



بررسی تأثیر پارامترهای طراحی در کاهش آلاینده NO_x با روش کاهش انتخابی غیر کاتالیستی (SNCR)

مسعود شفا¹، کیومرث مظاهری^{2*}، علیرضا علی‌پور³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 14115-111، kiumars@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 مهر 1393

پذیرش: 26 آبان 1393

ارائه در سایت: 03 دی 1393

کلید واژگان:

آلاینده NO

روش کاهش انتخابی غیر کاتالیستی

هندسه

زاویه نازل

سپرک

چکیده

کوره‌های صنعتی و نیروگاه‌ها با مصرف قابل توجه سوخت‌های فسیلی، نقش عمده‌ای در تولید آلاینده‌های هوا دارند. اکسید نیتروژن از جمله این آلاینده‌هاست. در تحقیق حاضر، اثر هندسه‌های مختلف در کاهش اکسید نیتروژن (NO) با روش کاهش انتخابی غیر کاتالیستی در دودکش کوره‌های صنعتی و نیروگاه‌ها، به صورت عددی بررسی شده است. در این روش، آمونیاک در محدوده دمای بین 1150 تا 1350 کلوین به درون دودکش تزریق شده و با واکنش با NO، گاز نیتروژن تولید می‌کند. هندسه مورد استفاده شامل دودکش استوانه‌ای به طول 500 سانتی‌متر و قطر پنج سانتی‌متر است. چهار هندسه تزریق آمونیاک توسط یک نازل، دو نازل، چهار نازل و پاشش توسط یک حلقه در دور دودکش مورد بررسی قرار گرفته است. با بررسی میزان کاهش آلاینده NO، مشاهده شد که تزریق با یک نازل نسبت به سایر هندسه‌ها بازده کمتری در روش SNCR ایجاد می‌کند. همچنین، در ادامه اثر افزایش طول دودکش نیز بررسی شده است. با افزایش طول دودکش مشخص شد، این عامل تأثیر زیادی بر کاهش پدیده لغزش آمونیاک دارد. برای بررسی اثر زاویه نازل آمونیاک بر بازده SNCR، تزریق در زوایای 75- تا 75+ درجه مورد ارزیابی قرار گرفت. مشخص شد با افزایش قدر مطلق زاویه نازل، بازده این پدیده کاهش می‌یابد. در نهایت تأثیر افزودن سپرک در مسیر جریان مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد با افزودن سپرک زمان و طول مورد نیاز برای انجام واکنش به دلیل اختلاط بهتر کاهش می‌یابد.

Investigation of geometry effect on reduction of nitrogen oxide by Selective Non Catalytic Reduction (SNCR) method

Masoud Shafa¹, Kiumars Mazaheri^{2*}, Alireza Alipoor³

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 14115-111 Tehran, Iran, kiumars@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 06 October 2014

Accepted 17 November 2014

Available Online 26 December 2014

Keywords:

Pollutant of NO

Selective Non Catalytic Reduction Method

Geometry

Nozzles Angle

Baffle

ABSTRACT

Industrial kilns and power plants with high consumption of fossil fuels play a significant role in the production of air pollutants. Nitrogen oxide is one of these pollutants. In the present work, effect of different geometries on NO reduction in stack of industrial kilns and power plants is investigated numerically based on a selective non catalytic reduction (SNCR) method. In SNCR method, the NO reacts with ammonia which is injected into the kiln stack at temperature range of about 1150-1350 K and nitrogen is formed. In this study, a cylindrical stack with 500 cm length and 5 cm diameter is chosen, similar to Ostberg's experimental work. Four geometries for ammonia injection with one, two, and four nozzles and by a ring around the stack have been studied. Numerical simulation of NO reduction by SNCR method shows that injection with one nozzle has lower efficiency than other injection geometries. Also, effect of gas stack length on NO reduction has been investigated. The results show that increasing stack length has a significant effect on ammonia slip reduction phenomenon. To investigate the effect of ammonia injection nozzle angle on SNCR efficiency, nozzle angles between 75- to 75+ degrees were analyzed. Results show that the efficiency of this phenomenon decreases by increasing absolute value of injection nozzle angle. Finally, effect of baffle presence in mainstream has been studied. It is observed that the required time and length for reaction decrease due to better mixing.

1- مقدمه

صنعتی و نیروگاه‌ها نیز به عنوان یکی از مصرف‌کنندگان قابل توجه

سوخت‌های فسیلی، نقشی عمده‌ای در ایجاد این آلودگی دارند [1].

در میان آلاینده‌های تولید شده توسط سوخت‌های هیدروکربنی، کاهش

NO و NO₂ بیش از سایر آلاینده‌ها مورد توجه قرار دارد که در اصطلاح به

محصولات ناشی از احتراق سوخت‌های هیدروکربنی شامل ترکیبات CO، N₂،

NO و NO₂ هستند که در میان آن‌ها ترکیبات CO، SO₂،

NO و NO₂ به عنوان آلاینده محیط زیست شناخته می‌شوند. کوره‌های

Please cite this article using:

M. Shafa, K. Mazaheri, A. Alipoor, Investigation of geometry effect on reduction of nitrogen oxide by Selective Non Catalytic Reduction (SNCR) method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 92-100, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

NO و NO₂، NO_x گفته می‌شود. چون، بیش از 85 درصد NO_x مربوط به NO است، بنابراین در مطالعات نیز معمولاً تغییر کسر جرمی NO به عنوان آلایندة NO_x مورد بررسی قرار می‌گیرد و از اثرات NO₂ صرف‌نظر می‌شود[2]. با توجه به لزوم کاهش آلایندة NO_x، روش‌های مختلفی برای کاهش آلایندة NO_x ارائه شده است. بهبود شرایط احتراق، استفاده از مشعل‌های با NO_x کمتر، تزریق مرحله‌ای هوای احتراق، کاهش انتخابی غیر کاتالیستی¹ و کاهش انتخابی کاتالیستی از جمله روش‌های کاهش NO_x در کوره‌های صنعتی و نیروگاه‌ها است.

یکی از روش‌های پرکاربرد، روش کاهش انتخابی غیر کاتالیستی است. این روش اولین بار در سال 1975 توسط اکسون[2] به کار گرفته شد. در این روش، در محدوده دمایی بین 1150 تا 1350 کلوین، آمونیاک (NH₃) به درون دودکش تزریق می‌شود و با محصولات خروجی از محفظه احتراق مخلوط می‌شود. محصولات گازی درون دودکش در دمای بالا با آمونیاک واکنش داده و مقدار قابل توجهی از NO_x، به آب و نیتروژن تبدیل می‌شود.

بازده، نسبت مولی NH₃ به NO_x و دمای بهینه سه پارامتر مهم در روش SNCR هستند. بازده به صورت نسبت $1 - (NO_{out}/NO_{in})$ تعریف می‌شود. NO_{in} و NO_{out} به ترتیب مربوط به آلایندة NO_x ورودی و خروجی به دودکش هستند. بازده روش SNCR معمولاً در محدوده 60 تا 70 درصد قرار دارد. نسبت مولی NH₃ به NO_x با R نشان داده می‌شود. این نسبت بسته به نوع کاربرد، عددی بین 1 تا 2 است. افزایش مقدار R به مقادیر بزرگ‌تر از 2 تأثیر قابل توجهی بر روی بازده نخواهد داشت، اما باعث خروج بخشی از آمونیاک تزریقی از دودکش می‌شود که به این پدیده لغزش آمونیاک گفته می‌شود. از آنجایی که آمونیاک ماده‌ای سمی است، باید از لغزش آمونیاک جلوگیری شود.

