

مطالعه عددی احتراق متان در جریان چرخشی

سید بشیر اجله^{۱*}، صادق تابع جماعت^۲، مسعود عیدی عطارزاده^۳

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(^{*} نویسنده مخاطب: ajelleh@aut.ac.ir)

چکیده

در مقاله پیشرو، جریان احتراقی چرخشی درون محفظه بسته با روش عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این شبیه‌سازی، از روش RANS مدل آشفتگی k - استفاده شده است و برای تأیید صحت روش مورد استفاده با نتایج تجربی به روش LDV مقایسه شده‌اند. مقایسه نتایج حل نشان دهنده‌ی همخوانی بسیار مناسب نیمرخ دما، سرعت و گونه‌های احتراقی برای محفظه مذکور می‌باشند که با روش عددی و تجربی بدست آمده‌اند. این همخوانی بدین معنی است که برای پیش بینی رفتار جریان دارای احتراق، در زمانی که آلاینده‌ها مطرح نباشد، استفاده از یک فرآیند دو مرحله‌ای و نوع مناسب از مدل آشفتگی k - اطلاعات مناسبی را ارائه می‌کند.

واژه‌های کلیدی: چرخانه^۴ - متان هوا - k - RNG - احتراق

۱- مقدمه

با توسعه ابزارهای مورد استفاده در شبیه‌سازی جریان سیال - نرم افزاری و سخت افزاری - استفاده از روش‌های دارای دقت بالا مانند LES و DNS، بیش از پیش مورد علاقه محققین قرار گرفته است. اما در کنار مزایای بسیار خوبی که در دقت پیش‌بینی جریان حاصل می‌شوند، پیچیده شدن معادلات و افزایش حجم محاسباتی مشکلی است که نتیجه آن افزایش زمان حل و افزایش هزینه تجهیزات خواهد بود. برای شبیه‌سازی جریان با هزینه محاسباتی کمتر و داشتن دقت مناسب از روش‌های زیر مجموعه RANS بهره می‌برند. اما به دلیل نارسایی RANS در شبیه‌سازی جریان دارای گردابه، الگوی گردابه k - به این مجموعه اضافه می‌گردد و به صورت همزمان با معادلات RANS حل می‌شود. شیرین زاده و مهدوی مقدم (۱) (۱۳۸۹) با استفاده از روش k - RNG و Reynolds Stress تأثیر برخی متغیرها مانند نسبت هوا به سوخت، عدد چرخش و زاویه پاشش سوخت را مورد بررسی قرار داده‌اند. لی و همکاران (۲) (۲۰۰۶م) با استفاده روش k - احتراق و خنک کاری دیواره‌ی محفظه احتراق یک توربین گاز هوایی را شبیه سازی کردند. پوینست و همکاران (۳) نیز با استفاده از روش LES جریان داخل یک محفظه‌ی احتراق آزمون را شبیه سازی و پایداری احتراق را مورد بررسی قرار داده‌اند. لاکازه و همکاران (۴) (۲۰۰۹) با استفاده

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

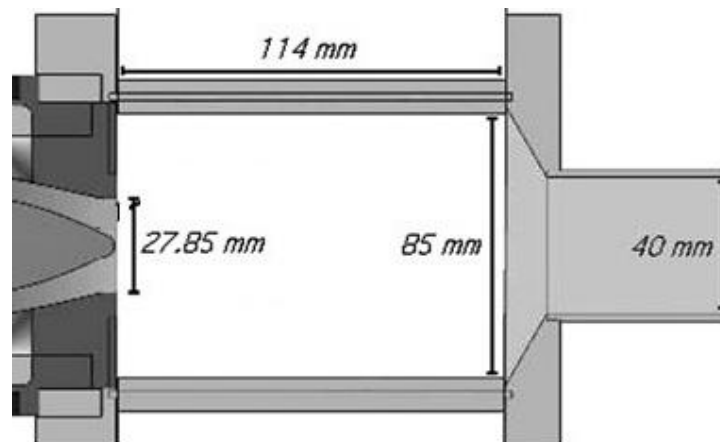
۲- دانشیار، دانشکده هوافضای دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

