

ارزیابی مقدماتی سیستم احتراق نسل سوم موتور IGT25، قسمت اول: تحلیل عملکرد و تخمین آلاینده‌ها

سینا ثانی^{۱*}، محمد مرندی^۲، محمدعلی سرودی^۳، هیوا خالدی^۴

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، واحد مهندسی، دپارتمان احتراق، شرکت توربوتک، تهران، s.sani@turbotec-co.com
۲- کارشناسی، مهندسی تکنولوژی ساخت و تولید، واحد کد، دپارتمان احتراق، شرکت توربوتک، تهران، m.marandi@turbotec-co.com
۳- کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، مدیر دپارتمان احتراق، شرکت توربوتک، تهران، m.soroudi@turbotec-co.com
۴- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، مدیر عامل، شرکت توربوتک، تهران، h.khaledi@turbotec-co.com
* نویسنده مخاطب

چکیده

در چند دهه اخیر، شاهد افزایش روزافزون آلاینده‌های گازی ناشی از فرآیند احتراق درون توربین‌های گازی هستیم. در همین راستا طراحی و ارتقا محفظه‌های احتراق توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است. با توجه به کاربرد بالای توربین‌های گازی IGT25 در کشور، ارتقا و بهبود عملکرد احتراقی این توربین در قالب نسل سوم محفظه احتراق، حائز اهمیت ویژه‌ای خواهد بود. در این پژوهش، شبیه‌سازی جریان واکنشی آشفته سه بعدی برای دو محفظه احتراق توربین‌های گازی نسل دوم و نسل سوم IGT25 انجام شده است که هدف عمده آن مقایسه توزیع دما، نحوه اختلاط سوخت و هوا، شکل شعله و میزان آلاینده‌های تولیدی NOx بین دو توربین گاز در شرایط بار کامل است. ابتدا هندسه هر دو محفظه احتراق شبکه بندی گردیده و سپس شبیه سازی جریان احتراقی در نرم افزار Fluent انجام شده است. نتایج حل هر دو توربین گاز نشان داد که توزیع دمای جریان خروجی از محفظه احتراق نسل سوم یکنواخت‌تر است و مقدار آلاینده NOx تولیدی نیز بیش از ۴۰ درصد کاهش یافته است.

کلمات کلیدی: توربین گاز، محفظه احتراق، شکل شعله، توزیع دما، آلاینده NOx

مقدمه

امروزه فرآیند احتراق نزدیک به ۹۵ درصد انرژی لازم برای نیازهای بشر را تامین می‌کند [۱]. رشد بالای جمعیت جهان موجب افزایش مصرف بی‌رویه منابع انرژی شده است که از طرفی ما را با کاهش منابع محدود انرژی روبرو کرده است و از طرف دیگر موجب افزایش آلاینده‌ها و بالا رفتن دمای کره زمین به عنوان اصلی‌ترین مشکل زیست محیطی شده است. در چند دهه گذشته، تلاش‌های بسیاری برای کاهش تولید آلاینده‌ها نظیر NOx^۱ به خصوص در توربین‌های گازی صورت گرفته است [۲]. یکی از تکنولوژی‌هایی که برای کاهش مقدار آلاینده‌ها در توربین‌های گاز صنعتی به کار برده می‌شود، استفاده از برنهای کاهش‌دهنده آلاینده‌ها می‌باشد. در نسل اول این نوع از برن‌ها، از تزریق بخار و آب برای کاهش NOx استفاده گردیده است که یکی از مشکلات این نسل، تولید مقادیر بیشتر کربن مونوکسید است. در نسل دوم این برن‌ها، از تکنولوژی EV^۲ استفاده گردید که از این نسل برن درون توربین‌های گازی IGT25 بهره گرفته شده است. در نسل سوم، عملکرد برن‌های AEV^۳ در کاهش آلاینده‌ها بهبود پیدا کرد که ایده آن کار در شرایط پیش آمیختگی رقیق^۴ جهت بهبود اختلاط سوخت و هوا و کاهش دمای شعله است. یکی از معایب اصلی این روش افزایش احتمال وجود ناپایداری‌های احتراقی، افزایش احتمال خاموش شدن شعله، برگشت شعله به برن^۵ و افزایش نوسانات در شرایط کاری جدید است که در نتیجه بازده احتراق افت پیدا می‌کند [۳].

یکی از مزیت‌های دیگر برن‌های احتراقی نسل سوم، وجود سوپرلر^۶ می‌باشد که باعث ایجاد چرخش در جریان می‌شود و طراحی هر چه بهتر آن نیز موجب بهبود عملکرد کلی فرآیند احتراق خواهد شد. ایجاد چرخش با قدرت بالا باعث کوتاه‌تر شدن ناحیه تشکیل شعله می‌شود، بدین صورت که بازچرخش جریان باعث تثبیت محل تشکیل شعله و بهبود پایداری شعله می‌گردد. همچنین برگشت گونه‌های شیمیایی فعال و گرما به سمت پایه شعله منجر به کاهش مقادیر هیدروکربن‌های نسوخته می‌شود [۴-۵].

یکی از شرکت‌های پیشرو در ساخت توربین گازی، شرکت زیمنس است که توربین‌های گازی با توان خروجی مختلف از ۵ تا ۵۹۳ مگاوات را در نقاط مختلف جهان تولید می‌نماید. شعبه زیمنس کشور سوئد، توربین‌های گاز صنعتی میان‌رده (از ۱۹ تا ۵۳ مگاوات) را تولید می‌نماید. توربین گاز SGT-700 یکی از توربین‌های میان‌رده زیمنس محسوب می‌شود که توانی در حدود ۳۳ مگاوات تولید می‌نماید. این توربین با استفاده از برن‌های نسل سه DLE^۷ بیش از یک میلیون ساعت کاری را تجربه کرده است. همچنین این نوع برن DLE بر روی توربین گاز SGT-800 نیز نصب شده است و به عنوان یک گزینه برای توربین گاز SGT-600 نیز در دسترس است. از دیگر مزیت‌های توربین گاز SGT-700، حلقوی^۸ بودن چیدمان محفظه احتراق می‌باشد که باعث ایجاد توزیع دمای یکنواخت ورودی به توربین خواهد شد و نسبت مساحت خنک کاری به حجم محفظه احتراق مقدار کمتری در مقایسه با حالت استوانه‌ای^۹ خواهد داشت [۶]. همچنین در سال‌های اخیر، این محفظه احتراق از نظر توانایی دمپ کردن امواج آکوستیکی و بهبود خنک کاری برخوردار^{۱۰} ارتقا یافته است.

