه‌سازی عددی است. همان‌طور که می‌دانید، یکی از تقریب‌های تجربی برای مشخص کردن تراکم‌ناپذیری جریان کمتر شدن عدد ماخ از مقدار 0.3 است. بنابراین، با رسم کانتور عدد ماخ در طول محفظه در یک سطح مقطع محوری، می‌توان از کوچک بودن عدد ماخ و در نتیجه تراکم‌ناپذیری جریان اطمینان حاصل کرد. کانتور مورد نظر در شکل ۲۰ برای نسبت هم‌ارزی 0.35 ، که بیشترین سرعت ورودی هوا را دارد، نشان داده شده است. مطابق شکل، می‌توان مشاهده کرد که بیشینه عدد ماخ در سطح محفظه برابر با 0.25 و در مقطع ورودی هوا از سوراخ‌های اولیه و ثانویه است. در نتیجه، به علت پایین بودن عدد ماخ، می‌توان اطمینان پیدا کرد که فرض تراکم‌ناپذیری در جریان در روند شبیه‌سازی فرضی درست بوده است.

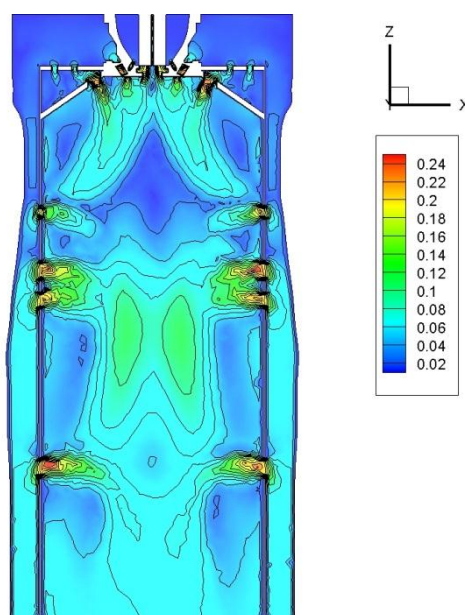


Figure 20- Contour distribution of Mach number along the combustion chamber for equivalence ratio equal to 0.35
 شکل ۲۰- کانتور توزیع عدد ماخ در طول محفظه احتراق برای نسبت هم‌ارزی معادل با ۰/۳۵

بررسی اثر نسبت هم‌ارزی بر روی توزیع NO درون محفظه

تغییرات نسبت جرمی NO در مرکز طول استوانه برای چهار نسبت هم‌ارزی مختلف در شکل ۲۱ نمایش داده شده است. با در نظر گرفتن یک نسبت هم‌ارزی ثابت، می‌توان متوجه شد که نمودار تغییرات نسبت جرمی NO بسیار مشابه به روند تغییرات دمای گاز در شکل ۱۸ است. با افزایش دما در طول استوانه در داخل شعله، مقدار تولید گونه NO نیز افزایش پیدا می‌کند. در مکانی که دمای شعله بیشینه است مقدار NO تولید شده نیز بیشینه خواهد شد. سپس، با کاهش دما میزان تولید آن نیز کاهش پیدا می‌کند. بررسی تغییرات نسبت جرمی گونه NO بر روی قطر هر سطح مقطع عرضی از محفظه می‌تواند نتایج مفیدی در اختیار قرار دهد. بدین منظور، تغییرات ذکر شده در شکل ۲۲ نمایش داده شده است.

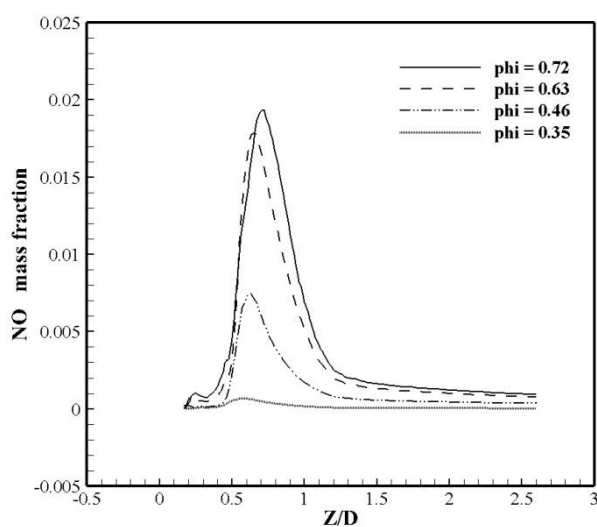


Figure 21- Changes in the mass ratio of NO in the center of the chamber length for four different equivalence ratio
 شکل ۲۱- تغییرات نسبت جرمی گونه NO در مرکز طول محفظه برای چهار نسبت هم‌ارزی مختلف

