

بهبود مصرف سوخت و کاهش تولید آلاینده‌ها در محفظه احتراق میکروتوربین گاز ارتقا یافته بر اساس تغییر هندسی محدود

رضا آقایی طوق^۱

^۱ استادیار، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، reza_tog@srbiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۶/۲۵

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۲/۱۲

چکیده

مقاله حاضر به بررسی اثر تغییرات هندسی محدود در عملکرد محفظه احتراق یک میکروتوربین گاز ارتقا یافته خاص می‌پردازد. سوخت مورد استفاده در این محفظه گاز متان است. هدف از این کار، بهبود عملکرد محفظه از نظر مصرف سوخت و نیز کاهش آلاینده‌های NO و CO_2 است. به این منظور، ابتدا بر اساس محاسبات مربوط، یک محفظه احتراق برای موتور ارتقا یافته طراحی شد و بعد از آن، با ایجاد تغییراتی در حجم نواحی احتراق اولیه (PZ) و رقیق‌سازی (DZ)، دو هندسه دیگر به وجود آمد. سپس، با استفاده از تحلیل عددی سه-بعدی، عملکرد احتراق در هر سه هندسه مورد آزمایش و ارزیابی واقع شد. برای شبیه‌سازی عددی از مدل برهم‌کنش PDF و مدل آشفستگی $k-\varepsilon$ استفاده شده است. نتایج نشان‌داد محفظه با هندسه‌ای که ۲۵٪ حجم آن کاهش داده شده است، با ۱۰٪ کاهش نسبت سوخت به اکسیدکننده (FAR)، الگوی جریان و عملکرد بهتری دارد و میزان آلاینده‌های مذکور در آن به‌طور میانگین، بیش از ۳۰٪ کاهش یافته است.

واژگان کلیدی

محفظه احتراق، میکروتوربین گاز، بهبود عملکرد، اکسید نیتروژن، دی‌اکسید کربن، دمای خروجی.

۱. مقدمه

پایدار و بدون پدیده‌های نامطلوب، مانند خاموشی^۱ یا انفجار^۲ ایجاد شود. این چند جمله‌خیز در شرایط واقعی احتراق ممکن است به تعداد قابل توجهی از معادلات بیانجامد. به‌جهت وجود پیچیدگی‌های دینامیکی و مکانیکی در فرآیند کلی احتراق، این بخش از موتور کمتر از سایر بخش‌ها از پیش‌بینی‌ها و محاسبات نظری پیروی می‌کند؛ به این معنا که همواره در طراحی محفظه احتراق، یک فرآیند سعی و خطا وجود خواهد داشت. برای

محفظه احتراق بخش مهمی از یک موتور توربین گازی است. در واقع، برقراری تعادل بین پارامترهای عملکردی احتراق مانند بازده حرارتی و حتی میزان تولید آلاینده‌ها و نیز الگوی کلی جریان برعهده محفظه احتراق است. حفظ این تعادل کار بسیار دشواری است؛ زیرا مقدار قابل توجهی از سوخت و بسیار بیش از آن هوا (به‌طور مثال، با نسبت تقریبی ۱:۵۰)، بایستی در یک محیط کوچک و در زمانی اندک محترق شوند و در عین حال، شعله‌ای

موتورهای میکروتوربین گاز که ممکن است در شرایط آب و هوایی متفاوت، یا حتی با سوخت‌های متفاوت کار کنند، موضوع سازگاری عملکرد اجزاء موتور، از جمله محفظه احتراق به‌نظر جدی‌تر از موتورهای مشابه است. البته با وجود امکان استفاده از سوخت‌های گوناگون در توربین‌های گاز، استفاده از گاز متان به‌دلیل ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی از محبوبیت بیشتری برخوردار است. موضوعی که مورد علاقه کار حاضر نیز می‌باشد و مثالی از احتراق غیر پیش‌آمیخته است.

در کل، از دیدگاه مهندسی هزینه‌های طراحی محفظه‌های احتراق بالا است. انجام آزمایش‌هایی که بتواند اطمینان طراح را از عملکرد واقعی و بلندمدت محفظه تأمین کند، هم بودجه و هم زمان قابل توجهی می‌طلبد. راه مناسب‌تر برای کاهش هزینه‌ها، استفاده از تحلیل عددی سه‌بعدی جریان درون محفظه احتراق به‌منظور تأیید یا اصلاح مراحل پیشین طراحی است. کاری که امروزه با پیشرفت روش‌های تحلیل عددی و ارتقا قابل توجه کدها و نرم‌افزارهای تجاری شبیه‌سازی عددی، کمک قابل توجهی در افزایش دقت و سرعت طراحی داشته است.

البته باید یادآوری کرد که چه در گذشته و چه در حال حاضر، با توجه به سطح فناوری، انجام برخی آزمایش‌ها جزو هزینه‌های پیشرفت مهندسی است. به‌طور مثال، کاتموس و مک‌گتک (۱۹۸۹) [۱] آزمایش‌هایی را برای بررسی جریان چرخشی رقیق‌ساز در محفظه احتراق انجام دادند. آن‌ها تغییرات قابل توجهی در ناحیه برخورد جت‌های جریان رقیق‌سازی^۳ مشاهده کردند. امروزه چنین پدیده‌هایی را با استفاده از کدهای تجاری CFD به‌آسانی تشخیص می‌دهند و از نتایج آزمایش‌های تجربی مشابه گذشته در تأیید این داده‌های تحلیل عددی استفاده می‌کنند. بنابراین، بدیهی است که انجام آزمایش‌های تجربی در هر سطح از فناوری الزامی است؛ اما آزمایش‌های عددی به‌جهت برخورداری از برخی انعطال‌ها، مانند فرضیات ساده‌ساز، می‌تواند جنبه‌های مختلفی از آثار فیزیکی جریان سیال و واکنش‌های شیمیایی را عیان ساخته و اثر جداگانه پدیده‌ها را روشن‌تر کند. در عین حال، این آزمایش‌ها به‌منظور کاهش هزینه‌ها و زمان کلی فرآیند طراحی نیز مورد استقبال‌اند.

از جمله مثال‌هایی که در رابطه با اصلاح طراحی محفظه بر اساس نتایج تحلیل عددی می‌توان اشاره کرد، کار کالشرستا و همکاران (۲۰۰۸) [۲] است. آنان پدیده احتراق در محفظه احتراق

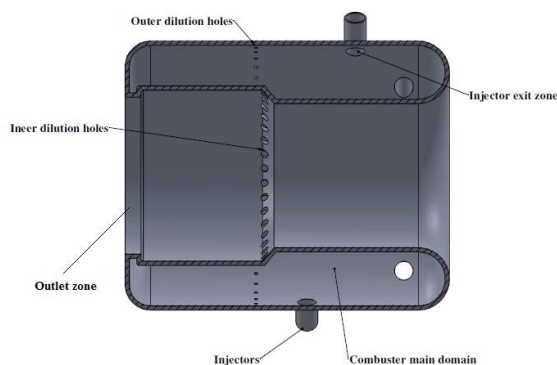
حلقوی یک توربین گاز کوچک را با استفاده از کد تجاری CFX شبیه‌سازی کردند و توانستند با استفاده از یک ناحیه اختلاط جایگزین، توزیع دمای خروجی را یک‌نواخت‌تر کنند.

در زمینه تحلیل جریان در محفظه‌های احتراق گازسوز، کارهای متعددی با اهداف گوناگون صورت گرفته است. به‌طور مثال، مدل‌سازی احتراق متان در محفظه میکروتوربین گاز توسط لوی و همکاران (۲۰۰۹) [۳] انجام شد. آنان با استفاده از مدل آشفتگی $k - \epsilon$ استاندارد، تحلیل مناسبی از احتراق مخلوط غیر پیش‌آمیخته در محفظه را انجام دادند که انطباق خوبی با نتایج تجربی داشته است. میچل و همکاران (۲۰۰۹) [۴] خنک‌کاری لایه‌ای بر روی دیواره‌ای که تعداد زیادی روزنه رقیق‌ساز بر روی آن تعبیه شده بود را به‌صورت عددی و تجربی بررسی کردند. هدف آنان ارزیابی چگونگی پاشش جریان رقیق‌ساز یا خنک‌ساز بوده است. چواکی قنای (۲۰۱۰) [۵] به‌طور عددی اثر تغییرپذیر بودن ترکیب سوخت و ارزش حرارتی آن بر عملکرد احتراق را مطالعه کرد. جعفر و همکاران (۲۰۱۱) [۶]، الگوی جریان در محفظه احتراق یک توربین گاز را با استفاده از روش عددی و تجربی مطالعه کردند. در محفظه مورد مطالعه آن‌ها از تیغه‌هایی برای بازچرخش جریان استفاده می‌شد تا شعله پایدار ایجاد شود. تیغه‌هایی با زاویه چرخش ۵۰ درجه، کم‌ترین افت فشار را در ایجاد ناحیه بازچرخش مناسب داشتند. پاتان و همکاران (۲۰۱۲) [۷] با استفاده از نرم‌افزار CFX، احتراق متان در یک محفظه احتراق توربین گازی را به‌صورت سه‌بعدی تحلیل کردند. آنان آثار تغییر پارامترهای مختلفی چون نسبت سوخت به هوا (FAR^4)، زاویه چرخش هوای ورودی و محل تعبیه سوراخ‌های ورود هوای رقیق‌ساز در عملکرد احتراق و آلاینده‌های حاصله را بررسی کردند. شهریاری و نظری (۲۰۱۶) [۸] با استفاده از تحلیل عددی و با به‌کارگیری مدل احتراقی PDF^۵ و مدل آشفتگی $k - \epsilon$ استاندارد، محفظه احتراق یک توربوجت ارتقا یافته را مطالعه کردند. هدف آنان بررسی عملکرد احتراق در شرایط پروازی مختلف بوده است.

