

تأثیر جریان هوای ورودی نوسانی بر توزیع دما و اکسیدهای نیتروژن احتراق آشفته متان-هوا

یاسر طاهری

دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

مهران رجبی زرگرآبادی*

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

در این مطالعه تحلیل عددی اثر ورودی هوای سینوسی بر مشخصه های احتراق آشفته مخلوط متان-هوا مورد بررسی قرار گرفته است. گام زمانی در تحلیل عددی برابر یک هشتم زمان چرخه کامل نوسان در نظر گرفته شده است نتایج حاصل از ورودی هوای نوسانی در سه فرکانس ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ هرتز با ورودی هوای پایا مقایسه شده است. روش تابع چگالی احتمال (PDF) برای تخمین برهم کنش آشفته و احتراق بکار گرفته شده و برای پیش بینی رفتار آشفته گی جریان از روش $k-\epsilon$ استاندارد استفاده شده است. برای پیش بینی اکسیدهای نیتروژن حاصل از احتراق، از مکانیزم توسعه یافته زلدوویچ استفاده شده است. در این تحقیق نتایج شبیه سازی عددی در حالت پایا مطابقت قابل قبولی با داده های تجربی دارد. نتایج این تحقیق نشان می دهد که ورودی هوای نوسانی بر اختلاط سوخت و هوا و توزیع کسر مخلوط در محفظه تأثیر قابل توجهی دارد. همچنین استفاده از ورودی هوای نوسانی منجر به افزایش دما و در نتیجه افزایش میزان اکسیدهای نیتروژن در محفظه احتراق خواهد شد.

واژه های کلیدی: آشفته گی، تابع چگالی احتمال، اکسیدهای نیتروژن، ورودی هوای نوسانی.

The Effect of Oscillating Inlet Air on Temperature Distribution and NO_x in Turbulent CH₄-Air Combustion.

Y. Taheri

Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

M. Rajabi Zargarabadi

Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Abstract

In this study a two-dimensional combustion chamber was simulated to investigate the effect of oscillating inlet air in turbulent Methane-Air diffusion flame. In this study, the velocity of inlet air to combustion chamber was oscillated in form of sinusoidal with amplitude about half of the inlet velocity in steady state and 20 Hz frequencies. The time step in numerical analysis was considered as 1/8 time in per cycle. According to considered frequency, the time step was 0.00625s and the results was investigated after 100 and 200 complete cycles. The PDF model was used for estimate the turbulence-combustion interaction and the turbulent behavior of streams is predicted via the standard $k-\epsilon$ model. The modeling of thermal formation of NO_x was adopted the extended Zeldovich mechanism. The temperature distribution from PDF model has a better agreement with experimental results than Eddy dissipation model. Also the results show that using of oscillating inlet air, in addition to increasing temperature, will cause increasing in NO_x from the combustion and changing of the frequency to 50 and 100 Hz have an insignificant effects on temperature distributions.

Keywords: Turbulence, Probability density function, NO_x, Oscillating inlet air.

در زمینه مدل سازی احتراق آشفته، روش های رایج از قبیل معادلات متوسط گیری شده رینولدزی علاوه بر دقت پایین، تنها در گستره خاصی از مسایل احتراقی قابل استفاده می باشند. مشکل اصلی در این روش ها، مدل سازی جمله نرخ واکنش شیمیایی متوسط گیری شده است. در روش تابع چگالی احتمال (PDF) که بر اساس توصیف آماری آشفته گی گسترش یافته است، میزان قابل توجهی از مشکل مدل سازی غیر دقیق کاسته می شود. به این ترتیب که جملات چشمه ناشی از واکنش های شیمیایی در معادلات متوسط گیری شده بر خلاف روش های متداول متوسط گیری شده، نیاز به مدل سازی نداشته و بطور دقیق منظور می شوند.

در طی سالیان گذشته مطالعات محدودی در زمینه بررسی اثرات نوسانی سرعت بر روی پایداری شعله مخصوصاً شعله های پیش آمیخته صورت پذیرفته است. Fleifil و همکاران [۱] یک مدل تحلیلی بمنظور توصیف پاسخ دینامیکی یک شعله لایه ای پیش آمیخته و پایا در کناره

۱- مقدمه

احتراق سوخت های فسیلی همواره آلاینده هایی نظیر منواکسید کربن و اکسید نیتروژن را به همراه داشته است. ماهیت پیچیده آشفته گی در تعامل با واکنش های شیمیایی سبب می شود که احتراق آشفته به یکی از پیچیده ترین مباحث مکانیک سیالات تبدیل شود. معادلات حاکم برای توصیف احتراق آشفته و به طور کلی جریان های آشفته را می توان در دو گروه دسته بندی کرد. در گروه اول، همه یا قسمتی از مقیاس های جریان به طور دقیق حل می شود. روش های شبیه سازی عددی دقیق و شبیه سازی گردابه های بزرگ در این گروه قرار دارند. در گروه دوم که "مدلسازی" نامیده می شود، همه مقیاس های جریان مدل سازی می شود که شامل روش های مبتنی بر متوسط گیری معادلات جریان و روش های تابع چگالی احتمال هستند.

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: rajabi@semnan.ac.ir

لوله به نوسان سرعت ارائه نمودند. نتایج مدل آن‌ها نشان داد که مقدار آشفتنگی گرمای آزاد شده و فاز مربوط به آشفتنگی دینامیکی مقدماتاً به عدد استروهال، یعنی نسبت فرکانس غالب در شعاع لوله به سرعت سوختن لایه‌ای، بستگی دارد. همچنین بیان نمودند که آشفتنگی فرکانس بالا از شعله عبور می‌کند، در حالیکه فرکانس‌های پایین منجر به یک پاسخ قوی می‌گردد. Chaparro و Cetegen [۲] در یک مطالعه تجربی خصوصیات Blowoff شعله‌های پیش‌آمیخته مخروطی برای سه شکل متفاوت نگهدارنده شعله و با در نظر گرفتن نوسان سرعت بالادست انجام دادند. سرعت جریان بصورت سینوسی در فرکانس‌های تا ۴۰۰ هرتز و با دامنه ۰/۰۸ نوسانی گردید. آن‌ها دریافتند که نسبت تعادل، یک وابستگی به فرکانس نوسان جریان از خود نشان می‌دهد و این موضوع را برای هر سه نوع نگهدارنده شعله بررسی نمودند. Chaudhuri و Cetegen [۳] یک مطالعه تجربی برای تعیین نسبت‌های تعادل Blowoff برای شعله‌های مخروطی پیش‌آمیخته غنی در محدوده سرعت‌های بین ۵ تا ۱۶ متر بر ثانیه با دامنه‌ای برابر با ۹ درصد سرعت متوسط جریان تا فرکانس ۳۵۰ هرتز و در حضور گرادیان‌های فضایی مخلوط (سه توزیع فضایی مخلوط متفاوت در نظر گرفته شده است که عبارتند از: ۱) مخلوط سوخت/هوا (یکنواخت ۲) غلظت بالاتر سوخت در جریان ورودی ۳) غلظت بالاتر سوخت در جریان خروجی) و مدولاسیون سرعت بالادست جریان ارائه نمودند. آن‌ها دریافتند که برای نسبت‌های تعادل داخلی جت بالاتر، Blowoff شعله پیش از باریک‌شدن تدریجی مخروط شعله حاصل می‌گردد.

