

## بررسی عددی اثر نوع سوخت بر انتشار ناکس در محفظه احتراق توربین گاز

محمد شفیعی دهج<sup>۱</sup>، علیرضا جلالی<sup>۲\*</sup>، مهدی رزانی<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان، mshafiey@vru.ac.ir

۲- استادیار، مهندسی هوافضا، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، a.r.jalali84@gmail.com

۳- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان، m.razani5311@gmail.com

\* نویسنده مخاطب

### چکیده

در این پژوهش به بررسی عددی احتراق سه نوع سوخت متان، بوتان و Jet A در محفظه احتراق توربین گازی در نرم افزار ANSYS CFX با مدل K-ε پرداخته شده است. سه فاکتور توزیع دما، توزیع سرعت و آلاینده NO<sub>x</sub> به منظور درک پدیده احتراق و انتشار گاز آلاینده ناکس مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که سرعت در مرکز محفظه احتراق در سوخت متان افت بیشتری نسبت به دو سوخت دیگر داشته و تمرکز شعله سوخت متان در ناحیه مرکزی محفظه احتراق نسبت به دو سوخت دیگر بیشتر بوده، همین طول و تمرکز شعله در سوخت متان باعث تولید آلاینده ناکس بیشتری شده در حالی که سوخت Jet A به دلیل عدم توزیع دما و گسترش شعله در محفظه احتراق نسبت به سوخت دیگر تولید آلاینده ناکس کمتری دارد. اما در بررسی میزان آلاینده منوکسیدکربن (CO) مقدار آلاینده تولید شده در سوخت Jet A به دلیل وجود نواحی دما پایین که به علت اختلاط غیرهمگن ایجاد می‌گردد نسبت به دو سوخت دیگر بیشتر شده است. نتایج بدست آمده از حل عددی با نتایج مرجع مقایسه شده و تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** محفظه احتراق، آلاینده ناکس، حل عددی، توربین گاز، توزیع دما

### مقدمه

در این برهه از زندگی بشر مباحثی چون الودگی هوا و گرم شدن کره زمین دغدغه‌ای برای زندگی بشر شده و محققان همواره در صدد یافتن چاره‌ای برای رفع این معضل بوده‌اند. حل عددی در بین محققان جایگاه ویژه‌ای برای مطالعه و بررسی انواع سوخت‌ها و تعیین میزان آلاینده‌های آنها بر محیط زیست داشته است. محفظه احتراق توربین گازی را می‌توان محیطی مناسب برای بررسی فرایندهای فیزیکی و شیمیایی سوخت‌های مختلف مورد استفاده قرار داد. نیکول پاتل و همکاران [۱] در یک بررسی عددی احتراق مخلوط هوا متان در اتاق احتراق توربین گازی، پارامترهای مختلفی از قبیل نسبت سوخت به هوا، زاویه چرخش ورودی هوای اولیه، و موقعیت محوری سوراخ‌های رقیق سازی را برای بررسی تأثیر این پارامترها بر عملکرد و احتراق محفظه احتراق مورد مطالعه قرار دادند. اف‌دی ماری و دوستان [۲] به شبیه‌سازی گردابی بزرگ (LES) برای پیش‌بینی دما و غلظت گونه‌ها در یک مدل پرداخته‌اند. زهیر صبحوحی و فتح‌الله امی [۳] بر طراحی مفهومی محفظه احتراق موتورهای هوایی متعارف متمرکز شده‌اند. روابط تحلیلی و تجربی پرکاربردترین ابزار طراحی محفظه احتراق است. لغبور و التور مک‌گورک و پالما [۴] آزمایش‌هایی برای جریان در داخل یک احتراق توربین گازی با دو هدف اصلی افزایش درک نوع جریان و تهیه داده‌های تجربی برای کمک به توسعه مدل‌های ریاضی انجام دادند. جعفر و همکاران الگوی جریان را در یک محفظه احتراق توربین گازی با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی و آزمایش مورد بررسی قرار داده‌اند. محمد مقیمان و همکاران [۵] تأثیر دمای گاز ورودی بر میزان دوده، دمای شعله و راندمان کلی دیگ بخار ۱۲۰ کیلووات را مورد بررسی قرار دادند. مندل و همکارانش [۶] پیش‌گرمایش هوا را بر میزان تشکیل دوده و انتشار NO<sub>x</sub> در شعله ارام سوخت متان مورد بررسی قرار دادند. یوان تاو چن و جیمزاف

