

شبیه‌سازی عددی جریان احتراقی در محفظه احتراق توربین گاز مدل با تکنولوژی ورودی هوای پیچشی دوگانه

علیرضا فضل‌الهی قمشی^۱ و امیر مردانی^۲

۱- کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، fazzollahi.alireza@gmail.com
۲- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران (نویسنده مخاطب)، amardani@sharif.edu
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۴/۲۸، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۵/۹/۲۵، پذیرش: ۹۵/۱۱/۲۹)

چکیده: در این پژوهش، محفظه احتراق توربین گاز مدل (GTMC)، که به منظور تزریق جریان هوا از تکنولوژی ورودی پیچشی دوگانه بهره می‌برد، با استفاده از فرضیات ساده‌کننده، به صورت پایا و با فرض تقارن محوری و تحت روش RANS در حالت احتراقی و غیراحتراقی مورد مطالعه و شبیه‌سازی عددی قرار گرفته است. بدین منظور، در گام نخست، توانایی مدل‌های اغتشاشی $k-\epsilon$ ، RNG $k-\epsilon$ ، Realizable $k-\epsilon$ و RSM در پیش‌بینی الگوی جریان غیراحتراقی درون محفظه، بررسی شده و پس از انتخاب مدل اغتشاشی مناسب، جریان احتراقی، با به کارگیری مدل‌های احتراقی EDC و TPDF در کنار استفاده از سینتیک شیمیایی DRM22، شبیه‌سازی شده است. در این بررسی، مقادیر حاصل از شبیه‌سازی برای مؤلفه‌های سرعت محوری، شعاعی و مماسی در حالت احتراقی و غیراحتراقی و کسر مخلوط، دما و گونه‌های H_2 ، CO و CO_2 در حالت احتراقی، با نتایج حاصل از مشاهدات آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج کلی این بررسی نشان می‌دهد که علی‌رغم اعمال فرضیات ساده‌کننده، شبیه‌سازی صورت گرفته به خوبی توانایی مدل‌سازی و توصیف رفتار کلی جریان و احتراق درون محفظه را داراست. اما، مطابق انتظار، استفاده از مدل‌های اغتشاشی و احتراقی پیشرفته‌تر، در کنار افزایش هزینه محاسباتی، منجر به دستیابی به نتایج بهتر می‌شود. این نتایج حاکی از برتری مدل RSM نسبت به دو مدل اغتشاشی دیگر در شبیه‌سازی جریان غیراحتراقی درون محفظه است. همچنین، نتایج نشان‌دهنده برتری مدل TPDF در پیش‌بینی توزیع گونه‌های اصلی و ساختار شعله در نزدیکی ورودی محفظه است، در حالی که استفاده از مدل EDC منجر به پیش‌بینی دقیق‌تر میدان احتراقی در پایین دست جریان می‌شود.

کلیدواژگان: محفظه احتراق توربین گاز، ورودی پیچشی دوگانه، مدل‌های اغتشاشی، مدل‌های احتراقی، تقارن محوری

مقدمه

در سال‌های اخیر، اکثر فعالیت‌های مرتبط با توسعه تکنولوژی توربین‌های گازی به افزایش توان عملکردی، بهینه‌سازی مصرف سوخت و کاهش میزان تولید آلاینده‌ها و هزینه‌های عملکردی معطوف شده است [۱-۵]. به منظور دستیابی به چنین معیارهایی، استفاده از جریان‌هایی با میزان پیچش^۱ بالا پیشنهاد شده است [۳، ۶]. مزیت استفاده از محفظه‌های احتراق با جریان پیچشی توانایی انتقال انرژی بالا، تسریع روند اختلاط سوخت و اکسند و متعاقب آن کاهش ابعاد محفظه احتراق و بهبود فرایند اشتعال است [۳، ۱]. از سوی دیگر، استفاده از مشعل‌های با میزان پیچش بالا منجر به پایداری بیشتر شعله و احتراق در شرایط پیش‌آمیخته و غنی از اکسند در گستره وسیعی از محدوده عملکردی توربین‌های گاز می‌شود و طول عمر آن‌ها را افزایش می‌دهد [۶، ۷]. این در حالی است که ایجاد چنین جریان‌هایی، مستلزم به کارگیری هندسه‌های پیچیده در طراحی محفظه احتراق است [۳]. علاوه بر این، استفاده از این نوع مشعل‌ها منجر به ایجاد ساختارهای گوناگون در جریان درون محفظه

1. Swirl

احتراق می‌شود [۴]. این امر روند طراحی محفظه احتراق را پیچیده‌تر کرده و ضرورت آشنایی و شناخت هر چه بیشتر پدیده‌های فیزیکی درون چنین محفظه‌هایی را افزایش می‌دهد.

مدل‌سازی عددی، به‌عنوان یک بخش مهم از چرخه طراحی با قابلیت اطمینان بالا، همواره مورد توجه طراحان قرار دارد [۵-۷]. ساختار درهم جریان پیچشی در محفظه احتراق توربین‌های گازی، محققین این عرصه را ملزم به استفاده از مدل‌های پیچیده فیزیکی در شبیه‌سازی‌های عددی می‌کند که منجر به افزایش زمان و هزینه محاسباتی و متعاقب آن به طول انجامیدن روند طراحی می‌شود. لذا، بررسی قابلیت به‌کارگیری مدل‌های فیزیکی ساده در روش‌های عددی، به‌منظور کاهش هزینه محاسباتی، موضوع جذابی به‌نظر می‌رسد. با به‌کارگیری مدل‌های ساده فیزیکی و تلفیق آن‌ها با یک استراتژی مناسب، و استفاده از فرضیات مناسب، امکان یک مدل‌سازی عددی با هزینه محاسباتی اندک فراهم می‌شود و می‌توان نتایج قابل قبولی را، حتی در مورد جریان‌های پیچیده درون محفظه احتراق‌های با ساختار پیچیده، ارائه داد.

تا به امروز، مدل‌سازی عددی جریان محفظه احتراق توربین گاز با مشکلاتی زیادی همراه بوده است. یکی از این مشکلات پیچیدگی هندسی محفظه احتراق توربین گاز است که منجر به یک فرایند زمان‌بر برای ایجاد شبکه محاسباتی می‌شود. با وجود این، اصلی‌ترین مشکل در دسترس نبودن نتایج و داده‌های آزمایشگاهی به‌منظور صحت‌سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی است [۵، ۱]. به‌منظور رفع این مشکل، محفظه احتراق‌های مدل، با تمامی ویژگی‌های یک محفظه احتراق توربین گاز واقعی، در ابعاد آزمایشگاهی ساخته شده و مورد آزمایش و مطالعه قرار گرفته‌اند [۵]. اکنون، نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت‌گرفته روی این مدل‌ها امکان صحت‌سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی را فراهم آورده است. از جمله این محفظه‌های مدل می‌توان به GTMC^۱ اشاره کرد. این محفظه احتراق مدل از تکنولوژی ورودی پیچشی دوگانه^۲ استفاده می‌کند. مزیت بهره‌گیری از این نوع مشعل‌ها در کاهش حجم محفظه احتراق و بهبود و تسریع فرایند اختلاط سوخت و اکسندنده محققین را به استفاده از این نوع ورودی‌ها در محفظه‌های احتراق توربین‌های گازی نیز سوق داده است. میزان چرخش بالای ایجادشده توسط ورودی‌های این محفظه احتراق آن را در زمره محفظه احتراق‌های با میزان پیچش بالا قرار می‌دهد [۷]. استفاده از مشعل‌های با میزان پیچش بالا، موجب بروز سه نوع ناپایداری در جریان درون محفظه‌های احتراق می‌شود. یکی از این ناپایداری‌ها، پیشروی مرکز گردابه^۳ است. این پدیده ناپایا در ورودی محفظه به‌وقوع می‌پیوندد و منجر به ایجاد یک جریان چرخشی می‌شود که با فرکانس مشخصی حول محور پیچش جریان در حال چرخش است [۶، ۷]. شکل دیگری از این نوع ناپایداری‌ها وجود پدیده ریزش گردابه^۴ در ورودی محفظه است. این پدیده ناشی از وجود پره‌های ایجادکننده جریان پیچشی در ورودی هواست و منجر به چین‌خوردن شعله^۵ در نزدیکی ورودی محفظه می‌شود [۴، ۷]. نوع دیگر ناپایداری در جریان‌های با پیچش بالا پدیده شکست گردابه^۶ است. این پدیده بر اثر افت فشار در مرکز گردابه و مکش جریان درون محفظه به داخل ورودی رخ می‌دهد. در اثر این ناپایداری یک ناحیه با سرعت محوری منفی درون محفظه شکل می‌گیرد. بروز این پدیده منجر به تشکیل دو ناحیه با جریان چرخشی درون محفظه احتراق می‌شود. یکی از این جریان‌های چرخشی در نزدیکی محور پیچش جریان اصلی به‌وجود می‌آید (IRZ^۷) و متعاقباً یک ناحیه دیگر با جریان چرخشی در گوشه‌های محفظه شکل می‌گیرد (ORZ^۸) [۸، ۶-۲]. بروز همزمان این ناپایداری‌ها جریان بسیار پیچیده‌ای را درون محفظه احتراق شکل می‌دهد. لذا، مدل‌سازی عددی جریان درون چنین محفظه‌هایی فرایندی زمان‌بر و مستلزم به‌کارگیری روش‌های خاص با دقت بالاست.

1. Gas Turbine Model Combustor
2. Double Swirl
3. PVC
4. Vortex Shedding
5. Flame Wrinkling
6. Vortex Breakdown
7. Inner Recirculation Zone
8. Outer Recirculation Zone

محفظه احتراق توربین گازی GTMC توسط مرکز هوافضای آلمان (DLR)^۱ و با هدف ایجاد مجموعه‌ای از داده‌های آزمایشگاهی، به منظور شناخت بیشتر میدان جریان احتراقی و غیراحتراقی درون محفظه احتراق‌های مدرن و همچنین صحت‌سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی، توسعه داده شده است. این محفظه احتراق دارای دو ورودی پیچشی هم‌محور است که از یک مخزن هوای مشترک تغذیه می‌شوند و جریان سوخت از بین این دو جریان هوا به صورت غیرپیچشی وارد محفظه می‌شود و به این ترتیب احتراق در شرایط نیمه‌پیش‌آمیخته صورت می‌گیرد. این محفظه که در سه شرایط عملکردی مختلف (A، B و C) به صورت تجربی مطالعه شده است، در شرایط عملکردی شعله A، با توربین‌های گاز موجود در صنایع هوایی، قابل مقایسه است. در این شرایط عملکردی، شعله‌ای پایدار، بدون پرش^۲، بلندشدگی^۳، پس‌زنی^۴ و خاموشی^۵ مشاهده می‌شود [۱،۹]. این عملکرد پایدار، امکان مناسبی برای شبیه‌سازی‌های عددی و صحت‌سنجی مدل‌های اغتشاشی، مدل‌های احتراقی و اثر متقابل این مدل‌ها فراهم می‌آورد [۲].

GTMC برخلاف سایر محفظه‌های احتراق پیچشی دارای دو ورودی هوای پیچشی است که به صورت هم‌مرکز فرایند تزریق هوا به محفظه را عهده‌دارند. استفاده از چنین روشی این امکان را فراهم می‌آورد تا ابعاد ناحیه واکنشی، از طریق تنظیم نسبت دبی عبوری و میزان پیچش جریان در این دو ورودی هم‌مرکز، صورت گیرد و این موضوع می‌تواند موجب انعطاف‌پذیری در طراحی شکل محفظه احتراق و کاهش ابعاد آن شود. علاوه بر این، وجود جریان با میزان پیچش بالا به اختلاط مناسب سوخت و اکسنده می‌انجامد. همچنین، ساختار جریان درون GTMC به گونه‌ای است که سوخت و اکسنده پس از ورود به ناحیه واکنشی با محصولات واکنش مخلوط می‌شوند و پیش‌گرم‌سازی و رقیق‌سازی آئرو‌دینامیکی به صورت خودکار شکل می‌گیرد و بهبود بازده احتراق را در پی خواهد داشت. این سه موضوع، به خصوص در توربین‌های گاز هوایی، می‌تواند به کاهش وزن سیستم احتراقی و بهبود بازده کلی منجر شود.