از شبیه سازی LES احتراق جرقه‌ای یک جریان جت آشفته‌ی متان را شبیه سازی نمودند. میرحسینی، مقدّس و مستوفی‌زاده (۱۳۹۰) (۵) جریان و انتقال حرارت محفظه احتراق یک موتور هوایی را با استفاده از k-Standard شبیه سازی کرده‌اند. گیریدهاران و مونگیا (۶) جریان خروجی از چرخانه محفظه‌ی احتراق موتور CFM56 را شبیه‌سازی نمودند. در مقاله پیشرو نتایج بدست آمده از روش k- با نتایج تجربی و نتایج شبیه سازی LES مقایسه شده‌اند. نکته‌ای که در شبیه سازی جریان احتراق محفظه احتراق هائز اهمیت است وجود گونه‌های مختلف شرکت کننده در احتراق است که هر یک رفتار ویژه به خود را در برابر واکنش، آزادسازی یا جذب انرژی و افزایش دما نشان می‌دهند. بنابراین یک الگوی آشفته‌گی مناسب باید بتواند در کنار شبیه سازی جریان آشفته‌ی سیال، قابلیت پیش بینی مناسب تغییرات جریان در ضمن انجام واکنش را داشته باشد، که با استفاده از نیمرخ میزان گونه‌های واکنشی در هر مقطع و نیمرخ‌های مربوط به سرعت می‌توان در این مورد قضاوت کرد.

۲- هندسه مورد بررسی

هندسه مورد بررسی، شکل ۱، یک محفظه‌ی آزمون دارای ورودی هوای مجهز به چرخانه است که هوا با عبور از میان پره‌های چرخانه دارای مؤلفه‌های محوری، شعاعی و مماسی می‌شود. طول محفظه ۱۱۴ mm، قطر خروجی ۴۰ mm و قطر اصلی محفظه ۸۵ mm است. جریان پس از عبور از چرخانه در حفره‌ای در کف محفظه به قطر ۲۷/۸۵ mm وارد محفظه می‌شود.



شکل ۱- هندسه محفظه آزمون (۴)

۳- معادلات حاکم

جریان مورد بررسی در این مسئله از نوع پایا است و با توجه به شرایط مرزی اعمال شده در ورودی و هندسه محفظه استفاده شده، عدد رینولدز جریان حدود ۸۷۰۰ است که برای جریان داخلی نشان دهنده‌ی آشفته بودن جریان است. با توجه به این موضوع برای شبیه سازی معادلات باید روابط مربوط به اغتشاش نیز به طور همزمان حل شوند که به معادلات پایه، معادلات ناویر-استوکس، افزوده میگردند. بنابراین ۶ معادله شامل: پایستگی جرم، پایستگی تکانه، پایستگی انرژی به همراه معادله پایستگی اتم‌ها و دو معادله مربوط به آشفته‌گی جریان باید حل شوند. معادلات ۱ تا ۴ معادلات RANS جریان سیال را نشان می‌دهد.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = 0 \quad \text{معادله ۱}$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla u = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho \sum_{k=1}^N Y_k f_k \quad \text{معادله ۲}$$

$$\rho \frac{De}{Dt} = \rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla e = \nabla \cdot q - p \nabla \cdot u + \tau \cdot \nabla u + \rho \sum_{k=1}^N Y_k f_k \cdot V_k \quad \text{معادله ۳}$$

$$\rho \frac{DY_k}{Dt} = \frac{\partial Y_k}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla Y_k = \nabla \cdot (-\rho V_k Y_k) + \omega_k \quad \text{معادله ۴}$$

در معادلات فوق، نماد چگالی، ρ نماد سرعت، u نماد فشار، p دما بر حسب کلوین و q انرژی (گرما) داده شده به المان سیال را نشان می‌دهد. E انرژی داخلی المان سیال را نشان می‌دهد و ω_k نماد تنسور تنش المان سیال است.