مدل چند محفظه‌ای برای ناپایداری‌های احتراق در یک توربین گازی را استفاده کردند. از مدل پیشنهادی برای توضیح وابستگی فرکانس ناپایداری به هندسه مشعل و سایر پارامترهای جریان استفاده شده است. سوکولوف و همکاران [۷] مطالعه یک مدل ریاضی برای توصیف جریان چرخش متقارن همراه با احتراق و انتشار آلاینده‌ها را بر اساس حل عددی معادله رینولدز با مدل توربولانسی k-ω را انجام دادند. نتایج تحقیقات عددی و تجربی از خصوصیات جریان، انتقال حرارت و انتقال جرم، احتراق و تشکیل NO<sub>x</sub> در یک احتراق حلقوی با جت‌های هوایی متورم را ارائه کردند. یانگ و همکارانش با پیش‌گرمکن هوا به مطالعه اثرات پیش‌گرمایش سوخت ورودی (گاز پروپان) بر دمای ماکزیمم شعله و انتشار آلاینده NO<sub>x</sub> برای مقادیر مختلف اکسیژن ورودی پرداختند. جواد و مقیمیان [۸] به مطالعه آزمایشگاهی اثر افزایش دمای سوخت بر درخشندگی شعله و انتشار آلاینده NO<sub>x</sub> در بویلر صنعتی پرداختند. کریشنا و گانسان [۹] تجزیه و تحلیل CFD جریان از طریق الگوریتم پرندگان را انجام دادند. لی و دیگر همکاران یک روش جدید برای پیش‌بینی انتشار NO<sub>x</sub> در طراحی احتراق اولیه توربین گازی را ارائه کردند. کانیش [۱۰] یک مدل شبکه راکتور برای پیش‌بینی انتشار NO<sub>x</sub> در توربین‌های گازی را مورد بررسی قرار دادند. با توجه به مطالب ذکر شده و اهمیت بررسی میزان تولید آلاینده NO<sub>x</sub> در انواع سوخت‌ها و تأثیر آنها بر محیط زیست، در این پژوهش به بررسی عددی احتراق سه نوع سوخت متان، بوتان و Jet A در محفظه احتراق توربین گازی پرداخته شده است. لذا سه فاکتور توزیع دما، توزیع سرعت و آلاینده NO<sub>x</sub> به منظور درک پدیده احتراق و انتشار گاز آلاینده ناکس مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین نتایج حل عددی با نتایج تجربی موجود مقایسه می‌شود.

### هندسه مساله

شکل (۱) هندسه ترسیم شده برای یک محفظه احتراق توربین گازی را نشان می‌دهد. برای تجزیه و تحلیل احتراق، پیش‌بینی توزیع دما، توزیع سرعت و میزان انتشار آلاینده ناکس از نرم‌افزار cfx استفاده شده است. میزان اشغافتگی ۱۰٪ و هوای ورودی به محفظه احتراق با درجه حرارت ۳۰۰K توسط مجراهای شکل دهنده جریان هدایت می‌شود تا یک زاویه چرخشی به هوای ورودی داده شود. شعاع تزریق کننده هوای اولیه ۵۰ میلی‌متر است. هوای ورودی به محفظه احتراق در دو حالت اولیه و ثانویه صورت می‌گیرد. که هوای ورودی اولیه با سرعت ۱۰ m/s و هوای ثانویه که از طریق شش مجرای ورودی جانبی که روی محفظه احتراق تعبیه شده با سرعت ۶ m/s و سوخت مورد نیاز از طریق هفت مجرای پاشش با سرعت ۰/۰۰۱ kg/s در جریان هوای ورودی پاشش می‌شود. در این بررسی تولید شبکه که در شکل (۲) نشان داده شده است به صورت اتوماتیک در workbench-mesh با میزان ۹۳۹۷۰۲ سلول و ۱۷۹۳۴۵ گره انجام شده که سلول‌ها به شکل سه ضلعی می‌باشند.