این محفظه احتراق برای اولین بار در سال ۲۰۰۸ توسط وایدنهورن و همکارانش به صورت عددی مطالعه شد [۷، ۱۰، ۱۱]. در این مطالعات، توانایی مدل‌های اغتشاشی هیبرید SAS^۶، DES^۷ و RANS^۸ برای شبیه‌سازی جریان غیراحتراقی درون محفظه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان‌دهنده برتری مدل SAS هم از لحاظ دقت و هم از منظر هزینه محاسباتی بود. آن‌ها در ادامه با استفاده از این مدل اغتشاشی و به کارگیری مدل احتراقی ترکیبی EDM^۹/FRC^{۱۰} میدان جریان احتراقی درون محفظه را مدل‌سازی کردند [۶، ۱۲، ۱۳]. در سال ۲۰۱۳، سی و ایهمه از مدل اغتشاشی LES به منظور شبیه‌سازی عددی جریان غیراحتراقی درون این محفظه احتراق استفاده کردند [۲]. آن‌ها با مقایسه مدل‌های زیرشبکه‌ای اغتشاشی مختلف، دریافتند که نتایج حاصل از شبیه‌سازی، به شدت به این مدل‌ها حساس است و نتایج حاصل از مدل زیرشبکه‌ای ورم‌ن دقیق‌تر از نتایج سایر مدل‌هاست. بنیم و همکارانش نیز مدل‌های اغتشاشی مختلف را در شبیه‌سازی این محفظه احتراق مورد استفاده قرار دادند [۸]. آن‌ها، همچنین، در مورد اثر شرط مرزی خروجی روی دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی مطالعاتی را صورت دادند. در سال ۲۰۱۴، سی و ایهمه اثر اندازه شبکه محاسباتی را روی نتایج حاصل از شبیه‌سازی بررسی کردند [۳]. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که ریزتر کردن شبکه در برخی موارد منجر به کاهش دقت نتایج می‌شود و لذا شبیه‌سازی جریان درون این محفظه احتراق به شبکه بسیار ریز نیاز ندارد و مستلزم بررسی موارد دیگری است.

1. Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt
2. Blowoff
3. Liftoff
4. Flashback
5. Extinction
6. Scale Adaptive Simulation
7. Detached Eddy Simulation
8. Reynolds Averaged Navier Stokes
9. Eddy Dissipation Model
10. Finite Rate Chemistry

واندخده و همکارانش نیز با به‌کارگیری مدل‌های اغتشاشی DES و RANS و مدل احتراقی^۱ FGM این محفظه احتراق را مدل‌سازی کردند[۴]. آن‌ها دریافته‌اند که هر چند مدل RANS نتایج نسبتاً قابل قبولی ارائه می‌دهد، در دستیابی به برخی از جزئیات جریان درون محفظه با مشکل مواجه است، اما مدل DES نتایجی با دقت بیشتر ارائه می‌دهد. سی و ایهمه مطالعه دیگری نیز روی مدل‌سازی جریان احتراقی درون این محفظه احتراق صورت دادند[۵]. آن‌ها برای مدل‌سازی اغتشاش از مدل LES بهره گرفتند و عملکرد مدل‌های احتراقی پیشرفته‌ای نظیر FPV^۲ را در مورد پیش‌بینی میدان احتراقی درون محفظه مورد ارزیابی قرار دادند. در واقع، تمامی مدل‌سازی‌های صورت‌گرفته روی GTMC در فضای سه‌بعدی، به‌صورت ناپایا و با استفاده از مدل‌های پیچیده اغتشاشی و احتراقی انجام شده است. با این وجود، استفاده از مدل‌های پرهزینه‌ای نظیر LES همواره با مشکلات فراوانی همراه بوده است؛ به‌ویژه اینکه فرایند طراحی و بهینه‌سازی محفظه‌های احتراق از طریق چرخه‌های تکراری صورت می‌گیرد. لذا، مدل‌های کم‌هزینه RANS و RANS/LES به‌عنوان بهترین ابزار شبیه‌سازی و تحلیل محفظه احتراق‌های صنعتی به‌شمار می‌آید[۴].

یکی از مهم‌ترین معضلات استفاده از مدل‌های اغتشاشی پایه RANS بیش‌تر پیش‌بینی کردن مقادیر اتلاف^۳ است که منجر به ازدست رفتن برخی ساختارهای مهم در جریان می‌شود[۶،۷]. اما، سادگی این مدل‌ها و امکان استفاده از آن‌ها در میدان‌های دوبعدی و متقارن‌محوری شبیه‌سازی‌های عددی را به‌سمت استفاده از این مدل‌ها سوق می‌دهد. در جریان‌های با میزان پیچش بالا، به‌دلیل انحناهای خطوط جریان و وجود گرادیان فشار، تنش‌های رینولدز به‌طور قابل‌توجهی دچار تغییر می‌شوند[۸]. با توجه به این موضوع، به‌منظور شبیه‌سازی جریان‌های اغتشاشی با میزان پیچش زیاد تحت فرمولاسیون RANS از مدل RSM^۴ استفاده می‌شود، چرا که این مدل اثرات انحناهای خطوط جریان و تغییرات سریع نرخ کرنش را دربر می‌گیرد[۴]. با این وجود، در پژوهش حاضر، با توجه به هزینه محاسباتی پایین‌تر مدل‌های اغتشاشی $k - \epsilon$ و Realizable $k - \epsilon$ ، مدل‌های مذکور نیز به‌منظور شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند تا در صورت دستیابی نتایج مناسب برای شبیه‌سازی نهایی پیشنهاد شوند.

تا به امروز تلاش‌های زیادی در زمینه مطالعه سیستم‌های احتراقی با شرایط عملکردی پیش‌آمیخته و غیرپیش‌آمیخته صورت گرفته است. با این وجود، بررسی‌های کمتری به سیستم‌های نیمه‌پیش‌آمیخته اختصاص یافته‌است. لذا، با توجه به اینکه GTMC در چنین شرایطی عمل می‌کند، شبیه‌سازی احتراق درون آن می‌تواند با چالش‌هایی همراه باشد[۵]. موضوع احتراق نیز به خودی خود مسئله‌ای چالش‌برانگیز و بسیار پیچیده است که تعداد بسیار زیادی از معادلات دیفرانسیل غیرخطی را در دل خود جای می‌دهد. از دیدگاه دقت محاسباتی استفاده از مدل‌ها و سینتیک‌های شیمیایی دربرگیرنده جزئیات فراوان امری ایدئال به‌نظر می‌رسد، اما این موضوع پیامد هزینه سنگین محاسباتی به‌ویژه در محفظه احتراق‌های صنعتی با ساختار هندسی پیچیده را در پی دارد[۴]. چالش‌های اصلی در مدل‌سازی احتراق آشفته یافتن راه‌حلی برای محاسبه نرخ واکنش متوسط^۵ و گنجاندن اثر سینتیک‌های شیمیایی درون مدل است[۱۴].

در روش RANS معادلات مربوط به بقای گونه‌های شیمیایی و انرژی، همانند سایر معادلات، میانگین‌گیری می‌شوند. این امر منجر به تولید جمله‌های ناشناخته جدیدی در معادلات مذکور می‌شود. جمله اول مربوط به شار اغتشاشی گونه‌ها و آنتالپی است که معمولاً با استفاده از فرض گرادیان پخش^۶ مدل‌سازی می‌شود. جمله دوم مربوط به متوسط نرخ واکنش است. این جمله با استفاده از مدل‌های نرخ محدود، نظیر EDC^۷، جایگزین می‌شود[۱۵]. از آنجایی که نرخ واکنش به‌شدت غیرخطی

1. Flamelet Generated Manifold
2. flamelet progress variable
3. Dissipation
4. Reynolds Stress Model
5. Mean Reaction Rate
6. Gradient Diffusion
7. Eddy Dissipation Concept

است، مدل سازی نرخ واکنش متوسط در جریان اغتشاشی امری پیچیده است و منجر به خطا می شود. راه جایگزین برای متوسط گیری از معادلات بقای گونه ها و انرژی استخراج یک معادله انتقال برای تابع چگالی احتمال تک نقطه ای^۱ آن هاست. این تابع را می توان متناسب با صورت کسری از زمان در نظر گرفت که سیال، در هر گونه، حالت دمایی و حالت فشاری می گذراند. با حل این معادله انتقال، هر یک از حالات ترموشیمیایی به راحتی قابل محاسبه خواهد بود [۱۵-۱۷].

در مدل EDC، واکنش های شیمیایی، در ساختارهای کوچک اغتشاشی^۲، به صورت راکتور فشار ثابت مدل می شوند [۱۴]. این مدل، که توسط مگنوسن توسعه یافته است [۱۸]، به صورت گسترده در سیستم های احتراقی رایج مورد مطالعه و صحت سنجی قرار گرفته است [۱۹] و این مزیت را داراست که هم زمان با در نظر گرفتن اثرات سینتیک نرخ محدود هزینه محاسباتی بسیار کمتری را نسبت به مدل های پیشرفته ای نظیر^۳ TPDF داراست. این برتری نتیجه دقت پایین تری است که این مدل در توصیف نوسانات اغتشاشی-دمایی به کار برده است [۲۰].

مزیت اصلی استفاده از روش TPDF در عدم نیاز به مدل سازی جمله های مربوط به نرخ واکنش است که به شدت غیرخطی اند. با وجود این، جمله هایی نظیر اختلاط مولکولی^۴ در معادلات مربوط به این روش ظاهر می شوند که نیاز به مدل سازی دارند. به طور فیزیکی اختلاط بین ذراتی از سیال صورت می گیرد، که در مجاورت یکدیگر قرار دارند. در نظر نگرفتن این موضوع در مدل سازی اختلاط مولکولی منشاء خطا به حساب می آید. مدل^۵ EMST تنها مدل موجود در این روش است، که محلی بودن اختلاط مولکولی را در نظر می گیرد و لذا دارای دقت بالاتری نسبت به سایر مدل هاست. با وجود این، استفاده از این مدل اختلاط مولکولی منجر به افزایش هزینه محاسباتی نیز می شود [۱۵-۱۷].

بر اساس آنچه که بیان شد، هدف این مطالعه تلاش برای ساده سازی و کاهش هزینه محاسباتی فرایند مدل سازی محفظه احتراق GTMC و شناخت فیزیک جریان و احتراق در شرایط به کارگیری ورودی های دوگانه هواست. بدین منظور، ابتدا مسئله از لحاظ هندسی ساده سازی شده و سپس، با استفاده از مدل های اغتشاشی پایه RANS مناسب برای شبیه سازی جریان های پیچشی، حل معادلات جریان غیراحتراقی درون محفظه صورت گرفته است. پس از کسب اطمینان از صحت نتایج حاصل از شبیه سازی جریان غیراحتراقی، با به کارگیری مدل های احتراقی EDC و TPDF و استفاده از سینتیک شیمیایی^۶ DRM22 [۲۱]، که پیش تر عملکرد مناسبی در پیش بینی احتراق متان ارائه داده است [۲۲-۲۴]، جریان احتراقی درون محفظه مدل سازی شده و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه شده است.

هندسه و شرایط عملکردی محفظه احتراق

طرحواره GTMC در شکل ۱ نمایش داده شده است. این محفظه احتراق دارای دو ورودی هواست که به صورت هم محور وظیفه تزریق جریان پیچشی به محفظه را به عهده دارند که هر دو از یک مخزن مشترک تغذیه می شوند. صفحه شامل ورودی هوای مرکزی^۶ و سوخت در پایین دست ورودی هوای کناری^۷ و در فاصله ۴/۵ میلی متری از آن قرار دارد. قطر دهانه ورودی هوای مرکزی ۱۵ میلی متر، قطر داخلی ورودی هوای کناری ۱۷ میلی متر و قطر خارجی آن ۲۵ میلی متر است. نزدیک به ۴۰ درصد جریان ورودی به مخزن وارد ورودی هوای مرکزی و مابقی آن وارد ورودی هوای کناری می شود. جریان هوای مرکزی توسط ۸ پره، جهت چرخش جریان، تأمین می شود. این فرایند در ورودی کناری به وسیله ۱۲ پره صورت می گیرد و این امر موجب می شود که جریان ایجاد شده توسط ورودی هوای کناری دارای پیچش بیشتری نسبت به جریان ورودی هوای مرکزی باشد.

