

کاهش تولید آلاینده اکسید نیتروژن در محفظه احتراق هواچرخشی با استفاده از هوادهی در مجرای سوخت

علی ارشادی^۱، مهران رجیبی زرگرآبادی^۲

۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، rajabi@semnan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۰۹

چکیده

در این مقاله تحلیل عددی اثر همزمان هوادهی در مجرای سوخت و سرعت چرخش هوا بر تولید و انتشار اکسید نیتروژن در یک محفظه احتراق استوانه‌ای انجام شده است. در این راستا، مخلوط استوکیومتریک متان - هوا در یک محفظه هواچرخشی با احتراق آشفته و غیرپیش‌آمیخته در نظر گرفته شده است. تأثیر هوادهی در مجرای سوخت در نسبت هم‌ارزی ثابت و در اعداد چرخش صفر، ۰/۴۸، ۰/۶۸ و ۱/۰۸ بررسی شده است. برای مدل‌سازی آشفته‌گی جریان از مدل $k-\epsilon$ و جهت برهم‌کنش آشفته‌گی - احتراق دو مدل PDF و EDM اعمال شده‌اند. مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با مقادیر تجربی نشان می‌دهد که مدل PDF به‌همراه مکانیزم زلدویچ برای پیش‌بینی پارامترهای احتراق چرخشی مناسب است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در هر عدد چرخش، یک درصد هوادهی مشخص وجود دارد که به ازای آن علاوه بر احتراق کامل میزان تولید آلاینده NO به حداقل می‌رسد. همچنین بدون هوادهی در مجرای سوخت، اعمال چرخش در هوای ورودی منجر به افزایش دمای خروجی و افزایش تولید اکسیدهای نیتروژن در محفظه می‌شود. نتایج تحلیل عددی نشان می‌دهد که در عدد چرخش ۰/۴۸، هوادهی در مجرای سوخت به میزان ۲/۵ درصد، منجر به احتراق کامل، افزایش دمای متوسط خروجی و همچنین کاهش تولید آلاینده NO خواهد شد.

واژگان کلیدی

محفظه احتراق چرخشی، هوادهی در سوخت، اکسیدهای نیتروژن، شبیه‌سازی عددی

۱. مقدمه

توسعه شده است. کاربردهایی چون مصارف خانگی، حمل‌ونقل، صنایع پتروشیمی و بسیاری از موارد دیگر که اهمیت پژوهش در

با توجه به کاربردهای وسیع احتراق در زمینه‌های مختلف این پدیده جزء جدایی‌ناپذیر زندگی امروز، به‌خصوص در جوامع در حال

این حوزه را نشان می‌دهند [۱]. افزایش بازده احتراق و کاهش تولید آلایندةها دو هدف اصلی در تحقیقات حوزه احتراق می‌باشند که در بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از مهم‌ترین آلایندةهایی که در اثر فرایند احتراق تولید و منتشر می‌شوند می‌توان به خانواده اکسیدهای نیتروژن، اکسیدهای گوگرد، منو اکسید کربن و دوده اشاره کرد. مهم‌ترین و مضرترین آلایندة تولیدی، خانواده اکسیدهای نیتروژن است که عامل اصلی ایجاد باران‌های اسیدی و مه‌های آلوده به مواد شیمیایی می‌باشند [۲].

محققان پژوهش‌های گسترده‌ای درخصوص جریان‌های واکنشی در محفظه احتراق با هدف افزایش بازده حرارتی و کاهش تولید و انتشار آلایندةها انجام داده‌اند. این پژوهش‌ها مبتنی بر روش‌های تجربی - آزمایشگاهی، تحلیلی و همچنین عددی بوده است. در این راستا زکی و رجبی (۲۰۱۴) به بررسی تأثیر هوادهای در مجرای سوخت بر تولید اکسیدهای نیتروژن با استفاده از روش‌های عددی در یک محفظه احتراق بدون چرخش پرداختند [۳]. آنها نشان دادند که نسبت هم‌ارزی تأثیر قابل توجهی بر میزان تولید اکسید نیتروژن دارد و هوادهای باعث کاهش تولید اکسید نیتروژن در محفظه احتراق می‌شود. لورندی (۲۰۰۰) به بررسی تجربی اثر عوامل مهمی چون نسبت هوا به سوخت، فشار و دمای ورودی در محفظه احتراق برای سوخت‌های گاز و مایع پرداخت [۴]. ایلباس (۲۰۰۵) تحقیقاتی در مورد تأثیر نوع مدل تشعشع استفاده‌شده بر مدلسازی و پیش‌بینی اکسید نیتروژن در محفظه احتراق انجام داد [۵]. تابع جماعت و مهدی‌زاده (۲۰۰۶) تأثیر پاشش آب بر تولید آلایندة اکسید نیتروژن را مورد بررسی قرار دادند [۶]. از نتایج این تحقیق می‌توان به کاهش چشمگیر اکسید نیتروژن تولیدی و افزایش نشر مونو اکسید کربن اشاره کرد. ابراهیمی و آقاجفی (۲۰۰۵) روش دوباره‌سوزی در کاهش تولید اکسیدهای نیتروژن را مورد بررسی قرار دادند [۷]. مقیمان و همکاران (۲۰۱۱) در یک پژوهش آزمایشگاهی اثر افزایش دمای سوخت را بر عواملی چون درخشندگی شعله و همچنین میزان انتشار NO را مورد بررسی قرار دادند [۸]. آنها نشان دادند که افزایش دمای سوخت ورودی بین ۲۴۰ تا ۳۰۰ درجه، کاهش ۷ درصدی در تولید NO را نتیجه می‌دهد. استفاده از جریان‌های چرخشی در طراحی سیستم‌های احتراقی به‌منظور ایجاد بازده بالا، پایداری بیشتر شعله و کاهش آلایندةها بسیار مورد توجه بوده

است. برخی از این پژوهش‌ها در زمینه طراحی هندسی چرخنده‌ها^۱ (سویلرها) انجام شده که دارای اهدافی چون پایداری شعله [۹-۱۰]، کاهش حد خاموشی شعله [۱۱]، طراحی زاویه‌های بهینه در پره‌های سویلر [۱۲] و به‌طور کلی افزایش بازده حرارتی و کاهش آلایندةها [۱۳-۱۴] می‌باشند.