نرخ تولید NO و ضخامت شعله در ابتدا در سال ۱۹۸۱ توسط Hahn و Wendt برای شعله جت متان غیرپیش‌آمیخته و در حالت لایه‌ای بررسی و مورد آزمایش قرار گرفت. آن‌ها پیش‌بینی کردند که نرخ تولید NO بصورت تابعی از امتداد شعله است [۴]. در دهه‌های بعد با توجه به پیشرفت قابل ملاحظه تکنولوژی و قدرت محاسباتی، تلاش‌های فراوانی برای پیش‌بینی دقیق‌تر نرخ‌های تولید NO در شعله‌های غیرپیش‌آمیخته صورت پذیرفت. Räkke و همکاران عبارات صریح ساده‌شده‌ای را برای نرخ‌های تولید NO لحظه‌ای و موضعی ارائه نمودند [۵]. Chen و Chang تشکیل NO در یک شعله آشفته جت غیرپیش‌آمیخته با استفاده از دیدگاه تابع چگالی احتمال (PDF) اسکالر الحاقی و مدل بدون شعله متداول در سال ۱۹۹۶ مدل نمودند [۶]. آن‌ها بطور واضح اثبات نمودند که اتلاف حرارتی تشعشعی بطور قابل ملاحظه‌ای در پیش‌بینی NO در میدان دوردست دارای اهمیت می‌باشد و این روش می‌تواند با کاهش مقادیر پیش‌بینی‌شده منجر به مطابقت بهتری با داده‌های تجربی گردد. دیدگاه مشابهی برای ارائه روش محاسباتی جدید بمنظور توانایی پیش‌بینی شاخص انتشار شعله‌های غیرپیش‌آمیخته آشفته توسط Yamashita و همکاران مورد استفاده قرار گرفت [۷]. مدل جدید دیگری در سال ۱۹۹۹ برای پیش‌بینی احتراق گازی پیش‌آمیخته غیر آدیباتیک آشفته تحت شرایط توربین گاز توسط Kok و همکاران ارائه گردید [۸]. زمانیکه مدل آن‌ها با نتایج اندازه‌گیری‌شده انتشار NOx و CO مقایسه گردید، مطابقت خوبی نشان داد.

مکانیزم تولید NOx در شعله‌های آشفته توسط Yamashita در سال ۲۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفت. Yamashita با بکارگیری شبیه-

سازی عددی مستقیم برای شعله پخش جت سوخت دو بعدی توانست اثبات کند که تشکیل NOx در حوزه جریان آشفته دارای مکانیزمی مشابه تشکیل NOx در شعله پخش لایه‌ای غیرپایدار می‌باشد [۹]. تحقیقات متعددی در مورد تشکیل NOx در رژیم‌های متفاوت احتراق در سال‌های اندک بررسی گردید [۱۰-۱۸]. اکثریت کارهای صورت گرفته در شبیه‌سازی عددی پیش‌بینی NOx در شعله‌های گازی توسط Lopez-Parra و Turan منتشر گردید [۱۹-۲۱]. آن‌ها از دیدگاه‌های عددی متعددی برای مدل نمودن تشکیل حرارتی NOx، تشکیل سریع NOx و نرخ‌های سوختن مجدد آن‌ها در شعله‌های پخش گوناگون استفاده نمودند.

در این مطالعه از روش PDF استفاده شده است تا نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نسبت به داده‌های تجربی ارائه شده، مطابقت بهتری از خود نشان دهد. همچنین هدف اصلی در این تحقیق بررسی اثرات یک ورودی هوای سینوسی بر توزیع دمایی و اکسیدهای نیتروژن حاصل از احتراق یک شعله پخش آشفته غیر پیش‌آمیخته متان-هوا می‌باشد که تاکنون در این خصوص مطالعاتی صورت نگرفته است. در این بررسی، سرعت ورودی هوا به محفظه احتراق به صورت سینوسی با دامنه‌ای در حدود نصف سرعت ورودی در حالت یکنواخت و فرکانسی برابر با ۲۰ هرتز نوسانی شده است. $[v = 0.5076 + A * \sin(\omega * t)]$ گام زمانی در تحلیل عددی بصورت یک هشتم زمان در هر چرخه در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن فرکانس ۲۰ هرتز، گام زمانی ۰/۰۰۶۲۵ ثانیه بدست می‌آید و نتایج پس از گذشت ۱۰۰ چرخه کامل (۵ ثانیه) و ۲۰۰ چرخه کامل (۱۰ ثانیه) مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- هندسه و شرایط مرزی

نمای دو بعدی از هندسه مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است. در ابتدا هندسه بصورت سه بعدی مورد بررسی قرار گرفته و نمایی از این شبکه‌بندی سه بعدی نیز در شکل ۲-الف نشان داده شده است. اما از آنجاییکه تفاوت آشکاری میان نتایج راه‌حل دو و سه بعدی (شکل ۳) وجود نداشته و از سوی دیگر هندسه و نتایج ارائه شده در مقالات مرجع [۲۲-۲۳] نیز بصورت دو بعدی نشان داده شده است، از اینرو هندسه خود را نیز بصورت دو بعدی ارائه می‌نماییم. متان از طریق نازلی با قطر ۴ میلی‌متر به فضای مورد نظر پاشیده می‌شود. نرخ جریان جرمی متان و هوا ثابت و به ترتیب برابرند با $1/72 \times 10^{-4}$ kg/s و 118×10^{-4} kg/s [۲۳]. شدت آشفتنگی جریان هوا ۲۰٪ و جریان سوخت ۱۰٪ در نظر گرفته شده است.