1. Single Point, Joint PDF
2. Fine Scales
3. Transported Probability Density Function
4. Molecular Mixing
5. Euclidean Minimum Spanning Tree
6. Central Air Inlet
7. Annular Air inlet

جریان سوخت متان نیز توسط ۷۲ کانال، به صورت غیرپیچشی از بین دو ورودی هوا، وارد محفظه احتراق می‌شود. محفظه احتراق دارای مقطع مربعی شکل با ابعاد ۸۵ میلی‌متر بوده و ارتفاع آن ۱۱۴ میلی‌متر است و یک صفحه مخروطی شکل آن را به آگزوزی استوانه‌ای شکل، به قطر ۴۰ میلی‌متر و طول ۵۰ میلی‌متر متصل می‌کند [۹،۱].

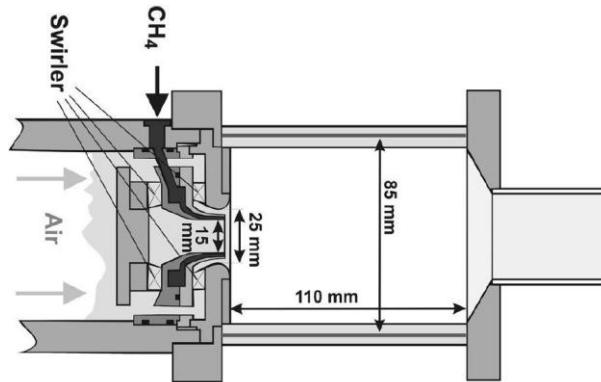


Figure 1- Schematic drawing of the model combustor [1]

شکل ۱- طرحواره محفظه احتراق توربین گاز مدل (GTMC) [۱]

آزمایش‌های تجربی مربوط به این محفظه احتراق تحت سه نوع شرایط عملکردی و در شرایط اتمسفریک صورت گرفته‌اند، اما آنچه مورد توجه این مطالعه قرار دارد شرایط پایدار مربوط به شعله نوع A است که در جدول ۱ ارائه شده است. در این شرایط، عدد رینولدز جریان بر مبنای قطر خروجی ورودی هوای مرکزی ۵۸۰۰۰ و عدد پیچش^۱ برابر ۰/۹ گزارش شده است. بر این اساس، جریان داخل محفظه در دسته جریان‌های کاملاً آشفته، با میزان پیچش زیاد، طبقه‌بندی می‌شود [۱،۹].

جدول ۱- پارامترهای عملکردی مربوط به شعله نوع A [۹،۱]

Table 1- Characteristics of Flame A [1,9]

	Air		CH ₄		P _{th} kW	Φ _{global}	f _{global}	T _{global adiabatic} K
	sl/min	g/min	sl/min	g/min				
Flame A	850	1095	58.2	41.8	34.9	0.65	0.037	1750

P_{th}, thermal power; Φ_{global}, equivalence ratio for the overall mixture; f_{global}, mixture fraction for the overall mixture; T_{global ad}, adiabatic temperature for the overall mixture with inlet temperature T₀ = 295 K

روش مدل‌سازی عددی

بر اساس آنچه که بیان شد، محفظه احتراق GTMC، از لحاظ ساختار هندسی بسیار پیچیده بوده و میدان جریان درون آن، میدانی کاملاً سه‌بعدی است. با وجود این، می‌توان با اعمال برخی فرضیات ساده‌کننده، میدان جریان سه‌بعدی داخل این محفظه را به صورت متقارن محوری و با دقت قابل قبول مدل‌سازی کرد. نتایج به دست آمده از میدان سرعت حاصل از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی سه‌بعدی صورت گرفته نشان می‌دهند که فرضیه تقارن محوری جریان درون محفظه احتراق فرض مناسبی است [۹-۷،۴،۱]؛ اگرچه اثرات عدم تقارن جریان در گوشه‌های محفظه احتراق آشکار می‌شود [۲] که قابل چشم‌پوشی به نظر می‌رسد.

با وجود این، اثرات سه‌بعدی بودن جریان در کانال‌های شعاعی ایجادکننده جریان پیچشی داخل ورودی‌های هوا، که ایجادکننده الگوی جریان درون محفظه‌اند، به هیچ عنوان قابل چشم‌پوشی نیست. به منظور دستیابی به شرایط مرزی مناسب و

1. Swirl Number

قابل اطمینان، ورودی‌های هوای مرکزی و کناری به صورت سه بعدی مدل سازی شدند و از نتایج این مدل سازی جهت مشخص کردن شرایط مرزی استفاده شده است. بدین منظور توزیع سرعت‌های محوری، شعاعی و مماسی در فاصله ۱ میلی متری پس از خروج جریان از کانال‌های شعاعی استخراج شده و پس از میانگین گیری روی تمامی مقاطع شعاعی، به عنوان شرط مرزی برای مسئله موجود در نظر گرفته شد. در شکل ۲، میدان محاسباتی، شبکه و شرایط مرزی مربوط به ورودی‌های هوا به نمایش درآمده است. همان گونه که در این شکل مشخص است، برای اعمال شرط مرزی ورودی، از شرط دبی جرمی ورودی^۱ و برای مرز خروجی از شرط فشار خروجی^۲ استفاده شده است.

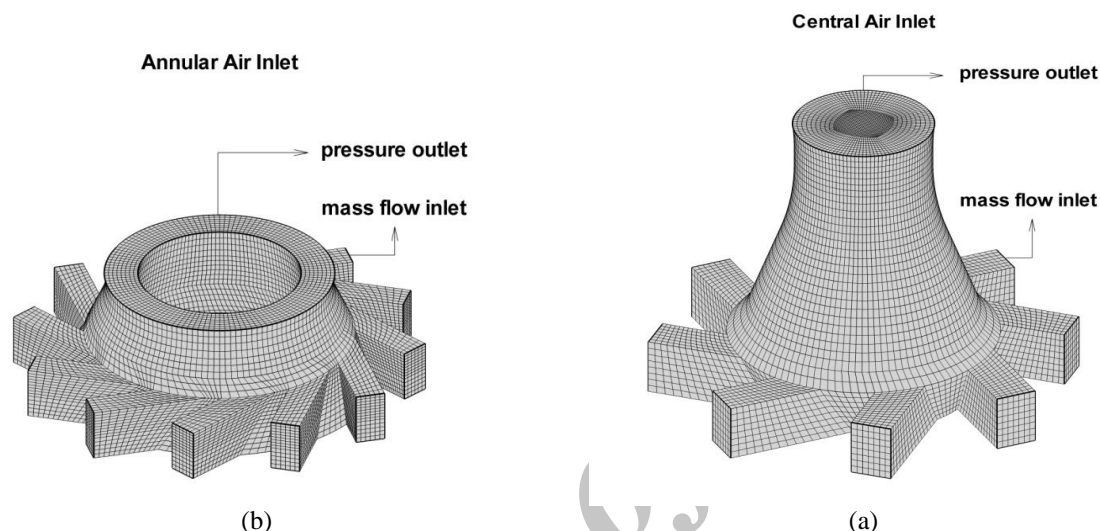


Figure 2- a) 3D computational domain of central swirler, b) 3D computational domain of annular swirler.

شکل ۲- (a) میدان محاسباتی سه بعدی مربوط به ورودی هوای مرکزی، (b) میدان محاسباتی سه بعدی مربوط به ورودی هوای کناری

در شکل ۳، میدان محاسباتی، شبکه مورد استفاده و شرایط مرزی مربوط به محفظه احتراق نشان داده شده اند. شروع میدان محاسباتی ۱ میلی متر بالاتر از کانال‌های شعاعی تأمین هوا (محل میانگین گیری مؤلفه‌های سرعت) قرار گرفته است. این شبکه به صورت چندبلوکه و با به کارگیری روش هیبرید، به صورت ترکیبی از شبکه‌های باسازمان و بدون سازمان ایجاد شده است و بخش باسازمان بیش از ۹۵ درصد میدان محاسباتی را دربر می‌گیرد. مهم ترین نکته در تولید این شبکه، توجه به محل جدایش جریان، از روی دیواره ورودی هوای کناری است. به نحوی که ریزنبودن کافی شبکه در روی این دیواره موجب می‌شود که جریان به دیواره بچسبد و از روی آن جدا نشود (اثر کواندا^۳) [۳]. این امر موجب می‌شود تا ناحیه گردش بیرونی (ORZ) درون محفظه تشکیل نشود و در پی آن ناحیه گردش داخلی (IRZ)، بزرگ تر از اندازه واقعی، شبیه سازی شود. نتیجه این امر عدم تطابق الگوی جریان درون محفظه با آزمایش‌های تجربی خواهد بود. بدین منظور روی دیواره جانبی ورودی هوای کناری، همواره شرط $Y^+ < 1$ رعایت شده است. برای اعمال شرط مرزی ورودی‌های هوا از شرط سرعت ورودی^۴ استفاده شده است. همان گونه که بیان شد، مقادیر مربوط به مؤلفه‌های سرعت ورودی، از حل سه بعدی جریان ورودی‌های هوای شعاعی استخراج شده است. مرز ورودی سوخت توسط یک شیار با مساحت معادل کانال‌های ورودی سوخت و با استفاده از شرط دبی جرمی ورودی مدل سازی شده است. همچنین، تمامی دیواره‌ها با استفاده از شرط عدم لغزش و به صورت بی دررو، و شرایط مرزی خروجی اگزوز با شرط فشار خروجی مدل شده است.

1. Mass Flow Inlet
2. Pressure Outlet
3. Coandă
4. Velocity Inlet

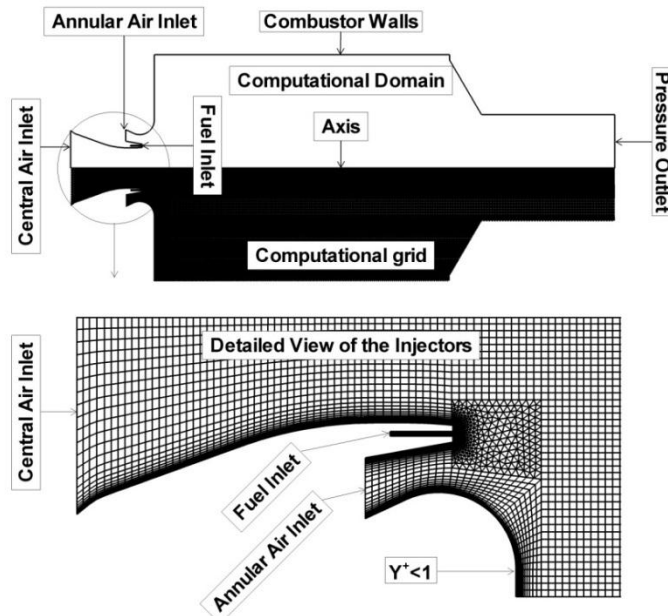


Figure 3- computational domain and applied boundary condition

شکل ۳- میدان حل، شرایط مرزی و شبکه محاسباتی

شبیه‌سازی، با استفاده از حلگر فشار پایه^۱ به صورت ضمنی^۲، در فضای متقارن محوری و به صورت پایا صورت گرفته است. به منظور ارتباط فشار با میدان سرعت از الگوریتم سیمپل^۳ استفاده شده است. گسسته‌سازی تمامی معادلات، به جز گونه‌ها، نیز با استفاده از روش QUICK^۴، که یک روش مرتبه دو است، صورت گرفته است. به منظور اطمینان از عدم وابستگی نتایج حل عددی به شبکه محاسباتی، بررسی استقلال نتایج شبیه‌سازی از شبکه محاسباتی انجام شده است. این بررسی با استفاده از دو شبکه محاسباتی، با تعداد سلول محاسباتی ۲۴۳۷۰ و ۹۷۴۸۰، صورت گرفته است که نشان‌دهنده استقلال نتایج شبیه‌سازی از شبکه محاسباتی است. توزیع سرعت محوری، دما و کسر جرمی گونه CO برای هر دو شبکه مورد استفاده و داده‌های آزمایشگاهی مربوطه در شکل ۳ مشاهده می‌شود. این شکل نشان‌دهنده استقلال نتایج از شبکه محاسباتی برای شبکه محاسباتی دارای ۲۴۳۷۰ سلول است.