به دمایی که در آن بیشترین بازده روش SNCR ایجاد می‌شود، دمای بهینه گفته می‌شود. در دمای کمتر از 1150 کلوین، شدت واکنش‌ها کم هستند[2] و نه تنها کاهش NO_x ایجاد نمی‌شود بلکه بیشتر NH₃ تزریقی بدون واکنش باقی می‌ماند. در دماهای بیشتر از 1350 کلوین، NH₃ تمایل به اکسید شدن به شکل NO دارد، که این نیز در کاهش NO_x مطلوب نیست. از دیگر پارامترهای قابل تعریف در کار حاضر زاویه نازل و زاویه پاشش هستند. زاویه نازل مربوط به زاویه قرارگیری نازل در مکان تزریق است، در حالی که زاویه پاشش نازل نصف زاویه مخروطی است که از پاشش ایجاد می‌شود.

موزیو و همکاران[3] با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی بر روی احتراق غیر پیش آمیخته متان-هوا نشان دادند که مقدار بهینه کاهش NO_x در $R=1/6$ رخ می‌دهد. طبق نتایج ایشان در $R=1$ مقدار آلایندة NO_x تا 65 درصد و در $R=3$ تا بیش از 90 درصد کاهش می‌یابد. با افزایش مقدار R، هم‌زمان پدیده لغزش نیز تشدید می‌شود[3].

لیون و همکاران[4] در کار تجربی خود اثر مقدار غلظت اکسیژن موجود در گاز دودکش را مورد بررسی قرار دادند. ایشان دریافتند حضور اکسیژن یکی از پارامترهای تأثیرگذار برای شروع روند SNCR است و عملاً بدون وجود اکسیژن حذف NO_x توسط فرآیند SNCR اتفاق نمی‌افتد.

رابین و همکاران[5] همین اثر را برای سوخت زغال‌سنگ در دو دمای مختلف مورد آزمایش قرار دادند. ایشان مشاهده کردند که در دمای 1273 کلوین، تغییرات SNCR مستقل از غلظت اکسیژن است. اما در 1181 کلوین،

بازده SNCR با افزایش غلظت اکسیژن بالا می‌رود.

استبرگ و همکاران[6] نیز در یک کار تجربی اثر دما را بر SNCR بررسی کردند. ایشان دریافتند که در دمای 1250 کلوین، بیشترین بازده SNCR اتفاق می‌افتد. در ضمن، با افزودن نیتروژن به آمونیاک تزریقی مشاهده شد که بازده SNCR افزایش می‌یابد. افزودن هوا نیز، نتایج مشابهی را در بر داشت.

به موازات کارهای تجربی انجام شده، شبیه‌سازی‌های عددی متفاوتی نیز در زمینه SNCR گزارش شده است. در کار عددی بورستروم و همکاران[7] به بررسی روش SNCR در کاهش NO_x ایجاد شده از کوره آهن پرداخته شده است. آن‌ها تغییرات NO_x و دما در طول دودکش را با سینتیک شیمیایی دو مرحله‌ای بروور مورد بررسی قرار دادند. نتایج این کار نشان داد که بیشترین شدت کاهش NO_x، در ابتدای تزریق است و در نقاط پایین‌دست دودکش این شدت کم می‌شود.

در کار عددی دیگر، زانائلو و همکاران[8] به بررسی اثر اختلاط در پدیده SNCR پرداختند. ایشان مشاهده کردند که در دماهای کمتر از 1200 کلوین، بازده SNCR به اختلاط بستگی ندارد. علت این پدیده بزرگ‌تر بودن زمان مشخصه واکنش از زمان پدیده اختلاط است که موجب می‌شود سینتیک مواد شیمیایی میزان کاهش NO را کنترل کند. با این حال، وقتی دما افزایش می‌یابد، نرخ واکنش نیز زیاد می‌شود و زمان واکنش را هم‌مرتبه با زمان اختلاط می‌کند. در این وضعیت افزایش اختلاط منجر به کاهش بهتر NO می‌شود. همچنین، ایشان تأثیر دو سینتیک شیمیایی دوو و بروور را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که سینتیک شیمیایی بروور از دقت بالاتری برای شبیه‌سازی این پدیده برخوردار است.

حسینی و همکاران[9] در کاری تجربی و عددی به بررسی اثر زاویه پاشش آمونیاک در پدیده SNCR پرداختند. ایشان با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی، روش SNCR را برای کاهش آلایندة گازهای خروجی، ناشی از احتراق غیر پیش آمیخته گازوئیل-هوا بررسی نمودند. همچنین، به موازات کار آزمایشگاهی، شبیه‌سازی این پدیده را با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت انجام دادند. در این کار هندسه دودکش به صورت دوبعدی تقارن محوری در نظر گرفته شده است که با توجه به وجود یک نازل در کار آزمایشگاهی امکان اعتبارسنجی آن با نتایج تجربی وجود ندارد. همچنین، از آنجایی که این پدیده ماهیتی مغشوش دارد در نظر گرفتن هندسه دوبعدی مطلوب نیست. نتایج کار ایشان نشان می‌دهد که استفاده از نازل با زاویه پاشش کمتر (به- علت نفوذ بهتر آمونیاک به درون محصولات دودکش) بازده SNCR را افزایش می‌دهد و همچنین دمای پاشش بهینه مقدار 1355 کلوین است.

شفا و همکاران[10] در کاری عددی به بررسی تأثیر سینتیک‌های شیمیایی میلر، دوو، گلاربرگ و بروور در پیش‌بینی کاهش NO با روش SNCR پرداختند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که سینتیک‌های شیمیایی گلاربرگ و بروور نسبت به دو سینتیک دیگر خطای کمتری دارند.

با مروری بر کارهای انجام شده در زمینه روش SNCR مشاهده می‌شود که هندسه یکی از پارامترهای موثر در مقدار بازده این پدیده است. تعداد نازل استفاده شده به منظور پاشش آمونیاک به درون دودکش و همچنین طول دودکش، از عوامل هندسی مهم در این روش هستند. با توجه به مطالعات انجام شده توسط نگارندگان، در زمینه تعداد نازل‌ها و طول دودکش تاکنون تحقیق عددی انجام نشده است و تنها در مرجع [9] زاویه پاشش بررسی شده است. بنابراین، هدف از کار حاضر بررسی تأثیر هندسه، شامل تعداد نازل‌های پاشش آمونیاک به درون دودکش، طول دودکش و زاویه نازل‌ها بر روی

1- Selective Non Catalytic Reduction

معادله بقای گونه

$$\rho \left(\frac{\partial Y_i}{\partial t} + u \cdot \nabla Y_i \right) = -\nabla \cdot (\rho Y_i V_i) + \dot{\omega}_i \quad (10)$$

در معادله بقای گونه، Y_i و V_i به ترتیب کسر جرمی گونه و سرعت نفوذی گونه i ام هستند.

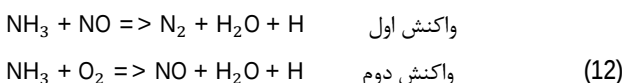
معادله حالت گاز ایده آل

$$\rho = \frac{PMW_{\text{mix}}}{R_u T} \quad (11)$$

در معادله حالت گاز ایده آل، PMW_{mix} و R_u به ترتیب جرم مولکولی مخلوط و ثابت جهانی گازها هستند.

با توجه به پیشنهاد مرجع [7]، برای مدل سازی جریان اغتشاشی، مدل k-ε استاندارد به کار گرفته می شود. در کار حاضر با توجه به دایروی بودن مقاطع، غیر چرخشی بودن جریان و بالا بودن عدد رینولدز استفاده از مدل دو معادله ای k-ε استاندارد مناسب است.

