

Numerical Simulation of Turbulent Reacting flow in a Trapped Vortex Combustor

M. Esmaeili^{1*}

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University

*Postal Code: 1465774111, Tehran, IRAN

m.esmaeili@khu.ac.ir

Trapped vortex combustor (TVC) is a compact combustor which represents the high efficiency in flame stabilization. In this study, turbulent reacting flow through trapped vortex combustor is numerically simulated. In order to model turbulence, the $K-\omega$ -SST and scale adaptive simulation (SAS) models, and to model combustion, the species transport and probability density function (PDF) approaches are used. To verify the numerical model, numerical results are compared with the available experimental data. There is a good agreement between the mean and RMS values of temperature and emission indices (CO, unburnt hydrocarbon (UHC) and NO_x) obtained from numerical results and experimental data. Moreover, simulation is performed for different values of equivalence ratios and mainstream inlet temperatures and results show that with a constant value of equivalence ratio, by increasing the mainstream inlet temperature, combustion efficiency increases, while CO and UHC emission indices decrease.

Keywords: Trapped vortex combustor, Reacting turbulent flow, Emission indices, Combustion efficiency

1. Assistant Professor (Corresponding Author)

شبیه‌سازی عددی جریان واکنشی مغشوش در محفظه احتراق با گردابه به دام افتاده

مصطفی اسماعیلی^{*۱}

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی

*تهران، صندوق پستی ۱۴۹۱۱-۱۵۷۱۹

m.esmaeili@khu.ac.ir

محفظة احتراق با گردابه به دام افتاده محفظه‌ای فشرده است که کارایی بالایی در پایداری شعله دارد. در این مطالعه، جریان واکنشی مغشوش در محفظه احتراق با گردابه به دام افتاده به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. مدل‌های توربولانسی شبیه‌سازی مقیاس انطباقی و $K-\omega-SST$ و رویکردهای احتراقی انتقال اجزاء و تابع چگالی احتمال برای مدل‌سازی توربولانس و احتراق مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به منظور اعتبارسنجی مدل عددی، نتایج با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه شده است. انطباق مناسبی بین مقادیر متوسط و نوسانی دما، مقادیر صدور آلاینده‌ها (مونوکسید کربن، هیدروکربن نسوخته و اکسیدهای نیتروژن) و همچنین راندمان احتراق به دست آمده از حل عددی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. ضمناً، شبیه‌سازی برای مقادیر مختلف نسبت هم‌ارزی و دمای ورودی جریان اصلی انجام شد و نتایج نشان می‌دهد که در یک مقدار ثابت نسبت هم‌ارزی، با افزایش دمای جریان اصلی، راندمان احتراق افزایش و شاخص‌های آلاینده‌گی مونوکسید کربن و هیدروکربن نسوخته کاهش می‌یابند.

واژه‌های کلیدی: محفظه احتراق با گردابه به دام افتاده، جریان مغشوش، شاخص‌های آلاینده‌گی، راندمان احتراق

علائم و اختصارات

مقدمه

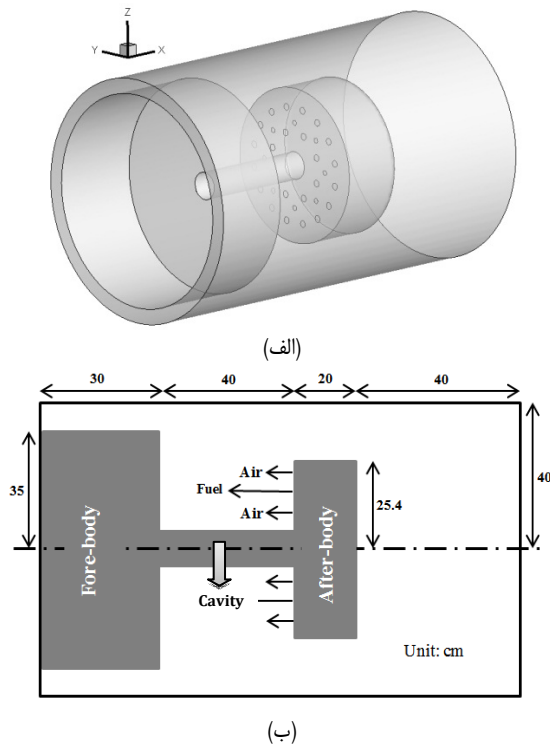
محفظة احتراق یکی از مهم‌ترین اجزای موتور توربین گازی بوده و در آن کارکرد پایدار، برای عملکرد بهتر موتور ضروری است. در محفظه احتراق‌های موجود، شعله در ناحیه اولیه محفظه به کمک پره چرخشی^۱، پله معکوس^۲ پایدار می‌شود و به موجب آن، یک ناحیه جریان برگشتی^۳ ایجاد می‌شود که به عنوان منبع پیوسته‌ای از اشتعال برای جریان اصلی سوخت و هوای محفظه عمل می‌کند. در سرعت‌های بالای جریان ورودی، این ناحیه ناپایدار شده و بر روی پارامترهایی چون پایداری شعله، راندمان احتراق و میزان آلاینده‌های خروجی، تأثیر منفی می‌گذارد و در نتیجه موجب عملکرد نامناسب

u_i	سرعت (ms^{-1})
x_i	جهت‌های مختصات (m)
p	فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)
k	انرژی جنبشی توربولانس (m^2s^{-2})
f	کسر مخلوط
f_{i2}	واریانس کسر مخلوط
Y	کسر جرمی
ω	نرخ اتلاف ویژه (s^{-1})
ρ	چگالی (kgm^{-3})
τ	عمر متوسط موضعی هوا (S)
ox	اکسید
fuel	سوخت

2. Swirl vane
 3. Backward facing step
 4. Recirculating zone

۱. استادیار (نویسنده مخاطب)

اخیراً ژیانگ و همکاران در یک مطالعه عددی در سال ۲۰۱۶ [۱۹]، به منظور بهبود راندمان محفظه احتراق با گردابه به دام افتاده دو بعدی، از یک ساختار جدید حفره به همراه پره راهنما و جسم مانع در برابر جریان^۸ استفاده کردند. نتایج این شبیه‌سازی غیراقتراقی نشان داد که با افزودن جسم مانع، مقدار و توزیع انرژی جنبشی توربولانس و میزان انتقال جرم و حرارت در محفظه احتراق افزایش می‌یابد.



شکل ۱- هندسه محفظه احتراق با گردابه به دام افتاده

مطالعه حاضر به شبیه‌سازی عددی جریان واکنشی مغشوش در محفظه احتراق با گردابه به دام افتاده از نوع استوانه‌ای (شکل ۱) پرداخته است. به منظور مدل‌سازی جریان مغشوش، از مدل‌های شبیه‌سازی مقیاس انطباقی^۹ و K- ω -SST استفاده شده است. ضمناً رویکردهای اقتراقی انتقال اجزاء و تابع چگالی احتمال^{۱۰} برای مدل‌سازی اقتراق مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به منظور اعتبارسنجی مدل عددی، نتایج عددی مطالعه حاضر با نتایج آزمایشگاهی سو و همکاران [۳] مقایسه شده است. ضمناً اثر نسبت هم ارزی کلی محفظه و همچنین دمای جریان اصلی ورودی به محفظه بر روی مقادیر آلاینده‌ها و راندمان اقتراق بررسی شده است. وجه اقتراق مطالعه حاضر از مطالعات گذشته این است که در مطالعه حاضر، اثر

محفظه احتراق می‌شود. این مشکل در محفظه‌های اقتراق پایدار شده با جریان چرخشی، با به‌کارگیری حفره^۵ به عنوان شعله نگهدار مرتفع می‌شود [۳-۱]. این روش متفاوت، برای پایدار کردن شعله کارایی بالایی دارد و با نام «محفظه احتراق با گردابه به دام افتاده» شناخته می‌شود. این روش را سو و همکاران [۳، ۲] ارائه کرده‌اند.