با توجه به این که ارزیابی هر ایده و طراحی سعی و خطایی آن هزینه‌بر می‌باشد، بدین منظور نیاز به شبیه‌سازی توربین گاز پیش اهمیت یافته است. شبیه‌سازی فرآیند احتراق به عنوان بخش مهمی از توربین گاز نیز بسیار حائز اهمیت می‌باشد. از طرف دیگر، بررسی شبیه‌سازی محفظه احتراق به علت پیچیدگی بالا، بسیار پیچیده و زمان‌بر می‌باشد. اضافه بر پیچیدگی‌های هندسی، وجود پدیده‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی اعم از جریان توربولانس، واکنش‌های احتراق و مکانیزم‌های انتقال حرارت بر محفظه احتراق حاکم است که مدلسازی دقیق آنها نیاز به مقایسه با داده‌های تجربی دارد [۷]. با این وجود، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی میدان جریان و احتراق نقش تعیین‌کننده‌ای در ارزیابی عملکرد، قابلیت کارکرد، عمر و آلاینده‌های ناشی از احتراق دارد. همین امر اهمیت شبیه‌سازی عددی میدان جریان را نشان می‌دهد که در چند دهه اخیر، تحقیقاتی در این مورد انجام شده است که در ادامه بخشی از این تحقیقات بررسی شده است.

⁶ Swirler
⁷ Dry low emissions
⁸ Annular
⁹ Can
¹⁰ Impingement cooling

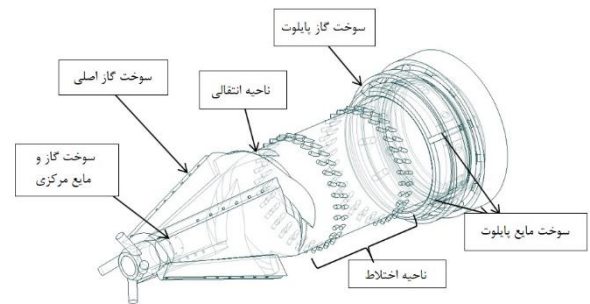
¹ Nitrogen oxides
² Environmental Burner
³ Advanced Environmental Burner
⁴ Lean premixed
⁵ Flash back

روی هندسه‌های مورد نظر، شبکه‌بندی در نرم‌افزار ANSYS Meshing انجام شد.

در المان‌بندی انجام شده به فراخور نیاز از المان‌های مکعبی، گوه‌ای، منشوری و چهاروجهی استفاده شده است. المان‌بندی به گونه‌ای انجام شده که در نواحی با تغییرات شدید از المان‌های ریزتر و در نواحی با تغییرات کم از المان‌های درشت‌تر استفاده شود. همچنین برای محاسبه دقیق جریان نزدیک دیوار از المان‌های لایه مرزی با ضخامت اولین لایه مرزی 0.1 و تعداد 14 لایه و نرخ رشد $1/2$ استفاده شده است.

به منظور حل جریان درون هندسه مدنظر، نیاز است که دامنه حل با کیفیت مناسبی شبکه‌بندی شود اما اندازه المان‌ها برای محاسبه دقیق اختلاط و واکنش احتراق باید به اندازه کافی ریز باشد. همچنین وجود سوراخ‌های ریز ورود سوخت و هوا، جزئیات هندسی کوچک به همراه پیچیدگی فراوان در قسمت پیلوت، ناحیه اختلاط و انتقالی موجب پیچیده‌تر شدن و ریزتر شدن المان‌بندی در این نواحی می‌شود. المان‌بندی در قسمت اعظم لاینر و بخشی از داخل برنز به صورت منظم^۴ انجام شده است تا تعداد المان‌ها کاهش یافته و همچنین کیفیت شبکه بندی بهبود یابد. سایر بخش‌های هندسه هر دو توربین گازی به صورت نامنظم^۵ شبکه‌بندی شده‌است.

اندازه المان در داخل لاینر 3 میلی‌متر و در نزدیک دیواره‌ها 1 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به اختلاط سوخت و هوا که درون برنز انجام می‌شود، المان‌های این ناحیه بسیار ریز می‌باشند و حداکثر اندازه المان در قسمت برنز و پیلوت 1 میلی‌متر تنظیم شده است. شماتیکی از شبکه‌بندی انجام شده برای هر دو نسل محافظه احتراق در شکل ۵ ارائه گردیده است.

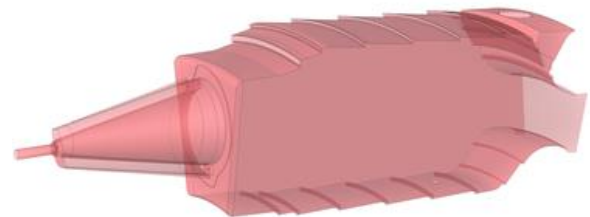


شکل ۳: نمای کلی از برنز نسل سوم DLE

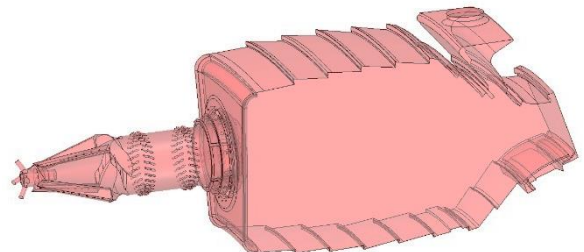
یکی از اهداف از نسل سوم برنرهای مورد بحث، کاهش مقدار آلاینده‌های NOx تا مقدار 42 ppm برای سوخت مایع و 15 ppm برای سوخت گازی است.

در ادامه این پروژه به بررسی شبیه‌سازی نسل دوم و سوم محافظه احتراق توربین گازی IGT25 پرداخته خواهد شد. هندسه‌ای که برای حل جریان احتراقی به کار برده شده است شامل برنز و لاینر می‌باشد. شماتیکی از دو هندسه مربوطه در شکل ۴ ارائه شده است که در این پژوهش به بررسی جریان، توزیع دما و شکل شعله درون لاینر و برنز هر دو هندسه خواهیم پرداخت.