در کار حاضر، برای بیان روابط شیمیایی بین واکنش دهنده ها با توجه به پیشنهاد مرجع [10] از سینتیک دو مرحله ای برور استفاده شده است. رابطه (12) این سینتیک را نشان می دهد.



3- مسئله شبیه سازی شده

هندسه مورد استفاده در کار حاضر با توجه به کار تجربی استبرگ و همکاران [6] انتخاب شده است. هندسه مورد نظر دودکش استوانه ای به طول 500 سانتی متر و قطر 5 سانتی متر است. طرحواره این هندسه در شکل 1 نشان داده شده است.

در این شکل، نقاط 1 و 2 به ترتیب مربوط به نقطه اختلاط واکنش دهنده ها و مکان محفظه احتراق هستند. با عبور محصولات احتراق از خنک کننده که با شماره 3 در شکل نشان داده شده است، دمای محصولات تا دمای مورد نظر کاهش و محصولات وارد دودکش افقی می شوند. ترکیب محصولات در ورودی دودکش برابر 73/4 درصد حجمی N₂، 15/1 درصد حجمی H₂O، 8/0 درصد حجمی CO₂، 3/4 درصد حجمی O₂ و 0/0537 درصد حجمی NO، با دبی 940 nl/min و دمای 1250 K است.

در نقطه 5 (به فاصله 125 سانتی متر از ابتدای دودکش) تزریق آمونیاک از نازلی به قطر 1/9 میلی متر صورت می گیرد و نسبت مولی NH₃ به NO_x برابر 2 است. دبی تزریق آمونیاک برابر 1 nl/min و دمای آن 300 K است. نقطه 4 نشانگر مرکز دودکش و نقطه 6 مربوط به مکان اندازه گیری کسر جرمی گازهای خروجی است. تمام دودکش افقی توسط پوشش سرامیک، عایق بندی شده است.

4- روش عددی و شرایط مرزی

در پژوهش حاضر برای شبکه بندی میدان حل، نرم افزار گمبیت² به کار گرفته شده است. همچنین، برای شبیه سازی عددی سه بعدی تزریق ماده آمونیاک به صورت جت گازی از حلگر واکنشی ریاکتینگ فوم³ مربوط به کد متن باز این فوم⁴ استفاده شده است. تصحیح فشار در حلگر ریاکتینگ فوم با الگوریتم

آلایندة NO_x با روش SNCR است. برای اعتبارسنجی برنامه استفاده شده و تطبیق آن با نتایج تجربی، از کار آزمایشگاهی استبرگ و همکاران [6] استفاده شده است.

2- معادلات حاکم

برای شبیه سازی جریان به همراه واکنش های شیمیایی، معادلات ناویر-استوکس به همراه معادلات بقای انرژی و بقای گونه ها و معادله حالت گاز کامل حل می شوند. معادلات حاکم به صورت رابطه (1) تا (11) بیان می شوند.

معادله پیوستگی

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

در رابطه (1)، ρ چگالی و u بردار سرعت است.

معادله بقای مومنتوم

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g - \nabla p + \mu \nabla^2 u \quad (2)$$

معادله بقای انرژی

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \sum_{i=1}^{N_g} h_i \dot{\omega}_i \quad (3)$$

در رابطه (3)، c_p و h_i به ترتیب ضریب هدایت حرارتی مخلوط، ظرفیت حرارتی و آنتالپی گونه i ام هستند. جمله $\dot{\omega}_i$ مربوط به نرخ تشکیل یا از بین رفتن گونه شیمیایی i ام است که با توجه به سینتیک شیمیایی مشخص می شود. برای توضیح نحوه محاسبه جمله $\dot{\omega}_i$ ابتدا باید شکل کلی واکنش شیمیایی بیان شود. برای یک سیستم شیمیایی متشکل از N گونه و M واکنش می توان واکنش شیمیایی را به صورت رابطه (4) بیان نمود.

$$\sum_{i=1}^N v'_{ij} \mathcal{M}_i = \sum_{i=1}^N v''_{ij} \mathcal{M}_i, \quad j = 1, M \quad i = 1, \dots, N \quad (4)$$

به طوری که $\mathcal{M}_i$ نشانگر گونه i ام و v'_{ij} و v''_{ij} ضرایب مولی استوکیومتری گونه i ام در واکنش j ام هستند. بر این اساس نرخ جرمی تولید/مصرف گونه i ام بر واحد حجم، $\dot{\omega}_i$ ، به صورت روابط (5) تا (7) بیان می شوند.

$$\dot{\omega}_i = \frac{d[X_i]}{dt} = \sum_{j=1}^M v_{ij} Q_j \quad (5)$$

$$v_{ij} = v''_{ij} - v'_{ij} \quad (6)$$

$$Q_j = K_{fj} \prod_{i=1}^N [X_i]^{v'_{ij}} - K_{rj} \prod_{i=1}^N [X_i]^{v''_{ij}} \quad (7)$$

W_i جرم مولکولی گونه i ام، $[X_i] = \rho Y_i / W_i$ نماد غلظت مولی گونه i ام و Q_j نشان دهنده نرخ پیشرفت واکنش j ام هستند. K_{fj} و K_{rj} نرخ های رفت و برگشت واکنش j ام هستند. در محاسبات عددی ثابت های نرخ K_{fj} و K_{rj} به طور معمول با استفاده از قانون آرنیوس¹ (روابط (8) و (9)) بیان می شوند [7].

$$K_{fj} = A_{fj} T^{B_{fj}} \exp \left(-\frac{E_{a_{fj}}}{RT} \right) \quad (8)$$

$$K_{rj} = \frac{K_{fj}}{\left(\frac{P_a}{RT} \right)^{\sum_{i=1}^N v_{ij}} \exp \left(\frac{\Delta S_j^0}{R} - \frac{\Delta H_j^0}{RT} \right)} \quad (9)$$

در روابط (8) و (9)، $E_{a_{fj}}$ انرژی فعال سازی واکنش j ام، R ثابت گاز، A_{fj} ضریب پیش نمایی آرنیوس، B_{fj} توان دما و P_a برابر 1 bar هستند. ΔH_j^0 و ΔS_j^0 نیز به ترتیب تغییرات آنتالپی و آنتروپی برای واکنش j ام هستند.

2- Gambit

3- Reacting FOAM

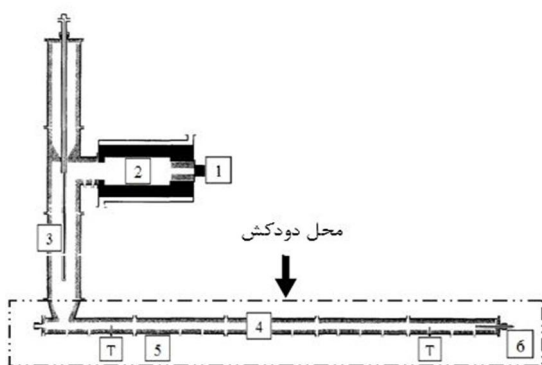
4- Open FOAM

1- Arrhenius law

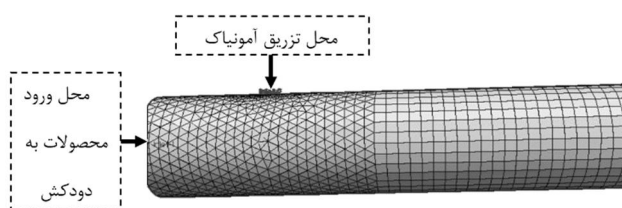
و برابر 24/89 درصد است.

