

کاهش تولید NO_x در کوره های شکست حرارتی با استفاده از روش بازسوزش

غلامرضا صالحی^{۱*}، ابراهیم محمدپور^۲، محمدحسین مشرفی^۳، علی لهراسبی^۴

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نوشهر

(* پست الکترونیک نویسنده مخاطب: salehi.iuans@gmail.com)

چکیده

با توجه به اهمیت روز افزون ترکیبات اولفینی به عنوان ماده اولیه بسیاری از صنایع پتروشیمی، بررسی راکتورهای شکست حرارتی در جهت تولید محصولات اولفینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. دمای بالای مورد نیاز برای شکست حرارتی در راکتور باعث تولید میزان زیادی آلاینده‌ی NO_x در محصولات احتراق درون کوره می‌شود. در این تحقیق کاهش آلاینده‌های ناشی از احتراق درون کوره های شکست حرارتی با استفاده از روش بازسوزش و به کار گیری مشعل های دیفیوژن بررسی و شبیه سازی شده است. در تحلیل انجام گرفته از نسبت های مختلف تعادلی برای مشعل های طبقات مختلف به منظور ایجاد شرایط غنی و فقیر از سوخت، با ثابت نگه داشتن توان حرارتی کوره، مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از نتایج حاصله بهینه سازی مناسب انجام گرفته و مقادیر بهینه برای نسبت های تعادلی در مناطق غنی و فقیر استخراج شده است.

واژه‌های کلیدی: شبیه سازی- بهینه سازی- کاهش NO_x- بازسوزش- آلاینده ها

۱- مقدمه

بهترین فرآیند تولید اولفین‌ها شکست حرارتی هیدروکربنها در مجاورت بخار آب می‌باشد. شکست حرارتی در دمای بالا (۸۰۰-۹۰۰) و در درون راکتور شکست حرارتی درون کوره انجام می شود. مدل‌هایی که برای شبیه سازی بخش تشعشی کوره‌ها موجود می باشد، به دو دسته تقسیم می شوند: ۱-مدلهایی بر مبنای مدل ناحیه ای ۲- مدل‌هایی بر مبنای حل عددی معادلات ناویر استوکس. مدل‌های ریاضی که بر مبنای مدل ناحیه ای می باشند، به سه دسته تقسیم می شوند: ۱- مدل کوره با جریان اختلاط کامل ۲- مدل کوره با جریان پیستونی و ۳- مدل کوره چند ناحیه ای [۱]

در مدل‌های فوق پدیده احتراق تعادلی فرض می‌گردد که در نتیجه، تحلیل درستی از عمل احتراق داده نمی‌شود. به عنوان مثال حرارت تولیدی ناشی از عمل احتراق را به طور یکنواخت بین نواحی حجمی گاز توزیع می‌کنند که با توجه به درجه حرارت نواحی و توزیع این گونه‌ها، این فرض درست نمی باشد. لذا وارد نمودن احتراق در شبیه سازی کوره ها توسط این مدل با تقریب زیادی همراه است. جهت آنالیز دقیق کوره باید از روشهای عددی استفاده نمود. [۲] اکثر تحقیقاتی که در مورد شبیه سازی کوره شکست حرارتی توسط مدل‌های ناحیه ای یا عددی انجام شده در آزمایشگاه تحقیقاتی گنت (Gent) در کشور بلژیک بوده است. [۳]

از جمله اینکه ۱۰۰۰ واکنش با ۱۲۸ جزء و انواع خوراک مورد مطالعه قرار گرفته است. مارین و همکاران (G.B. Marin) در این زمینه نرم افزارهایی به نام فلوسیم (FLOWSIM) و کرکسیم (CRACKSIM) ارائه کرده اند. شبیه سازی همزمان

۱ و ۴- عضو هیئت علمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نوشهر

۲ و ۳- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی



FCCI2012-6017

کوره و راکتور نیاز به محاسبات شار حرارتی دارد که بر پایه معادلات ناحیه بندی هاتل (Hottel) و ساروفیم (Sarofim) انجام شده است. رآو (Rao) و همکاران نتایج شبیه‌سازی همزمان کوره و راکتور را که در آن از معادلات ناحیه‌بندی استفاده نمودند در مرجع [۴] ارائه کردند.