(الف)

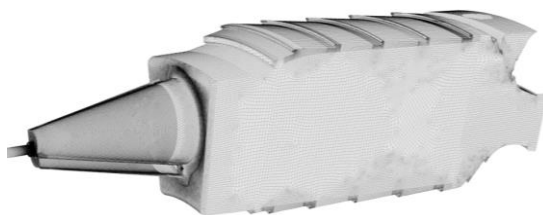


(ب)

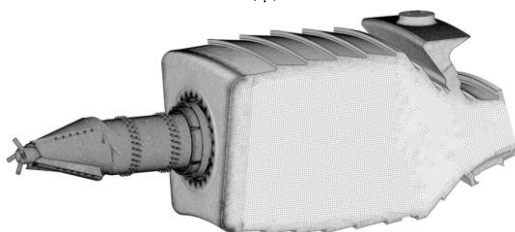


شکل ۴: هندسه برنز و لاینر محافظه احتراق (الف) نسل دوم (ب) نسل سوم توربین گاز IGT25

(الف)



(ب)



شکل ۵: نمای سه بعدی از شبکه‌بندی برنز و لاینر (الف) نسل دوم (ب) نسل سوم توربین گاز IGT25

تعداد المان‌های پیاده سازی شده بر روی نسل دوم و نسل سوم محافظه احتراق توربین گاز IGT25 به ترتیب برابر 13881069 با 17469008 المان می‌باشد. یکی از پارامترهای مهم در بررسی کیفیت شبکه‌بندی، Skewness می‌باشد که مقدار آن برای المان‌بندی انجام شده بر روی دامنه حل کمتر از 0.9 بوده که نشان از کیفیت بالای شبکه‌بندی حاضر است. علاوه بر این شاخص، سعی شده است.

جزئیات هندسی که برای شبیه‌سازی جریان احتراقی درون هر دو توربین گاز در نظر گرفته شده است شامل سوراخ‌ها و شکاف ورودی هوای دیفیوزر، مسیرهای سوخت مایع و گازی مرکزی، استوانه‌های شامل سوخت گاز اصلی، سوخت پیلوت، سوراخ‌های خنک‌کاری برخوردی، سوراخ‌های خنک‌کاری لایه‌ای^۱، سوراخ‌های هوای رقیق‌سازی و مسیر بای‌پس^۲ می‌باشد.

شبکه بندی

یکی از مراحل مهم در انجام هر شبیه‌سازی، تولید مش و انجام شبکه‌بندی میدان حل می‌باشد. پس از تولید هندسه و انجام ساده‌سازی‌های لازم بر

⁴ Structured mesh

⁵ Unstructured mesh

¹ Film cooling

² By-pass

³ Growth rate

شرایط مرزی

اضافه بر شبکه بندی با کیفیت برای انجام شبیه سازی، شرایط مرزی مناسبی نیاز است. در جدول ۱، شرایط مرزی جریان ورودی هوا و سوخت به محفظه احتراق آورده شده است.

جدول ۱: شرایط مرزی جریان ورودی سوخت به محفظه احتراق

مقدار	پارامتر(واحد)	نوع توربین گاز
۱/۴۶۰	دبی ورودی (kg/s)	نسل دوم توربین گاز IGT25
۳۰۰	دمای ورودی (K)	
۱/۷۴۵	دبی ورودی (kg/s)	نسل سوم توربین گاز IGT25
۳۰۰	دمای ورودی (K)	

هوای ورودی از چند مسیر مختلف اعم از شکاف روی مخروطی برنر، سوراخ های روی برنر و سوراخ های خنک کاری اطراف لاینر وارد محفظه احتراق می شود و پس از واکنش با سوخت ورودی و تشکیل محصولات گازی از محفظه احتراق خارج خواهد شد. همانگونه که قبلا اشاره گردید، مسیرهای جریان سوخت ورودی به دو نسل محفظه احتراق توربین گازی IGT25 با یکدیگر تفاوت هایی دارند، اینگونه که سوخت ورودی به محفظه احتراق نسل دوم از مرکز و شکاف های مخروطی برنر وارد می شود در حالی که جریان سوخت ورودی به نسل سوم محفظه احتراق از سه مسیر مرکزی، اصلی و پیلوت وارد محفظه احتراق می شوند. دبی سوخت گازی برای کل محفظه احتراق در شرایط کاری بار کامل به ازای محفظه احتراق نسل دوم و سوم IGT25 به ترتیب برابر با ۱/۴۶۰ و ۱/۷۴۵ کیلوگرم بر ثانیه با دمای نزدیک محیط، برابر با ۳۰۰ کلوین است. با توجه به اینکه علاوه بر سوخت اصلی، سوخت پیلوت درون توربین گاز IGT25 نسل سوم وجود دارد که نسبت آن به سوخت کل^۱ برابر ۰/۰۲ در نظر گرفته شده است. پس از مخلوط شدن سوخت و هوای ورودی به برنرها، احتراق درون محفظه های نسل دوم و سوم IGT25 به ترتیب در فشار عملکردی معادل ۱۳/۹bar و ۱۷/۳ bar صورت می گیرد. شایان ذکر است که شرط مرزی عدم لغزش^۲ برای دیواره های هر دو محفظه احتراق در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه جریان درون برنر و لاینر به صورت چرخشی متقارن است، تنها یک هجدهم از هندسه کلی شبیه سازی شده است و سطوح کناری با شرط مرزی پریودیک^۳ اعمال شده اند.

معادلات حاکم

با توجه به شرایط مرزی و شبکه بندی انجام شده، معادلات احتراق و جریان توربولانس و انتقال حرارت تشعشع بر روی دامنه حل گسسته سازی شده، باید حل گردد تا نتایج حل جریان واکنشی (احتراق) بدست آید، بنابراین انتخاب مدل های مناسب احتراقی و آشفستگی از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا که مدلسازی احتراق هیدروکربن ها و شکسته شدن آنها به چندین هیدروکربن دیگر، فرآیندی دشوار است و نیاز است که از مدل های ساده سازی شده برای شبیه سازی واکنش ها استفاده کرد. به منظور کاهش

هزینه های محاسباتی از مدل های کاهیده شده نرم افزار Fluent استفاده خواهد گردید. اخیرا بهینه سازی در مورد انتخاب تعداد واکنش های مناسب برای شبیه سازی دقیق احتراق توربین گاز در چندین مقاله انجام شده است [۱۱-۱۲].

در انجام شبیه سازی ها برای حل جریان مغشوش، مدلسازی تشعشع و حل احتراقی به ترتیب از مدل های Standard - ε - k، مدل DO^f و FR/ED^۵ درون نرم افزار Fluent استفاده شده است.