5-2- بررسی تأثیر تعداد نازل‌های پاشش آمونیاک

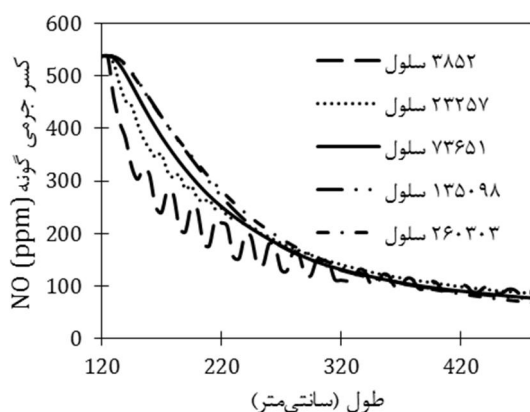
در هنگام استفاده از یک نازل در قسمت بالایی دودکش، کاهش NO در نقاط بالایی دودکش نسبت به نقاط پایینی آن بیشتر می‌شود. با توجه به کانتور کسر جرمی NO نشان داده شده در شکل 5 این نکته به خوبی نمایان است. علت کسر جرمی بیشتر آمونیاک در نزدیکی نازل است. راه پیشنهادی در کار حاضر برای همگن‌تر شدن کاهش NO در بالا و پایین کانال افزایش تعداد نازل‌هاست. برای بررسی اثر تعداد نازل، چهار هندسه تزریق آمونیاک شامل یک نازل، دو نازل، چهار نازل و پاشش توسط



شکل 1 طرحواره مسئله مورد بررسی [6]



شکل 2 طرحواره شبکه‌بندی مسئله مورد بررسی



شکل 3 بررسی استقلال از نتایج از شبکه محاسباتی

یک حلقه در دور دودکش با دبی ثابت تزریق آمونیاک مورد بررسی قرار گرفته است. شکل 6 هندسه‌های به کار گرفته شده برای تزریق را نشان می‌دهد. برای ثابت ماندن دبی جرمی تزریق آمونیاک $(1/25 \times 10^{-5} \text{ kg/s})$ و

پیمپل¹ انجام شده است. در حلگر ریاکتینگ فوم برای گسسته‌سازی کلیه ترم‌های زمانی از روش اولر مرتبه یک استفاده شده است. گسسته‌سازی سایر جمله‌ها از روش گاوس با دقت مرتبه دوم استفاده شده است. همچنین، کلیه میان‌یابی‌ها انجام گرفته به صورت خطی است. با توجه به اینکه آلایندة NO_x از مرتبه ppm است، باقیمانده‌ها با دقت 1×10^{-9} محاسبه می‌شوند. با توجه به توربولانس بودن جریان (عدد رینولدز 10645) ضرایب نفوذ مولکولی با تقریب خوب به وسیله فرض عدد لوییس² برابر با یک و با معلوم بودن ضریب نفوذ حرارتی محاسبه می‌شوند.

شرط مرزی در ورودی دودکش برای دما، کسر جرمی گونه‌ها و سرعت، مقدار ثابت در نظر گرفته شده است. در خروجی شرط مرزی گرادیان نرمال صفر برای تمامی متغیرها به کار گرفته شده است. بدین معنی که تغییرات متغیرها در جهت عمود بر سطح صفر است. همچنین، شرط مرزی خروجی برای فشار، فشار محیط است. در دیواره‌ها نیز شرط مرزی عایق برای دما، شرط عدم لغزش برای سرعت و گرادیان صفر برای گونه‌ها در نظر گرفته می‌شود.

5- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا حلگر مورد استفاده جهت شبیه‌سازی (این فوم) با نتایج تجربی صحت‌سنجی می‌شود. اثر چهار هندسه تزریق آمونیاک شامل یک، دو و چهار نازل و همچنین پاشش توسط یک حلقه در دور دودکش مورد بررسی قرار می‌گیرند. نتایج براساس دو متغیر بازده و پدیده لغزش آمونیاک بحث می‌شود. سپس، تأثیر طول دودکش بر اختلاط بهتر آمونیاک با محصولات دودکش مورد بررسی قرار می‌گیرد. اثر زاویه تزریق آمونیاک در زوایای مختلف بر بازده SNCR ارزیابی می‌شود و در نهایت اثر افزودن سپرک³ در مسیر جریان تحلیل می‌شود.

5-1- صحت‌سنجی برنامه استفاده شده

با توجه به نتایج تجربی آمونیاک تزریق شده بر بالادست جریان اثری ندارد [2]. به همین دلیل شبیه‌سازی برای 380 سانتی‌متر انتهایی دودکش انجام می‌گیرد. با توجه به وجود نازل در جداره کانال، شبکه‌بندی سه‌بعدی متفاوتی در طول کانال در نظر گرفته شده است به طوری که در نزدیکی نازل شبکه‌بندی بی‌ساختار و در سایر مکان‌های کانال شبکه‌بندی با ساختار استفاده شده است (شکل 2).

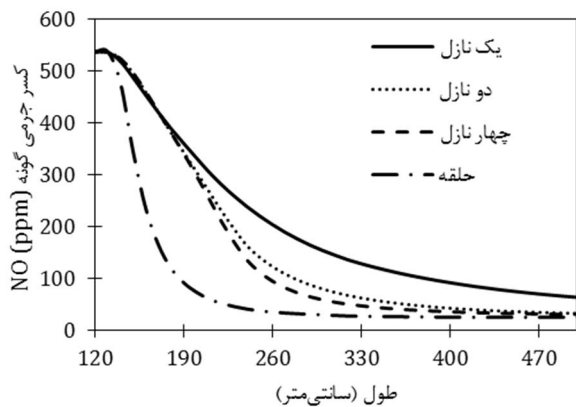
نتیجه بررسی استقلال نتایج از شبکه عددی برای کار حاضر در شکل 3 نشان داده شده است. محور افقی در این شکل مرکز کانال در راستای طول و محور عمودی مقدار گونه NO را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از شبکه‌های محاسباتی شامل 135098 سلول و 260303 سلول تفاوت ناچیزی با یکدیگر دارند. بنابراین، با توجه به هزینه محاسباتی بالاتر برای شبکه‌بندی با 260303 سلول، تعداد 135098 سلول محاسباتی برای ادامه کار در نظر گرفته می‌شود.

شکل 4 نتایج تجربی کار استبرگ [6] را با نتایج عددی کار حاضر در پیش‌بینی آلایندة NO و در انتهای دودکش را با هم مقایسه می‌کند. محور افقی در این شکل دمای محصولات و محور عمودی مقدار گونه NO را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است نتایج کار حاضر در تطابق خوبی با نتایج تجربی است، به طوری که ماکزیمم خطا در دمای 1310 کلین

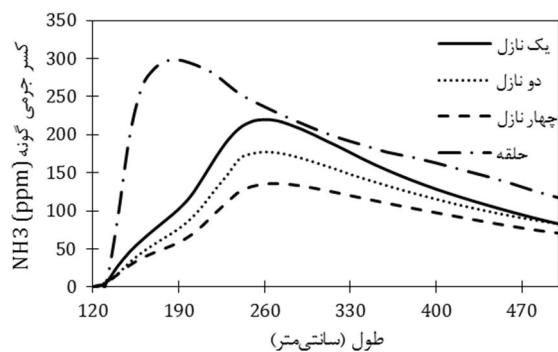
1- Pimple
2- Lewis number
3- Baffle

این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد نازل توزیع کسر جرمی NO در انتهای دودکش یکنواخت‌تر می‌شود که این نشانگر اختلاط بهتر است. برای بازده مطلوب SNCR و لغزش مجاز آمونیاک استفاده از دو نازل مطلوب به نظر می‌رسد.

