

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

علیرضا فضلالهی قمشی و امیر مردانی ً

۱- کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، fazlollahi.alireza@gmail.com
 ۲- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران (نویسنده مخاطب)، amardani@sharif.edu
 (تاریخ دریافت: ۲۸/۹/۱۲۸، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۵/۹/۲۵، پذیرش: ۹۵/۱۱/۲۹)

چكیده: در این پژوهش، محفظه احتراق توربین گاز مدل (GTMC)، كه به منظور تزریق جریان هوا از تكنولوژی ورودی پیچشی دوگانه بهره میبرد، با استفاده از فرضیات ساده كننده، به صورت پایا و با فرض تقارن محوری و تحت روش RANS در حالت احتراقی و غیراجتراقی مورد مطالعه و شبیه سازی عددی قرار گرفته است. بدین منظور، در گام نخست، توانایی مدل های اغتشاشی $\Theta = RNG$ ه مورد مطالعه و شبیه سازی عددی قرار گرفته است. بدین منظور، در گام نخست، توانایی مدل های اغتشاشی $\Theta = RNG$ ه مورد مطالعه و شبیه سازی عددی قرار گرفته است. بدین منظور، در گام نخست، توانایی مراحی شده ای اختشاشی منافر، در گام نخست، توانایی مدل های اغتشاشی $\Theta = RNG$ ه مورد مطالعه و شبیه سازی عددی قرار گرفته است. بدین منظور، در گام نخست، توانایی مراحی شده ای اختشاشی محافلی اعتشاهی محاصل از شبیه سازی شده است. در این بررسی، مقادیر حاصل از شبیه سازی برای مؤلفه های سرعت محوری، شعاعی و مماسی در حالت احتراقی و غیراحتراقی و کسر مخلوط، دما و گونه های داری برای مؤلفه های سرعت محوری، شعاعی و مماسی در حالت احتراقی و غیراحتراقی و کسر مخلوط، دما و گونه های در این بررسی، مقادیر حاصل از شبیه سازی شده است. در این بررسی، مقادیر حاصل از شبیه سازی برای مؤلفه های سرعت محوری، شعاعی و مماسی در حالت احتراقی و غیراحتراقی و کسر مخلوط، دما و گونه های داری در ی که علی مؤلفه می سرعت محوری، شعاعی و مماسی در حالت احتراقی و غیراحتراقی و دی محلوط، دما و گونه های در ی در ی که علی زم در این برسی، مقادیر حلی این بررسی نشان می دهد و معای که علی زم مورت گرفته به خوبی توانایی مدل سازی و توصیف رفتار کلی جریان و احتراق درون محفظه است. نتایج حاکی از برتری مدل RSM نسبت به دو مدل هو احتراق در در محفظه را داراست. اما، مطابق انظار، استفاده از مدل های اغتشاشی و احتراقی پیشرفته در در در ندان هر معین در مدی مورت گرفته به خوبی توانایی مدل سازی و توصیف رفتار کلی جریان و نور محفظه را داراست. اما، مطابق انتظار، استفاده از مدل های اغتشاشی و احتراقی پیشرفته در، در کنار افزایش که مینین منور در همچنین منوی در می مدل مازی در مدال در مدی هر می میشین میور می به مینو در مدی مدی مرد مدی مدی مدی مدو مدل مدی می مورد. می مودی محفظه است. مدر می مدل RAM می و ساختار شعله در نزدیکی ورودی محفظه است، در حالی که استوا در مدل CO مدی مدی می مدی می می

کلیدواژگان: محفظه احتراق توربین گاز، ورودی پیچشی دوگانه، مدلهای اغتشاشی، مدلهای احتراقی، متقارن 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[1–0]. بهمنظور دستیابی به چنین معیارهایی، استفاده از جریانهایی با میزان پیچش ^۱ بالا پیشنهاد شدهاست[۶،۳]. مزیت استفاده از محفظههای احتراق با جریان پیچشی توانایی انتقال انرژی بالا، تسریع روند اختلاط سوخت و اکسنده و متعاقب آن کاهش ابعاد محفظه احتراق و بهبود فرایند اشتعال است[۱۰،۳]. از سوی دیگر، استفاده از مشعلهای با میزان پیچش بالا منجر به پایداری بیشتر شعله و احتراق در شرایط پیشآمیخته و غنی از اکسنده در گستره وسیعی از محدوده عملکردی توربینهای گاز میشود و طول عمر آنها را افزایش میدهد[۶۰]. این در حالی است که ایجاد چنین جریانهایی، مستلزم به کارگیری هندسههای پیچیده در طراحی محفظه احتراق است[۳].

^{1.} Swirl

احتراق می شود [۴]. این امر روند طراحی محفظه احتراق را پیچیده تر 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 شبیه سازیهای عددی می کند که منجر به افزایش زمان و هزینه محاسباتی و متعاقب آن به طول انجامیدن روند طراحی می شود. لذا، بررسی قابلیت به کارگیری مدلهای فیزیکی ساده در روشهای عددی، به منظور کاهش هزینه محاسباتی، موضوع جذابی به نظر می رسد. با به کارگیری مدلهای ساده فیزیکی و تلفیق آن ها با یک استراتژی مناسب، و استفاده از فرضیات مناسب، امکان یک مدل سازی عددی با هزینه محاسباتی اندک فراهم می شود و می توان نتایج قابل قبولی را، حتی در مورد جریان های 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، اصلی ترین 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 صورت گرفته روی این مدلها امکان صحتسنجی نتایج حاصل از شبیهسازیهای عددی را فراهم آورده است. ازجمله این محفظههای مدل مى توان به GTMC اشاره كرد. اين محفظه احتراق مدل از تكنولوژى ورودى پيچشى دوگانه استفاده مىكند. مزيت بهره گیری از این نوع مشعل ها در کاهش حجم محفظه احتراق و بهبود و تسریع فرایند اختلاط سوخت و اکسنده 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 می شود. یکی از این ناپایداریها، پیشروی مرکز گردابه کاست. این پدیده ناپایا در ورودی محفظه بهوقوع می پیوندد و منجر به ایجاد یک جریان چرخشی می شود که با فرکانس مشخصی حول محور پیچش جریان در حال چرخش است[۶،۷]. شکل دیگری از این نوع ناپایداریها وجود پدیده ریزش گردابه^{¹ د}ر ورودی محفظه است. این پدیده ناشی از وجود پرههای ایجادکننده جریان پیچشی در ورودی هواست و منجر به چینخوردن شعله⁶ در نزدیکی ورودی محفظه می شود [۴،۷]. نوع دیگر ناپایداری در جریانهای با پیچش بالا پدیده شکست گردابه⁵ 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 می گیرد. 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^V) و متعاقباً یک ناحیه دیگر با جریان چرخشی در گوشههای محفظه شکل میگیرد (^ORZ)[۲-۴۸]. بروز همزمان این ناپایداریها جریان بسیار پیچیدهای را درون محفظه احتراق شکل میدهد. لذا، مدلسازی عددی جریان درون چنین محفظههایی فرایندی زمان ر و مستلزم به کارگیری روشهای خاص با دقت بالاست.

