نحوه استناد به این مقاله: ریحان پور، سعید؛ ارشادی، علی (۱۳۹۰). کاهش تولید اکسیدهای نیتروژن و دوده در محفظه احتراق آشفته غیر پیش مخلوط متان/هوا با استفاده از تزریق آب. تبدیل انرژی، ۲ (۴و۳)، ۱۰-۱.

کاهش تولید اکسیدهای نیتروژن و دوده در محفظه احتراق آشفته غیر پیش مخلوط متان/هوا با استفاده از تزریق آب

سعید ریحان‌پور[1]*، علی ارشادی[2]

[1]دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مکانیک - دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول
[2] مربی دانشکده مکانیک - دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول

دریافت: شهریور ۹۵، بازنگری: آبان ۹۵، پذیرش: دی ۹۵

چکیده

هدف اصلی مقاله حاضر کاهش آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن و دوده (سوت) در محفظه‌ی احتراق با استفاده از تزریق آب به هوای ورودی (رطوبت نسبی هوا) به محفظه می‌باشد. در این راستا یک محفظه‌ی احتراق متقارن محوری آشفته با سوخت گازی (متان) و غیرپیش مخلوط، برگرفته از تحقیق آزمایشگاهی درنظر گرفته شده است. جهت آشفتگی جریان از مدل دو معادله‌ای k-ε در دو حالت استاندارد و تحقق‌پذیر و برای محاسبه نرخ انجام واکنش از دو مدل احتراقی اضمحلال گردابه‌ای (EDM) و تابع چگالی احتمال (PDF) استفاده شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها نشان داد که دقیق‌ترین مدل جهت آشفتگی جریان k-ε تحقق‌پذیر و برای احتراق، PDF است. به هدف کاهش آلاینده‌ها، میزان رطوبت نسبی هوای ورودی در شش مقدار مختلف از صفر تا ۱۰۰درصد در نظر گرفته شد. نتایج نشان دادند که با افزایش رطوبت نسبی هوای ورودی، کاهش خفیف دما و در نتیجه آن کاهش شدید آلاینده‌هایی نظیر اکسید نیتروژن و دوده در محفظه دیده می‌شود. علت کاهش NO و دوده را می‌توان به ترتیب، کاهش بیشینه‌ی دمای محفظه در اثر تبخیر آب تزریق شده و همچنین کاهش کربن موجود در محفظه عنوان نمود. میزان کاهش دما در اثر رطوبت‌دهی به هوا (از ۰ تا ۱۰۰درصد)، مقدار ۱درصد بود درحالی که این مقدار برای NO و دوده به ترتیب ۶۷/۵ و ۷۱/۸ درصد دیده شد. عدم کاهش راندمان حرارتی و کاهش شدید NO و دوده، نشان از کارآمد بودن روش فوق جهت کاهش آلاینده‌ها می‌باشد.

***عهده‌دار مکاتبات:** s.reihanpour@gmail.com

کلمات کلیدی: احتراق غیر پیش‌آمیخته، رطوبت نسبی، کاهش آلاینده‌ها، NOx ، سوت

۱- مقدمه

مطابق آمارهای ارائه شده، در حال حاضر منابع تامین انرژی بالغ بر ۸۰٪ در جهان و ۹۰٪ در ایران با استفاده از سوخت‌های فسیلی تامین می‌شوند. که بر اساس پیش‌بینی‌های صورت گرفته این آمار برای سال‌های آینده نیز در حال افزایش است [۱]. یکی از مهم‌ترین مشکلات استفاده از سوخت‌های فسیلی (احتراق) جهت تامین انرژی، ایجاد آلاینده‌ها می‌باشد که بسیاری از محققین در زمینه‌ی احتراق، پژوهش خود را معطوف به این موضوع کرده‌اند. از مهم‌ترین آلاینده‌های ایجاد شده در احتراق، می‌توان گروه اکسیدهای نیتروژن و دوده را نام برد. گروه اکسیدهای نیتروژن شامل اکسید نیتروژن NO، دی اکسید نیتروژن NO_2 و اکسید دی نیتروژن N_2O می‌باشد. از موثرترین مکانیزم‌های تشکیل NO می‌توان مکانیزم دمایی یا حرارتی[4] و مکانیزم سریع[5] را نام برد. مکانیزم حرارتی حساسیت بالایی نسبت به دما داشته و جهت تشکیل آن به دمایی بالاتر از ۱۶۰۰ کلوین نیاز دارد که با افزایش دما سرعت تشکیل NOx نیز بالاتر می‌رود. در مکانیزم سریع NOx در ناحیه‌ی شعله بوجود آمده و از نتایج آن هیدروژن‌های کربن می‌باشد [۲]. از طرفی مکانیزم تشکیل دوده نیز به سه قسمت تقسیم شده، که شامل مکانیزم تک مرحله، دو مرحله و موس - بروکس است. مدل موس - بروکس برای پیش‌بینی دوده در شعله‌های سوخت‌های هیدروکربنی از قبیل متان و پروپان استفاده می‌شود. بر اساس مطالب ذکر شده پژوهشگران در این زمینه فعالیت‌های مفیدی انجام داده تا بتوانند گام مهمی در راستای کاهش آلاینده‌های تولیدی در اثر استفاده از سوخت‌های فسیلی (احتراق) بردارند.

1- Realizable

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1390.2.3.1.1]