مدل K-ε در جریانهای اغتشاشی به عنوان یک مدل استاندارد در دینامیک سیالات محاسباتی شناخته است. که به سبب پایین بودن هزینه محاسبات از این مدل دو معادله ای برای حل این مسئله استفاده شده است. که این مدل استاندارد توسط معادله نیم تجربی زیر بدست می آید.

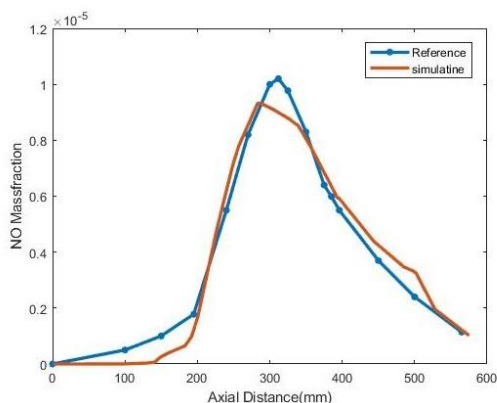
$$\frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j k_{,j} = \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} k_{,j} \right)_{,j} + G + B - \rho \epsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho u_j \epsilon_{,j} = \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \epsilon_{,j} \right)_{,j} + C_1 \frac{\epsilon}{k} G \quad (8)$$

$$+ C_1(1 - C_3) \frac{\epsilon}{k} B - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

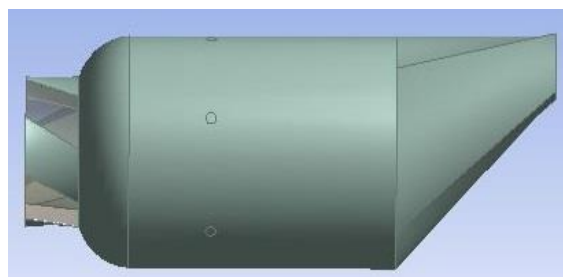
### نتایج

به منظور اعتبارسنجی نتایج مورد بررسی حاصل از شبیه سازی عددی در این مقاله با نتایج مرجع [۱] مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد که مقادیر آلاینده ناکس (NOx) بدست آمده از حل عددی با نتایج مرجع تطابق خوبی دارند که شکل (۳) این توضیح را تایید می کند.

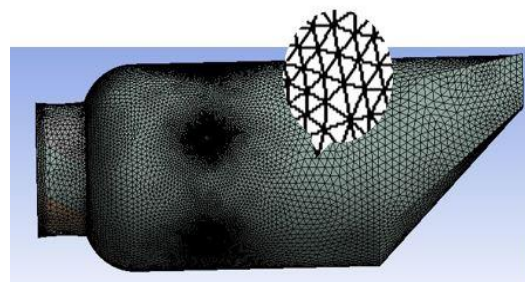


شکل ۳: مقایسه مقادیر NO در محور محفظه احتراق توربین گازی

در سیستم های احتراقی توربین گازی هوا از طریق حفره های اولیه و ثانویه به داخل هدایت می شود این جریانها موجب ایجاد گردابه های اجباری (شکل ۴) می شود. در این گردابه ها افت سرعت خیلی زیاد می باشد. سرعت هوا کمتر از سرعت شعله می رسد که می توان عمل احتراق را با تزریق سوخت به چشمه گردابه آغاز نمود. همچنین میتوان میزان اشفتگی در محور اصلی را افزایش داد که خود موجب پایداری شعله و آزاد شدن گرمای بیشتری در بخش اصلی توربین می شود. همانطور که در شکل (۵) مشاهده می گردد کانتور توزیع دما در مشعل با دمای هوای ورودی 300K، و نسبت اختلاط سوخت و هوای یکسان برای هر سه نوع سوخت متان، بوتان و Jet A آورده شده است.