- 1. Gas Turbine Model Combustor
- 2. Double Swirl
- 3. PVC
- Vortex Shedding
 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، بهمنظور 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 هم محور است که از یک مخزن هوای مشترک تغذیه میشوند و جریان سوخت از بین این دو جریان هوا بهصورت غیرپیچشی وارد محفظه میشود و به این ترتیب احتراق در شرایط نیمه پیش آمیخته صورت میگیرد. این محفظه که در سه شرایط عملکردی مختلف (A و C) بهصورت 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^۲، پسزنی¹ و خاموشی⁶ مشاهده میشود [۱۰۹]. این عملکرد پایدار، امکان مناسبی برای شبیهسازیهای عددی و صحتسنجی مدلهای اغتشاشی، مدلهای احتراقی و اثر متقابل این مدلها فراهم می آورد[۲].

GTMC برخلاف سایر محفظههای احتراق پیچشی دارای دو ورودی هوای پیچشی است که بهصورت هم مرکز 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 هم مرکز، صورت گیرد و این موضوع میتواند موجب انعطاف پذیری در طراحی شکل محفظه احتراق و کاهش ابعاد آن شود. علاوهبر 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 پیش گرمسازی و رقیق سازی آئرودینامیکی به صورت خودکار شکل می گیرد و بهبود بازده احتراق را درپی 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 اولینبار در سال ۲۰۰۸ توسط وایدنهورن و همکارانش به صورت عددی مطالعه شد [۱۱،۱۰،۷]. در این مطالعات، توانایی مدلهای اغتشاشی هیبرید ^۶SAS^{، SAS^{, V}}Ces برای شبیه سازی جریان غیراحتراقی درون محفظه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان دهنده 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 ^{۲۰}Ces در EDM⁹/FRC میان جریان احتراقی درون محفظه را مدل سازی کردند[۶،۱۲،۱۳]. در سال ۲۰۱۳، سی و ایهمه از مدل اغتشاشی Zes به منظور شبیه سازی عددی جریان غیراحتراقی درون این محفظه احتراق استفاده کردند[۲]. آنها با مقایسه مدلهای زیرشبکه ای شبیه سازی عددی جریان غیراحتراقی درون این محفظه احتراق استفاده کردند[۲]. آنها با مقایسه مدلهای زیرشبکه ای زیرشبکه ای ورمن دقیق تر از نتایج سایر مدلهاست. بنیم و همکارانش نیز مدلها حساس است و نتایج حاصل از مدل زیرشبکه ای ورمن دقیق تر از نتایج سایر مدلهاست. بنیم و همکارانش نیز مدلهای اغتشاشی مختلف را در شبیه سازی این محفظه احتراق مورد استفاده قرار دادند[۸]. آنها، همچنین، در مورد اثر شرط مرزی خروجی روی دقت نتایج حاصل از شبیه سازی مطالعاتی را صورت دادند. در سال ۲۰۱۴، سی و ایهمه اثر اندازه شبکه محاسباتی را روی نتایج حاصل از شبیه سازی مطالعاتی را صورت دادند. در سال ۲۰۱۴، سی و ایهمه اثر اندازه شبکه محاسباتی را روی نتایج حاصل از شبیه سازی بررسی کردند[۳]. آنها به این نتیجه دست یافتند که ریزتر کردن شبکه در برخی موارد منجر به کاهش دقت نتایج میشود و لذا شبیه سازی جریان درون این محفظه احتراق به شبکه بسیار ریز نیاز ندارد و مستازم بررسی موارد دیگری است.

- 6. Scale Adaptive Simulation
- 7. Detached Eddy Simulation
- 8. Reynolds Averaged Navier Stokes

10. Finite Rate Chemistry

^{1.} Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt

^{2.} Blowoff

^{3.} Liftoff

^{4.} Flashback

^{5.} Extinction

^{9.} Eddy Dissipation Model

وانخده و همکارانش نیز با به کارگیری مدلهای اغتشاشی DES و RANS و مدل احتراقی 'FGM این محفظه احتراق را مدلسازی کردند[۴]. آنها دریافتند 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 ^۲VPV را در مورد پیشبینی میدان احتراقی درون محفظه مورد ارزیابی قرار دادند. در واقع، تمامی مدلسازیهای صورت گرفته روی GTMC در فضای سهبعدی، به صورت ناپایا و با استفاده از مدلهای پیچیده اغتشاشی و احتراقی انجام شده است. با این وجود، استفاده از مدلهای پرهزینهای نظیر ZES همواره با مشکلات فراوانی همراه بوده است؛ به ویژه اینکه فرایند طراحی و بهینه سازی محفظههای احتراق از طریق چرخههای تکراری صورت میگیرد. لذا، مدلهای کمهزینه RANS و RANS به عنوان بهترین ابزار شبیه سازی و تحلیل محفظه