2- Eddy Dissipation Model
3- Probability Density Function
4- Thermal
5- Prompt

از این جمله می‌توان به تحقیق ژو و همکاران [۳]، اشاره کرد که در یک تحقیق اثر چرخشی بودن هوای ورودی به محفظه را بر تولید اکسیدهای نیتروژن در یک احتراق غیر پیش‌آمیخته در چهار میزان چرخش (صفر، ۰/۴۸، ۰/۶۸، ۱/۰۸) بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که در چرخش‌های کم، به نسبت اعداد چرخش زیاد میزان تولید NO کم‌تر است. در یک تحقیق عددی دیگر، ماگل و همکاران [۴]، به مطالعه‌ی احتراق غیر پیش‌آمیخته در یک محفظه‌ی احتراق استوانه‌ای با توان 400kw و استفاده از مدل آشفتگی k-ε و مدل احتراق اضمحلال گردابه‌ای ثابت[1] (EDC) و همچنین مدل تشعشع پرداختند و سپس غلظت NOx را در موقعیت‌های مختلف محفظه بدست آوردند. عامری [۵] تحقیقاتی درباره تاثیر نوع سوخت بر احتراق و عملکرد توربین‌های گازی ارائه داده است. در تحقیقی دیگر احتراق بدون شعله بیوگاز در حالت سه بعدی بصورت عددی توسط حسینی و همکاران [۶] مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی اثر درجه حرارت پیش‌گرم و درجه حرارت دیوار، روی شکل‌گیری آلاینده‌ها در دو حالت بدون شعله و معمولی بحث شد و مشخص شد که اگر چه احتراق معمولی پیش‌گرم می‌تواند از نظر کاهش مصرف سوخت موثر باشد اما باعث افزایش تشکیل NOx می‌شود در حالی که احتراق بدون شعله به مقدار قابل توجهی تشکیل NOx را کاهش می‌دهد. ایلباس و همکاران [۷] به روش عددی، تولید اکسیدهای نیتروژن در احتراق‌های هیدروژنی را بررسی کردند. آن‌ها با در نظر گرفتن تاثیرات تشعشع و مدل آشفتگی k-ε به این نتیجه رسیدند که تشکیل اکسیدهای نیتروژن در احتراق هیدروژنی، به دلیل بالا بودن دما از احتراق سوخت متان بیش‌تر بوده و مخلوط کردن هیدروژن و متان، تشکیل NOx را به شکل قابل توجهی کاهش می‌دهد. ابراهیمی و آقانجفی [۸]، روش دوباره سوزی در کاهش تولید اکسیدهای نیتروژن را بررسی کردند. در یک تحقیق که بصورت آزمایشگاهی توسط بروکس و موس [۹]، بر روی یک محفظه‌ی احتراق صورت گرفت. احتراق با مدل‌های شیمیایی آهسته شبیه‌سازی شد و میزان انتشار سوت با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی محاسبه شد. در تحقیق دیگری با محفظه‌ی احتراق مشابه توسط چوایب و همکاران [۱۰]، اثر غنی‌سازی هیدروژن روی متان/هوا تحت شعله‌ی محدود علاوه بر میکروجت هوا بررسی شده و نشان داده شد که با افزایش درصد هیدروژن در مخلوط سوخت ، افزایش اختلاط و در نتیجه کاهش قابل توجه سوخت و آلاینده‌ی سوت را در بر دارد. با توجه به تحقیقات انجام شده که در بالا به برخی از آن‌ها اشاره شد، تاثیر عوامل زیادی بر تولید آلاینده‌های ناشی از احتراق توسط محققین مورد توجه قرار گرفته است. اما تاکنون تاثیر تزریق آب به هوای ورودی (رطوبت نسبی هوای ورودی) بر تولید آلاینده‌هایی نظیر NOx و سوت بررسی نشده است. لذا در پژوهش حاضر هدف اصلی، تحلیل عددی تاثیر رطوبت نسبی هوا بر تولید آلاینده‌ها در محفظه‌ی احتراق غیر پیش‌آمیخته متان/هوا (مشابه با تحقیق بروکس و موس [۹]) می‌باشد.

۲- معادلات حاکم

جریان‌های واکنشی دارای معادلات پیچیده‌تری نسبت به جریان‌های غیر واکنشی می‌باشند. با توجه به شرایط و نوع مسئله معادلات بقا ، مومنتوم و انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند که تمام معادلات در شرایط پایا و برای جریان غیر قابل تراکم حل می‌شوند.

۲- ۱- معادلات بقا

معادلات بقا برای جرم، مومنتوم و انرژی به ترتیب در معادلات ۱ و ۲ و۴ آمده‌اند :

$$\frac{\partial}{\partial X_j}\left(\bar{\rho}\tilde{u_j}\right) = 0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u_i}\tilde{u_j})}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial \tilde{u_i}}{\partial X_j} + \frac{\partial \tilde{u_j}}{\partial X_j} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial \tilde{u_i}}{\partial X_j}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial X_j}\left(-\overline{\rho u_i' u_j'}\right) + \bar{\rho} g_i \qquad (۲)$$

از طرفی تنش رینولدز به گرادیان سرعت متوسط مربوط می‌شود که از تئوری بوزینسک [۱۱] گرفته شده است:

$$\left(-\overline{\rho u_i' u_j'}\right) = \mu_t\left(\frac{\partial \tilde{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u_j}}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}(\bar{\rho}k + \mu_t\frac{\partial \tilde{u_i}}{\partial x_i})\delta_{ij} \qquad (۳)$$

$$\frac{\partial}{\partial X_j}\left(\bar{\rho}\tilde{u_j}\tilde{H}\right) = \frac{\partial}{\partial X_j}\left(\frac{\mu_t}{Pr_t}\frac{\partial \tilde{H}}{\partial X_j}\right) + S_E \qquad (۴)$$

۲- ۲- معادلات آشفتگی

مدل آشفتگی k-ε شامل دو معادله، انتقال جهت انرژی جنبشی (k) و اضمحلال آن (ε) جهت تعریف لزجت آشفتگی می‌باشد. در معادله ۵ لزجت آشفتگی با استفاده از این مدل ارائه شده است :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \qquad (۵)$$

در معادله فوق C_μ مقدار ثابتی است. در زیر نیز به معادله‌ی انتقال اشاره شده است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial X_i}[u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial X_j}\left(k_{eff}\frac{\partial T}{\partial X_j} + u_i(\tau_{ij})_{eff}\right) + S_h \qquad (۶)$$

که در معادله بالا E انرژی کل، k_{eff} اثر هدایت حرارتی و $(\tau_{ij})_{eff}$ تنسور تنش است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1390.2.3.1.1]

1- Eddy Dissipation Concept

۲- ۳- معادلات احتراق

در این تحقیق برای شبیه‌سازی احتراق دو مدل EDM و PDF در نظر گرفته شده است. در مدل EDM فرض می‌شود که نرخ واکنش توسط آشفتگی جریان کنترل می‌شود و این مدل تعمیم یافته‌ی مدل نرخ محدود (Finite – Rate) است که در زیر به آن اشاره شده است:

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\widetilde{u_j}\widetilde{Y_k})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\bar{\rho}D_{k,m} + \frac{\mu_t}{sc_t}\right)\frac{\partial \widetilde{Y_k}}{\partial x_j}\right) + R_k \qquad (۷)$$