محفظه احتراق با گردابه به دام افتاده، یک محفظه احتراق با هندسه جدید (شکل ۱) است که عملکرد پایدارتری را در محدوده وسیعی از دبی‌های جرمی سوخت نسبت به فناوری‌های موجود ارائه می‌کند [۳، ۲]. شایان ذکر است، فناوری محفظه احتراق با گردابه به دام افتاده، مراحل دانش علمی و توسعه محصول را گذرانده ولی هیچ نمونه موتور توربین گازی تجاری که در آن از این فناوری استفاده شده باشد، گزارش نشده است [۴].

XJ در مطالعات متعددی، انواع مختلف محفظه‌های اقتراق با گردابه به دام افتاده، به صورت آزمایشگاهی [۶-۱۳] و عددی [۱۴-۱۹] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به عنوان نمونه، در میان این مطالعات آزمایشگاهی می‌توان به کار تحقیقاتی جین و همکاران [۸] اشاره کرد. این مطالعه در در دانشگاه هوانوردی و فضانوردی نانجینگ^۶، بر روی محفظه‌های اقتراق با گردابه به دام افتاده از نوع صفحه‌ای انجام پذیرفته که در آن مشخصات اقتراقی و میدان جریان در یک مدل آزمایشگاهی از این محفظه‌ها برای جریان واکنشی و غیرواکنشی بررسی شده است. آنها نتیجه گرفتند که محدوده کنده شدن شعله رقیق^۷ در محدوده نسبت سوخت به هوا ۰/۰۴۳ تا ۰/۰۵۶ و ماخ ورودی ۰/۱۵ تا ۰/۳ بوده که مبین پایداری مناسب شعله است. ضمناً بهبود پروفیل شعاعی دمای خروجی، نشان‌دهنده کارایی مناسب جت‌های رقیق‌کننده محفظه انتخابی است. اخیراً کومار و میسرا [۹]، اثر پارامترهای مختلف بر مشخصات اغتشاش اقتراقی یک محفظه احتراق با گردابه به دام افتاده دوبعدی را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده‌اند. تحلیل طیفی آن‌ها نشان داده که مقدار دانسیته طیفی توان با افزایش سرعت هوای اولیه حفره و تغییر نسبت هم ارزی افزایش می‌یابد.

میان مطالعات عددی انجام شده در این زمینه، می‌توان به مطالعه کنای و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۱۴] اشاره کرد. آنها اثر افزایش هیدروژن سوخت را در یک محفظه احتراق با گردابه به دام افتاده دارای تقارن محوری و دیسک اضافی، مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که افزایش غنای هیدروژن سوخت هیدروکربن باعث افزایش انرژی و در نتیجه افزایش دمای بیشینه می‌شود. ضمناً افزایش هیدروژن سوخت، باعث کاهش مقدار آلاینده اکسیدهای نیتروژن و افزایش مونوکسید و دی اکسیدکربن می‌شود.

8. Blunt body

9. Scale Adaptive Simulation (SAS)

10. Probability Density Function (PDF)

5. Cavity

6. NUA

7. Lean blow out

در این معادلات، G_k و G_ω به ترتیب بیانگر تولید انرژی جنبشی توربولانس (k) و تولید نرخ اتلاف ویژه (ω) هستند. ضمناً Y_k و Y_ω بیانگر اتلاف دو کمیت انرژی جنبشی توربولانس و نرخ اتلاف ویژه بوده و S نیز جمله چشمه دو معادله است. مدل شبیه‌سازی مقیاس انطباقی، یک مدل دو معادله‌ای است که ابتدا توسط روتا [۲۵] پیشنهاد و سپس توسط منتر و اگروف [۲۶-۲۷] ارائه شده است. معادله حاکم بر این مدل از اضافه کردن یک جمله چشمه (معادله ۵) به معادلات مدل K- ω -SST (معادلات ۳ و ۴) حاصل می‌شود و به آن مدل SAS-SST نیز می‌گویند.

$$Q_{SAS} = \max \left[\rho \eta \kappa S^2 \left(\frac{L}{L_{VK}} \right) - C \frac{2\rho k}{\sigma_\phi} \max \left(\frac{1}{\omega^2} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \frac{1}{k^2} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right), 0 \right] \quad (5)$$

مفهوم پارامترها و هر یک از جملات این جمله چشمه تاثیرگذار در مراجع [۲۶, ۲۷] بیان شده است. این مدل، در جریان‌های محدود به دیواره مانند مدل‌های میانگین‌گیری شده رینولدز ناویر- استوکس دائم عمل می‌کند ولی در جریان‌های توربولانس غیردائم با تشکیل باندهای وسیعی از طیف توربولانس، مشابه مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^{۱۲} عمل می‌کند. وجود مقیاس طولی فن کارمن مدل شبیه‌سازی مقیاس انطباقی را قادر می‌سازد تا طیف توربولانس را در جریان‌های ناپایدار تسخیر کند. یک ویژگی مهم شبیه‌سازی مقیاس انطباقی این است که برخلاف مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، حساسیت به شبکه در این مدل زیاد نیست.

مدل‌سازی جریان احتراقی

به منظور مدل‌سازی احتراق، از دو روش استفاده شده است. در روش اول، از مدل انتقال اجزاء استفاده شده است. جمله چشمه معادله انتقال اجزاء یعنی نرخ تولید واکنش، از طریق ترکیب مدل نرخ محدود^{۱۳} و مدل اتلاف ادی^{۱۴} و استفاده از واکنش‌های شیمیایی تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای به‌دست آمده است. در روش دوم، شبیه‌سازی واکنش شیمیایی از طریق احتراق غیرپیش‌آمیخته و مدل تابع چگالی احتمال انجام پذیرفته است. ویژگی این روش نسبت به روش‌های نرخ محدود، امکان محاسبه کسر جرمی اجزای رادیکالی و درنظر گرفتن اثر تفکیک اجزا^{۱۵} و کوپلینگ مناسب جریان مغشوش و واکنش شیمیایی با هزینه محاسباتی پایین است. این

همزمان مدل‌های توربولانس و احتراق و نیز متغیرهای نسبت هم ارزی و دمای ورودی بر عملکرد نسل اول از محفظه‌های احتراق با گردابه به دام افتاده بررسی شده است.

معادلات حاکم

در این تحقیق از روش حجم محدود برای حل معادلات حاکم بر جریان مغشوش احتراقی استفاده شده است [۲۱]. معادلات حاکم بر این جریان، معادلات غیردائم میان‌گیری شده رینولدز ناویر- استوکس^{۱۱} و معادلات انتقال اجزاء و انرژی هستند. معادلات میان‌گیری شده زمانی بقای جرم و مومنتوم به‌صورت روابط (۱) و (۲) بیان می‌شوند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} - \rho u'_i u'_j) \quad (2)$$

در معادلات بالا و معادلاتی که در ادامه ارائه می‌شود، علامت میانگین‌گیری زمانی برای سادگی حذف شده است. ترم تنش رینولدز $(\rho u'_i u'_j)$ با استفاده از تقریب بوزینسک و مدل جریان مغشوش تعیین می‌شود.

