

انتخاب مدل مناسب برای مدلسازی اندرکنش توربولانس و احتراق در شبیه سازی عددی یک نمونه توربین گاز صنعتی

عماد رجبی

کارشناس طراحی محفظه احتراق، واحد تحقیق و توسعه، شرکت مهندسی و
ساخت توربین مینا (توگا)
Rajabi.Emad@mapnaturbine.com

عباس فخر طباطبایی

مدیر برنامه توسعه توربین MGT-75، شرکت مهندسی و ساخت توربین
مینا (توگا)
Tabatabaei.Abbas@mapnaturbine.com

چکیده

شبیه سازی واکنشی محفظه احتراق یک نمونه توربین گاز صنعتی در این تحقیق صورت پذیرفته است. شعله این محفظه از نوع غیرپیش مخلوط گازی می باشد. بر هم کنش پدیده اغتشاش و احتراق با استفاده از سه مدل در یک نرم افزار تجاری شبیه سازی شده و نتایج حاصل از این شبیه سازی مقایسه شده است. سه مدل غیرپیش مخلوط، اتلاف گردابه ای و مدل اتلاف گردابه ای نرخ محدود در این تحقیق به کار گرفته شده اند. پدیده اغتشاش با استفاده از مدل یک مدل RANS شبیه سازی شده است. دمای دیواره لاینر محفظه احتراق طی حل توأمان جریان و دیواره بدست آمده و برای سه مدل به کار گرفته، مقایسه شده است. طی این تحقیق توضیحاتی راجع به تفاوت مدل های مذکور بیان شده و با نتایج میدان دمایی در یک صفحه و بر روی جبهه شعله مقایسه شده، دلایل اختلافات ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفته شده است. در انتها مدل احتراق اتلاف گردابه ای به عنوان مدل پیشنهادی برای اینگونه مسائل معرفی شده است.

کلمات کلیدی: اندرکنش توربولانس و احتراق، احتراق غیرپیش مخلوط، Eddy dissipation، Finit rate/Eddy dissipation، دمای دیواره

مقدمه

شبیه سازی عددی از کم هزینه ترین راه های شناسایی سیستم های احتراقی در توربین گاز به شمار می رود. انجام آزمایشات با صرف هزینه های بسیار بالا منجر به انجام فعالیت های شبیه سازی عددی گسترده تری در شناسایی برخی از پدیده های موجود در احتراق توربین گاز می شود. البته به دلیل وجود پاره ای از کاستی ها در توانمندی این ابزارها و همچنین اعتبار سنجی روش های عددی انجام آزمایشات تجربی نیز ضروری است. در فاز شناسایی سیستم موجود ابزار CFD یکی از به صرفه ترین ابزارها به شمار می رود، که البته استفاده از این ابزارها مستلزم به کارگیری تکنیک های خاص و استفاده صحیح از روش های متناسب با

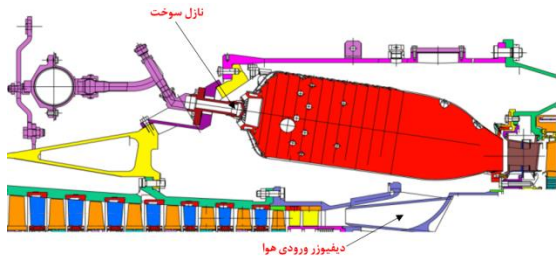
مسئله می باشد. از شبیه سازی عددی نیز می توان در اولین گام های طراحی محفظه های احتراق استفاده بسیار موثری نمود و به میزان قابل ملاحظه ای هزینه های تست های تجربی را کاهش داد. همانگونه که ذکر شد استفاده صحیح از کدهای تجاری موجود برای شبیه سازی مسئله حائز اهمیتی است، به گونه ای که به عنوان نمونه در یک تحلیل CFD استفاده از مدل توربولانسی مناسب یا مدل احتراقی ناصحیح موجبات رخ داد خطا در پیش بینی غلط از میدان جریان را سبب می شود. بنابراین تحقیق حاضر نمونه ای از روش انتخاب مدل برهم کنش توربولانس و احتراق را ارائه نموده است. البته لازم به ذکر است که قبل از این انتخاب در حوزه مورد بحث اخیر، در زمینه گزینش مدل های توربولانسی، انتخاب برخی ثوابت معادلات، جزئیات انتخاب شبکه مناسب برای تحلیل های واکنشی و ... فعالیت هایی انجام شده که از گستره این مقاله خارج می باشد و صرفاً برخی موارد منتخب ذکر شده است.