در معادله فوق R_k نشان‌دهنده نرخ واکنش گونه k است. در مدل‌سازی به روش PDF، خصوصیات جریان احتراقی بر پایه‌ی کسر مخلوط (f) محاسبه می‌شوند و کسر مخلوط مطابق با رابطه ۸ تعریف می‌شود [۱۲] :

$$f = \frac{[Y_g + S\bullet Y_{O_2}] - [Y_g + S\bullet Y_{O_2}]_2}{[Y_g + S\bullet Y_{O_2}]_1 - [Y_g + S\bullet Y_{O_2}]_2} \qquad (۸)$$

نسبت دبی جربی سوخت به هوا همچنین Y_g و Y_{O2} به ترتیب کسر جرمی سوخت و O_2 هستند. اندیس‌های ۱ و ۲ برای کروشه‌ها هم به ترتیب به نازل خروجی سوخت و هوا مربوط می‌شود. در مدل PDF یک معادله‌ی انتقال جهت کسر مخلوط در نظر گرفته می‌شود که به قرار رابطه ۹ است :

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{f}\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_t}\frac{\partial \tilde{f}}{\partial x_j}\right) \qquad (۹)$$

۲- ۴- انتشار آلاینده‌ها (NO_X و سوت)

با توجه به سهم ۹۰٪ تولید NO از خانواده اکسیدهای نیتروژن درون محفظه‌ی احتراق، می‌توان به تنهایی میزان تشکیل این گونه را مورد بررسی قرار داد. همانگونه که در قبل نیز عنوان شد دو مکانیزم غالب حرارتی و سریع برای تشکیل NO در نظر گرفته شده است که واکنش‌ها و معادلات حاکم به قرار زیرند :

NO حرارتی

$$O + N_2 \leftrightarrow NO + N \qquad (۱۰)$$

NO سریع

$$N + OH \leftrightarrow NO + O$$
$$N + OH \leftrightarrow NO + H$$
$$N + O_2 \leftrightarrow NO + O \qquad (۱۱)$$
$$HCN + OH \leftrightarrow CN + H_2$$
$$CH + N_2 \leftrightarrow HCN + N$$
$$CN + O_2 \leftrightarrow NO + CO$$

معادله انتقال برای تشکیل NO_X عبارت است از :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NO}) + \nabla.(\rho \tilde{u_1} Y_{NO}) = \nabla.(\rho D \nabla Y_{NO}) + S_{NO} \qquad (۱۲)$$

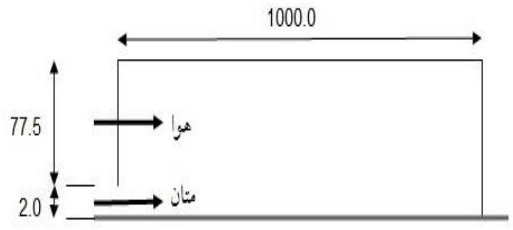
معادله کسر جرمی دوده نیز به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\bar{\rho}\widetilde{u_i}\widetilde{Y}_{soot}\right) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_{soot}}.\frac{\partial \widetilde{Y}_{soot}}{\partial x_i}\right) + R_{soot} \qquad (۱۳)$$

در معادله بالا R_{soot} نرخ خالص تولید دوده است. و Y_{soot} کسر جرمی دوده و σ_{soot} عدد پرانتل آشفتگی برای انتقال دوده هستند.

۳- توصیف هندسه و شرایط مرزی

یک محفظه‌ی احتراق با هندسه‌ی متقارن محوری با تزریق سوخت در مرکز مقطع و ورودی هوا در اطراف آن، به طول یک متر و قطر ۷۹/۵ میلی‌متر مطابق شکل ۱، در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: شماتیک محفظه‌ی احتراق. ابعاد براساس میلی متر

مقادیر آزمایشگاهی استفاده شده بر اساس نتایج تحقیقات بروکس و موس [۹] بوده که در شرایط استاندارد محیطی بدست آمده‌اند. میزان دبی هوای ورودی و سوخت (متان) به ترتیب ۰/۰۱۱۸kg/s و ۰/۰۰۰۱۷۲kg/s و همچنین دمای دیواره ، هوا و سوخت ورودی ۳۰۰ کلوین در نظر گرفته شده است. شدت آشفتگی برای هوا و سوخت ورودی ۵/۵ درصد بوده و همچنین مقدار عدد رینولدز جریان با توجه به دما و دبی جرمی ورودی برابر ۵۰۰۰ بدست می‌آید. برای کاهش تولید آلاینده‌ها، در شش مقدار متفاوت به هوای ورودی آب تزریق شده که ترکیب هوای ورودی با در نظر گرفتن رطوبت نسبی و فشار اتمسفر در جدول ۱، آمده است.

۴- حل عددی

همان طور که در شکل ۱، نشان داده شد محفظه‌ی احتراق بصورت دو بعدی متقارن محوری با جریان واکنشی آشفته و غیر پیش‌آمیخته بوده و برای آشفتگی از دو مدل k-ε ، تحقق‌پذیر و استاندارد استفاده شده است. همچنین بر اساس تحقیقات گذشته نظیر تحقیق چوایب و همکاران [۱۰]، برای تشعشع از مدل جهات گسسته[1] (DO) استفاده شد. برای مدل احتراق هم دو روش EDM و PDF در نظر گرفته شده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

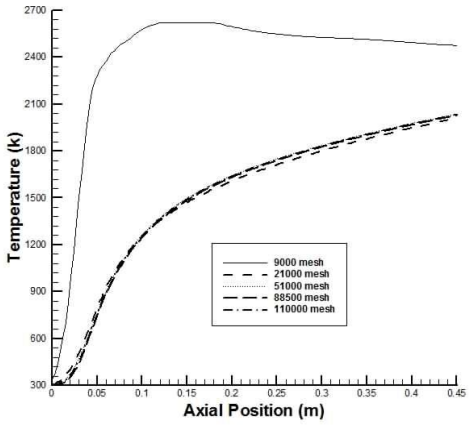
[DOR: 20.1001.1.20089813.1390.2.3.1.1]