از دیگر تحقیقاتی که بر روی کوره انجام شده است مطالعاتی بر روی تاثیر و مقایسه انواع مدل‌های تشعشعی در شبیه‌سازی عددی تشعشع درون کوره الفین می باشد. محققان با استفاده از مدل احتراقی سه مرحله ای برای سوخت که شامل متان و هیدروژن است و همچنین مدل توربولانسی $k-\epsilon$ ، مدل‌های تشعشعی DO، Rosseland، P-1، به تحلیل انتقال حرارت و انتقال اجزاء در کوره پرداخته و نتایج آن برای مدل‌های مختلف مقایسه شده و مدل بهینه مدل DO انتخاب شده است. [۵]

استفانیدیس و همکاران (Stefanidis) با استفاده از جزئیات مکانیزم احتراق به شبیه سازی کوره شکست حرارتی پرداخته‌اند. مدل آنها مبتنی بر انهدام ادی‌ها و سنتیک واکنشها همراه با تمامی اجزاء احتراقی بوده است. [۶] در اثر احتراق سوخت و بالا رفتن دما، شرایط برای واکنش بین مولکولهای نیتروژن و اکسیژن موجود در فضای محفظه احتراق مساعد می‌شود. به دلیل اینکه درصد زیادی از هوای وارد شده از مشعلها شامل نیتروژن است، این مکانیزم نقش عمده‌ای در تولید NOx ایفا می‌کند. روشهای کاهش NOx، به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند، روشهای قبل از احتراق و روشهای بعد از احتراق.

در روشهای بعد از احتراق بدون اینکه تغییری در فرآیند احتراق صورت گیرد، احتراق سر طبیعی خود را طی می‌کند. سپس با بکارگیری تکنیک‌های مناسب در مسیر گازهای خروجی که شامل NOx می‌باشد، NOx تولید شده کاهش می‌یابد. در مقابل در روشهای قبل از احتراق با تغییر در فرآیند احتراق، روشهایی اتخاذ می‌گردد که از تولید NOx جلوگیری شود. لذا با استفاده از روشهای بعد از احتراق این اطمینان خاطر را داریم که در میزان توان تولیدی تغییری صورت نمی‌گیرد ولی در روشهای قبل از احتراق این‌گونه نیست و شاهد تغییر هر چند اندک در توان تولیدی خواهیم بود. همچنین کارایی روشهای بعد از احتراق بیشتر از روشهای قبل از احتراق می‌باشد و بعضاً به حدود ۹۰٪ کاهش NOx می‌رسد. در حالی که در روشهای قبل از احتراق، کارایی حداکثر ۶۵٪ حاصل می‌شود. در مقابل این مزایا، نکته قابل اهمیت، هزینه روشهای بعد از احتراق می‌باشد که چندین برابر روشهای قبل از احتراق می‌باشد. دلیل این امر استفاده از تجهیزات متعدد در مسیر گازهای خروجی و همچنین کاتالیزور و عامل احیاء کننده، برای احیاء نیتروژن در این روشها می‌باشد که موجب افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری می‌گردد.

۲- روش بازسوزش

روش بازسوزش یکی از روشهای قبل از احتراق می‌باشد. در این روش مرحله‌ای کردن احتراق و انجام آن طی دو مرحله غنی از سوخت و فقیر از سوخت، باعث کاهش NOx می‌گردد. این روش توسط پاتری و انگل (Patry and Engel) در حدود ۶۰ سال پیش تجربه شد و سپس توسط شرکت میتسوبیشی (Mitsubishi) با استفاده از گازهای طبیعی و در اوایل دهه ۸۰ به کار گرفته شد و نتیجه آن کاهش بیش از ۵۰٪ در NOx تولیدی بود. مدتی بعد شرکت‌های بابکاک (Babcoak) و هیتاچی (Hitachi) همان روش را برای بویلرهای با دیواره آتشین به کار بردند [۷].