مروری بر فعالیت های عددی سایرین در حوزه شبیه سازی محفظه احتراق توربین گاز توسط مونگیا و همکارانش انجام شده و جزئیات مورد استفاده در این شبیه سازی ها ارائه شده است. در این تحقیق جزئیات حائز اهمیت در انتخاب مدل های توربولانس و شبیه سازی برهم کنش توربولانس و احتراق مورد بررسی قرار گرفته و مواردی نیز در زمینه نکات مورد توجه در تولید شبکه بحث شده است [۱]. برونتر و همکارانش نیز مطالعه ای بر فعالیت های دیگر افراد در حوزه احتراق توربین گاز داشته اند که می تواند به عنوان مرجع مناسبی برای انتخاب بهترین تکنیک متناسب با نوع مسئله انتخاب گردد. در این تحقیق مکانیزم های شیمی حاکم بر احتراق نیز مرور شده و روش های عددی مختلف با نظر بر فعالیت های سایرین مورد بحث قرار گرفته است [۲]. ریلا پیشرفت هایی که در روش های شبیه سازی گردابه های بزرگ (Large Eddy Simulation) به منظور شبیه سازی جریان غیرپیش مخلوط، اخیراً انجام شده، مورد بررسی قرار داده است [۳]. در این تحقیق بیشتر بر روش هایی که از تئوری کسر جرمی مخلوط (Mixture Fraction) در بر هم کنش توربولانس و احتراق بهره برده اند، تاکید شده، اما بر روی سایر روش های مدل سازی احتراق غیرپیش مخلوط نیز توضیحاتی ارائه شده است. دیوید لیگنل و همکاران از مدل بخشی پیش

انرژی، انرژی جنبشی، ϵ و گونه‌های شیمیایی برابر با 10^{-6} و معادله انتقال جرم 10^{-3} در خطای نسبی می‌باشد.

تولید هندسه و شبکه محاسباتی پیکربندی کلی سیستم احتراق

نمایی از سیستم احتراق توربین گاز MGT-30 با پیکربندی Reverse Flow Can-annular در شکل زیر نشان داده شده است. این سیستم احتراق شامل سه قسمت اصلی Fuel Nozzle، Transition Piece و Liner می‌باشد [۸].



شکل ۱- سیستم احتراق Reverse Flow Can-annular توربین گاز MGT-30 و نحوه چیدمانی آن در فضای Housing

با توجه به پیکربندی فوق، موقعیت و اندازه سوراخ‌های اصلی ورود هوا بروی دیواره لاینر سیستم فوق از نوع متداول می‌باشد. فرایند احتراق سوخت گاز طبیعی نیز از نوع غیر پیش آمیخته می‌باشد. این نوع پیکربندی شامل سه ناحیه اولیه، ثانویه و رقیق سازی به منظور تکمیل فرایند احتراق (Primary, secondary and Dilution) می‌باشد. هر چند برخی ملاحظات مانند پایداری احتراق در این نوع سیستم‌ها مطلوب می‌باشد ولی میزان آلاینده‌های تولید شده نسبتاً بالا می‌باشد. با توجه به اینکه این توربین در ایستگاه‌های تقویت فشار گاز و برای کاربری‌های که بار متغییر دارند مورد استفاده قرار می‌گیرد، عملکرد قابل اطمینان در حالت باز جزئی بسیار مورد توجه می‌باشد. بنابراین استفاده از این سیستم با هدف ذکر شده نسبتاً مناسب می‌باشد. سیستم احتراق توربین گاز MGT-30 شامل ۱۶ لاینر می‌باشد که در نتیجه ۱/۱۶ از این سیستم که در برگیرنده Liner، Transition Piece و Fuel Nozzle و همچنین فضای Housing متناظر با آن در نظر گرفته شده و شرط مرزی تناوبی (Periodic) برای صفحات تقارن در فرآیند اجرا منظور شده‌است. در شکل نحوه چیدمان لاینرها در هوزینگ محفظه احتراق مشاهده می‌شود.