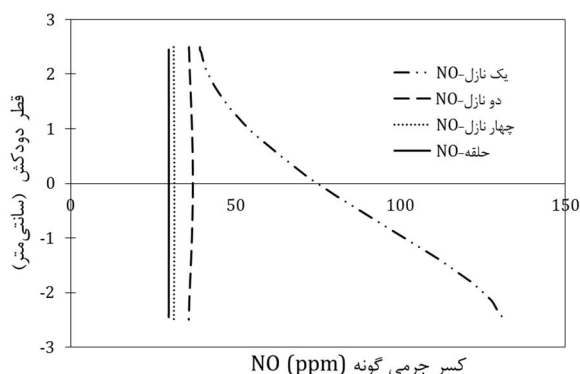
به منظور تحلیل بهتر، بازده فرآیند SNCR در شکل 10 برای تعداد نازل‌های متفاوت و در انتهای دودکش بررسی شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است با افزایش تعداد نازل‌ها و در نهایت تزریق آمونیاک با حلقه بازده افزایش یافته است، به‌طوری که کمترین بازده 0/875 مربوط به تزریق با یک نازل و بیشترین بازده 0/950 برای حالت تزریق با حلقه است.



شکل 7 تغییرات کسر جرمی NO در طول دودکش برای تعداد نازل‌های پاشش مختلف



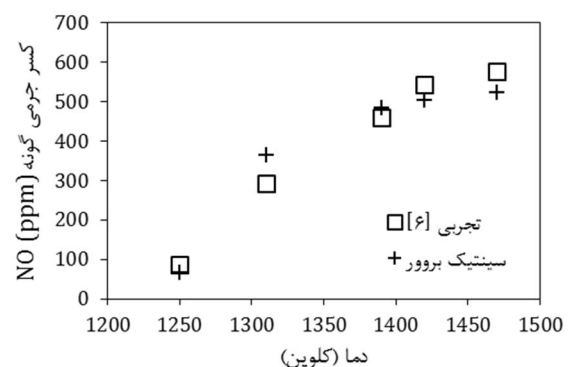
شکل 8 تغییرات کسر جرمی NH₃ در طول دودکش برای تعداد نازل‌های پاشش مختلف



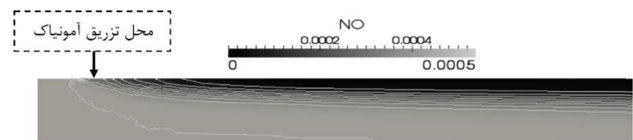
شکل 9 مقایسه توزیع کسر جرمی NO برای تعداد مختلف نازل‌ها در خروجی دودکش

سرعت تزریق آن (6/46 m/s) با توجه به رابطه $\dot{m} = \rho AV$ با افزایش تعداد نازل‌ها قطر سوراخ‌های پاشش باید کوچک‌تر انتخاب شوند. جدول 1 اندازه قطر نازل‌ها در پاشش با هندسه‌های مختلف را نشان می‌دهد. همچنین، در حالت تزریق با حلقه ضخامت آن 0/018 mm در نظر گرفته می‌شود.

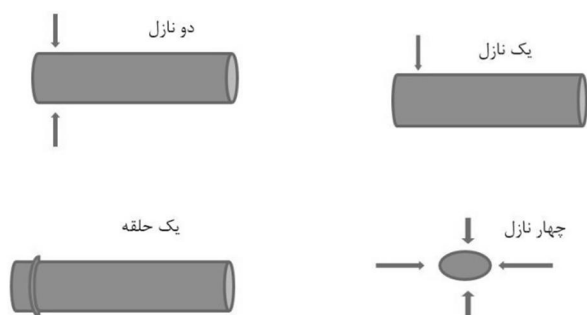
شکل های 7 و 8 به ترتیب تغییرات کسر جرمی NO و NH₃ را در امتداد محور مرکزی دودکش برای چهار هندسه به کار گرفته شده نشان می‌دهند. در این شکل‌ها محور افقی طول کانال برحسب سانتی‌متر و محور عمودی کسر جرمی گونه مورد نظر برحسب ppm است. همان‌طور که از این شکل‌ها مشخص است، با افزایش تعداد نازل‌ها اختلاط با NH₃ با محصولات دودکش بهتر شده و NO زودتر مصرف می‌شود. اما از طرف دیگر، با افزایش تعداد نازل از یک به چهار عدد لغزش آمونیاک در انتهای دودکش کمتر می‌شود. ولی در هنگام کاربرد حلقه رفتار متفاوت بوده و با تبدیل یک نازل به حلقه لغزش آمونیاک افزایش می‌یابد، که این امر مطلوب نیست.



شکل 4 صحت‌سنجی کسر جرمی گونه NO حاصل از نتایج عددی کار حاضر با مقادیر تجربی استبرگ [6]



شکل 5 کانتور کسر جرمی NO در هنگام پاشش با یک نازل



شکل 6 طرحواره هندسه‌های مختلف تزریق

جدول 1 اندازه قطر نازل‌ها در پاشش با هندسه‌های مختلف

تعداد نازل	قطر نازل (میلی‌متر)
1 نازل	1/90
2 نازل	1/34
4 نازل	0/95

شکل 9 توزیع NO را برای تعداد نازل‌های مختلف در نقطه انتهایی دودکش نشان می‌دهد. در این شکل محور افقی کسر جرمی گونه NO برحسب ppm و محور عمودی قطر کانال برحسب سانتی‌متر است. با توجه به

3-5- بررسی تأثیر افزایش طول دودکش بر بازده SNCR

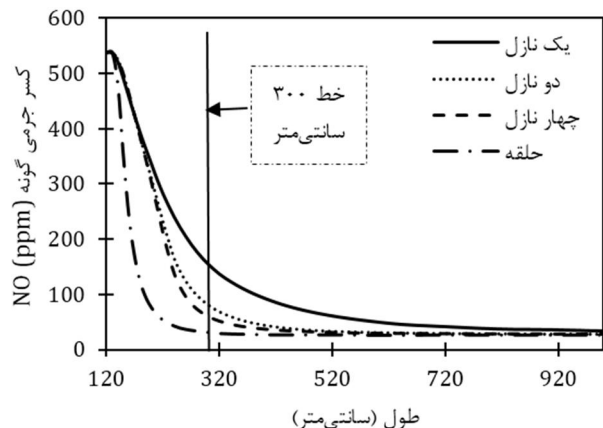
همان طور که از شکل 7 مشخص است، در هنگام استفاده از یک نازل در طول 500 سانتی متر همچنان مصرف گونه NO ادامه دارد. در این حالت به نظر می رسد زیادتر کردن طول دودکش با فراهم آوردن زمان بیشتر برای انجام واکنش ها، باعث اختلاط بهتر آمونیاک با محصولات دودکش می شود. در این بخش با افزایش طول دودکش از 500 سانتی متر به 1000 سانتی متر، تأثیر این پارامتر مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل 12 و شکل 13، نتایج مربوط به تغییرات مقادیر گونه های NO و NH₃ در طول 1000 سانتی متر نشان داده شده است. در این دو شکل محور افقی طول کانال برحسب سانتی متر و محور عمودی کسر جرمی گونه مورد نظر برحسب ppm است.