مدل‌سازی جریان مغشوش

مدل‌های میانگین‌گیری شده رینولدز ناویر- استوکس، کمیت‌های میانگین‌گیری شده جریان را حل می‌کنند، درحالی‌که بخش اصلی طیف انرژی توربولانس را مدل می‌کنند. در این مقاله، از فرمولاسیون SST مدل‌های K- ω [۲۲, ۲۳] و شبیه‌سازی مقیاس انطباقی استفاده شده است. تغییر تدریجی از فرمولاسیون استاندارد مدل K- ω در ناحیه داخلی لایه مرزی به فرمولاسیون K- ϵ در ناحیه بیرونی لایه مرزی، ویژگی مهم در فرمولاسیون SST مدل K- ω است [۲۴]. از این رو مدل K- ω -SST، قابلیت یک مدل توربولانس رینولدز پایین را بدون استفاده از توابع میراکنده خارجی دارد. ضمناً با تغییر به روش K- ϵ در جریان آزاد، این مدل مشکلات رایج مدل K- ω استاندارد را ندارد. معادلات انتقال حاکم بر این مدل به صورت ذیل تعریف می‌شوند:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \omega u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (4)$$

12. Large Eddy Simulation (LES)

13. Finite-rate

14. Eddy-dissipation

15. Dissociation

11. URANS

ناحیه محاسباتی و شرایط مرزی

هندسه استفاده شده در این مقاله بر اساس محفظه احتراق با گردابه به دام افتاده استوانه‌ای ارائه شده در مرجع [۳] است (شکل ۱). از آنجاکه این محفظه استوانه‌ای شکل است، در صورتی که جت‌های سوخت و هوا در حفره با یک مرز به صورت نوار جابجین شوند، هندسه دارای ویژگی تقارن محوری شده و هزینه محاسباتی به شدت کاهش می‌یابد. شایان ذکر است این تقریب با وجود کاهش هزینه محاسباتی، می‌تواند باعث خطا در محاسبات شود. بدین منظور، دبی معادل ورودی‌های سوخت و هوا، برای این ورودی نواری شکل محاسبه می‌شود. شرایط مرزی استفاده شده، بر اساس اطلاعات داده شده در مرجع [۳] است. در مرز اصلی ورودی، هوا با سرعت ۴۲ متر بر ثانیه و دمای ۳۰۰ درجه وارد می‌شود. در داخل حفره، سه مرز ورودی (دو ورودی هوا و یک ورودی سوخت) وجود دارد. در هندسه اصلی، ورودی سوخت از ۸ جت سوخت با قطر ۱/۷۵ میلی‌متر تشکیل شده است. در هندسه تقارن محوری معادل، در مرز ورودی سوخت، پروپان گازی با سرعت ۵ متر بر ثانیه و دمای ۳۰۰ درجه کلویین، از یک نوار با عرض یک میلی‌متر خارج می‌شود. دبی جریان در این حالت برابر با هندسه اصلی است. در هندسه معادل دو ورودی هوا با سرعت ۱۲/۴ متر بر ثانیه و دمای ۳۰۰ درجه کلویین در نظر گرفته شده است. دبی هوای ورودی از این ورودی‌های نواری شکل با دبی هوای خروجی از ۲۴ جت هوا با قطر ۲/۲۹ میلی‌متر در هندسه واقعی برابر است.

نتایج

قبل از بررسی نتایج، شبکه عددی استفاده شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. با معادل‌سازی انجام گرفته (تبدیل هندسه سه بعدی به هندسه دو بعدی دارای تقارن محوری)، تعداد شبکه محاسباتی و در نتیجه هزینه محاسباتی به شدت کاهش می‌یابد. در این هندسه با تقارن محوری، از یک شبکه سازمان یافته استفاده شده و به منظور تسخیر بهتر گردایان‌های کمیت‌های مختلف اعم از سرعت، دما و اجزای شیمیایی، شبکه در نزدیکی دیواره‌ها و نزدیک ورودی‌های جت ریز شده است. در این پروژه، از سه شبکه درشت (سی و دو هزار المان)، شبکه متوسط (پنجاه و چهار هزار المان) و شبکه ریز (نود و چهار هزار المان) استفاده شده است. مقایسه نتایج عددی با این سه شبکه نشان می‌دهد، که با استفاده از یک شبکه ریز استقلال از شبکه محاسباتی حاصل می‌گردد.

روش در صورت وجود جریان مغشوش و ورودی مجزای سوخت و اکسند قابل استفاده است. ضمناً نرخ واکنش‌های شیمیایی باید آنقدر سریع باشد که جریان بتواند به حالتی نزدیک به حالت تعادل شیمیایی برسد. در مطالعه حاضر از مدل بتا تابع چگالی احتمال^{۱۶} که نتایج بهتری نسبت به سایر مدل‌های تابع چگالی احتمال دارد، استفاده شده است. مدل بتا تابع چگالی احتمال، به وسیله دو پارامتر کمیت متوسط اسکالر و واریانس تعیین می‌گردد. به منظور دوری جستن از پیچیدگی‌های موجود در معادله انتقال اجزا، کمیت کسر مخلوط^{۱۷} در مدل بتا تابع چگالی احتمال به صورت رابطه (۶) به کسر جرمی (Y_i) وابسته می‌شود:

$$f = \frac{Y_i - Y_{i,ox}}{Y_{i,fuel} - Y_{i,ox}} \quad (6)$$

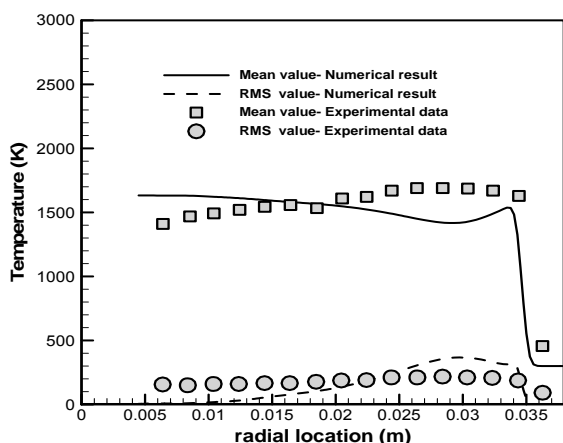
در معادله بالا، زیرنویس ox و fuel مربوط به مقادیر کسر جرمی در ورودی اکسند و سوخت است. در ورودی سوخت، $f = 1$ بوده و در ورودی اکسند $f = 0$ است و در میدان جریان مقدار این کمیت بین صفر تا یک متغیر است. معادله انتقال برای مقدار متوسط کسر مخلوط (f) و واریانسش (f'^2) به صورت روابط (۷ و ۸) است:

$$\frac{\partial(\rho f)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho f u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_f} \right) \frac{\partial f}{\partial x_j} \right] + S \quad (7)$$

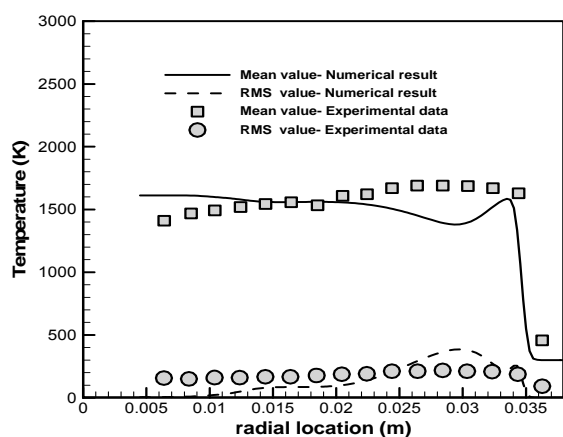
$$\frac{\partial(\rho f'^2)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho f'^2 u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_f} \right) \frac{\partial f'^2}{\partial x_j} \right] + C_g \mu_t \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right)^2 - C_d \rho \frac{\epsilon}{k} f'^2 \quad (8)$$

در مطالعه حاضر، دقت گسسته‌سازی جملات پخشی و شارهای جابه‌جایی از مرتبه دوم بوده و میان‌یابی فشار از طریق الگوریتم پرستو^{۱۸} انجام پذیرفته و کوپلینگ سرعت و فشار از طریق الگوریتم کوپل^{۱۹} انجام پذیرفته است [۲۱]. ضمناً گسسته‌سازی زمانی از طرق روش مرتبه دوم ضمنی محدود شده صورت پذیرفته است. در حل‌های غیردائم، مقادیر میانگین‌گیری زمانی بعد از گذشت ۱۰ برابر زمان مشخصه محفظه شروع می‌شود. ضمناً، مدت میانگین‌گیری چند برابر این مقدار است.