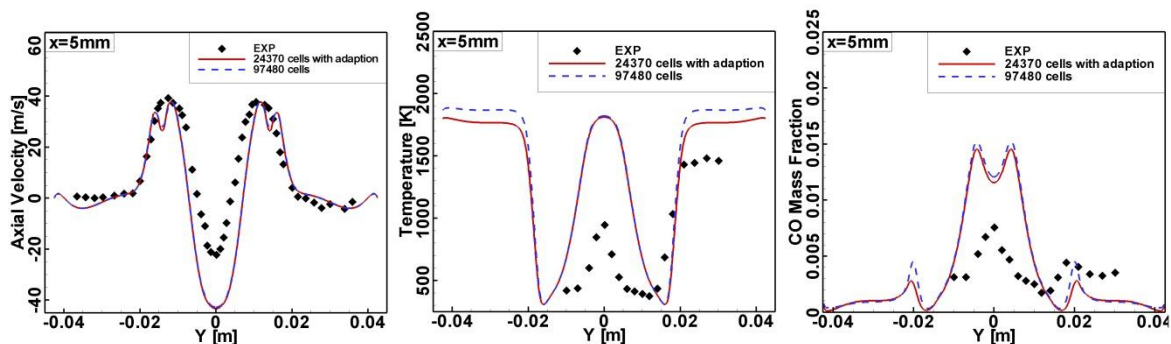


Figure 4- Independence of results from grid resolution

شکل ۴- استقلال نتایج از شبکه محاسباتی

1. Pressure Based
2. Implicit
3. SIMPLE
4. Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics

یافته‌ها

نتایج حاصل از حل جریان غیراحتراقی

شکل توزیع خطوط مسیر مربوط به حل میدان احتراقی درون GTMC را با استفاده از مدل اغتشاشی SAS نشان می‌دهد که مربوط به مرجع شماره ۶ است و می‌تواند به عنوان یک مرجع برای شناسایی و تفهیم الگوی کلی جریان درون محفظه احتراق مورد استناد قرار گیرد. همان‌گونه که پیش‌تر نیز گفته شد، این شکل نشان‌گر میدان جریان بسیار پیچیده‌ای است که برای جریان‌های چرخشی در محیط‌های بسته امری طبیعی است [۷]. همان‌گونه که انتظار می‌رود، این شکل یک ناحیه چرخشی در مرکز و نزدیک محور محفظه احتراق را نشان می‌دهد، که ناشی از پدیده شکست گردابه است. همچنین، یک ناحیه چرخشی دیگر نیز در گوشه‌های محفظه دیده می‌شود. این ساختار جریان نشان می‌دهد که در مدل‌سازی جریان‌های پیچشی درون هندسه‌هایی نظیر محفظه‌های احتراق مدل‌سازی آشفتگی جریان نزدیک دیواره در درجه دوم اهمیت قرار می‌گیرد. در واقع، در چنین شرایطی، معیار موفقیت یک مدل اغتشاشی توانایی آن در پیش‌بینی جریان در مرکز محفظه است [۱۶].

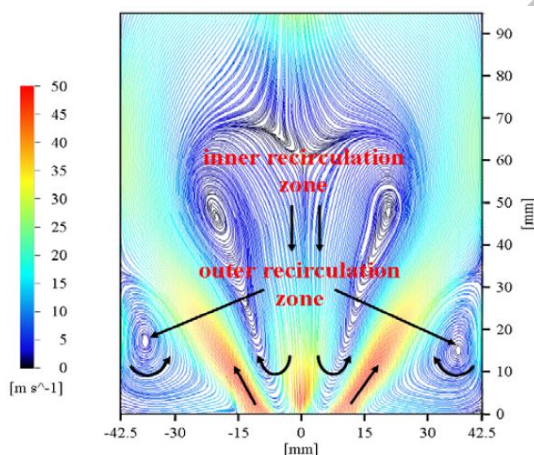


Figure 5- Streamline plot and imposed axial velocity contours for reacting flow field simulated using SAS turbulence model [6]
شکل ۵- خطوط مسیر مربوط به حل میدان احتراقی درون GTMC و کانتور توزیع سرعت محوری با استفاده از مدل اغتشاشی SAS [۶]

در شکل توزیع خطوط مسیر مربوط به جریان غیراحتراقی نشان داده شده است. این شکل مربوط به شبیه‌سازی‌های صورت گرفته با استفاده از مدل‌های اغتشاشی $k-\epsilon$ RNG، $k-\epsilon$ Realizable و RSM است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، هر سه مدل اغتشاشی قادر به پیش‌بینی نواحی با جریان گردشی مرکزی (IRZ) و کناری (ORZ) درون محفظه‌اند. استفاده از شبکه با تراکم بالا در نزدیکی دیواره جانبی ورودی هوای کناری باعث شده تا هر سه مدل محل جدایش جریان از روی این دیواره را با دقت مناسبی پیش‌بینی کنند. با وجود این، به نظر می‌رسد که مدل $k-\epsilon$ Realizable پیش‌بینی مناسبی از ORZ ندارد. لذا، در بررسی اولیه، مشخص می‌شود که این مدل اغتشاشی توانایی لازم برای مدل‌سازی جریان درون GTMC را ندارد. نواحی با تراکم خطوط بالا نشان‌دهنده لایه برشی^۱ ناشی از برخورد جریان ورودی به محفظه، با جریان چرخشی درون محفظه است. وجود این دو لایه برشی در ورودی محفظه، در کنار جریان بازگشتی و پیچشی، امکان اختلاط بالای سوخت و اکسنده را فراهم می‌آورد [۲۵]. این شکل نشان می‌دهد که پیش‌بینی مدل $k-\epsilon$ RNG از اندازه ناحیه IRZ بزرگ‌تر از اندازه پیش‌بینی شده توسط مدل RSM است. با توجه به اینکه ضعف اصلی مدل‌های خانواده $k-\epsilon$ در مدل‌سازی بازشدگی فواره‌های^۲ متقارن محوری است [۱۶]، در نگاه نخست می‌توان انتظار داشت که مدل RSM نتایج قابل قبول‌تری را نسبت به سایر مدل‌ها ارائه دهد.

1. Shear Layer
2. Jet

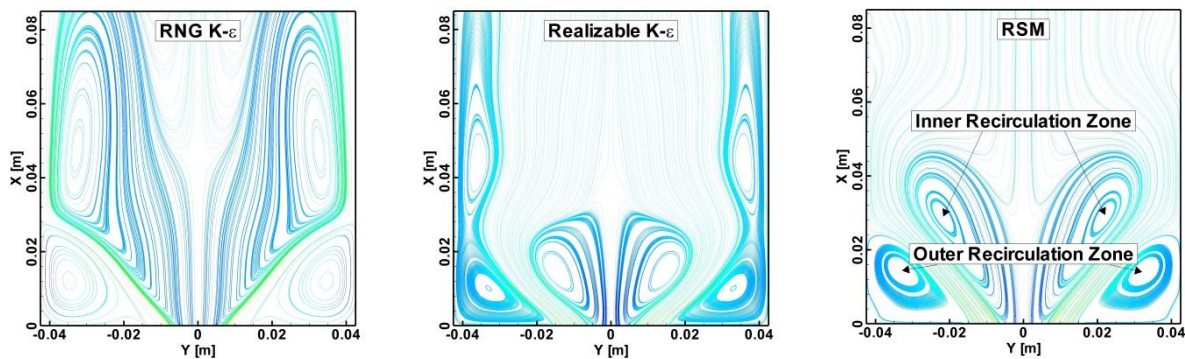


Figure 6- Streamline plot of the axial velocity for non-reacting flow simulated using RNG K – ϵ , Realizable k – ϵ and RSM turbulence models

شکل ۶- خطوط مسیر مربوط به حل جریان غیراحتراقی با استفاده از مدل‌های اغتشاشی ϵ -RNG K، ϵ -Realizable k و RSM

شکل پیش‌بینی مدل‌های اغتشاشی مختلف، برای مقادیر سرعت محوری^۱، شعاعی^۲ و مماسی^۳، در جریان غیراحتراقی را در مقایسه با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی در ۴ موقعیت مکانی نشان می‌دهد. نمودارهای سرعت محوری نشان‌دهنده سه ناحیه مجزا، از جریان درون محفظه‌اند. ناحیه نزدیک به محور، با مقادیر منفی سرعت، هم‌ارز با ناحیه شکست گردابه است که منجر به تشکیل IRZ می‌شود و در شرایط وجود شعله می‌تواند موجب پایداری آن شود. ناحیه با بیشینه مقادیر سرعت محوری نشان‌دهنده لایه برشی ناشی از تداخل جریان ورودی به محفظه با جریان برگشتی درون آن است. همچنین، ناحیه با مقادیر سرعت محوری منفی در نزدیکی دیواره محفظه نشان‌دهنده ORZ است. با فاصله‌گرفتن از ورودی محفظه، طبق انتظار، اثرات لزجت از قدرت جریان فواره ورودی کاسته و رفته‌رفته جریان در پایین‌دست محفظه یکنواخت می‌شود.

این نتایج پیش‌بینی انجام‌شده در بخش قبل، در مورد عدم توانایی مدل ϵ -Realizable k در ارائه نتایج مناسب، را به‌طور کامل تأیید نمی‌کند. همان‌طور که از شکل مشخص است، حداقل در مورد سرعت محوری، نتایج حاصل از این مدل به نتایج حاصل از مدل RSM و داده‌های تجربی نزدیک است. مدل ϵ -RNG k در پیش‌بینی مقادیر منفی سرعت محوری در نزدیکی ورودی، به مانند سایر مدل‌ها عمل می‌کند. با این وجود، این مدل، در نقاط دور از ورودی، نتایج قابل‌قبولی ارائه نمی‌دهد. همچنین، این نتایج نشان می‌دهد که زاویه بازشدگی جریان توسط مدل‌های عددی بیش از مقدار واقعی آن پیش‌بینی شده است. با فاصله‌گرفتن از ورودی محفظه، نتایج شبیه‌سازی‌های عددی از نتایج تجربی فاصله می‌گیرد. این امر به‌دلیل وجود میرایی^۴ عددی زیاد در مدل‌های RANS است [۷،۶].

همچنین، نواحی با مقادیر سرعت شعاعی منفی هم‌ارز با ناحیه ORZ هستند. نمودارهای شکل نشان می‌دهد که مدل ϵ -RNG k پیش‌بینی مناسبی از سرعت شعاعی به‌خصوص در نقاط دور از محور ارائه نمی‌دهد. در مورد این نمودارها نیز، مدل RSM نزدیک‌ترین نتایج را به داده‌های تجربی ارائه می‌دهد. البته، این قابل پیش‌بینی است که مدل RSM نتایج بهتری را نسبت به دو مدل دیگر ارائه دهد، چرا که این مدل اثرات انحنای خطوط جریان، پیچش و تغییرات سریع نرخ کرنش را، به‌طور ویژه، مورد توجه قرار می‌دهد [۲۳]. اما، همان‌گونه که از نمودارها قابل مشاهده است، مدل‌های اغتشاشی دیگر نیز فیزیک جریان مشابهی را پیش‌بینی می‌نمایند، اما دقت نتایج، در مدل‌های مختلف، متفاوت است.

همچنین، مقایسه مقادیر سرعت مماسی حاصل از مدل‌های اغتشاشی مختلف با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که بیشترین میزان اختلاف نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاه در مقادیر سرعت مماسی قابل مشاهده است. احتمالاً علت این امر حذف اثرات سه‌بعدی بودن جریان و ساده‌سازی‌های صورت‌گرفته است. علی‌رغم این موضوع، نتایج ارائه‌شده چیزی مخالف با

1. Axial Velocity
2. Radial Velocity
3. Swirl Velocity
4. Dissipation

فیزیک جریان را ارائه نمی‌دهند. به‌خصوص، در نزدیکی ورودی، فیزیک جریان را به‌خوبی پیش‌بینی می‌کنند، هرچند مدل‌های عددی مقادیر بیشینه را بیشتر از مقادیر تجربی آن محاسبه کرده‌اند. با فاصله‌گرفتن از ورودی، اثرات لزجت مقادیر بیشینه سرعت مماسی را کاهش داده و توزیع یکنواخت‌تری از آن ارائه می‌دهد. همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود، مدل RSM نتایج بهتری را نسبت به مدل $k-\epsilon$ Realizable و $k-\epsilon$ RNG ارائه می‌دهد.