معادله ε - k برای شبیه سازی جریان توربولانس سوخت و هوا درون محفظه استفاده می شود که در معادلات ۱ و ۲ آورده شده است.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - \rho C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

که در معادله بالا k انرژی جنبشی توربولانس، ε نرخ آشفستگی، G_k تولید انرژی جنبشی توربولانسی، μ_t ویسکوزیته توربولانس و σ_k عدد پراکتل میباشد. در معادله دوم C_{1ε} و C_{2ε} دو ثابت معادله میباشد.

با توجه به اینکه درصد قابل توجهی از مکانیزم انتقال حرارت درون محفظه احتراق از طریق تشعشع صورت می گیرد، انتخاب مدل مناسب تشعشعی اهمیت زیادی پیدا می کند. در این مقاله از مدل DO برای شبیه سازی انتقال حرارت تشعشعی استفاده گردیده است که معادله آن آورده شده است:

$$\frac{d\mathbf{I}(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s) \mathbf{I}(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} \mathbf{I}(\vec{r}, \vec{s}') \varphi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (3)$$

در معادله بالا تغییرات شدت تشعشع^۶ تابعی از ضرایب جذب^۷ و پخش^۸ تشعشع در جهات مختلف است. همچنین تاثیر شکست پرتو عبوری از سطوح را می توان با تغییر ضریب n درون معادله ۳ مدلسازی کرد.

مدل های مختلفی برای شبیه سازی احتراق وجود دارد که در این پژوهش از FR/ED به منظور شبیه سازی واکنش ها استفاده شده است. این مدل برای شبیه سازی جریان با اغتشاش بالا و اختلاط شدید استفاده خواهد شد به این صورت که به ازای هر المان از دامنه حل، سرعت انجام واکنش توسط یکی از مدل های FR و ED محدود می شود. غالبا مدل FR محدود کننده سرعت واکنش برای ناحیه قبل از تشکیل شعله است. نرخ تولید و یا تخریب گونه شیمیایی ژام در واکنش ژام درون معادله ۴ ارائه گردیده است.

$$\begin{aligned} \dot{R}_{i,r} = & \Gamma(v_{i,r}'' - v_{i,r}') (k_{f,r} \prod_{j=1}^N [C_{j,r}]^{\eta'_{j,r}} \\ & - k_{b,r} \prod_{j=1}^N [C_{j,r}]^{\eta''_{j,r}}) \end{aligned} \quad (4)$$

که C_{j,r} درصد مولی گونه j در واکنش ژام را نشان می دهد. دو پارامتر k_{f,r} و k_{b,r} سرعت پیشرفت واکنش در جهت رفت و برگشت را نشان می دهد.

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{-E_r/RT} \quad (5)$$

$$k_{b,r} = k_{f,r} / K_r \quad (6)$$

⁵ Finite-Rate Eddy-Dissipation

⁶ Radiation intensity

⁷ Absorption coefficient

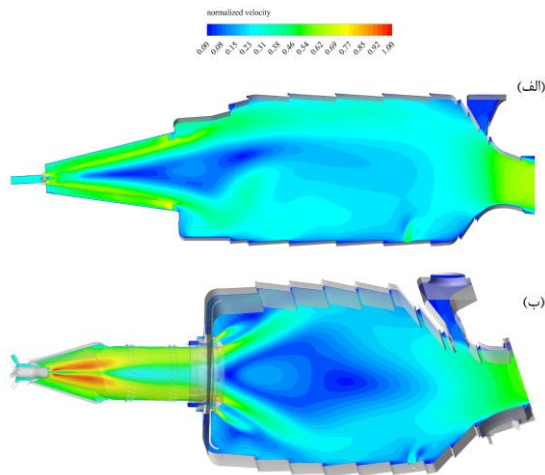
⁸ Scattering coefficient

¹ Pilot Fuel Ratio (PFR)

² No-slip

³ Periodic

⁴ Discrete Ordinates model

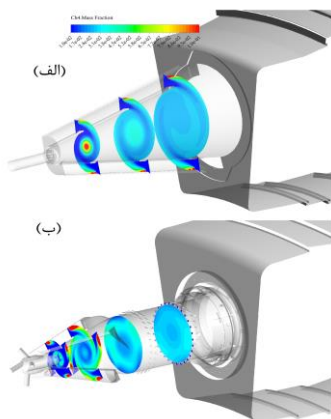


شکل ۷: کانتور توزیع سرعت بی بعد در مقطع میانی محفظه احتراق (الف) نسل دوم و (ب) نسل سوم توربین گاز IGT25

همانگونه که در شکل ۷ مشاهده می شود، جریان درون محفظه احتراق نسل دوم توربین گاز IGT25 نسبت به نسل سوم متقارن تر است که به علت نصب متقارن برنر بر روی لاینر می باشد. همچنین تاثیر برنر نسل سوم بر اختلاط بهتر سوخت و هوا در شکل ۷ (ب) به خصوص در خروجی برنر قابل مشاهده است اما این توزیع یکنواخت سرعت در مقطع خروجی برنر نسل دوم وجود ندارد. این اختلاط خوب نتیجه ایجاد جریان چرخشی توسط پره های انتقالی و ناحیه اختلاط موجود در برنر نسل سوم است.

علاوه بر تغییر برنر در محفظه احتراق نسل سوم، پروفیل انتهایی لاینر مربوطه به گونه ای طراحی شده است که جریان خروجی از محفظه احتراق نسل سوم یکنواختی بهتری داشته باشد.

برای پی بردن به چگونگی اختلاط سوخت و هوا در مسیر جریان، شکل ۸ که کسر جرمی سوخت (متان) در مسیر برنر هر دو نسل نشان داده شده است. سوخت متان از ورودی مرکزی و دو استوانه کناری وارد قسمت مخروطی برنر نسل دوم می شود و با هوای ورودی اختلاط پیدا می کند اما استوانه های سوخت اصلی ورودی به برنر نسل سوم بین چهار استوانه تقسیم خواهد شد.



شکل ۸: توزیع کسر جرمی سوخت متان درون برنر (الف) نسل دوم و (ب) نسل سوم توربین گاز IGT25

همانگونه که در شکل ۸ مشاهده می شود، متان ورودی به برنر نسل سوم فرصت بیشتری برای اختلاط با هوای ورودی دارد و در نهایت توزیع یکنواخت تری از مخلوط سوخت و هوا ایجاد می کند.

دو معادله بالا سرعت پیشرفت واکنش در مسیر رفت و برگشت را نشان خواهد داد که تابعی از انرژی فعال سازی واکنش، دما و ثابت تعادلی می باشد. در مدل ED، نرخ تولید گونه آم در واکنش r برابر با مقدار مینیمم $R_{i,r}$ دو معادله ۷ و ۸ است که محدود کننده سرعت واکنش در ناحیه پس از تشکیل شعله است.