1- Discrete Ordinate

جدول ۱: کسر جرمی مواد تشکیل دهنده هوا در فشار اتمسفر و دمای 300k

کسر جرمی N_2	کسر جرمی O_2	کسر جرمی H_2O	رطوبت مطلق	فشار جزیی بخار kpa	رطوبت نسبی ٪
۰/۷۷	۰/۲۳	۰	۰	۰	۰
۰/۷۶۶	۰/۲۲۹	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰/۷۲	۲۰
۰/۷۶۳	۰/۲۲۸	۰/۰۰۹	۰/۰۰۹	۱/۴۴	۴۰
۰/۷۵۹	۰/۲۲۷	۰/۰۱۴	۰/۰۱۴	۲/۱۶	۶۰
۰/۷۵۶	۰/۲۲۶	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸	۲/۸۸	۸۰
۰/۷۵۲	۰/۲۲۵	۰/۰۲۳	۰/۰۲۳	۳/۶	۱۰۰

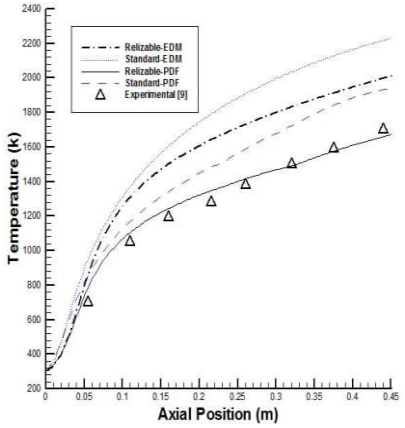
جهت حل معادلات حاکم از کد تجاری انسیس فلوئنت ۱۵ [۱۷] استفاده و برای حل عددی و مرتبط کردن معادلات سرعت و فشار، الگوریتم Simple انتخاب شده است. المان‌بندی با توجه به متقارن بودن محفظه فقط برای قسمت بالایی ، بصورت مربعی و توسط نرم افزار گمبیت ۲/۴/۶ انجام شده است. بررسی استقلال حل از شبکه‌بندی با استفاده از خاصیت دما (همانطور که در شکل ۲، دیده شده) انجام شد و با توجه به نتایج بدست آمده و بمنظور افزایش سرعت و کاهش زمان محاسبات تعداد ۲۱۰۰۰ المان برای این مسئله در نظر گرفته شد. حداقل دقت حل برای پیوستگی ، مومنتوم و بقای گونه‌ها 10^{-3} و برای تشعشع، انرژی و NO 10^{-6} در نظر گرفته شده است.



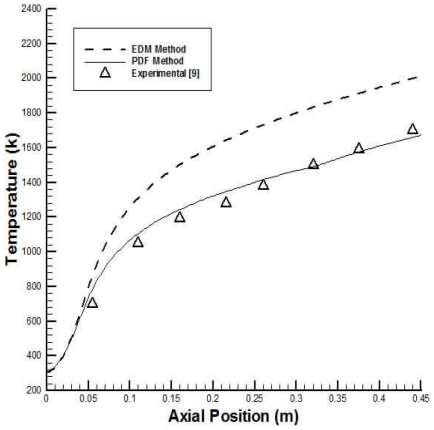
شکل ۲: بررسی استقلال حل از شبکه‌بندی با استفاده از خاصیت دما بر روی محور مرکزی محفظه‌ی احتراق

۵- نتایج و بحث

در ابتدا دقت و صحت نتایج توسط دو مدل از آشفتگی بررسی شد و نتایج آن در جدول ۲، و شکل ۳، مشاهده می‌شود. نتایج بدست آمده برای تمامی مدل‌ها مطابقت قابل قبولی نسبت به نتایج آزمایشگاهی مرجع [۹] داشتند. در هر کدام از دو روش احتراقی EDM و PDF بهترین مدل آشفتگی k-ε، تحقق‌پذیر شد که این نتایج با بررسی عددی محققان در زمینه‌ی مدل‌های آشفتگی جریان که در مرجع [۱۳] به آن اشاره شده است، مطابقت داشت. در شکل ۴، نیز بین روش‌های احتراقی EDM و PDF برای خاصیت دما روی محور مرکزی محفظه‌ی احتراق مقایسه‌ای انجام شده و همچنین میزان تفاوت هر یک از آن‌ها با نتایج داده‌های آزمایشگاهی [۹] مشخص است و مطابق با آن چه که دیده می‌شود نتایج مدل PDF دارای دقت بالاتری بوده و بسیار به داده‌های آزمایشگاهی نزدیک‌تر است.



شکل ۳: مقایسه مدل‌های آشفتگی k-ε در پیش‌بینی توزیع دما



شکل۴: مقایسه مدل‌های احتراقی در پیش‌بینی توزیع دما

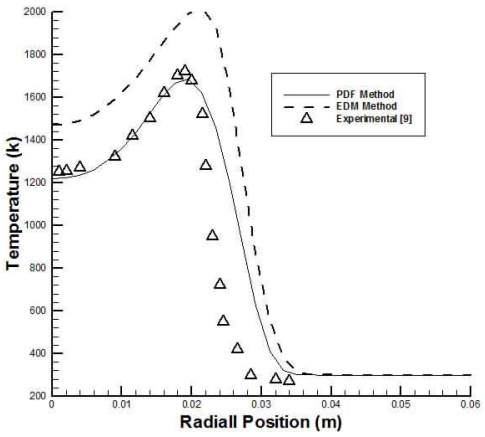
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1390.2.3.1.1]

جدول ۲: بیشینه‌ی دما در ۴ مقطع عرضی برای مدل‌های مختلف احتراق و آشفتگی k-ε

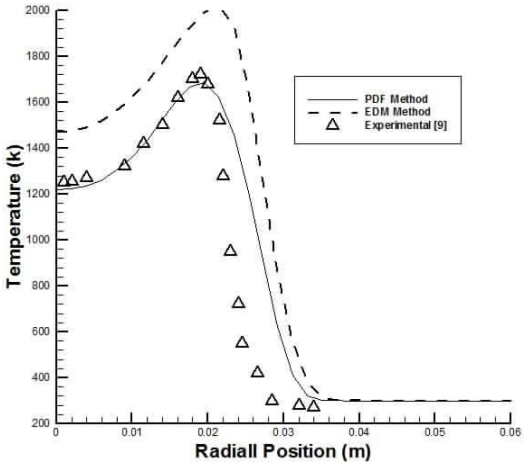
مدل آشفتگی k-ε	مدل احتراق	محور x = ۰/۱۵	x = ۰/۲	x = ۰/۲۵	x = ۰/۳
استاندارد	EDM	۲۰۲۲/۳۷	۲۰۶۲/۷	۲۰۹۶/۵	۲۱۲۶/۰۶
	PDF	۱۶۶۲/۱۷	۱۷۲۳/۵۱	۱۷۷۰/۰۸	۱۸۱۶/۷۶
تحقق پذیر	EDM	۲۰۲۱/۴۹	۲۰۵۸/۳۶	۲۰۸۳/۸۱	۲۱۰۳/۳
	PDF	۱۶۸۷/۱	۱۷۴۱/۲۵	۱۷۸۰/۳۳	۱۸۱۰/۳۱
Experimental Data		۱۷۲۰	۱۷۰۰	۱۷۰۰	۱۶۷۰