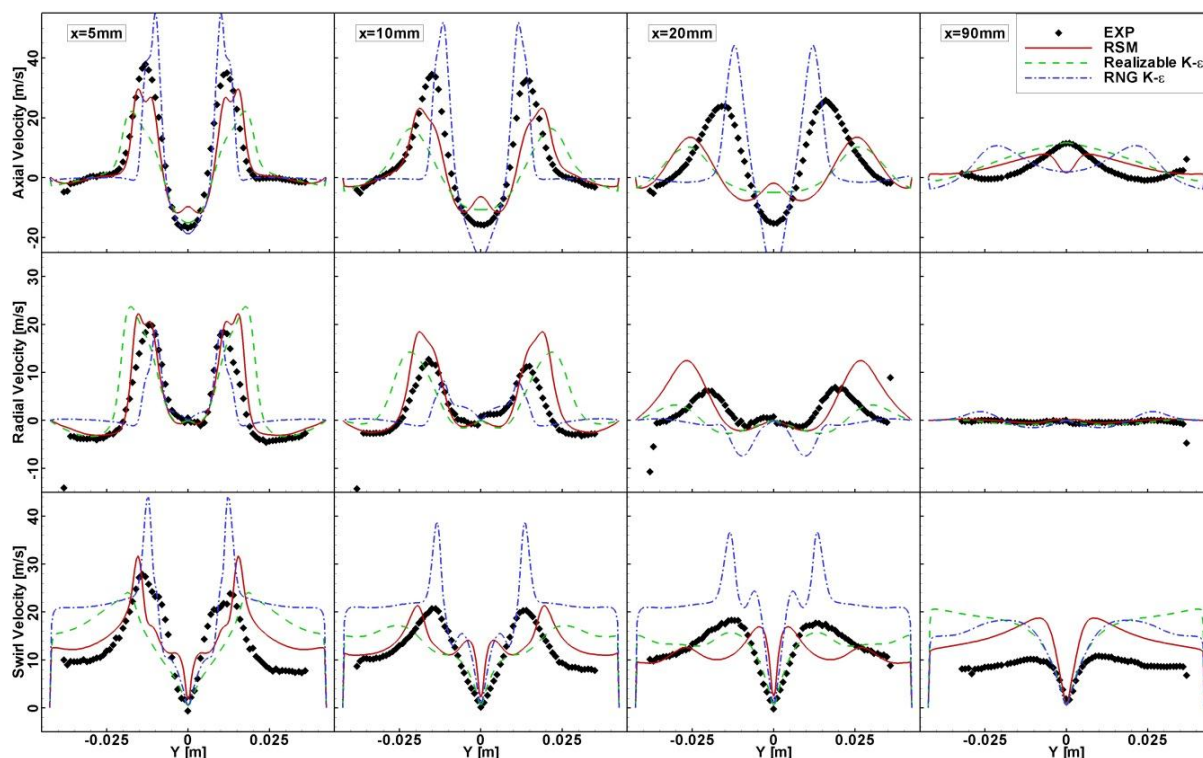


Figure 7- Comparison of computed and experimental velocity components for non-reacting flow field at four axial sections through GTMC

شکل ۷- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر آزمایشگاهی مؤلفه‌های سرعت برای جریان غیراحتراقی در چهار فاصله محوری درون محفظه احتراق

نتایج حاصل از حل جریان احتراقی

میدان سرعت

شکل کانتورهای مربوط به الگوی محاسبه‌شده برای سرعت محوری را نشان می‌دهد. این شکل بیان‌گر پیش‌بینی صحیح شبیه‌سازی‌ها از ساختار فیزیکی جریان درون محفظه و تطابق آن با مشاهدات تجربی است. خطوط مشکی‌رنگ نمایان‌گر نواحی دارای سرعت محوری صفر است. مقادیر منفی در مرکز محفظه احتراق نشان‌دهنده IRZ است که بر اثر شکست گردابه پدید آمده است. مختصه اصلی این ناحیه وجود گرادیان‌های شدید سرعت در آن است [۶]. همانند جریان غیراحتراقی، ناحیه ORZ نیز در گوشه‌های محفظه شکل یافته است. در ضمن، یک لایه برشی بین IRZ و جریان ورودی و یک لایه برشی نیز بین ORZ و جریان ورودی وجود دارد. در شکل ابعاد IRZ حاصل از نتایج شبیه‌سازی با ابعاد واقعی آن مقایسه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که شبیه‌سازی صورت‌گرفته با استفاده از مدل احتراقی EDC پیش‌بینی مناسبی از ارتفاع IRZ دارد، ولی عرض آن را بیشتر از ابعاد واقعی پیش‌بینی می‌کند. این در حالی است که استفاده از مدل احتراقی TPDF به پیش‌بینی کمتر از مقدار واقعی طول این ناحیه منجر شده و عرض آن را بیش از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند.

شکل نتایج حاصل از شبیه‌سازی احتراقی صورت گرفته با استفاده از دو مدل احتراقی EDC و TPDF را برای مؤلفه‌های سرعت محوری، شعاعی، مماسی و مقادیر تجربی آن‌ها را در ۴ موقعیت مکانی نشان می‌دهد. در بیشترین مقدار سرعت محوری برای هر دو مدل احتراقی 40m/s محاسبه شده است. با توجه به سرعت شعاعی منفی، نواحی مربوط به ORZ در $Y > 17\text{mm}$ قابل شناسایی‌اند. نواحی دربرگیرنده سرعت بیشینه مماسی نشان‌دهنده تداخل جریان‌های ورودی است و ناحیه با سرعت مماسی کم، بین این دو ناحیه، حاصل از جریان غیرپیشگی سوخت است.

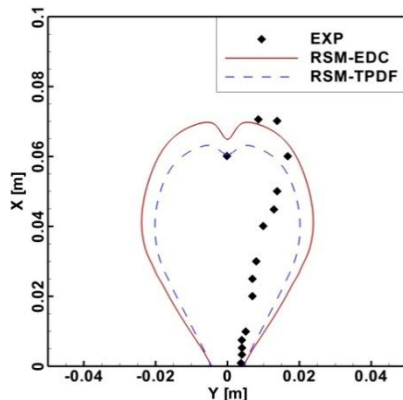


Figure 9- Comparison of computed and experimental borders of IRZ

شکل ۹- مقایسه ابعاد شبیه‌سازی شده برای IRZ با ابعاد تجربی آن

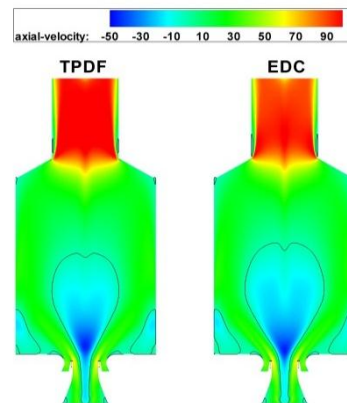


Figure 8- Contours of axial velocity for the EDC and TPDF models
Black lines represent the location of zero axial velocity

شکل ۸- کانتورهای سرعت محوری، شبیه‌سازی شده با استفاده از دو مدل احتراقی EDC و TPDF

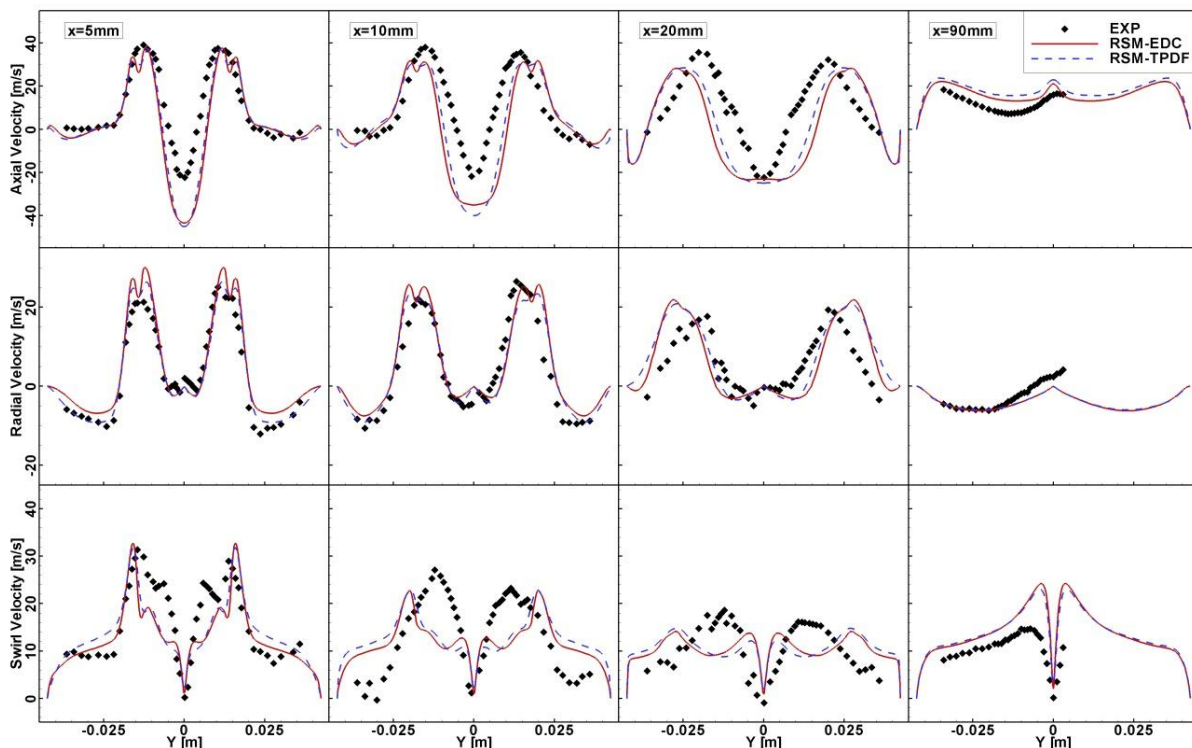


Figure 10- Comparison of computed and experimental velocity components for reacting flow field at four axial sections through GTMC

شکل ۱۰- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر آزمایشگاهی مؤلفه‌های سرعت برای جریان احتراقی در چهار فاصله محوری درون محفظه احتراق

در مقاطع بالادست $X=20\text{mm}$ خواص کلی جریان دچار تغییر نمی‌شود و تنها توزیع‌های سرعت در راستای شعاعی گسترده‌تر شده و هم‌زمان از ابعاد ORZ کاسته می‌شود و به تبع آن، بر ابعاد IRZ افزوده می‌شود. از مقطع $X=20\text{mm}$ به بعد، توزیع‌های سرعت یکنواخت‌تر می‌شوند و در $X=90\text{mm}$ شاهد توزیع‌های یکنواخت در مؤلفه‌های سرعت هستیم. به‌جز مقادیر کمینه سرعت محوری در نزدیکی نازل ورودی، در تمامی مقاطع، نتایج حاصل از شبیه‌سازی مربوط به سرعت محوری و شعاعی تطابق نزدیکی با داده‌های تجربی دارد. با وجود این، مقادیر بیشینه این سرعت‌ها، در نزدیکی دهانه ورودی، اندکی بیشتر از مقادیر تجربی، و در نواحی دور از دهانه اندکی کمتر از آن پیش‌بینی شده‌اند. سرعت مماسی نیز، در نواحی نزدیک به دهانه ورودی، تطابق خوبی با داده‌های تجربی دارد. اما، با افزایش فاصله از ورودی، از دقت این نتایج کاسته می‌شود که همان‌گونه که اشاره شد، ناشی از بیش پیش‌بینی مقادیر اتلاف است.