ژو و همکاران (۲۰۰۲) در یک تحقیق آزمایشگاهی اثر چرخشی بودن هوای ورودی را در چهار میزان چرخش بر تولید اکسیدهای نیتروژن را در یک احتراق غیرپیش‌آمیخته بررسی نمودند [۱۵]. آنها بیان کردند که افزایش میزان چرخش در چرخش‌های کم (عدد چرخش^۲ کمتر از ۰/۵) افزایش دمای خروجی و کاهش NO و همچنین در مقادیر چرخش زیاد (بزرگتر از ۰/۵) کاهش جزئی دمای خروجی دیده می‌شود. وانگ فنگ و همکاران (۲۰۱۴) اثر برهم‌کنش آشفستگی و احتراق را در محفظه استوانه‌ای بررسی کردند [۱۶]. آنها نشان دادند که نوع مدل آشفستگی بر پیش‌بینی احتراق و میزان تولید NO بسیار مؤثر می‌باشد. عرب‌نژاد و همکاران (۲۰۱۵) نیز در پژوهشی به بررسی تأثیر مقدار چرخش جریان بر پایداری شعله در یک احتراق پیش‌آمیخته پرداختند [۱۷]. عدم وابستگی پایداری به چرخش و ایجاد ناحیه بازگردشی داخلی و حرکت آن به سمت بالادست بر اثر افزایش چرخش از نتایج این تحقیق بوده است. ایلباس و همکاران (۲۰۱۶) نیز در تحقیقی مشابه به بررسی اثر چرخش بر خصوصیات احتراق سوخت‌های گازی پرداختند و عنوان کردند که ارتباط مستقیمی بین میزان چرخش و بیشینه دما درون محفظه وجود دارد [۱۸]. آنها نهایتاً مقداری بهینه جهت عدد چرخش برای مسئله مورد نظر خود ارائه نمودند. با توجه به مطالعات انجام‌شده هوادهای و چرخش دو عامل مهم و تأثیرگذار بر پارامترهای احتراق و تولید اکسیدهای نیتروژن می‌باشند.

اگرچه در تحقیقات پیشین اثر این دو عامل به‌خوبی بررسی شده است، اما این مطالعات فاقد بررسی همزمان وجود چرخش و هوادهای و تأثیر همزمان آنها بر خصوصیات احتراق هستند. در حالی که پیش‌بینی می‌شود وجود همزمان این دو عامل تأثیر قابل توجهی بر الگوی جریان، نحوه اختلاط سوخت و هوا و همچنین تولید آلایندةها داشته باشد. بر این اساس هدف اصلی این مقاله بررسی عددی تأثیر همزمان چرخش و هوادهای بر خصوصیات احتراق (دما و اکسیدهای نیتروژن) در یک محفظه احتراق چرخشی آشفته است.

با فرض شبه‌پایا نرخ تشکیل NO به‌صورت رابطه ۵ به‌دست

می‌آید.

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_{f1}[O][N_2] \quad (5)$$

به‌طوری‌که در این رابطه k_{f1} ضریب نرخ واکنش رفت در رابطه ۲ می‌باشد. غلظت گونه $[O]$ براساس فرض تعادل جزئی^۶ به‌دست می‌آید. معادله انتقال NO مشابه با دیگر گونه‌ها در شرایط پایا مطابق با معادله زیر بیان می‌شود [۱۹]:

$$\nabla \cdot (\rho u Y_{NO}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{NO}) + S_{NO} \quad (6)$$

در این معادله Y_{NO} کسر جرمی اکسید نیتروژن و S_{NO} ترم چشمه آن بوده که با توجه به نوع سازوکار انتخاب‌شده (حرارتی) تعیین خواهد شد [۳].

۳. هندسه و شرایط مرزی

نمای شماتیک کلی از محفظه احتراق مورد بررسی در پژوهش حاضر در شکل ۱ ارائه شده است. محفظه احتراق دارای هندسه متقارن محوری می‌باشد. در مرکز محفظه نازل تزریق سوخت قرار داده شده و جریان هوای ورودی به‌صورت چرخشی پیرامون آن قرار داده شده است. طول محفظه ۹۰ و قطر آن ۸ سانتی‌متر است. در جدول ۲ ابعاد محفظه ارائه شده است.

نتایج آزمایشگاهی برگرفته از تحقیقات انجام‌شده توسط ژو و همکاران (۲۰۰۲) می‌باشد [۱۵]. این نتایج در شرایط استاندارد دما و فشار محیطی انجام شده‌اند. میزان دبی هوای ورودی ۸/۹ متر مکعب بر ثانیه و سوخت برابر ۰/۸۹۳۲ متر مکعب بر ثانیه و همچنین شرایط احتراق استوکیومتریکی می‌باشد. دمای دیواره محفظه ۵۰۰ کلوین و دمای هوا و سوخت ورودی ۳۰۰ کلوین اعمال شده است. در خروجی محفظه احتراق نیز مطابق شرایط آزمایشگاهی، شرط مرزی فشار محیط اعمال شده است. اعداد چرخش هوای ورودی از رابطه ۷ قابل محاسبه خواهد بود. این عدد براساس حاصل تقسیم شار تکانه زاویه‌ای در جهت محور (G_ϕ) بر حاصل ضرب شار تکانه محوری در جهت محور (G_R) در شعاع R مشعل تعریف می‌شود [۱۵ و ۱۷]:

$$SN = \frac{G_\phi}{G_R R} \quad (7)$$

زاویه ورودی هوا به‌ترتیب صفر، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه در نظر گرفته شده که اعداد چرخشی معادل با صفر، ۰/۴۸، ۰/۶۸ و ۱/۰۸ برای آنها به‌دست می‌آید.

۲. مدل‌سازی ریاضی

با توجه به نوع مسئله معادلات حاکم جهت تعیین میدان جریان و توزیع دما شامل معادلات اساسی بقای جرم، مومنتوم، انرژی، بقای گونه‌ها و معادلات مربوط به مدل جریان آشفته و مدل برهم‌کنش آشفته‌گی و احتراق می‌باشند. با توجه به هندسه متقارن محفظه احتراق مورد نظر، از شرایط تقارن محوری جهت کاهش زمان محاسباتی استفاده شده است. همچنین با توجه به نوع جریان شرایط تراکم‌ناپذیری و پایا نیز فرضیات قابل قبولی می‌باشند. براساس شرایط مذکور فرم کلی تمامی معادلات بقا را می‌توان به‌صورت رابطه ۱ ارائه نمود [۳]:

$$\nabla(\rho u \phi - \Gamma_\phi \nabla \phi) = S_\phi \quad (1)$$

معادله ۱ متشکل از جملات انتقال جابه‌جایی متغیر ϕ و جملات نفوذی (پخشی) متغیر ϕ می‌باشند. همچنین Γ_ϕ معرف ضریب نفوذ موثر است. جهت مدل‌سازی آشفته‌گی جریان، تاکنون مدل‌های متنوعی ارائه شده که در این میان بر اساس پژوهش‌های پیشین [۲-۳، ۱۶] در مسئله پیش‌رو از مدل دو معادله‌ای k-ε استاندارد استفاده شده است. جهت برهم‌کنش اثر آشفته‌گی و نوسانات خصوصیات جریان بر نرخ تولید و مصرف گونه‌ها در واکنش احتراق، از دو نوع مدل اضمحلال گردابه‌ای^۲ (EDM) و تابع چگالی احتمال^۴ (PDF) استفاده شده است. جزئیات مدل‌ها در مراجع [۱۹-۲۰] موجود می‌باشند.