تولید شبکه محاسباتی

تولید شبکه محاسباتی بی‌سازمان Tetrahedral با استفاده از روش Robust (Octree) که منحصر به نرم افزار ICEM CFD می‌باشد، ایجاد شده است. تعداد کل سلول‌های تولید شده برابر با 31,000,000 می‌باشد که با توجه به تمهیدات مورد نیاز برای تحلیل‌های احتراقی در ناحیه واکنشی با توجه به توزیع گونه‌های شیمیایی فرآیند اصلاح مش

مخلوط (Partially Premixed) مبتنی بر Flamelet برای شبیه‌سازی اثر تغییرات عدد دامکوهر (Damkohler Number) در یک شعله غیرپیش مخلوط استفاده کرده‌اند [۴]. در تحقیق مذکور خاموشی و اشتعال مجدد با توجه به نرخ اتلاف اسکالر (Scalar dissipation rate) مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق نرخ انتقال حرارت از شعله و نرخ انتقال حرارت نفوذی مقایسه شده و خاموشی و اشتعال مجدد بدین وسیله مورد ارزیابی قرار گرفته است. قاسم احمد و همکاران شعله پیش مخلوط متان-هوا را با استفاده از یک مکانیزم کاهش یافته هشت مرحله‌ای، شبیه‌سازی توربولانس با یک مدل RANS و برهم‌کنش توربولانس و احتراق را با استفاده از مدل EDC مدل کردند [۵]. برایان کپس و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی گراده‌های بزرگ برای پیش بینی پدیده‌های توربولانس و با استفاده از تئوری Flamelet برای برهم‌کنش پدیده‌های توربولانس و احتراق استفاده کرده‌اند [۶]. برای اختلاط subgrid-scale نیز از فرض تابع دانسیته احتمال (Probability Density Function) استفاده شده است.

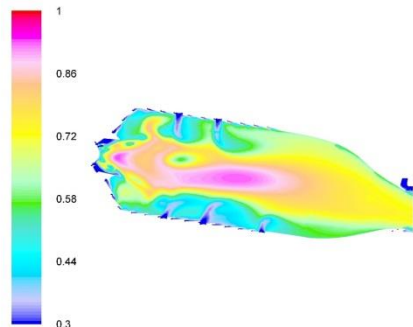
با توجه به تاریخچه‌ای که از شبیه‌سازی شعله‌های غیرپیش مخلوط ذکر شد، مدل‌های متنوعی به منظور شبیه‌سازی برهم‌کنش توربولانس و احتراق مورد استفاده قرار گرفته است، اما به صورت عمومی می‌توان این نکته را بیان کرد که این مدل‌ها غالباً از نوع شیمی سریع (Fast Chemistry) بوده‌اند. البته برای شعله‌های غیر پیش مخلوط این فرض نیز به واقعیت نزدیک می‌باشد، چراکه نرخ واکنش‌ها توسط شدت اختلاط کنترل شده و مقیاس زمانی توربولانس (Turbulent Time Scale) بیشتر از مقیاس زمانی شیمیایی (Chemical Time Scale) می‌باشد. بدین منظور در این تحقیق سه مدل احتراقی برای شبیه‌سازی شعله غیرپیش مخلوط در توربین گاز MGT-30 متعلق به شرکت توگا از گروه مینا به کار گرفته شده و اثر این سه مدل بر دمای دیواره، توزیع دمای خروجی از محفظه و توزیع دمای درون محفظه، بررسی شده‌است. البته همانطور که ذکر شد، یکی از موارد بسیار تاثیر گذار در شبیه‌سازی فرآیندهای احتراقی در هر شرایطی و انجام پیش‌بینی صحیح از پدیده‌ها و توزیع دما و گونه‌های شیمیایی در فضای محاسباتی، تخمین صحیح از پدیده‌های توربولانس جریان می‌باشد که قبل از انجام این تحقیق، بر موارد مذکور نیز فعالیت‌هایی صورت گرفته و متناسب با نیاز و دقت محاسبات، در این زمینه انتخابی صورت گرفته که از حدود این مقاله خارج می‌باشد. در این مقاله برای شبیه‌سازی توربولانس از مدل Standard k- ϵ استفاده شده است.

نرم افزار و روش حاکم بر حل معادلات

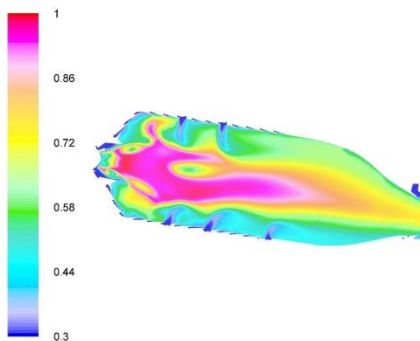
بسته نرم افزاری Fluent برای شبیه‌سازی این مسئله مورد استفاده قرار گرفته‌است [۷]. این نرم افزار مبتنی بر روش حجم محدود در مرکز سلول‌ها می‌باشد. حل جریان به صورت دائم انجام شده، گسسته سازی ترم‌های معادلات از مرتبه دوم انجام شده و معادلات بر پایه فشار و غیر قابل تراکم در نظر گرفته شده‌اند. کوپلینگ معادلات فشار و سرعت با استفاده از روش SIMPLE انجام شده است. معیار همگرایی معادلات