میدان دمایی و توزیع گونه‌ها

در شرایط فقیر از سوخت، به‌منظور کاهش احتمال وقوع پدیده ناپایداری احتراق و کاهش میزان آلاینده‌ها، اختلاط سوخت و اکسنده باید به‌خوبی صورت گیرد [۴]. شکل ۱۵ توزیع کسر مخلوط^۱ شبیه‌سازی شده را با توزیع تجربی آن مقایسه می‌کند. به‌منظور محاسبه کسر مخلوط، از تعریف ارائه‌شده توسط بیلگر استفاده شده است [۲۶]. همان‌گونه که انتظار می‌رود، بیشترین مقدار کسر مخلوط در نزدیکی نازل سوخت مشاهده می‌شود که با حرکت به سمت پایین دست جریان به سرعت کاهش یافته و به مقدار استوکیومتریکی می‌رسد. این موضوع نشان‌دهنده اختلاط مناسب سوخت و اکسنده درون GTMC است. پس از رسیدن به مقدار استوکیومتریکی، و حرکت بیشتر به پایین دست جریان، مقدار نسبت مخلوط باز هم کاهش پیدا می‌کند که این امر از ماهیت نیمه پیش‌آمیخته بودن جریان درون محفظه نشأت می‌گیرد. همان‌گونه که شکل ۱۵ نشان می‌دهد، مدل TPDF توزیع بهتری از کسر مخلوط نسبت به مدل EDC را در ORZ ارائه می‌دهد. توجه به نتایج تجربی نشان می‌دهد که کمترین میزان نفوذ سوخت به ناحیه ORZ صورت می‌گیرد و کسر مخلوط در این ناحیه به کمترین مقدار کاهش می‌یابد. مدل TPDF نیز نشان‌دهنده این موضوع است، اما مدل EDC توزیعی معادل با مقادیر کسر مخلوط کلی را در این ناحیه ارائه می‌دهد. علی‌رغم این که مدل EDC اختلاط را سریع‌تر از مقادیر واقعی پیش‌بینی می‌کند، توصیف مناسبی از مقادیر کسر مخلوط در پایین دست IRZ دارد، در حالی که مدل TPDF کسر مخلوط را بیش از مقادیر تجربی آن پیش‌بینی می‌کند. هرچند الگوی پیش‌بینی شده برای کسر مخلوط توسط مدل TPDF تطابق بیشتری با توزیع واقعی آن دارد.

شکل خطوط هم‌تراز دمای حاصل از شبیه‌سازی و داده‌های تجربی را درون محفظه نشان می‌دهد. با توجه به داده‌های آزمایشگاهی، اکثر واکنش‌ها در ناحیه IRZ به‌وقوع می‌پیوندد و این ناحیه دربرگیرنده بالاترین دما درون محفظه است. این موضوع به‌طور مستقیم با توزیع کسر مخلوط در ارتباط است. با افزایش فاصله از نازل ورودی، دما به سرعت افزایش می‌یابد. ادامه فاصله گرفتن از نازل ورودی، دما مجدداً شروع به کاهش می‌کند و این روند به آرامی تا خروجی محفظه ادامه می‌یابد. بیشترین دمای پیش‌بینی شده توسط مدل EDC، ۱۸۳۹ کلوین و مقدار آن برای مدل TPDF، ۲۰۵۶ کلوین است، در حالی که این مقدار با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی نزدیک به ۱۸۰۰ کلوین گزارش شده است. مدل TPDF در پیش‌بینی توزیع دما نیز (به‌خصوص در نزدیکی ورودی) بهتر از مدل EDC عمل می‌کند. این موضوع نتیجه پیش‌بینی بهتر مدل TPDF در مقادیر کسر مخلوط است. ابعاد ناحیه واکنشی پیش‌بینی شده توسط مدل EDC گسترده‌تر از ناحیه متناظر در مدل TPDF است که به‌نوعی با ابعاد پیش‌بینی شده برای IRZ توسط این مدل‌ها در شکل هم‌خوانی دارد.

شکل ۱۳۶ نتایج حاصل از حل عددی مربوط به کسر مخلوط را برای مدل‌های احتراقی مختلف، با مقادیر تجربی آن، در چهار موقعیت مکانی مقایسه می‌کند. در $X=5\text{mm}$ بیشترین میزان کسر مخلوط محاسبه شده بسیار کمتر از میزان آن در خروجی نازل سوخت است، که نشان‌دهنده اختلاط شدید سوخت و اکسنده در نزدیکی ورودی است. در $X=10\text{mm}$ مقادیر

1. Mixture Fraction

کسر مخلوط تا مقدار استوکیومتریک آن افت می‌کند و تا $X=20\text{mm}$ ادامه می‌یابد. در $X=20\text{mm}$ تغییرات کسر مخلوط در راستای شعاعی کاهش می‌یابد. این موضوع نشانه‌ای برای تکمیل فرایند اختلاط سوخت و اکسند ه به‌شمار می‌آید. هر دو مدل EDC و TPDF در نزدیکی نازل تطابق مناسبی با داده‌های تجربی ندارند، که می‌تواند ناشی از اثرات شدید ناپایابودن جریان در این ناحیه باشد [۴]. با حرکت به سمت پایین دست جریان، دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی بهبود می‌یابد و دقت نتایج مربوط به TPDF در این بخش نیز بهتر از مدل EDC است.

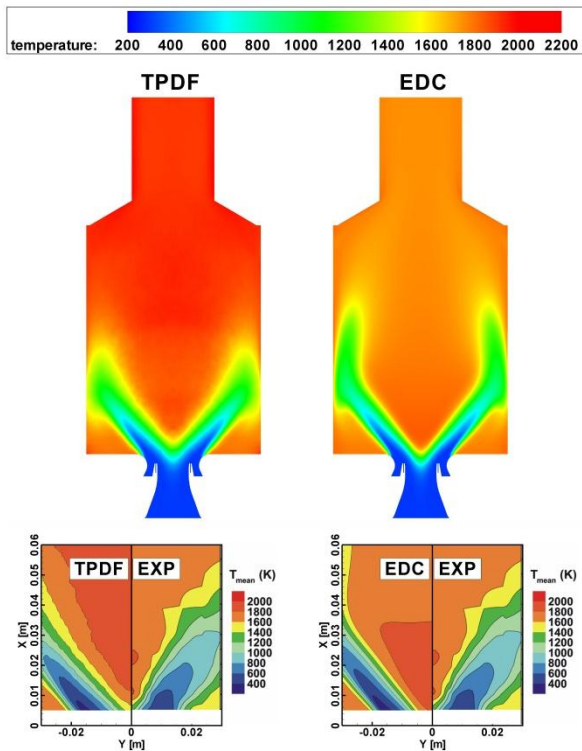


Figure 12. Comparison of computed and experimental Temperature contours for EDC and TPDF models.

شکل ۱۲- کانتورهای دما، شبیه‌سازی شده با استفاده از دو مدل احتراقی EDC و TPDF و مقایسه آن با مقادیر تجربی

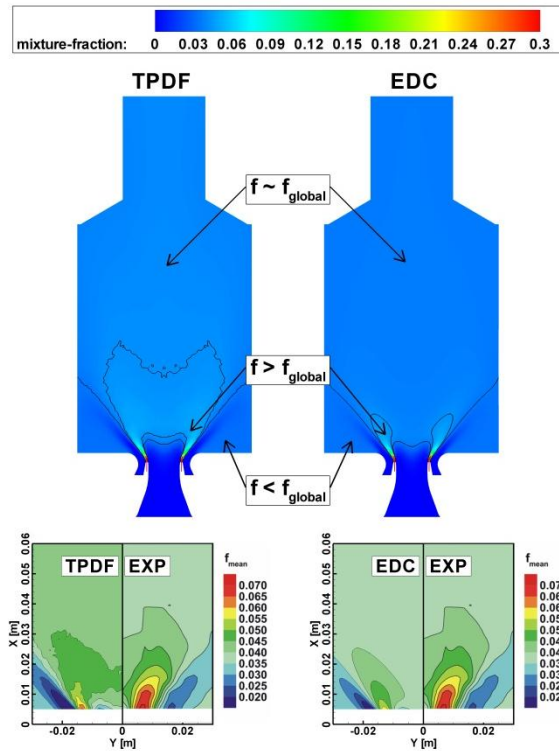


Figure 11. Comparison of computed and experimental mixture fraction contours for EDC and TPDF models.

شکل ۱۱- کانتورهای کسر مخلوط، شبیه‌سازی شده با استفاده از دو مدل احتراقی EDC و TPDF و مقایسه آن با مقادیر تجربی

شکل ۶، همچنین، نتایج مربوط به توزیع دمای درون محفظه را در چهار مقطع مختلف نشان می‌دهد. در $X=5\text{mm}$ دمای پیش‌بینی شده روی محور محفظه، توسط مدل EDC و TPDF به ترتیب، ۸۰۰ و ۵۰۰ کلین بیش‌تر از دمای تجربی محاسبه شده است. این دقت پایین، به‌ویژه در مورد مدل EDC، به‌خاطر این موضوع است که این مدل به‌اندازه‌ای دقیق نیست که بتواند میزان بلندشدگی شعله را به‌خوبی پیش‌بینی کند [۱۹]. ناحیه دمایی پایین در فاصله $5 < Y < 15$ متناظر با ورود جریان گاز تازه به محفظه است که توسط هر دو مدل شبیه‌سازی شده است. در $X=10\text{mm}$ ، همراه با افزایش کسر مخلوط به سمت مقدار استوکیومتریک، اشتعال سوخت و اکسند ه صورت می‌گیرد که افزایش سریع دما را در پی دارد. با افزایش فاصله از نازل ورودی، ناحیه دمایی بالا در مرکز محفظه گسترش می‌یابد که متناظر با گسترش IRZ در راستای شعاعی است. مقایسه دو مدل نشان می‌دهد که مدل TPDF دمای درون محفظه را، به‌خصوص در پایین دست ORZ، بهتر پیش‌بینی می‌کند. این امر به‌دلیل پیش‌بینی بهتر این مدل از توزیع کسر مخلوط درون محفظه است [۲۷].

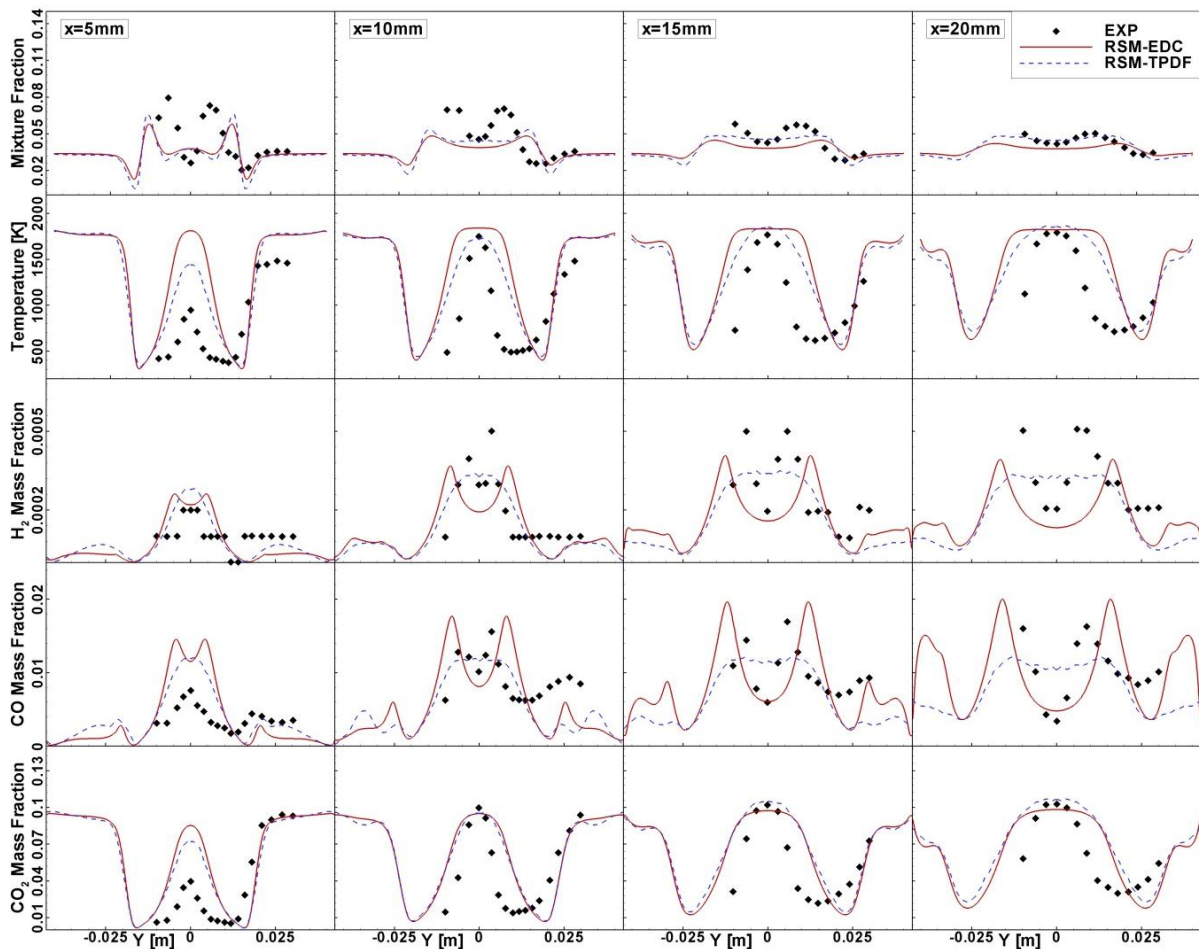


Figure 13- Comparison of computed and experimental radial profiles of mixture fraction, temperature, H_2 , CO and CO_2 for reacting flow field at four axial sections through GTMC.