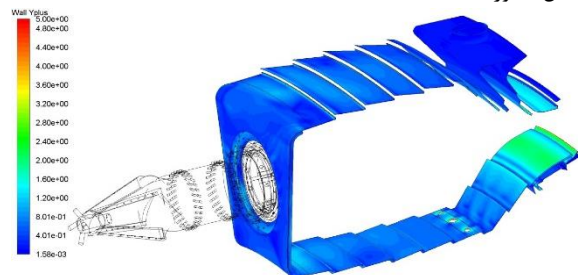
$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\epsilon}{k} \min \left(\frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}} \right) \quad (7)$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\epsilon}{k} \left(\frac{\sum_P Y_P}{\sum_j^n v'_{j,r} M_{w,j}} \right) \quad (8)$$

که دو ثابت تجربی A و B به ترتیب برابر با ۴ و ۰/۵ هستند. لازم به ذکر است که ترکیب دو مدل ED و FR برای شبیه سازی جریان احتراقی واکنش های چند مرحله ای^۱ تعداد بالا مناسب نمی باشد، بنابراین در این پژوهش از واکنش دو مرحله ای سوخت متان استفاده گردیده است.

بحث بر روی نتایج

قبل از ارائه نتایج شبیه سازی باید از کیفیت شبکه بندی پیاده سازی شده روی دامنه حل اطمینان حاصل کنیم. بدین منظور از کانتور γ^+ بر روی دیواره لاینر محفظه احتراق نسل سوم IGT25 بهره گرفته شده است که در شکل ۶ آورده شده است.



شکل ۶: کانتور توزیع γ^+

مطابق شکل ۶، مقدار γ^+ روی دیواره لاینر کمتر از ۵ می باشد که نشان از کیفیت مناسب المان بندی ناحیه حل در شبیه سازی جریان مغشوش به منظور محاسبه دقیق انتقال حرارت صورت گرفته در دیواره های لاینر درون محفظه احتراق است.

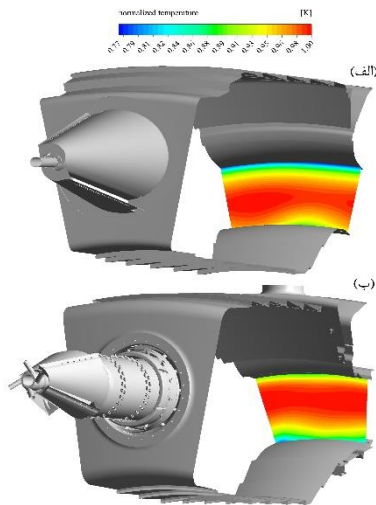
با توجه به مدل های انتخابی و کیفیت بالای شبکه بندی پیاده سازی شده روی هندسه، نوبت به انجام شبیه سازی جریان احتراقی درون محفظه رسیده است که در این بخش نتایجی اعم از توزیع دما، کانتور سرعت، شکل شعله و آلاینده های تولیدی به ازای هر دو توربین گازی را بررسی خواهیم کرد.

یکی از مهمترین قسمت های شبیه سازی در مسائل احتراقی، مدل سازی صحیح ناحیه باز چرخش^۲ جریان می باشد زیرا که اهمیت زیادی در پایداری احتراق و شعله خواهد داشت. بدین منظور در ابتدا تنها حل جریان درون برنر و لاینر بدون احتساب احتراق و انتقال حرارت بررسی خواهد گردید تا شکل کلی میدان جریان، نواحی باز چرخش جریان، اختلاط سوخت و هوا و سایر پیش نیازها برای حل کلی بدست آید. پس از شبیه سازی و همگرایی جریان درون محفظه، کانتور سرعت جریان که با بیشینه سرعت در مقطع میانی بی بعد شده است، بر روی صفحه میانی درون محفظه احتراق هر دو توربین گاز در شکل ۷ ارائه شده است.

² Recirculation Zone (RZ)

¹ Multi-step reactions

با توجه به اهمیت توزیع دمای خروجی از لاینر، شکل ۱۰ که نشان‌دهنده توزیع دمای بی‌بعد در مقطع خروجی محفظه احتراق‌ها می‌باشد، در ادامه ارائه شده است.



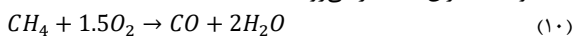
شکل ۱۰: کانتور توزیع دمای بی‌بعد در مقطع خروجی محفظه احتراق (الف) نسل دوم و (ب) نسل سوم توربین گاز IGT25

همانگونه که شکل ۱۰ نشان می‌دهد، دمای گازهای خروجی در نزدیکی دیواره کمتر از نواحی میانی خروجی جریان است که به علت وجود جریان هوای خنک‌کاری لایه‌ای نزدیک دیواره لاینر می‌باشد. یکی از پارامترهای مهم که به نحوی نشان‌دهنده یکنواختی توزیع دمای جریان خروجی محفظه است، پارامتر بی‌بعد *pattern factor* می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$Pattern\ factor = \frac{T_{max} - T_{ave}}{T_{ave} - T_{in}} \quad (9)$$

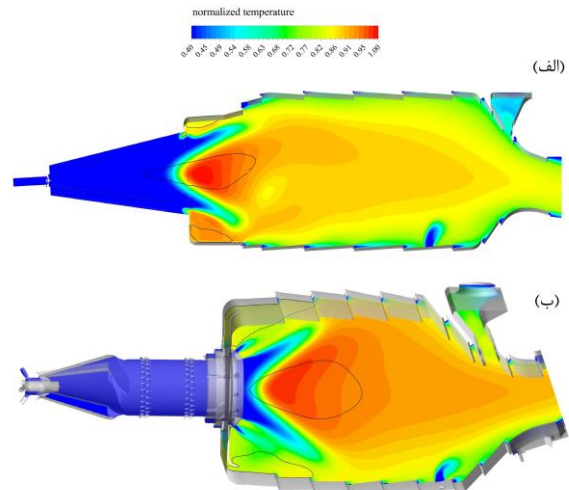
که در رابطه فوق T_{max} ، ماکزیمم دما، T_{ave} متوسط دما در مقطع خروجی و T_{in} دمای هوای ورودی به محفظه می‌باشد. مقدار *pattern factor* بر اساس توزیع دمای خروجی از محفظه احتراق برای نسل سوم توربین گاز IGT25، حدود ۳۰ درصد کمتر از محفظه احتراق نسل دوم می‌باشد که نشان‌دهنده یکنواختی بسیار خوب این محفظه می‌باشد.