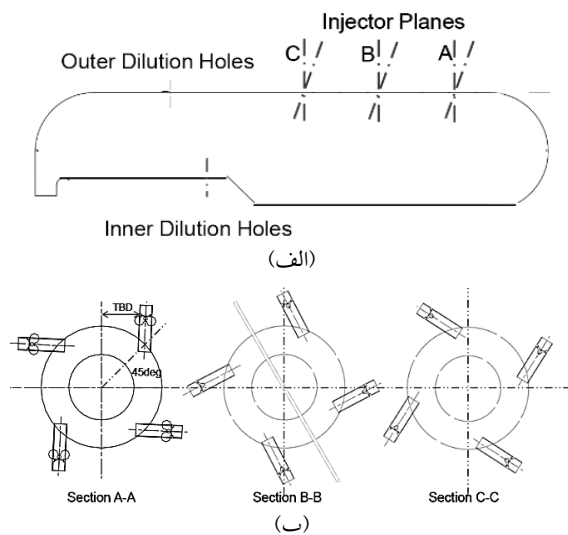
ارشادی و رجبی (۲۰۱۷) [۹] با استفاده از مدل‌های احتراقی PDF و EDM^۶ و مدل آشفتگی $k - \epsilon$ ، میزان هوادهی در مجرای سوخت در اعداد مختلف چرخش و تأثیر آن بر آلاینده مونواکسید نیتروژن (NO) را بررسی کردند. بر اساس نتایج کار آنان، در هر عدد چرخش مقدار هوادهی بهینه‌ای وجود دارد، که بر

۲. مدل هندسی مورد مطالعه

موتور ارتقا یافته که در این مقاله با نام M250 مشخص می‌شود، توان محوری حدود ۲۵۰ kW را تأمین می‌کند. الگوی اصلی و موتور پایه‌ای که مطالعات برای رسیدن به موتور ارتقا یافته بر اساس آن شکل گرفته است، یک میکروتوربین گازی تجاری خاص با توان اسمی ۲۰۰ kW است که در این جا با عنوان M200 شناخته می‌شود. در شکل ۱، بخش‌های مختلف محفظه احتراق مورد مطالعه نشان داده شده است. در شکل ۲، مقطعی از طرح‌نمای کلی محفظه و نحوه چیدمان و محل تعبیه سوخت‌پاش‌ها^۱ و روزنه‌های رقیق‌سازی نشان داده شده است.



شکل ۱. ساختار کلی محفظه احتراق مورد مطالعه



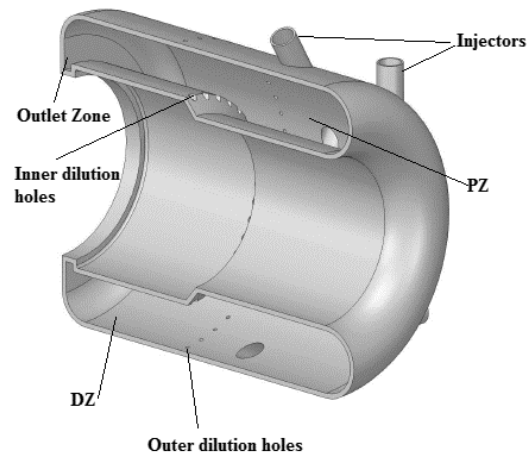
شکل ۲. طرح‌نمای کلی از محفظه اولیه: (الف) محل تعبیه سوخت‌پاش‌ها و روزنه‌های رقیق‌سازی؛ (ب) نحوه چیدمان سوخت‌پاش‌ها

بر اساس طرح‌واره‌های موجود و پس از انجام محاسبات ترموگازدینامیکی چرخه موتور ارتقا یافته، مدل سه‌بعدی محفظه

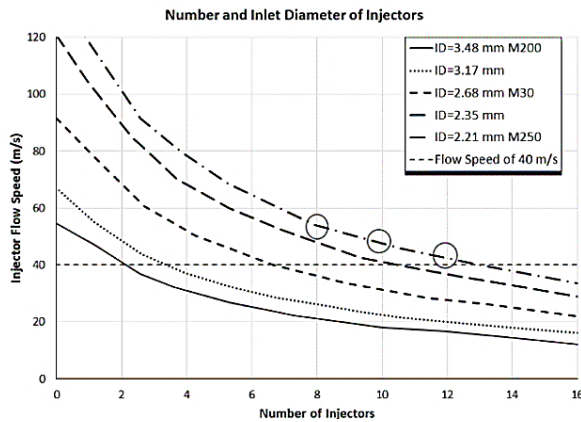
اساس آن علاوه بر احتراق کامل، میزان تولید آلاینده NO به حداقل می‌رسد. مطالعات افرادی چون بوشارت و جویی (۲۰۰۴) [۱۰] و تاتو و همکاران (۲۰۰۹) [۱۱] بر روی سرعت شعله آرام^۲ مخلوط متان- هوا نشان می‌دهد، زمانی که سرعت جریان در سوخت‌پاش ۵۰ برابر سرعت شعله آرام باشد، مقاومت در برابر خاموشی به مقدار بیشینه خود می‌رسد. تغییرات هندسی در جهت افزایش یا کاهش حجم محفظه در PZ و DZ می‌تواند بر میزان افت فشار سکون و نیز تعدیل یا افزایش دما در خروجی محفظه مؤثر باشد. به‌طور مثال، جویی و همکاران (۲۰۱۹) [۱۲] آثار تغییرات هندسی و FAR را بر عملکرد محفظه احتراق یک توربین گاز کوچک مطالعه کردند. آنان حجم محفظه را ۱۵٪ و مقدار FAR را ۴۰٪ افزایش دادند و در نهایت به این نتیجه رسیدند که حتی تغییرات جزئی در هندسه و حجم محفظه احتراق، تأثیر قابل توجهی بر عملکرد محفظه دارد.

هدف از کار حاضر، ارتقا و بهبود عملکرد محفظه احتراق برای یک میکروتوربین گاز ارتقا یافته است. به‌طوری‌که، علاوه بر تحقق دمای خروجی محاسبه شده برای موتور ارتقا یافته، بتوان با کاهش مصرف سوخت به ملاک‌های اقتصاد انرژی و کاهش تولید آلاینده‌های NO و CO₂ نیز دست یافت. موضوع بهبود و بهینه‌سازی سامانه‌های مختلف مهندسی در دهه‌های گذشته بسیار مورد توجه بوده و از راهبردهای اصلی در بهره‌وری انرژی بوده است. در این راستا، روش‌های بسیار پیش‌رفته با استفاده از الگوریتم‌های پیچیده در بهینه‌سازی استفاده می‌شود. در این مقدمه بایستی متذکر شد که هدف این کار، استفاده از ایده‌های ساده بر مبنای تعامل هندسه و سیال بوده و عدم ورود به مطالعات پیچیده و امکان بهره‌گیری از اصول اساسی مهندسی (هندسه)، که به مراتب کم‌هزینه‌تر و در دسترس‌تر از شیوه‌های مدرن است، درحقیقت، نگاه نوآورانه کار حاضر است. پس از انجام محاسبات ترموگازدینامیکی محفظه احتراق موتور ارتقا یافته، طراحی سه‌بعدی محفظه حلقوی که با مخلوط گازی غیر پیش‌آمیخته کار می‌کند انجام شده است. این محفظه در ناحیه اولیه^۳ (PZ) مخلوط سوخت گازی متان و هوا را دریافت کرده و در ناحیه رقیق‌سازی (DZ)، با استفاده از ردیف‌هایی از روزنه‌های هوا کار خنک‌سازی و تعدیل دما صورت می‌پذیرد. در این کار، مدل $k - \epsilon$ استاندارد برای مدل‌سازی آشفتگی، مدل احتراقی PDF برای مخلوط غیر پیش‌آمیخته و مدل تشعشی P1 استفاده شده است.

احتراق مطابق با شکل ۳ تولید شد. این هندسه در مقاله حاضر با نام هندسه اول شناخته می‌شود.



شکل ۳. مدل سه‌بعدی محفظه احتراق ارتقا یافته (هندسه اول): برش مقارن در امتداد محور طولی



شکل ۴. قطر داخلی و تعداد سوخت‌پاش‌ها

جدول ۱. مشخصات هندسی محفظه احتراق مورد مطالعه

طول (%)	PZ	DZ	کل
	۳۷،۳۰	۳۱،۹۵	۶۹،۲۵
قطر (%)	داخلی PZ	داخلی DZ	خارجی
	۳۳،۴۸	۳۹،۴۱	۷۲،۸۹
سوخت‌پاش و روزنه رقیق‌ساز	تعداد	قطر (%)	
سوخت‌پاش	۱۲	۴،۰۹	
روزنه‌های داخلی	۳۶	۱،۵۵	
روزنه‌های بیرونی	۴۸	۰،۷۷	

۲-۲. تغییر هندسه

از ملاحظات اصلی در طراحی محفظه، رسیدن به یک دمای مشخص با توزیع یک‌نواخت در خروجی با حداقل افت فشار سکون است. البته میزان آلاینده‌های تولیدی در فرآیند احتراق نیز همواره بخش مهمی از ملاحظات و چالش‌های طراحی است. برای تأمین چنین شرایطی کارهای تحلیلی و تجربی زیادی لازم است. هدف از کار حاضر، رسیدن به شرایط مطلوب در خروجی محفظه با لحاظ تغییرات هندسی محدود است؛ مانند کار مرجع [۱۲]. محدوده این تغییرات بر اساس جانمایی کلی محفظه در موتور ارتقا یافته و توسط طراح موتور تعیین شده است. بر اساس در کار حاضر، بر اساس محدودیت جانمایی کلی محفظه در موتور، دو هندسه دیگر تولید و اثر تغییرات هندسی اعمال شده بر روی آن‌ها بر عملکرد محفظه مطالعه شده است. با ۲۵٪ کاهش حجم PZ و DZ هندسه دوم و تنها با ۱۵٪ افزایش حجم DZ هندسه سوم ایجاد شده است. برای افزایش حجم DZ در هندسه

۲-۱. تعیین تعداد و قطر داخلی سوخت‌پاش‌ها

چنانچه به هر دلیلی متغیرهای عملکردی، مانند نسبت سوخت به هوا تغییر یابند، خاموشی (فلش‌بک) مهم‌ترین چالش برای محفظه احتراق خواهد بود. می‌توان با بهینه کردن طراحی سوخت‌پاش‌ها در جهت کمینه کردن ناحیه بازچرخش، یا افزایش سرعت حجمی جریان عبوری از سوخت‌پاش‌ها و نیز کاهش غلظت سوخت در ناحیه سرعت پایین، مقاومت در برابر خاموشی را افزایش داد. بر اساس مطالعات مراجع [۱۰] و [۱۱] و با توجه به داده‌های موتور اولیه، سرعت حجمی ۴۰ m/s در سوخت‌پاش‌ها مقاومت مناسبی در برابر خاموشی در موتور ارتقا یافته ایجاد خواهد کرد.