مطابق شکل، می‌توان مشاهده کرد که پروفیل تولید NO در هر سطح مقطع از محفظه شباهت بسیاری با پروفیل دما در همان سطح مقطع براساس شکل ۱۹ دارد. این مطلب دوباره اهمیت دمای سیال در تولید آلاینده احتراقی را نشان می‌دهد.

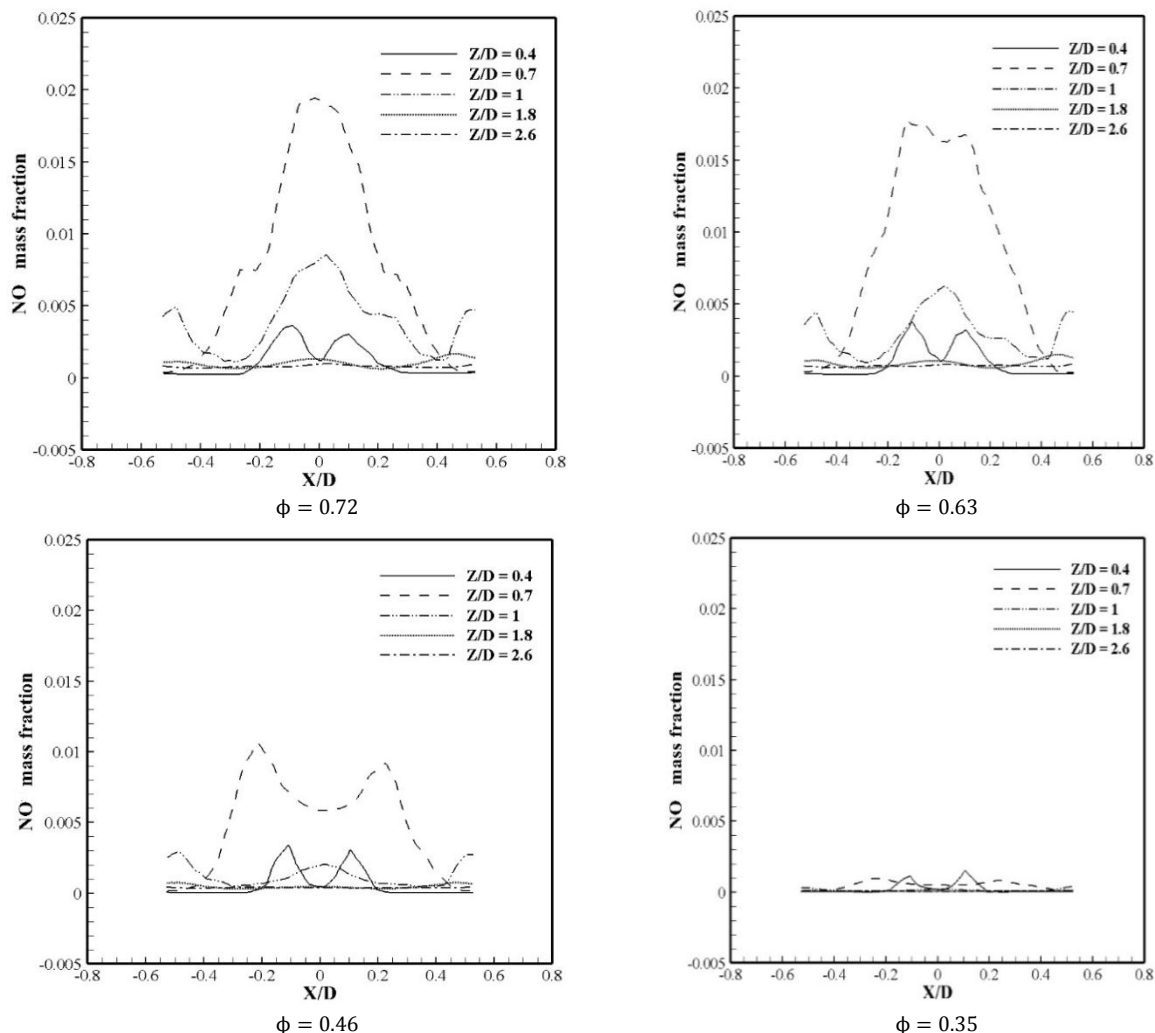


Figure 22- mass ratio of NO₂ species on the diameter of five cross-sections of the chamber in four different equivalence ratios
 شکل ۲۲- تغییرات نسبت جرمی گونه NO بر روی قطر پنج سطح مقطع عرضی از محفظه در چهار نسبت هم‌ارزی مختلف

بررسی اثر تغییر نسبت هم‌ارزی بر تغییرات چگالی جریان درون محفظه

حال بعد از بررسی فیزیک جریان درون محفظه احتراق، شکل شعله و محل قرارگیری آن می‌توان اثر تغییر نسبت هم‌ارزی را بر روی پارامترهای اثرگذار مهم نظیر چگالی جریان بررسی کرد. قبل از پرداختن به بحث اثر افزایش دبی جرمی هوای