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[۷٫۶]. اما، سادگی این مدلها و امکان استفاده از آنها در میدانهای دوبعدی و متقارن محوری شبیه سازی های عددی را به سمت استفاده از این مدلها سوق می دهد. در جریانهای با میزان پیچش بالا، به دلیل انحنای خطوط جریان و وجود گرادیان فشار، تنشهای رینولدز به طور قابل توجهی دچار تغییر میشوند[۸]. با توجه به این موضوع، به منظور شبیه سازی های اغتشاشی با میزان پیچش زاد تحت فرمولا سوق می دهد. در جریانهای با میزان پیچش بالا، به دلیل انحنای خطوط جریان و وجود گرادیان فشار، تنشهای رینولدز به طور قابل توجهی دچار تغییر میشوند[۸]. با توجه به این موضوع، به منظور شبیه سازی جریانهای اغتشاشی با میزان پیچش زیاد تحت فرمولا سیون RANS از مدل ⁴ این داد]. با توجه به این موضوع، به منظور شبیه سازی جریانهای اغتشاشی با میزان پیچش زیاد تحت فرمولا سیون RANS از می و دود ⁴ را دان فشار، تنشهای رینولدز به طور قابل توجهی دچار تغییر می شوند[۸]. با توجه به این موضوع، به منظور شبیه سازی جریانهای اغتشاشی با میزان پیچش زیاد تحت فرمولا سیون RANS از مدل ⁴ RANS استفاده می شود. می از در می گیرد[۴]. ما میزان پیچش زیاد تحت فرمولا سیون RANS از مدل ⁴ این مدل ای این مدل اثرات انحنای خطوط جریان و تغییرات سریع نرخ کرنش را دربر می گیرد[۴]. از مدل ⁴ NDS استفاده می شود، چرا که این مدل اثرات انحنای خطوط جریان و تغییرات سریع نرخ کرنش را دربر می گیرد[۴]. با این وجود، در پژوهش حاضر، با توجه به هزینه محاسباتی پایین تر مدل های اغتشاشی RANS و RANS و عرفی می می مدل های مذکور نیز به منظور شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته اند تا در صورت دستیابی نتایج مناسب برای شبیه ازی نهای مدل های مذکور نیز به منظور شبیه می مورد استفاده قرار گرفته اند تا در صورت دستیابی نتایج مناسب برای شبیه می پیشنهاد شوند.

تا به امروز تلاشهای زیادی در زمینه مطالعه سیستمهای اختراقی با شرایط عملکردی پیش آمیخته و غیرپیش آمیخته صورت گرفته است. با این وجود، بررسیهای کمتری به سیستمهای نیمه پیش آمیخته اختصاص یافته است. لذا، با توجه به اینکه GTMC در چنین شرایطی عمل می کند، شبیه سازی احتراق درون آن می تواند با چالشهایی همراه باشد [۵]. موضوع احتراق نیز به خودی خود مسئله ای چالش برانگیز و بسیار پیچیده است که تعداد بسیار زیادی از معادلات دیفرانسیل غیرخطی را در دل خود جای می دهد. از دیدگاه دقت محاسباتی استفاده از مدل ها و سینتیکه ای شیمیایی دربرگیرنده جزئیات فراوان امری ایدئال به نظر می رسد، اما این موضوع پیامد هزینه سنگین محاسباتی به ویژه در محفظه احتراق های صنعتی با ساختار هندسی پیچیده را در پی دارد [۴]. چالش های اصلی در مدل سازی احتراق آشفته یافتن راه حلی برای محاسبه نرخ واکنش متوسط⁶ و

در روش RANS معادلات مربوط به بقای گونههای شیمیایی و انرژی، همانند سایر معادلات، میانگین گیری می شوند. این امر منجر به تولید جملههای ناشناخته جدیدی در معادلات مذکور می شود. جمله اول مربوط به شار اغتشاشی گونهها و آنتالپی است که معمولاً با استفاده از فرض گرادیان پخش² مدل سازی می شود. جمله دوم مربوط به متوسط نرخ واکنش است. این جمله با استفاده از مدل های نرخ محدود، نظیر EDC^۷، جایگزین می شود [۱۵]. از آنجایی که نرخ واکنش به شدت غیر خطی

- 4. Reynolds Stress Model
- 5. Mean Reaction Rate 6. Gradient Diffusion

^{1.} Flamelet Generated Manifold

^{2.} flamelet progress variable

^{3.} Dissipation

^{7.} Eddy Dissipation Concept

www.SID.ir

است، مدلسازی نرخ واکنش متوسط در جریان اغتشاشی امری پیچیده است و منجر به خطا میشود. راه جایگزین برای متوسط گیری از معادلات بقای گونهها و انرژی استخراج یک معادله انتقال برای تابع چگالی احتمال تکنقطهای^۱ آنهاست. این تابع را میتوان متناسب با صورت کسری از زمان درنظر گرفت که سیال، در هر گونه، حالت دمایی و حالت فشاری میگذراند. با حل این معادله انتقال، هر یک از حالات ترموشیمیایی به راحتی قابل محاسبه خواهد بود [۱۵-۱۷].

در مدل EDC، واکنشهای شیمیایی، در ساختارهای کوچک اغتشاشی^۲، بهصورت راکتور فشار ثابت مدل میشوند[۱۴]. این مدل، که توسط مگنوسن توسعه یافتهاست[۱۸]، بهصورت گسترده در سیستمهای احتراقی رایج مورد مطالعه و صحتسنجی قرار گرفته است[۱۹] و این مزیت را داراست که همزمان با درنظر گرفتن اثرات سینتیک نرخ محدود هزینه محاسباتی بسیار کمتری را نسبت به مدلهای پیشرفتهای نظیر TPDF^۳ داراست. این برتری نتیجه دقت پایینتری است که این مدل در توصیف نوسانات اغتشاشی-دمایی به کار برده است[۲۰].