در شکل ۵، پیش‌بینی دما بر روی محورهای عرضی (۵- الف تا د) برای دو نوع مدل‌سازی EDM و PDF بصورت مقایسه‌ای با نتایج آزمایشگاهی [۹] نمایش داده شده است. همانگونه که در شکل ۴، برای محورهای میانی دیده شد، در مقاطع عرضی نیز هر دو مدل روند تغییرات مشابهی از خود ارائه نموده‌اند ولی دقت نتایج مدل PDF بسیار بالاتر بوده و نتایج قابل قبول‌تری نسبت به مدل EDM ارائه داده است. نحوه‌ی تغییرات کسر مخلوط (f) نسبت به محور مرکزی محفظه در شکل ۶، ارائه شده است. در این شکل نیز دقت نتایج PDF به خوبی دیده می‌شود تمامی این بررسی‌ها نشان‌دهنده‌ی ظرفیت بالای روش PDF برای پیش‌بینی دما و گونه‌ها است که البته این نتیجه با بررسی‌های انجام شده توسط بازدیدی و همکاران [۱۴] و همچنین بررسی تحلیلی با روش شعله‌های آرام [۱۵] هم‌خوانی و مطابقت دارد.

الف - X=۰/۱۵



ب - X=۰/۲

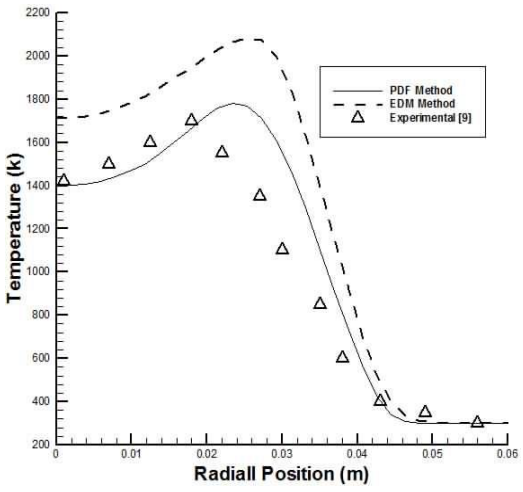


[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1390.2.3.1.1]

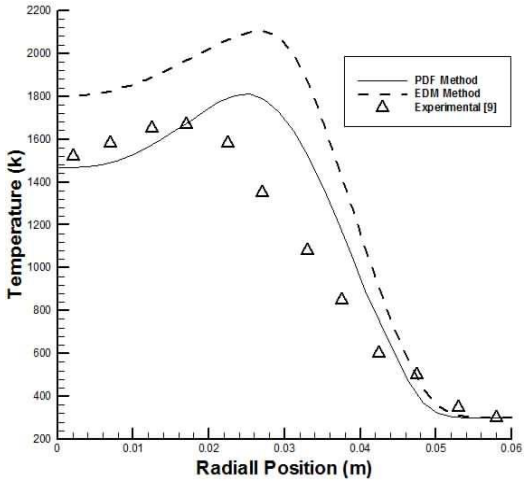
ج

X=۰/۲۵



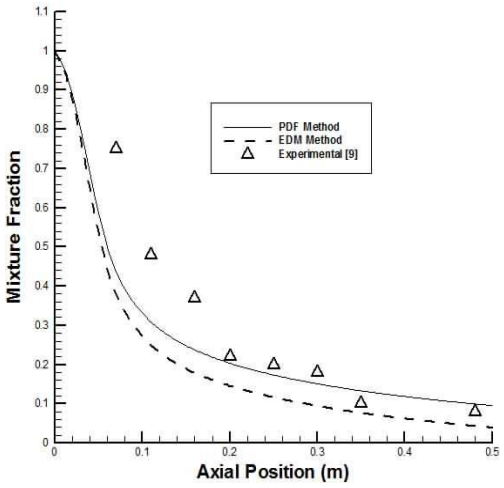
د

X=۰/۳



شکل۵: مقایسه مدل‌های احتراقی با استفاده از خاصیت دما در محورهای مختلف

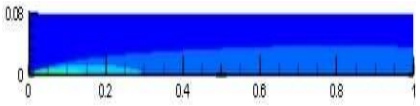
شکل۷، الف) کانتور سرعت را در کل طول محفظه‌ی احتراق و ب) کانتور و بردار سرعت در ابتدای محفظه را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل می‌توان دید بیش‌ترین سرعت در نازل سوخت و بر روی محور مرکزی اتفاق افتاده است. شکل ۸، نیز کانتور دما برای هوای ورودی در رطوبت‌های مختلف را بیان می‌کند. در شکل ۹، توزیع دما در طول محور مرکزی محفظه‌ی احتراق برای هوای ورودی با رطوبت‌های نسبی مختلف نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۸ و ۹، مشخص است با افزایش رطوبت، دما کاهش می‌یابد، هر چند که این کاهش دما بسیار اندک است اما می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر روی کاهش تشکیل NO_x داشته باشد.