اصول کلی روش بازسوزش بر مبنای اصلاح سیستم احتراق استوار است. در این روش سیستم احتراق به دو منطقه تقسیم می‌شود: منطقه غنی از سوخت و منطقه فقیر از سوخت. در بخش اول با افزایش نسبت سوخت به هوای مصرفی در مشعلها نسبت به حالت استوکیومتری، منطقه غنی از سوخت ایجاد می‌شود. در این منطقه به دلیل کمبود اکسیژن که در نتیجه کاهش میزان هوای مصرفی بوجود می‌آید، مقداری از هیدروکربنهای موجود در سوخت، بدون انجام واکنش و به صورت نسوخته به مرحله بعد منتقل می‌شود. در این منطقه با خارج شدن از حالت استوکیومتری، دمای آدیاباتیک شعله کاهش می‌یابد که این امر خود باعث کاهش تولید NOx می‌گردد. گازهای حاصل از احتراق پس از طی منطقه غنی از سوخت وارد

FCCI2012-6017

منطقه فقیر از سوخت می‌شوند. در این منطقه نسبت سوخت به هوای مصرفی در مشعلها، نسبت به حالت استوکیومتری کاهش می‌یابد. کاهش این نسبت، باعث افزایش اکسیژن موجود در فضای این منطقه شده و این امر باعث سوختن هیدروکربنهای نسوخته از مرحله قبل شده و در نتیجه تولید توان حرارتی مورد نیاز می‌گردد.

اثرات استفاده از روش بازسوزش در یک سیستم احتراقی را می‌توان به موارد زیر خلاصه کرد: ۱- کاهش میزان NO_x تولیدی ۲- کاهش ناچیز توان حرارتی تولیدی ۳- کاهش میزان مونوکسیدکربن تولیدی ۴- افزایش میزان دی‌اکسیدکربن تولیدی ۵- کاهش دمای شعله و بنابراین کاهش دما در تمامی مناطق درون کوره.

در این تحقیق کاهش آلاینده‌های ناشی از احتراق درون کوره‌های شکست حرارتی با استفاده از روش بازسوزش و به کارگیری مشعلهای دیفیوژن بررسی و شبیه‌سازی شده است. در این روش با مرحله بندی کردن احتراق و خروج احتراق از حالت استوکیومتری NO_x تولیدی کاهش می‌یابد. شرایط مرزی اعمال شده مدل آزمایشگاهی استفاده شده در دانشگاه گنت بلژیک می‌باشد. کوره مورد مطالعه به صورت سه بعدی مدل‌سازی شده و هوا و سوخت از طریق ۱۴ مشعل دیفیوژن که در دو طرف بویلر و در ۷ طبقه قرار دارند. در تحلیل انجام گرفته از نسبتهای مختلف تعادلی برای مشعلهای طبقات مختلف به منظور ایجاد شرایط غنی و فقیر از سوخت، با ثابت نگه داشتن توان حرارتی کوره، مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- معادلات حاکم

برای درک روش حل مسأله و متعاقب آن اعمال شرایط مرزی مناسب در قسمتهای مختلف کوره مورد مطالعه، بایستی جزئیات حل و معادلات حاکم بر حل میدان جریان و مدل‌سازیهای جریان مغشوش و نیز مدل‌سازی تشعشع مشخص شوند. مساله موجود علاوه بر معادله پیوستگی ممتنم و انرژی شامل احتراق، تشعشع و مدل‌سازی توربولانسی می‌باشد. در مقاله حاضر از شبکه باسازمان برای مدل‌سازی کوره‌ای که احتراق در آن صورت می‌پذیرد استفاده شده، معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز استفاده شده و از مدل $k-\epsilon$ به شکل توربولانسی و مدل DO برای تابش استفاده شده است. با در نظر گرفتن فرض‌های شبیه‌سازی و مدل سازی سه بعدی از جریان غلظت و دما برای بخش تشعشعی یک کوره شکست حرارتی بیان شده است. معادلات حاکم بر مساله در زیر بیان شده اند.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i (\rho E + \rho)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j J_j + u_j (\tau_{ij})_{eff} \right) + S_h \quad (3)$$

معادله (۱) معادله پیوستگی است که برای جریان‌های تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر کاربرد دارد و به همراه یک ترم منبع برای جرم اضافه شده در اثر تبخیر قطرات مایع در نظر گرفته شده است. معادله (۲) بقاء ممنتوم را در یک حجم کنترل بدون حرکت بیان می‌کند و معادله (۳) برای اعمال بقاء انرژی در نظر گرفته شده است. همچنین برای مدل‌سازی جریان مغشوش در کوره مدل استاندارد $k-\epsilon$ معادلات انتقال زیر را برای k و ϵ مورد استفاده قرار می‌دهد:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k \right] + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \epsilon \mathbf{U}) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \text{grad } \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$C_{\mu} = 0.09 ; \quad \sigma_k = 1.00 ; \quad \sigma_\epsilon = 1.30 ; \quad C_{1\epsilon} = 1.44 ; \quad C_{2\epsilon} = 1.92 \quad (6)$$