۴- شرایط مرزی

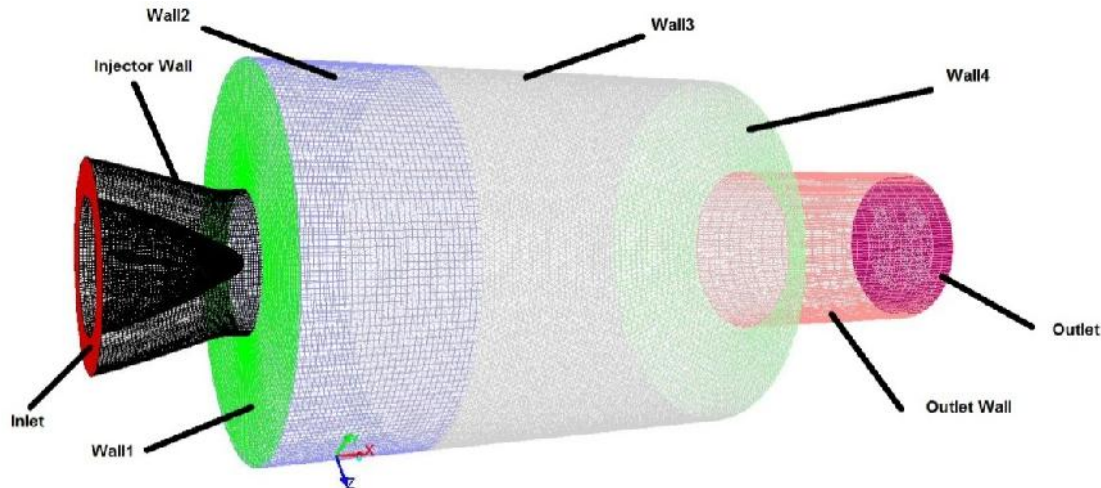
برای سادگی در شبیه سازی و استفاده از اطلاعات دقیق ارائه شده در مرجع (۳)، بخش ابتدای چرخانه (پره‌ها) از هندسه مجموعه حذف شده است و برای ورودی جریان از شرط مرزی سرعت بهره برده شده است. بدین ترتیب جریان با عبور از کانال پس از چرخانه به محفظه وارد می‌شود. در خروجی محفظه، با توجه به تخلیه محصولات به محیط و انجام آزمایش در فشار ۱ اتمسفر، از خروجی فشار استفاده شده است. برای دیواره‌ها هم شرط مرزی به صورت دما اعمال شد. در جدول ۱ مقادیر شرایط مرزی مورد استفاده در هندسه حل ارائه شده است.

جدول ۱ شرایط مرزی اعمال شده در حل

شرط مرزی	نوع شرط مرزی	مقدار		
		شعاعی	مماسی	محوری
ورودی چرخانه	Velocity Inlet (m/s)	9	15	12
جداره ورودی	Wall-temperature	700k		
جداره محفظه	Wall-temperature	1500k		
شیپوره خروجی	Wall-temperature	1200K		
خروجی	Pressure Outlet	Guage Pressure = 0		
فشار کارکرد	-	101325 Pa		

۵- مشخصات جریان

جریان سیال ورودی به محفظه به صورت ترکیب پیش مخلوط متان-هوا در نظر گرفته شده است. با توجه به اطلاعات ارائه شده در مرجع (۳) دبی جرمی هوا ۰/۰۱۲۲۳ کیلوگرم بر ثانیه و دبی جرمی سوخت ۰/۰۰۰۵۹ کیلوگرم بر ثانیه و معادل «نسبت هم‌ارزی»^۱ ۰/۸۳ است. دمای مخلوط در ورودی ۳۰۰ کلوین و فشار محفظه ۱۰۱/۳۲۵ کیلو پاسکال اعمال شده است. با توجه به تغییرات ناچیز فشار و وجود مقدار هوای اضافی، عمده‌ی گونه‌های موجود در محفظه را هوا تشکیل می‌دهد که موجب می‌گردد خواص سیالات ورودی و خروجی از محفظه به صورت گاز ایده‌آل تراکم ناپذیر در نظر گرفته شود. ظرفیت حرارتی گونه‌های شرکت کننده در واکنش به صورت چند جمله‌ای تابع دما با ضرایب پیش فرض نرم افزار تنظیم شد.



شکل ۲ - شرایط مرزی شبکه محاسباتی

۶- روش حل عددی

برای مسئله‌ی مذکور از نرم‌افزار Fluent استفاده گردید که شرایط مرزی و تنظیمات حلگر بر طبق آن چه که توضیح داده شد، در نرم افزار اعمال گردید. برای شبیه سازی آشفته‌گی جریان، از الگوی آشفته‌گی $k-\epsilon RNG$ با در نظر گرفتن تأثیر دیواره استفاده شد. برای بررسی استقلال نتایج حل از شبکه، از سه شبکه محاسباتی که به ترتیب حدود ۸۲۹۰۰۰، ۱۲۰۰۰۰۰ و ۲۱۶۰۰۰۰ جزء حجمی استفاده گردید. پس از بررسی استقلال نتایج از تعداد سلول‌های شبکه محاسباتی مورد استفاده، شبکه‌ی دارای ۲۱۶۰۰۰۰ سلول انتخاب شد. واکنش به صورت دو مرحله‌ای در نظر گرفته شد و برای حل از الگوی Species Transport استفاده شد.

در مقاله جاری با توجه به آن که آلاینده‌گی و تولید NOx هدف اصلی از شبیه‌سازی نیست، واکنش متان-هوا دو مرحله‌ای در نظر گرفته شد و ضرایب مورد استفاده در واکنش نیز از کتابخانه نرم‌افزار استخراج گردید.

