

## بررسی انتشار نیتروژن اکسید در یک دیگ بخار بازیافت گرمایی با دینامیک سیالات محاسباتی

عباس خوشحال<sup>۱\*</sup> و حمید یزدانی<sup>۲</sup>

۱- استادیار مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲- استادیار مهندسی پلیمر، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

دریافت: شهریور ۱۳۹۶، بازنگری: آذر ۱۳۹۶، پذیرش: آذر ۱۳۹۶

**چکیده:** در این پژوهش، انتشار نیتروژن اکسید (NO) در یک دیگ بخار بازیافت گرمایی (HRSG) با دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) بررسی شد. مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده در دیگ بخار HRSG با داده‌های به‌دست آمده از مدل‌سازی، تطابق خوبی بین این مقادیر را نشان داد. این تطابق بیانگر آن بود که مدل‌های مورد استفاده در سوختن و تولید NO برای پیش‌بینی ویژگی‌های جریان، سوختن و انتشار NO در دیگ بخار مناسب هستند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که تولید NO به‌طور کامل به جریان سیال، توزیع دما و غلظت اکسیژن حساس است. همچنین، اثر نسبت اکی‌والان در دبی ثابت هوا بر دمای شعله و تولید NO بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت اکی‌والان در شرایط کم سوخت، دمای شعله در دیگ بخار افزایش یافته و مقدار بیشتری NO تولید شد. با این حال در شرایط پرسوخت، افزایش نسبت اکی‌والان در دبی ثابت هوا، سبب کاهش دمای شعله و تولید NO شد. بیش‌ترین مقدار دمای شعله و NO تولیدی در شرایط استوکیومتری مشاهده شد.

**واژه‌های کلیدی:** دینامیک سیالات محاسباتی، انتشار NO، دیگ بخار HRSG، مدل‌سازی، نسبت اکی‌والان

### مقدمه

است زیرا عامل‌های متفاوتی مانند الگوی جریان سیال، نسبت سوخت به هوا، دمای هوا و غلظت اکسیژن در تولید این آلاینده بسیار مؤثر است. با مشخص شدن اثرهای این عامل‌ها روی NOx تولیدی می‌توان راه‌های کاهش این آلاینده را در دیگ‌های بخار بررسی کرد. مدل‌سازی سوختن در دیگ بخارها با دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> (CFD) یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای مشخص کردن تأثیر این عامل‌ها بر تولید NOx است. این

امروزه یکی از مشکل‌های مربوط به استفاده از سوخت‌های فسیلی، بحث آلودگی‌های محیط‌زیستی آن‌هاست. از مهمترین این آلودگی‌ها، تولید اکسیدهای نیتروژن (NOx) ناشی از احتراق اینگونه سوخت‌هاست که اثرهای مخربی بر محیط‌زیست دارد. یکی از منابع تولید این نوع آلودگی، دیگ بخارهای تولید بخار هستند. سازوکار تولید NOx در اینگونه تجهیزات بسیار پیچیده

1. Computational fluid dynamics

نیروگاه‌ها، بخار تولید می‌شود. بخار تولید شده یا به منظور تولید جریان الکتریسیته در نیروگاه‌ها یا به صورت مستقیم برای مصرف تجهیزات فرایندی در صنایع پتروشیمی مورد استفاده قرار می‌گیرد. افزایش کارایی یک دیگ بخار HRSG سبب افزایش بازده چرخه تولید جریان الکتریسیته از طریق افزایش کیفیت و مقدار بخار تولیدی یا کاهش اتلاف گرمایی می‌شود. از این رو بررسی عامل‌های مهم در درون دیگ بخار که بر کارایی آن اثرگذار است، بسیار ضروری به نظر می‌رسد. این عامل‌ها می‌تواند شامل هندسه HRSG، الگوی جریان، پروفایل دما و سرعت یا توزیع اجزای متفاوت درون HRSG باشد. العبید و همکارانش با به کارگیری یک مدل شبیه‌سازی، رفتار یک دیگ بخار HRSG را در حالتی که بخار درون آن در حالت فوق بحرانی بود، مورد بررسی قرار دادند. فشار بخار درون HRSG بالای ۲۵۰ bar بود. مدل‌سازی انجام شده در زمان شروع به کار و در بارهای<sup>۱</sup> متفاوت، از دقت خوبی برخوردار بود [۱۰]. از آنجا که دیگ‌های بخار با تولید اکسیدهای نیتروژن یکی از تجهیزات آلوده‌کننده محیط زیست هستند، بررسی تولید این آلاینده در داخل دیگ بخار بسیار حائز اهمیت است. همچنین، با توجه به بررسی‌های انجام شده، تاکنون پژوهشی درباره مدل‌سازی تولید NO در یک دیگ بخار HRSG صنعتی انجام نشده است. بنابراین، در این پژوهش احتراق و انتشار NO در یک دیگ بخار HRSG با CFD مورد بررسی قرار گرفته شده است. تجزیه گازهای خروجی از HRSG نشان‌دهنده به‌طور نسبی درصد بالایی از NO در آن‌هاست.