مزیت اصلی استفاده از روش TPDF در عدم نیاز به مدلسازی جملههای مربوط به نرخ واکنش است که به شدت غیرخطیاند. با وجود این، جملههایی 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. درنظر نگرفتن این موضوع در مدل سازی اختلاط مولکولی منشاء خطا به حساب می آید. مدل ^۵EMST تنها مدل موجود در این روش است، که محلی بودن اختلاط مولکولی را درنظر 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].

براساس آنچه که بیان شد، هدف این مطالعه تلاش برای سادهسازی و کاهش هزینه محاسباتیِ فرایند مدلسازی محفظه احتراق GTMC و شناخت فیزیک جریان و احتراق در شرایط به کارگیری ورودیهای دوگانه هواست. بدین منظور، ابتدا مسئله ازلحاظ هندسی سادهسازی شده و سپس، با استفاده از مدلهای اغتشاشی پایه RANS مناسب برای شبیهسازی جریانهای پیچشی، حل معادلات جریان غیراحتراقی درون محفظه صورت گرفته است. پس از کسب اطمینان از صحت نتایج حاصل از شبیهسازی جریان غیراحتراقی، با به کارگیری مدلهای احتراقی EDC و استفاده از سینتیک شیمیایی ETM[۲۱]ا، که پیش تر عملکرد مناسبی در پیشبینی احتراق متان ارائه داده است[۲۲–۲۴]، جریان احتراقی درون محفظه مدلسازی شده و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه شده است.

هندسه و شرايط عملكردي محفظه احتراق

طرحواره GTMC در شکل ۱ نمایش داده شده است. این محفظه احتراق دارای دو ورودی هواست که بهصورت هم محور وظیفه تزریق جریان پیچشی به محفظه را بهعهده دارند که هر دو از یک مخزن مشترک تغذیه می شوند. صفحه شامل ورودی هوای مرکزی² 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 در صد 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 ایجادشده 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، بهصورت غیرپیچشی از بین دو ورودی هوا، وارد محفظه احتراق می شود. محفظه احتراق دارای مقطع مربعی شکل با ابعاد ۸۵ میلی متر بوده و ارتفاع آن ۱۱۴ میلی متر است و یک صفحه مخروطی شکل آن را به اگزوزی استوانه ای شکل، به قطر ۴۰ میلی متر و طول ۵۰ میلی متر متصل می کند [۹۰۱].



Figure 1- Schematic drawing of the model combustor[1] شکل ۱- طرحواره محفظه احتراق توربین گاز مدل (GTMC)

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 برمبنای 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 می شود[۱،۹].

جدول ۱- پارامترهای عملکردی مربوط به شعله نوع A[۱۹] Table 1- Characteristics of Flame A [1,9]

	Air		CH ₄		P _{th}		f	T _{global adiabatic}
	sl/min	g/min	sl/min	g/min	kW	Ψ_{global}	¹ global	ĸ
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 $T_0 = 295$ K								

روش مدلسازی عددی

براساس آنچه که بیان شد، محفظه احتراق GTMC، ازلحاظ ساختار هندسی بسیار پیچیده بوده و میدان جریان درون آن، میدانی کاملاً سهبعدی است. با وجود این، میتوان با اعمال برخی فرضیات ساده کننده، میدان جریان سهبعدی داخل این محفظه را به صورت متقارن محوری و با دقت قابل قبول مدل سازی کرد. نتایج به دست آمده از میدان سرعتِ حاصل از آزمایش های تجربی و شبیه سازی های عددی سهبعدی صورت گرفته نشان می دهند که فرضیه تقارن محوری جریان درون محفظه احتراق فرض مناسبی است [۲۰،۱۰–۹]؛ اگرچه اثرات عدم تقارن جریان در گوشه های محفظه احتراق آشکار می شود [۲]

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. بهمنظور دستیابی به شرایط مرزی مناسب و

^{1.} Swirl Number

قابل اطمینان، ورودیهای هوای مرکزی و کناری بهصورت سهبعدی مدلسازی شدند و از نتایج این مدلسازی جهت مشخص کردن شرایط مرزی استفاده شده است. بدین منظور توزیع سرعتهای محوری، شعاعی و مماسی در فاصله ۱ میلیمتری پس از خروج جریان از کانالهای شعاعی استخراج شده و پس از میانگین گیری روی تمامی مقاطع شعاعی، بهعنوان شرط مرزی برای مسئله موجود درنظر گرفته شد. در شکل ۲، میدان محاسباتی، شبکه و شرایط مرزی مربوط به ورودیهای هوا بهنمایش 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.



(۵) 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 شدهاند. شروع میدان محاسباتی ۱ میلیمتر بالاتر از کانالهای شعاعی تأمین هوا (محل میانگینگیری مؤلفههای سرعت) قرار گرفته است. این شبکه بهصورت چندبلوکه و با بهکارگیری روش هیبرید، بهصورت ترکیبی از شبکههای باسازمان و بدونسازمان ایجاد شده است شبکه بهصورت چندبلوکه و با بهکارگیری روش هیبرید، بهصورت ترکیبی از شبکههای باسازمان و بدونسازمان ایجاد شده است فریک بخش باسازمان بیش از ۹۵ درصد میدان محاسباتی را دربر میگیرد. مهمترین نکته در تولید این شبکه، توجه به محل جدایش جریان، از روی دیواره ورودی هوای کناری است. بهنحوی که ریزنبودن کافی شبکه در روی این دیواره موجب میشود تا ناحیه گردش بیرونی (ORZ) جدایش جریان، از روی دیواره ورودی هوای کناری است. بهنحوی که ریزنبودن کافی شبکه در روی این دیواره موجب میشود رون روت و بخش باسازمان بیش از ۹۵ درصد میدان محاسباتی را دربر میگیرد. مهمترین نکته در تولید این شبکه، توجه به محل که جریان به دیواره بچسبد و از روی آن جدا نشود (اثر کواندا^۳)[۳]. این امر موجب میشود تا ناحیه گردش بیرونی (ORZ) محواب میشود تا ناحیه گردش داخلی (IRZ) مروف موجب میشود تا ناحیه گردش بیرونی (ORZ) معواب معنور روی دیواره و در پی آن ناحیه گردش داخلی (IRZ)، بزرگتر از اندازه واقعی، شیعسازی شود. نتیجه این امر موج محفظه تشکیل نشود و در پی آن ناحیه گردش داخلی (IRZ)، بزرگتر از اندازه واقعی، شیعسازی شود. نیرونی موای کناری، مواره محفز ه با آزمایشهای تجربی خواهد بود. بدین منظور روی دیواره جانبی ورودی هوای کناری، همواره شرط ایا الخوی جریان درون محفظه با آزمایشهای تجربی خواهد بود. بدین منظور روی دیواره جانبی ورودی هوای کناری، همواره شره معنوان قره میشر مربوط به مؤلفوهای سرعت ورودی ³ استفاده شده است. مرون محفظه با آزمایشهای تعربی و دودی، از حل سرعت و مرودی مربوط به میوای فردی موری مربوط به مروی هموای میای شرد است. مرزی ورودیهای هوا از شرط سرعت ورودی³ استفاده این مرمی همون ورودی هوای شامری شرون مرودی موری ورودی هرای می مرودی مرمی هرای شده است. مرزی ورودی مری ورودی هری مربوط به مؤلفوه می مرای همان گونه که بیان شد، مقادیر مربوط به مؤلفوهای سرعت ورودی، از حل سهبعدی جریان ورودی هرای هری مرمی هرمی مرمی مرمی مرمی هرمی مرودی مرمی وردی مرمی مری ورودی مرمی