۳- حل عددی

در شبیه‌سازی عددی تحقیق حاضر برای حل معادلات حاکم بر جریان، انتقال گرما و واکنش‌های شیمیایی از نرم‌افزار Fluent استفاده شده است. کوپلینگ فشار و سرعت با الگوریتم SIMPLE انجام شده است. برای مدل‌سازی شکل ۱ در نرم‌افزار Fluent، ابتدا هندسه مورد نظر را شبکه‌بندی نموده و با توجه به تقارن شکل مورد نظر نیمه بالایی هندسه را برای شبکه‌بندی مدنظر قرار می‌دهیم. با انجام حالت‌های مختلف شبکه‌بندی بهترین وضعیت شبکه‌بندی را بصورت ۵۰ نقطه بر

- معادله مومنتم:

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial (\bar{\tau}_{ij} + \bar{\tau}_{ij})}{\partial x_j} \quad (3)$$

که $\bar{\tau}_{ij}$ و $\bar{\tau}_{ij}$ به ترتیب لزجت متوسط و تانسورهای تنش رینولدز می-باشند و بصورت زیر تعریف می-شوند:

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left[\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] \quad (4)$$

$$\bar{\tau}_{ij} = -\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left[\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] - \frac{2}{3} (\rho k \delta_{ij}) \quad (5)$$

$$\delta_{ij} = 1 \text{ if } i = j, \delta_{ij} = 0 \text{ if } i \neq j$$

انرژی سینتیک آشفتگی متوسط بصورت $\bar{k} = (1/2) \overline{u_i' u_i'}$ و ویسکوزیته گردابه‌ای آشفتگی بصورت $C_\mu \mu_t = C_\mu \rho \bar{k}^2 / \bar{\epsilon}$ (0.09)، و نرخ اضمحلال متوسط انرژی آشفتگی بدین صورت تعریف می-شود: $\bar{\epsilon} = \nu (\partial \bar{u}_i' / \partial x_j) (\partial \bar{u}_i' / \partial x_j)$

معادلات انرژی سینتیک آشفتگی و نرخ اضمحلال (معادلات $k-\epsilon$) بصورت زیر بیان می-شوند:

$$\frac{\partial (\rho k \bar{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial [(\mu + \mu_t / \sigma_k) (\partial \bar{k} / \partial x_j)]}{\partial x_j} + G_k - \rho \bar{\epsilon} \quad (6)$$

$$\frac{\partial (\rho \bar{\epsilon} \bar{u}_j)}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} \frac{\bar{\epsilon}}{k} G_k + \frac{\partial [(\mu + \mu_t / \sigma_\epsilon) (\partial \bar{\epsilon} / \partial x_j)]}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\bar{\epsilon}^2}{k} \quad (7)$$

که $\sigma_k = 1$ ، $C_{\epsilon 2} = 1.92$ ، $C_{\epsilon 1} = 1.44$ ، $\sigma_\epsilon = 1.3$ ، و تولید انرژی آشفتگی برابر است با:

$$G_k = \mu_t \left[\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \left[\mu_t \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} + \rho k \right] \right] \quad (8)$$

شدت آشفتگی بصورت زیر تعریف می-شود:

$$I = \frac{V'}{V_{avr}} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{k}{u^2 + v^2}}$$

- معادله انرژی برای احتراق آشفته بصورت زیر بیان می-شود:

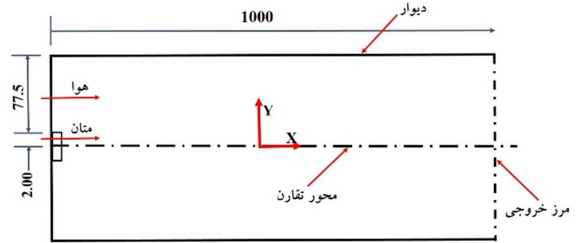
$$\frac{\partial (\rho E + p \bar{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial [(k_{eff}) (\partial \bar{T} / \partial x_j) - \sum_j h_j j + (\bar{\tau}_{eff} \bar{u}_j)]}{\partial x_j} + S_h \quad (9)$$

که E انرژی کل $(E = h - p/\rho + v^2/2)$ و h آنتالپی محسوس می-باشد. k_{eff} و j به ترتیب رسانایی گرمایی موثر و شار پخش گونه j است. اولین عبارت سمت راست معادله بالا به ترتیب بیان‌کننده انتقال انرژی توسط رسانش، پخش گونه‌ها و اتلاف لزجی می-باشد. S_h بیان‌کننده جمله منبع حرارتی حاصل از واکنش شیمیایی است.

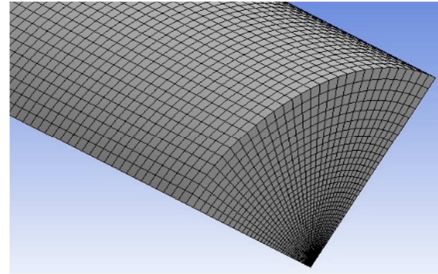
۴-۱- مدل سازی احتراق

به علت آشفته بودن جریان در محفظه احتراق مورد بررسی، در این مطالعه مدل تابع چگالی احتمال برای بدست آوردن برهمکنش آشفتگی و احتراق مورد استفاده قرار گرفته است. مدل مذکور قادر است مقدار متوسط غلظت اجزا، چگالی و دما را در دامنه محاسباتی از طریق محاسبه کسر مخلوط به دست آورد. در این مدل کسر مخلوط نقش برجسته‌ای در ساده‌سازی شبیه‌سازی ایفا می‌کند، زیرا نیازی به حل معادلات جداگانه برای هر جزء نیست و تنها با حل یک و یا دو معادله برای یک مقدار پایستار می‌توان تمامی کسر جرمی‌های دیگر

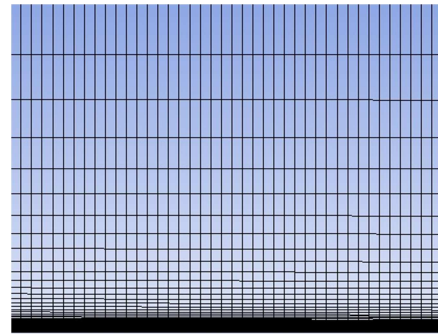
روی خطوط عمودی و ۴۰۰ نقطه بر روی خطوط افقی در نظر گرفته که در مجموع دربرگیرنده ۲۰۰۰۰ شبکه سلولی چهارضلعی است. نقاط موجود بر روی خطوط افقی با فاصله یکسان و نقاط موجود بر روی خطوط عمودی با نسبت فاصله ۱/۲ از خط پایینی به سمت خط بالا شبکه‌بندی شده است. نمایی از شبکه‌بندی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱- هندسه شعله (ابعاد به میلی‌متر می‌باشند)



(الف)



(ب)

شکل ۲- نمایی از شبکه‌بندی (الف) سه‌بعدی، (ب) دو بعدی هندسه مورد نظر

۴- معادلات حاکم

فرم کلی معادلات برای جریان‌های آشفته در حالت پایا و صرفنظر از اثرات جاذبه (نیروی شناوری) بصورت زیر بیان می‌شود [۲۴]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \Phi) = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) + S_\Phi \quad (1)$$

که در آن Φ متغیر وابسته‌ای است که بیانگر سرعت u_i ، دما T ، انرژی سینتیک آشفتگی k ، نرخ اضمحلال انرژی آشفتگی ϵ ، و کسر مخلوط f می‌باشد. آنگاه معادلات حاکم بر جریان‌های آشفته واکنشی عبارتند از:

- معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

برای احتراق غیرپیش‌آمیخته و در حالت غیرآدیاباتیک معادله انرژی با استفاده از آنتالپی کل محاسبه می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot \left(\frac{k_t}{c_p} \nabla H \right) + S_H \quad (15)$$

که در آن آنتالپی کل بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$H = \sum_j Y_j H_j$$

که Y_j کسر جرمی گونه j ام و برابر است با

$$H_j = \int_{T_{ref,j}}^T c_{p,j} dT + h_j^0(T_{ref,j})$$

که $h_j^0(T_{ref,j})$ آنتالپی تشکیل گونه j ام در دمای مرجع $T_{ref,j}$ است.