شکل ۱: شماتیک هندسه ی محفظه احتراق در توربین گازی



شکل ۲: شماتیک سلول با آرایه سه ضلعی

### معادلات

معادلات حاکم برای بررسی احتراق سه نوع سوخت یاد شده در محفظه احتراق توربین گازی عبارتند از معادلات بقای جرم و بقای انرژی و ممنتوم می باشد.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

معادله انرژی برای حل جریان های داخل احتراقی به شرح زیر می باشد.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i (PE + P)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ K_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j j_{j+u_j} (\tau_{ij})_{eff} \right] + S_h \quad (3)$$

که E انرژی کل و h انتالپی است و j شارپخش، K<sub>eff</sub> رسانش گرمای موثر و Sh هم منبع حرارتی حاصل از واکنش شیمیایی را بیان می کند که مقدار انرژی کل و انتالپی از رابطه زیر بدست می آید.

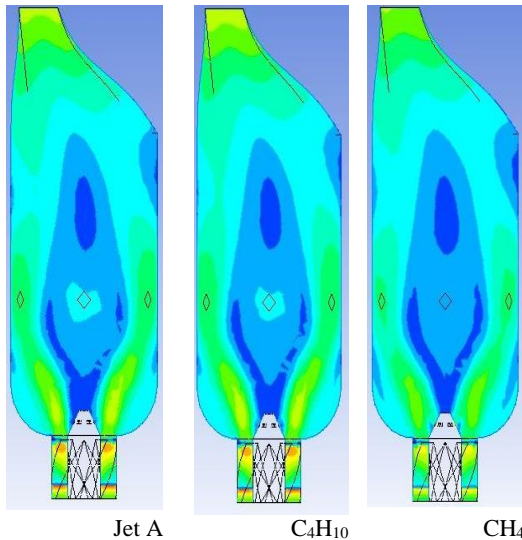
$$E = h - \frac{P}{\rho} + \frac{u_i^2}{2} \quad (4)$$

$$h = \sum_j m_j h_j \quad (5)$$

Sh در معادله انرژی مجموع حاصل تشعش و احتراق است که بخش مربوط احتراق به شرح زیر است.

$$S_{h, reaction} = \sum_j \left[ \frac{h_j}{M_j} + \int_{T_{ref}}^{T_{ref}} C_{p,j} dT \right] R_j \quad (6)$$

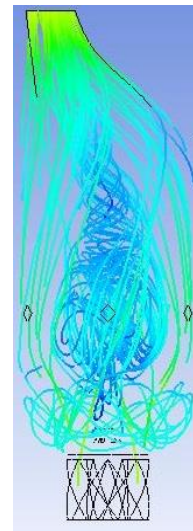
با توجه به شکل (۶) که توزیع سرعت برای هر سه نوع سوخت متان، بوتان و Jet A نشان داده شده است سرعت سیال در ابتدای ورود به مشعل زیاد بوده و پس از وارد شدن با افزایش سطح مقطع عبوری جریان، سرعت کاهش می یابد و در قسمتی که سطح کاهش می یابد سرعت شروع به افزایش می کند و تا به خروجی مشعل که با رنگ مشخص شده است به حداکثر مقدار خود می رسد و هم چنین دیده می شود در گوشه ها به دلیل ایجاد جدایش جریان و گردابه فشار نیز افزایش یافته است که برای سوخت متان افت فشار در مرکز محفظه احتراق با مقدار بیشتر نسبت به دو سوخت دیگر، در حالی که سرعت در کناره ها و در امتداد محفظه کمتر نسبت به سوخت بوتان و Jet A حاصل شده است. این کاهش سرعت هوا در محفظه احتراق سبب شده تا فرایند احتراق و عمل سوختن به خوبی صورت بگیرد.