ورودی، برای درک بهتر کانتور تغییرات چگالی در سطح مقطع طولی استوانه برای نسبت هم‌ارزی ۰/۴۶ در شکل ۲۳ نمایش داده شده است. مطابق شکل، همان‌طور که مشاهده می‌شود، چگالی هوا و سوخت قبل از ترکیب شدن باهم در مجراهای ورودی خود به ترتیب برابر با ۱/۰۴ و ۰/۶۷ کیلوگرم بر متر مکعب است. بعد از عبور از چرخاننده‌ها و ورود به محفظه، در ناحیه‌ای که شعله تشکیل شده است (بین سطح مقطع عرضی Z/D برابر با ۰/۲ و ۱)، چگالی جریان سیال به‌علت تشکیل محصولات احتراق به مقدار قابل‌توجهی کاهش می‌یابد، اما با ورود جریان هوا از سوراخ اولیه و ثانویه به درون محفظه و ترکیب شدن آن با محصولات احتراق، چگالی جریان سیال در طول استوانه زیاد می‌شود.

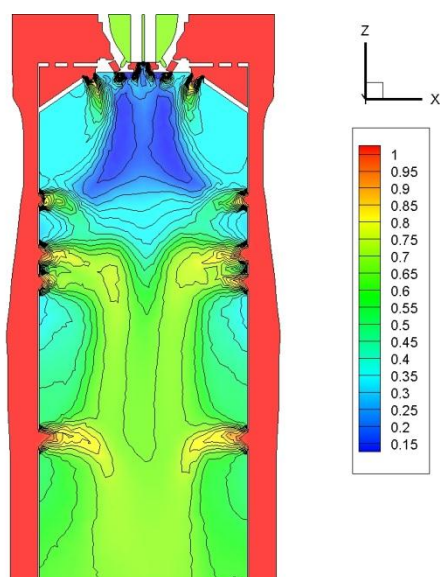


Figure 23- Density changes in a longitudinal cross section of the chamber in the equivalence ratio equal to 0.46