با در نظر گرفتن سهم هوا در PZ برای موتور ارتقا یافته، برای پنج قطر داخلی مختلف (۲،۲۱، ۲،۳۵، ۲،۶۸، ۳،۱۷ و ۳،۴۸ میلی‌متر) که با مقادیر قطر داخلی سوخت‌پاش‌های پنج موتور، از جمله M200، M30^{۱۰} و محفظه مورد مطالعه (موتور M250) سازگار هستند، جهت تعیین تعداد سوخت‌پاش‌ها بررسی شدند. این بررسی با استفاده از مدل‌های محاسباتی صفربعدی صورت گرفته است و صرفاً یک برآورد تخمینی است و چنانچه در شکل ۴ مشاهده می‌شود، برای محفظه ارتقا یافته (M250)، می‌توان تعداد سوخت‌پاش‌ها را بین ۸ تا ۱۲ عدد انتخاب کرد. با توجه به شکل‌های ۲ و ۳، سه صفحه سوخت‌پاش- هر کدام شامل ۴ عدد سوخت‌پاش، مجموعاً ۱۲ عدد- به‌طور مماس، مخلوط را در PZ تزریق می‌کنند. زاویه تزریق ۴۵ درجه است. هر صفحه با صفحه

در این مدل‌سازی، تابع دیواره scalable به‌طور خودکار توسط کد CFX انتخاب شده است. معادله (۴) انرژی جنبشی آشفته k و معادله (۵) نرخ اضمحلال انرژی آشفته ε را نشان می‌دهد. در این معادلات، G_k تولید انرژی جنبشی آشفته به‌سبب اختلاف سرعت‌ها، G_b تولید انرژی آشفته در اثر شناوری و Y_M سهم انبساط نوسانی در جریان آشفته تراکم‌پذیر را نشان می‌دهند. همچنین، ضرایب $C_{1\varepsilon} \dots C_{3\varepsilon}$ مقادیر ثابتی دارند.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (4)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

همان‌طور که در بخش مقدمه گفته شد، جهت برهم‌کنش اثر آشفته‌گی و نوسانات خواص جریان بر نرخ تولید و مصرف اجزاء در فرآیند احتراق، از مدل تابع چگالی احتمال، که با PDF [۸ و ۱۲] بیان می‌شود استفاده شده است. در این مدل، معادلات انتقال برای گونه‌های مجزا نوشته نمی‌شود؛ در عوض، معادله برای مقیاس بقا (f) حل می‌شود و غلظت هر جزء از توزیع کسری مخلوط پیش‌بینی شده به‌دست می‌آید.

برای مدل‌سازی تابش از مدل PI [۸ و ۱۲] استفاده شده است که ساده‌ترین مدل از مدل عمومی PN است؛ بنابراین، هزینه محاسباتی اندک و دقت بالا دارد. این مدل بر اساس گسترش شدت تابش I به سری‌های متعامد هم‌نوا می‌باشد. معادلات مربوط به مدل‌های اخیر در منابع مربوط قابل دسترس است.

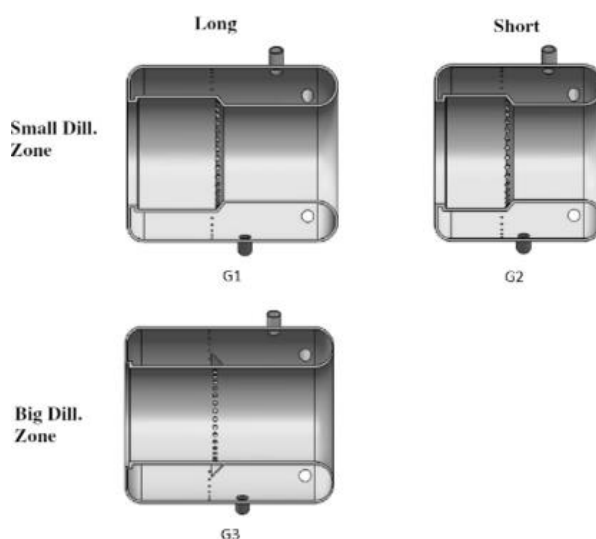
۴. شبکه محاسباتی و حل عددی

تحلیل عددی محفظه‌های مورد مطالعه با استفاده از کد تجاری ANSYS/CFX [۱۳] صورت گرفته است. آغاز کار با ایجاد شبکه محاسباتی برای میدان حل است. در این کار از کد GAMBIT [۱۴] برای تولید شبکه استفاده شده است. با توجه به وجود سطوح خمیده فراوان و اتصال مرزهای خطی و سطحی با اندازه‌های متفاوت و غالباً ریز، مانند روزنه‌های هوادهی متعدد، بنابراین از سلول‌های تتراهدرال در حجم استفاده شده است. اما در سطوحی که نیاز به محاسبات دقیق هست، مانند ورودی روزنه‌ها، از سلول‌های مربعی باسازمان استفاده شده است. شکل ۶ تصاویری از شبکه محاسباتی را نشان می‌دهد.

سوم، قطر داخلی این ناحیه با قطر داخلی PZ برابر فرض شده است. جدول ۲ خلاصه تفاوت حجمی محفظه‌ها و شکل ۵، طرح‌واره هندسه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهند.

جدول ۲. تفاوت حجمی هندسه‌های مورد مطالعه

هندسه اول	حجم PZ	حجم DZ
هندسه دوم	۰.۷۵	۱
هندسه سوم	۱	۱.۱۵



شکل ۵. هندسه‌های مورد مطالعه (G1~3: هندسه اول تا سوم)

۳. معادلات حاکم

معادلات به‌کار رفته در تحلیل عددی، معادلات حالت پایایی بقای جرم، مومنتوم و انرژی هستند. معادلات (۱) تا (۳)، به‌ترتیب این معادلات را ارائه می‌دهند.

$$\nabla(\rho \bar{V}) = S_m \quad (1)$$

که در این رابطه، S_m جمله چشمه و مربوط به اثر تبخیر سوخت است، ρ چگالی جریان و \bar{V} بردار سرعت است.

$$\nabla(\rho \bar{V} \bar{V}) = -\nabla \rho + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \bar{F} \quad (2)$$

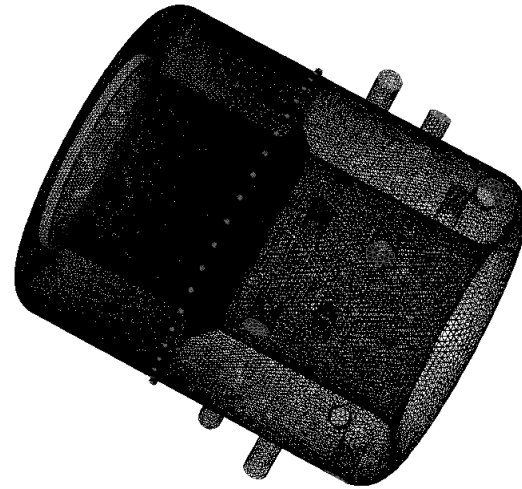
که در آن، \bar{F} بردار نیروهای سطحی و $\bar{\tau}$ تانسور تنش است.

$$\nabla(\rho \bar{V} H) = -\nabla \cdot \left(\frac{k_1}{c_p} \nabla H \right) + S_h \quad (3)$$

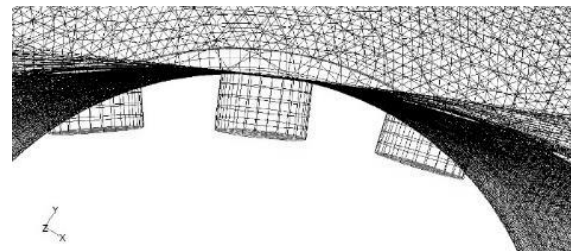
در این رابطه، H آنتالپی، k_1 ضریب هدایت حرارتی و S_h جمله چشمه انرژی است. معادلات تکمیلی دیگر در حل میدان جریان، معادلات آشفته‌گی هستند که در این کار از مدل $k - \varepsilon$ [۸ و ۱۲] استاندارد استفاده شده است.

۴-۱. مطالعه استقلال حل از شبکه محاسباتی

بر اساس مطالعه استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی، از بین چهار مدل محاسباتی تولید شده، که دارای اختلافی بین ۲۵ تا ۳۰ درصد با یکدیگر بوده‌اند، مدلی با تعداد سلول‌های بیش از ۱۹۰۰۰۰۰ به‌عنوان شبکه اصلی انتخاب شده است. در شکل ۷ نتایج محاسبه دما در یک صفحه میانی درون محفظه برای شبکه‌های مختلف نشان داده شده است.