با توجه به شکل های 12 و 13 در حالات حلقه، گونه NO در 300 سانتی متر اول دودکش مصرف می شود و به کمترین مقدار می رسد. درحالی که برای سایر حالت کمترین کسر جرمی گونه NO در طول های بیشتر اتفاق می افتد، به طوری که در حالت یک نازل کاهش مقدار NO در انتهای دودکش همچنان ادامه دارد. گونه NH₃ برخلاف گونه NO برای هر چهار هندسه در طول 1000 سانتی متر همچنان در حال مصرف بوده و به حالت پایا نرسیده است.

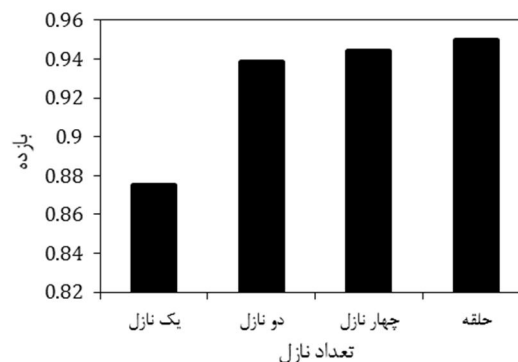
برای تحلیل جزئی تر جدول 2 کسر جرمی NO و NH₃ در خروجی دودکش برای دو طول 500 و 1000 سانتی متر را با هم مقایسه می کند. با بررسی جدول 2 مشخص می شود با افزایش طول دودکش از 500 سانتی متر به 1000 سانتی متر در هر چهار هندسه به طور همزمان NO کاهش بیشتری می یابد، درحالی که NH₃ کمتری در خروجی وجود دارد، که این مطلوب است. افزایش طول دودکش تا جایی مؤثر است که تغییرات مقدار NO و NH₃ ناچیز نباشد و بعد از آن می توان از افزایش طول کانال صرف نظر نمود. قابل ذکر است افزایش طول در هندسه تزریق با یک حلقه، اثر بیشتری بر روی کاهش پدیده لغزش آمونیاک نسبت به سایر هندسه ها داشته است، به طوری که افزایش درصد کاهش لغزش آمونیاک در هندسه های یک نازل، دو نازل، چهار نازل و پاشش توسط یک حلقه به ترتیب 8/23، 9/70، 10/65 و 14/19 درصد است.

4-5- بررسی اثر زاویه نازل بر بازده SNCR

زاویه نازل (α) از پارامترهای دیگری است، که بر اختلاط بین مواد دودکش و NH₃ تزریق شده از نازل تأثیر می گذارد. در پژوهش حاضر برای بررسی اثر زاویه تزریق آمونیاک بر بازده SNCR، تزریق در زوایای 75- تا 75 درجه مورد



شکل 12 تغییرات کسر جرمی NO در طول دودکش با افزایش طول به 1000 سانتی متر



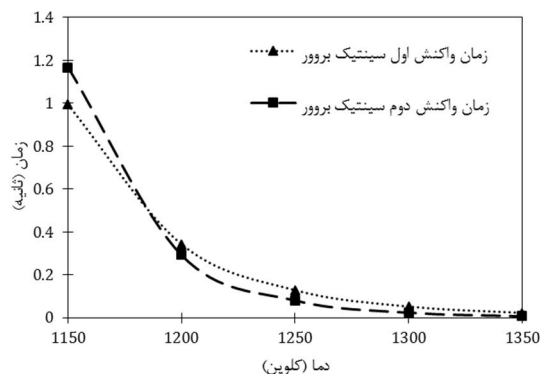
شکل 13 مقایسه بازده فرآیند SNCR برای تعداد مختلف نازل ها در خروجی دودکش در انتهای این بخش به بررسی سرعت واکنش های اول و دوم سینتیک بروور (رابطه 12)) پرداخته می شود.

سرعت انجام واکنش¹ از پارامترهای مهم در فرآیند SNCR است. از طرفی سرعت و زمان انجام واکنش با هم رابطه عکس دارند. یعنی با افزایش سرعت انجام واکنش زمان آن کاهش می یابد. استبرگ و همکاران [6] به بررسی زمان واکنش فرآیند SNCR پرداختند. ایشان با استفاده از ضرایب سینتیک دو مرحله ای بروور زمان واکنش را به صورت رابطه (13) تعریف نمودند.

$$T_{\text{reac}} = \frac{1}{k_r NO_{\text{in}} + k_{\text{ox}}} \quad (13)$$

در رابطه (13)، k_r و k_{ox} و T_{reac} به ترتیب ضرایب واکنش اول و دوم رابطه (12) (سینتیک بروور) و زمان واکنش هستند. استبرگ همچنین بیان کرد، زمان هر یک از واکنش های سینتیک بروور با صفر قرار دادن ضریب واکنش دیگر در رابطه ذکر شده محاسبه می شود.

حال به منظور بررسی دقیق تر هر یک از واکنش های سینتیک بروور زمان واکنش های اول و دوم این سینتیک در شکل 11 با هم مقایسه می شود. در این شکل محور افقی دما برحسب کلون و محور عمودی زمان برحسب ثانیه است. با توجه به این شکل، در دماهای پایین تر از 1200 کلون زمان انجام واکنش اول از واکنش دوم کمتر است، درحالی که در دماهای بالاتر از 1200 کلون روند برعکس می شود. به عنوان نتیجه گیری کلی واکنش های اول و دوم سینتیک بروور از نظر زمانی هم مرتبه هستند و با سرعت تقریباً یکسان انجام می شوند.



شکل 11 مقایسه زمان واکنش های اول و دوم سینتیک بروور

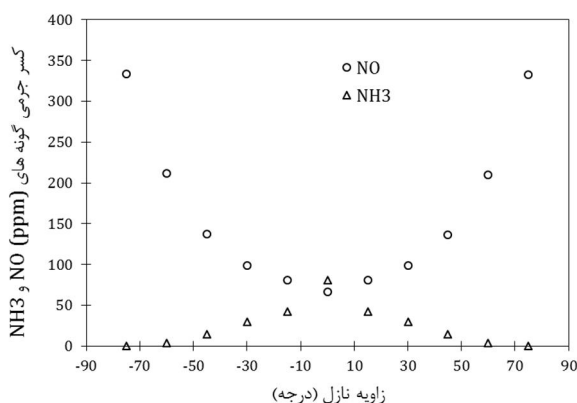
زوایای 15 و 15- درجه (42 ppm) نیز در محدوده مجاز بوده و مطلوب است. با توجه به مطالب این بخش استفاده از نازل با زوایای 15 و 15- درجه به دلیل بازده بالا در کاهش NO و لغزش مجاز NH₃ برای به کار بردن در فرآیند SNCR مناسب است.

5-5 بررسی اثر افزودن سپرک در مسیر جریان

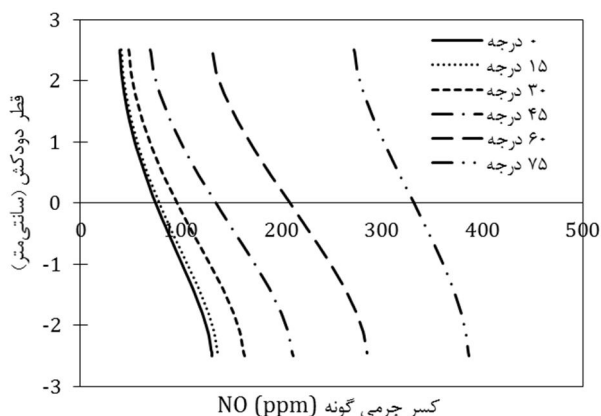
همان طور که در بخش های قبل بیان شد، افزایش اختلاط ماده آمونیاک با محصولات دودکش باعث بالارفتن بازده SNCR می شود. در بخش 5-3 مشاهده شد که با افزایش طول دودکش مقدار کاهش گونه NO در خروجی بیشتری شود. افزایش طول کانال باعث بالارفتن هزینه و فضای مورد نیاز برای تجهیزات SNCR می شود. راه حل پیشنهادی دیگر، استفاده از سپرک است.