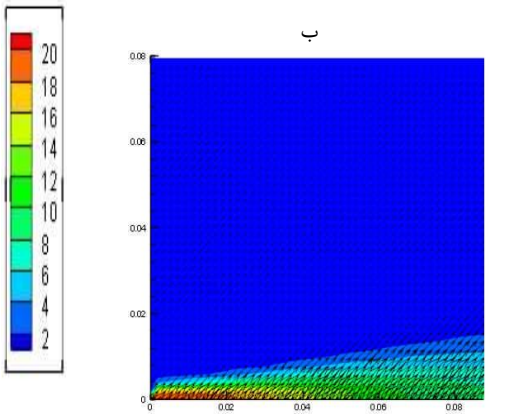
شکل ۶: توزیع کسر مخلوط بر روی محور مرکزی برای مدل‌های EDM و PDF

مقدار NO تولیدی بر روی محور تقارن محفظه در شش مقدار مختلف رطوبت هوای ورودی در شکل ۱۰، ارائه شده است. همانگونه که در شکل ۱۰، دیده می‌شود، افزایش رطوبت در هوای ورودی به محفظه بسیار بر روی تولید NOx موثر بوده است. میزان تشکیل NO در محفظه‌های احتراق سوخت‌های گازی بیش‌تر از طریق مکانیزم حرارتی انجام می‌شود و همانگونه که عنوان شد این مکانیزم جهت تشکیل NO نیاز به دمایی بالغ بر ۱۶۰۰ کلوین دارد. با توجه به پیوند سه گانه‌ی نیتروژن جهت شکست و ترکیب آن با اکسیژن و نهایتا تشکیل NO نیاز به انرژی زیاد و دمای بالا است، لذا کاهش بیشینه‌ی دما در محفظه می‌تواند به شدت کنترل‌کننده و کاهش دهنده‌ی تشکیل NO باشد. استفاده از تزریق آب به هوای ورودی (افزایش رطوبت نسبی هوای ورودی) باعث کاهش بیشینه‌ی دما در محفظه‌ی احتراق و به تبع آن کاهش شدید در میزان تولید NO می‌شود که در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ به خوبی نمود پیدا کرده است.

الف



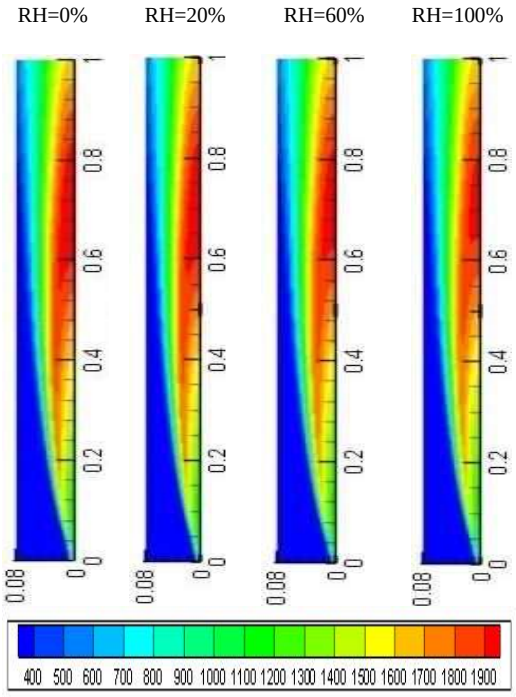
ب



[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

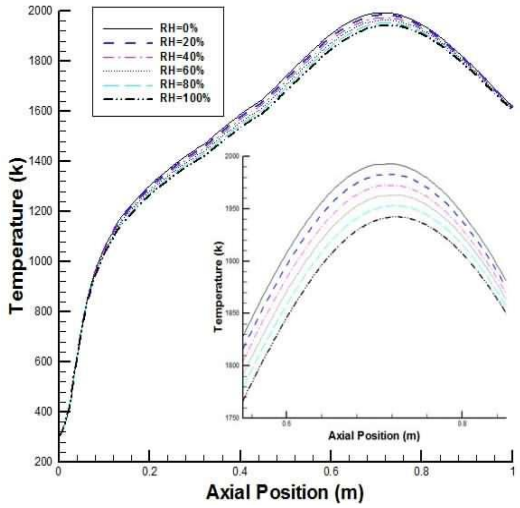
[DOR: 20.1001.1.20089813.1390.2.3.1.1]

شکل۷: کانتور سرعت الف) کل محفظه احتراق، ب) ابتدای محفظه

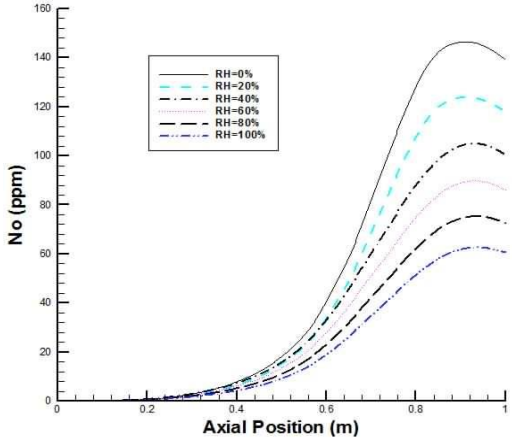


شکل ۸: کانتور دما درون محفظه احتراق برای مقادیر مختلف رطوبت نسبی هوای ورودی (کلوین)

شکل ۱۱، کانتور NOx را برای مقادیر مختلف رطوبت‌های نسبی هوای ورودی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل هم دیده می‌شود با افزایش درصد رطوبت نسبی مقادیر NOx تولیدی به شکل قابل توجهی کاهش می‌یابد و همانگونه که گفته شد این امر به علت کاهش دما و در پی آن کاهش شکست مولکولی نیتروژن اتفاق می‌افتد. در شکل ۱۲، مقایسه نتایج بدست آمده از روش PDF با نتایج آزمایشگاهی [۹] ، نتایج عددی تحقیقات چوایب و همکاران [۱۰] و وواللی و همکاران [۱۶] برای کسر حجمی آلاینده‌ی سوت نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود نتایج بدست آمده از روش PDF به نتایج تحقیقات گذشته نزدیک بوده و دارای دقت بالایی می‌باشد.