^{1.} Mass Flow Inlet

^{2.} Pressure Outlet

Coandă

^{4.} Velocity Inlet

عليرضا فضلالهي قمشي و امير مرداني



Figure 3- computational domain and applied boundary condition شکل ۳- میدان حل، شرایط مرزی و شبکه محاسباتی

شبیهسازی، با استفاده از حلگر فشار پایه^ا بهصورت ضمنی^۲، در فضای متقارن محوری و بهصورت پایا صورت گرفته است. بهمنظور ارتباط فشار با میدان سرعت از الگوریتم سیمپل^۲ استفاده شده است. گسستهسازی تمامی معادلات، بهجز گونهها، نیز با استفاده از روش ^۴QUICK، 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 می شود. این شکل نشاندهنده استقلال نتایج از شبکه محاسباتی برای شبکه محاسباتی دارای ۲۴۳۷۰ سلول است.



^{1.} Pressure Based

^{2.} Implicit

^{3.} SIMPLE

^{4.} Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics

بافتهها

نتايج حاصل از حل جريان غيراحتراقي

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 گفتهشد، 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 احتراق را نشان میدهد، این ساختار جریان نشان میده که در مدلسازی جریانهای پیچشی درون هندسههایی نظیر محفظههای احتراق مدل سازی آشفتگی جریان نشان میدهد که در مدلسازی جریانهای پیچشی درون چنین شرایطی، معیار موفقیت یک مدل اغتشاشی توانایی آن در پیشبینی جریان در مرکز محفظه است[۱۹].



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[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 $\epsilon = Ralizable$ $k = \epsilon$ ،RNG k – ϵ ،RNG k – و مصرت گرفته با استفاده از مدلهای اغتشاشی $\epsilon = RNG$ k – ϵ ،RNG k – ϵ ،RNG k – ϵ ،RNG k – ϵ ، ϵ

^{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 مدل های اغتشاشی RSG K – ٤ ،RNG K – ٤ ،RNG K – ٤ و RS

شکل پیشبینی مدلهای اغتشاشی مختلف، برای مقادیر سرعت محوری ، شعاعی کو مماسی ، 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 می شود و در شرایط وجود شعله می تواند 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 فاصله گرفتن 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 Realizable k – ϵ در ارائه نتایج مناسب، را بهطور كامل تأييد نمىكند. همان طور كه از شكل مشخص است، حداقل در مورد سرعت محورى، نتايج حاصل از اين مدل به نتایج حاصل از مدل RSM و دادههای تجربی نزدیک است. مدل ho =
ho RNG k – ho در پیشبینی مقایر 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 مدل های عددی بیش از مقدار واقعی آن پیشبینی شده است. با فاصله گرفتن از ورودی محفظه، نتایج شبیهسازیهای عددی از نتایج تجربی فاصله می گیرد. 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 یش بینی مناسبی از سرعت شعاعی به خصوص در نقاط دور از محور ارائه نمی دهد. در مورد این نمودارها نیز، مدل RNG k – ϵ 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 سهبعدیبودن جریان و سادهسازیهای صورتگرفته است. علی رغم این موضوع، نتایج ارائهشده چیزی مخالف با

^{1.} Axial Velocity

^{2.} Radial Velocity 3. Swirl Velocity

^{4.} Dissipation

فیزیک جریان را ارائه نمیدهند. به خصوص، در نزدیکی ورودی، فیزیک جریان را به خوبی پیش بینی می کنند، هرچند مدل های عددی مقادیر بیشینه را بیشتر از مقادیر تجربی آن محاسبه کردهاند. با فاصله گرفتن از ورودی، اثرات لزجت مقادیر بیشینه سرعت مماسی را کاهش داده و توزیع یکنواخت تری از آن ارائه می دهد. همان طور که در نمودارها مشاهده می شود، مدل RSM نتایج بهتری را نسبت به مدل Realizable k – e و ارائه می دهد.