۴-۲- مدل‌سازی اکسیدهای نیتروژن:

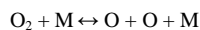
نحوه تشکیل NOx حرارتی توسط مجموعه‌ای از واکنش‌های شیمیایی با وابستگی حرارتی زیاد تعیین می‌گردد که بعنوان مکانیزم توسعه‌یافته Zeldovich شناخته شده است و بوسیله سه واکنش بازگشت‌پذیر زیر توصیف می‌گردد [۲۷]:



جدول ۱- مقادیر نرخ برای مکانیزم واکنشی Zeldovich توسعه‌یافته در تشکیل NO [۲۸].

$k_{f,1} = 1.8 \times 10^8 e^{-38370/T}$	$k_{r,1} = 3.7 \times 10^7 e^{-425/T}$
$k_{f,2} = 1.8 \times 10^8 T e^{-4680/T}$	$k_{r,2} = 3.81 \times 10^3 T e^{-20820/T}$
$k_{f,3} = 7.1 \times 10^7 e^{-450/T}$	$k_{r,3} = 1.7 \times 10^8 e^{-24560/T}$

که در جدول بالا $k_{f,1}$ ، $k_{f,2}$ و $k_{f,3}$ به ترتیب ثابت‌های نرخ برای واکنش‌های رفت و $k_{r,1}$ ، $k_{r,2}$ و $k_{r,3}$ متناظر با ثابت‌های نرخ واکنش‌های برگشت می‌باشند. روش تعادل جزئی برای رادیکال اکسیژن نیز بصورت زیر است [۲۳]:



$$[O] = k_p [O_2]^{1/2}$$

$$[O] = 3.97 \times 10^5 T^{-1/2} [O_2]^{1/2} e^{-31090/T}$$

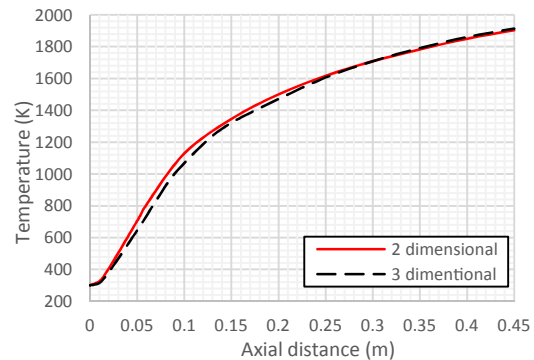
معادله انتقال NO برابر است با:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NO}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{NO}) = \nabla \cdot (\rho D_e \nabla Y_{NO}) + S_{NO} \quad (19)$$

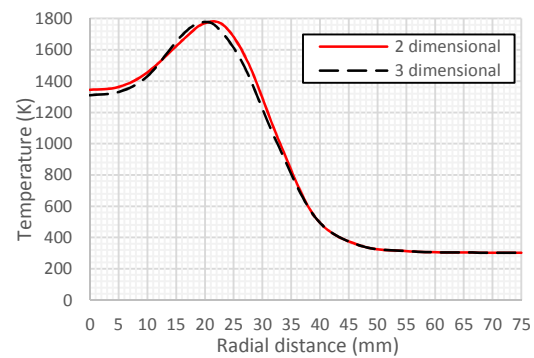
۵- بحث و نتایج

به منظور اعتبارسنجی نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عددی، توزیع دمای شعاعی و محوری بدست آمده با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه می‌شود. در شکل‌های ۴- الف تا د خروجی توزیع دمای بدست آمده با استفاده از نرم‌افزار Fluent با مقادیر دمایی اندازه‌گیری شده مقایسه شده است. دمای به دست آمده با مقادیر تجربی [۲۲] و عددی [۲۳] با استفاده از روش Eddy Dissipation مورد مقایسه قرار گرفته است. در شکل‌های توزیع دمای محوری در مرکز محفظه و توزیع دمای در فواصل محوری ۱۵۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر نشان داده شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مطابقت خوبی بین نتایج بدست آمده با نتایج ارائه‌شده وجود دارد. بعنوان مثال، همانطوریکه در شکل

اجزا را تخمین زد. کسر مخلوط به صورت کسر جرمی المان‌های ناشی شده از سوخت می‌باشد که توسط معادله زیر تعریف می‌شود [۲۵]:



(الف)



(ب)

شکل ۳- نتایج حالت دو و سه بعدی، الف) دمای محوری، ب) دمای شعاعی در فاصله محوری ۱۵۰ میلی‌متری

$$f = \frac{Y_i - Y_{i,ox}}{Y_{i,f} - Y_{i,ox}} \quad (10)$$

که زیرنویس‌های f و ox به ترتیب بیانگر اجزاء سوخت و اکسیدکننده می‌باشند. معادلات انتقال کسر مخلوط و واریانس آن در جریان آشفته به صورت زیر داده شده‌اند:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \bar{f}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \bar{f}}{\partial x_j} \right) \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \bar{f}^2) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \bar{f}^2}{\partial x_j} \right) + C_g \mu_t \left(\frac{\partial \bar{f}}{\partial x_j} \right) - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \bar{f}^2 \quad (12)$$

در معادلات بالا C_d و C_g مقادیری ثابت می‌باشند [۲۶]. مقادیر لحظه‌ای و متوسط زمانی مقادیر بالا مرتبط با معادله مدل تابع چگالی احتمال است. این تابع تعیین‌کننده احتمال قرار داشتن سیال در اطراف حالت f است. معادله احتمال را می‌توان بصورت زیر بیان نمود [۲۶]:

$$P(f) = \frac{f^{\alpha-1} (1-f)^{\beta-1}}{\int f^{\alpha-1} (1-f)^{\beta-1} df} \quad (13)$$

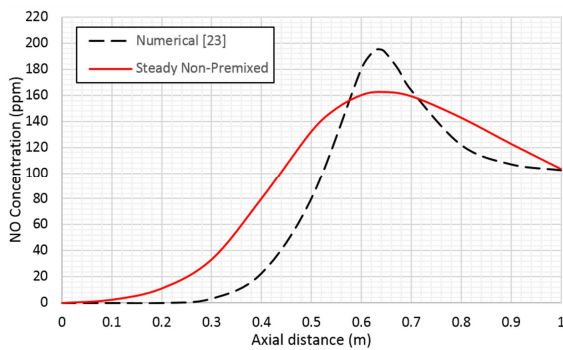
که α و β برابرند با:

$$\alpha = \bar{f} \left[\frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}^2} - 1 \right] \quad \beta = (1-\bar{f}) \left[\frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}^2} - 1 \right]$$