در این پژوهش با مدل‌سازی CFD این دیگ بخار و بررسی تولید NO در آن، علت بالا بودن مقدار آن در گازهای خروجی مورد مطالعه قرار گرفت. از آنجا که تولید NO به غلظت اکسیژن و دما بستگی دارد، با انتخاب مدل‌های مناسب و تعداد فضای محاسباتی بهینه (مش) سعی در افزایش دقت مدل‌سازی شده است. همچنین، اثر نسبت اکی‌والان در دبی‌های متفاوت سوخت بر دما و مقدار NO تولیدی درون دیگ بخار مورد بررسی قرار گرفت. برای محاسبه NO افزون بر سازوکار Thermal NO،

مدل‌سازی شامل حل جریان‌های واکنش‌پذیر همراه با انتقال گرما و انتقال اجزاء است. به‌طور تقریب تمام جریان‌های واکنش‌پذیر در صنعت، متلاطم هستند. از این رو، بحث آشفتگی یکی از فاکتورهای مهم در مدل‌سازی سوختن در دیگ بخارها است. از طرفی، سوختن با انتقال گرما همراه است و بیش‌ترین مقدار انتقال گرما، مربوط به انتقال گرما تشعشعی است که نیاز به انتخاب مدل مناسب برای مدل‌سازی و توصیف آن است. همچنین، در مدل‌سازی احتراق باید به شیمی و سنتیک واکنش به‌طور ویژه توجه و مدلی مناسب انتخاب شود تا توزیع اجزاء تولیدی مانند NOx درون محفظه احتراق به خوبی پیش‌بینی شود. پژوهش‌های متفاوتی در زمینه مدل‌سازی دیگ‌های بخار و انتشار آلودگی NOx وجود دارد [۱ تا ۴]. چوی و کیم سوختن و انتشار NOx در یک دیگ بخار زغال سنگ را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. برای محاسبه NOx مدل‌های Fuel و Thermal NOx به کار گرفته شدند. نتایج نشان داد که مقدار NOx تولیدی به شدت به دما وابسته است. به کارگیری فناوری سوختن مرحله‌ای هوا سبب کاهش دمای درون دیگ بخار و در نتیجه کاهش مقدار NOx تولیدی با سازوکار Thermal NOx شد. همچنین، با کاهش مقدار تماس نیتروژن موجود در سوخت با اکسیژن هوا با این روش، مقدار تولید NOx با سازوکار Fuel NOx کاهش پیدا کرد [۵]. در پژوهشی دیگر، مدلی برای بررسی تولید NOx در یک دیگ بخار صنعتی توسط لی و تامسون ارائه شد. این مدل، از سازوکار توسعه یافته زلدوویچ<sup>۲</sup> مشتق شده بود. برای بررسی دقت مدل‌سازی از داده‌های تجربی استفاده شده بود. در این پژوهش، اثر عامل‌های متفاوت مانند دبی سوخت، نسبت سوخت به هوا و زوایای متفاوت قرارگیری مشعل‌ها نسبت به دیواره دیگ بخار، روی NOx تولیدی بررسی شد [۶].

گروهی دیگر از پژوهش‌ها در زمینه دیگ‌های بخار، مربوط به مدل‌سازی، بهینه‌سازی یا بررسی پدیده‌های متفاوت در دیگ بخار بازیافت گرمایی<sup>۳</sup> (HRSG) است [۷ تا ۹]. در این نوع دیگ بخار با بازیافت گرما گازهای داغ خروجی از توربین‌های گازی

1. Extended Zeldovich mechanism 2. Heat recovery steam generator 3. Loads

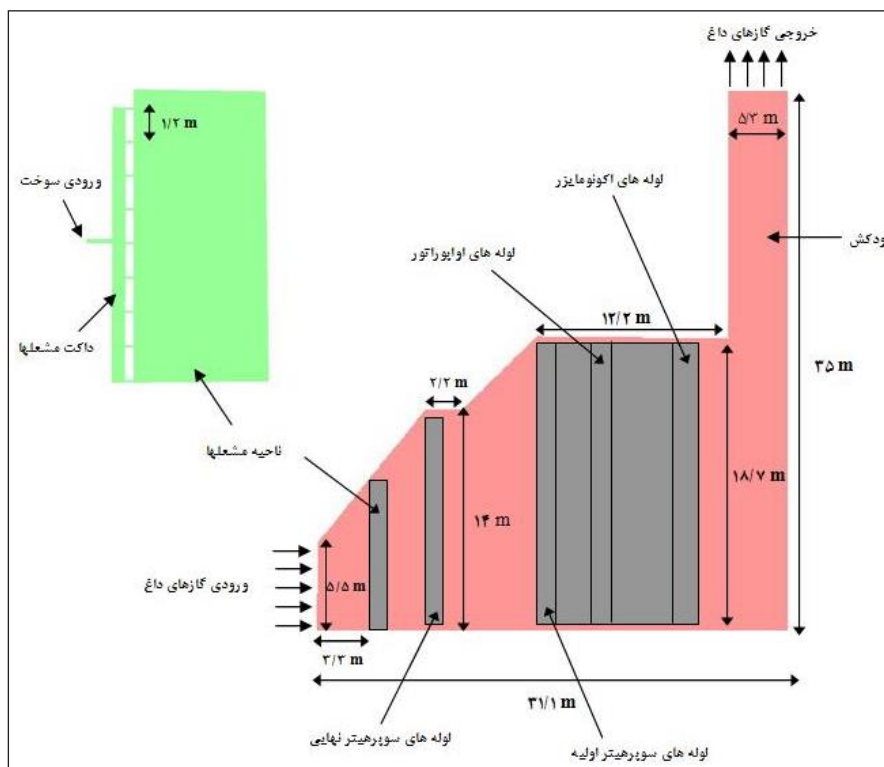
یک لوله به قطر داخلی ۱۵۵ mm وارد یک مجرا<sup>۱</sup> شده و از طریق آن بین افشانک‌های سوخت که تعدادشان ۹ عدد است، تقسیم می‌شود. قطر داخلی افشانک‌های سوخت ۷۸ mm است که در دیواره دیگ بخار واقع شده‌اند. مشعل‌ها در فاصله ۳٫۳ m از ورودی دیگ بخار و به فاصله ۱٫۲ m از یکدیگر نزدیک لوله‌های ابرگرماساز قرار دارند. سوخت مورد استفاده در مشعل‌ها، گاز طبیعی بوده که ترکیب‌های آن شامل ۸۵٫۳۱٪ جرمی متان، ۹٫۴۲٪ جرمی اتان، ۲٫۵۷٪ جرمی پروپان، ۱٫۱۵٪ نرمال بوتان، ۰٫۸۴٪ جرمی ازت و ۰٫۷۱٪ کربن دی‌اکسید است. دبی گاز طبیعی ورودی به افشانک‌های سوخت ۲٫۱۴ kg/s است. دیگ بخار HRSG با آجرهای ویژه به‌طور کامل عایق‌بندی شده است به‌طوری‌که انتقال گرما از داخل به بیرون دیگ بخار به‌طور تقریب برابر صفر است. این دیگ بخار دارای چهار گروه لوله است که در شکل ۱ نشان داده شده است.