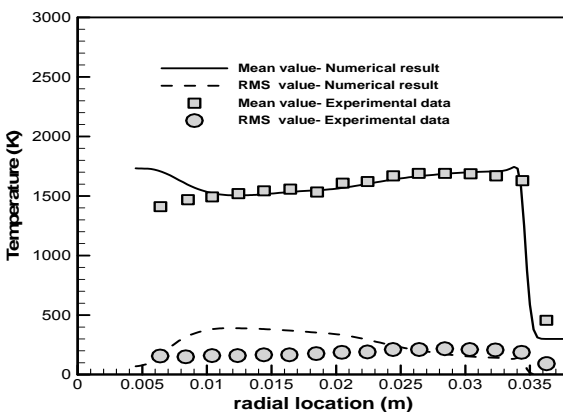
16. β -PDF
17. mixture fraction
18. PRESTO
19. Couple



شکل ۲- مقایسه مقادیر متوسط و rms دما به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی [۳] با نتایج عددی به دست آمده از مدل توربولانس K- ω و مدل احتراقی انتقال اجزا به همراه واکنش تک مرحله‌ای



شکل ۳- مقایسه مقادیر متوسط و rms دما به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی [۳] با نتایج عددی به دست آمده از مدل توربولانس K- ω و مدل احتراقی انتقال اجزا به همراه واکنش دو مرحله‌ای

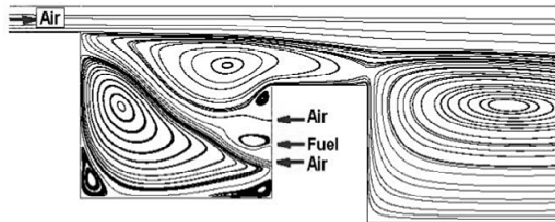


شکل ۴- مقایسه مقادیر متوسط و rms دما به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی [۳] با نتایج عددی به دست آمده از مدل توربولانس SAS و مدل احتراقی انتقال اجزا به همراه واکنش تک مرحله‌ای

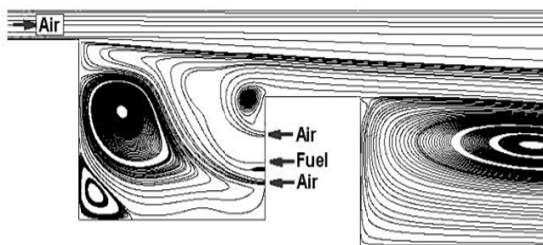
در مرجع [۳]، اطلاعاتی که قابلیت مقایسه با نتایج عددی را داشته باشند محدود است. توزیع مقادیر متوسط و نوسانی دما در مقاطعی محدود و همچنین میزان آلاینده‌ها در خروجی محفظه، اطلاعات قابل مقایسه هستند. در شکل (۲) تا (۴)، توزیع شعاعی مقادیر متوسط و نوسانی دما در مقطع $x=5\text{mm}$ در ابتدای حفره قرار دارد) به دست آمده از نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی [۳] مقایسه شده‌اند. در این شکل‌ها عملکرد مدل‌های توربولانسی شبیه‌سازی مقیاس انطباقی و $K-\omega$ ، و مدل‌های احتراقی انتقال اجزاء تابع چگالی احتمال برای مدل‌سازی توربولانس و احتراق مورد ارزیابی قرار گرفته است. با مقایسه شکل (۲) و (۴) مشخص می‌شود، با یک مدل احتراقی یکسان (مدل احتراقی انتقال اجزاء به همراه واکنش تک مرحله‌ای) مدل توربولانسی شبیه‌سازی مقیاس انطباقی، مقدار متوسط دما را بسیار بهتر از مدل $K-\omega$ پیش‌بینی کرده است. اما عملکرد هر دو مدل در محاسبه مقدار نوسانی دما چندان موفق نبوده است. با مقایسه شکل‌های (۴) و (۵) مشخص می‌شود، با استفاده از مدل تابع چگالی احتمال، کارایی مدل توربولانسی شبیه‌سازی مقیاس انطباقی در محاسبه مقدار نوسانی دما بالاتر می‌رود. از مقایسه شکل‌های (۲) و (۳) مشخص می‌شود، با استفاده از یک مدل توربولانسی یکسان ($K-\omega$) افزایش تعداد مراحل واکنش شیمیایی تأثیر زیادی در کیفیت نمودارهای دمای متوسط و نوسانی ندارد.

در جدول (۱)، میزان راندمان احتراق و مقادیر صدور آلاینده‌ها (مونوکسیدکربن، هیدروکربن نسوخته و اکسیدهای نیتروژن) در خروجی محفظه به دست آمده از نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی [۳] مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند، مدل $K-\omega$ به همراه واکنش شیمیایی دو مرحله‌ای و مدل شبیه‌سازی مقیاس انطباقی به همراه تابع چگالی احتمال، بهترین عملکرد را در محاسبه راندمان احتراق داشته و خطای این مدل‌ها برای محاسبه راندمان احتراق کمتر از ۵ درصد است. در مورد صدور آلاینده هیدروکربن نسوخته نیز عملکرد مدل $K-\omega$ به همراه واکنش شیمیایی دو مرحله‌ای و مدل شبیه‌سازی مقیاس انطباقی به همراه تابع چگالی احتمال بهتر از دو ترکیب دیگر بوده است. ضمناً در مورد صدور آلاینده مونوکسید کربن نیز عملکرد این دو ترکیب بهتر بوده ولی مدل $K-\omega$ به همراه واکنش شیمیایی دو مرحله‌ای بهترین کارایی را داشته و خطای محاسبه آن کمتر از ۱۰ درصد است. در محاسبه صدور آلاینده اکسیدهای نیتروژن، مدل $K-\omega$ به همراه واکنش شیمیایی تک مرحله‌ای بهترین عملکرد را داشته و با خطایی کمتر از ۷ درصد با نتایج آزمایشگاهی انطباق دارد.

یک ناحیه داغ با دمای حدود ۱۵۰۰ درجه کلوین (که منطبق بر نتایج آزمایشگاهی است) داخل حفره تشکیل می‌شود. دمای ناحیه واکنشی تشکیل شده در لایه برشی بالاتر بوده و این ناحیه با دمای بالاتر تا پشت دیسک دوم کشیده می‌شود.