می‌توان با استفاده از رابطه زیر کسر جرمی متوسط اجزا و دما را محاسبه نمود:

$$\bar{\Phi}_i = \int_0^1 p(f) \Phi_i(f) df \quad (14)$$

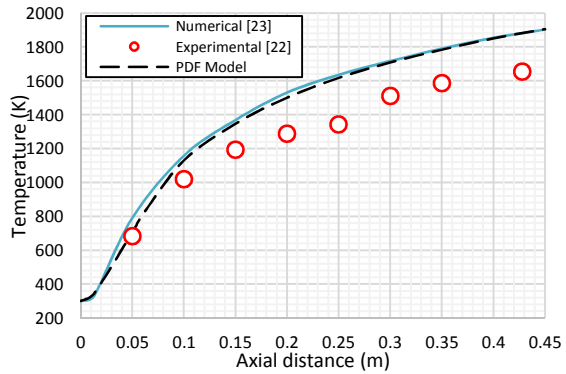
در حالیکه مقادیر حداکثر دمای اندازه‌گیری شده و محاسبه شده به ترتیب ۱۷۱۳ و ۱۸۲۵ کلون است. بعلاوه گردابان دمایی محوری محاسبه شده در شکل ۴-الف از لحاظ کیفی مطابقت خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. توانایی پیش‌بینی روش‌های PDF برای رژیم‌های احتراق غیرپیش‌آمیخته بخوبی توسط Haworth [۲۹] تایید شده است و همانطوریکه انتظار می‌رفت نتایج حاصل از روش تابع چگالی احتمال دارای دقت بیشتری نسبت به روش اضمحلال گردابه‌ای است و می‌توان این دقت را در نتایج بدست آمده مشاهده نمود. مقایسه مقدار NOx ارائه شده در مرجع [۲۳] و مقدار محاسبه شده با استفاده از روش Non-Premixed در شکل ۵ ارائه شده است. همانطوریکه مشاهده می‌شود مکان حداکثر غلظت NO در دو روش محاسبه شده یکسان می‌باشد.



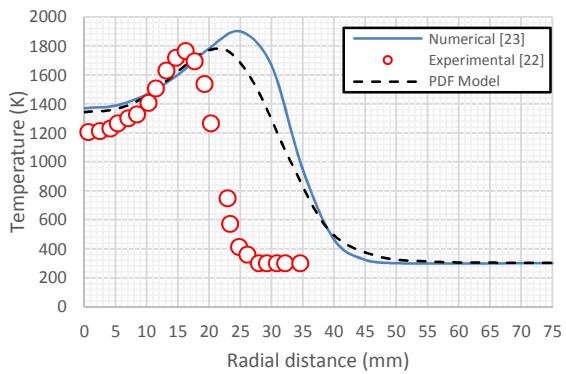
شکل ۵ - مقایسه مقادیر NO. در خط مرکزی محفظه احتراق.

سپس جریان ورودی هوا با رابطه سرعت بصورت نوسانی تغییر می‌دهیم. با در نظر گرفتن دامنه‌های مختلف و گام‌های زمانی متفاوت، دامنه $(A) = 0.254$ و گام زمانی 0.0625 ثانیه برای اعمال ورودی سرعت در نظر گرفته شده است. این محاسبات برای ورودی هوای با تعداد ۱۰۰ چرخه کامل (یعنی ۵ ثانیه) و ۲۰۰ چرخه کامل (یعنی ۱۰ ثانیه) انجام و نتایج حاصل از آن در شکل‌های ۵-الف تا د ارائه شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که اعمال ورودی سینوسی موجب افزایش دما در شعله خواهد شد. مطابق با یافته‌های Fleifil و همکارانش [۳۰]، این افزایش دما را می‌توان در نتیجه تغییر در روند واکنش شیمیایی و کاهش اتلاف حرارتی از محفظه احتراق بواسطه نوسانی شدن ورودی هوا دانست. آن‌ها نشان دادند که نوسان سرعت اثر قابل توجهی بر نرخ آزادسازی گرما دارد. بر طبق محاسبات صورت گرفته در دو حالت بدون ورودی نوسانی و همراه با ورودی نوسانی، آهنگ انتقال گرما در مرز خروجی در دو حالت ذکر شده به ترتیب ۷۷۱/۳۹ و ۷۱۸/۳۴ وات می‌باشد. مقایسه توزیع دمای در محور مرکزی و در جهت شعاعی (در دو فاصله ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی متری) برای دو حالت ۱۰۰ و ۲۰۰ چرخه کامل نوسان در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج حاصل از ۱۰۰ و ۲۰۰ چرخه کامل مشابه یکدیگر می‌باشند، از اینرو ۱۰۰ چرخه در نمودارهای دیگر به عنوان مرجع مقایسه در نظر گرفته شده است. در شکل ۶-ب مشاهده می‌شود که حداکثر

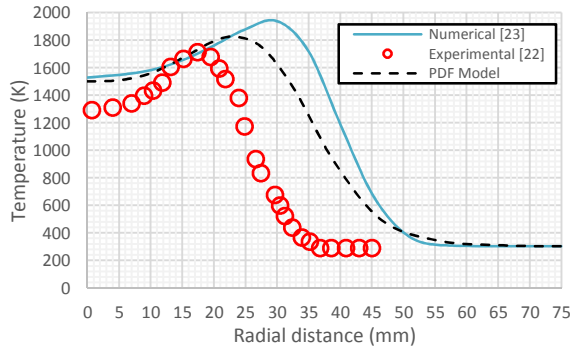
۴-ج مشاهده می‌شود مکان حداکثر دمای اندازه‌گیری شده و محاسبه شده به ترتیب ۱۷/۴ و ۲۳/۲ میلی‌متر می‌باشد.



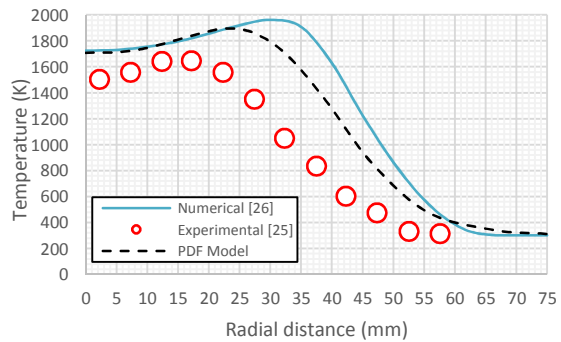
(الف)



(ب)



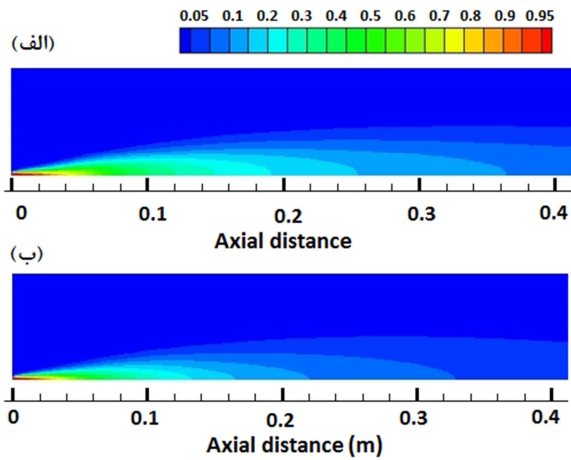
(ج)