شکل ۶: توزیع سرعت در امتداد محفظه احتراق توربین گازی

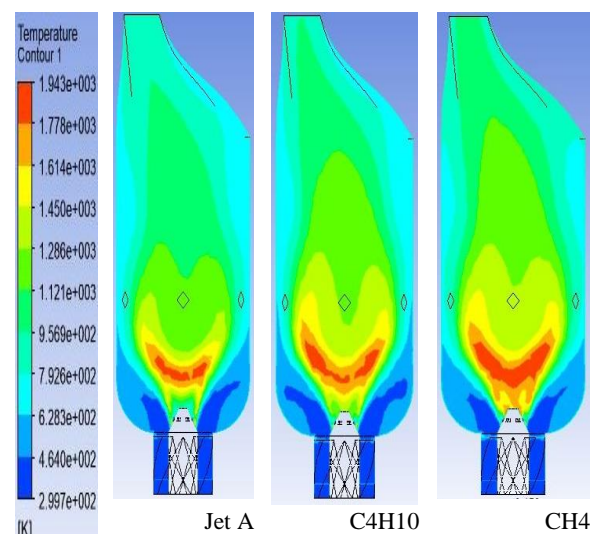
میزان انتشار ایندگی  $NO_x$  مستقیماً مربوط به دماست هرچه میزان تمرکز شعله و دمای خروجی محفظه احتراق بیشتر باشد میزان  $NO_x$  بیشتر خواهد بود. همانگونه که در شکل (۷) مشاهده می شود مخلوط سوخت و هوا متان به دلیل چرخش نسبت به شعاع محفظه و تمرکز جرمی سوخت و هوا، توزیع دما یکنواخت در طول محفظه احتراق ایجاد می گردد این امر باعث می شود تا دمای داخل شعله افزایش یابد و نرخ تشکیل آلایند  $NO_x$  نیز بیشتر شود. همانگونه که در شکل مشاهده می شود توزیع دما در سوخت متان بهتر از سوخت های بوتان و Jet A می باشد. میزان آلایند  $NO_x$  در سوخت بوتان به دلیل کاهش دما در مرکزیت شعله و کمتر شدن زمان اقامت شعله در مرکز محفظه احتراق کاهش می یابد. سوخت Jet A به دلیل عدم توزیع دما و گسترش شعله در محفظه احتراق نسبت به دو سوخت دیگر تولید آلایند  $NO_x$  کمتری دارد. نتایج میزان انتشار آلایند  $NO_x$  حاصل از بررسی سه سوخت به طور کلی در جدول (۱) ذکر شده و همچنین شکل (۸) میزان انتشار آلایند  $NO_x$  در خط مرکزی محفظه احتراق را نشان می دهد.

شکل (۹) بررسی آلایند منوکسیدکربن (CO) در سه سوخت ذکر شده را نشان می دهد. منوکسیدکربن به دلیل میل به واکنش زیادی که کربن با اکسیژن دارد بسیار خطرناک است و از احتراق ناقص کربن به دلیل کاهش میزان اکسیژن در هنگام سوختن به وجود می آید با توجه به مطالب ذکر شده سرعت در گردابه ها کاهش میابد و عمل اختلاط سوخت و هوا به خوبی صورت میگیرد و این باعث کامل شدن عمل سوختن می شود. گردابه ها در مرکز محفظه احتراق صورت می گیرد در حالی که سرعت در ابتدای ورودی