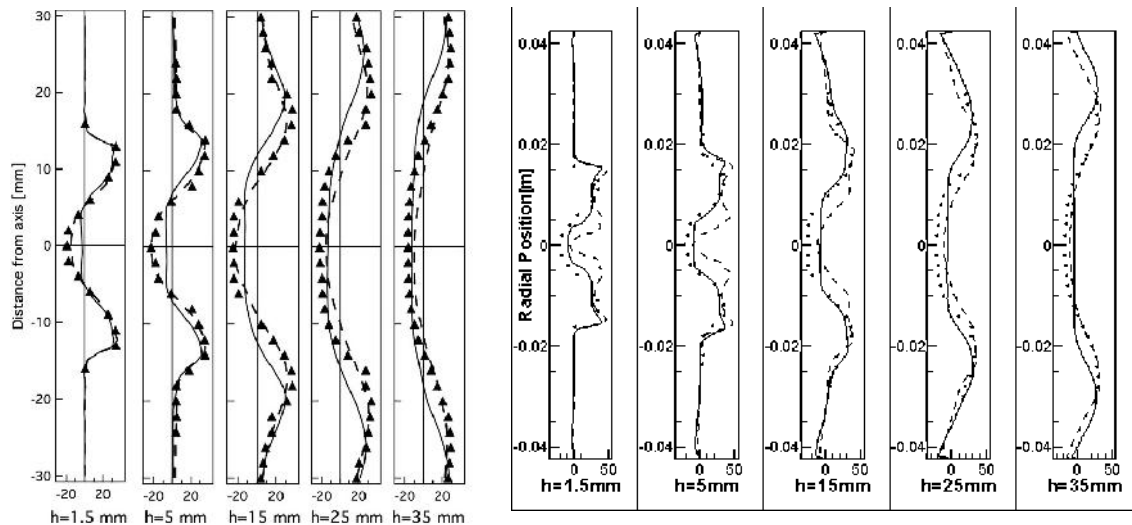
¹ Equivalence Ratio

جدول ۱ انرژی فعالسازی و ضریب پیش توان مورد استفاده در شبیه سازی واکنش

واکنش	ضریب پیش توان	انرژی فعال سازی
$CH_4 + 1.5O_2 \rightarrow CO + 2H_2O$	$5/0.12e+11$	$2e+08$
$CO + O_2 \leftrightarrow CO_2$	$2/239e+12$	$1/7e+8$

۷- بررسی صحت نتایج

سنجش صحت نتایج، با استفاده از مقایسه داده‌های حل عددی با داده‌های تجربی مرجع (۳) بدست آمده از روش Laser Doppler Velocimetry (LDV) انجام شد. با توجه به آن که در جریان احتراق بایستی سرعت جریان، واکنش و تغییرات دمایی به صورت همزمان شبیه سازی شوند؛ نیمرخ دما، سرعت محوری جریان و کسر جرمی CO_2 مورد بررسی قرار گرفته‌اند.