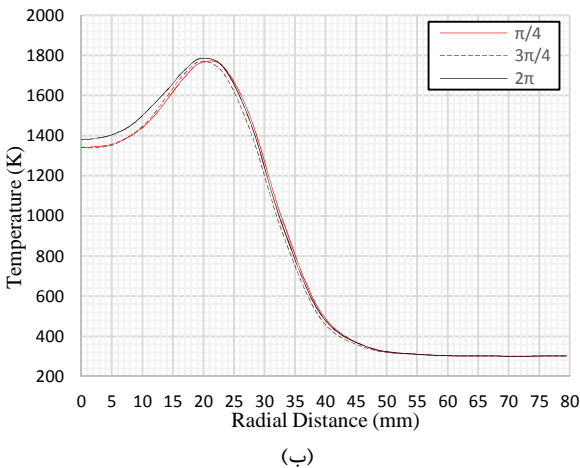
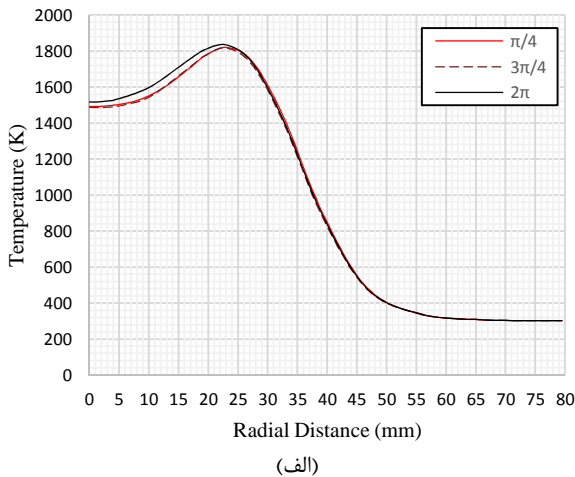
(د)

شکل ۴-الف) دمای محوری، ب) دمای شعاعی در فاصله محوری ۱۵۰ میلی‌متری، ج) دمای شعاعی در فاصله محوری ۲۰۰ میلی‌متری، د) دمای شعاعی در فاصله محوری ۳۰۰ میلی‌متری.

مجرای سوخت متفاوت است. لازم به ذکر است کسر مخلوط استوکیومتری برای مخلوط متان- هوا برابر ۰/۰۵۸ می باشد. تفاوت توزیع کسر مخلوط منجر به اختلاف در توزیع دما و توزیع اکسید نیتروژن می شود.

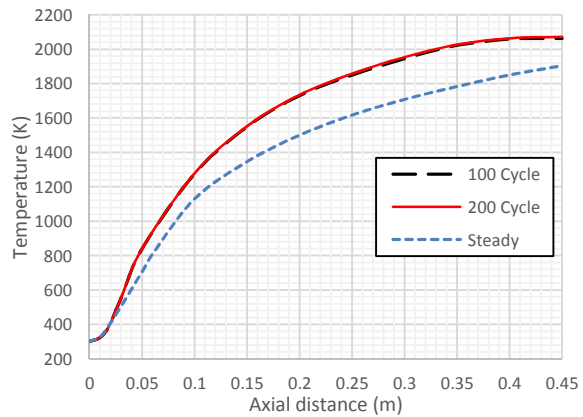


شکل ۷- توزیع کسر مخلوط در حالت الف) پایا ب) ورودی هوای نوسانی با فرکانس ۲۰ هرتز

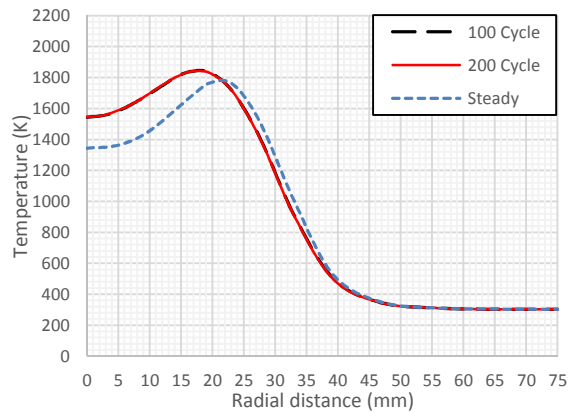


شکل ۸- دمای شعاعی در مقاطع $\pi/4$ ، $3\pi/4$ و 2π از یک چرخه در فاصله محوری الف) ۱۵۰ میلیمتر ب) ۲۰۰ میلیمتر

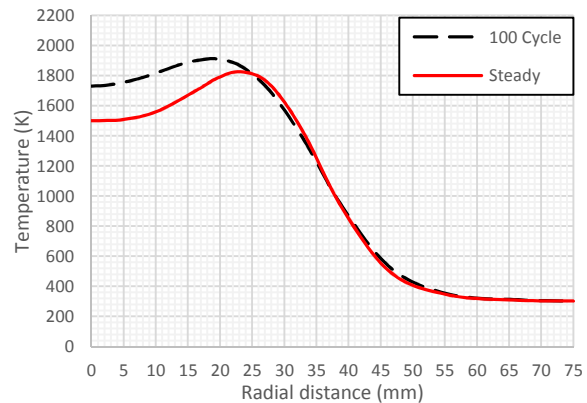
دمای بدست آمده در حالت پایا با استفاده از روش تابع چگالی احتمال ۱۷۵۵ کلوین می باشد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶- الف) دمای متوسط زمانی محوری، ب) دمای شعاعی در فاصله محوری ۱۵۰ میلیمتری، ج) دمای شعاعی در فاصله محوری ۲۰۰ میلیمتری، د) دمای شعاعی در فاصله محوری ۳۰۰ میلیمتری

در حالیکه با بکارگیری همین روش در حالت ورودی نوسانی این دما برابر با ۱۸۲۷ کلوین است. افزایش دما تأثیر به سزایی بر توزیع NO در محفظه دارد [۳۲]. در شکل ۷ مقایسه توزیع کسر مخلوط در محفظه احتراق بین دو حالت پایا و نوسانی ارائه شده است. مطابق شکل، توزیع کسر مخلوط حالت نوسانی با حالت پایا به ویژه در فواصل نزدیک

توسعه یافته Zeldovich استفاده گردید. هدف اصلی در این مقاله بررسی اثرات نوسانی بودن ورودی هوا بر روی توزیع دمایی و اکسیدهای نیتروژن شعله است. نتایج بدست آمده عبارتند از:

(۱) نتایج شبیه سازی عددی به دست آمده از مدل PDF مطابقت قابل قبولی با داده های تجربی در پیش بینی دما دارد. همانطوریکه توزیع دمایی حاصل از روش PDF نسبت به روش اضمحلال گردابه ای، مطابقت بهتری با نتایج تجربی ارائه شده، از خود نشان می دهد.