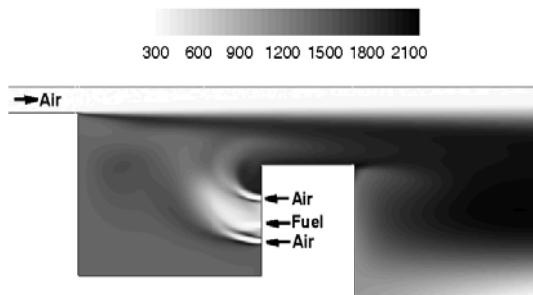


(الف)

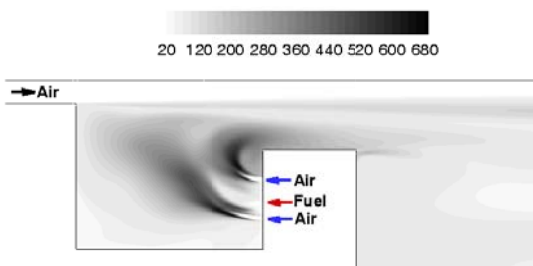


(ب)

شکل ۶- خطوط جریان در محفظه احتراق با گردابه به دام افتاده، (الف) جریان غیراحتراقی (ب) جریان احتراقی

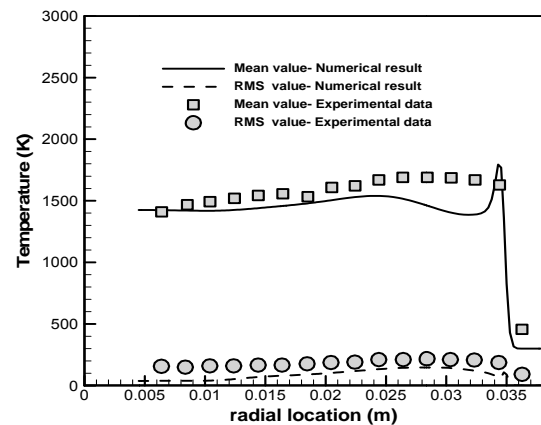


(الف)



(ب)

شکل ۷- کانتورهای (الف) مقدار میانگین دما (ب) مقدار rms دما



شکل ۵- مقایسه مقادیر متوسط و rms دما به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی [۳] با نتایج عددی به دست آمده از مدل توربولانس SAS و مدل احتراقی غیرپیش‌آمیخته و PDF

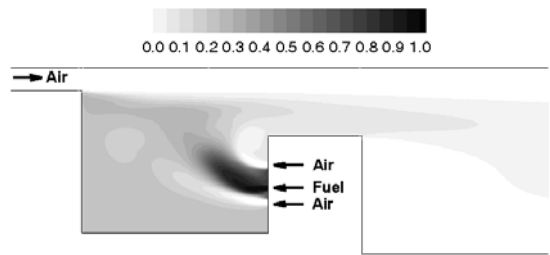
جدول ۱- مقایسه راندمان احتراق و شاخص آلاینده‌گی هیدروکربن نسوخته،

مونوکسید کربن و اکسیدهای نیتروژن به دست آمده از نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی [۳]

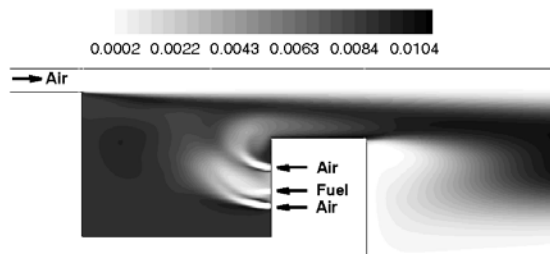
EI _{NOx} (g/kg) (Fuel)	EI _{CO} (g/kg) (Fuel)	EI _{UHC} (g/kg) (Fuel)	راندمان احتراق (%)	
۱/۷۸	---	۱۹۱	۸۱	مدل K- ω به همراه واکنش تک مرحله‌ای
۲/۹۵	۸۱/۱	۱۱۲	۸۸.۵	مدل K- ω به همراه واکنش دو مرحله‌ای
۲/۸۷	---	۲۷۰	۷۴	مدل SAS به همراه واکنش دو مرحله‌ای
۵/۹۴	۷۰	۱۱۵	۸۸	مدل SAS به همراه مدل PDF
۱/۹	۹۰	۵۶/۲	۹۲/۳	نتایج آزمایشگاهی سو و همکاران [۳]

مهم‌ترین عامل برای پایداری شعله در محفظه با گردابه به دام افتاده، تشکیل گردابه در داخل حفره محفظه است. ناحیه چرخشی با سرعت پایین، این امکان را به شعله می‌دهد که در این ناحیه پایدار شود و در واقع این گردابه به عنوان شعله نگهدار عمل می‌کند. در شکل (۶)، خطوط جریان برای جریان احتراقی و غیراحتراقی مقایسه شده است. در جریان غیراحتراقی، دو گردابه تشکیل شده است. جهت این گردابه‌ها را جریان اصلی تعیین می‌کند. بر اثر ناحیه واکنشی در لایه برشی بین جریان اصلی و جریان داخل حفره و نیز انبساط ناشی از آزاد شدن گرما باعث شده که شکل گردابه‌ها تغییر کرده و گردابه بالایی اثر خود را از دست داده و تبدیل به یک گردابه بسیار کوچک شده است. در شکل (۷) توزیع مقادیر متوسط و rms دما به نمایش درآمده است. همان‌طور که از این شکل برمی‌آید،

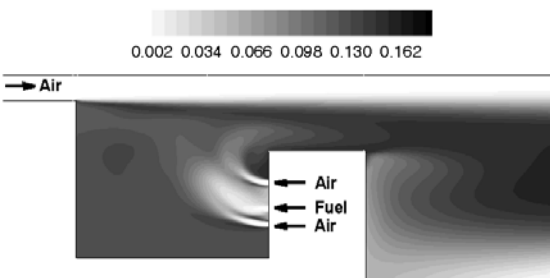
عنوان هیدروکربن نسوخته از محفظه خارج می‌شود. اختلاط جریان سوخت محصور شده در داخل محفظه با هوای اولیه و ثانویه، یک شعله پایدار تشکیل داده و این شعله به عنوان یک پایلوت برای جریان اصلی عمل می‌کند. این ویژگی، امکان کارکردن محفظه با گردابه دام افتاده در شرایط رقیق‌تر سوخت را فراهم می‌آورد.



(الف)



(ب)

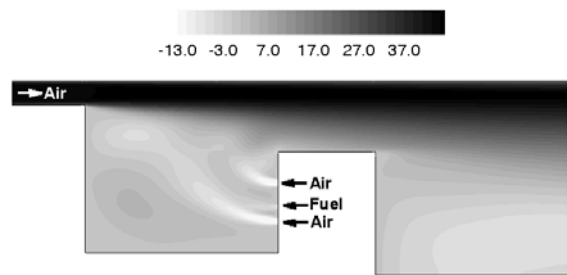


(ج)

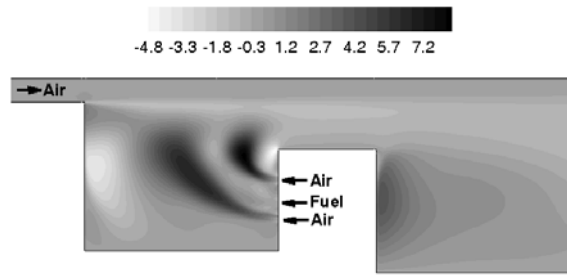
شکل ۹- کانتورهای مقادیر میانگین کسر جرمی (الف) پروپان ب) مونوکسیدکربن ج) دی اکسید کربن

بعد از مقایسه کمیتهای جریان با نتایج آزمایشگاهی و تحلیل مشخصات جریان، در ادامه اثر نسبت هم ارزی کلی و اثر دمای ورودی بر راندمان احتراق و میزان آلاینده‌های صادره مورد بررسی قرار می‌گیرد. شایان ذکر است نسبت هم ارزی کلی به صورت هوا به سوخت استوکیومتریکی به نسبت هوا به سوخت واقعی تعریف می‌شود. عبارت کلی در انتهای نسبت هم ارزی بدین منظور است که در محاسبه نسبت هوا به سوخت واقعی، علاوه بر هوای اولیه و ثانویه داخل حفره، اثر هوای جریان اصلی نیز در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۰)، اثر افزایش نسبت هم ارزی برای سه دمای

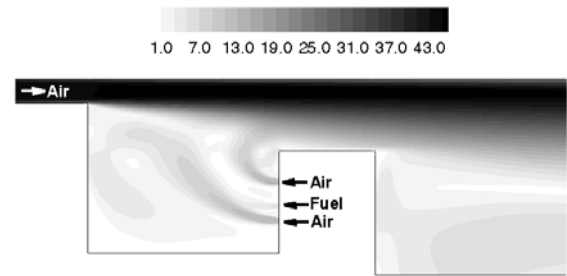
در شکل (۸)، کانتورهای توزیع سرعت محوری، سرعت شعاعی و اندازه سرعت به نمایش درآمده‌اند. همان‌طور که در شکل اندازه سرعت مشخص است، یک ناحیه با سرعت بالا (مرتبط با جریان اصلی سرعت بالا)، یک ناحیه با سرعت پایین (مرتبط با ناحیه جدا شده داخل حفره و ناحیه جدا شده پشت دیسک دوم) و یک ناحیه با سرعت متوسط (مرتبط با ناحیه برشی حاصل از اختلاط جریان اصلی با جریان داخل حفره) دیده می‌شوند. توزیع سرعت داخل حفره عامل اصلی تشکیل گردابه پایدارکننده شعله است.