استفاده از سپرک در مسیر جریان، به دلیل ایجاد گردابه، طول اختلاط را کاهش می دهد. در کار حاضر سپرک هایی با مساحت نصف سطح مقطع دودکش در فواصل 150، 200، 250، 300، 350، 400 و 450 سانتی متر در مسیر جریان قرار داده شده است (شکل 17).

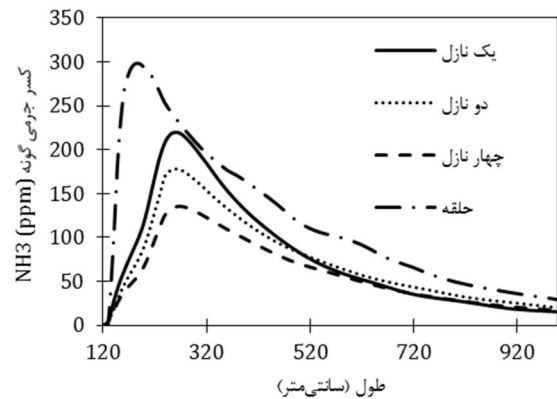
به دلیل تغییر هندسه استقلال از مش مجدداً بررسی می شود و تعداد 251024 سلول محاسباتی برای ادامه کار در نظر گرفته می شود. شایان ذکر است در بخش حاضر به دلیل تولید گردابه ها در مسیر جریان از مدل اغتشاشی k-ε RNG به جای k-ε استاندارد استفاده می شود.



شکل 15 مقدار کسر جرمی NO و NH₃ در خروجی دودکش برای تزریق در زوایای مختلف



شکل 16 مقایسه توزیع NO برای زوایای مختلف نازل در نقطه انتهایی دودکش به طول 500 سانتی متر



شکل 13 تغییرات کسر جرمی NH₃ در طول دودکش با افزایش طول به 1000 سانتی متر

جدول 2 مقایسه کسر جرمی NO و NH₃ در خروجی دودکش برای دو طول 500 و 1000 سانتی متر

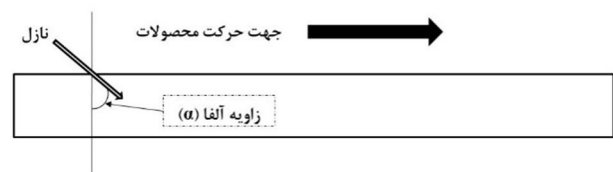
طول				نوع پاشش
1000 سانتی متر		500 سانتی متر		
NH ₃ (ppm)	NO(ppm)	NH ₃ (ppm)	NO(ppm)	
15	34	81	67	1 نازل
20	27	80	33	2 نازل
17	27	68	30	4 نازل
30	26	118	27	حلقه

ارزیابی قرار گرفته است. زاویه بین نازل و دودکش با توجه به شکل 14 تعریف می شود.

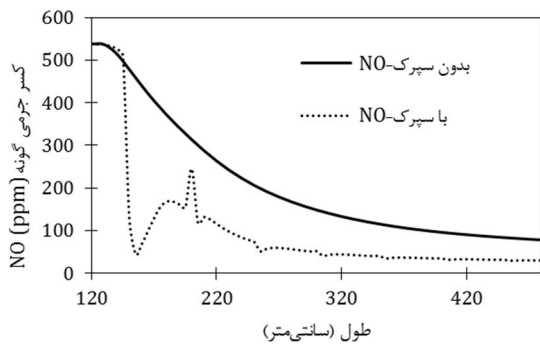
شکل 15 نتایج مربوط به مقدار NO و NH₃ در خروجی دودکش را برای پاشش آمونیاک با زوایای نازل مختلف نشان می دهد. در این شکل محور افقی زاویه نازل برحسب درجه و محور عمودی کسر جرمی NO و NH₃ برحسب ppm است. همان طور که از این شکل مشخص است با افزایش زاویه نازل مقدار NO در خروجی بیشتر می شود و در کنار آن پدیده لغزش آمونیاک کمتر می شود. علت این است که قطر دودکش بزرگ بوده و در نتیجه با افزایش زاویه نازل، نفوذ آمونیاک به نیمه پایینی دودکش کمتر می شود و بازده SNCR کاهش می یابد.

شکل 16 توزیع NO برای زوایای مختلف نازل در نقطه انتهایی دودکش را نشان می دهد. در این شکل محور افقی کسر جرمی گونه NO برحسب ppm و محور عمودی قطر کانال برحسب سانتی متر است. با توجه به این شکل با افزایش زاویه نازل از صفر تا 75 درجه، مقدار گونه NO در نیمه بالایی دودکش از مقدار 39 به 272 ppm افزایش می یابد که در تطابق با تحلیل گفته شده در پاراگراف گذشته است.

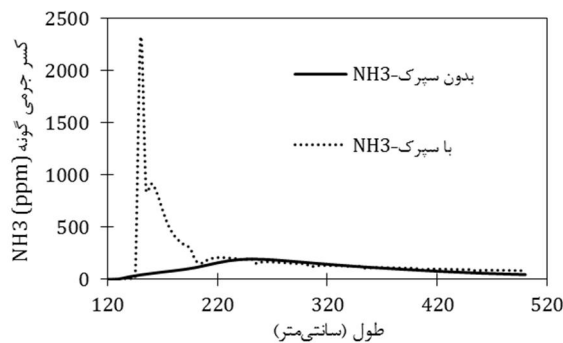
قابل ذکر است مقدار مجاز کسر جرمی آمونیاک در جو 25 تا 50 ppm است [2]. در نتیجه مقدار بیشترین لغزش گونه آمونیاک در حالت تزریق با



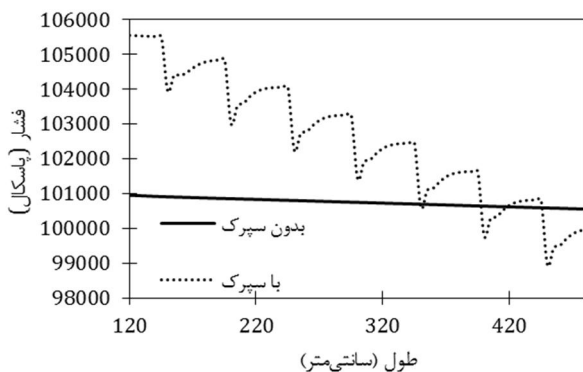
شکل 14 نحوه تعیین زاویه بین دودکش و نازل



شکل 19 تغییرات کسر جرمی گونه NO در مرکز کانال و در راستای طول آن در هنگام استفاده و عدم استفاده از سپرک



شکل 20 تغییرات کسر جرمی گونه NH₃ در مرکز کانال و در راستای طول آن در هنگام استفاده و عدم استفاده از سپرک