اثر مدل احتراقی بر توزیع دما

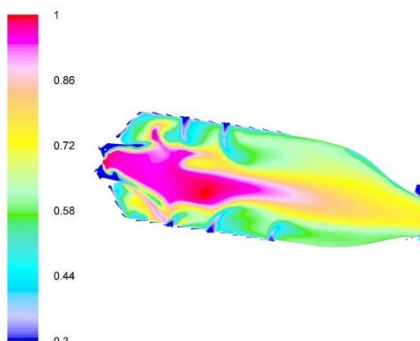
در این بخش به ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان واکنشی با بهره‌گیری از سه مدل احتراقی و مقایسه این نتایج پرداخته خواهد شد (نتایج توزیع دمایی به صورت بی بعد نشان داده شده است) و در انتها یک مدل به عنوان مدل منتخب برای شبیه‌سازی این گونه محفظه‌های احتراق معرفی می‌شود. توزیع دمای گازهای حاصل از احتراق برای سه مدل احتراقی در شکل‌های زیر نشان داده شده‌است. مقادیر این سه مدل استفاده از بیشترین مقدار دمای تخمین زده شده توسط این سه مدل بی‌بعد شده است.



(الف)



(ب)

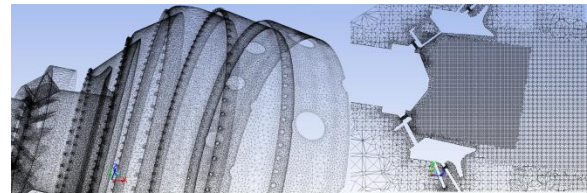


(ج)

شکل ۳- توزیع دمای گازهای داخل لاینر محفظه احتراق، شبیه‌سازی با استفاده از مدل (الف): Non-Premixed flamelet، (ب): EDM، (ج):

FR/ED

انجام شده است. بعد از این مرحله تعداد سلول‌ها به حدود 33,600,000 افزایش یافته است. جزئیات تولید شبکه در مرجع ۸ ارائه شده است.



شکل ۲- جزئیات شبکه تولید شده پس از انجام عمل Mesh Adaption

شرایط مرزی اعمالی

برای شرط مرزی ورودی به دیفیوزر، یک شانزدهم دبی جرمی خروجی از کمپرسور منظور شده است. با توجه به اینکه شرط گرادین فشار صفر در خروجی محفظه احتراق در نظر گرفته شده، فشار ورودی در پروسه حل محاسبه می‌شود. برای شرط مرزی ورودی سوخت نیز بر روی سوراخ‌های ورودی، شرط مرزی دبی جرمی گذاشته شده‌است. برای مرزهای جانبی کیسینگ محفظه شرط مرزی Periodic در نظر گرفته شده است.

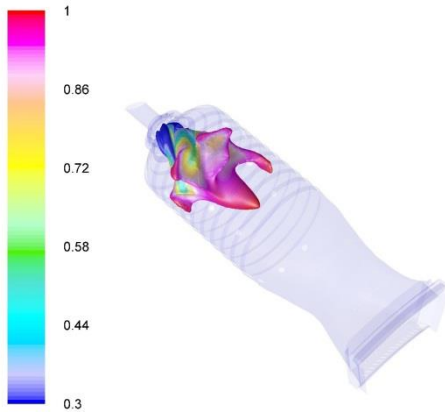
ارائه و تحلیل نتایج شبیه‌سازی

در شبیه‌سازی میدان‌های احتراقی غالباً به دلیل اینکه حل میدان جریان همراه با احتراق به زمان بیشتری نیاز دارد، بهتر است پس از حل جریان غیرواکنشی و همگرایی جریان سرد، جریان واکنشی حل شود. مضاف بر آن برخی از خروجی‌های جریان غیر واکنشی نیز مفید بوده و تصمیم‌گیری در رابطه با برخی از تکنیک‌های حل عددی، شبکه و ... در این مرحله با اختصاص زمان کمتری قابل تغییر و انتخاب می‌باشد. با توجه به اینکه در این مقاله هدف مقایسه نتایج شبیه‌سازی جریان واکنشی برای سه مدل احتراقی می‌باشد، نتایج جریان سرد ارائه نشده و در تحقیق‌های دیگر قابل دسترسی می‌باشد [۸].