شکل ۴: گردابه های حاصل عبور هوای ورودی از تیغه های شکل دهنده

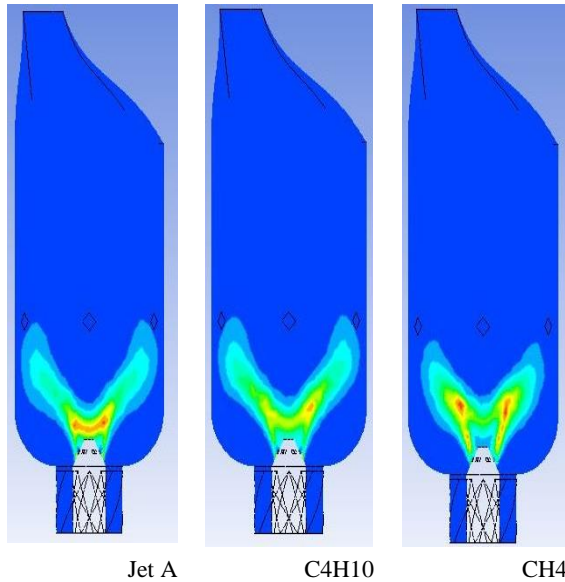
برای سوخت متان ( $CH_4$ ) با توجه به زیاد بودن ناحیه قرمز در شکل نشان می دهد که در قسمت بیشتتری از مشعل دما بالا است. بیشتترین دما در نزدیکی نازل سوخت مشاهده می شود. با افزایش فاصله از نازل ورودی، دما به سرعت افزایش می یابد با ادامه فاصله گرفتن از نازل ورودی دما شروع به کاهش می کند این روند به آرامی تا خروجی محفظه احتراق ادامه می یابد در حالی که دمای ناحیه قرمز در سوخت متان ( $1883 K$ ) می باشد. که در مقایسه با دو نوع سوخت دیگر بوتان با دمای ( $1943 K$ ) و سوخت Jet A با دما ( $1906 K$ ) کمتر است. اما این اتفاق به دلیل اینکه دمای هوای ورودی برای عمل پیش گرم کردن در این نوع سوخت به خوبی ظاهر شده احتراق به خوبی صورت گرفته و سبب افزایش گسترش شعله در قسمت میانی مشعل شده است. برای سوخت بوتان ( $C_4H_{10}$ ) با توجه به دمای بالای اولیه نسبت به دو سوخت دیگر تمرکز شعله در قسمت میانی مشعل کمتر از سوخت متان می باشد. در سوخت Jet A انتشار شعله به دلیل اینکه دمای هوای ورودی برای اختلاط سوخت و هوا برای این نوع سوخت پایین می باشد. بخش زیاد انرژی از دمای بالا ابتدای احتراق برای افزایش دمای مخلوط سوخت و هوا استفاده می شود و این امر سبب می شود نسبت به دو سوخت دیگر دمای کمتری در مشعل توزیع شود.



شکل ۵: توزیع دما در محفظه احتراق توربین گازی با دمای یکسان در سوخت های متان، بوتان و Jet A

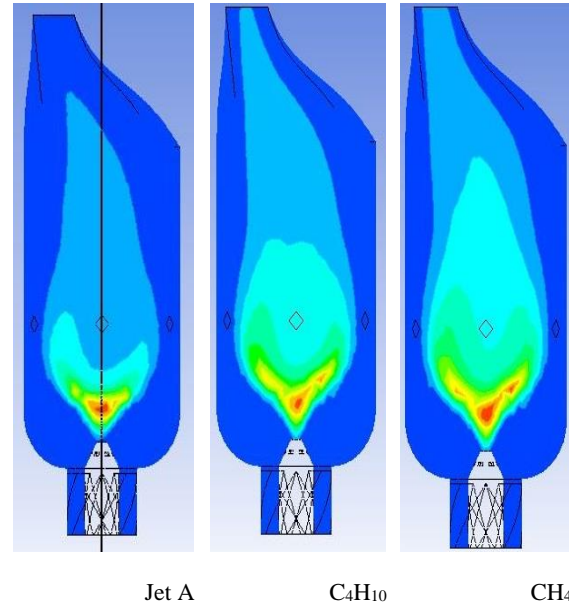
جدول ۱: مقادیر الاینده  $\text{CO}$  و  $\text{NO}_x$  در سوخت های مختلف در دمای ورودی K ۳۰۰