۲-۱. مدل‌سازی تشکیل اکسیدهای نیتروژن

تشکیل اکسیدهای نیتروژن در محفظه احتراق را می‌توان به تنهایی با تولید و انتشار اکسید نیتروژن، NO بررسی نمود؛ زیرا به‌طور تقریبی ۹۰ درصد اکسیدهای نیتروژن تشکیل شده، NO می‌باشند [۲]. با توجه به نوع سوخت (هیدروکربن) دو سازوکار اصلی حرارتی و سریع^۵ جهت تولید اکسیدهای نیتروژن وجود دارد. سهم تولید NO ناشی از حرارت نسبت به دیگر سازوکارها بسیار بیشتر بوده و با تقریب خوبی می‌توان از مابقی روش‌ها صرف‌نظر کرد که در این تحقیق جهت بررسی تولید NO فقط سازوکار حرارتی در نظر گرفته شده است [۳ و ۲۷]. واکنش‌های تولید اکسیدهای نیتروژن در روش حرارتی به شکل زیر هستند [۱]:



جدول ۱. توابع و ضرایب معادلات حاکم در جریان واکنشی (معادله ۱) [۲]

معادله	φ	Γ_φ	S_φ
پیوستگی	1	0	0
مومنتوم	u_j	μ_{eff}	$\frac{\partial}{\partial x_j} \mu_{eff} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{\partial p}{\partial x_i}$
انرژی جنبشی آشفتنگی	k	$\mu + \mu_t / \sigma_k$	$G^* - \rho \varepsilon$
انرژی اتلاف آشفتنگی	ε	$\mu + \mu_t / \sigma_\varepsilon$	$C_{\varepsilon 1} G - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon$
کسر جرمی	Y_i	$\mu + \mu_t / \sigma_k$	R_i
واریانس کسر مخلوط	g	$\mu + \mu_t / \sigma_k$	$2 \frac{\mu_t}{\sigma_t} \left(\frac{\partial f}{\partial x_m} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial x_m} \right) - C_g \rho g \frac{\varepsilon}{k}$
انتالپی کل	h	$\mu + \mu_t / \sigma_k$	$-S_{rad}^{**}$

جدول ۲. ابعاد محفظه احتراق به میلی متر

D1	D2	D3	Df	Lf
۸	۱۰	۳۰	۸۰	۹۰۰

۴. حل عددی

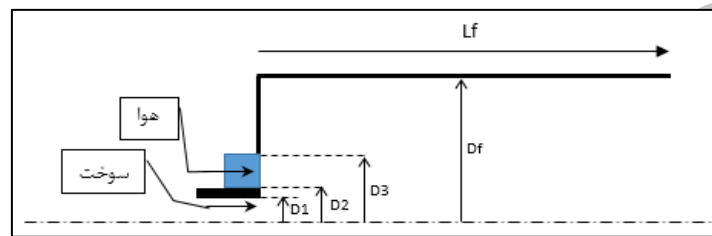
با توجه به هندسه متقارن محوری، جهت کاهش زمان محاسباتی محفظه مورد بررسی به صورت دوبعدی متقارن محوری در نظر گرفته شده است. شکل ۲ شبکه بندی و دامنه محاسباتی محفظه احتراق مورد بررسی را نشان می دهد. امان ها به صورت چهاروجهی بوده و با توجه به کاهش نرخ تغییرات در راستای طول محفظه، با نسبت رشد ۱/۰۵ در راستای طول محفظه در نظر گرفته شده اند. بررسی استقلال حل عددی از شبکه بندی با استفاده از توزیع دما در محور محفظه انجام شده است. تعداد ۶۰۰۰۰ امان برای کل محدوده به عنوان حل مستقل از شبکه به دست آمده است. در شبیه سازی عددی مسئله حاضر حل معادلات با استفاده از کد تجاری انسیس فلوئنت ۱۶ [۱۹] انجام شده است. حل عددی معادلات براساس روش حجم محدود و به صورت مرتبه دو و پیشرو انجام شده اند. جهت ارتباط بین معادلات سرعت و فشار، الگوریتم سیمپل^۲ اعمال شده است. حل معادلات به صورت عددی و مبتنی بر روش تکرار بوده و حداقل دقت حل برای پیوستگی - مومنتوم و گونه ها از مرتبه 10^{-3} و برای معادلات انرژی و NO از مرتبه 10^{-6} در نظر گرفته شده است.

۵. تحلیل نتایج

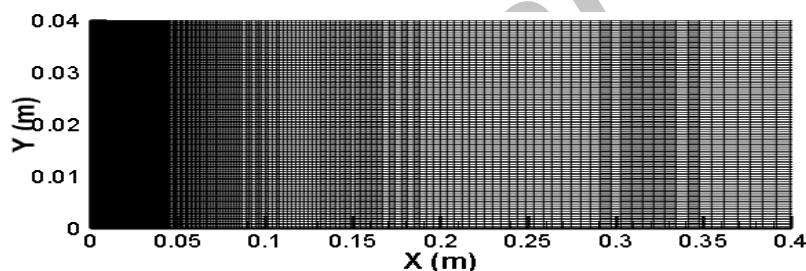
۵-۱. اعتبارسنجی حل عددی

در این تحقیق، محفظه احتراق مورد نظر برگرفته از پژوهش آزمایشگاهی ژو و همکاران [۱۵] می باشد. از اینرو، برخی نتایج حاصل از شبیه سازی عددی حاضر با مقادیر تجربی موجود مقایسه شده است. در شکل ۳ توزیع دمای به دست آمده از نتایج عددی با استفاده از دو مدل EDM و PDF به همراه مقادیر تجربی نمایش داده شده است. نمودارهای ارائه شده در دو مقطع عرضی محفظه به فاصله های ۵ و ۷۰/۵ سانتی متر و در عدد چرخش ۰/۶۸ می باشند. اگرچه مدل PDF نسبت به مدل EDM توزیع دما را به خوبی پیش بینی نموده است، اما اختلاف نتایج آن با مقادیر تجربی در مرکز محفظه قابل ملاحظه است. شکل ۴، مقادیر NO برای مقاطعی به فاصله محوری ۵ و ۷۰/۵ سانتی متری و در عدد چرخش ۰/۶۸ را ارائه می دهند. مطابق شکل ۴، توزیع NO به دست آمده از مدل PDF به همراه استفاده از سازوکار زلدوویچ مطابقت قابل قبولی با مقادیر تجربی [۱۵] دارد. همان گونه که در نمودار شکل های ۳ و ۴ مشاهده می شود، نتایج شبیه سازی عددی با استفاده از مدل PDF، در مقایسه با نتایج تجربی، از دقت