همانطور که ابتدای این مقاله ذکر شد، از سه مدل احتراقی برای شبیه‌سازی اندرکنش توربولانس و احتراق در نرم‌افزار Fluent استفاده شده است. این سه مدل عبارت‌اند از: مدل اتلاف گردابه‌ای (Eddy Dissipation Model)، مدل نرخ واکنش محدود/اتلاف گردابه‌ای (Finite Rate/Eddy dissipation) و مدل غیر پیش مخلوط مبتنی بر (Non-Premixed Flamelet) Steady Flamelet. (از ذکر جزئیات معادله‌های این مدل‌ها اجتناب شده، معادلات حاکم در مرجع ۷ قابل دسترسی است).

همانطور که ذکر شد، برای شبیه‌سازی توربولانس از مدل Standard k-ε استفاده شده‌است. در این بخش توزیع دما در صفحه میانی گذرنده از لاینر محفظه احتراق و توزیع دمای خروجی، برای سه مدل ارائه خواهد شد. سپس مباحثی در رابطه با تفاوت نتایج شبیه‌سازی این سه مدل ارائه می‌شود و پس از آن تاثیراتی که تخمین میدان دمایی درون لاینر بر روی پیش‌بینی توزیع دمای دیواره محفظه خواهد گذاشت، با استفاده از سه شکل از توزیع دمای دیواره محفظه ارائه خواهد شد.

لازم به ذکر است بیشینه دمایی که در میدان دمایی تخمین زده شده، در حالتی است که از مدل FR/ED استفاده شده باشد، بنابراین مقادیر دمایی با استفاده از بیشینه این تخمین دمایی بی‌بعد شده و کمینه دمایی نیز، دمایی ورودی به محفظه احتراق می‌باشد. تفاوت مدل‌های استفاده شده در این است که دو مدل غیرپیش مخلوط و EDM مبتنی بر شیمی سریع بوده و نرخ واکنش‌ها توسط شدت اختلاط کنترل می‌شود و تبعیت از مقیاس زمانی اختلاط در نرخ واکنش‌ها وجود دارد. در مدل FR/ED علاوه بر نرخ اختلاط، نرخ واکنش‌ها نیز محاسبه شده و نرخ پیشروی واکنش‌ها توسط مقیاس زمانی کنترل می‌شود که مقدار بیشتری داشته‌باشد. مشاهده می‌شود که در حالتی که EDM استفاده شده بیشینه دمایی تخمین زده شده در صفحه نشان داده شده در شکل از FR/ED کمتر بوده و نسبت به حالتی که از مدل غیرپیش مخلوط استفاده می‌شود، بیشتر است. در ادامه شکل جبهه شعله که با مقادیر کسر جرمی برابر با 0.055 بدست آمده است، با دمایی گاز رنگ شده است.



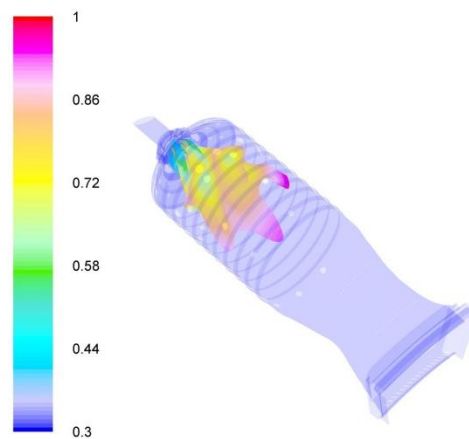
(ج)

شکل ۴- جبهه شعله رنگ شده با دما با استفاده از مدل (الف): Non-Premixed flamelet, (ب): EDM, (ج): FR/ED

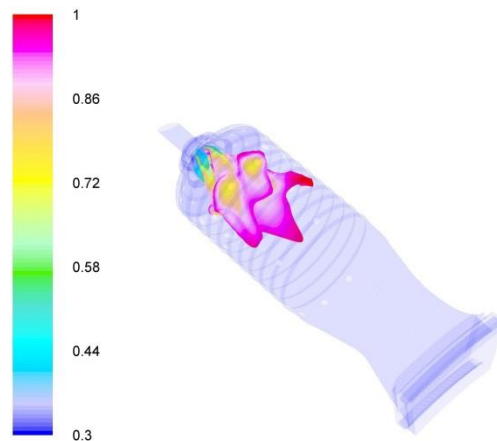
از تصاویر فوق مشخص است که طول و بازشدگی شعله برای سه حالت فوق قدری متفاوت است هر چند در دو مدل اول این تفاوت ناچیزتر و با مدل سوم بیشتر می‌باشد. اشکال فوق نیز نشان دهنده افزایش دمایی سطح شعله بر روی جبهه شعله به ترتیب برای مدل غیرپیش مخلوط، EDM و مدل FR/ED که بیشینه دما سطح شعله را تخمین زده است.