شکل ۲۳- تغییرات چگالی در یک سطح مقطع طولی از محفظه در نسبت هم‌ارزی معادل با ۰/۴۶

حال با توجه به کانتور تغییرات چگالی می‌توان اثر کاهش نسبت هم‌ارزی را بر روی توزیع چگالی درون محفظه احتراق مشاهده کرد. شکل ۲۴ نمودار تغییرات چگالی در مرکز طول محفظه را در چهار نسبت هم‌ارزی مختلف نشان می‌دهد. مطابق شکل، همان‌طور که ذکر شد، با در نظر گرفتن یک نسبت هم‌ارزی ثابت، چگالی سیال در محل تشکیل شعله، بین سطح مقطع ارزی Z/D برابر با ۰/۲ و ۱، کمترین مقدار خود را دارد. هوا با وارد شدن به محفظه از سوراخ اولیه در سطح مقطع عرضی ۱، با محصولات احتراق ترکیب شده و باعث افزایش چگالی جریان می‌شود. این روند تا سطح مقطع عرضی ۱/۸ ادامه می‌یابد و در این مکان دوباره هوا از طریق اولین سوراخ وارد محفظه شده و دوباره باعث افزایش چگالی جریان می‌شود، اما نکته قابل توجه افزایش چگالی جریان با کاهش نسبت هم‌ارزی است. در واقع، کاهش نسبت هم‌ارزی معادل با افزایش دبی جرمی هوای ورودی به داخل محفظه بوده و همین مسئله باعث افزایش چگالی جریان سیال می‌شود. بنابراین، مطابق انتظار کاهش نسبت هم‌ارزی تأثیر مثبت بر روی افزایش چگالی گاز درون محفظه احتراق دارد.

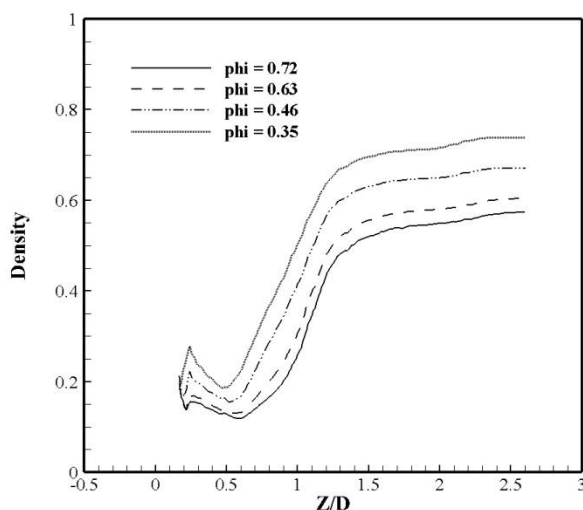


Figure 24- Density changes (kg/m^3) in the center of the chamber length in several different equivalence ratios

شکل ۲۴- تغییرات چگالی (برحسب کیلوگرم بر متر مکعب) در مرکز طول محفظه در چند نسبت هم‌ارزی مختلف

نتیجه گیری

هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر نسبت هم‌ارزی بر روی پارامترهای مختلف حاصل از احتراق در یک محفظه دوپیشی خاص بود. در این پژوهش، در ابتدا سعی شد که با تعریف مناسب شرایط مرزی و تولید شبکه با کیفیت، یک شبیه‌سازی دقیق بر روی احتراق سوخت و هوا درون یک محفظه احتراق دوپیشی انجام گیرد. در بخش نتایج، در ابتدا سعی شد که فیزیک جریان درون محفظه با دقت بررسی شود تا بتوان مطابق با آن به تحلیل نتایج مربوط به احتراق پرداخت. در محفظه احتراق مدنظر، هوا از طریق یک لوله شعله وارد می‌شود و از طریق چرخاننده‌ها وارد نازل می‌شود. در حین حرکت به سمت چرخاننده‌ها، چندین سوراخ اولیه و ثانویه به‌نحوی تعبیه شده است که بخشی از آن به‌طور مستقیم و بدون شرکت کردن در فرایند احتراق وارد محفظه می‌شود. نتایج نشان داد، که فارغ از دبی جرمی هوای ورودی، حدود ۸۱ درصد از کل هوای ورودی از تمام سوراخ‌ها وارد محفظه می‌شود که حدود ۱۴ درصد آن سهم سوراخ‌های اول، ۵۵ درصد آن سهم سوراخ‌های ثانویه و ۱۲ درصد آن سهم سوراخ اولیه است. اهمیت تعبیه سوراخ‌ها بر روی بدنه محفظه در خنک‌کاری دیوار و پایدارسازی شعله درون محفظه است. شبیه‌سازی‌ها در چهار نسبت هم‌ارزی مختلف، که تمامی آن‌ها برای فاز رقیق از سوخت‌اند، انجام گرفته است. نتایج به‌شرح زیر ارائه می‌شود.

- فیزیک جریان درون محفظه نشان داد که در نسبت هم‌ارزی بالاتر از ۱، هوای ورودی برای ایجاد جریان بازگشتی و پایداری شعله کافی نیست؛ در نتیجه مانع از شکل‌گیری شعله می‌شود.