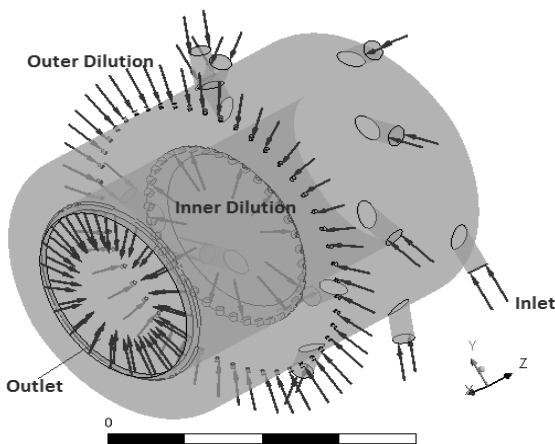
(الف)



(ب)

شکل ۶. شبکه محاسباتی تولید شده: (الف) شبکه محاسباتی کل میدان حل؛ (ب) شبکه با سازمان روی سطوح روزنه‌ها

محور افقی در نمودار شکل ۷، موقعیت نقاط داده نرمالایز شده در راستای محور میانی محفظه (محور ماشین) و محور عمودی، دمای استاتیک نرمالایز شده برحسب دمای طراحی در خروجی محفظه است. چنانچه مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از شبکه اولیه (درشت) در اغلب نقاط میانی دور از نتایج سایر شبکه‌هاست. این اختلاف به دلیل عدم توانایی شبکه درشت در تشخیص گردابه‌های تشکیل شده در این نواحی است. سایر شبکه‌ها اما، نتایج تقریباً مشابه و نزدیک به هم دارند. با ملاحظه صرفه اقتصادی محاسبات، شبکه دوم برای ادامه کار انتخاب شده است.

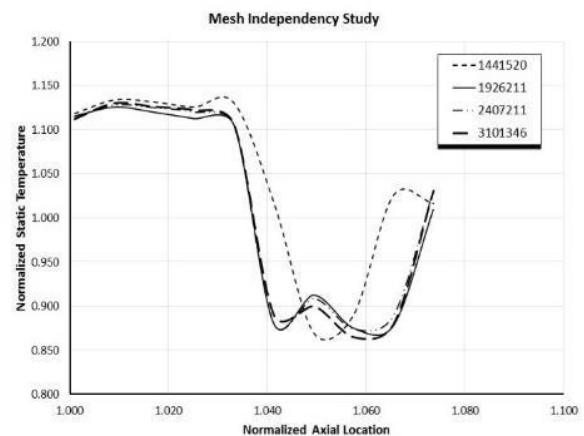


شکل ۷. مدل سیالاتی و شروط مرزی

این مطالعه برای هندسه اول صورت گرفته است و با توجه به چالش‌های اصلی در ایجاد شبکه که بیش‌تر مربوط به روزنه‌های رقیق‌سازی با قطرهای ریز است، برای هندسه‌های دیگر از الگوی مشابه استفاده شده است. تکرار فرآیند بررسی استقلال شبکه برای هندسه دوم حاکی از موفقیت این روش دارد.

۴-۲. شرایط مرزی

فشار سکون (۴ bar) و دمای سکون (۸۷۰ K) با ۱۰٪ شدت آشفستگی برای مرز ورودی تعیین شد. در مرز خروجی و ورودی روزنه‌های رقیق‌سازی، شرط مرزی دبی جرمی اعمال شد. درصد تزریق هوا در PZ از مسیر سوخت‌پاش‌ها و روزنه‌های داخلی و خارجی در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس محاسبات اولیه ترمودینامیکی چرخه، برای رسیدن به دمای ۱۳۵۰ K در خروجی، مقدار FAR=۰،۰۱۲ به دست آمده است. گفته شد که یکی از اهداف کار حاضر، کاهش مصرف سوخت به منظور کاهش میزان



شکل ۷. مطالعه استقلال حل از شبکه محاسباتی

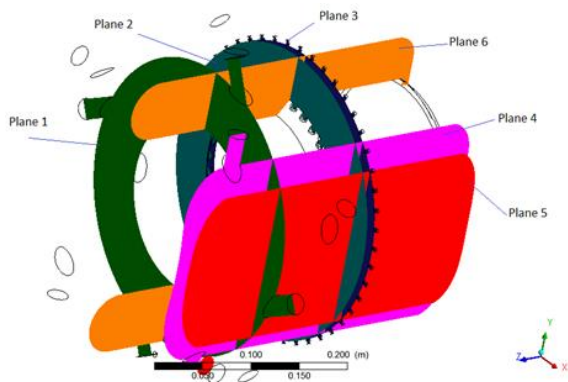
بر اساس این واقعیت که سوخت طبیعی ۱۰۰٪ متان فرض شده است و نرخ احتراق تحت تأثیر نرخ اختلاط مواد خواهد بود و مدل اضمحلال گردابه^{۱۱} استفاده شده است [۱۳].

۵. صحنه‌گذاری نتایج روش PDF

با توجه به لزوم صحنه‌گذاری نتایج حاصل از به‌کارگیری مدل PDF، می‌توان مشابه کار ارشادی و رجبی [۹] و با استفاده از نتایج آزمایش‌های ژو و همکاران [۱۵]، این روش را صحنه‌گذاری کرد. با توجه به زاویه ورود هوا به محفظه (۴۵ درجه)، عدد چرخش معادل برابر با ۰٫۶۸ خواهد بود که برای این مقدار از چرخش، نتایج تجربی در مرجع ۱۵ موجود است. در شکل ۸، مقایسه نتایج تجربی اندازه‌گیری دما با نتایج حاصل از به‌کارگیری مدل PDF در عدد چرخش ۰٫۶۸ ارائه شده است. با توجه به این مقایسه، با وجود اختلاف قابل توجه در مرکز محفظه که می‌تواند به دلیل افزایش ناگهانی دما در لحظه شروع احتراق در آزمایش باشد، در سایر نقاط انطباق مناسبی با نتایج تجربی مشاهده می‌شود.

۶. بحث بر روی نتایج

برای درک واضح از الگوی جریان درون محفظه‌های طراحی شده، مطابق با شکل ۹، چندین صفحه در موقیعت‌های مختلف و به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که بتوانند عمده‌ترین پدیده‌های جریانی درون میدان حل را پوشش دهند.



شکل ۹. صفحات انتخاب شده برای بررسی الگوی جریان درون محفظه

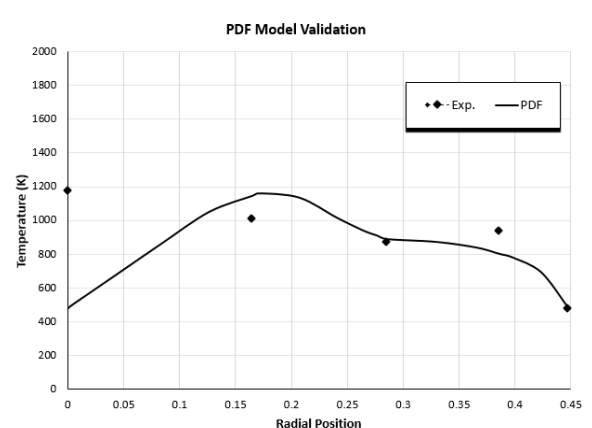
شکل‌های ۱۰ تا ۱۴ کانتورهای سرعت را در صفحات انتخابی نشان می‌دهند. در تمامی شکل‌ها، هندسه‌های اول تا سوم به ترتیب با عنوان (الف)، (ب) و (ج) معرفی شده‌اند. در شکل ۱۰،

آلاینده‌ها و ملاحظات اقتصاد انرژی است. برای رسیدن به این هدف، بایستی امکان بهبود عملکرد محفظه به صورت سه-بعدی نیز بررسی شود؛ زیرا احتراق، مانند بسیاری از جریان‌ها و پدیده‌های سیالاتی یک فرآیند کاملاً سه-بعدی است و رخدادهای درون آن مقید به محاسبات اولیه نیست. به همین منظور، در ابتدای کار و با هدف‌گذاری کاهش ۲۵ درصدی مصرف سوخت، FAR=۰٫۰۰۹۳ در نظر گرفته شد. بنابراین، در شرط مرزی ورودی، مقدار CH₄ با کسر جرمی متناظر با این نسبت سوخت به هوا تعیین گردید (جدول ۳). شایان گفتن است که درصد و کسر جرمی هوا در ورودی‌های مختلف بر اساس مقادیر مورد استفاده در موتور مرجع تعیین شده و در این مرحله از کار بازبینی نشده است. در کارهای تکمیلی موازی ممکن است در این مورد بازبینی‌هایی صورت پذیرد.

جدول ۳. درصد و کسر جرمی هوا و سوخت در ورودی‌های مختلف

مؤلفه	سوخت‌پاش		روزنه‌ها	
	داخلي	بيروني	داخلي	بيروني
هوا	جریان جرمی (%)	۶۲٫۹۶	۲۷٫۷۸	۹٫۲۶
	کسر جرمی	۰٫۲۳۲	۰٫۲۳۲	۰٫۲۳۲
سوخت	جریان جرمی (%)	۱۰۰	۰	۰
	کسر جرمی	۰٫۰۱۴۸	۰	۰

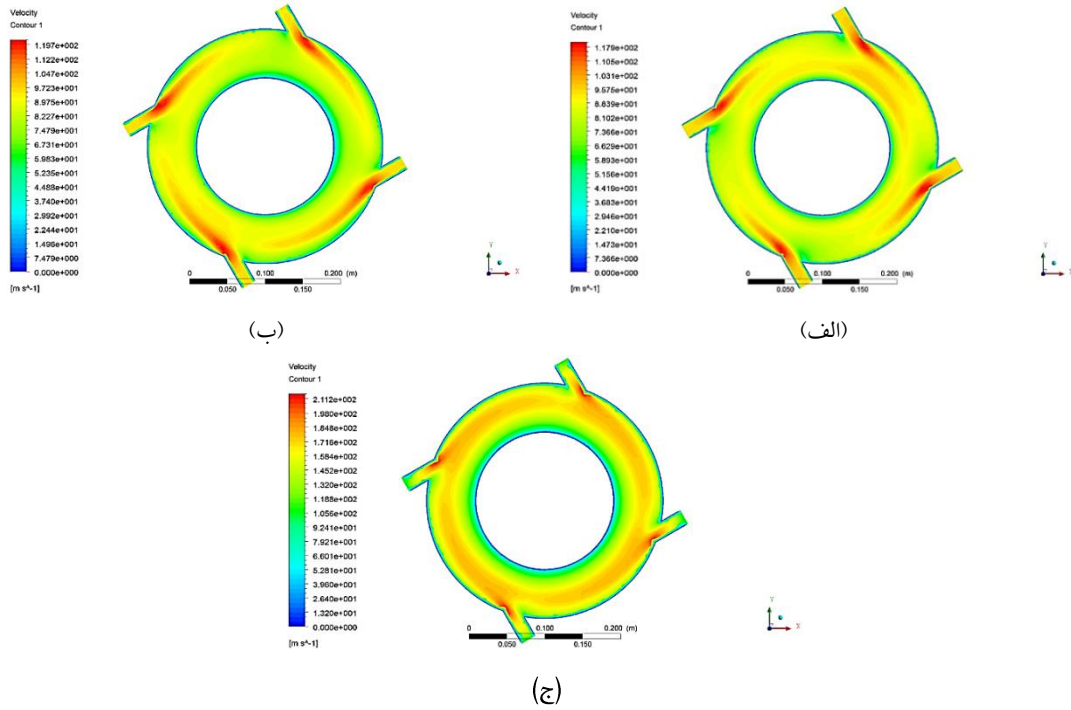
معیار هم‌گرایی باقی‌مانده‌ها برای تمامی نتایج مورد ارزیابی ۱۰-۶ تعیین شده است. میدان کلی جریان پس از تعیین شرایط مرزی در شکل ۸ نشان داده شده است.