میزان چرخش از عدد چرخش $0/48$ به بالا، کاهش میزان دمای احتراق را نتیجه می‌دهد. توزیع دما در صفحه مرکزی محفظه احتراق برای اعداد چرخش مختلف در شکل ۷ ارائه شده‌اند. همانگونه که در شکل مشخص است، در اثر افزایش چرخش هوای ورودی به محفظه، منطقه دمابالای محفظه کاهش و بیشترین دمای ایجاد شده در محفظه افزایش یافته است. براساس مرجع [۱۸] دلیل کاهش منطقه دمابالا در حالت‌های ورودی چرخشی را می‌توان اختلاط زود هنگام هوا و سوخت باتوجه به نوع توزیع هوای ورودی در مقاطع نزدیکتر به دیواره عنوان کرد.



شکل ۱. نمای شماتیک محفظه احتراق چرخشی [۱۵]



شکل ۲. شبکه بندی محفظه احتراق چرخشی

مختلف، از شرایط بدون هوادهی تا ۱۰ درصد (صفر، ۱، ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد)، برای هر یک از اعداد چرخش انجام شده تا تأثیر همزمان این دو عامل بر احتراق بررسی گردد. در تمامی مدل‌ها شرایط استوکیومتریکی حفظ شده و شبیه‌سازی عددی فرایند احتراق با استفاده از مدل PDF انجام شده است. جهت حفظ شرایط استوکیومتریکی میزان درصد هوای اضافه شده به مجرای سوخت از میزان هوای ورودی کسر شده است. توزیع دما در حالات مختلف هوادهی برای $SN=0/48$ در شکل ۹ آمده است. مشاهده می‌شود که در یک عدد چرخش ثابت با افزایش درصد هوادهی از صفر تا ۲/۵ درصد، بیشینه دما در محفظه افزایش یافته و در مقادیر هوادهی بالای ۲/۵ درصد این مقدار دما در محفظه کاهش یافته است. دلیل کاهش دما در هوادهی‌های بالا، تشکیل شعله نامناسب است که با افزایش میزان چرخش، شعله ایجاد

بالاتری نسبت به مدل EDM برخوردار است. در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب دمای میانگین محفظه و میزان متوسط اکسیدهای نیتروژن در مقطع خروجی برای اعداد چرخش مختلف رسم شده است. مقایسه دو مدل PDF و EDM نشان می‌دهد که نتایج به دست آمده از مدل PDF مطابقت مناسبتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. براساس شکل ۵ بیشترین دمای خروجی در عدد چرخش $0/48$ و کمترین دما نیز در حالت بدون چرخش است. به‌طور کلی می‌توان چنین عنوان کرد که چرخش هوای ورودی در اعداد چرخش کمتر از $0/48$ سبب افزایش بازده حرارتی و افزایش

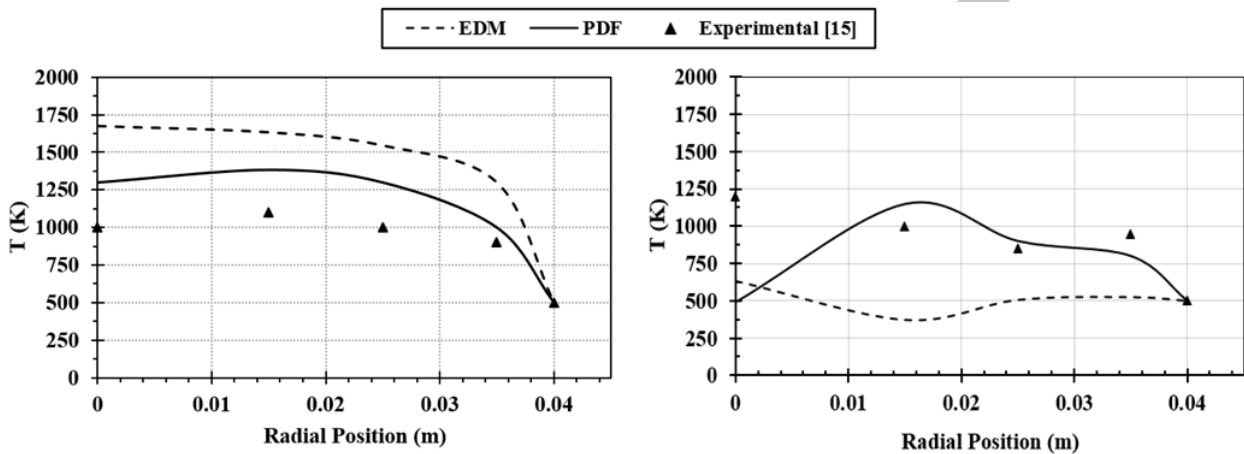
شکل ۸ خطوط جریان را در دو حالت با چرخش و بدون چرخش به صورت مقایسه‌ای نشان می‌دهد. منطقه چرخشی در گوشه محفظه و در فاصله محوری X مشاهده می‌شود. در اثر افزایش چرخش هوای ورودی کاهش فاصله X و نزدیک شدن گردابه به دیواره ورودی دیده می‌شود. این کاهش در اثر افزایش مؤلفه مماسی سرعت ورودی نتیجه می‌شود که همان علت عنوان شده برای کاهش محدوده دمابالا می‌باشد.