سازوکار Promp NO نیز به‌کارگرفته شده است که این مورد در مدل‌سازی دیگ‌های بخار صنعتی منحصربه‌فرد است.

## بخش تجربی

معرفی دیگ بخار بازیافت گرمایی

در این پژوهش، یک دیگ بخار بازیافت گرمایی با ظرفیت ۳۳۰ ton/h بخار با فشار ۴۳ atm و دمای ۴۳۰ °C مدل‌سازی شده است. دیگ بخار HRSG در مسیر گازهای داغ خروجی از توربین واقع شده است. غلظت اکسیژن در گازهای داغ ورودی به دیگ بخار ۱۵٫۵٪ جرمی، غلظت بخار آب ۵٫۴٪ جرمی، غلظت دی‌اکسید کربن ۵٪ جرمی و غلظت نیتروژن ۷۴٫۱٪ جرمی بود. ارتفاع دیگ بخار ۱۸٫۷ m، طول آن ۳۱٫۱ m و عرض آن ۵ m بود. دبی گازهای داغ خروجی از توربین و ورودی به دیگ بخار، ۳۹۰ kg/s با دمای ۵۵۲٫۸ °C بود. سوخت مشعل‌ها از طریق

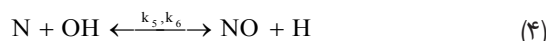
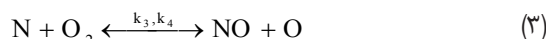
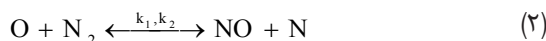


شکل ۱ مشخصات و ابعاد دیگ بخار HRSG

1. Duct

مدل‌ها و روابط ریاضی

توسعه یافته زلدوویچ شناخته می‌شوند. واکنش‌های اصلی که تشکیل NO گرمایی را از نیتروژن مولکولی هدایت می‌کنند به صورت زیر هستند:



سرعت تشکیل NO از معادله ۵ به دست می‌آید:

$$\frac{d[NO]}{dt} = \frac{1}{1 + \frac{k_2[NO]}{k_3[O_2] + k_5[OH]}} \times \left[ 2k_1[O][N_2] - \frac{2k_2}{k_3[O_2] + k_5[OH]} \times (k_4[O][NO] + k_6[H][NO]) \right] \quad (5)$$

که در آن:

$$k_i = A_i T^{B_i} \exp\left(\frac{-C_i}{T}\right) \quad (6)$$

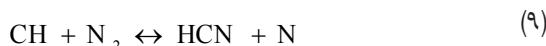
T دما،  $A_i$ ،  $B_i$  و  $C_i$  مقادیر ثابت و  $k_i$  ها ثابت‌های سرعت واکنش هستند که توسط بالچ و همکارانش تعیین شده‌اند [۱۵]. غلظت‌های [O] و [OH] از معادله‌های ۷ و ۸ محاسبه می‌شوند [۱۶].

$$[O] = 36.64 \times T^{1/2} \times \exp\left(\frac{-27123}{T}\right) \times [O_2]^{1/2} \quad (7)$$

$$[OH] = 2.129 \times 10^{-2} \times T^{-0.57} \times \exp\left(\frac{-4595}{T}\right) \times [O]^{1/2} [H_2O]^{1/2} \quad (8)$$

مدل برانگیخته NO

سازوکار تولید NO برانگیخته شامل یک سری واکنش‌هاست که به صورت زیر بیان می‌شوند:



اساس مدل‌سازی با CFD حل معادلات بقای جرم، تکانه، پیوستگی، انرژی و ... است. این معادله‌ها با روش‌های عددی و به وسیله نرم‌افزار حل می‌شوند. در بیشتر کدهای CFD از معادله‌های رینولدز و ناویر-استوکس برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. در این پژوهش از مدل اغتشاش  $k - \epsilon$  RNG [۱۱] برای مدل‌سازی جریان‌های متلاطم، استفاده شده است. این مدل برای جت‌های دوار دقت بالایی دارد. برای محاسبه‌های تشعشع از مدل  $DO^{12}$  استفاده شده است، زیرا این مدل در گستره وسیعی از ضخامت‌های نوری کاربرد دارد و مدل EDC<sup>۴</sup> [۱۳] برای مدل‌سازی احتراق و جریان‌های واکنش‌پذیر به کار گرفته شده است.