از تصاویر حالت ج در شکل‌های ۳ و ۴ مشخص است که ناحیه واکنشی از ابتدای خروجی از نازل سوخت شروع می‌شود و این پدیده ناشی از آن است که در این ناحیه مقیاس زمانی شیمیایی از مقیاس زمانی توربولانس بیشتر می‌باشد و واکنش‌ها با توجه به اصلی که این مدل بر آن مبتنی است، آغاز می‌شود. با توجه به شواهد تجربی که از نازل سوخت این محفظه احتراق وجود دارد به نظر نمی‌رسد که ناحیه واکنشی به نازل سوخت چسبیده باشد.

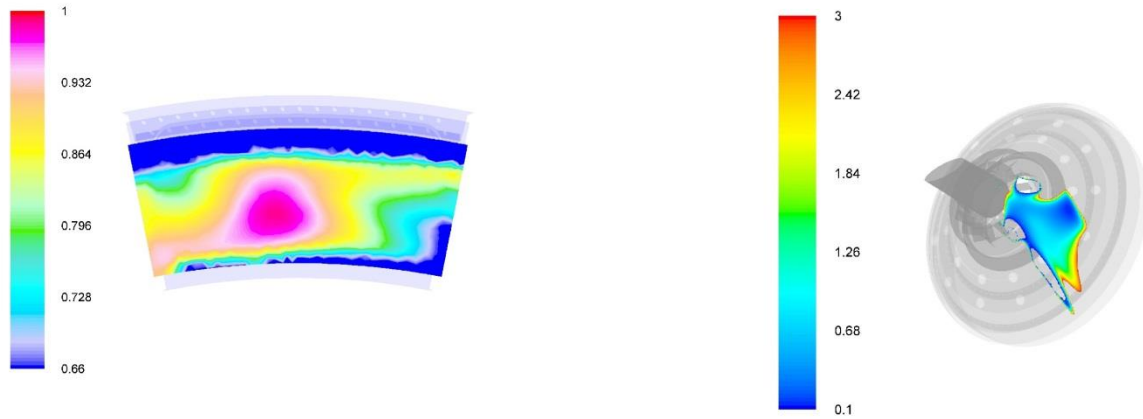
در تحلیل‌های احتراقی عدد دامکوهلر (مقیاس زمانی شیمیایی / مقیاس زمانی توربولانس) یکی از اعداد بی بعدی است که به شناخت بهتر پدیده‌ها کمک می‌کند بنابراین در این قسمت از آن استفاده شده است. در ادامه در قسمتی از صفحه میانی گذرنده از لاینر عدد توزیع عدد دامکوهلر برای حالتی که تحلیل با استفاده از مدل FR/ED انجام شده، نمایش داده شده است.



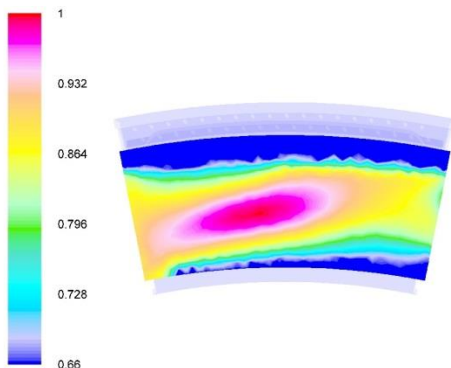
(الف)



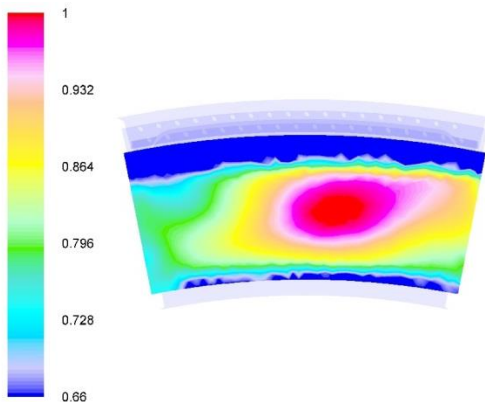
(ب)



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵- توزیع عدد دامکوهلر در صفحه میانی گذرنده از لاینر در مدل FR/ED