(۲) نتایج شبیه سازی عددی نشان می دهد اعمال نوسان در ورودی هوا موجب بر اختلاط سوخت و هوا و در نتیجه بر توزیع کسر مخلوط در محفظه احتراق موثر است.

(۳) در مقایسه با ورودی هوا، پایا، اعمال ورودی هوای نوسانی افزایش دمای احتراق به ویژه در قسمت مرکزی محفظه را به دنبال دارد.

(۴) افزایش دما در حالت ورودی هوای نوسانی منجر به افزایش تولید اکسیدهای نیتروژن در شعله متان-هوا می شود.

(۵) تغییرات قابل توجهی بر روی توزیع دمایی بواسطه اعمال فرکانس های مختلف شامل ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ هرتز مشاهده نشده است.

۷- نمادها

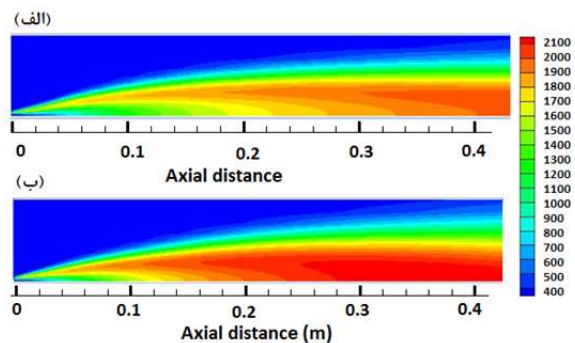
$c_{p,j}$	ظرفیت گرمایی در فشار ثابت برای گونه زام،
$(kj kg^{-1} k^{-1})$	
c_{μ}	ثابت، ۰/۰۹
C_{E1}	ثابت، ۱/۴۴
C_{E2}	ثابت، ۱/۹۲
E	انرژی کل به ازای واحد جرم $(kj kg^{-1})$
f	کسر مخلوط
h	آنتالپی محسوس $(kj kg^{-1})$
h_j^0	آنتالپی تشکیل گونه زام $(kj kg^{-1})$
k	انرژی سینتیک آشفستگی $(m^2 s^{-2})$
k_{eff}	رسانایی گرمایی موثر $(wm^{-1} k^{-1})$
p	فشار (پاسکال)
S_{NO}	جمله منبع NO حاصل از تشکیل حرارتی NO
T	دما (کلوین)
u	سرعت (ms^{-1})
Y_j	کسر جرمی گونه زام

علائم یونانی

ε	نرخ اضمحلال انرژی آشفستگی $(m^2 s^{-2})$
σ_{ε}	عدد پراوتل آشفستگی برای ε ، ۱/۳
μ	لزجت دینامیکی $(kg m^{-1} s^{-1})$
τ	تانسور تنش
σ_k	عدد پراوتل آشفستگی برای k ، ۱/۰
ρ	چگالی $(kg m^{-3})$
μ_t	لزجت گردابه ای آشفستگی
∇	اپراتور دیفرانسیلی $(i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y})$
δ	علامت تانسوری Kronecker

همچنین تغییرات ناشی از اعمال اولین چرخه ورودی سینوسی بر توزیع دمایی احتراق در مقاطع 2π و $3\pi/4$ و $\pi/4$ از یک چرخه بصورت دمای شعاعی در فواصل محوری ۱۵۰ و ۲۰۰ میلیمتری به ترتیب در شکل ۸-الف و ب رسم شده است.

در شکل ۹ مقایسه توزیع دما بین دو حالت پایا و حالت ورودی هوای نوسانی با فرکانس ۲۰ هرتز تا فاصله ۰/۴ متری محفظه احتراق انجام شده است. مطابق شکل، ورودی نوسانی هوا باعث افزایش دما به ویژه در مرکز محفظه احتراق می شود. از آنجا که سهم عمده تشکیل NO مربوط به مکانیزم حرارتی است، افزایش دمای احتراق منجر به افزایش تشکیل اکسید نیتروژن در محفظه احتراق می شود.



شکل ۹- توزیع دما در حالت الف) پایا ب) ورودی هوای نوسانی با فرکانس ۲۰ هرتز

در شکل ۱۰-الف تا د مقادیر NO بین دو حالت پایا و نوسانی بر روی محور تقارن و در فاصله های محوری ۱۵۰ میلیمتری، ۲۰۰ میلیمتری، ۳۰۰ میلیمتری و مرز خروجی رسم شده است. Fang و همکاران [۳۱] نشان دادن که پروفیل های غلظت NO تقریباً با مقدار دمای متوسط متناسب می باشند و همانطوریکه مشاهده شد اعمال ورودی سینوسی موجب افزایش توزیع دمایی در سطح شعله گردید و این روند، افزایش اکسید نیتروژن حاصل از احتراق را نیز به همراه دارد. اثر تغییر فرکانس بر توزیع دمایی در جدول ۲ ارائه شده است. بدین منظور به جای فرکانس ۲۰ هرتز، سرعت ورودی هوا را با فرکانس های ۵۰ و ۱۰۰ هرتز نوسانی نموده و به ازای ۱۰۰ چرخه کامل محاسبات را انجام داده ایم. با در نظر گرفتن فرکانس های ۵۰ و ۱۰۰ هرتز و در نظر گرفتن تحلیل عددی بصورت یک هشتم زمان در هر چرخه، گام زمانی به ترتیب ۰/۰۰۲۵ و ۰/۰۰۱۲۵ ثانیه بدست می آید. نتایج ارائه شده در جدول نشان می دهد که تغییر فرکانس اثر ناچیزی بر روی توزیع دمایی احتراق آشفته متان-هوا دارد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک محفظه احتراق دو بعدی متقارن محوری شبیه سازی شده است تا در آن اثرات ورودی و ورودی سینوسی هوای مربوط به شعله پخش آشفته حاصله از گاز متان-هوا مورد بررسی قرار گیرد. به علت نوسان مشخصه های جریان، روش تابع چگالی احتمال (PDF) برای تخمین برهم کنش آشفستگی و احتراق بکار گرفته شده و برای پیش بینی رفتار آشفستگی جریان از روش $k-\varepsilon$ استاندارد استفاده شده است. برای پیش بینی اکسیدهای نیتروژن حاصل از احتراق از مکانیزم