Figure 7- Comparison of computed and experimental velocity components for non-reacting flow field at four axial sections through GTMC شکل ۷- مقایسه مقادیر شبیهسازیشده 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 محاسبه شده برای سرعت محوری را نشان میدهد. این شکل بیان گر پیش بینی صحیح شبیه سازی ها از ساختار فیزیکی جریان درون محفظه و تطابق آن با مشاهدات تجربی است. خطوط مشکی نگ نمایان گر نواحی دارای سرعت محوری صفر است. مقادیر منفی در مرکز محفظه احتراق نشان دهنده IRZ است که براثر شکست گردابه پدید آمده است. مختصه اصلی این ناحیه وجود گرادیان های شدید سرعت در آن است [۶]. همانند جریان غیر احتراقی، ناحیه ORZ نیز در گوشه های 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 شبیه سازی با ابعاد واقعی آن مقایسه شده است. این مقایسه نشان می دهد که شبیه سازی صورت گرفته با استفاده از مدل احتراقی EDC پیش بینی مناسبی از ارتفاع IRZ دارد، ولی عرض آن را بیشتر از ابعاد واقعی پیش بینی می کند. این در حالی است که استفاده از مدل احتراقی می ناحیه IRZ دو از و قعی طول این ناحیه منجر شده و عرض آن را بیش از مقدار واقعی پیش بینی می کند. شکل نتایج حاصل از شبیه سازی احتراقی صورت گرفته با استفاده از دو مدل احتراقی EDC و TPDF را برای مؤلفه های سرعت محوری، شعاعی، مماسی و مقادیر تجربی آن ها را در ۴ موقعیت مکانی نشان می دهد. در X=5mm 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 T7mm کابل شناسایی اند. نواحی دربر گیرنده سرعت بیشینه مماسی نشان دهنده تداخل جریان های ورودی است و ناحیه با سرعت مماسی کم، بین این دو ناحیه، حاصل از جریان غیرپیچشی سوخت است.



Figure 10- Comparison of computed and experimental velocity components for reacting flow field at four axial sections through GTMC شکل ۱۰- مقایسه مقادیر شبیه سازی شده و مقادیر آزمایشگاهی مؤلفه های سرعت برای جریان احتراقی در چهار فاصله محوری درون محفظه احتراق

www.SID.ir

در مقاطع بالادست X=20mm خواص کلی جریان دچار تغییر نمی شود و تنها توزیعهای سرعت در راستای شعاعی گسترده تر شده و همزمان از ابعاد ORZ کاسته می شود و به تبع آن، بر ابعاد IRZ افزوده می شود. از مقطع X=20mm به بعد، توزیعهای سرعت یکنواخت تر می شوند و در X=90mm شاهد توزیعهای یکنواخت در مؤلفه های 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 همان گونه که اشاره شد، ناشی از بیش پیشبینی مقادیر اتلاف است.

میدان دمایی و توزیع گونهها

در شرایط فقیر از سوخت، بهمنظور کاهش احنمال وقوع پدیده ناپایداری احتراق و کاهش میزان آلایندهها، اختلاط سوخت و اکسنده باید بهخوبی صورت گیرد[۴]. شکل۱۵ توزیع کسر مخلوط ^۱ شبیهسازی شده را با توزیع تجربی آن مقایسه میکند. به-منظور محاسبه کسر مخلوط، از تعریف ارائه شده توسط بیلگر استفاده شده است[۲۶]. همان گونه که انتظار میرود، بیشترین مقدار کسر مخلوط در نزدیکی نازل سوخت مشاهده می شود که با حرکت به سمت پایین دست جریان به سرعت کاهش یافته و به مقدار استوکیومتریک می رسد. این موضوع نشان دهنده اختلاط مناسب سوخت و اکسنده درون GTMC است. پس از امر از ماهیت نیمه پیش آمیخته بودن جریان درون محفظه نشأت می گیرد. همان گونه که شان می دهد، مدل TPDF امر از ماهیت نیمه پیش آمیخته بودن جریان درون محفظه نشأت می گیرد. همان گونه که شکل۱۵ نشان می دهد، مدل TPDF توزیع بهتری از کسر مخلوط نسبت به مدل DDZ را در ZOD ارائه می دهد. توجه به نتایج تجربی نشان می دهد که کمترین میزان نفوذ سوخت به ناحیه ZDZ را در ZOD ارائه می دهد. توجه به نتایج تجربی نشان می دهد مدل TPDF توزیع بهتری از کسر مخلوط نسبت به مدل DDZ را در ZOD ارائه می دهد. توجه به نتایج تجربی نشان می دهد که کمترین میزان نفوذ سوخت به ناحیه ZDZ و سرت می گیرد و کسر مخلوط در این ناحیه به کمترین مقدار کاهش می می دهد مدل TPDF توزیع بهتری از کسر مخلوط نسبت به مدل DDZ توزیعی معادل با مقادیر کسر مخلوط کلی را در این ناحیه ارائه می دهد. میزان نفوذ سوخت به ناحیه ZDZ و سر مخلوط در این ناحیه به کمترین مقدار کاهش می یابد. مدل TPDF نیز نشان دهده این می در این ناحیه به کمترین مقدار کاهش می یابد. مدل TPDF علیزان نفوذ سوخت به ناحیه کمترین می کند، توصیف مان در این ناحیه ارائه می دهد. میزان نفوذ سوخت به مدل DDZ اختلاط را سریعتر از مقادیر واقعی پیش بینی می کند، توصیف مناسبی از مقادیر کسر مخلوط در پایین دست ZDI اختلاط را سریعتر از مقادیر واقعی پیش بینی می کند، توصیف مناسبی از مقادیر کسر مخلوط در پایین در می می نود. می می در در مان یو می یش بینی می کند، توصیف مناسبی از مقادیر کسر مخلوط در پایی بیشینی می کند. می می ند. هرچند الگوی پیش بینی می کند. بوسی یا می می کند. هرچند الگوی پیش بینی می کند. هرچند الگوی پیش بین