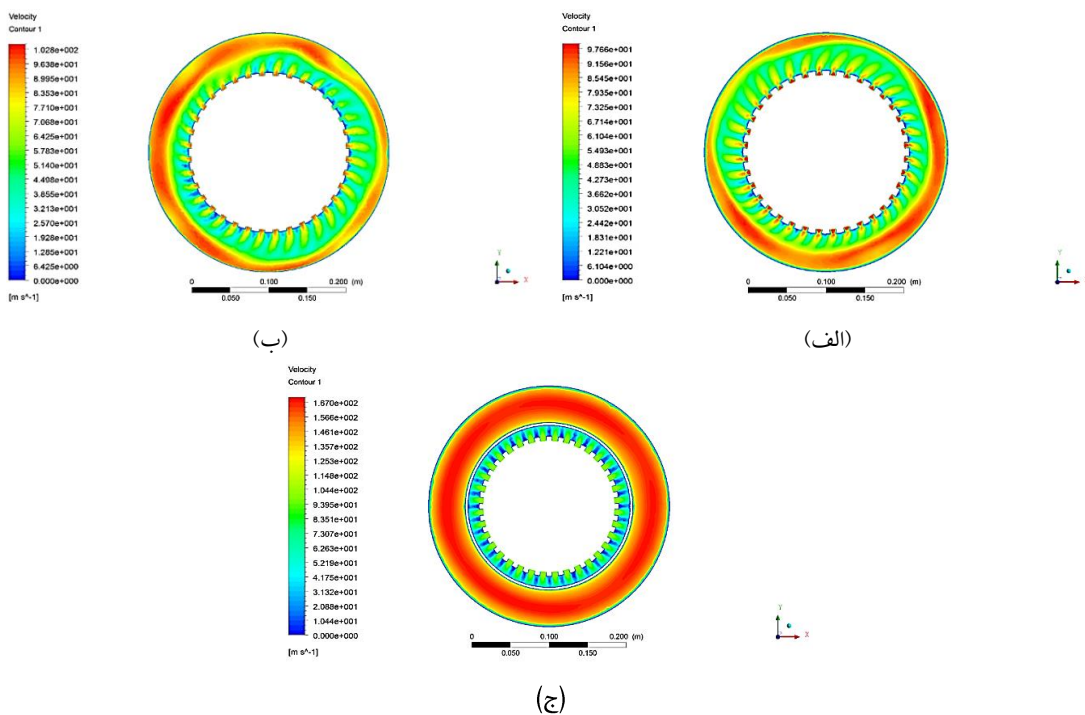
شکل ۸. مقایسه توزیع دما با نتایج تجربی در عدد چرخش ۰٫۶۸ در مقطع X=۵ cm

دیگر است و ممکن است موجب اختلال در عملکرد کلی محفظه شود. برای قضاوت بهتر بایستی مقادیر عددی پارامترهای عملکردی ارزیابی شوند. همچنین در این تصاویر، توزیع سرعت در هندسه دوم، بهتر از هندسه اول است.

صفحه ۱، شامل چهار عدد سوخت‌پاش در PZ است و نشان می‌دهد که هندسه سوم توزیع سرعت یک‌نواخت‌تری در مقایسه با دیگر هندسه‌ها دارد. در شکل ۱۱، توزیع سرعت یک‌نواختی در ناحیه رقیق‌ساز داخلی برای هندسه سوم مشاهده می‌شود. با این وجود، سرعت بیشینه در این هندسه بسیار بیش‌تر از هندسه‌های



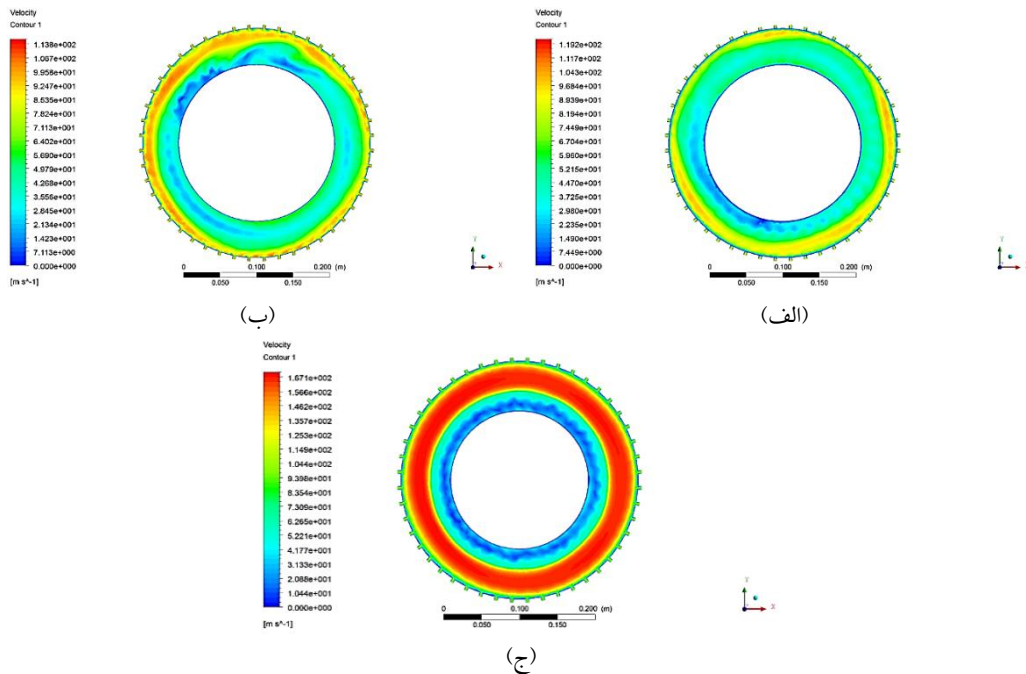
شکل ۱۰. کانتور سرعت در صفحه ۱ (سوخت‌پاش‌ها در PZ)



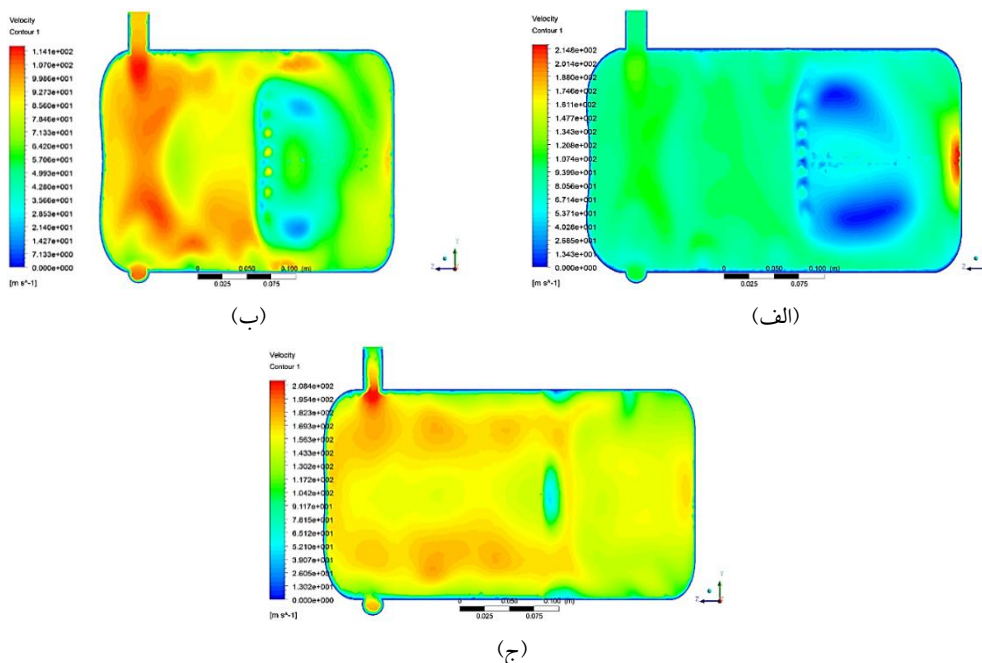
شکل ۱۱. کانتور سرعت در صفحه ۲ (روزنه‌های رقیق‌سازی داخلی)

شکل ۱۳ توزیع سرعت در صفحه‌های موازی با محور مرکزی محفظه (z) و در نزدیکی دیواره داخلی آن را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، هندسه‌های سوم و اول توزیع سرعت پیوسته‌تری را نشان می‌دهند. در هندسه اول اما، شدت کلی سرعت به‌طور قابل توجهی پایین است و دو هسته گردابه در ناحیه رقیق‌سازی در آن دیده می‌شود. ناحیه‌های گردابه‌ای در هندسه دوم کوچک و در هندسه سوم تقریباً محو شده است (در این صفحه).

شکل ۱۲ توزیع سرعت در ناحیه رقیق‌ساز خارجی را نشان می‌دهد. بار دیگر، هندسه سوم در مقایسه با دیگر هندسه‌ها توزیع سرعت پیوسته‌تری دارد. یک ناحیه کم‌سرعت متصل به یک ناحیه پرسرعت فوقانی در شکل ۱۲ دیده می‌شود. این پدیده به دلیل استقرار دیواره شعله‌نگهدار مخروطی حائل بین دو ناحیه است. هندسه دوم دارای یک لایه نازک سرعت-بالا در نزدیک دیواره خارجی محفظه است که می‌تواند در بازچرخش جریان موثر باشد.