معادلات (۴) و (۵) بیان می‌کنند که:

= [انتقال k یا ε از طریق جابجایی] + [سرعت تغییر k یا ε]

[سرعت تولید k یا ε] + [سرعت اتلاف k یا ε] - [انتقال k یا ε از طریق نفوذ]

معادلات شامل پنج ثابت قابل تعدیل هستند. مقادیری که در مدل استاندارد k-ε برای این ثابتها استفاده می‌شود از انطباق داده‌ها در محدوده وسیعی از جریان‌های آشفتهدست آمده‌اند که در معادله (۶) ذکر شده‌اند.

مدل DO معادلات انتقال تشعشعی را برای تعداد محدودی از زوایای گسسته حل می‌کند که این زوایای گسسته، هر کدام داری جهت برداری مشخصی در مختصات کارتزین هستند که میزان ریز بودن زوایا در گسسته سازی زاویه ای تحت کنترل ما می‌باشد. معادلات تشعشعی این مدل در جهت s برای محیط‌های خاکستری و غیر خاکستری بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{d(I s_i)}{dx_i} + (a + \sigma_s) I(r, s) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(r, s') \Phi(s, s') d\Omega' \quad (7)$$

$$\frac{dI_\lambda(r, s)}{ds} + (a_\lambda + \sigma_s) I_\lambda(r, s) = a_\lambda n^2 I_{b\lambda} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(r, s') \Phi(s, s') d\Omega' \quad (8)$$

در اجرای مدل DO در نرم افزار سی-اف-ایکس (CFX) از توابع فاز مختلفی میتوان استفاده کرد از جمله: تابع فازی نامتجانس خطی و تابع فازی دلتا، که معادله تابع فازی دلتا در زیر بیان شده است.

$$\Phi(s, s') = 2 f \delta(s, s') + (1 - f)(1 + Cs \cdot s') \quad (9)$$

که f ضریب پخش پیشرو، $\delta(s, s')$ تابع دلتای زیراک میباشد، وقتی که $f = 1$ است ترم دوم سمت راست معادله برابر صفر خواهد شد و این بدان معنی است که هیچگونه پخشی وجود ندارد. C ضریب عدم تقارن میباشد.

همچنین واکنشهای حاکم جهت کاهش NO_x به روش بازسوزش بوسیله HCN به صورت زیر می‌باشند: [۸]