شکل ۶- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر آزمایشگاهی توزیع شعاعی کسر مخلوط، دما، H_2 ، CO و CO_2 برای جریان احتراقی در چهار فاصله محوری درون محفظه احتراق

همچنین، در شکل ۱۳ نتایج حاصل از شبیه‌سازی مربوط به توزیع گونه‌های H_2 ، CO و CO_2 به همراه مقادیر تجربی آن‌ها ارائه شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در نزدیکی نازل ورودی از دقت مناسبی برخوردار نیست. این امر می‌تواند ناشی از وجود پدیده‌های ناپایا، نظیر چروکیدگی شعله، باشد [۵،۴] که البته امکان مدل‌سازی آن در حل پایا امکان‌پذیر نیست. همچنین، اختلاف موجود میان دمای شبیه‌سازی شده در این ناحیه با مقدار تجربی آن که پیش‌تر به آن اشاره شد نیز، می‌تواند عاملی برای این موضوع باشد. با فاصله گرفتن از نازل ورودی، دقت نتایج شبیه‌سازی بهبود می‌یابد. عملکرد مدل EDC در پیش‌بینی نوسانات گونه‌ها بهتر از مدل دیگر است، اما مدل TPDF پیش‌بینی بهتری از توزیع متوسط گونه‌ها ارائه می‌دهد که متناظر با پیش‌بینی بهتر این مدل از توزیع دما و کسر مخلوط درون محفظه است.

فیزیک احتراق تحت شرایط به کارگیری دو ورودی هوای پیش‌سختی

شکل کانتور سرعت محوری مربوط به حل جریان احتراقی درون GTMC را در نزدیکی ورودی‌های هوا نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، سرعت جریان در لبه ورودی مرکزی بیشتر از مقدار آن در لبه ورودی کناری است. با توجه به اینکه محل تزریق سوخت بین این دو ورودی هوا قرار دارد، بخش اصلی سوخت به منطقه‌ای مکش می‌شود که دارای

سرعت بالاتر و فشار نسبی پایین‌تری باشد. ل، با توجه به شکل، می‌توان این امر را پیش‌بینی کرد که بخش اعظم سوخت وارد ناحیه IRZ می‌شود که متأثر از ورودی هوای مرکزی است. در واقع، با توجه به شکل مشاهده می‌شود که بخش زیادی از هوای ورودی از ورودی مرکزی وارد بخش IRZ می‌شود. با توجه به مکیده شدن بخش زیادی از جریان سوخت به جریان ورودی مرکزی، سوخت در ناحیه IRZ، که یک ناحیه با جریان بازگشتی است، محبوس می‌شود و فرایند اختلاط به خوبی انجام می‌شود. پس از طی فرایند احتراق نیز، بخش زیادی از گازهای داغ تولیدی در ناحیه IRZ محبوس مانده و منجر به رقیق‌سازی و پیش‌گرم‌سازی آئروپنایمیکی مخلوط سوخت و اکسنده پیش از احتراق می‌شوند. این امر منجر به دستیابی به احتراقی با کیفیت بالا و میزان آلاینده‌گی پایین در محفظه احتراق‌هایی می‌شود که از چنین تکنولوژی در توزیع هوای ورودی استفاده می‌کنند.

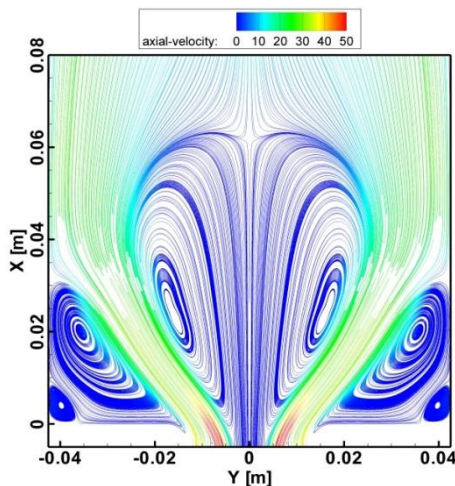


Figure 15- Reacting flow pathlines simulated using RSM turbulence model and TPDF turbulence-chemistry interaction model

شکل ۱۵- خطوط مسیر مربوط به حل جریان احتراقی درون محفظه حاصل از به کارگیری مدل اغتشاشی RSM و مدل احتراقی TPDF

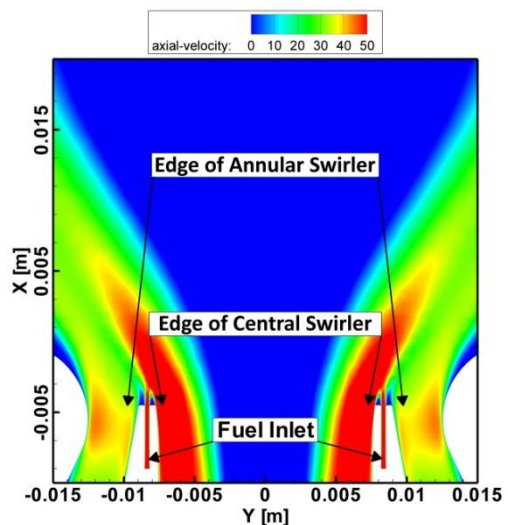


Figure 14- Contours of axial velocity around inlet
شکل ۱۴- کانتور سرعت محوری در نزدیکی ورودی

به‌منظور مطالعه ساختار شعله درون محفظه احتراق، خطوط هم‌تراز کسر مخلوط، فشار نسبی، دما و گونه‌های OH و CH_2O به ترتیب در شکل ارائه شده است. در این شکل، به‌منظور دستیابی به درک بهتر خطوط مسیر، خطوط مربوط به سرعت محوری صفر و خطوط هم‌تراز کسر مخلوط نیز با رنگ مشکی نمایش داده شده است. این شکل مؤید فرضیه ارائه شده در بخش قبل است؛ به این صورت که به‌علت افت فشار در IRZ و سرعت بالای جریان در لبه ورودی مرکزی نسبت به ورودی کناری، سوخت تزریق شده به‌سرعت به داخل IRZ مکیده شده است، لذا احتراق در IRZ به‌وقوع پیوسته است. بررسی توزیع OH نشان‌دهنده این موضوع است. بیشترین مقادیر مربوط به گونه OH در ناحیه IRZ متمرکز است که به‌معنای وقوع واکنش‌هایی با نرخ بالا در این منطقه است، در حالی که در نواحی دیگر محفظه این موضوع مشاهده نمی‌شود. همچنین، توجه به توزیع گونه CH_2O ، به‌عنوان رادیکالی که نشان‌گر وقوع جرقه است، نشان می‌دهد که جرقه در نواحی دارای کسر مخلوط ۰/۹ تا ۱ به‌وقوع می‌پیوندد که درون IRZ واقع است. توجه به تمامی این موارد بیانگر این موضوع است که احتراق درون ناحیه IRZ پایدار می‌شود و در ناحیه ORZ واکنش‌ها با نرخ پایینی به‌وقوع می‌پیوندند. با توجه به عدم اختلاط سوخت با جریان هوای کناری می‌توان این فرضیه را مطرح کرد که جریان کناری علاوه بر نقشی که در تعیین ابعاد IRZ و محل تشکیل نواحی نزدیک به استوکیومتریک دارد (پیش‌تر به آن اشاره شد)، می‌تواند به‌نوعی نقش خنک‌کاری دیواره‌ها را از طریق کاهش نرخ واکنش‌های شیمیایی عهده‌دار باشد. علاوه بر این موضوع، به‌نظر می‌رسد وقوع شکست گردابه^۱ توسط جریان کناری مانع از فرار سوخت از IRZ می‌شود.

1. Vortex Breakdown

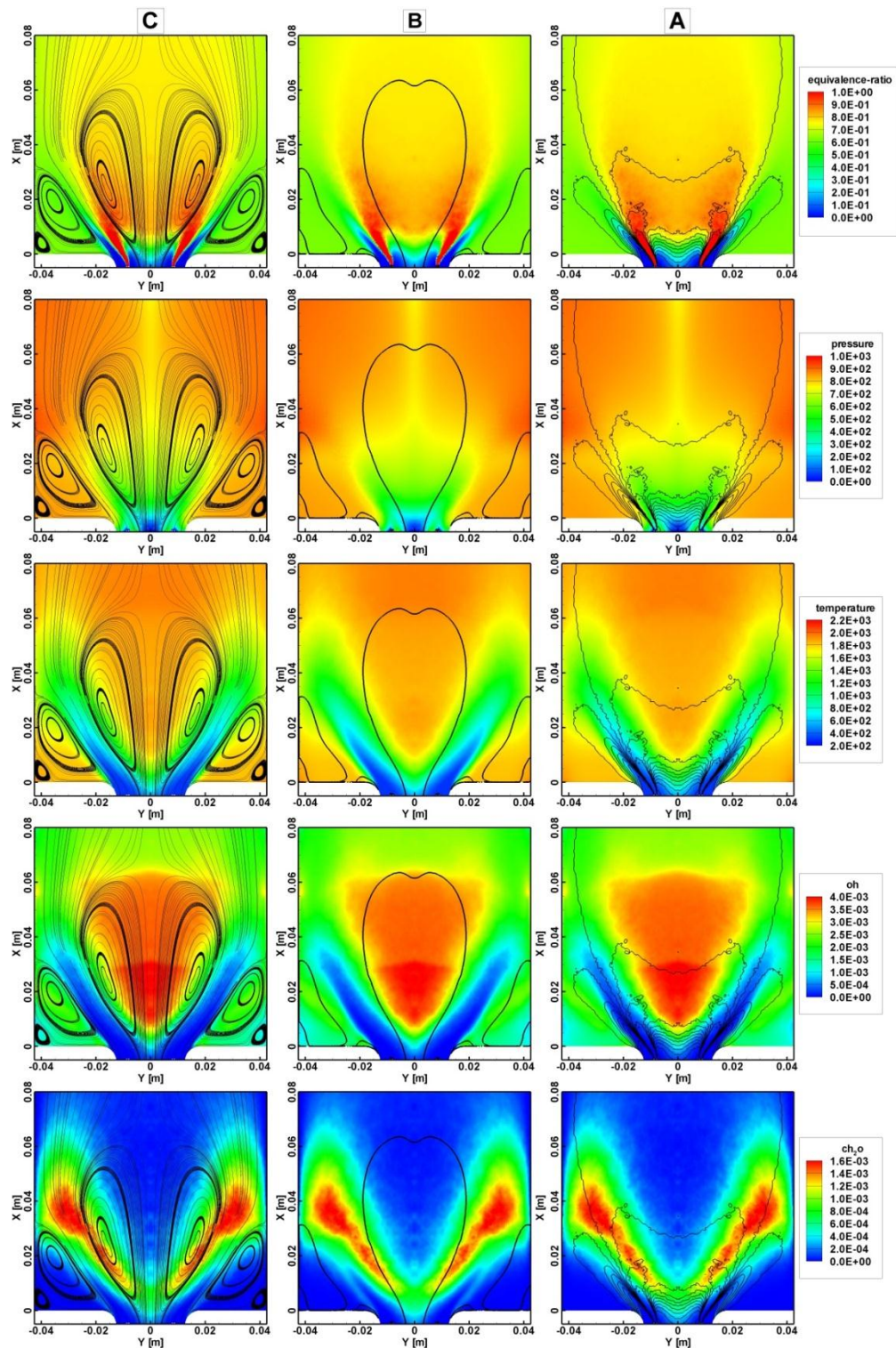


Figure16- Contours of mixture fraction, pressure, temperature and mass fractions of OH and CH_2O resulted from simulation using RSM turbulence model and TPDF turbulence-chemistry interaction model. Black lines in column A represent equivalence ratio levels, lines in column B are zero axial velocity regions, and lines in column C are path lines.