شکل 21 تغییرات فشار در طول دودکش در حضور سپرک و بدون حضور سپرک

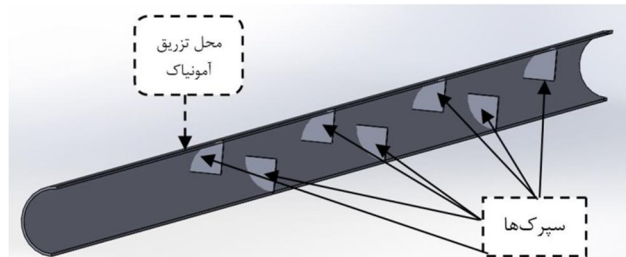
6- نتیجه گیری

در کار حاضر اثر پارامترهای مختلف طراحی بر کاهش آلایندة NO_x با روش کاهش انتخابی غیرکاتالیستی (SNCR)، به صورت عددی بررسی شد. چهار هندسه تزریق آمونیاک توسط یک نازل، دو نازل، چهار نازل و پاشش توسط یک حلقه در دور دودکش با فرض ثابت دبی تزریق آمونیاک مورد بررسی قرار گرفتند. با افزایش تعداد نازل‌ها و در نهایت تبدیل نازل به یک حلقه بازده روش SNCR افزایش یافت. با توجه به نتایج قسمت بررسی تعداد نازل‌های پاشش آمونیاک مختلف، استفاده از دو نازل برای فرآیند SNCR پیشنهاد می‌شود، زیرا دارای مقدار بالای کاهش NO و مقدار لغزش NH₃ کم است. سپس، اثر افزایش طول دودکش بر مقدار گونه NO و NH₃ بررسی شد. با توجه به نتایج به دست آمده در این قسمت، افزایش طول دودکش به منظور کاهش بیشتر NO و کمتر شدن لغزش NH₃ توصیه می‌شود. با ارزیابی تزریق در زوایای 75- تا 75 درجه مشخص شد که با استفاده از نازل‌های با قدر

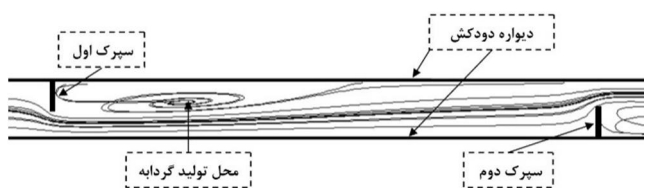
همان‌طور که بیان شد، علت اصلی کاهش طول مورد نیاز برای کاهش گونه NO در هنگام افزودن سپرک تولید گردابه‌هاست. در شکل 18، با کشیدن خطوط جریان، گردابه‌های تولید شده در پشت سپرک نشان داده شده‌اند.

شکل 19 تغییرات کسر جرمی گونه NO در مرکز کانال و در راستای طول آن در هنگام استفاده و عدم استفاده سپرک را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است در هنگام عدم استفاده از سپرک مقدار گونه NO در طول 500 سانتی‌متر به 75 ppm می‌رسد، در حالی که با استفاده از سپرک در طول 250 سانتی‌متر مقدار گونه NO به 75 ppm می‌رسد و طول مورد نیاز برای اختلاط 250 سانتی‌متر کاهش می‌یابد. شکل 20 تغییرات کسر جرمی گونه NH₃ در مرکز کانال و در راستای طول آن در هنگام استفاده و عدم استفاده سپرک را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل در طول‌های بیشتر از 250 سانتی‌متر کسر جرمی گونه NH₃ در هنگام استفاده و عدم استفاده از سپرک رفتار مشابهی دارد، در نتیجه افزودن سپرک بر طول مورد نیاز بر کاهش گونه NH₃ تأثیر نمی‌گذارد.

از پارامترهای مهم و نامطلوب دیگر که در هنگام افزودن سپرک باید مورد بررسی قرار گیرد ایجاد افت فشار در دودکش است. افت فشار اگر بیش از حد باشد مانع خروج محصولات احتراق از دودکش می‌شود. شکل 21 تغییرات فشار در طول دودکش در حضور سپرک و بدون حضور سپرک را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است، در حالت بدون حضور سپرک فشار تقریباً ثابت باقی می‌ماند، در حالی که در حضور سپرک فشار به اندازه 5554 پاسکال در طول دودکش افت می‌کند، که این افت فشار نامطلوب است. با توجه به شکل 21، نقاط کاهش فشار مربوط به مکان‌های حضور سپرک‌ها (150، 200، 250، 300، 350، 400 و 450 سانتی‌متر) هستند. شایان ذکر است در خروجی دودکش فشار در شرایط با حضور سپرک و بدون حضور سپرک، برابر با فشار محیط می‌شود، که این مطلب در تطابق کامل با شکل 21 است.



شکل 17 محل قرارگیری سپرک‌ها در مسیر جریان



شکل 18 گردابه‌های تولید شده بر اثر قرار دادن سپرک در مسیر جریان

- [4] R. K. Lyon, *Method for the Reduction of the Concentration of NO in Combustion Effluents using Ammonia*, U. S. Patent, No. 3900554, 1975.
- [5] M. A. I. Robin, H. J. Price, R. T. Squires, Tailoring NH₃ based SNCR for installation on power plants boilers, *Joint EPA/EPRl Symposium on Stationary Combustion NO_x Control*, US Environmental Protection Agency, United States, pp. 251–289, 1991.
- [6] M. Ostberg, D. J. Kim, E. J. Jan, Influence of mixing on the SNCR process, *Chemical Engineering Science*, Vol. 52, No. 15, pp. 2511–2525, 1997.
- [7] P. E. C. Burstrom, T. S. Lundstrom, CFD-modelling of Selective Non-Catalytic Reduction of NO_x in grate-kiln plants, *Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, Melbourne, Australia, pp. 180–186, 2009.
- [8] E. F. Zanoelo, *Modeling Study of Selective Non-catalytic Reduction of nitrogen Oxides by Ammonia and Urea*, Chemical Kinetics and Fluid Dynamics, Thesis PhD, Department of Chemical Engineering, Torino University, Italy, University Torino, 1999.
- [9] N. Hosseini, *The effect of SNCR NO_x emissions in the combustion of liquid fuel in the furnace*, Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University of Mashhad, 1391. (In Persian)
- [10] M. Shafa, K. Mazaheri, A. Alipoor, Effect of chemical kinetics in predicting NO_x reduction with Selective Non Catalytic Reduction (SNCR) method, *fifth Conference Thermal power plant in Shahid Beheshti University of Tehran*, pp. 76–82, 2014. (In Persian)

مطلق زاویه کوچک‌تر، به‌علت نفوذ بهتر NH₃ به درون محصولات احتراق، بازده SNCR افزایش می‌یابد. درنهایت اثر افزودن چند سپرک در دودکش مورد بررسی بر فرآیند SNCR بررسی شد. با توجه به نتایج افزودن سپرک در مسیر جریان، استفاده از این عامل برای فرآیند SNCR توصیه نمی‌شود، زیرا بر کمتر شدن طول لازم برای پدیده لغزش آمونیاک تأثیر نمی‌گذارد و احتیاج به طولی مشابه با عدم حضور سپرک به منظور رسیدن غلظت گونه NH₃ به مقدار مجاز دارد. همچنین، حضور سپرک باعث افت فشار در مسیر جریان می‌شود.

7- مراجع

- [1] A. Dabir, *Government had a greater role in reducing pollution*, Accessed 2 February 2014; <http://www.mohitzist.ir/fa/content/1140>.
- [2] M. T. Javed, N. Irfan, B. M. Gibbs, Review Control of combustion-generated nitrogen oxides by selective non-catalytic reduction, *Journal of Environmental Management*, Vol.83, pp. 251–289, 2007.
- [3] L. J. Muzio, J. K. Arand, D. P. Teixeira, Gas Phase Decomposition of Nitric Oxide in Combustion Product, *Sixteenth Symposium (International) on Combustion*, University of Leeds, England, pp. 199–208, 1977.