در مکانیزم‌های احتراقی کاهیده شده درون نرم افزار Fluent، تشکیل محصولات احتراق شامل دو واکنش می‌باشد، البته این دو واکنش متوسط همه واکنش‌ها محسوب می‌شوند که واکنش اول مربوط به تشکیل کربن مونوکسید است که یک ترکیب کاملاً ناپایدار می‌باشد و از واکنش همین ترکیب ناپایدار در دمای بالا با اکسیژن، کربن‌دی‌اکسید تشکیل می‌شود که از محصولات احتراق به شمار می‌رود.



شکل شعله ایجاد شده در مسائل احتراقی از اهمیت بسیاری برخوردار است و یکی از راه‌های شناسایی شکل شعله از روی توزیع کسر جرمی کربن مونوکسید است زیرا که بلافاصله بعد از انجام واکنش احتراق تشکیل خواهد شد و سپس در دماهای بالاتر با اکسیژن ترکیب خواهد گردید و کربن دی‌اکسید را تشکیل می‌دهد. از آنجایی که سرعت انجام این دو واکنش بسیار بالا است، تبدیل کربن مونوکسید به کربن دی‌اکسید در مرز باریکی رخ خواهد داد که جدا کننده دو ناحیه سرد و گرم می‌شود. از طرفی این مرز

برای بررسی ناحیه تشکیل شعله، توزیع دمای درون محفظه و نواحی بازچرخش جریان را باید بررسی کنیم زیرا که بازگشت گونه‌های فعال شیمیایی به سمت ریشه شعله و همچنین پایداری شعله درون محفظه احتراق وابسته به چگونگی بازچرخش جریان خواهد بود. بدین منظور بهبود نواحی بازچرخش جریان در شکل‌گیری شعله و پایداری آن ضروری است. شکل ۹ کانتور دمای بی‌بعد شده با بیشینه دمای محفظه را به همراه خطوط مشخص‌کننده نواحی بازچرخش، نشان می‌دهد.



شکل ۹: کانتور توزیع دمای بی‌بعد به همراه خطوط مشکی نشان‌دهنده نواحی بازچرخش در مقطع میانی محفظه احتراق (الف) نسل دوم و (ب) نسل سوم توربین گاز IGT25

همانگونه که در شکل ۹ نمایش داده شده است، سه ناحیه بازچرخش اعم از یک بازچرخش اصلی و دو بازچرخش فرعی درون دامنه حل هر محفظه احتراق بوجود می‌آید. ناحیه بازچرخش اصلی برای محفظه احتراق نسل سوم IGT25 اندکی پس از خروجی برنر تشکیل می‌شود و تا اواسط لاینر ادامه دارد، این در حالی است که ناحیه بازچرخش اصلی محفظه احتراق نسل دوم توربین گاز IGT25، از انتهای برنر شروع می‌شود. همین امر موجب تشکیل شعله در خروجی برنر می‌شود اما شعله درون نسل سوم این محفظه با فاصله مناسب از خروجی برنر تشکیل می‌گردد.

با دقت به کانتور توزیع دمایی نرمال درون هر دو محفظه احتراق، سوخت و هوا به ترتیب از ابتدای برنر و شکاف‌های قسمت مخروطی وارد شده و اختلاط بین آن‌ها رخ می‌دهد تا جریان با دمای یکنواختی در ورودی لاینر داشته باشیم. محفظه احتراق نسل سوم IGT25 دارای ناحیه دما بالای گسترده‌تری در مقایسه با نسل دوم است زیرا که ناحیه بازچرخش بزرگتری درون لاینر ایجاد شده است. به عبارتی توزیع دمایی درون این محفظه احتراق یکنواخت‌تر می‌باشد که موجب بهبود عمر قطعات و کاهش تولید آلاینده‌های مضر خواهد شد.

سوراخ‌های خنک‌کاری لایه‌ای و رقیق‌سازی لاینر که به منظور کاهش دمای دیواره‌ها تعبیه شده است، لایه‌ای از هوای خنک را در نزدیکی دیواره‌های لاینر ایجاد می‌کند که به نحوی که یک لایه مقاومت حرارتی را در برابر جریان‌های داغ داخل لاینر ایجاد می‌نماید که در شکل ۹ برای هر دو محفظه احتراق قابل مشاهده است. همچنین برای یکنواخت کردن دمای جریان خروجی از محفظه که پارامتر مهمی برای پره‌های ردیف اول توربین محسوب می‌شود، از سوراخ‌های رقیق‌سازی در قسمت داخلی انتهای لاینر استفاده شده است که تاثیر این سوراخ‌ها بر توزیع دمای نزدیک دیواره خروجی محفظه نیز دیده می‌شود.

می‌شود. معادله مربوط به تولید NOx حرارتی و سریع در زیر آورده شده است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NO}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{NO}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{NO}) + S_{NO} \quad (13)$$

NOx ناشی از سوخت از اکسیداسیون نیتروژن درون سوخت تشکیل می‌شود که برای سوخت استفاده شده در این پروژه وجود ندارد.

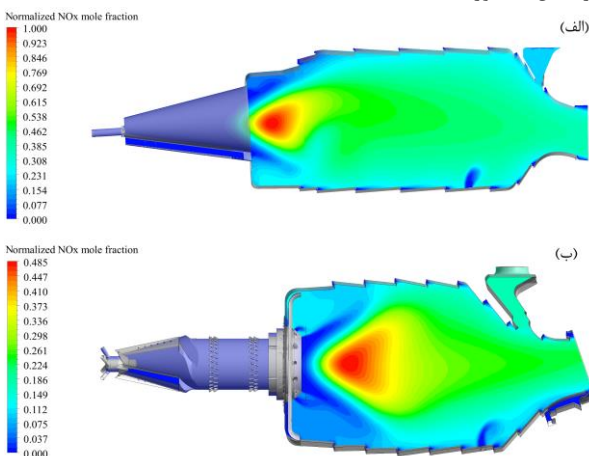
تولید NOx ناشی از واکنش‌های میانی از واکنش با مولکول نیتروژن تولیدی از N₂O ایجاد می‌شود. نرم افزار Fluent معادلات انتقالی اضافی برای گونه‌های HCN، NH₃ و N₂O علاوه بر NO حل خواهد کرد که در روابط ۱۴-۱۶ ارائه شده است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{HCN}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{HCN}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{HCN}) + S_{HCN} \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NH_3}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{NH_3}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{NH_3}) + S_{NH_3} \quad (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{N_2O}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{N_2O}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{N_2O}) + S_{N_2O} \quad (16)$$