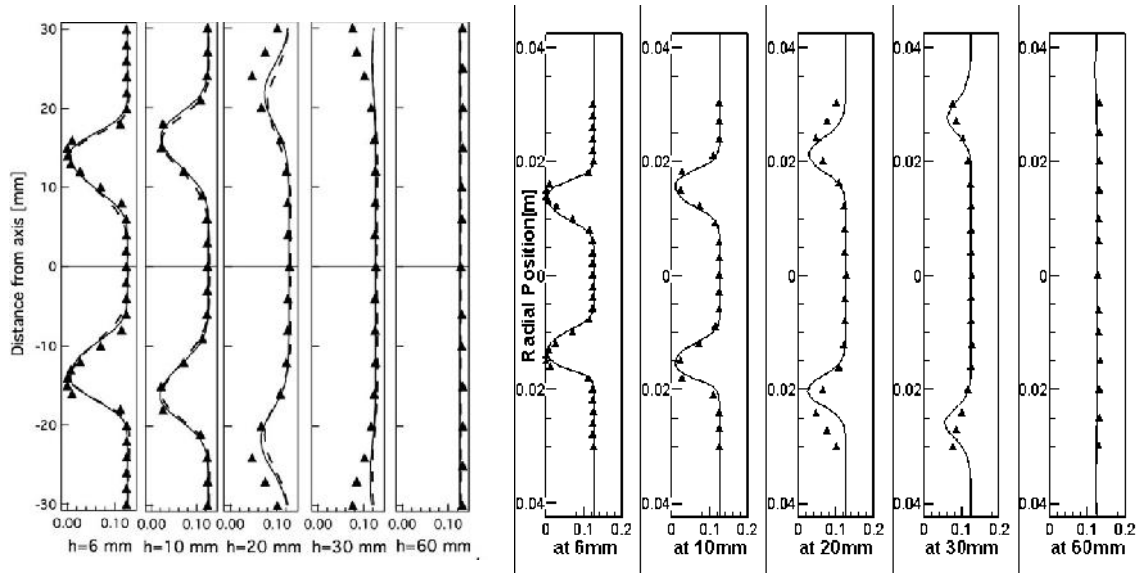
ب) مقایسه نتایج تجربی (مثلث) و حل LES

الف) نیمرخ سرعت محوری در مقاطع مختلف محفظه

شکل ۳ مقایسه نتایج تجربی با روش‌های عددی برای سرعت محوری محفظه در مقاطع مختلف، الف: حل $k - \epsilon RNGRANS$ و ب: حل $k - \epsilon Standard$ (خط چین) و

ب: حل LES

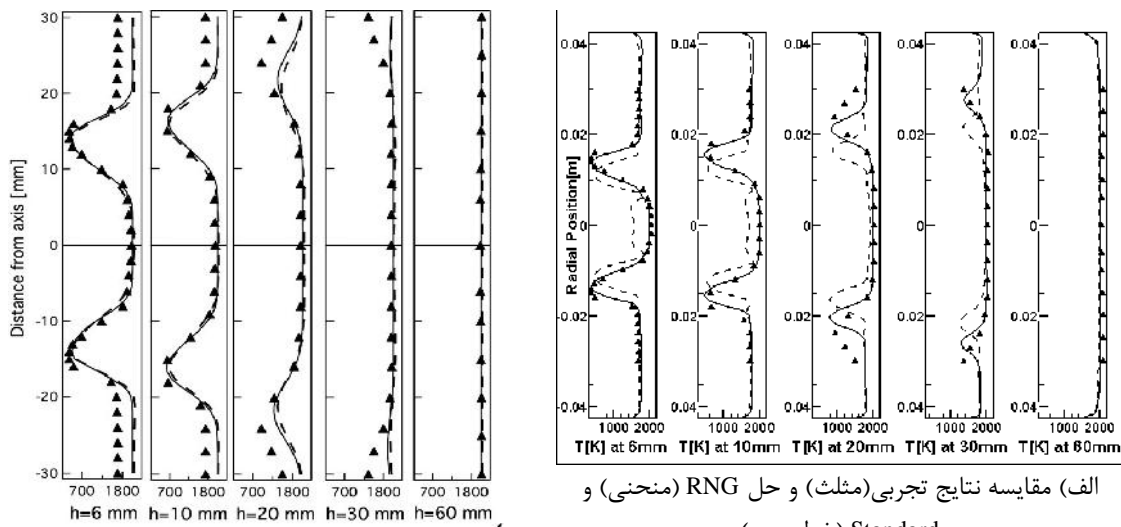
مقایسه نتایج شکل ۳ (الف) و (ب) نشان می‌دهد که برای شبیه سازی جریان پایای درون محفظه در نسبت هم‌ارزی $0.8/3$ ، نتایج حل LES و RNG نسبت به داده‌های تجربی در نقاط مشابهی اختلاف دارند. برای انتخاب نوع مدل $k - \epsilon$ نتایج $k - \epsilon Standard$ و $k - \epsilon RNG$ مقایسه شد. شکل ۳ (الف) نشان می‌دهد که مدل آشفتنگی $k - \epsilon Standard$ ، شیوهی مناسبی برای شبیه‌سازی جریان درون محفظه‌ی دارای چرخانه نیست. در هر دو روش RNG و LES نیمرخ کسر جرمی CO_2 در مقطع ۲۰ میلی‌متر و شعاع حدود ۲۰ تا ۳۰ میلی‌متری از نتایج عددی فاصله می‌گیرد. نکته دیگری که در هر دو نمودار قابل توجه است تطابق بسیار مناسب نتایج برای جریان نزدیک خروجی چرخانه است که تقریباً به صورت کامل بر یکدیگر منطبق‌اند (شکل ۴). شکل ۵ روندی مشابه آن چه برای کسر جرمی CO_2 توصیف شد را در خصوص نیمرخ دمای مقاطع مختلف محفظه نشان می‌دهد.