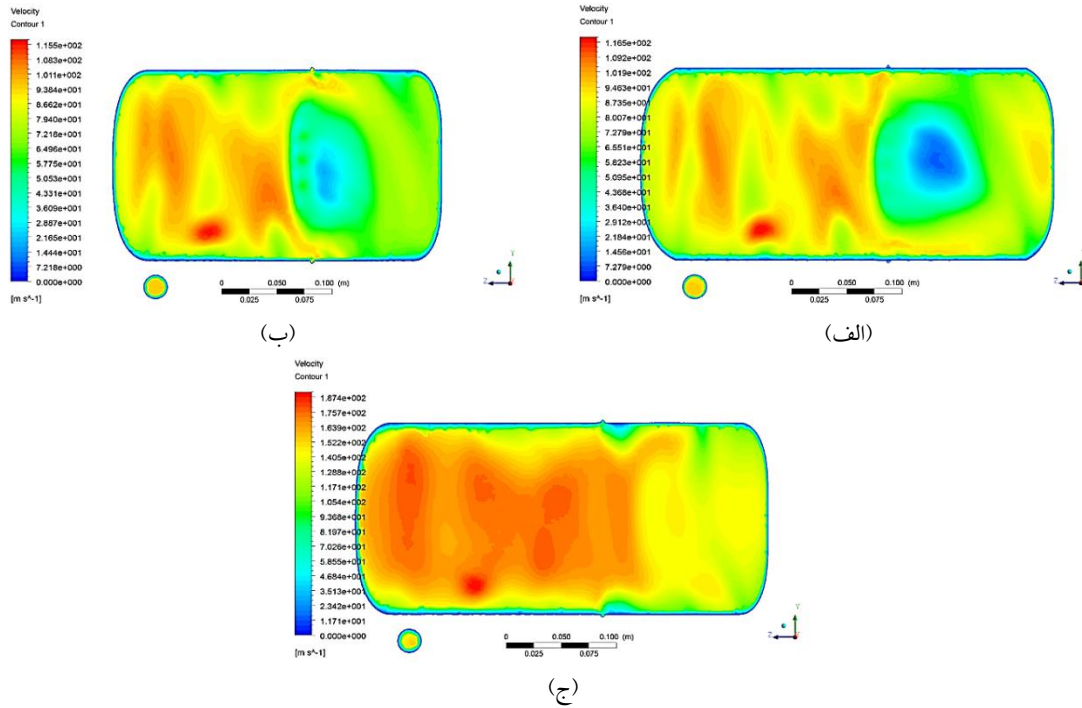
شکل ۱۲. کانتور سرعت در صفحه ۳ (روزنه‌های رقیق‌سازی خارجی)



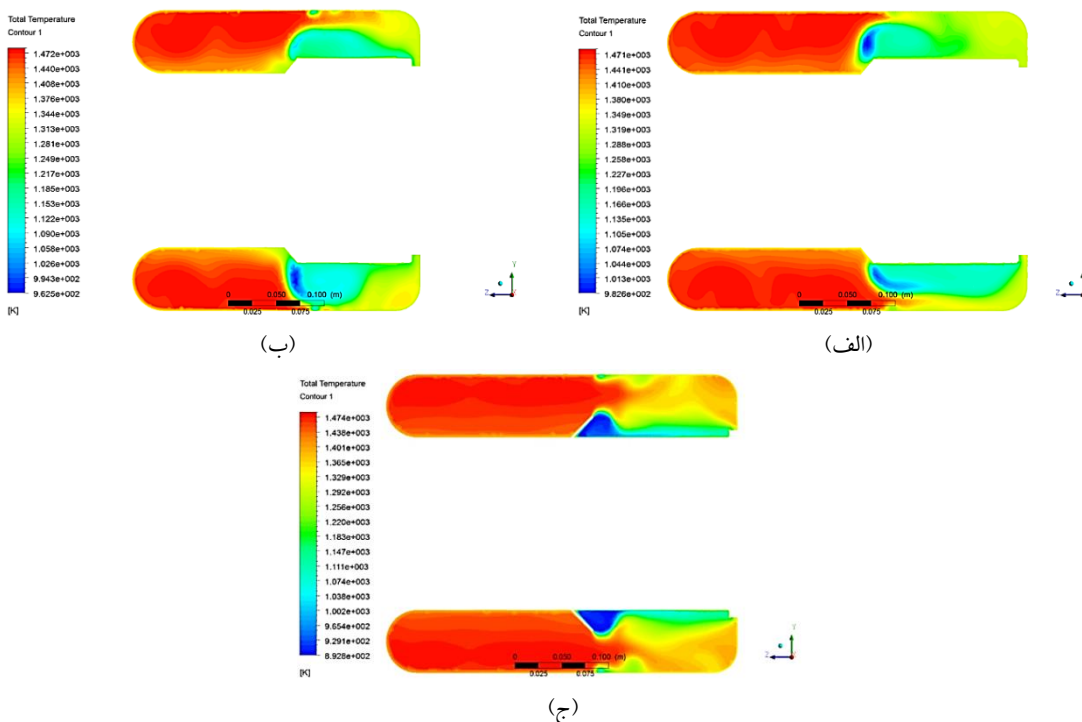
شکل ۱۳. کانتور سرعت در صفحه ۴

شکل ۱۵ توزیع دمای سکون در صفحه ۶ را ارائه داده است. با توجه به این شکل، ناحیه‌های کم‌دما (گردابه‌ها) در هندسه‌های اول و سوم مشاهده می‌شود. در هندسه دوم، عدم تقارن در وجود ناحیه کم‌دما مشهود است. بیشینه دما در تمامی موارد حدود K ۱۴۷۰ است.

صفحه ۵ موازی صفحه ۴ و در راستای محور Z است. شکل ۱۴ توزیع سرعت در این صفحه را نشان می‌دهد و می‌توان دید که هندسه سوم همچنان در شرایط مطلوبی است. توزیع سرعت در هندسه دوم نیز بهتر از هندسه اول است. ناحیه گردابه‌ای بزرگی به‌وضوح در هندسه اول در این صفحه مشاهده می‌شود.



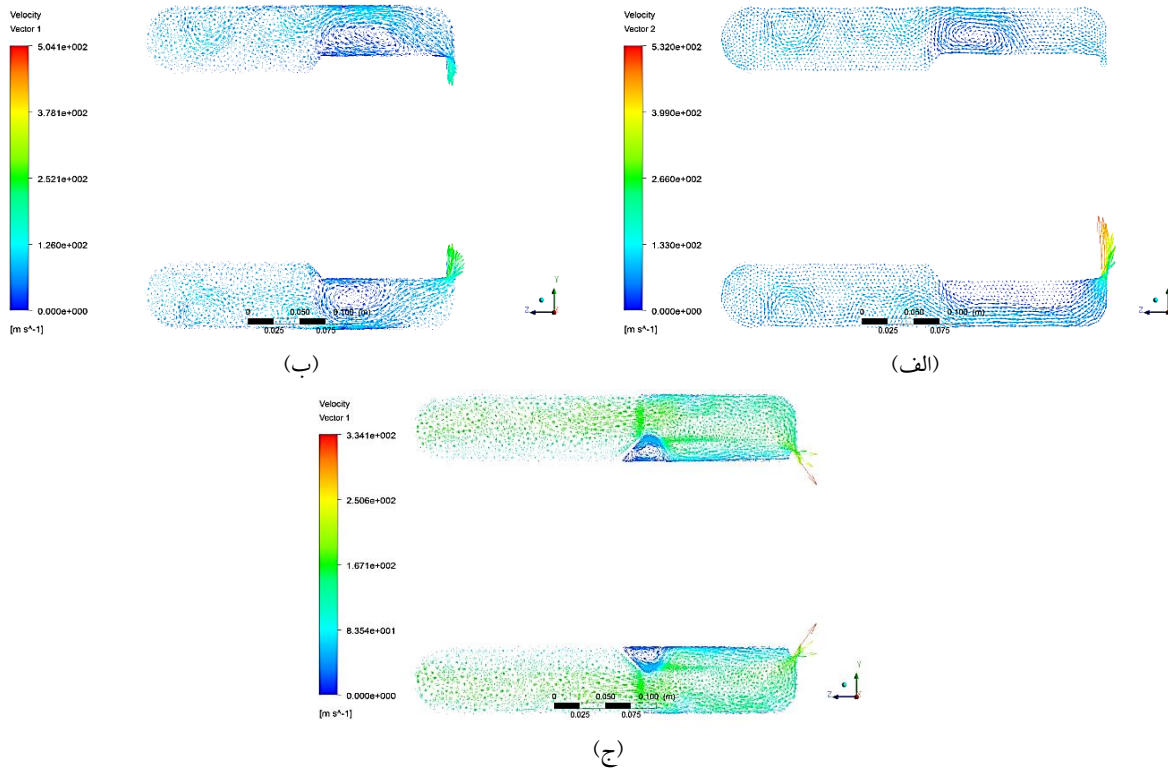
شکل ۱۴. کانتور سرعت در صفحه ۵



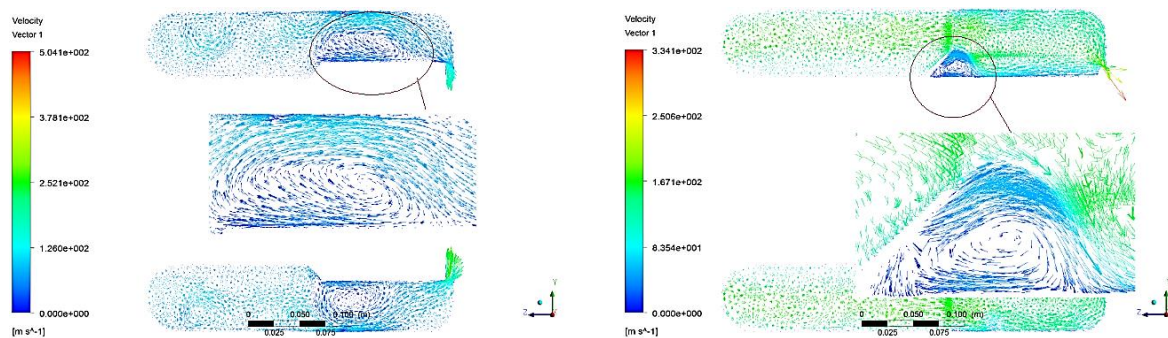
شکل ۱۵. کانتور دما در صفحه ۶

مشاهده می‌شود. باید توجه داشت که گردابه هندسه سوم ناحیه کوچک‌تری در مقایسه با دیگر هندسه‌ها اشغال کرده است؛ یعنی در هندسه‌های اول و دوم گردابه سطح گسترده‌تری دارد.