۲-۵. آثار هوادهی بر احتراق چرخشی

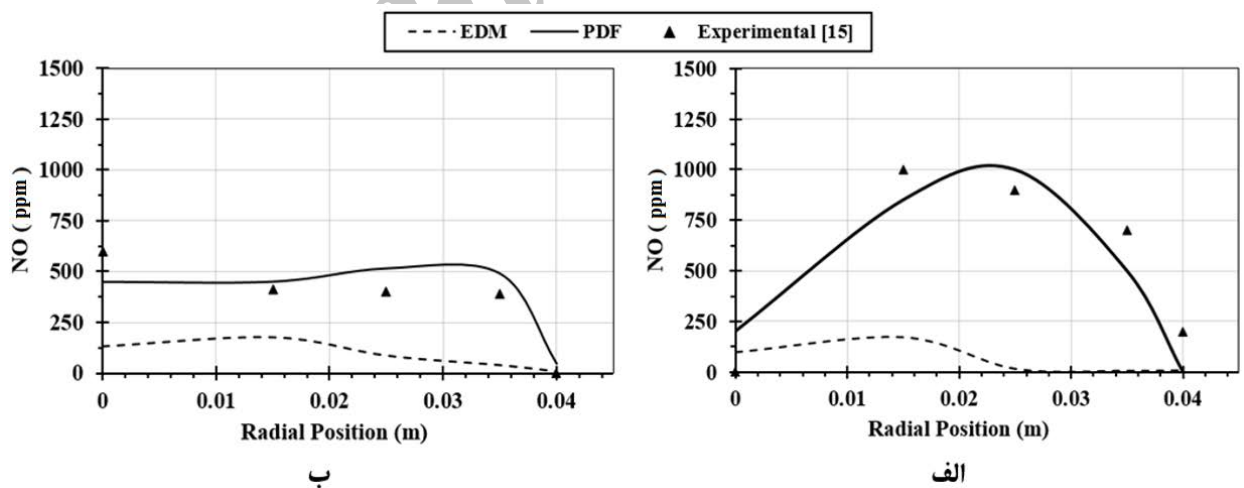
با توجه به تأثیر هوادهی بر عملکرد محفظه‌های احتراق چرخشی، در این تحقیق تأثیر همزمان این دو عامل بر توزیع دما و تولید اکسیدهای نیتروژن بررسی شده است که در این بخش به آن پرداخته خواهد شد. مقدار درصد هوادهی در سوخت، در پنج مقدار

مختلف هوادہی، برای دو حالت احتراق چرخشی و بدون چرخش در شکل ۱۱ رسم شده است. در اعداد چرخش صفر و ۰/۴۸، با افزایش هوادہی تا ۲/۵ درصد، دما بر محور تقارن افزایش پیدا کرده و در هوادہی‌های بالاتر از آن کاهش دما دیده می‌شود. مطابق شکل ۱۱، با افزایش درصد هوادہی بالاتر از ۲/۵ درصد، تشکیل شعله و افزایش دما، در فاصله کمتری نسبت به ورودی هوا و سوخت اتفاق می‌افتد. دلیل این اتفاق را می‌توان اختلاط سریعتر سوخت و هوا با توجه به هوادہی بالا در سوخت دانست که منجر به تشکیل شعله در فاصلہای نزدیکتر می‌شود.

شده، ظرفیت هوادہی کمتری را در مجرای سوخت از خود نشان می‌دهد. در شکل ۱۰ مقادیر گونه‌های CH_4 و O_2 ، CO_2 ، H_2O در خروجی، نسبت به میزان هوادہی در دو حالت عدد چرخش ارائه شده‌اند. همان‌گونه که مشخص است در اثر افزایش میزان هوادہی، افزایش اکسیژن و کاهش H_2O دیده می‌شود. نحوه تغییر O_2 و H_2O کاملاً معکوس است. افزایش میزان اکسیژن در خروجی نشان‌دهنده احتراق ناقص متان در محفظه است؛ لذا هوادہی زیاد در سوخت سبب ایجاد شعله نامناسب و احتراق ناقص می‌شود. توزیع دما در راستای محور تقارن در حالت‌های



شکل ۳. مقایسه توزیع دما با مقادیر تجربی در عدد چرخش ۰/۶۸؛ الف) $x=5$ cm، ب) $x=70.5$ cm



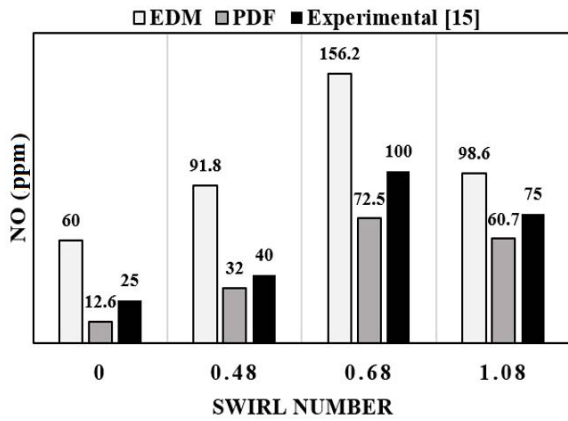
شکل ۴. مقایسه توزیع NO با مقادیر تجربی در عدد چرخش ۰/۶۸؛ الف) $x=5$ cm، ب) $x=70.5$ cm

اکسیدهای نیتروژن دیده شده که در اثر افت شدید دمای بیشینه محفظه بوده است. در حالت بدون چرخش، افزایش میزان هوادہی تا ۲/۵ درصد، سبب افزایش تولید اکسیدهای نیتروژن شده (شکل

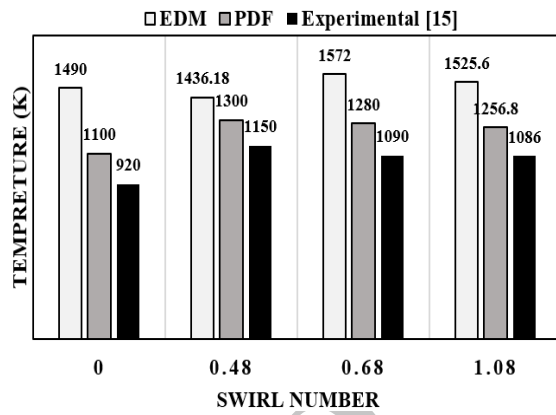
شکل ۱۲ توزیع اکسیدهای نیتروژن در مقادیر مختلف هوادہی در اعداد چرخش صفر و ۰/۴۸ را نشان داده است. در هر دو حالت افزایش میزان هوادہی بالای ۵ درصد کاهش

می‌شود (شکل ۱۲ ب).

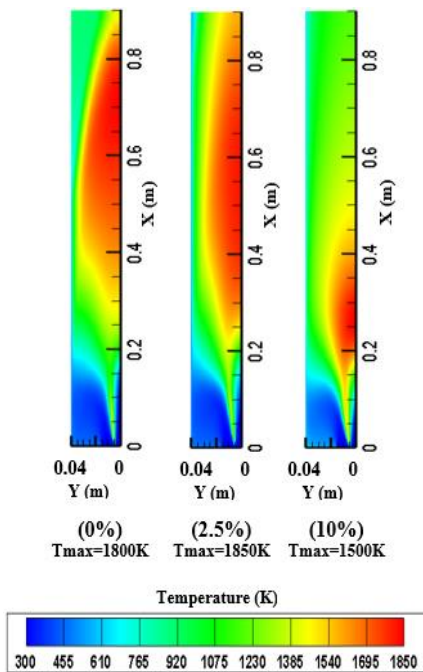
۱۲ الف) که این روند در حالت چرخشی بصورت معکوس دیده