ب) مقایسه نتایج تجربی (مثلث) و حل LES

الف) مقایسه نتایج تجربی (مثلث) و حل $k - \epsilon RNG$

شکل ۴ مقایسه نتایج عددی $k - \epsilon RNG$ (الف) و LES (ب) با یکدیگر برای کسر جرمی CO_2 در مقاطع مختلف محفظه



ب) مقایسه نتایج تجربی (مثلث) و LES

الف) مقایسه نتایج تجربی (مثلث) و حل RNG (منحنی) و Standard (خط چین)

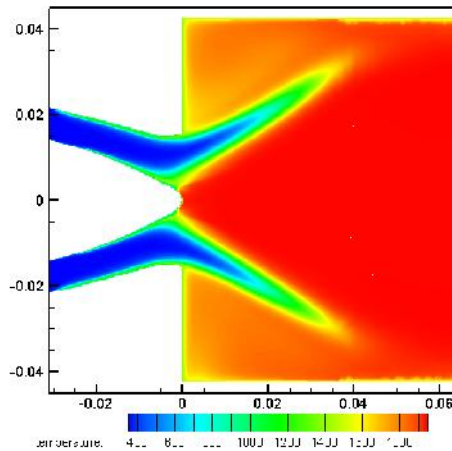
شکل ۵- مقایسه نتایج عددی $k - \epsilon RNG$ (الف) و LES (ب) با یکدیگر برای دما در مقاطع مختلف محفظه

۸- بررسی نتایج

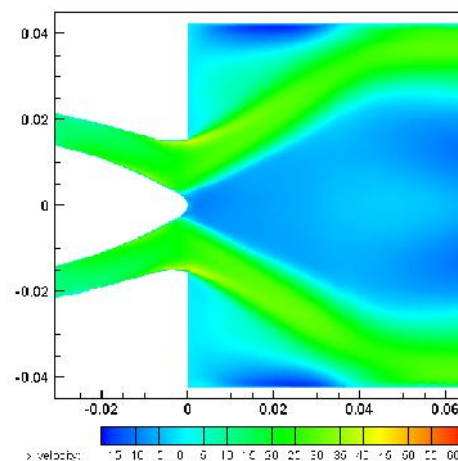
شکل ۶ نشان دهنده‌ی توزیع سرعت محوری جریان در ابتدای محفظه بر روی صفحه تقارن است. همان طور که در شکل مشخص است؛ به دلیل خواص ذاتی یک جریان چرخشی (Swirl Flow)، پس از خروج گاز از درون کانال چرخش، با وجود

آنکه کانال جریان را به سمت مرکز محفظه هدایت می‌کند، نیروی ناشی از سرعت چرخشی، جریان را به طرفین منحرف کرده و موجب باز شدن آن می‌شود. بدین ترتیب جریان پس از ورود به ناحیه احتراق به دیواره‌های اطراف می‌چسبد و ناحیه باز چرخش (Recirculation Zone) را در میانه‌ی محفظه ایجاد می‌نماید. همچنین در ابتدای محفظه در کنار دیواره‌ی کف محفظه نیز جریان چرخشی ایجاد می‌گردد (شکل ۶-الف). جریان چرخشی مرکزی تشکیل شده موجب می‌شود تا بخشی از محصولات داغ حاصل از احتراق به صورت پیوسته در ارتباط با جریان ورودی باشند و با انتقال شار حرارتی بالا به جریان پیش مخلوط ورودی، موجب پایداری شعله در این ناحیه شوند.

در شکل ۶-ب همچنین مشخص می‌گردد که به دلیل باز شدن جریان در خروجی چرخانه (ورودی ناحیه احتراقی) شعله به اطراف کشیده می‌شود. این کشیده شدن شعله را کانتور دمای موجود در این تصویر به خوبی نشان می‌دهد که در مقایسه نتایج عددی و تجربی، شکل ۶، نیز این امر به وضوح قابل مشاهده است. با در نظر گرفتن دمای حدود ۱۵۰۰ کلوین (۴) برای ناحیه شعله، شکل ۶-ب نشان می‌دهد که در فاصله‌ی حدود ۰/۰۴ متری از ابتدای محفظه احتراق تقریباً به صورت کامل انجام می‌شود. در شکل ۶-ب مشخص است که شعله‌ی ایجاد شده به داخل ورودی چرخانه کشیده می‌شود. دلیل این موضوع وجود لایه مرزی‌ای است که موجب کاهش سرعت جریان و در نتیجه ورود شعله به داخل کانال می‌شود.