بردارهای سرعت در شکل ۱۶ نشان داده شده است. می‌توان دید که در هندسه سوم، یک گردابه بسیار قوی در پشت دیواره حائل ناحیه رقیق‌ساز شکل یافته است. در شکل‌های ۱۷ و ۱۸، به‌ترتیب، نمای بزرگ‌شده از گردابه‌های هندسه سوم و دوم



شکل ۱۶. بردارهای سرعت در صفحه ۶



شکل ۱۸. گردابه گسترده در ناحیه رقیق‌ساز هندسه دوم

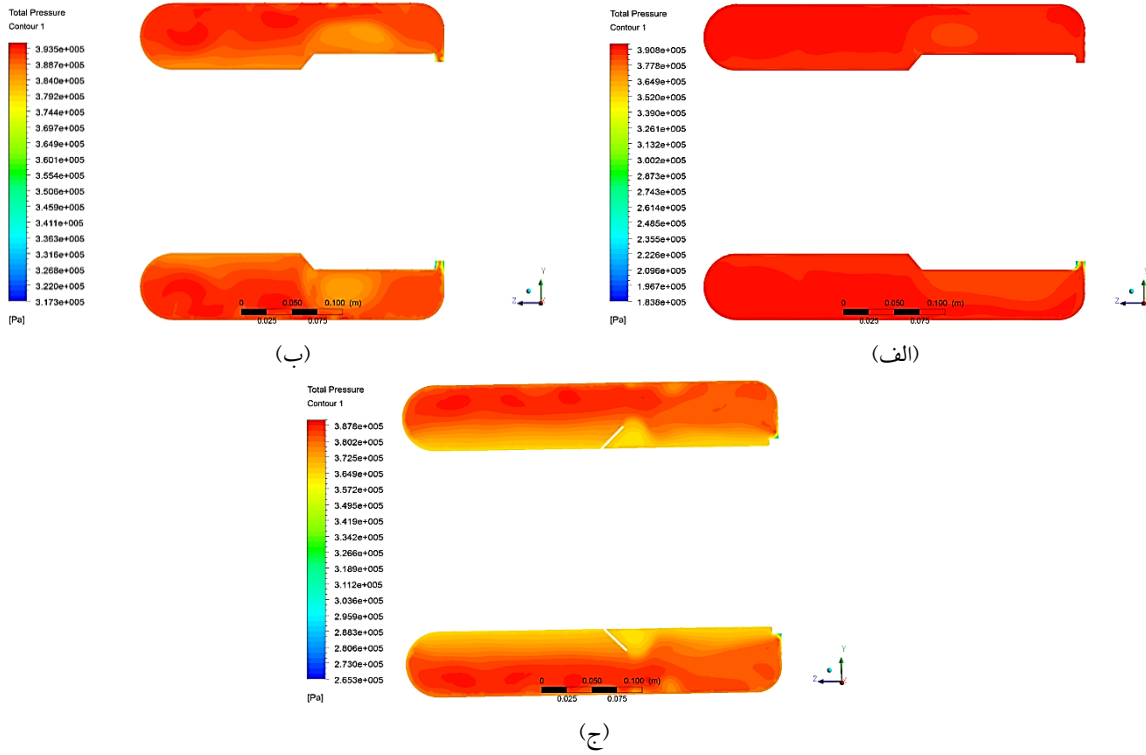
شکل ۱۷. گردابه قوی پشت دیوار حائل ناحیه رقیق‌ساز هندسه سوم

در این‌جا بهتر است به میزان تولید آلاینده‌ها نیز پرداخته شود. شکل ۲۰ کانتورهای کسر جرمی NO را نشان می‌دهد. تفاوت معناداری در توزیع اکسید نیتروژن در هندسه سوم مشاهده می‌شود. با این‌حال، برای قضاوت نهایی بایستی مقادیر عددی (جدول ۴) ارزیابی شوند.

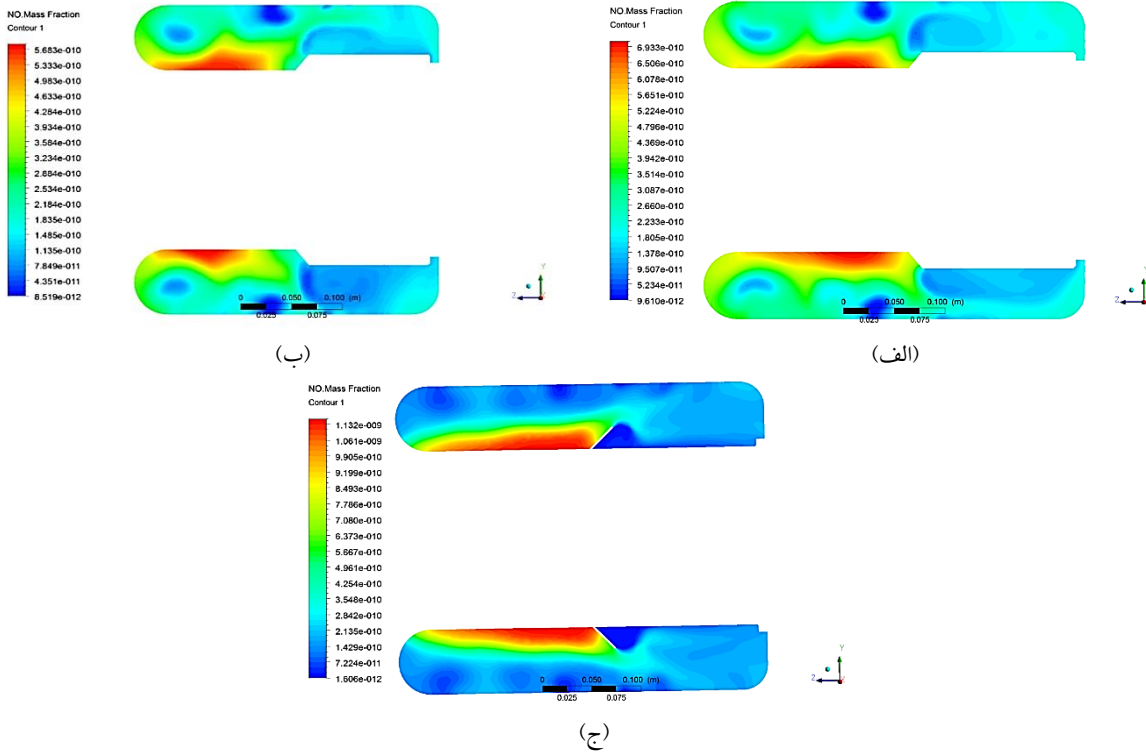
در شکل ۱۹، کانتورهای فشار سکون در صفحه ۶ ارائه شده است. به‌نظر می‌رسد هندسه دوم و سوم توزیع فشار سکون مشابهی دارند. با این حال، هندسه دوم در وضعیت بهتری دارد. بیشینه فشار سکون بزرگ‌تر متعلق به هندسه دوم است. همچنین، بیشینه فشار سکون هندسه اول از هندسه سوم بالاتر است. در این رابطه باید به مقادیر عددی در جدول ۴ رجوع کرد.

در مورد کسر جرمی CO_2 ، شرایط مشابهی با توزیع کسر جرمی NO وجود دارد. شکل ۲۱ این گفته را تأیید می‌کند.

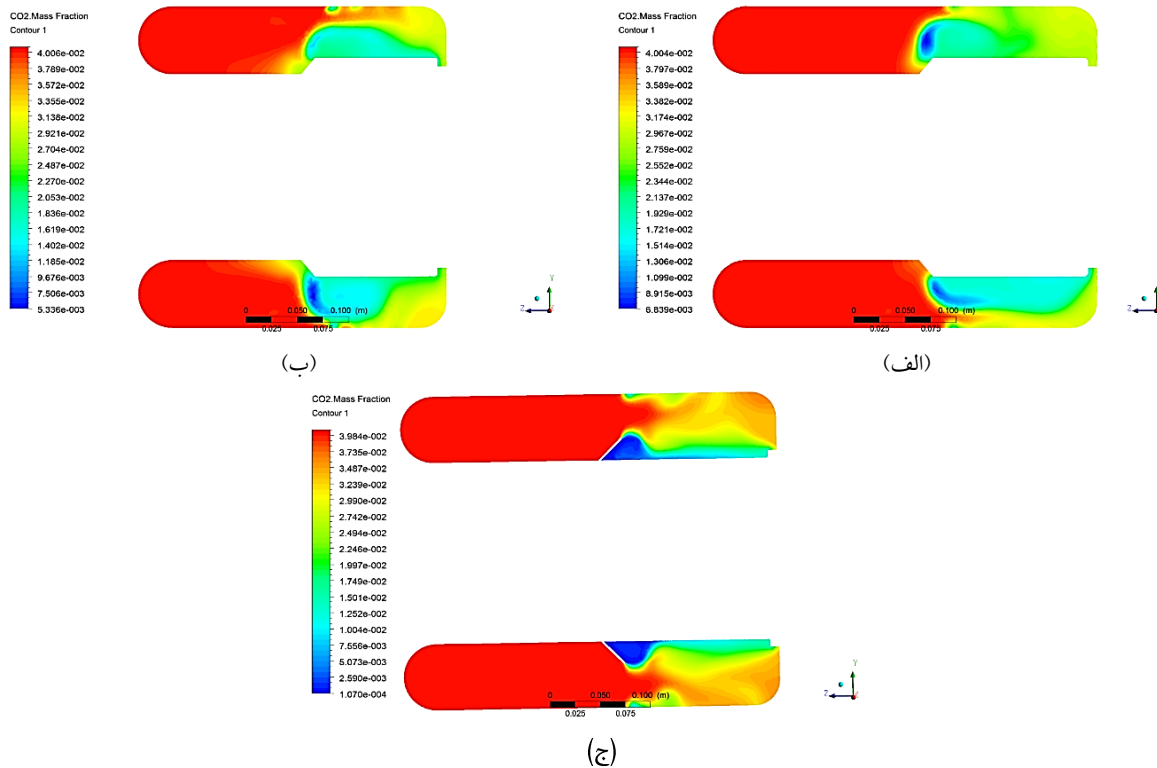
در جدول ۴، عددی پارامترهای بررسی شده ارائه شده‌اند.