مدل‌های تولید NO

اکسیدهای نیتروژن که اتمسفر را آلوده می‌کنند، نیتروژن مونواکسید (NO)، نیتروژن دی‌اکسید ( $NO_2$ ) و نیتروس اکسید ( $N_2O$ ) هستند. این ترکیب‌ها به طور معمول به عنوان  $NO_x$  شناخته می‌شوند. از آنجا که مقدار  $NO_2$  و  $N_2O$  تولیدی در فرایندهای سوختن بسیار کم است [۱۴]، بنابراین، تمرکز این پژوهش بر تولید و انتشار NO است. مقدار NO تولیدی در طی فرایند سوختن با معادله انتقال زیر تعیین می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m_{NO}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} m_{NO}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla m_{NO}) + S_{NO} \quad (1)$$

که در آن،  $m_{NO}$  جزء جرمی،  $\rho$  چگالی،  $\mathbf{u}$  بردار سرعت جریان و  $S_{NO}$  ترم منبع NO است که دلالت به تولید یا مصرف NO دارد و با مدل‌های متفاوت تولید NO قابل تعیین است. در این پژوهش، از مدل‌های NO گرمایی<sup>۵</sup> و NO برانگیخته<sup>۶</sup> برای مدل‌سازی انتشار NO استفاده شده است.

مدل NO گرمایی

تشکیل NO گرمایی با یک سری واکنش‌های شیمیایی که به شدت به دما بستگی دارند، تعیین می‌شوند که به عنوان سازوکار

1. Nozzle 2. Discrete ordinate 3. Optical thickness 4. Eddy dissipation concept 5. Thermal NO 6. Prompt NO

منبع NO که در معادله ۱ ظاهر شده است، بر طبق سازوکارهای شرح داده شده، به صورت زیر محاسبه می شود:

$$S_{NO} = M_{NO} \left[ \frac{d[NO]_{thermal}}{dt} + \frac{d[NO]_{prompt}}{dt} \right] \quad (19)$$

که در آن،  $M_{NO}$  جرم مولکولی NO است.

#### شرایط مرزی و الگوریتم حل

شرایط مرزی برای این مدل سازی در بیشترین ظرفیت دیگ بخار (تولید  $33000 \text{ kg/t}$  بخار) به این صورت است:

• گازهای داغ ورودی به HRSG (دبی جرمی:  $390 \text{ kg/s}$ ، دما:  $552.8^\circ \text{C}$ )

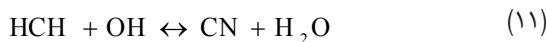
• درصد جرمی اجزای موجود در گازهای داغ ورودی به HRSG (اکسیژن:  $15.5\%$ ، کربن دی اکسید:  $5\%$ ، بخار آب:  $5.4\%$ ، نیتروژن:  $74.1\%$ )

• خروجی از سامانه از طریق دودکش (فشار خروجی: اتمسفریک)  
• گاز طبیعی ورودی به مشعل ها (دبی جرمی:  $2.14 \text{ kg/s}$ ، دما:  $28^\circ \text{C}$ )

دیواره های دیگ بخار بی دررو<sup>۱</sup> (مقدار شار گرمایی برابر صفر) و سامانه در حالت پایدار در نظر گرفته شده است. در مدل سازی برای ارتباط سرعت- فشار از روش SIMPLE و از الگوی مجزاسازی مرتبه دوم Upwind برای تکانه، انرژی جنبشی آشفته<sup>۲</sup> و اتلاف انرژی استفاده شده است. مقدار خطای محاسباتی برای همگرایی عامل های متفاوت مانند معادله پیوستگی، سرعت، انرژی و جزء مولی اجزاء حدود  $10^{-5}$  و برای تولید NO حدود  $10^{-6}$  انتخاب شد.

#### مدل سازی CFD

در این پژوهش، از نرم افزار 6.2 FLUENT [۱۸] برای مدل سازی احتراق و انتشار NO در دیگ بخار HRSG استفاده شده است. با استفاده از این نرم افزار امکان حل معادلات اغتشاش، تشعشع، سوختن و تولید NO به صورت عددی امکان پذیر شده



برای سوخت های گازی، دسوت [۱۷] سرعت تولید NO را به صورت معادله ۱۵ بیان کرد.

$$\frac{d[NO]}{dt} = f k_{pr} [O_2]^b [N_2] [Fuel] \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (15)$$

که در آن:

$$f = 4.75 + 0.0819 n - 23.2 \Phi + 32 \Phi^2 - 12.2 \Phi^3 \quad (16)$$

$$k_{pr} = 6.4 \times 10^6 \left(\frac{RT}{P}\right)^{b+1} \quad (17)$$

R ثابت جهانی گازها، فشار،  $K_{pr}$  ثابت سرعت فشاری،  $E_a$  انرژی فعال سازی واکنش، n تعداد اتم های کربن در سوخت هیدروکربنی،  $\Phi$  نسبت اکی والان، f مقدار ثابت و b جزء مولی اکسیژن در شعله است که از رابطه زیر به دست می آید:

$$b = \begin{cases} 1 & [O_2] \leq 4.1 \times 10^{-3} \\ -3.95 - 0.9 \ln[O_2] & 4.1 \times 10^{-3} \leq [O_2] \leq 1.11 \times 10^{-2} \\ -0.35 - 0.1 \ln[O_2] & 1.11 \times 10^{-2} < [O_2] < 0.03 \\ 0 & [O_2] \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