(الف)



(ب)

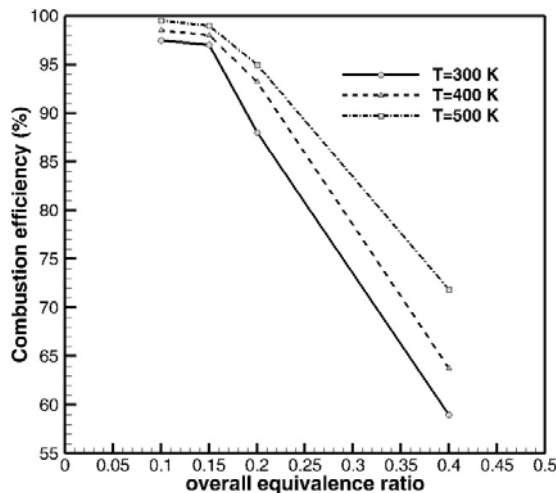


(ج)

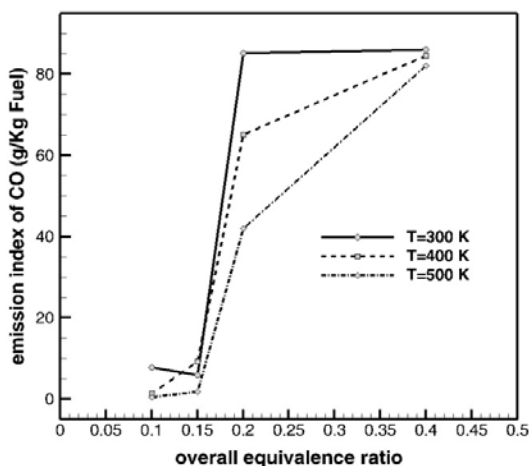
شکل ۸- کانتورهای مقادیر میانگین (الف) سرعت محوری ب) سرعت شعاعی ج) اندازه سرعت

در شکل (۹)، کانتورهای کسر جرمی سوخت (پروپان)، مونوکسیدکربن و دی اکسیدکربن نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است در ورودی سوخت، کسر جرمی سوخت بالا بوده و به تدریج با اختلاط با جریان هوای اولیه و ثانویه، کسر جرمی سوخت در داخل محفظه کاهش می‌یابد. نکته مهم از عملکرد مناسب محفظه با گردابه به دام افتاده این است، که بخش عمده محتوای سوخت داخل حفره می‌ماند و تنها بخش بسیار اندکی به

خطی راندمان احتراق و شاخص آلاینده‌گی (به جز اکسیدهای نیتروژن) با دماست که امکان به دست آوردن رابطه‌ای برای تغییرات این متغیرها با دما پدید می‌آورد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش دمای ورودی، دمای کلی احتراق افزایش یافته و در نتیجه میزان راندمان احتراق افزایش می‌یابد. ضمناً با افزایش دمای جریان ورودی اصلی، میزان شاخص آلاینده‌گی هیدروکربن نسوخته و مونوکسید کربن کاهش می‌یابد. نکته قابل ذکر این است که شیب تغییرات راندمان احتراق و شاخص‌های آلاینده‌گی هیدروکربن نسوخته با افزایش نسبت هم ارزی افزایش می‌یابند. در شکل (۱۷)، روند تغییرات شاخص اکسیدهای نیتروژن با دمای ورودی جریان اصلی در نسبت‌های هم ارزی مختلف نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که میزان شاخص NO_x برای نسبت‌های هم ارزی ۰/۱ و ۰/۱۵، در دمای ۴۰۰ درجه کلوین کمینه است.



شکل ۱۰- نمودار درصد راندمان احتراق بر حسب ضریب اکیووالانس به ازای دماهای ورودی مختلف جریان اصلی

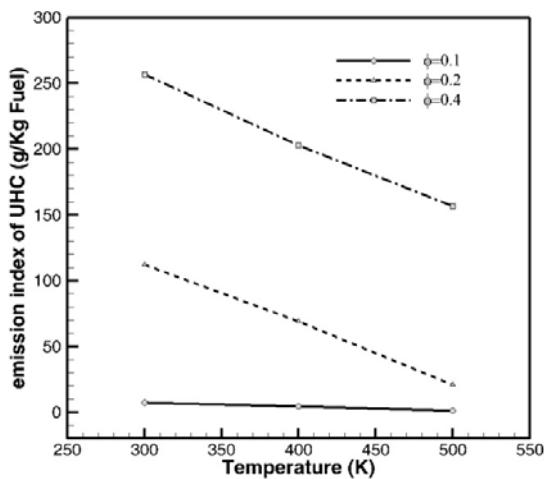


شکل ۱۱- نمودار شاخص آلاینده‌گی مونوکسید کربن بر حسب ضریب اکیووالانس به ازای دماهای ورودی مختلف جریان اصلی

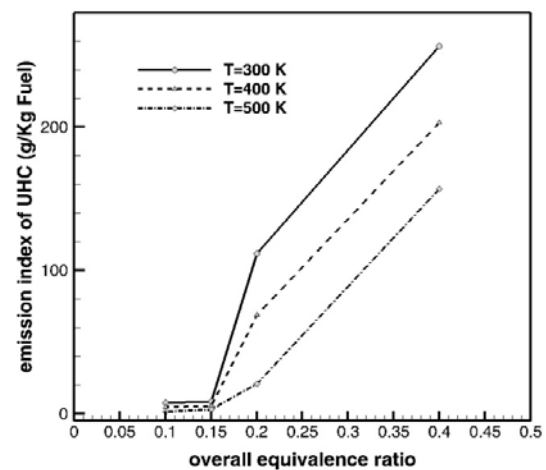
مختلف ورودی بر راندمان احتراق بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش نسبت هم ارزی و در نتیجه کاهش میزان هوا، راندمان احتراق کاهش می‌یابد. نرخ کاهش راندمان از نسبت هم ارزی ۰/۱ تا ۰/۱۵ خیلی کم است ولی با افزایش نسبت هم ارزی به ۰/۲ و ۰/۴، نرخ کاهش راندمان افزایش می‌یابد. با کاهش نسبت هم ارزی، محفظه در شرایط رقیق‌تر کار کرده و با افزایش هوا، میزان سوخت بیشتری مصرف شده و در نتیجه راندمان احتراق بیشتر می‌شود. شایان ذکر است روند تغییر راندمان احتراق برای دماهای ورودی مختلف یکسان بوده و با افزایش دمای ورودی، دمای ناحیه واکنشی و دمای دیواره نیز افزایش یافته و در نتیجه راندمان احتراق افزایش می‌یابد. ضمناً از نسبت هم ارزی ۰/۱۵ بالاتر، تغییرات راندمان احتراق تقریباً به صورت خطی است.