ردیف	نوع سوخت	مقدار $\text{CO}$	مقدار $\text{NO}_x$
۱	متان	$1/635e-002$	$0/95e-6$
۲	بوتان	$1/654e-002$	$0/83e-6$
۳	Jet A	$1/741e-002$	$0/56e-6$



شکل ۹: توزیع الاینده  $\text{CO}$  در محفظه احتراق توربین گازی با سوخت های متان، بوتان و Jet A

محفظه احتراق به سمت دیواره ها زیاد است. عمل اختلاط به دلیل سرعت زیاد به خوبی صورت نمی گیرد و باعث احتراق ناقص و تولید  $\text{CO}$  می شود با افزایش فاصله از ابتدای شروع احتراق میزان  $\text{CO}$  کاهش میابد. در حالت کلی منبع تولید  $\text{CO}$  در نواحی ابتدایی احتراق در محفظه احتراق توربین گازی وجود نواحی دما بالاست که به علت اختلاط غیر همگن ایجاد می گردد بیشترین میزان انتشار الاینده  $\text{CO}$  در سوخت Jet A با میزان انتشار الاینده ذکر شده در جدول (۱) نسبت به دو سوخت دیگر می باشد.



شکل ۷: توزیع الاینده  $\text{NO}_x$  در محفظه احتراق توربین گازی با سوخت های متان، بوتان و Jet A

### نتیجه گیری

در این پژوهش یک محفظه احتراق توربین گازی به منظور بررسی سه نوع سوخت متان، بوتان و Jet A در سه پارامتر توزیع دما، توزیع سرعت و انتشار الاینده ناکس شبیه سازی شده است که نتایج حاصل از آن عبارتند از:

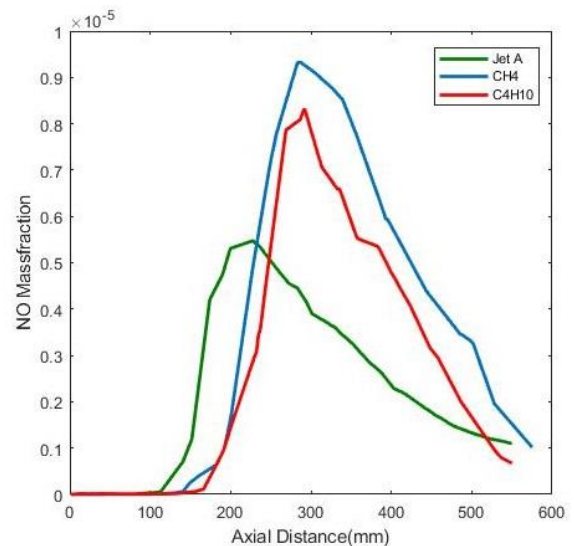
۱- عبور هوای ورودی از مجراهای شکل دهنده جریان به دلیل پاشش سوخت در مسیر هوای ورودی سبب افشاندن کامل سوخت می شود نتیجه آن اختلاط کامل سوخت و هوا و نیز احتراق آن در درجه حرارت بالا در بخش اولیه محفظه احتراق شده است.

۲- میزان ناکس تولیدی به دلیل چرخشی بودن مخلوط سوخت و هوا نسبت به شعاع محفظه احتراق در سوخت متان بیشتر از دو نوع سوخت دیگر است. سوخت Jet A به دلیل عدم توزیع دما و گسترش شعله در محفظه احتراق نسبت به دو سوخت دیگر تولید الاینده  $\text{NO}_x$  کمتری دارد.

۳- در دمای مورد بررسی سوخت متان با ارزش حرارتی بالاتری نسبت به سوخت بوتان و Jet A ظاهر شده که شکل (۵) بیانگر این موضوع می باشد.