دمای شعله بر اساس تعداد متفاوت مش‌ها برای شرایط ورودی یکسان، مورد بررسی قرار گرفته شد. جدول ۱ مقادیر بیشتر دمای شعله بر اساس تعداد مش‌ها را نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که بیش‌ترین دمای شعله پیش‌بینی شده برای تعداد مش‌ها برابر با ۱۲۳۳۷۴۶ و ۱۴۹۷۳۴۴ بسیار نزدیک به هم هستند. بنابراین، به منظور کاهش زمان محاسبات می‌توان از تعداد مش‌های بیشتر از ۱۲۳۳۷۴۶ صرف‌نظر کرد و این تعداد مش را به عنوان مش بهینه برای مدل‌سازی انتخاب کرد. تعداد دفعات حدس و خطا تا حصول نتیجه دلخواه و همگرا شدن نتایج، ۱۷,۹۶۸ بود.

جدول ۱ بیش‌ترین دمای شعله پیش‌بینی شده بر اساس تعداد مش‌ها

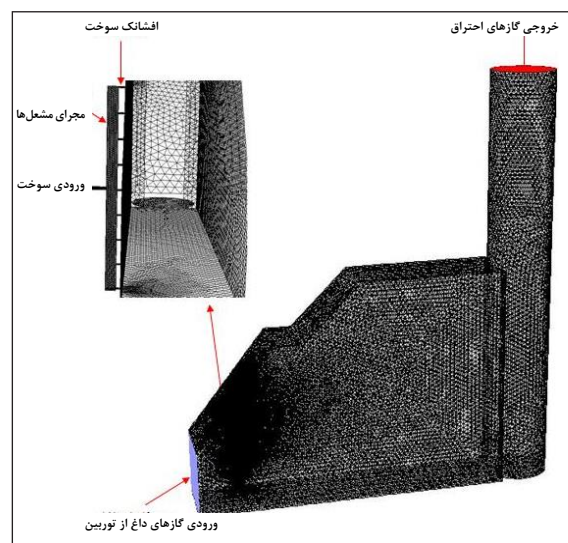
ردیف	تعداد حجم‌های کنترل	بیش‌ترین دمای شعله پیش‌بینی شده (°C)	درصد تفاوت
۱	۸۵۴۱۶۱	۱۹۰۵۳۱	-
۲	۱۰۱۴۲۱۷	۱۸۴۷۲۴	۳,۰۴۷
۳	۱۲۳۳۷۴۶	۱۸۲۴,۱۵	۱,۲۴۹
۴	۱۴۹۷۳۴۴	۱۸۲۱,۷۹	۰,۱۲۹

## نتیجه‌ها و بحث

### بررسی دقت مدل‌سازی

برای بررسی دقت مدل‌سازی، غلظت‌های  $CO_2$ ،  $O_2$  و  $NO$  به‌دست آمده از مدل‌سازی با غلظت اندازه‌گیری شده این مواد، در جدول ۲ مقایسه شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که مقدار خطا برای غلظت‌های  $O_2$  و  $CO_2$  کمتر از ۵٪ و برای  $NO$  حدود ۶,۳۹٪ است. بنابراین، تطابق خوبی بین داده‌های به‌دست آمده از مدل‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده وجود دارد. این نتیجه بیانگر آن است که مدل‌های انتخابی برای این مدل‌سازی، مناسب هستند. از طرفی مقدار دمای بی‌دررو شعله به‌دست آمده از مدل‌سازی حدود  $1824\text{ }^{\circ}C$  است. این مقدار با توجه به شرایط مسأله در مرجع [۱۹] برابر با  $1850\text{ }^{\circ}C$  محاسبه شده که در مقایسه با مقدار مدل‌سازی، مقدار خطای ۱,۴٪ را نشان می‌دهد.

است. دیگ بخار موردنظر ابتدا در نرم‌افزار GAMBIT به حجم‌های محاسباتی کوچک (مش) تقسیم‌بندی شد. در این نرم‌افزار شکل هندسی HRSG با کوچک‌ترین جزئیات، ترسیم و پس از مش‌بندی، شرایط مرزی و اولیه به آن اعمال شده است. شکل ۲ طرح‌واره‌ای از HRSG مدل شده به همراه افشانک‌های سوخت را نشان می‌دهد. برای بررسی بهتر احتراق و تولید  $NO$ ، اندازه مش‌ها در اطراف افشانک‌های سوخت جایی که شعله تشکیل می‌شود، کوچک‌تر از سایر نقاط HRSG انتخاب شده است.

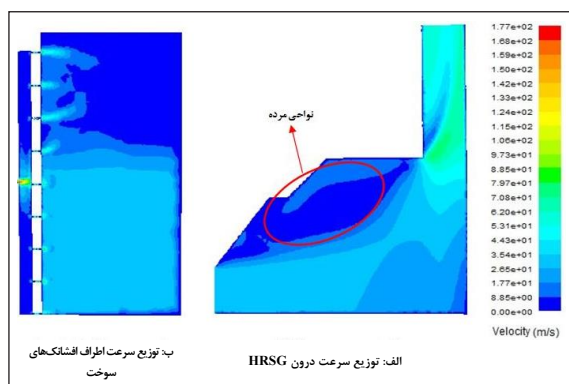


شکل ۲ دیگ بخار HRSG و مش‌های مدل شده

در مرحله بعدی، دیگ بخار مدل شده برای اعمال معادلات مربوطه، به نرم‌افزار FLUENT منتقل شد. به منظور مطالعه اثر تعداد حجم‌های کنترل روی محاسبات و یافتن تعداد بهینه حجم کنترل که هم جواب‌های قابل قبولی را ارائه دهد و هم‌زمان انجام محاسبات به ازای آن زیاد نباشد، چهار اندازه متفاوت مش مورد بررسی قرار گرفت. این اندازه مش‌ها از بزرگ به کوچک به ترتیب تولیدکننده تعداد ۸۵۴۱۶۱، ۱۰۱۴۲۱۷، ۱۲۳۳۷۴۶ و ۱۴۹۷۳۴۴ مش هستند. این تعداد مش، مربوط به دیگ بخار HRSG و افشانک‌های سوخت است. بدین منظور، بیش‌ترین