شکل ۱۹. توزیع فشار سکون در صفحه ۶



شکل ۲۰. کانتورهای کسر جرمی NO در صفحه ۶



شکل ۲۱. کانتورهای کسر جرمی CO_2 در صفحه ۶

جدول ۴. جزئیات مقادیر عددی

CO_2	NO	T_{02}	ΔP_0	P_{02}	هندسه
(MF)	(MF)				
$\times E-2$	$\times E-10$	(K)	%	(bar)	
۲،۵۷	۱،۷۴	۱۳۴۷	۱۰،۸۵	۳،۵۶	اول
۲،۵۶	۱،۲۹	۱۳۰۰	۵،۶۵	۳،۷۷	دوم
۲،۵۸	۱،۶۷	۱۳۱۴	۱۵،۷۷	۳،۳۶	سوم

به طوری که کسر جرمی آن در هندسه دوم ۳۵٪ کمتر از هندسه اول و ۳۰٪ کمتر از هندسه سوم است. این اختلاف در مورد CO_2 چندان قابل توجه نیست.

مشکلی که در مورد نتایج هندسه دوم هست، عدم تحقق دمای $K 1350$ در خروجی است، که دلیل عمده آن، به کار بردن FAR کاهیده است. برای رفع این ایراد، با افزایش گام به گام FAR و بارسیدن به مقدار 0.0108 ، که همچنان ۱۰٪ کمتر از مقدار پیش طراحی شده آن (0.012) است، دمای $K 1351.66$ در خروجی محقق می شود. در این شرایط، میزان کسر جرمی آلاینده های NO و CO_2 به ترتیب، $10^{-10} \times 1.27E$ و $2 \times 10^{-9} \times 2.94E$ خواهد بود. بر این اساس، میزان آلاینده NO بازم کاهش یافته

در جدول فوق، P_{02} فشار سکون، ΔP_0 درصد افت فشار سکون و T_{02} دمای سکون است. نماد MF برای کسر جرمی استفاده شده است.

با وجود این که در بررسی های تصویری، هندسه سوم توزیع جریان مناسبی نشان می داد، اما مطابق با نتایج جدول ۴، هندسه دوم (با توزیع نتایج متوسط کانتورها)، با داشتن کمترین تولید آلاینده های NO و CO_2 و نیز با کمینه افت فشار سکون، بهترین عملکرد را نشان می دهد. می توان گفت بهتر بودن توزیع جریان در هندسه سوم تنها در یکنواخت بودن خطوط جریان نمود یافته و نتایج عددی به طور مستقیم به اصل واکنش های شیمیایی و آثار آن بر میزان آلاینده ها یا افت فشار سکون مربوط است. از نظر میزان تولید آلاینده ها، اختلاف عمده در تولید آلاینده NO است؛

است، اما آلاینده CO_2 شاهد افزایش است که دلیل آن نیز، افزایش سوخت هیدروکربنی متان است.

۷. نتیجه‌گیری

هدف از این مقاله، بهبود عملکرد محفظه احتراق یک میکروتوربین گاز ارتقا یافته بود که با گاز متان تغذیه می‌شود. به‌طور مشخص، بهبود اقتصاد مصرف سوخت و کاهش میزان تولید آلاینده‌های NO و CO_2 از طریق اعمال تغییرات هندسی ساده و محدود در دستور کار بوده است.

برای تحقق اهداف اصلی، سه هندسه متفاوت برای محفظه موتور ارتقا یافته تولید شد. هندسه دوم با ۲۵٪ کاهش حجم هندسه اول و هندسه سوم با ۱۵٪ افزایش DZ هندسه اول ایجاد شدند. مطالعه عددی با استفاده از کد تجاری CFX و با به‌کارگیری مدل برهم‌کنش PDF و مدل آشفستگی $k - \epsilon$ برای هر سه هندسه صورت گرفت. نتایج حاصله با استناد به نتایج تجربی مورد صحت‌گذاری واقع شد.

۸. مأخذ

نتایج اساسی و مهم به‌دست آمده از این مطالعه به‌قرار ذیل است:

الف) هرگونه تغییر در هندسه و حجم محفظه آثار محسوسی بر عملکرد آن دارد.

ب) الگوی جریان در هندسه سوم، به‌دلیل افزایش فضای تعامل جریان در ناحیه رقیق‌ساز، بهتر از دو هندسه دیگر است؛ اما نتایج عددی هندسه دوم بهتر است.

ج) کاهش حجم محفظه موجب بازیابی فشار سکون و جلوگیری از اتلاف آنتالپی در الگوی سه- بعدی و پیچیده جریان شده و در تحقق دمای از پیش تعیین شده در خروجی موثر است.

د) با تغییرات ساده در هندسه امکان کاهش ده درصدی FAR و کاهش بیش از ۳۰٪ دو مولفه آلاینده مورد اشاره فراهم شد.

ه) پیشنهاد می‌شود احتراق در محفظه مشابه با سوخت مایع بررسی شود.

- [1] P. Koutmos and J.J. McGuirk, Investigation of Swirler/Dilution Jet Flow Split on Primary Zone Flow patterns in a Water Model Can- Type Combustor, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, vol. 111, pp. 310 – 317, Apr. 1989.
- [2] D. B. Kulshreshtha, S. A. Channiwala, K. V. Chaudhari and S. B. Dikshit, Design, Numerical Simulation and Experimental Investigations on Can Annular Type Combustion Chamber for 20 kW Gas Turbine Engine, Int. J. Dynamics and Fluids, vol. 4, no. 2, pp 175 – 189, 2008.
- [3] Y. Levy, V. Erenburg, Y. Goldman, V. Sherbaum, V. Ovcharenko, CFD Assisted Design of MICRO GT combustor, Faculty of Aerospace Engineering, Israel Institute of Technology, Haifa, 32000, (2009).
- [4] B. Michel, P. Gajan, A. Strzelecki, N. Savary, Full coverage film cooling performance, C.R.Mecanique, 337, 562-572, 2009.
- [5] C. Ghenai, Combustion of Syngas Fuel in Gas Turbine Can Combustor, Hindawi Publishing Corporation, Advances in Mechanical Engineering, vol. 2010, 13 pages, Article ID 342357, doi:10.1155/2010/342357.
- [6] M. N. Mohd Jaafar, K. Jusoff, M. S. Osman, and M. S. A. Ishak, Combustor aerodynamic using radial swirler, Int. J. of the Physical Sciences, vol. 6(13), pp. 3091 – 3098, Jul. 2011.
- [7] F. H. Pathan, N. K. Patel, M. V. Tadvi, Numerical investigation of the combustion of methane air mixture in gas turbine can-type combustion chamber, International j. of Sci. & Eng. Research, vol. 3, Issue 10, October-2012.
- [8] B. S., M. R. Nazari, Improvement of the performance and distribution of outlet combustion chamber temperature of a turbojet engine with upgraded compressor in different flight conditions, Aerospace Knowledge and Technology Journal, 5, Issue 3 (special Issue), 2016, 69-81. (in Persian)
- [9] A. Ershadi, M. Rajabi-ZargarAbadi, NOx Formation Reduction Using Primary Aeration in a Swirl Stabilizer Combustor, Aerospace Knowledge and Technology Journal, 6, 1, 2017, 41-51. (in Persian)
- [10] K.J. Bosschaart, L.P.H. de Goey, The laminar burning velocity of flames propagating in mixtures of hydrocarbons and air measured with the heat flux method, Combustion and Flame, Volume 136, Issue 3, 2004, Pages 261-269, ISSN 0010-2180.
- [11] T. Tahtouh, F. Halter, C. Mounaïm-Rousselle, Measurement of laminar burning speeds and Markstein lengths using a novel methodology, Combustion and Flame, Volume 156, Issue 9, 2009, Pages 1735-1743, ISSN 0010-2180.
- [12] J. Joy, P. Wang, & S. Yu, Effect of geometric modification on flow behaviour and performance

of reverse flow combustor, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 233(4), 1457–1471, 2019.

[13] User's Guide, Release 11.0.-ANSYS, Inc., 2007 ANSYS/CFX Tutorials, Release 11.0.-ANSYS.

[14] User's Guide, Gambit, Gambit. "2.2." Fluent Inc., Lebanon, New Hampshire, USA (2004).

[15] L. X. Zhou, X. L. Chen, Studies on the effect of swirl on NO formation in methan/air turbulent combustion, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 29, pp. 2235–2242, 2002.

پی نوشت

-
1. Flashback
 2. Blowout
 3. Dilution Zone
 4. Fuel-Air-Ratio
 5. Probability Density Function
 6. Eddy Dissipation Model
 7. laminar flame speed
 8. PZ: Primary Zone
 9. Injectors

11. Eddy Dissipation

۱۰. موتور با توان خروجی ۳۰ kW

۱۲. شایان گفتن است که مقادیر ناچیز کسر جرمی مونواکسید نیتروژن در خروجی محفظه، به درستی نسبی شبکه محاسباتی در این ناحیه و زمان اقامت کوتاه در محفظه مربوط است [۱۳].