۳- مراحل شبیه‌سازی

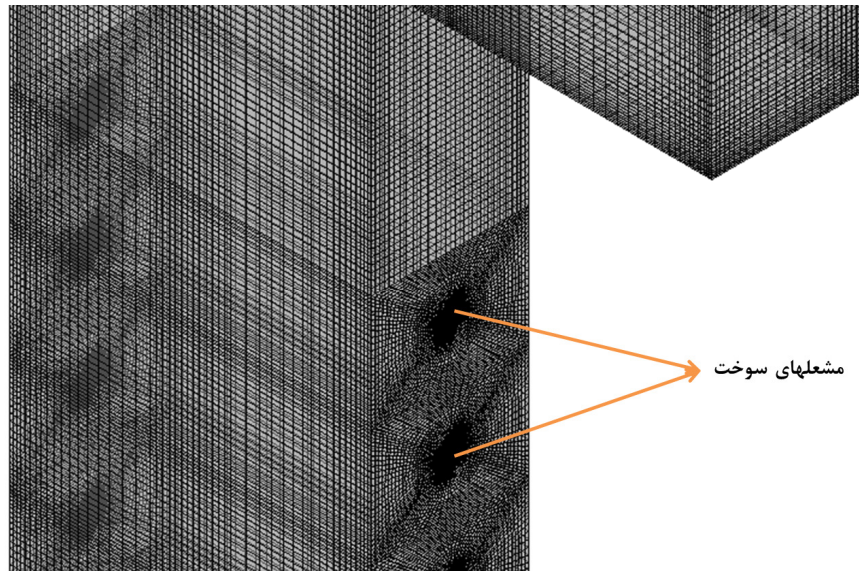
۳-۱- تولید هندسه و شبکه بندی

کوره مورد بررسی در این پژوهش از مدارک آزمایشگاه صنعتی دانشگاه گنت بلژیک استخراج شده است که دارای ۷ ردیف مشعل در دیواره های کوره در دو سمت کوره میباشد. ارتفاع کوره در قسمت تشعشعی ۵/۸ متر، عرض آن ۱/۷ متر و عمق مورد بررسی ۰/۷۴ متر می باشد. در بخشی از کوره که در اینجا مدل می شود روی هر دیواره یک ستون از مشعل ها داریم که در ۷ ردیف قرار گرفته اند که در مجموع ۱۴ مشعل روی ۲ دیواره جانبی کوره خواهیم داشت. مشخصات هندسی کامل کوره در جدول (۱) ذکر شده است.

پس از ترسیم مدل سه بعدی، شبکه بندی آن در نرم افزار گمبیت (Gambit) انجام می‌گیرد. شبکه بندی باید به اندازه‌های کوچک باشد که تغییرات کم ایجاد شده در محفظه احتراقی را لحاظ نماید. همچنین تولید شبکه‌ی باسازمان، باعث تسریع در سرعت همگرایی مسئله خواهد شد. به این منظور شبکه بندی مدل سه بعدی کوره با تکنیک‌های به روز به صورت باسازمان انجام گردیده است به طوری که تعداد المان‌ها برابر با ۱۵۱۲۰۹۹ است. در محل مشعل ها بدلیل اختلاط جریان هوا و سوخت شبکه ها ریزتر انتخاب شده است.

جدول ۱- مشخصات هندسی کوره مورد بررسی [۹]

۵/۸۲	ارتفاع (متر)	کوره
۱۱/۸۳	طول (متر)	
۱/۷	عرض (متر)	
۰/۲۳	ضخامت لایه نسوز (متر)	
۰.۵	ضخامت عایق (متر)	
۰/۰۰۵	ضخامت کیسنگ (متر)	
۲۲۴	تعداد مشعل‌های تشعشی	مشعل‌ها
۰/۰۶۵	قطر نازل مشعل	
۰/۳۵۶	قطر پلیت مشعل	
۱/۲۳۲۴	دبی جریان گاز درون کوره (kg/s)	شرایط اشتعال



شکل ۱- نمایی از شبکه‌ی ایجاد شده در کوره

۳-۲- شرایط مرزی

شرط مرزی دیواره بدون لغزش، بدون فلاکس جرمی اجزاء شیمیایی، بدون حرکت و بدون جدایش فازها و شرط گرادیان دما برابر با صفر برای تمام دیواره‌ها اعمال شده است. همچنین ضریب انتشار دیواره‌ها برابر با ۰/۸۵ در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه مجرای ورودی سوخت و هوا از یکدیگر مجزا شده و مشعل به صورت دیفیوژن مدل شده است، تعیین کسرهای جرمی اجزاء شیمیایی برای مجراهای ورودی سوخت و هوا مشخص می‌باشد. (برای مجرای ورودی سوخت کسر جرمی متان (CH₄) برابر ۱ و بقیه صفر و برای مجرای ورودی هوا، کسر جرمی اکسیژن (O₂) برابر ۲۱٪ و نیتروژن برابر ۷۹٪ می‌باشد). [۹] و [۱۰]

۳-۳ انتخاب شرایط احتراقی

در این پژوهش برای بررسی تاثیر استفاده از روش بازسوزش بر کاهش NO_x تولیدی ۱۷ حالت مختلف احتراقی در نظر گرفته شده و هر حالت جداگانه مدلسازی شده و نتایج آن استخراج شده است. مشخصات مشعل‌ها مطابق هندسه ذکر شده در مدارک آزمایشگاه صنعتی گنت بوده و به صورت ۳ بعدی مدل شده اند [۹]. همان طور که قبلا بیان گردید در روش بازسوزش مشعل‌ها به دو بخش فقیر و غنی تقسیم می‌شوند. در منطقه غنی از سوخت نسبت هوا به سوخت بیشتر از حالت استوکیومتریک می‌باشد. برای دستیابی به معیاری برای بررسی بکارگیری روش بازسوزش، ابتدا حالت استوکیومتریک مدلسازی شده است. یادآور می‌شویم که تغییرات نسبت تعادلی تنها با تغییر دبی هوای مصرفی بوده و میزان سوخت به دلیل ثابت بودن توان تغییری نخواهد داشت. برای اعمال تغییرات مشعل‌ها را به دو منطقه تقسیم می‌کنیم و ۳ ردیف پایینی مشعل را به عنوان منطقه غنی و ۴ ردیف بالایی را به عنوان منطقه فقیر در نظر می‌گیریم.