شکل خطوط همتراز دمای حاصل از شبیه سازی و داده های تجربی را درون محفظه نشان می دهد. با توجه به داده های آزمایشگاهی، اکثر واکنش ها در ناحیه IRZ به وقوع می پیوندد و این ناحیه دربر گیرنده بالاترین دما درون محفظه است. این موضوع به طور مستقیم با توزیع کسر مخلوط در ارتباط است. با افزایش فاصله از نازل ورودی، دما به سرعت افزایش می یابد. با ادامه فاصله گرفتن از نازل ورودی، دما به سرعت افزایش می یابد. با ادامه فاصله گرفتن از نازل ورودی، دما مجدداً شروع به کاهش می کند و این روند به آرامی تا خروجی محفظه ادامه می یابد. با بیشترین دمای پیش بینی شده توسط مدل ۲۰۵۹ شروع به کاهش می کند و این روند به آرامی تا خروجی محفظه ادامه می یابد. با بیشترین دمای پیش بینی شده توسط مدل ۱۸۳۹ در کلوین و مقدار آن برای مدل ۲۰۵۶، ۲۰۵۶ کلوین است، در حالی که این مقدار با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی نزدیک به ۱۸۰۰ کلوین گزارش شده است. مدل TPDF در پیش بینی توزیع دما این مقدار با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی نزدیک به ۱۸۰۰ کلوین گزارش شده است. مدل TPDF در مقادیر نیز (به خصوص در نزدیکی ورودی) بهتر از مدل DPD عمل می کند. این موضوع نتیجه پیش بینی بهتر مدل TPDF در مقادیر نیز (به خصوص در نزدیکی ورودی) بهتر از مدل EDC عمل می کند. این موضوع نتیجه پیش بینی بهتر مدل TPDF در مقادیر بیز (به خصوص در نزدیکی ورودی) بهتر از مدل EDC عمل می کند. این موضوع نتیجه پیش بینی بهتر مدل TPDF در مقادیر بیز (به خصوص در نزدیکی ورودی) بهتر از مدل EDC عمل می کند. این موضوع نتیجه پیش بینی بهتر مدل TPDF در مقادیر بیز (به خصوص در نزدیکی ورودی) بهتر از مدل EDC عمل می کند. این موضوع نتیجه پیش بینی بهتر مدل TPDF در مقادیر بیز (به خصوص در نزدیکی ورودی) بهتر از مدل EDC می کند. این موضوع نتیجه پیش بینی بهتر مدل TPDF در مقادیر کسر مخلوط است. ایعاد ناحیه واکنشی پیش بینی شده توسط مدل EDC گسترده تر از ناحیه متناظر در مدل TPDF است که کسر مخلوط است. ایعاد ناحیه واکنشی پیش بینی شده توسط مدل EDC گسترده تر از ناحیه متناظر در مدل TPDF است که به خوانی 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=5mm بیشترین میزان کسر مخلوط محاسبهشده بسیار کمتر از میزان آن در خروجی نازل سوخت است، که نشاندهنده اختلاط شدید سوخت و اکسنده در نزدیکی ورودی است. در X=10mm مقادیر

^{1.} Mixture Fraction

کسر مخلوط تا مقدار استوکیومتریک ان افت میکند و تا X=20mm ادامه مییابد. در X=20mm تغییرات کسر مخلوط در راستای شعاعی کاهش مییابد. این موضوع نشانهای برای تکمیل فرایند اختلاط سوخت و اکسنده 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 بهسمت پاییندست جریان، دقت نتایج حاصل از شبیهسازی بهبود مییابد و دقت نتایج مربوط به TPDF در این بخش نیز بهتر از مدل EDC است.



شکل ۶ همچنین، نتایج مربوط به توزیع دمای درون محفظه را در چهار مقطع مختلف نشان می دهد. در X=5mm دی پیش بینی شده روی محور محفظه، توسط مدل EDC و TPDF به ترتیب، ۸۰۰ و ۵۰۰ کلوین بیش تر از دمای تجربی محاسبه شده است. این دقت پایین، به ویژه در مورد مدل EDC، به خاطر این موضوع است که این مدل به اندازه ای دقیق نیست که بتواند میزان بلند شدگی شعله را به خوبی پیش بینی کند [۱۹]. ناحیه دماپایین در فاصله 55>Y>7 متناظر با ورود جریان گاز تازه به محفظه است که این مدل به اندازه ای دقیق نیست که بتواند میزان بلند شدگی شعله را به خوبی پیش بینی کند [۱۹]. ناحیه دماپایین در فاصله 55>Y>7 متناظر با ورود جریان گاز تازه به محفظه است که توسط هر دو مدل شبیه سازی شده است. در Mom X=10mm، همراه با افزایش کسر مخلوط به سمت مقدار استوکیومتریک، اشتعال سوخت و اکسنده صورت می گیرد که افزایش سریع دما را درپی دارد. با افزایش فاصله از نازل ورودی، ناحیه دمابالا در مرکز محفظه گسترش می بابد که متناظر با گسترش SIR در راستای شعاعی است. مقایسه دو مدل نشان می دود می می در پایین در پایین در راستای شعاعی است. مقایسه دو مدل نشان می ده در با فزایش فاصله از نازل ورودی، می دمابالا در مرکز محفظه گسترش می می ده را با گسترش SIR در راستای شعاعی است. مقایسه دو مدل نشان می ده دو مدل نشان پیش بینی بهتر پیش بینی می در از توزیع کسر مخلوط درون محفظه است.



Figure 13- Comparison of computed and experimental radial profiles of mixture fraction, temperature, H₂, CO and CO₂ for reacting flow field at four axial sections through GTMC. شکل ۶- مقایسه مقادیر شبیهسازیشده و مقادیر آزمایشگاهی توزیع شعاعی کسر مخلوط، دما، H₂، CO و CO₂ و CO برای جریان احتراقی در چهار فاصله محوری درون محفظه احتراق

همچنین، در شکل ۱۳ نتایج حاصل از شبیه سازی مربوط به توزیع گونه های H₂ OO و CO به همراه مقادیر تجربی آن ها ارائه شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی در نزدیکی نازل ورودی از دقت مناسبی برخوردار نیست. این امر میتواند ناشی از وجود پدیده های ناپایا، نظیر چروکیدگی شعله، باشد [۵،۴] که البته امکان مدل سازی آن در حل پایا امکان پذیر نیست. همچنین، اختلاف موجود میان دمای شبیه سازی شده در این ناحیه با مقدار تجربی آن که پیش تر به آن اشاره شد نیز، میتواند عاملی برای این موضوع باشد. با فاصله گرفتن از نازل ورودی، دقت نتایج شبیه سازی بهبود مییابد. عملکرد مدل DO در پیش بینی نوسانات گونه ها بهتر از مدل دیگر است، اما مدل TPDF پیش بینی بهتری از توزیع متوسط گونه ها ارائه می دهد که متناظر با پیش بینی بهتر این مدل از توزیع دما و کسر مخلوط درون محفظه است.