شکل ۹: تاثیر رطوبت نسبی هوای ورودی بر توزیع دما روی محور تقارن محفظه

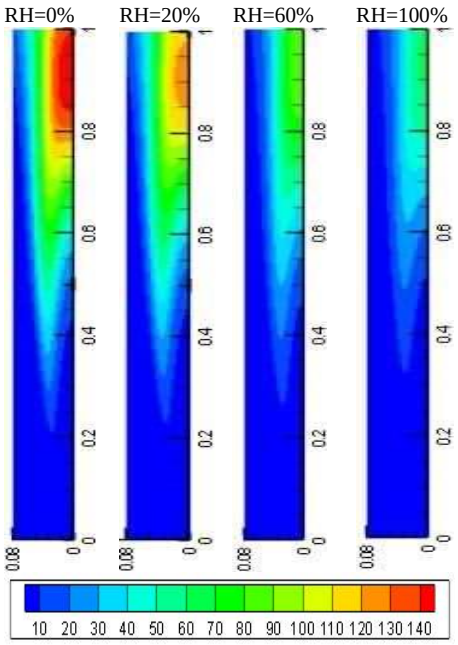


شکل ۱۰: تاثیر رطوبت نسبی هوای ورودی بر توزیع NO روی محور تقارن محفظه

تاثیر رطوبت نسبی هوای ورودی بر تولید سوت روی محور تقارن درون محفظه در شکل ۱۳، ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش درصد رطوبت نسبی، کسر حجمی دوده نیز کاهش می‌یابد. شکل‌گیری ذرات دوده در احتراق ناقص، و جایی که اتم‌های کربن نسوخته حضور دارند صورت می‌گیرد. لذا با اضافه کردن آب به هوای ورودی می‌توان اتم‌های کربن را درون محفظه کاهش داد و به تبع آن باعث کاهش شدید دوده تولیدی در محفظه شد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1390.2.3.1.1]

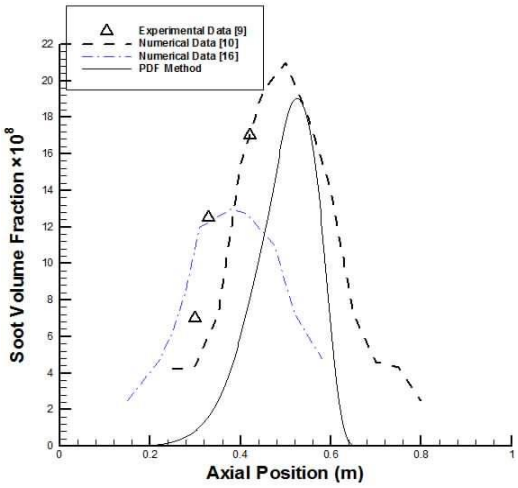


شکل۱۱: کانتور اکسید نیتروژن درون محفظه برای مقادیر مختلف رطوبت نسبی هوای ورودی (ppm)

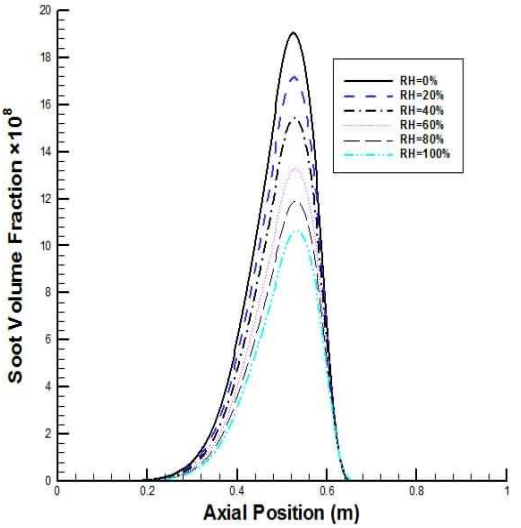
در جدول ۳، مقادیر دما و آلاینده‌های NO و سوت برای هوای ورودی با رطوبت‌های نسبی مختلف در خروجی محفظه‌ی احتراق ارائه شده است. با مقایسه‌ی مقادیر این جدول می‌توان بیان نمود که با افزایش رطوبت نسبی از صفر تا ۱۰۰٪ بیش ترین مقدار کاهش دما در خروجی محفظه ۹/۲۹ کلوین معادل ۱٪ بوده در حالی که میزان کاهش NO در خروجی از مقدار اولیه ۵۳/۱۳ پی‌پی‌ام به ۱۷/۹۲ پی‌پی‌ام و معادل ۶۷/۵٪ می‌باشد. این مقادیر نیز برای سوت از مقدار $۱۷/۳۲\times۱۰^{-۲۲}$ برای رطوبت صفر به مقدار $۴/۸۹\times۱۰^{-۲۲}$ برای رطوبت ۱۰۰٪ کاهش پیدا کرده که این کاهش معادل ۷۱/۸٪ می‌باشد.

جدول ۳: مقادیر دما و آلاینده‌های NO و دوده در مقطع خروجی در مقادیر مختلف رطوبت نسبی هوای ورودی

درصد رطوبت	دما (کلوین)	NO (PPM)	Soot Volume Fraction $\times ۱۰^{-۲۲}$
۰	۸۸۸/۷۱	۵۵/۱۳	۱۷/۳۲
۲۰	۸۸۶/۵۵۴	۴۶/۶۷	۱۲/۶۹
۴۰	۸۸۴/۳۹	۳/۰۰۳	۱۰/۵
۶۰	۸۸۳/۸۹	۲۵/۶۱	۹/۵۲
۸۰	۸۸۱/۷	۲۱/۵۲	۹/۲۷
۱۰۰	۸۷۹/۴۲	۱۷/۹۲	۴/۸۹



شکل ۱۲: کسر حجمی دوده روی محور مرکزی. مقایسه با تحقیقات گذشته



شکل ۱۳: تاثیر رطوبت نسبی هوای ورودی بر میزان دوده تولیدی روی محور تقارن محفظه

۶- نتیجه گیری

در این مقاله تاثیر تزریق آب به هوای ورودی (رطوبت نسبی هوای ورودی) بر توزیع دما و تولید آلاینده‌های NO_X و سوت به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. در این منظور یک محفظه‌ی احتراق دو بعدی متقارن محوری متان/هوا آشفته غیر پیش‌آمیخته مطابق با تحقیق آزمایشگاهی مرجع [۹] در نظر گرفته شده است. ابتدا مدل آشفتگی k-ε در دو حالت استاندارد و تحقق‌پذیر مقایسه شده و مشخص گردید که مدل تحقق‌پذیر نتایج بهتری برای پیش‌بینی خاصیت دما از خود نشان می‌دهد. سپس مقایسه‌ای بر مدل‌های احتراقی EDM و PDF انجام

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1390.2.3.1.1]