- با بررسی نتایج مربوط به شدت گردابه میزان قدرت هر جریان بازگشتی درون محفظه مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه حاصل‌شده آن است که کاهش نسبت هم‌ارزی باعث افزایش شدت گردابه و در نتیجه افزایش جریان‌های پیشی موجود در محفظه می‌شود.

- برای تکمیل بحث فیزیک جریان درون محفظه، پروفیل هر سه مؤلفه سرعت در تمام سطح مقطع‌های تعریف‌شده مورد بررسی قرار گرفت. در بحث مطالعه پروفیل شعاعی، در سازگاری با نتایج مربوط به شدت گردابه این نتیجه نشان می‌دهد که قدرت جریان‌های پیشی در انتهای محفظه کاهش یافته است. نکته قابل توجه دیگر افزایش اندازه شعاعی با کاهش نسبت هم‌ارزی است. مشاهده شد که افزایش دبی جرمی هوا منجر به افزایش اندازه شعاعی در هر مقطع از محفظه می‌شود، اما در تمامی نسبت‌های هم‌ارزی پروفیل سرعت در مقطع خروجی به‌طور تقریبی یکسان و مشابه است. این مسئله نشان می‌دهد که فارغ از دبی جرمی ورودی، جریان سیال در انتهای محفظه در نهایت انرژی خود را از دست می‌دهد و پروفیل سرعت به سمت تخت‌شدن میل می‌کند. در مطالعه پروفیل سرعت مماسی، با افزایش دبی جرمی هوای ورودی به محفظه، اندازه سرعت شعاعی افزایش پیدا می‌کند. علت آن نیز، همان‌طور که ذکر شد، افزایش تکانه عرضی جریان ورودی از سوراخ‌های اولیه و ثانویه است. پروفیل سرعت شعاعی در مقطع خروجی محفظه نیز به سمت تخت‌شدن میل پیدا می‌کند.

- چگالی محصولات احتراق دیگر پارامتر مهمی بود که تغییرات آن در طول محفظه مورد تحلیل قرار گرفت و نتیجه حاصل شد که کاهش نسبت هم‌ارزی موجب افزایش چگالی سیال درون محفظه احتراق می‌شود.

- در بحث دمای شعله، مشخص شد که کاهش نسبت هم‌ارزی نه تنها باعث کاهش بیشینه دمای شعله می‌شود، بلکه می‌تواند طول شعله را تا حدودی کاهش دهد.

- با محاسبه توزیع عدد ماخ درون محفظه مشخص شد که فرض جریان تراکم‌ناپذیر فرضی صحیح در فرایند شبیه‌سازی بوده است.

- با رسم نمودار تغییرات NO در طول محفظه نتیجه حاصل شد که رفتار تولید NO بسیار به دمای سیال بستگی دارد و نمودار تغییرات آن بسیار مشابه نمودار تغییرات دما در محفظه است که نتیجه حاصل از آن تأثیر مثبت کاهش نسبت هم‌ارزی بر روی کاهش تولید آلاینده NO احتراق است. تا جایی که کاهش نسبت هم‌ارزی از مقدار ۰/۷۲ به ۰/۳۵ می‌تواند میزان تولید NO را تا حدود ۹۷ درصد کاهش دهد.