شکل ۱۶- کانتورهای کسر مخلوط، فشار، دما و گونه‌های شیمیایی OH و CH_2O حاصل از به کارگیری مدل اغتشاشی RSM و مدل احتراقی TPDF. خطوط مشکی رنگ در ستون A نشان دهنده خطوط هم‌تراز نسبت هم‌ارزی، در ستون B نشان‌دهنده نقاط دارای سرعت محوری صفر و در ستون C نشان‌دهنده خطوط مسیرند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، محفظه احتراق توربین گاز مدل، با استفاده از مدل‌های اغتشاشی $RNG K - \epsilon$ ، $Realizable k - \epsilon$ و RSM و مدل‌های احتراقی EDC و TPDF و با به‌کارگیری سینتیک شیمیایی DRM22، تحت روش RANS در حالت احتراقی و غیراحتراقی و به‌صورت متقارن محوری در شرایط پایه، با هدف شناخت الگوی جریان‌های ایجادشده توسط ورودی‌های پیچشی دوگانه و کاهش هزینه‌های محاسباتی، شبیه‌سازی شد. در ابتدا، با استفاده از حل جریان غیراحتراقی توسط مدل‌های مختلف اغتشاشی، ساختارهای مهم میدان جریان، نظیر IRZ و ORZ، استخراج شد و مشاهده شد که نتایج حاصل‌شده توسط مدل‌های مختلف RSM با مشاهدات صورت‌گرفته در آزمایش‌های تجربی مطابقت مناسبی دارد. در ادامه، با افزودن مدل‌های احتراقی به شبیه‌سازی، توانایی هر یک از این مدل‌ها در پیش‌بینی جریان احتراقی درون محفظه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده حاکی از این موضوع است که هر دو مدل EDC و TPDF پیش‌بینی مناسبی از ساختارهای کلی احتراق درون محفظه دارند. مدل EDC در پیش‌بینی میزان بلندشدگی شعله و دمای گوشه‌های محفظه احتراق خطای بیشتری را ارائه می‌دهد، اما در مورد محاسبه مقادیر مربوط به گونه‌های واسط بهتر از مدل TPDF عمل می‌کند. با وجود این، مدل TPDF در پیش‌بینی توزیع کسر مخلوط و دما در محفظه و همچنین محاسبه مقادیر مربوط به گونه‌های اصلی موفق‌تر از مدل دیگر است. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که علی‌رغم اعمال فرضیات ساده‌کننده‌ای نظیر فرض پایابودن جریان و فرض تقارن محوری، می‌توان پیش‌بینی مناسبی از میدان سرعت و دما، و توزیع گونه‌های احتراقی درون محفظه ارائه کرد. این موضوع به‌معنای کاهش قابل توجه هزینه محاسباتی و امکان شبیه‌سازی با سیستم‌های دارای قابلیت محاسباتی پایین است. فرایند صورت‌گرفته در این پژوهش منجر به شناخت الگوی اختلاط و احتراق در محفظه‌های با ورودی‌های پیچشی دوگانه شد. به‌علاوه فرایند صورت‌گرفته در این پژوهش را می‌توان به‌عنوان پایه و گام نخست شبیه‌سازی سه‌بعدی در نظر گرفت.

منابع

1. P. Weigand, W. Meier, X. R. Duan, W. Stricker and M. Aigner, "Investigations of Swirl Flames in a Gas Turbine Model Combustor: I. Flow Field, Structures, Temperature, and Species Distributions," *Combustion and Flame*, 144, 2006, pp. 205-24.
2. Y. C. See and M. Ihme, "Large-Eddy Simulation of a Gas Turbine Model Combustor," *51st AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2013.
3. Y. C. See and M. Ihme, "Les Investigation of Flow Field Sensitivity in a Gas Turbine Model Combustor," *52nd Aerospace Sciences Meeting*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2014.
4. M. J. Wankhede, F. A. Tap, P. Schapotschnikow and W. J. Ramaekers, "Numerical Study of Unsteady Flow-Field and Flame Dynamics in a Gas Turbine Model Combustor," *ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition*, American Society of Mechanical Engineers, 2014, pp. V04AT04A050-V04AT04A50.
5. Y. C. See and M. Ihme, "Large Eddy Simulation of a Partially-Premixed Gas Turbine Model Combustor," *Proceedings of the Combustion Institute*, 35, 2015, pp. 1225-34.
6. A. Widenhorn, B. Noll and M. Aigner, "Numerical Characterisation of a Gas Turbine Model Combustor Applying Scale-Adaptive Simulation," *ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air*, American Society of Mechanical Engineers, Orlando, Florida, USA, 2009, pp. 11-23.
7. A. Widenhorn, B. Noll and M. Aigner, "Numerical Study of a Non-Reacting Turbulent Flow in a Gas-Turbine Model Combustor," *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Orlando, Florida, USA 2009.
8. A. Benim, S. Iqbal, A. Nahavandi, W. Meier, A. Wiedermann and F. Joos, "Analysis of Turbulent Swirling Flow in an Isothermal Gas Turbine Combustor Model," *ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition*, American Society of Mechanical Engineers, 2014, pp. V04AT04A001-V04AT04A01.
9. W. Meier, X. R. Duan and P. Weigand, "Investigations of Swirl Flames in a Gas Turbine Model Combustor: II. Turbulence-Chemistry Interactions," *Combustion and Flame*, 144, 2006, pp. 225-36.
10. A. Widenhorn, B. Noll, M. Stöhr and M. Aigner, "Numerical Characterization of the Non-Reacting Flow in a Swirled Gasturbine Model Combustor," *High Performance Computing in Science and Engineering '07*, ed. by Wolfgang E. Nagel, Dietmar Kröner and Michael Resch, Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 431-44.

11. A. Widenhorn, B. Noll, M. Stöhr and M. Aigner, "Numerical Investigation of a Laboratory Combustor Applying Hybrid Rans-Les Methods," *Advances in Hybrid Rans-Les Modelling*, ed. by Shia-Hui Peng and Werner Haase, Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 152-61.
12. A. Widenhorn, B. Noll and M. Aigner, "Numerical Characterization of the Reacting Flow in a Swirled Gasturbine Model Combustor," *High Performance Computing in Science and Engineering '08*, ed. by Wolfgang E. Nagel, Dietmar B. Kröner and Michael M. Resch, Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 365-80.
13. A. Widenhorn, B. Noll and M. Aigner, "Numerical Characterization of a Gas Turbine Model Combustor," *High Performance Computing in Science and Engineering '09*, ed. by Wolfgang E. Nagel, Dietmar B. Kröner and Michael M. Resch, Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 179-95.
14. F. C. Christo and B. B. Dally, "Modeling Turbulent Reacting Jets Issuing into a Hot and Diluted Coflow," *Combustion and Flame*, 142, 2005, pp. 117-29.
15. T. Poinso and D. Veynante, *Theoretical and Numerical Combustion*, Philadelphia, RT Edwards, Inc., 2005.
16. Fluent Inc., "Fluent 6.3 User's Guide".
17. F. C. Christo and B. B. Dally, "Application of Transport Pdf Approach for Modelling Mild Combustion," *15th Australasian Fluid Mechanics Conference*, University of Sydney, Australia, 2004.
18. B. Magnussen, "On the Structure of Turbulence and a Generalized Eddy Dissipation Concept for Chemical Reaction in Turbulent Flow," *19th Aerospace Sciences Meeting*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1981.
19. J. Aminian, C. Galletti, S. Shahhosseini and L. Tognotti, "Numerical Investigation of a Mild Combustion Burner: Analysis of Mixing Field, Chemical Kinetics and Turbulence-Chemistry Interaction," *Flow, Turbulence and Combustion*, 88, 2012, pp. 597-623.
20. A. De, E. Oldenhof, P. Sathiah and D. Roekaerts, "Numerical Simulation of Delft-Jet-in-Hot-Coflow (Djhc) Flames Using the Eddy Dissipation Concept Model for Turbulence-Chemistry Interaction," *Flow, Turbulence and Combustion*, 87, 2011, pp. 537-67.
21. A. Kazakov and M. Frenklach, "Reduced Version of Gri-Mech 1.2. 22 Species (+ N₂, Ar); 104 Reactions," PennState: 1994, <http://www.me.berkeley.edu/drm/>, Accessed 2 February 2016.
22. A. Mardani, S. Tabejamaat and S. Hassanpour, "Numerical Study of Co and Co₂ Formation in Ch₄/H₂ Blended Flame under Mild Condition," *Combustion and flame*, 160, 2013, pp. 1636-49.
23. A. Mardani, S. Tabejamaat and M. Ghamari, "Numerical Study of Influence of Molecular Diffusion in the Mild Combustion Regime," *Combustion Theory and Modelling*, 14, 2010, pp. 747-74.
24. A. Mardani and S. Tabejamaat, "Effect of Hydrogen on Hydrogen-Methane Turbulent Non-Premixed Flame under Mild Condition," *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 2010, pp. 11324-31.
25. A. Mardani, A. Fazlollahi, "Numerical Investigation of Non-reacting Flowfield in A Gas Turbine Model Combustor using Different Turbulence Models," *14th International Conference of Iranian Aerospace Society* Tehran, Iran, 3-5 March 2015. (in Persian)
26. Fluent, I. N. C. (2006). FLUENT 6.3 user's guide. Fluent documentation.
27. R. W. Bilger, S. H. Starner and R. J. Kee, "On Reduced Mechanisms for Methane/Air Combustion in Nonpremixed Flames," *Combustion and Flame*, 80, 1990, pp. 135-49.
28. A. Mardani, A. Fazlollahi, "Numerical Investigation of Reacting Flowfield in A Gas Turbine Model Combustor using Different Turbulence-Chemistry Interaction Models," *6th Fuel and Combustion Conference of Iran*, Tehran, Iran, 16-17 February 2016. (in Persian)

English Abstract

Numerical Investigation of Reacting Flow in a Double-swirled Gas Turbine Model Combustor

Alireza Fazlollahi-Ghomshi¹ and Amir Mardani²

1- Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

2- Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 2016.7.19, Received in revised form: 2016.12.16, Accepted: 2017/2.18)

In this work, numerical investigation of a double-swirled gas turbine model combustor (GTMC) was carried out using RANS approach with three different turbulence models of RNG k- ϵ , Realizable k- ϵ and RSM, and two different turbulence-chemistry interaction models of EDC (Eddy Dissipation Concept) and TPDF (Transported Probability Density Function). A detailed reduced mechanism of DRM22 (with 22 species and 104 reactions) was used to represent the chemical reactions. GTMC with a good optical access for laser measurements provided a useful database for swirling CH₄/Air diffusion flames at atmospheric pressure. Comprehensive comparisons were done for the predictions and measurements of velocity, mixture fraction, temperature, and chemical species concentrations of H₂, O₂, OH, H₂O, CH₄, CO, and CO₂. Results showed an acceptable accuracy of predictions. This means that the simplified 2D-axisymmetric simulation has the ability to capture the important features and structure of combustion field in a double highly swirled chamber, like GTMC, with much lower CPU time in comparison with the costly 3D simulations. This study illustrated that using RSM turbulence model presents acceptable results for the flow field, while the other turbulence models were not capable of capturing quantitatively acceptable results. In terms of comparison between the turbulence-chemistry interaction models, TPDF led to a good prediction for major species and flame structure near the inlets, while the EDC predicted more accurately downstream of the flow field. Moreover, the analysis of flame structure showed that mixing of fuel and oxidizer under double-swirl configuration happens fast and in high levels. In addition, using this type of mixing led to stabilization of main reaction zone in the center of combustion chamber near the injection plane. As a result, under double-swirl injection configuration clean and high quality combustion with reduced size of combustion chamber can be achieved simultaneously.

Keywords: Gas Turbine Combustor, double-Swirl Injector, Turbulence Model, Turbulence-Chemistry Interaction model