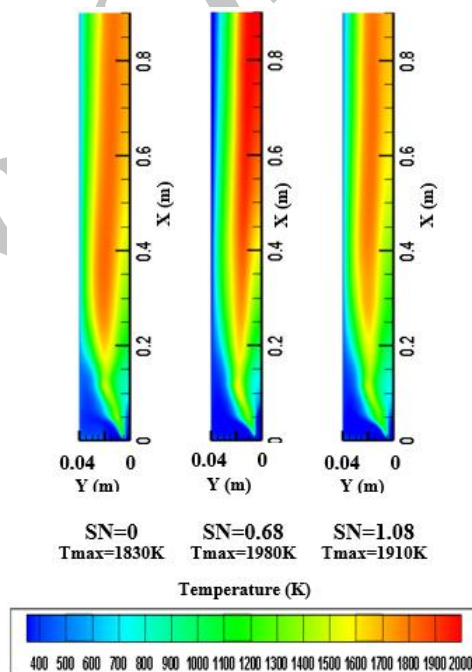
شکل ۶. مقایسه نتایج عددی میانگین تولید اکسید نیتروژن با مقادیر تجربی در اعداد چرخش مختلف



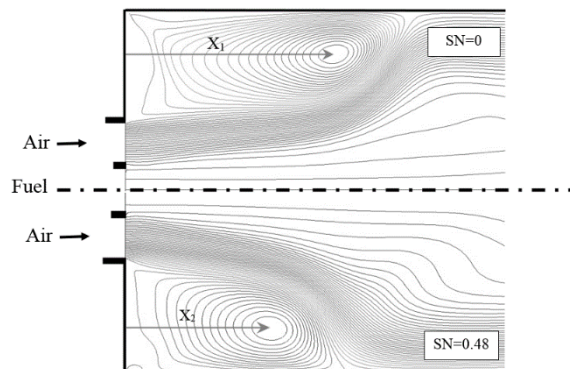
شکل ۵. مقایسه نتایج عددی میانگین دمای خروجی با مقادیر تجربی در اعداد چرخش مختلف



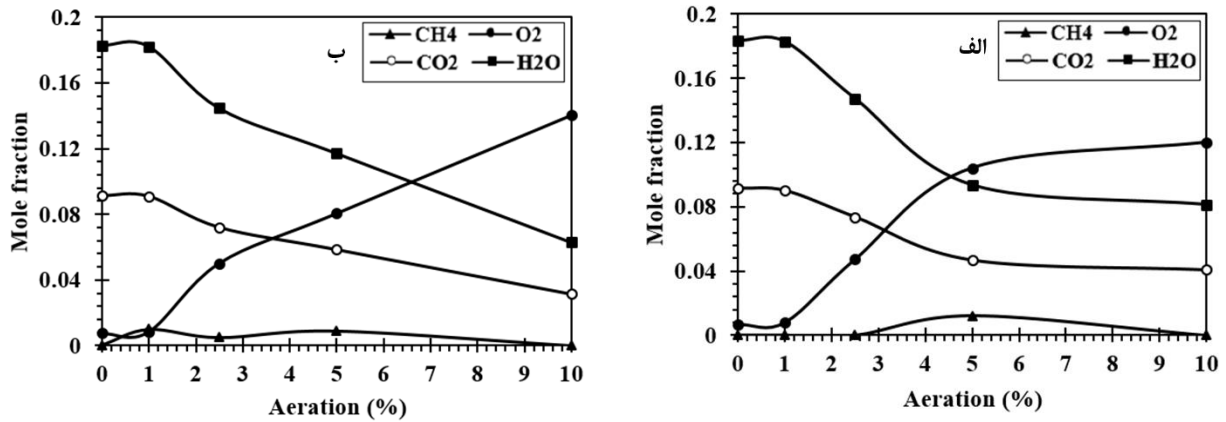
شکل ۹. تاثیر هوادهی بر توزیع دما در SN=۰/۴۸



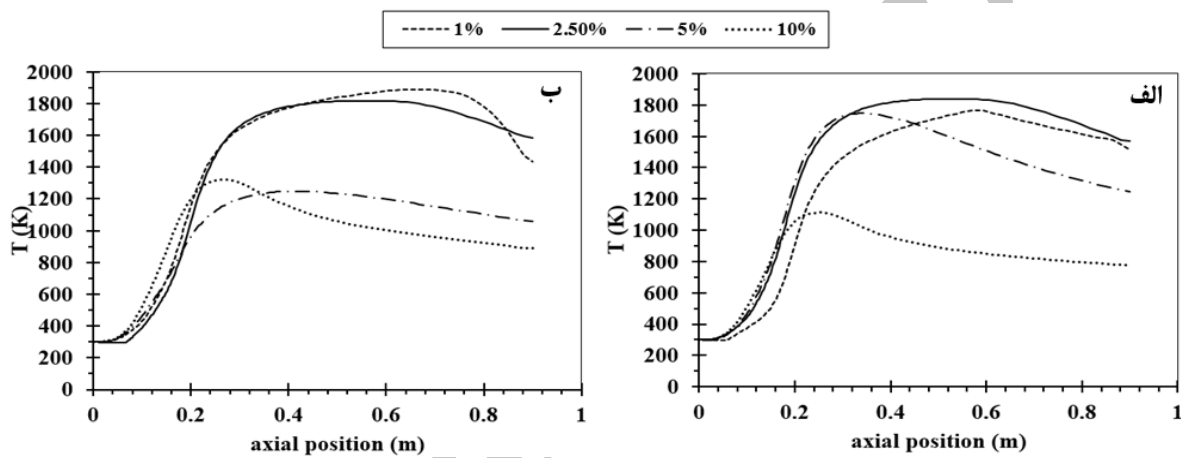
شکل ۷. تاثیر چرخش بر توزیع دمای محفظه



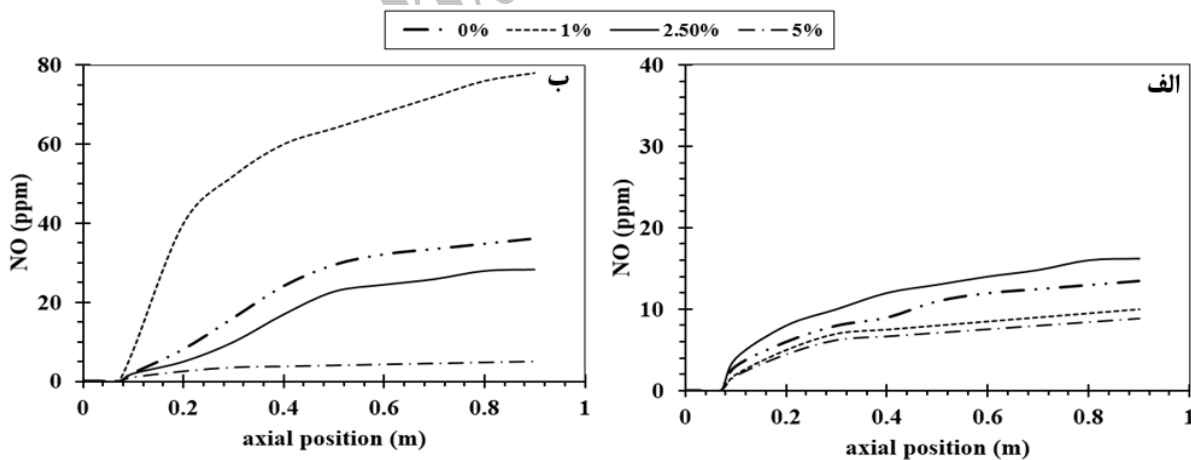
شکل ۸. خطوط جریان و بردارهای سرعت در دو حالت چرخشی