- [19] F.A.T. Lopez-Parra, A. Computational study on the effect of turbulence intensity and pulse frequency in soot concentration in an acetylene diffusion flame. (Ed.) Intl Conference on Computational Sciences ICCS 2005, LCNS 3516, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg. 2005, pp. 120–128.
- [20] F.A.T. Lopez-Parra, A. Computational study on the effect of pulse characteristics on the soot and NOx formation and combustion in diffusion flames. (Ed.) Proc European Combust Meeting Louvain-la-Neuve, Belgium. 2005.
- [21] F.A.T. Lopez-Parra, A. Computational study on the effect of turbulence intensity in soot formation and depletion in an acetylene diffusion flame. (Ed.) Proc European Combust Meeting, Louvain-la-Neuve, Belgium 2005.
- [22] Brookes S.J., Moss J.B., Measurements of soot and thermal radiation from confined turbulent jet diffusion flames of methane, *Combustion and Flame* 116, pp. 49–61, 1999.
- [23] Saqr K.M., Aly H.S., Sies M.M., Wahid M.A., Effect of free stream turbulence on NOx and soot formation in turbulent diffusion CH4-air flames, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37, pp. 611–617, 2010.
- [24] Hsin-Yi Shih, Chi-Rong Liu, A computational study on the combustion of hydrogen/methane blended fuels for a micro gas turbines, *International Journal of Hydrogen Energy* 39, pp. 15103–15115, 2014.
- [25] Sivathanu YR, Faeth GM. Generalized state relationships for scalar properties in non-premixed hydrocarbon/air flames. *Combust Flame*, 82 (211), 1990.
- [26] Peters N., *Turbulent combustion*, Cambridge University Press, 2000.
- [27] Zeldovich Y.B., The oxidation of nitrogen in combustion and explosions, *Acta Physicochimica* 21, pp. 577–628, 1946.
- [28] R.K. Hanson, S. Salimian, Survey of rate constants in H/N/O systems, in: W.C. Gardiner (Ed.), *Combustion Chemistry*, 1984.
- [29] Haworth D.C., Progress in probability density function methods for turbulent reacting flows, *Progress in Energy and Combustion Science* 36 (2), pp.168–259, 2010.
- [30] Fleifil M., Annaswamy A. M., Ghoneim Z. A., Ghoneim A. F., Response of a laminar premixed flame to flow oscillations: a kinematic model and thermoacoustic instability results, *Combustion and Flame*, 106: pp.487-510, 1996.
- [31] Wang Fang, Xie Xiang, Jiang Qi, Zhou Lixing, Effect of turbulence on NO formation in swirling combustion, *Chinese Journal of Aeronautics*, 27(4): pp. 797–804, 2014.
- [32] Alemi E., Rajabi Zargarabadi M., Effects of jet characteristics on NO formation in a jet-stabilized combustor, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 112, pp. 55–67, 2017.
- [1] Fleifil M., Annaswamy A.M., Ghoneim A.A., Ghoneim A.F., Response of a laminar premixed flame to flow oscillations: A kinematic model and thermoacoustic instability results. *Combustion and Flame*, 106, pp.487-510, 1996.
- [2] Chaparro A.A., Cetegen B.M., Blowoff characteristics of bluff-body stabilized conical premixed flames under upstream velocity modulation, *Combustion and Flame* 144, pp.318-335, 2006.
- [3] Chaudhuri S., Cetegen B.M., Blowoff characteristic of bluff-body stabilized conical premixed flames with upstream spatial mixture gradients and velocity oscillations, *Combustion and Flame* 153, pp. 616-633, 2008.
- [4] Hahn W.A., Wendt J.O.L., NOx formation in flat, laminar, opposed jet methane diffusion flames, *Symposium (International) on Combustion* 18 (1) pp.121–131, 1981.
- [5] N.A. Række, J.E. Hustad, O.K. Sänju, F.A. Williams, Scaling of nitric oxide emissions from buoyancy-dominated hydrocarbon turbulent-jet diffusion flames, *Symposium (International) on Combustion* 24 (1), pp.385–393, 1992.
- [6] Chen J.Y., Chang W.C., Flamelet and PDF modeling of CO and NOx emissions from a turbulent, methane hydrogen jet nonpremixed flame, *Symposium (International) on Combustion* 26 (2), pp.2207–2214, 1996.
- [7] Yamashita H., Nishioka M., Takeno T., Prediction of NOx production rate in the turbulent diffusion flame, *Energy Conversion and Management* 38 (13–10), pp.1343–1352, 1997.
- [8] Kok J.B.W., Louis J.J.J., Yu J.H., IRST model for turbulent premixed non-adiabatic methane flames, *Combustion Science and Technology* 149 (1), pp. 225–246, 1999.
- [9] Yamashita H., Numerical study on NOx production of transitional fuel jet diffusion flame, *JSME International Journal, Series B* 43 (1), pp.97–103, 2000.
- [10] Muppala S.P.R., Wen J.X., N.K. Aluri Modelling issues of lean high-pressure turbulent premixed hydrogen-enriched hydrocarbon combustion at gas turbine conditions (Ed.) *Collection of Technical Papers - 5th International Energy Conversion Engineering Conference St. Louis, MO 2007*, pp. 271–280.
- [11] Lopez-Parra F., Turan A., Computational study on the effects of non-periodic flow perturbations on the emissions of soot and NOx in a confined turbulent methane/air diffusion flame, *Combustion Science and Technology* 179 (7), pp. 1361–1384, 2007.
- [12] Wetzel F., Habisreuther P., N. Zarzalis Numerical investigation of lean blow out of a model gas turbine combustion chamber using a presumed JPDP-reaction model by taking heat loss processes into account (Ed.) *Proceedings of the ASME Turbo Expo Barcelona 2006*, pp. 41–49.
- [13] Wang H.F., Chen Y.L., Chen H.L., Liu M.H., Numerical analysis of instantaneous response of the CH4/O2/N2 laminar flamelet, *Jisuan Wuli/Chinese Journal of Computational Physics* 23 (2), pp.193–198, 2006.
- [14] Ilbas M., Yilmaz I., Veziroglu T.N., Kaplan Y., Hydrogen as burner fuel: modelling of hydrogen–hydrocarbon composite fuel combustion and NOx formation in a small burner, *International Journal of Energy Research* 29 (11), pp.973–990, 2005.
- [15] Ilbas M., Yilmaz I., Kaplan Y., Investigations of hydrogen and hydrogen– hydrocarbon composite fuel combustion and NOx emission characteristics in a model combustor, *International Journal of Hydrogen Energy* 30 (10), pp.1139–1147, 2005.
- [16] Santos A., Costa M., Re-examination of the scaling laws for NOx emissions from hydrocarbon turbulent jet diffusion flames (Ed.) *International Symposium on Combustion, Abstracts of Works-in-Progress Posters Chicago, IL 2004*, pp. 170.
- [17] Koseki H., Flame stability limit and exhaust emissions of low calorific fuel combustion in turbulent diffusion combustor for a small-scale fuel cell, *JSMEInternational Journal, Series B: Fluids and Thermal Engineering* 47 (2), pp. 221–227, 2004.
- [18] Dally B.B., Riesmeier E., Peters N., Effect of fuel mixture on moderate and intense low oxygen dilution combustion, *Combustion and Flame* 137 (4), pp. 418–431, 2004.