جدول ۲ مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و نتایج مدل‌سازی دیگ بخار HRSG

ردیف	غلظت مواد	محل اندازه‌گیری (خروجی از دودکش)	مقادیر اندازه‌گیری شده	نتایج مدل‌سازی
۱	O <sub>2</sub> (درصد جرمی)	فاصله ۱ متری از دیواره دودکش	۱۱,۷۴	۱۱,۲۶
		فاصله ۲ متری از دیواره دودکش	۱۱,۸۰	۱۱,۳۱
		فاصله ۲,۶ متری از دیواره دودکش (مرکز دودکش)	۱۱,۸۳	۱۱,۳۵
۲	CO <sub>2</sub> (درصد جرمی)	فاصله ۱ متری از دیواره دودکش	۶,۳۶	۶,۶۵
		فاصله ۲ متری از دیواره دودکش	۶,۴۱	۶,۶۹
		فاصله ۲,۶ متری از دیواره دودکش (مرکز دودکش)	۶,۴۳	۶,۷۱
۳	NO (ppm)	فاصله ۱ متری از دیواره دودکش	۱۷۶	۱۶۴
		فاصله ۲ متری از دیواره دودکش	۱۷۳	۱۶۲
		فاصله ۲,۶ متری از دیواره دودکش (مرکز دودکش)	۱۷۲	۱۶۱



شکل ۳ توزیع سرعت داخل دیگ بخار HRSG از دو نمای متفاوت

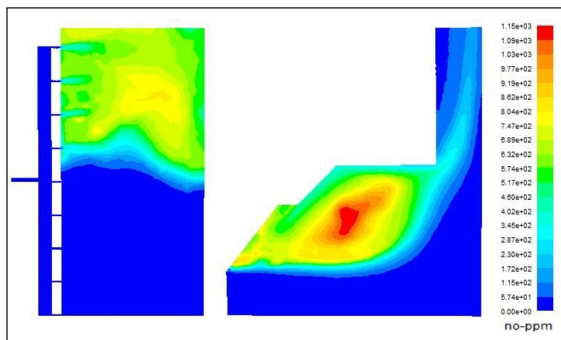
شکل ۴ توزیع دما در داخل دیگ بخار HRSG و اطراف افشانک‌های سوخت را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست، دما در نزدیکی مشعل‌ها جایی که شعله تشکیل می‌شود، بیشتر از سایر نواحی است. نکته مهم در این حالت، این است که بیشترین مقدار دما در نواحی مرده است. در این ناحیه به علت

### تغییرات سرعت و دما داخل HRSG

شکل ۳ کانتورهای سرعت در داخل دیگ بخار HRSG از دو نمای متفاوت یکی نواحی اطراف افشانک‌های سوخت و دیگری داخل HRSG و نزدیک ورودی دیگ بخار جایی که گازهای داغ خروجی از توربین وارد دیگ بخار می‌شوند را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار سرعت در مقطع ورودی سوخت به مجرا افشانک‌ها است. همچنین، مقدار سرعت در ورودی دیگ بخار به دلیل ورود گازهای داغ به درون دیگ بخار زیاد است. سرعت‌های بالا در دودکش نیز مشاهده می‌شود که علت این امر کاهش سطح مقطع عبور سیال در دودکش است. در بالای ناحیه ورودی به HRSG، به دلیل تشکیل نواحی مرده، مقدار سرعت کمترین مقدار است. سرعت سیال در ناحیه پایینی افشانک‌ها نیز به دلیل عبور گازهای داغ از این ناحیه، زیاد است ولی سرعت سیال در ناحیه بالایی افشانک‌های سوخت به علت وجود نواحی مرده، بسیار کمتر از سایر نواحی دیگر است.



در اطراف افشانک‌های سوخت که عمل سوختن انجام می‌شود و در نواحی مرده که دما بالا است، مقدار تولید NO بیشتر از جاهای دیگر است زیرا NO تولید شده به دما و غلظت اکسیژن به شدت وابسته است. از طرفی مشاهده می‌شود که در قسمت پایینی افشانک‌های سوخت، مقدار تولید NO بسیار کم است. در این ناحیه چون اختلاط سوخت با گازهای داغ بسیار خوب انجام می‌شود، سبب شده که مقدار تولید NO بسیار کم باشد. زیرا اختلاط مناسب سوخت با گازهای داغ سبب کاهش پیک‌های دمایی شعله می‌شود. بنابراین، می‌توان گفت که دلیل اصلی زیاد بودن غلظت NO در گازهای خروجی از HRSG وجود نواحی مرده در قسمت بالایی افشانک‌های سوخت است که سبب شده دما در این نواحی زیاد، اختلاط سوخت و گازهای داغ نامناسب و در نتیجه تولید NO زیاد باشد.