شکل ۱۰. کسر مولی آب، دی اکسید کربن، اکسیژن و متان در مقطع خروجی در درصدهای هوادهای مختلف (الف) SN=0، (ب) SN=0.48



شکل ۱۱. توزیع محوری دما نسبت به درصد هوادهای مختلف، (الف) SN=0، (ب) SN=0.48

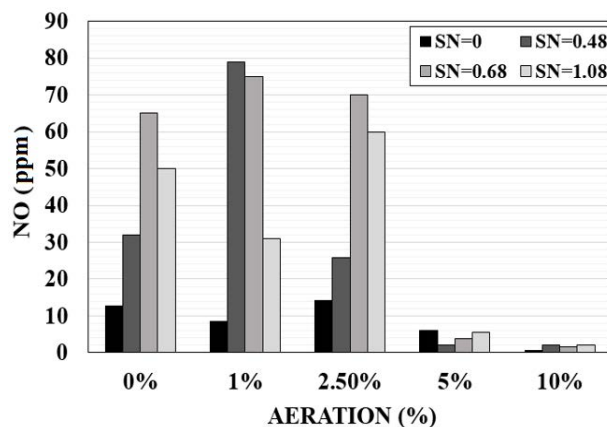


شکل ۱۲. توزیع محوری NO نسبت به درصد هوادهای مختلف، (الف) SN=0، (ب) SN=0.48

چرخش دیده می‌شود. بیشترین دمای خروجی در حالت هوادهای ۲/۵ درصد و کمترین آن مربوط به درصدهای هوادهای بالا بوده که دلیل آن عدم تشکیل شعله مناسب در این مدل‌ها است. به‌طور متوسط بیشترین دمای خروجی در عدد چرخش ۰/۴۸ و کمترین

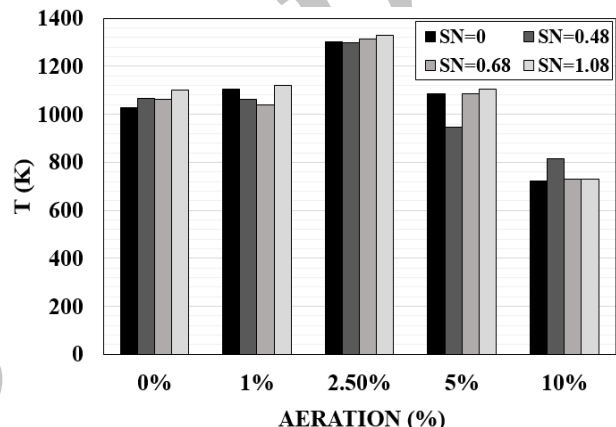
در شکل ۱۳ مقادیر متوسط دمای خروجی از محفظه در حالت‌های مختلف چرخش و درصد هوادهای به‌صورت ستونی رسم شده‌اند. مطابق شکل، با افزایش درصد هوادهای ابتدا افزایش دما و سپس کاهش دمای خروجی از محفظه، برای اعداد مختلف

حالات چرخش یک مقدار بیشینه اکسیدهای نیتروژن وجود دارد که برای اعداد چرخش ۰/۴۸ و ۰/۶۸ در حالت هوادهی ۱ درصد و برای بدون چرخش و ۱/۰۸ در حالت هوادهی ۲/۵ درصد می باشد. لذا براساس این نتایج، باید جهت کاهش تولید اکسیدهای نیتروژن در اعداد چرخش ۰/۴۸ و ۰/۶۸، میزان هوادهی بیشتر از ۱ درصد و برای مقادیر چرخش صفر و ۱/۰۸، هوادهی بالای ۲/۵ درصد انتخاب شود. برای تمامی اعداد چرخش در درصدهای هوادهی ۵ و ۱۰ درصد میزان تولید و انتشار اکسید نیتروژن بسیار کاهش یافته که دلیل اصلی آن را می توان کاهش دمای ماکزیمم و یکنواخت شدن دما در محفظه عنوان کرد.



شکل ۱۴. اکسید نیتروژن تولیدی (خروجی) از محفظه در اعداد چرخش مختلف نسبت به درصد هوادهی

آن در چرخش ۱/۰۸ به دست آمده است. بیشترین دمای خروجی از محفظه ۱۳۳۰ کلوین در عدد چرخش ۱/۰۸ و هوادهی ۲/۵ درصد می باشد. افزایش هوادهی تا ۲/۵ درصد در عدد چرخش ۰/۴۸ سبب افزایش دمای خروجی از مقدار ۱۰۵۰ به ۱۳۱۰ کلوین شده است. به طور تقریبی چنین روندی نیز برای مابقی مقادیر چرخش هوای ورودی دیده می شود. مقادیر متوسط اکسیدهای نیتروژن در مقطع خروجی محفظه در حالت های مختلف چرخش و هوادهی در شکل ۱۴ رسم شده اند. در تمامی حالات، افزایش هوادهی سبب افزایش تولید اکسیدهای نیتروژن شده است که این افزایش تا میزان هوادهی ۲/۵ درصد دیده می شود. همچنین در تمامی



شکل ۱۳. متوسط دمای خروجی در اعداد چرخش مختلف نسبت به درصد هوادهی

نشان می دهد که اعمال هوادهی به میزان ۵ و ۱۰ درصد، سبب کاهش چشمگیر در دمای متوسط خروجی می شود. در این حالت، احتراق ناقص و کاهش دمای محفظه، کاهش تولید آلاینده NO را در تمامی اعداد چرخش مورد بررسی به دنبال دارد. نتایج تحلیل عددی نشان می دهد که برای هر عدد چرخش، مقدار مشخصی هوادهی وجود خواهد داشت که به ازای آن، در اثر احتراق کامل، دمای متوسط خروجی از محفظه احتراق افزایش و همچنین میزان تولید اکسید نیتروژن کاهش می یابد. در عدد چرخش ۰/۴۸، هوادهی در مجرای سوخت به میزان ۲/۵ درصد، منجر به افزایش دمای متوسط خروجی به بیش از ۱۳۰۰ کلوین و کاهش تولید آلاینده NO به کمتر از ۳۰ ppm خواهد شد.