منابع

1. A. Rajaei, "Providing strategies to reduce air pollution in Tehran," *Journal of science and engineering Elites*, 3, No. 1, 2019, pp. 7-29. (In Persian)
2. U. S. Energy Information administration, *international energy outlook 2017 overview*, international energy outlook, IE2017, September 14, 2017, www.eia.gov.com, Accessed 22 March 2019.
3. A. Lefebvre, D. Ballan, "Gas turbine combustion alternative fuels and emissions," third edition, CRC Press, Boca Raton, 2010.
4. D. Fredrich, W. P. Jones and A. J. Marquis, "The stochastic fields method applied to a partially premixed swirl flame with wall heat transfer," *Combustion and Flame*, 205, 2019, pp. 446-456.
5. P. Gajan, A. Pierre, B. Alain Strzelecki, B. Platet, R. Lecourt and F. Giuliani, "Investigation of spray behavior downstream of an aeroengine injector with acoustic excitation," *Journal of propulsion and power*, 23, No. 2, 2007, pp. 390-397.
6. A. Fazlollahi-Ghomshi and A. Mardani, "Numerical Investigation of Reacting Flow in a Double-swirled Gas Turbine Model Combustor," *Fuel and Combustion*, 9, No. 2, 2016, pp. 39-58. (in Persian)
7. M. Najib, M. Nazri and M. Jafar, "Effect of varying the double radial swirler configuration on the fluid dynamic and emissions performances in a can combustor," *Jurnal Teknologi*, 79, 2017, pp. 3-7.
8. A. M. Elbaz, H. A. Moneib, K. M. Shebil and William L. Roberts, "Low NOX-LPG staged combustion double swirl flames," *Renewable Energy*, 138, 2019, pp. 303-315.
9. C. Zong, Y. Lyu, D. Guo, Li. Chengqin and T. Zhu,, "experimental and numerical study on emission characteristics of the double annular swirler under different pilot fuel ratios," *Proceedings of ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT*, Oslo, Norway, pp. 11-15, 2018.
10. F. Zaiguo, H. Gao, Z. Zeng, J. Liu and Q. Zhu, "Generation characteristics of thermal NOx in a double-swirler annular combustor under various inlet conditions," *Energy*, 200, 2020, pp. 117-187.
11. N. Merlo, "Combustion characteristics of methane-oxygen enhanced air turbulent non-premixed swirling flames," *Experimental thermal and fluid science*, 56, 2014, pp. 53-60.
12. B. Guo, T. A. G. Langrish and D. F. Fletcher, "Simulation of Turbulent Swirl Flow in an Axisymmetric Sudden Expansion Introduction," *AIAA Journal*, 39, No. 1, 2006 pp. 96-102.
13. B. Pritz and M. Gabi, "Numerical Simulation of Turbulent Swirling Flows," *PAMM journal*, 31, 2013, pp. 309-310
14. A. Ahmadian Hosseini, M. Ghodrat, M. Moghiman and 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 , pp. 390-397.
15. M.Torkzadeh, F. Bolourchifard and E. Amani, "An investigation of air-swirl design criteria for gas turbine combustors through a multi-objective CFD optimization," *Fuel*, 186, 2016, pp. 734-749.

English Abstract

Numerical simulation of the effect of the air-fuel ratio on NO emission reduction in a gas turbine combustor with a double swirler

Mohamadhasan Sedghi¹, Mohamadhasan Nobakhti^{2*} and Masud zareh³

1- Department of Mechanical Engineering, Srbiau, Tehran, Iran, mohamadhasan7.sedghi@gmail.com

2- Department of Mechanical Engineering, Srbiau, Tehran, Iran, m.nobakhti@srbiau.ac.ir

3- Department of Mechanical Engineering, Srbiau, Tehran, Iran, m.zareh@srbiau.ac.ir

*Corresponding author

(Received: 2021.01.30, Received in revised form: 2021.05.09, Accepted: 2021.07.21)

The purpose of this study is investigating the effect of fuel to air ratio on the flow characteristics and NO emission in a model double swirler combustion chamber. The air in this combustion chamber passes inversely through the liner. In this research, by defining the boundary conditions and producing adequate mesh, and using standard K- ϵ model for methane fuel, combustion simulations have been performed. The simulations are performed in four different equivalence ratios, all of which are for the dilute phase of the fuel. The physics of the flow inside the chamber showed that in the higher equivalence ratios than 1, the mass flow air in entrance is not enough to keep the vortex breakdown and the stability of the flame, and thus prevents the formation of flame. By examining the vorticity and the amount of power of each vortex breakdown inside the chamber, the results showed that reducing the equivalence ratio increases the intensity of the vortex. It was found that reducing the equivalence ratio not only reduces the maximum flame temperature, but can also reduce the flame length to some extent. Finally, it was concluded that the NO production behavior is highly depend on the fluid temperature and its change graph is very similar to the temperature change diagram in the chamber, which results in a significant positive effect of decreasing the equivalence ratio on reduce the production of combustion emissions.

Keywords: effect of the air-fuel ratio, Numerical simulation 3D, double swirler combustion chamber, emission reduction