۴- کاهش سرعت هوا در محفظه احتراق توربین گازی موجب شده تا فرایند احتراق و عمل سوختن به خوبی صورت بگیرد که سرعت جریان ورودی هوا سبب افت بیشتری در مرکز محفظه احتراق در سوخت متان نسبت به سوخت بوتان و Jet A شده است. حتی سرعت در کناره ها در امتداد محفظه احتراق کمتر نسبت به دو سوخت دیگر حاصل شده است. که این خود سبب کامل شدن احتراق در سوخت متان شده است.

۵- در حالت کلی منبع تولید  $\text{CO}$  در نواحی ابتدایی احتراق وجود نواحی دما بالاست که به علت اختلاط غیر همگن ایجاد می شود که بیشترین میزان مربوط سوخت Jet A نسبت به دو سوخت دیگر می باشد.



شکل ۸: اثر تغییرات سوخت بر میزان انتشار الاینده  $\text{NO}$  در خط مرکزی محفظه احتراق

9- Mandal, B. K., Sarkar, A., & Datta, A. (2006). Numerical prediction of the soot and NO formation in a confined laminar diffusion flame without and with air preheat. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 220(5), 473-486.

10- Chen, Y., & Driscoll, J. F. (2016). A multi-chamber model of combustion instabilities and its assessment using kilohertz laser diagnostics in a gas turbine model combustor. Combustion and Flame, 174, 120-137.

### فهرست علائم

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$	ضرایب ثابت معادله $\varepsilon$
$CP, j\phi$	گرمای ویژه نمونه گرمی ژام
$E$	انرژی کل
$h$	انتالپی
$h_{j\phi}$	انتالپی نمونه های گرمی
$jz\phi$	ام زفلاکس دیفیوژن نمونه گرمی
$K_{eff}$	ضریب پخش گرمای موثر
$k$	انرژی جنبشی
$\varepsilon$	نرخ استهلاک انرژی جنبشی
$\rho$	چگالی
$M$	ویسکوزیته
$\Sigma$	ثابت استغنا بولترمن
$T_{ij}$	تنش برشی
$Eff$	تنش برشی موثر
$Sh, reaction$	سهام احتراق در معادله انرژی
$m_{j\phi}$	کسر گرمی نمونه گرمی ژام
$R_{j\phi}$	نرخ تولید یا مصرف نمونه گرمی ژام
$P$	فشار (bar)
$U_j$	مولفه ژام سرعت
$T$	زمان (s)
$T$	دما (k)
$PE$	انرژی پتانسیل

### مراجع

- 1- Pathan, H., Partel, K., & Tadvi, V. (2012). Numerical investigation of the combustion of methane air mixture in gas turbine can-type combustion chamber. International Journal of Scientific & Engineering Research, 3(10), 1-7.
- 2- Di Mare, F., Jones, W. P., & Menzies, K. R. (2004). Large eddy simulation of a model gas turbine combustor. Combustion and Flame, 137(3), 278-294.
- 3- Ommi, F., & Saboohi, Z. (2017). Conceptual Design of Conventional Gas Turbine Combustors Aiming at Pollutants Emission Prediction. Modares Mechanical Engineering, 16(10), 429-440.
- 4- A. Mellor, Design of Modern Turbine Combustors, pp. 343-476, San Diego:Academic Press, 1990
- 5- Lefebvre, A. H. (1998). Gas turbine combustion. CRC press.
- 6- Jaafar, M. M., Jusoff, K., Osman, M. S., & Ishak, M. S. A. (2011). Combustor aerodynamic using radial swirler. International Journal of Physical Sciences, 6(13), 3091-3098.
- 7- Koutmos, P., & McGuirk, J. J. (1989). Investigation of swirler/dilution jet flow split on primary zone flow patterns in a water model can-type combustor.
- 8- Jalilimehr, M., Moghiman, M., & Niazmand, H. (2017). Numerical and experimental study of natural gas preheating effects on the soot formation, flame luminosity and NO emission. Journal of Solid and Fluid Mechanics, 7(1), 79-90.