گرفت. نتایج نشان داد که مدل PDF دارای نتایج دقیق‌تری در مقایسه با مدل EDM برای دما و خصوصیات احتراق نسبت به نتایج آزمایشگاهی است. در ادامه تاثیر تزریق آب به هوای ورودی از طریق عدد رطوبت نسبی هوای ورودی بر تولید و انتشار آلاینده‌های NOx و سوت مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور میزان رطوبت نسبی از صفر تا ۱۰۰ درصد در شش مقدار مختلف ۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شد. این بررسی نشان داد که افزایش درصد رطوبت نسبی باعث کاهش بسیار خفیف در دمای محفظه شده در حالیکه نتیجه‌ی این امر کاهش چشم‌گیر آلاینده‌های NOx و سوت بود. از علل کاهش NOx و سوت می‌توان به کاهش دمای بیشینه (برای NOx) و همچنین کاهش اتم کربن نسوخته (برای سوت) در اثر افزایش رطوبت نسبی هوای ورودی اشاره کرد. در مقدار رطوبت صفر، دمای خروجی ۸۸۸/۷۱ کلوین و مقدار NO خروجی ۵۵/۱۳ پی‌پی‌ام بدست آمد که این مقادیر برای رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد به ۸۷۹/۴۲ کلوین و ۱۷/۹۲ پی‌پی‌ام کاهش یافتند. با افزایش رطوبت نسبی کسر حجمی سوت نیز افت قابل توجهی داشت بطوریکه در رطوبت صفر درصد $۱۷/۳۲\times۱۰^{-۲۲}$ و در حالت رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد این مقدار به $۴/۸۹\times۱۰^{-۲۲}$ رسید. بطور کلی می‌توان بیان نمود که افزایش درصد رطوبت نسبی هوای ورودی از صفر تا ۱۰۰ درصد باعث کاهش خفیف ۱٪ دما و از سوی دیگر کاهش چشم‌گیر ۶۷/۵٪ و ۷۱/۸٪ به ترتیب برای آلاینده‌های NOx و سوت شده و با توجه به عدم کاهش راندمان حرارتی و در نتیجه کاهش آلاینده‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که روش رطوبت‌دهی هوای ورودی می‌تواند یک روش بسیار مفید جهت کاهش انتشار آلاینده‌های NOx و سوت در احتراق غیر پیش‌آمیخته سوخت‌های گازی باشد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی	
D_k	ضریب پخش مولکولی، m^2/s
e	هوای خروجی
E	انرژی کل، j
f	کسر مخلوط
F'	تغییر کسر مخلوط
g	شتاب گرانشی، m^2/s
H	آنتالپی، j
h	آنتالپی ویژه، J/kg
K	انرژی جنبشی آشفتگی، m^2/s^2
L	طول محفظه احتراق، m
P	فشار استاتیک، Pa
Pr	عدد پرانتل، $Pr = C_p u / \lambda$
Re	عدد رینولدز، $Re = \rho u D_h / \mu$
R_k	نرخ واکنش گونه k
S_C	عدد اشمیت آشفتگی، $S_C = u / \rho D_k$
T	دما
u_i, u_j	سرعت محوری و شعاعی، m/s
u_i', v_j'	تغییر سرعت محوری و شعاعی، m/s
x	مسافت محوری، m
y	مسافت شعاعی، m
Y_k	کسر جرمی گونه k
علائم یونانی	
ρ	غلظت، kg/m^3
μ	ویسکوزیته دینامیکی، kg/m.s
ϑ	ویسکوزیته سینماتیکی، m^2/s
δ_{ij}	نماد کرونکر
τ	تنسور تنش، $kg/m.s^2$

مراجع

[1] S. R. Turns, An Introduction To Combustion, ,International Editions (2000).

[2] S. h. Hashemi, M. farzaneGord, A. ershadi, Investigation on NOX reduction 2D modeling Electric Arc Furnace (EAF), Proceedings of the Fourth International Exergy, Energy and Environment Symposium, (2009) 18-23

[3] L. X. Zhou, X. L. Chen, Studies on the effect of swirl on NO formation in methan/air turbulent combustion, Proceedings of the Combustion Institute, 29 (2002) 2235–2242.

[4] H. C. Magel, U. Schnell, K. R. G. Hein, Simulation of detailed chem-istry in a turbulent combustor flow, Proc Combust Instit, 26 (1996) 67.

[5] M. Ameri, Influence of fuel on gas turbine production and performanc, Iran 1st Conference on Combustion, Tarbiat Modares university, (2005).

[6] S. E. Hosseini, G. Bagheri, M. A. Wahid, Numerical investigation of biogas flameless

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1390.2.3.1.1]

combustion, Energy Conversion and Management, 81 (2014) 41–50.

[7] M. Ilbas, I. Yılmaz, Y. Kaplan, Investigations of hydrogen and hydrogen–hydrocarbon composite fuel combustion and NOx emission characteristics in a model combustor, International Journal of Hydrogen Energy, 30 (10) (2005) 1139-1147.

[8] R. Ebrahimi, S. Agha Najafi, Reburn effective method for NOx reduction, 12th International Conference on Mechanical Engineering, Tarbiat Modares university, (2004).

[9] S. J. Brookes, J. B. Moss, Measurements of soot production and thermal radiation from confined turbulent jet diffusion flames of methane, Combust Flame 116 (1999) 49–61.

[10] S. Chouaieb , W. Kriaa, H. Mhiri, P. Bournot, Presumed PDF modeling of microjet assisted CH4–H2/air turbulent Flames, Energy Conversion and Management, 120 (2016) 412–421.

[11] J. O. Hinze, Turbulence, New York: McGraw-Hill Publishing Co, (1975).

[12] L. Salentey, Etude expérimentale du comportement de brûleurs à jets séparés: Application à la combustion gaz naturel-oxygène pur, université de Rouen, (2002).

[13] K. M. Saqr, M. A. Wahid, Comparison of four eddy-viscosity turbulence models in the eddy dissipation modeling of turbulent diffusion flames, Int J Appl Math Mech, 7(19) (2011) 1–18.

[14] F. Bazdidi-Tehrani, H. Zeinivand, Presumed PDF modeling of reactive two-phase flow in a three dimensional jet-stabilized model combustor, Energy Convers Manage, 51 (2010) 225–34.

[15] F. Tabet, B. Sarh, I. Gokalp, Hydrogen–hydrocarbon turbulent non-premixed flame structure, Int J Hydrogen Energy, 34 (2009) 5040–7.

[16] R. M. Woolley, M. Fairweather, Conditional moment closure modelling of soot formation in turbulent, non-premixed methane and propane flames, Fuel, 88 (2009) 393–407.

[17] User guide Ansys Fluent 15.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1390.2.3.1.1]