فیزیک احتراق تحت شرایط بهکارگیری دو ورودی هوای پیچشی

شکل کانتور سرعت محوری مربوط به حل جریان احتراقی درون GTMC را در نزدیکی ورودیهای هوا نشان میدهد. همان گونه 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 می شود که دارای سرعت بالاتر و فشار نسبی پایین تری باشد. ل، با توجه به شکل ، می توان این امر را پیش بینی کرد که بخش اعظم سوخت وارد ناحیه IRZ می شود که متأثر از ورودی هوای مرکزی است. در واقع، با توجه به شکل مشاهده می شود که بخش زیادی از هوای ورودی از ورودی مرکزی وارد بخش IRZ می شود. 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 می شود و فرایند اختلاط به خوبی انجام می شود. پس از طی فرایند احتراق نیز، بخش زیادی از گازهای داغ تولیدی در ناحیه IRZ محبوس مانده و منجر به رقیق سازی و پیش گرم سازی آئرودینامیکی مخلوط سوخت و اکسنده پیش از احتراق می شوند. این امر منجر به دستیابی به احتراقی با کیفیت



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 TPDF حاصل از به کارگیری مدل اغتشاشی RSM و مدل احتراقی



به منظور مطالعه ساختار شعله درون محفظه احتراق، خطوط همتراز کسرمخلوط، فشار نسبی، دما و گونههای OH و CH₂O بهتر تیب در شکل ارائه شده است. در این شکل، به منظور دستیابی به درک بهتر خطوط مسیر، خطوط مربوط به سرعت محوری صفر و خطوط همتراز کسرمخلوط نیز با رنگ مشکی نمایش داده شده است. این شکل مؤید فرضیه ارائه شده در سرعت محوری صفر و خطوط همتراز کسرمخلوط نیز با رنگ مشکی نمایش داده شده است. این شکل مؤید فرضیه ارائه شده در بخش سرعت محوری صفر و خطوط همتراز کسرمخلوط نیز با رنگ مشکی نمایش داده شده است. این شکل مؤید فرضیه ارائه شده در نموی سرعت محوری صفر و خطوط همتراز کسرمخلوط نیز با رنگ مشکی نمایش داده شده است. این شکل مؤید فرضیه ارائه شده در نموی بخش قبل است؛ به این صورت که به علت افت فشار در IRZ و سرعت بالای جریان در لبه ورودی مرکزی نسبت به ورودی نمازی، سوخت تزریق شده به سرعت به داخل IRZ مکیده شده است، لذا احتراق در IRZ بهوقوع پیوسته است. بررسی توزیع OH نمازی، سوخت تزریق شده به سرعت به داخل IRZ مکیده شده است، لذا احتراق در IRZ بهوقوع پیوسته است. بررسی توزیع OH نمازی، سوخت تزریق شده به سرعت به داخل IRZ معیده شده است، لذا احتراق در IRZ بهوقوع پیوسته است. بررسی توزیع OH در ناری، سوخت تزریق شده به سرعت به داخل IRZ مربوط به گونه HO در ناحیه IRZ متمرکز است که به معنای وقوع واکنشهایی با نماز در این منطقه است. در حالی که در نواحی دیگر محفظه این موضوع مشاهده نمی شود. همچنین، توجه به توزیع گونه مرد CH₂O به معنوان رادیکالی که نشان گر وقوع جرقه است، نشان می دهد که جرقه در نواحی دارای کسر مخلوط P از I بهوقوع می میوند که درون II به معونان این می مونوع است از مروضوع است که احتراق درون ناحیه IRZ ای می شود و در ناحیه SIR واکن این موضوع است که احتراق درون ناحیه SIR واکن می و و در ناحیه SIR وقوع می پیوندند. با توجه به عدم اختلاط سوخت با جریان هوای کناری می توان این می و در ناحیه SIR واکن در این مولو P از این می وادی کناری می مونو واکن می مونو واکن می مونو واکن می مونو واکنشهایی با در در واکنی می مرون واکن می مونوع می و توزی می مونو می و توی می و در مونو می به مونوی می و واکن می مونوی می و در ناحی SIR واکن می مونوی می و در ناحی کاری دیواره می و در نامی واحی نور کاری می واکن می مور مونو می نور می واکن می مونوی می موای می واکن می مولو می و دو

^{1.} Vortex Breakdown



Figure16- Contours of mixture fraction, pressure, temperature and mass fractions of OH and CH₂O 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 کسرمخلوط، فشار، دما و گونههای شیمیایی OH و CH₂O حاصل از به کارگیری مدل اغتشاشی RSM و مدل احتراقی شکل ۱۶- کانتورهای کسرمخلوط، فشار، دما و گونههای شیمیایی OH و CH₂O حاصل از به کارگیری مدل اغتشاشی TPDF و مدل احتراقی TPDF. خطوط مشکیرنگ در ستون A نشان دهنده خطوط هم تراز نسبت هم_ارزی، در ستون B نشان دهنده نقاط دارای سرعت محوری صفر و در ستون C نشان دهنده خطوط مسیرند.

نتيجهگيرى

در این پژوهش، محفظه احتراق توربین گاز مدل، با استفاده از مدلهای اغتشاشی = 0 RNG K – ϵ ،RNG K و Robin S (and the control control

بهعلاوه فرایند صورت گرفته در این پژوهش را میتوان بهعنوان پایه و گام نخست شبیهسازی سهبعدی درنظر 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.
- 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.
- 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, DietmarB Kröner and MichaelM 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. Poinsot 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.
- 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.
- 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 Co 2 Formation in Ch 4/H 2 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)

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 quantitively acceptable results. In terms of comparison between the turbulencechemistry 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. Morever, 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