در شکل (۱۱)، اثر افزایش نسبت هم ارزی در دماهای مختلف بر روی میزان شاخص آلاینده‌گی مونوکسید کربن نشان داده شده است. به جز ناحیه نسبت هم ارزی بین ۰/۱ تا ۰/۱۵، که روند تغییرات شاخص آلاینده‌گی مونوکسید کربن منظم نیست، با افزایش نسبت هم ارزی از ۰/۱۵ به بعد، میزان مونوکسید کربن در خروجی افزایش می‌یابد. ضمناً با افزایش دما، میزان مونوکسید کربن کاهش می‌یابد. در شکل (۱۲)، اثر افزایش نسبت هم ارزی در دماهای مختلف بر روی میزان شاخص آلاینده‌گی هیدروکربن نسوخته نشان داده شده است. روند تغییرات دقیقاً عکس روند تغییرات راندمان احتراق است. با افزایش نسبت هم ارزی و در نتیجه کاهش میزان هوا، میزان شاخص هیدروکربن نسوخته افزایش می‌یابد. ضمناً در دماهای ورودی بالاتر نیز میزان هیدروکربن نسوخته کمتر است. در شکل (۱۳)، روند تغییرات شاخص اکسیدهای نیتروژن با افزایش نسبت هم ارزی کلی برای دماهای مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل بر می‌آید با کاهش نسبت هم ارزی میزان شاخص اکسیدهای نیتروژن کاهش می‌یابد. علت این روند را می‌توان با توزیع خطوط جریان و دما در شکل‌های (۶) و (۷) توجیه کرد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است، ناحیه جدا شده بعد از دیسک دوم، مکان مناسبی برای افزایش دمای گازهای خروجی پدید آورده است. با افزایش دما، میزان اکسیدهای نیتروژن گرمایی ($Themel NO_x$) که بخش مهم اکسیدهای نیتروژن را تشکیل می‌دهد، افزایش یافته و در نتیجه مقدار کلی شاخص اکسید نیتروژن نیز افزایش می‌یابد. ضمناً، روند تغییر میزان اکسید نیتروژن برای دماهای ورودی مختلف، روند یکنوایی نداشته و میزان شاخص NO_x در دمای ورودی ۴۰۰ درجه کلوین، کمینه است.

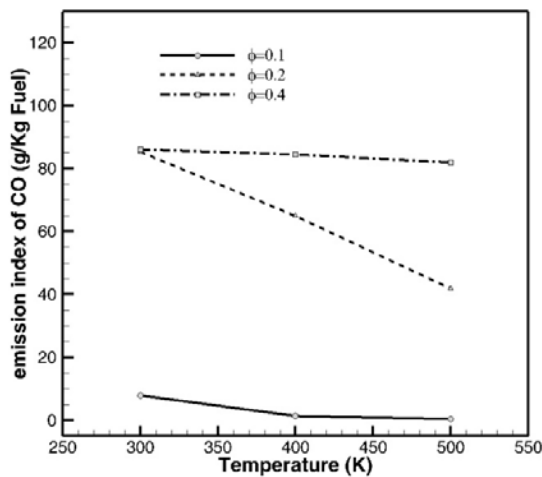
در شکل (۱۴) تا (۱۷)، روند تغییرات راندمان احتراق و شاخص آلاینده‌ها با دمای ورودی جریان اصلی در نسبت‌های هم ارزی مختلف به نمایش درآمده است. نکته مهم این نمودارها، تغییرات



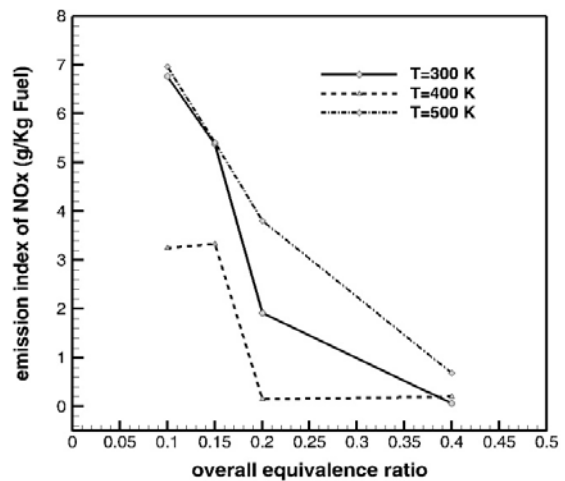
شکل ۱۵- نمودار شاخص آلاینده‌گی هیدروکربن نسوخته بر حسب دماهای ورودی مختلف جریان اصلی به ازای ضریب اکیووالانس‌های کلی مختلف



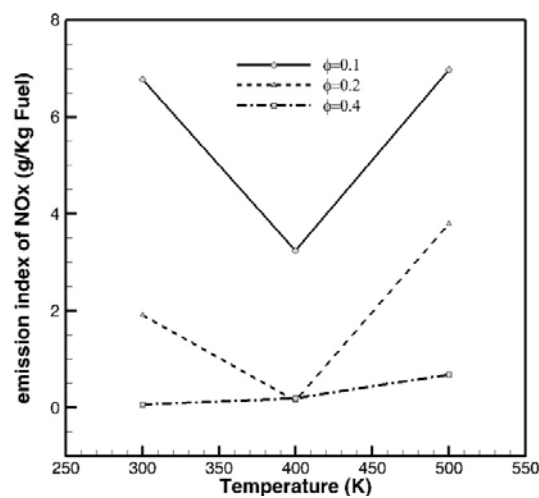
شکل ۱۲- نمودار شاخص آلاینده‌گی هیدروکربن نسوخته بر حسب ضریب اکیووالانس به ازای دماهای ورودی مختلف جریان اصلی



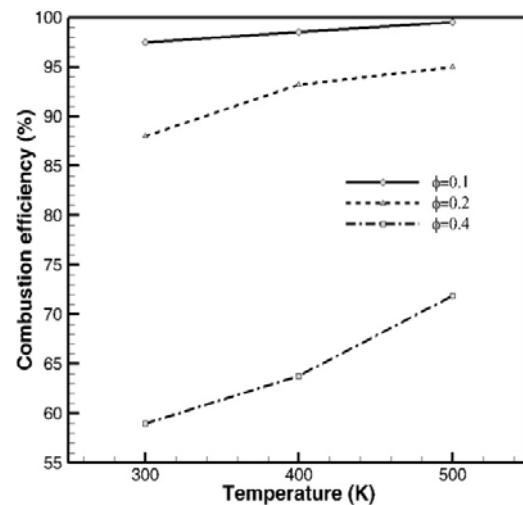
شکل ۱۶- شاخص آلاینده‌گی مونوکسیدکربن بر حسب دماهای ورودی مختلف جریان اصلی به ازای ضریب اکیووالانس‌های کلی مختلف



شکل ۱۳- نمودار شاخص آلاینده‌گی اکسیدهای نیتروژن بر حسب ضریب اکیووالانس به ازای دماهای ورودی مختلف جریان اصلی



شکل ۱۷- شاخص آلاینده‌گی اکسیدهای نیتروژن بر حسب دماهای ورودی مختلف جریان اصلی به ازای ضریب اکیووالانس‌های کلی مختلف



شکل ۱۴- نمودار راندمان احتراق بر حسب دماهای ورودی مختلف جریان اصلی به ازای ضریب اکیووالانس‌های کلی مختلف

Proceeding 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, January 2001.