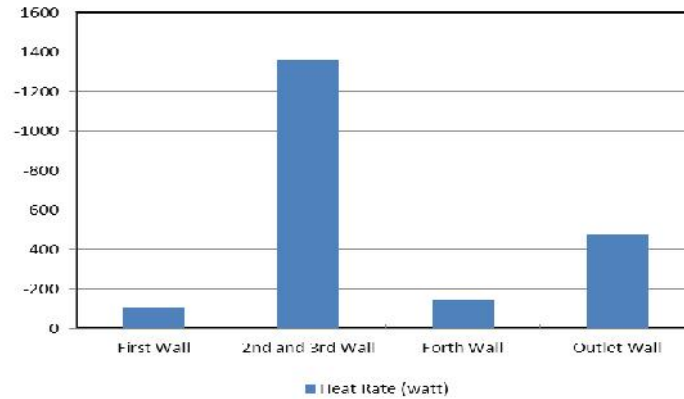
ب) کانتور توزیع دما (کلوین)



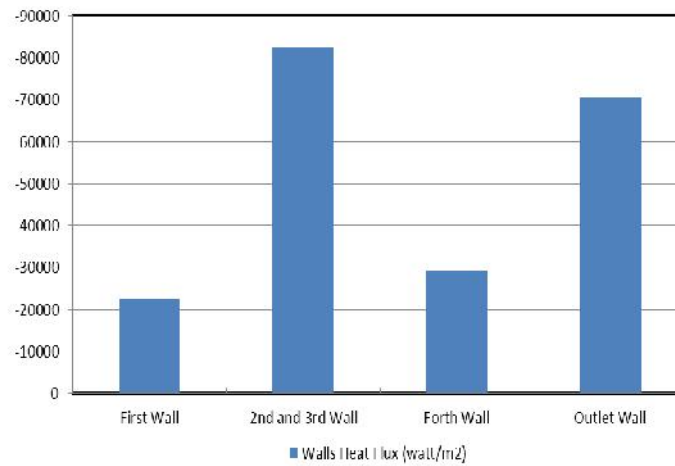
الف) کانتور توزیع سرعت محوری (متر بر ثانیه)

شکل ۶ کانتورهای سرعت محوری (الف) و دما (ب) در صفحه تقارن محفظه در نزدیکی ورودی

شکل ۷ نشان دهنده‌ی میزان انرژی‌ای است که با توجه به شرایط مرزی اعمال شده از دیواره‌های محفظه عبور می‌کند. همان‌طور که در این نمودار مشخص است، ناحیه‌ای که در آن احتراق انجام می‌شود دارای بیشترین میزان انرژی منتقل شده به دیواره‌ها است. شکل ۸ نیز نشان می‌دهد که همین نسبت در میزان شار حرارتی دیواره‌ها وجود دارد، بدین معنی که از جداره‌های ناحیه احتراقی حرارت بیشتری نسبت به جداره‌های خروجی و جداره‌ی ابتدای محفظه منتقل می‌گردد.