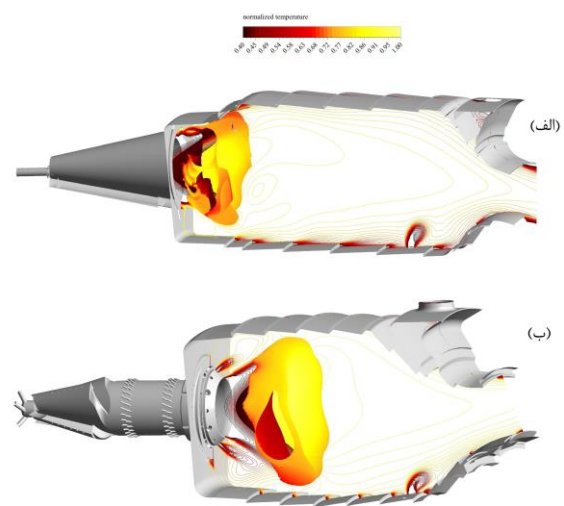
که Y_{NO} و Y_{N₂O}، Y_{NH₃}، Y_{HCN} به ترتیب نشان دهنده کسر جرمی گونه‌های HCN، NH₃ و N₂O و NO در حالت گازی می‌باشد و D ضریب پخش شونده‌گی موثر است. همچنین ترم‌های S_{NO}، S_{HCN}، S_{NH₃} و S_{N₂O} برای هر معادله به صورت جداگانه مشخص خواهد شد و معادلات مربوطه حل خواهد گردید. پس پردازش‌های لازم برای پیش بینی تولید آلاینده NOx با توجه به میدان دما، سرعت و گونه‌های شیمیایی درون نرم افزار Fluent انجام خواهد شد و نتایج آن به ازای هر دو نسل محافظه احتراق توربین گاز IGT25 در شکل ۱۲ آورده شده است.



شکل ۱۲: توزیع کسر مولی بی‌بعد آلاینده NOx در محافظه احتراق (الف) نسل دوم و (ب) نسل سوم توربین گاز IGT25

لازم به ذکر است که مقادیر NOx تولیدی به ازای مقدار ماکزیمم آن برای محافظه احتراق نسل دوم توربین گاز IGT25 بی‌بعد شده است. همانگونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، سهم بسیاری از آلاینده تولیدی در ریشه شعله تشکیل خواهد شد زیرا دما بسیار بالا می‌باشد و تولید NOx حرارتی نقش اساسی در تولید آلاینده NOx دارد. یکی دیگر از دلایل تولید آلاینده

نشان دهنده شعله درون محافظه خواهد بود که در شکل ۱۱ برای هر دو محافظه احتراق آورده شده است.



شکل ۱۱: شکل شعله درون محافظه احتراق (الف) نسل دوم و (ب) نسل سوم توربین گاز IGT25

شعله ایجاد شده درون محافظه احتراق نسل سوم IGT25 در فاصله بیشتری از خروجی برنر تشکیل شده است و همچنین مرز وسیع‌تری را در مقایسه با محافظه احتراق نسل دوم IGT25 در بر می‌گیرد که به علت تفاوت در ناحیه بازچرخش اصلی می‌باشد.

یکی دیگر از پارامترهای کلیدی بررسی عملکرد محافظه همان بازده احتراق است که طبق رابطه ۱۲ محاسبه می‌گردد.

$$\eta = \frac{\text{heat released in combustion}}{\text{heat available in fuel}} \quad (12)$$

در تعریف فوق انرژی آزاد شده در محافظه همان آنتالپی تولید شده از سوختن متان در محافظه است که از نتایج شبیه سازی سه بعدی بدست می‌آید. از طرفی ارزش حرارتی متان ۵۰ مگاژول بر کیلوگرم می‌باشد که برای هر دو نسل محافظه احتراق توربین گاز IGT25 بالای ۹۹/۹۹ درصد خواهید رسید. این امر نشان می‌دهد که بازده احتراق اصولاً مقدار بالایی است ولی نوسانات احتراق، ناپایداری شعله و تولید آلاینده‌ها از جمله معضلات قابل بررسی است که ما در ادامه این پژوهش به بررسی NOx به عنوان آلاینده اصلی ناشی از فرآیند احتراق خواهیم پرداخت زیرا که اثرات جبران ناپذیری بر روی محیط زیست می‌گذارد.

آلاینده NOx اصولاً از نیتریک اکسید (NO) و مقدار کمتری نیتروژن اکسید (NO₂) و نیتروس اکسید (N₂O) تشکیل می‌شود. از نرم افزار Fluent برای حل معادله انتقال غلظت NO درون دامنه استفاده شده است. همچنین معادلات اضافی دیگر برای حل گونه‌هایی نظیر N₂O در واکنش میانی در نظر گرفته می‌شود. برای بدست آوردن مقدار آلاینده NOx، ابتدا باید جریان احتراقی کاملاً حل گردد و سپس از پس پردازش برای حل آلاینده‌ها استفاده خواهد شد.

تولید آلاینده‌های NOx به چهار بخش اصلی تقسیم خواهد شد که شامل تولید NOx حرارتی^۱، تولید NOx سریع^۲، تولید NOx ناشی از سوخت^۳ و تولید NOx ناشی از واکنش‌های میانی^۴ می‌باشد.