۶. نتیجه گیری

در این مقاله تحلیل عددی اثر هوادهی در مجرای سوخت بر مشخصه های احتراق در یک محفظه احتراق متقارن هواچرخشی انجام شده است. برای مدل سازی آشفستگی جریان از مدل $k-\epsilon$ و جهت برهم کنش آشفستگی - احتراق از دو مدل PDF و EDM استفاده شده است. مقایسه نتایج شبیه سازی عددی با مقادیر تجربی نشان می دهد که مدل PDF به همراه سازوکار زلدوویچ قادر به پیش بینی مناسب توزیع دما و نرخ تولید آلاینده اکسید نیتروژن خواهد بود. اثر هوادهی در مجرای سوخت در محفظه احتراق هوا چرخشی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می دهد که در حالت عدم هوادهی در مجرای سوخت، اعمال چرخش در هوای ورودی منجر به احتراق کامل، افزایش دمای خروجی و افزایش تولید اکسیدهای نیتروژن در محفظه می شود. بررسی اثر هوادهی در نسبت استوکیومتری ثابت

μ	لزجت (Pa.s)	فهرست نمادها و نشانه‌ها	
ρ	چگالی (kg.m^{-3})	D	قطر محفظه (m)
χ	کسر مولی	d	قطر نازل (m)
		ε	اتلافات آشفتگی (m^2s^{-2})
		G	تکانه (kg.m.s^{-1})
		k	نرخ واکنش
		L	طول محفظه (m)
		P	فشار (Pa)
		R	شعاع (m)
		t	زمان (s)
		T	دما (K)
		u_z	سرعت (m.s^{-1})
		x	فاصله از نازل روی محور محفظه (m)

اختصارها	
NOx	اکسیدهای نیتروژن
PDF	مدل احتراق probability density function
EDM	مدل احتراق Eddy Dissipation
SN	عدد چرخش Swirl Number

زیرنویس‌ها	
x	مؤلفه محوری
φ	مؤلفه زاویه‌ای
eff	کمیت در فرم مؤثر

۷. مأخذ

- [1] S. R. Turns, S. J. Mantel, *an Introduction to Combustion*, 2nd Edition, New York, McGraw Hill, 2000.
- [2] Sh. 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, pp. 18-23, 2009.
- [3] M. Zaki, M. Rajabi-Zargarabadi, Numerical analysis of effects of primary aeration on NOX production in a model gas turbine combustion chamber, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 101-109, 2014, (In Persian فارسی).
- [4] C. S. Cooper, N. M. Laurendeau, Parametric study of NO production via quantitative laser-induced fluorescence in high-pressure, swirl stabilization spray flames, *Proc Combust Inst*, Vol. 28, pp. 287–293, 2000.
- [5] M. Ilbas, The effect of thermal radiation and radiation models on hydrogen–hydrocarbon combustion modeling, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 30, Issue 10, pp 1113-1126, 2005.
- [6] S. Mahdizadeh, S. Tabe'jamaa't, NOx Reduction Analysis in Fuel Gas Combustion Chamber using Water Injection, *Mechanic and airspace Journal of Imam Hossein university*, Vol. 1, No. 1, 2006 (In Persian فارسی).
- [7] R. Ebrahimi, S. Agha Najafi, Return effective method for NOx reduction, 12th International Conference on Mechanical Engineering, Tarbiat Modares university, 2005 (In Persian فارسی).
- [8] S. M. Javadi, M. Moghiman, Experimental Study of Natural Gas Temperature Effects on the Flame Luminosity and NO Emission in a 120 kW Boiler, Vol. 4, pp. 15-24, 2011 (In Persian فارسی).
- [9] M. E. Feyz, J. A. Esfahani, I. Pishbin, S. M. Modarres Razavi, Effect of recess length on the flame parameters and combustion performance of a low swirl burner, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 89, pp. 609-617, 2015.
- [10] Y. A. Eldrainy, Kh. M. Saqr, H. S. Aly, M. Nazri Mohd Jaafar, CFD insight of the flow dynamics in a novel swirler for gas turbine combustors, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 936–941, 2009.
- [11] Sh. Ti, Zh. Chen, Zh. Li, Y. Xie, Y. Shao, Q. Zong, Q. Zhang, Influence of different swirl vane angles of over fire air on flow and combustion

- characteristics and NO_x emissions in a 600 MWe utility boiler, *Energy*, Vol. 74, pp. 775-787, 2014.
- [12] Y. A. Eldrainy, Kh. M. Saqr, H. S. Aly, Th. M. Lazim, M. Nazri-Mohd-Jaafar, Large eddy simulation and preliminary modeling of the flow downstream a variable geometry swirler for gas turbine combustors, *International communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 1104–1109, 2011.
- [13] Y. Wu, C. Carlsson, R. Szasz, L. Peng, L. Fuchs, X. S. Bai, Effect of geometrical contraction on vortex breakdown of swirling turbulent flow in a model combustor, *Fuel*, Vol. 170, pp. 210–225, 2016.
- [14] Y. Li, R. Li, D. Li, J. Bao, P. Zhang, Combustion characteristics of a slotted swirl combustor: An experimental test and numerical validation, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 66, pp 140–147, 2015.
- [15] 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*, Vol. 29, pp. 2235–2242, 2002.
- [16] W. Fang, X. Xiang, Effect of turbulence on NO formation in swirling combustor, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 27, No. 4, pp 797–804, 2014.
- [17] M. Arabnejad, M. Shahsavari-Farshchi, A Numerical Study of the Effect of Swirl Number on Premixed Low Swirl Combustion, Vol. 8, pp. 1-12, 2015 (In Persian فارسی).
- [18] M. Ilbas, S. Karyeyen, I. Yilmaz, Effect of swirl number on combustion characteristics of hydrogen-containing fuels in a combustor, *Int. J. of hydrogen energy*, vol. xxx, pp. 1-7, 2016.
- [19] FLUENT 6.3., Tutorial Guide Fluent 6.3. Inc., 2006.
- [20] S. Chouaieb, W. Kriaa, H. Mhiri, Ph. Bournot, Presumed PDF modeling of microjet assisted CH₄-H₂/air turbulent flames, *Energy Conversion and Management*, Vol. 120, pp. 412–421, 2016.

پی نوشت

-
1. swirler
 2. swirl number
 3. eddy dissipation model
 4. probability density function
 5. prompt NO_x
 6. partial equilibrium
 7. SIMPLE algorithm