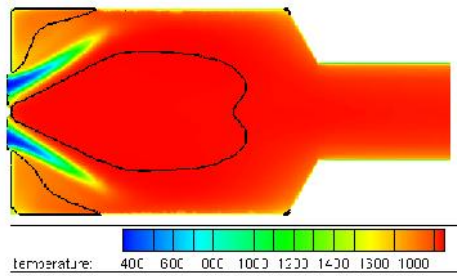


شکل ۷- انتقال حرارت از دیواره‌های محفظه

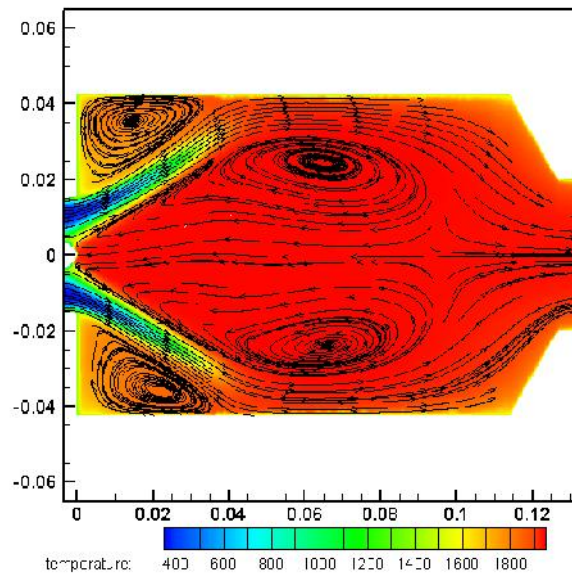


شکل ۸ - شار حرارتی هر یک از دیواره‌های محفظه

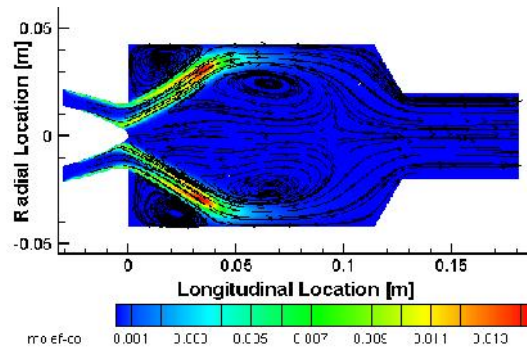
شکل ۹، شکل ۱۰ و شکل ۱۱ نشان دهنده‌ی نواحی باز چرخش جریان درون محفظه هستند. شکل ۹ نشان می‌دهد که بیشینه دما در ناحیه بازگشتی مرکزی اتفاق می‌افتد. همچنین جریان ورودی به محفظه در لحظه‌ی اول وارد این ناحیه نمی‌شود بلکه ناحیه بازگشتی را دور زده و در همین حین احتراق آن انجام می‌شود. شکل ۱۱ همچنین نشان دهنده‌ی ناحیه‌ی اصلی انجام فرآیند احتراق در محفظه است. این ناحیه در حقیقت مجرای است که از میان ناحیه مرکزی و ناحیه گوشه‌ی محفظه، به عنوان دو ناحیه باز چرخش، جریان مواد ورودی را به درون محفظه هدایت می‌کند.



شکل ۹ نواحی بازچرخش جریان (درون مرزهای سیاه رنگ) بر روی کانتور دما



شکل ۱۰- خطوط جریان در صفحه تقارن محفظه به همراه کانتور دما



شکل ۱۱- کانتور توزیع کسر جرمی CO به همراه خطوط جریان



۹- نتیجه گیری

در این مقاله، جریان چرخشی با استفاده از دو روش k -RNG و k -Standard شبیه سازی شده و با نتیجه تجربی صحت گذاری شد. نتایج بدست آمده نشان داد که استفاده از روش k -RNG برای مدل سازی جریان های محدود به دیواره و چرخشی بسیار مناسب تر است. همچنین در صورت شبکه بندی صحیح، دقت نتایج بدست آمده از روش RANS همانند روش LES خواهد بود. در این مطالعه مشخص گردید که به دلیل حضور لایه مرزی در خروجی چرخاننده، احتراق به درون آن کشیده می شود. همچنین شارحرارتی در دیواره میانی بسیار بیشتر از ناحیه خروجی و ورودی است و لازم است تا برای کنترل دمای دیواره های محفظه از خنک کاری مناسب استفاده شود.

مراجع

- ۱- بررسی عددی و بهینه سازی پارامترهای تاثیر گذار در محفظه احتراق توربین گاز با نرم افزار *Fluent*. شایرین زاده، فرهود and مهدوی مقدم، حسین. تهران: نخستین هواپیش منطقه ای مهندسی مکانیک. RCME2011-05-032. 1389.
- 2- *Combustion and cooling performance in an aero-engine annular combustor*. Li, L, Peng, X.F and Liu, T. 2006, Applied Thermal Engineering, pp. 1771-1779.
- 3- *Large Eddy Simulation of combustion instabilities in a lean partially premixed swirled flame*. Franzelli, Benedetta, et al., et al. Toulouse: ELSEVIER, 2012, Vol. 159.
- 4- *Large eddy simulation of spark ignition in a turbulent methane jet*. Lacaze, G, Richardson, E and Poinsot, T. 156, Toulouse: Elsevier, 2009.
- 5- *Large Eddy Simulations of gaseous flames in gas turbine combustion chambers*. Gicquel, L.Y.M, Staffelbach, G. and Poinsot, T. Toulouse: Elsevier, 2012.
- ۵- بررسی انتقال حرارت به لاینر و نحوه توزیع جریان در محفظه احتراق حلقوی موتور *J85-Ge21* امیر حسینی، سید ابوالحسن، مقدس، محمدحسن and مستوفی زاده، علیرضا. IRANAPA2012-16789. 1390.
- 6- *SWIRL CUP MODELING – PART VIII: SPRAY COMBUSTION IN CFM-56 SINGLE CUP FLAME TUBE*. Giridharan, Manampathy G and Mongia, Hukam C. Cincinnati: AIAA, 2003. AIAA-2003-0319.