NOx حرارتی از اکسیداسیون نیتروژن حاضر در هوای احتراق تولید می‌شود و NOx سریع در واکنش‌های با سرعت بسیار بالا در نزدیکی شعله تشکیل

³ Fuel NOx formation
⁴ Intermediate reactions

¹ Thermal NOx formation
² Prompt NOx formation

\vec{s}	بردار انتشار تشعشع
I	شدت تشعشع، W/sr
a	ضریب جذب، 1/m
σ_s	ضریب پراکندگی، 1/m
n	ضریب شکست
σ	ثابت استفان بولتزمن، W/m^2K^4
φ	تابع پراکندگی
T	دما، K
u	ضریب استوکیومتری
$C_{j,r}$	درصد مولی جزئی j ام در واکنش r ام
E_r	انرژی فعالسازی واکنش، J/mol
K_r	ثابت تعادلی واکنش r ام
R	نرخ انجام واکنش، mol/s
Y	درصد مولی
η	بازده احتراق

مراجع

- Griffiths, J. F., Barnard, J. A. (1998), *Flame and Combustion*, 3rd edition, Springer.
- Lörst ad, D., Lindholm, A., Gohari Barhaghi, D., Alessio Bonaldo, A., Fedina, E., Fureby, C., Lantz, A., Collin, R., Aldén, M., 2012, "Measurements and LES of a SGT-800 Burner in a Combustion Rig", *Combustion, Fuels and Emissions, Parts A and B*, 2, 1427-1438.
- Lefebvre, A. H., and Ballal, D. R., 2010. "Gas turbine combustion: alternative fuels and emissions", 3rd ed. CRC Press.
- Syred, N., 2006. "A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems", *Progress in Energy and Combust. Science*, 32(2), 93- 161.
- Gupta, A. K., Lilley, D. G., and Syred, N., 1984, "Swirl Flows", Abacus Press, Tunbridge Wells, UK.
- Lörst ad, D., Pettersson, J. and Lindholm, A., 2009. "Emission reduction and cooling improvements due to the introduction of passive acoustic damping in an existing SGT-800 combustor", ASME paper GT2009-59313.
- Abou-Taouk, A., Andersson, N., Eriksson, L., & Lörst ad, D., 2016, "CFD Analysis of a SGT-800 Burner in a Combustion Rig", *Combustion, Fuels and Emissions*, 4B, 57423-V04BT04A014.
- Lörst ad, D., Lindholm A., Alin, N., Fureby, C., Lantz, A., Collin, R. and Aldén, M. "Experimental and LES investigation of a SGT-800 burner in a combustion rig". ASME paper GT2010-22688, 2010.
- Moëll, D., Lörst ad, D., and Bai, X. S., 2015. Numerical investigation of methane/hydrogen/air partially premixed flames in the SGT-800 burner fitted to a combustion rig. Ninth Mediterranean Combustion Symposium.
- Lörst ad, D., Ljung, A., & Abou-Taouk, A., 2016, "Investigation of Siemens SGT-800 Industrial Gas Turbine Combustor Using Different Combustion and Turbulence Models.", *Combustion, Fuels and Emissions*, 4B, 57694-V04BT04A037.
- Moëll, D., Lörst ad, D., and Bai, X. S., 2015. "Numerical investigation of hydrogen enriched natural gas in the SGT-800 burner". ASME Turbo Expo. GT2015-44040.
- Slavinskaya, N., Huckaby, E. D., 2010. "A comparative study of eight finite-rate chemistry kinetics for CO/H2 combustion", *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 4(3), 331-356.

NOx، انجام سریع واکنش‌ها دقیقاً قبل از شکل‌گیری شعله می‌باشد که عمده آلاینده تولیدی را قبل از ایجاد شعله تشکیل خواهد داد. از مقایسه شکل ۱۲ (الف) و (ب) به مقدار بالای NOx تولیدی درون نسل دوم توربین گاز IGT25 نسبت به محفظه نسل جدید آن پی خواهیم برد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مقدار آلاینده تولیدی در خروجی از محفظه احتراق نسل دوم و سوم موتور IGT25 به ترتیب برابر با ۲۲/۲۶ ppm و ۱۲/۶۸ ppm بدست آمده است. بنابراین برنرهای نسل سوم DLE در کاهش آلاینده تولیدی نقش بسیار موثری را ایفا خواهند کرد.

نتیجه‌گیری

در گزارش حاضر به شبیه‌سازی قسمتی از محفظه احتراق دو نسل موتور IGT25 شامل برنر و لاینر پرداخته‌ایم. ابتدا هندسه‌ها با جزئیات دقیق ارائه گردید و نقش قسمت‌های مختلف برنرهای نسل دوم و سوم DLE در محفظه احتراق توضیح داده شد. سپس دامنه حل جریان شبکه‌بندی گردید تا با اعمال شرایط مرزی مناسب، آماده شبیه‌سازی شود. به علت وجود تقارن جریان چرخشی درون کل محفظه شامل ۱۸ برنر، تنها یک هجدهم از هندسه اصلی شبیه‌سازی گردید تا هزینه و زمان محاسباتی مورد نیاز را کاهش دهیم.

در این پژوهش از نرم افزار Fluent جهت شبیه‌سازی مدل احتراق، جریان مغشوش، انتقال حرارت درون محفظه و آلاینده NOx تولیدی استفاده شده است. ابتدا حل جریان مغشوش درون برنر و لاینر انجام شد تا نواحی بازچرخش جریان ایجاد شود، سپس حل احتراقی و انتقال حرارت جریان درون محفظه انجام گردید.

دو پارامتر اصلی در مسائل احتراقی اعم از توزیع دما و آلاینده NOx تولیدی به ازای دو نسل مختلف محفظه احتراق بررسی گردید. نتایج نشان داد مقدار pattern factor بر اساس توزیع دمای خروجی از محفظه احتراق برای نسل سوم توربین گاز IGT25، حدود ۳۰ درصد کمتر از محفظه احتراق نسل دوم می‌باشد. مقدار Pattern factor حاکی از یکنواخت‌تر بودن توزیع دمای جریان خروجی محفظه احتراق نسل سوم توربین گاز IGT25 است. از آنجایی که راندمان احتراق برای هر دو نسل محفظه احتراق بالای ۹۹/۹۹ درصد می‌باشد، پارامتر دیگری که برای مقایسه دو محفظه احتراق اهمیت پیدا می‌کند، میزان آلاینده NOx تولیدی است. نتایج نشان داد که مقدار NOx تولیدی محفظه احتراق نسل دوم موتور IGT25 نزدیک به ۱/۷۵ برابر NOx تولیدی محفظه احتراق نسل سوم می‌باشد. بنابراین به کارگیری برنرهای نسل سوم DLE به همراه تغییرات هندسی درون لاینر سیستم احتراق نسل سوم موتور IGT25 موجب کاهش چشم‌گیر آلاینده NOx تا ۱۲/۶۸ ppm شده است.

فهرست علائم

ρ	چگالی، kg/m^3
k	انرژی جنبشی توربولانس، J/kg
t	زمان، s
u_i	مولفه سرعت، m/s
x_i	مختصات کارتیزین، m
μ	ویسکوزیته دینامیکی، Pa.s
μ_t	ویسکوزیته توربولانسی، Pa.s
σ_k	عدد پرانتل
G_k	تولید انرژی جنبشی توربولانس
ϵ	نرخ آشفتگی
\vec{r}	بردار مکان