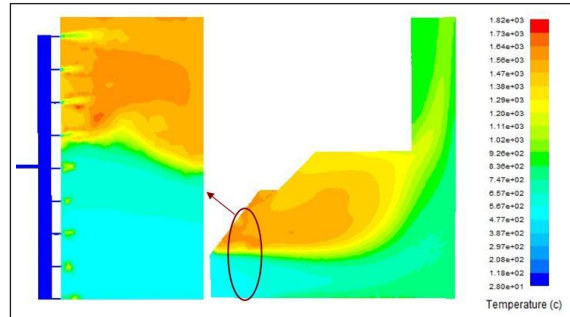


شکل ۶ توزیع غلظت NO داخل دیگ بخار HRSG و اطراف افشانک‌های سوخت

#### تأثیر نسبت اکی‌والان

در این پژوهش، اثر نسبت اکی‌والان ( $\Phi$ ) در دبی ثابت هوا و دبی‌های متفاوت سوخت بر بیش‌ترین دمای شعله و مقدار NO تولیدی، مورد بررسی قرار گرفت. نسبت اکی‌والان، نسبت سوخت به هوا در شرایط واقعی به شرایط استوکیومتری است. شکل ۷ اثر نسبت اکی‌والان بر بیش‌ترین دمای شعله در دبی ثابت هوا و دبی‌های متفاوت سوخت را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، در شرایط کم سوخت ( $\Phi < 1$ ) با افزایش نسبت اکی‌والان، بیش‌ترین دمای شعله

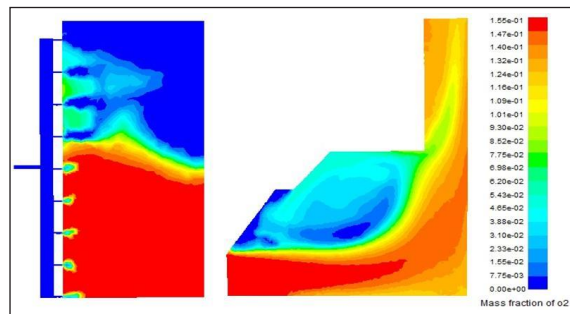
سرعت پایین سیال، امکان اختلاط مناسب سیال با گازهای داغ ورودی به دیگ بخار وجود نداشته و این امر سبب تشکیل نواحی داغ می‌شود.



شکل ۴ توزیع دما داخل دیگ بخار HRSG و اطراف افشانک‌های سوخت

#### توزیع اجزاء

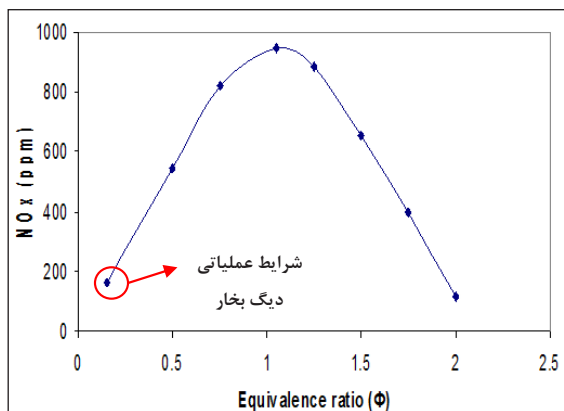
توزیع غلظت اکسیژن در داخل دیگ بخار HRSG در شکل ۵ نمایش داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که بیش‌ترین غلظت اکسیژن در ناحیه ورودی HRSG است، جایی که گازهای داغ خروجی از توربین وارد دیگ بخار می‌شوند. غلظت اکسیژن در نواحی نزدیک مشعل‌ها به خاطر واکنش سوختن، کاهش یافته است. همچنین، در ناحیه مرده که گازهای داغ از آنجا عبور نمی‌کنند، غلظت اکسیژن کم است.



شکل ۵ توزیع غلظت اکسیژن داخل دیگ بخار HRSG و اطراف افشانک‌های سوخت

توزیع NO در داخل دیگ بخار و اطراف افشانک‌های سوخت در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود