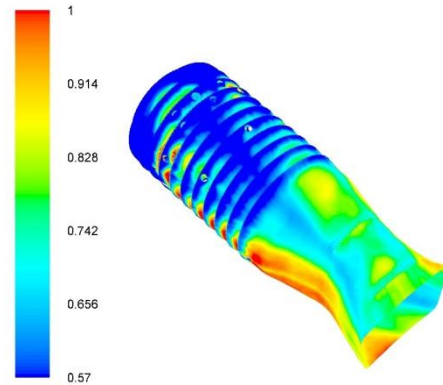
از تصویر فوق مشخص است که مقدار عدد دامکوهلر پیرامون نازل سوخت از عدد یک کمتر می‌باشد و مقیاس زمانی شیمیایی است که نرخ واکنش‌ها در این مدل در معادلات تعیین می‌کند. به همین دلیل در این ناحیه در این مدل واکنش‌ها آغاز شده اما در دو مدل دیگر که این مقایسه وجود ندارد، ناحیه واکنشی از مقداری جلوتر از نازل سوخت آغاز شده‌است. همچنین در مدل FR/ED می‌توان اینگونه استدلال کرد که، با توجه به شروع سریعتر واکنش‌ها بنابراین دمای گازهای ورودی با پیشروی در طول لاینر به ناحیه واکنشی بیشتر شده و این پدیده خود باعث تخمین دمایی بالاتر در این مدل نسبت به دو مدل دیگر شده‌است.

در ادامه توزیع دمای خروجی محفظه که با بیشترین مقدار تخمین دمایی سه مدل (مدل FR/ED) در خروجی محفظه بی بعد شده، نمایش داده شده‌است. تصاویر زیر نشان دهنده اختلاف قابل ملاحظه‌تر نتایج حاصل از مدل FR/ED با دو مدل دیگر است، البته این بدین معنی نیست که نتایج کدام یک از مدل‌ها صحیح و کدام ناصحیح است، اما می‌توان اهمیت انتخاب مدل احتراقی و اثر متقابل آن که بر روی پارامترهای خروجی را بیان کرد (این داده‌ها می‌تواند اطلاعات ورودی برای تحلیل مراحل توربین باشد که پیش بینی ناصحیح از مقدار و محل رخ داد بیشینه دما بر نتایج حاصل از شبیه‌سازی توربین نیز تاثیر گذار خواهد بود). برای سه مدل زیر پارامتر توزیع دمای خروجی از محفظه با مقادیر تجربی داده‌های OEM مقایسه شده و نتیجه حاصل شده حاکی از این است که این توزیع برای مدل ED تطابق بهتری دارد.

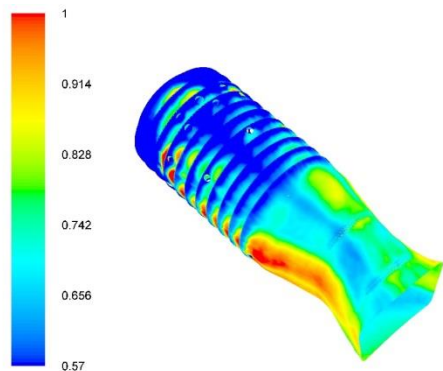
شکل ۶- توزیع دمای خروجی تخمین زده با استفاده از مدل (الف):

FR/ED (ج)، EDM (ب)، Non-Premixed flamelet (الف)

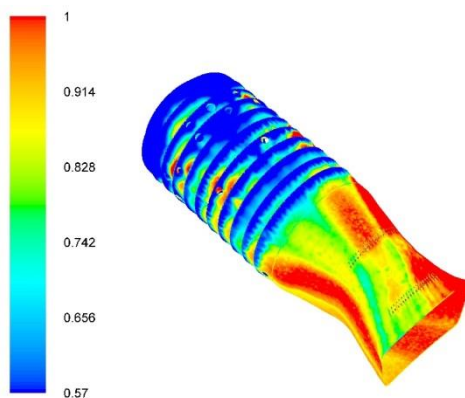
نتایج تحلیل توأمان انتقال حرارت جابجایی و هدایت دیواره لاینر در شکل‌های زیر، ارائه شده‌است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۷- توزیع دمای دیواره داخلی لاینر، با استفاده از مدل (الف): FR/ED، (ب): EDM، (ج): Non-Premixed flamelet