- [3] Hsu, K.-Y., Goss, L. and Roquemore, W., "Characteristics of a Trapped-Vortex Combustor," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 14, No. 1, 1998, pp. 57-65.
- [4] Esmaili, M., "
- [5] Katta, V.R. and Roquemore, W., Study on Trapped-Vortex Combustor-Effect of Injection on Flow Dynamics," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 14, No. 3, 1998, pp. 273-281.
- [6] Agarwal, K.K., Krishna, S. and Ravikrishna, R., "Mixing Enhancement in a Compact Trapped Vortex Combustor," *Combustion Science and Technology*, Vol. 185, No. 3, 2013, pp. 363-378.
- [7] Burguburu, J., Cabot, G., Renou, B., Boukhalfa, A., Cazalens, M.M., "Flame Stabilization by Hot Products Gases Recirculation in a Trapped Vortex Combustor," *Proceeding of American Society of Mechanical Engineers*, June 2012, pp. 319-328.
- [8] Jin, Y., Li, Y., He, X., Zhang, J., Jiang, B., Wu, Z. Song, Y., Experimental Investigations on Flow Field and Combustion Characteristics of a Model Trapped Vortex Combustor, *Applied Energy*, Vol. 134, 2014, pp. 257-269.
- [9] Kumar, P.E. and Mishra, D., Combustion Noise Characteristics of an Experimental 2D Trapped Vortex Combustor, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 43, 2015, pp. 388-394.
- [10] Wu, Z., Jin, Y., He, X., Xue, C. and Hong, L., "Experimental and Numerical Studies on a Trapped Vortex Combustor with Different Struts Width, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 91, 2015, pp. 91-104.
- [11] Kumar, P.E. and Mishra, D., "Combustion Characteristics of a 2D Twin Cavity Trapped Vortex Combustor," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2017 .
- [12] Zbeeb, K., "Syngas Heating Value Effects on Performance and Emissions of a Trapped Vortex Combustor," *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 138, No. 5, 2016, pp. 052209.
- [13] Chen, S., Chue, R.S., Yu, S.C., Schlüter, J. U., "Spinning Effects on a Trapped Vortex Combustor," *Journal of Propulsion and Power*, 2016, pp. 1133-1145.
- [14] Ghenai, C., Zbeeb, K. and Janajreh, I., "Combustion of Alternative Fuels in Vortex Trapped Combustor," *Energy Conversion and Management*, Vol. 65, 2013, pp. 819-828.
- [15] Bruno, C. and Losurdo, M., 'The Trapped Vortex Combustor: an Advanced Combustion Technology for Aerospace and Gas Turbine Applications,' in: *Advanced Combustion and Aerothermal Technologies*, Eds., Springer, pp. 365-384, 2007 .
- [16] Kumar, P.E. and Mishra, D., "Numerical Investigation of the Flow and Flame Structure in an Axisymmetric Trapped Vortex Combustor, *Fuel*, Vol. 102, pp. 78-84, 2012 .
- [17] Kumar, P.E. and Mishra, D., "Numerical Simulation of Cavity Flow Structure in an Axisymmetric Trapped Vortex Combustor, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 21, No. 1, 2012, pp. 16-23.

جمع بندی

مفهوم محفظه با گردابه به دام افتاده، از یک جریان چرخشی غنی (از سوخت) که در حفره به دام افتاده است، استفاده می‌کند. در این حالت یک شعله پیلوت به وجود می‌آید و به صورت پیوسته مخلوط رقیق عبوری از بالای حفره را مشتعل می‌کند. ناحیه چرخشی محصولات داغ احتراقی درون حفره و اختلاط سریع آنها با مخلوط رقیق اصلی، یک منبع اشتعال پیوسته را فراهم آورده و شعله را پایدار می‌سازد. در این مقاله، جریان واکنشی مغشوش در محفظه احتراق با گردابه به دام افتاده به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. به منظور اعتبارسنجی مدل عددی، نتایج عددی مطالعه حاضر، با نتایج آزمایشگاهی سو و همکاران [۳] مقایسه شده است. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی TVC با نتایج محدود آزمایشگاهی موجود نتیجه گرفته شد، مدل K- ω -SST به همراه واکنش شیمیایی دو مرحله‌ای و مدل SAS به همراه مدل PDF، بهترین عملکرد را در محاسبه راندمان احتراق داشته و خطای این مدل‌ها برای محاسبه راندمان احتراق کمتر از ۵ درصد است. در مورد صدور آلاینده هیدروکربن نسوخته نیز عملکرد مدل K- ω به همراه واکنش شیمیایی دو مرحله‌ای و مدل SAS به همراه PDF بهتر از دیگر ترکیب‌ها بوده است. ضمناً در مورد صدور آلاینده مونوکسیدکربن نیز عملکرد این دو ترکیب بهتر بوده ولی مدل K- ω به همراه واکنش شیمیایی دو مرحله‌ای بهترین کارایی را داشته و خطای محاسبه آن کمتر از ۱۰ درصد است. همچنین، نتایج نشان می‌دهند با افزایش نسبت هم‌ارزی کلی و در نتیجه کاهش میزان هوا، راندمان احتراق و شاخص آلاینده‌گی NO_x، کاهش می‌یابند. برخلاف این دو پارامتر، با افزایش نسبت هم‌ارزی کلی، شاخص آلاینده‌گی مونوکسیدکربن و هیدروکربن نسوخته افزایش می‌یابند. ضمناً با افزایش دمای جریان اصلی ورودی به محفظه، دمای کلی احتراق افزایش یافته و محتوای سوخت در خروجی محفظه کاهش یافته و در نتیجه میزان راندمان احتراق افزایش می‌یابد. با افزایش دمای جریان ورودی اصلی، میزان شاخص آلاینده‌گی هیدروکربن نسوخته و مونوکسید کربن کاهش می‌یابد. ضمناً روند تغییر میزان شاخص آلاینده‌گی NO_x، برای دماهای ورودی مختلف، روند یکنوایی نداشته و میزان شاخص NO_x در دمای ورودی ۴۰۰ درجه کلوین، کمینه است.

مراجع

- [1] Hsu, K., Goss, L., Trump, D. and Roquemore, W., "Performance of a Trapped-Vortex Combustor," *AIAA Paper*, Vol. 810, 1995 .
- [2] Roquemore, W., Shouse, D., Burrus, D. and et.al., "Vortex Combustor Concept for Gas Turbine Engines,"

- [23] Menter, F. R., "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 8, 1994, pp. 1598-1605.
- [24] Menter, F.R. "Review of the Shear-Stress Transport Turbulence Model Experience from an Industrial Perspective," *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Vol. 23, No. 4, 2009, pp. 305-316.
- [25] Rotta, J. C., *Turbulente Strömungen: Eine Einführung in Die Theorie und ihre Anwendung*, Springer-Verlag, 2013.
- [26] Egorov, Y., Menter, F., Lechner, R. and Cokljat, D. "The Scale-Adaptive Simulation Method for Unsteady Turbulent Flow Predictions. Part 2: Application to Complex Flows, Flow," *Turbulence and Combustion*, Vol. 85, No. 1, 2010, pp. 139-165.
- [27] Menter, F. and Egorov, Y., "The Scale-Adaptive Simulation Method for Unsteady Turbulent Flow Predictions. Part 1: Theory and Model Description, Flow," *Turbulence and Combustion*, Vol. 85, No. 1, 2010, pp. 113-138.
- [18] Merlin, C., Domingo, P., Vervisch, L., "Large Eddy Simulation of Turbulent Flames in a Trapped Vortex Combustor (TVC)-A Flamelet Presumed-pdf Closure Preserving Laminar Flame Speed," *Comptes Rendus Mécanique*, Vol. 340, Issue 11-12, 2012, pp. 917-932.
- [19] Jiang, B., He, X., Jin, Y. and et. al., "Effects of Multi-Orifice Configurations of the Quench Plate on Mixing Characteristics of the Quench Zone in an RQL-TVC Model," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 8, 2016, pp. 57-68.
- [20] Deng, Y. and Su, F., "Low Emissions Trapped Vortex Combustor," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology, An International Journal*, Vol. 88, No. 1, 2016, pp. 33-41.
- [21] Fluent, User's Guide, 2014 .
- [22] Menter, F. R., Kuntz, M. and Langtry, R., Ten Years of Experience with the SST Turbulence Model *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4*, Begell House Inc, 2003, pp. 625-632.