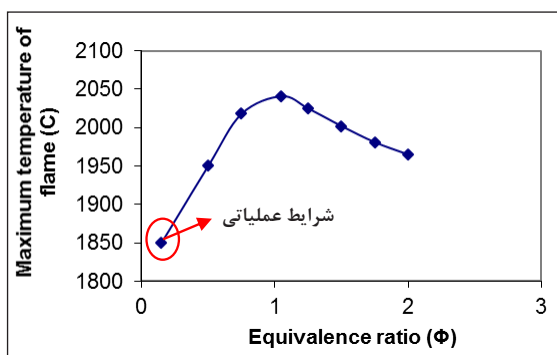


شکل ۸ اثر نسبت اکی‌والان روی NO تولیدی

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با مدل‌سازی یک دیگ بخار باز یافت گرمایی با CFD در مقیاس واقعی این امکان به وجود آمد که بتوان دلیل بالا بودن غلظت NO در گازهای خروجی از این دیگ بخار و شرایط تولید این آلاینده در داخل دیگ بخار را مشخص کرد. مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده در واحد HRSG با داده‌های به دست آمده از مدل‌سازی، سازگاری خوبی بین این مقادیر را نشان داد. نتایج مدل‌سازی بیانگر آن بود که تولید NO به شدت به دما، غلظت اکسیژن و نحوه مخلوط شدن سوخت با هوا برای عمل سوختن بستگی دارد. بیش‌ترین مقدار NO در نواحی مرده تولید شد. همچنین، در این پژوهش اثر نسبت اکی‌والان در دبی ثابت هوا و دبی‌های متفاوت سوخت روی بیش‌ترین دمای شعله و مقدار NO تولیدی، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در شرایط کم سوخت با افزایش نسبت اکی‌والان، اکسیژن با سوخت واکنش داده و دمای شعله و NO تولیدی افزایش پیدا می‌کند. در حالت پر سوخت با افزایش نسبت اکی‌والان در دبی ثابت هوا، مقدار سوخت در ناحیه شعله افزایش یافت بدون اینکه اکسیژن کافی در این ناحیه موجود باشد. بنابراین، در این شرایط سوخت اضافی سبب کاهش بیش‌ترین دمای شعله شد. همچنین، چون در این ناحیه اکسیژن کمی وجود داشت، مقدار NO تولیدی کاهش پیدا کرد. بیش‌ترین مقدار NO تولیدی در شرایط استوکیومتری نزدیک نسبت اکی‌والان ( $\Phi = 1$ ) بود.

افزایش می‌یابد، زیرا در این حالت در ناحیه شعله، اکسیژن به مقدار کافی موجود بوده و با سوخت واکنش داده و بیش‌ترین دمای شعله افزایش می‌یابد. در شرایط استوکیومتری ( $\Phi = 1$ ) بیش‌ترین دمای شعله به بالاترین مقدار می‌رسد زیرا در این شرایط تمام اکسیژن با تمام سوخت واکنش می‌دهد. در شرایط پر سوخت ( $\Phi > 1$ ) با افزایش نسبت اکی‌والان، مقدار سوخت در ناحیه شعله افزایش یافته بدون اینکه اکسیژن کافی در این ناحیه موجود باشد. بنابراین، در این شرایط سوخت اضافی سبب کاهش بیش‌ترین دمای شعله می‌شود.



شکل ۷ اثر نسبت اکی‌والان روی بیش‌ترین دمای شعله

اثر افزایش نسبت اکی‌والان در دبی ثابت هوا و دبی‌های متفاوت سوخت بر NO تولیدی در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود در حالت کم سوخت ( $\Phi < 1$ ) با افزایش نسبت اکی‌والان چون اکسیژن زیادی در ناحیه شعله موجود است، اکسیژن با سوخت واکنش داده و دمای شعله را بالا می‌برد که به دلیل وجود اکسیژن زیاد و دمای بالا، مقدار NO تولیدی افزایش می‌یابد. در ناحیه پر سوخت ( $\Phi > 1$ ) با افزایش نسبت اکی‌والان در دبی ثابت هوا، بیش‌ترین دمای شعله کم می‌شود و چون در این ناحیه اکسیژن کمی وجود دارد، مقدار NO تولیدی کاهش می‌یابد. بیش‌ترین مقدار NO تولیدی در شرایط استوکیومتری نزدیک نسبت اکی‌والان ( $\Phi = 1$ ) است، زیرا در این شرایط دما و مقدار اکسیژن زیاد است.

## مراجع

- [1] Secco, S.D.; Juan, O.; Louisy, M.L.; Lucas, J.Y.; Plion, P.; and Porcheron, L.; Fuel 158, 672-683, 2015.
- [2] Zha, Q.; Li, D.; Wang, C.; and Che, D.; Applied Thermal Engineering 116, 170-181, 2017.
- [3] Ling, Z.; Ling, B.; Kuang, M.; Li, Z.; and Lu, Y.; Applied Energy 187, 689-705, 2017.
- [4] Tan, P.; Xia, J.; Zhang, C.; Fang, Q.; and Chen, G.; Energy 94, 672-679, 2016.
- [5] Choi, C.R.; and Kim, C.N.; Fuel 88, 1720-1731, 2009.
- [6] Li, N.; and Thompson, S.A.; UKACC International conference on control 96, 1016-21, 1996.
- [7] Mokhtari, H.; Ahmadisedigh, H.; Ameri, M.; Energy 118, 399-413, 2017.
- [8] Kumar, N.R.; Krishna, K.R.; Raju, A.V.S.; Energy Engineering 104, 64-78, 2009.
- [9] Franco, A.; Giannini, N.; Applied Thermal Engineering 25, 1293-1313, 2005.
- [10] Alobaid, F.; Ströhle, J.; Epple, B.; and Kim, H.G.; Applied Engineering 86, 1274-1282, 2009.
- [11] Launder, B.E.; and Spalding, D.B.; Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 3, 269-289, 1974.
- [12] Chui, E.H.; Raithby, G.D.; Numerical Heat Transfer Part B-Fundamentals 23, 269-288, 1993.
- [13] Magnussen, B.F.; 19th Proc. AIAA aerospace science meeting, Missouri, USA, 1981.
- [14] Coelho, P.J.; Carvalho, M.G.; Combustion Science and Technology 108, 363-82, 1995.
- [15] Baulch, D.L.; Drysdall, D.D.; Horne, D.G.; "Evaluated kinetic data for high temperature reactions", Butterworth, UK, 1973.
- [16] Westbrook, C.K.; Dryer, F.L.; Progress in Energy and Combustion Science 10, 1-57, 1984.
- [17] De Soete, G.G.; 15th Proc. on Combustion, The combustion institute, Tokyo, Japan, 1093-1102, 1975.
- [18] FLUENT, Inc., FLUENT 6.2 User's Guide, 2005.
- [19] Lefebvre, A.H.; Ballal, D.R.; "Gas Turbine Combustion", CRC Press, Third Edition, New York, 2010.