از اشکال فوق مشخص است که تخمین میدان دمایی مستقیماً بر دما دیواره لاینر تاثیرگذار بوده است. با توجه به اشکال ۳ و ۴ که واضح است در مدل FE/ED شعله بازتر شده، به دیواره نزدیک‌تر و دمای بیشینه شعله نیز بیشتر تخمین زده شده و به دیواره به تبعیت از آن بالاتر رفته است. اما در سه مورد مدل سازی الگوی دمایی برای دما دیواره به یکدیگر شبیه می‌باشد. به صورت کلی نیز می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌های ED و FR/ED نیز در برخی از نقاط شعله دمای محصولات احتراق را بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند [۷]، برای مدل ED مقدار اختلاف بیشینه دمایی درون میدان جریان با نتایج مدل غیرپیش مخلوط ناچیز می‌باشد، با توجه به اینکه مدل غیرپیش آمیخته مستلزم صرف هزینه زمانی بیشتری نسبت به مدل ED می‌باشد، مدل ED به عنوان مدل منتخب برای انجام شبیه‌سازی شعله غیرپیش مخلوط در توربین گاز مناسب می‌باشد. برای تعدیل بیشینه دمای شعله نیز اصلاحاتی انجام شده که از حیثه این مقاله خارج است و با اعمال آن بر مدل ED این افزایش دمای غیر واقعی ناشی از مدل احتراقی به مقادیر واقعی نزدیک‌تر خواهد شد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق شعله غیرپیش مخلوط گازی با استفاده از نرم افزار Fluent شبیه‌سازی شد. تمرکز این تحقیق بر اثر استفاده از سه مدل اندرکنش احتراق و توربولانس بر نتایج تحلیل میدان و اکنشی می‌باشد. ساختار شعله و همچنین توزیع دما در یک برش طولی از لاینر محفظه احتراق بررسی مورد بحث قرار گرفت. مشاهده شد که بیشینه دمای میدان جریان در حالت استفاده از مدل FR/ED اتفاق می‌افتد. در حالت شبیه‌سازی با مدل ED دمای بیشینه میدان از مدل FR/ED کمتر و از تخمین مدل غیرپیش مخلوط بیشتر می‌باشد. با توجه به اینکه دو مدل ED و غیر پیش مخلوط محاسبات نرخ واکنش را بر اساس نرخ اختلاط گونه‌های شیمیایی محاسبه می‌کنند، نتایج حاصل از این دوشبیه سازی به یکدیگر شباهت بیشتری دارد. در حالتی که از مدل FR/ED استفاده شده است ناحیه واکنشی گسترده‌تر و تحت تاثیر نرخ واکنش محاسبه شده بسط تر می‌شود. مجموعه این عوامل باعث پیش‌بینی میدان دمایی متفاوت در حالت اخیر نسبت به دو حالت قبل شده و تحت تاثیر آن توزیع دمای خروجی از لاینر و دمای دیواره نیز تغییرات بیشتری نسبت به دو حالت فوق می‌شود. در انتها با توجه به آنچه از اطلاعات OEM توربین در دسترس است و بر اساس سایر تجارب می‌توان گفت مدل ED برای شبیه‌سازی اینگونه جریان‌ها متناسب با هزینه و دقت مورد نظر، مدل مطلوبی می‌باشد.

تشکر و قدردانی

این فعالیت در راستای قرارداد شماره RD-RPI-92-11 با معاونت تحقیق و توسعه مینا انجام پذیرفته است.

هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۲۴ و ۲۵ بهمن ماه ۱۳۹۶

تهران، دانشگاه صنعتی شریف

مراجع

- 1- Mongia, Hukam C. "Recent progress in comprehensive modeling of gas turbine combustion", AIAA paper 1445, 2008.
- 2- B. Scott Brewster, Steven M. Cannon, James R. Farmer and Fanli Meng, "Modeling of lean premixed combustion in stationary gas turbines", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 25, pp. 353-385, 1999.
- 3- Riley, James J. "Review of large-eddy simulation of non-premixed turbulent combustion", Journal of fluids engineering 128, no. 2, pp. 209-215, 2006.
- 4- Lignell, David O., Jacqueline H. Chen, and Hans A. Schmutz. "Effects of Damköhler number on flame extinction and reignition in turbulent non-premixed flames using DNS", Combustion and Flame 158, no. 5, pp. 949-963, 2011.
- 5- Ahmed, Guessab, Aris Abdelkader, Abdelhamid Bounif, and Iskander Gökalp, "Reduced Chemical Kinetic Mechanisms: Simulation of Turbulent Non-Premixed CH₄-Air Flame", JJMIE 8, no. 2, 2014.
- 6- de Bruyn Kops, S. M., J. J. Riley, G. Kosály, and A. W. Cook. "Investigation of modeling for non-premixed turbulent combustion." *Flow, Turbulence and combustion* 60, no. 1 (1998): 105-122.
- 7- ANSYS FLUENT Theory Guide, Release 14.0, 2011.

۸- رجبی، ع. و فخرطباطبایی، ع.، "مرور طراحی سیستم احتراق توربین گاز MGT-30 با استفاده از شبیه سازی عددی"، ششمین کنفرانس صنعت نیروگاه‌های حرارتی، ۳۰-۲۹ دی، ۱۳۹۴.