۴- ارائه نتایج

همانگونه که انتظار می‌رفت نتایج حاکی از آن است که با تغییر نسبت هوا به سوخت مصرفی به نحوی که منطقه غنی از سوخت در مشعلهای طبقات پایین و منطقه فقیر از سوخت در مشعلهای طبقات بالا بوجود آید، NO_x تولیدی کاهش خواهد یافت. البته این تغییر نسبت را نمی‌توان بدون بررسی انتخاب نمود. چرا که مشاهده می‌کنیم در مواردی با وجود ایجاد منطقه فقیر و غنی به علت افزایش نیتروژن موجود در منطقه فقیر از سوخت میزان NO_x تولیدی افزایش یافته است. نتایج مربوط به میزان کاهش NO_x تولیدی نسبت به حالت استوکیومتری در حالت‌های مختلف اجرای حل در جدول (۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌کنیم میزان کاهش NO_x در حالت‌های مختلف تغییرات زیادی داشته است که برای برخی از مقادیر نسبت‌های تعادلی میزان NO_x تولیدی افزایش داشته است.

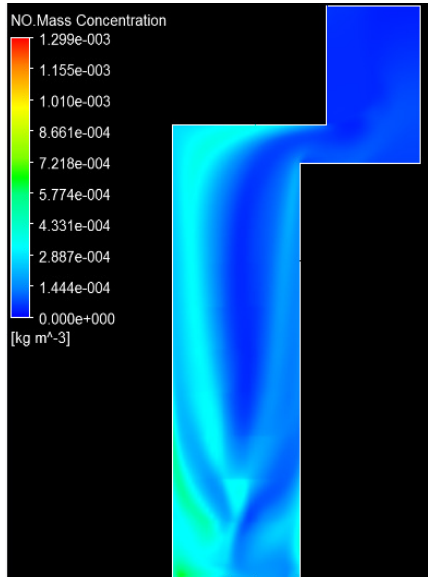
جدول ۲- مقادیر نسبت‌های تعادلی، میزان کاهش NO_x و میزان افزایش هیدروکربنهای نسوخته در حالت‌های مختلف حل

Unbruned CH_4 (increase %)	NO_x Reduction(%)	نسبتهای تعادلی		حالت‌های مختلف
		منطقه فقیر	منطقه غنی	
-	-	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	حالت استوکیومتریک
3.9301	-3.13775	۰/۹۹۴	۱/۰۰۶	حالت دوم
8.860508	-5.38105	۰/۹۸۸	۱/۰۱۲	حالت سوم
-0.90531	-9.26752	۰/۹۸۳	۱/۰۱۸	حالت چهارم
-2.16582	-8.43784	۰/۹۷۷	۱/۰۲۴	حالت پنجم
-3.61524	-8.27332	۰/۹۷۱	۱/۰۳۰	حالت ششم
-4.51994	-8.32158	۰/۹۶۶	۱/۰۳۷	حالت هفتم
-5.01247	-8.99774	۰/۹۶۰	۱/۰۴۳	حالت هشتم
-2.90916	-10.8736	۰/۹۵۵	۱/۰۴۹	حالت نهم
5.567206	1.587723	۰/۹۵۰	۱/۰۵۶	حالت دهم
-0.54226	8.976466	۰/۹۴۴	۱/۰۶۳	حالت یازدهم
3.737028	2.670602	۰/۹۳۹	۱/۰۶۹	حالت دوازدهم
-6.35381	-10.3901	۰/۹۲۹	۱/۰۸۳	حالت سیزدهم
-1.58106	0.256035	۰/۹۱۹	۱/۰۹۷	حالت چهاردهم
4.647113	17.16462	۰/۹۰۹	۱/۱۱۱	حالت پانزدهم
-5.21232	6.719859	۰/۸۹۹	۱/۱۲۶۱	حالت شانزدهم
-4.57182	5.571255	۰/۸۹۵	۱/۱۳۳	حالت هفدهم

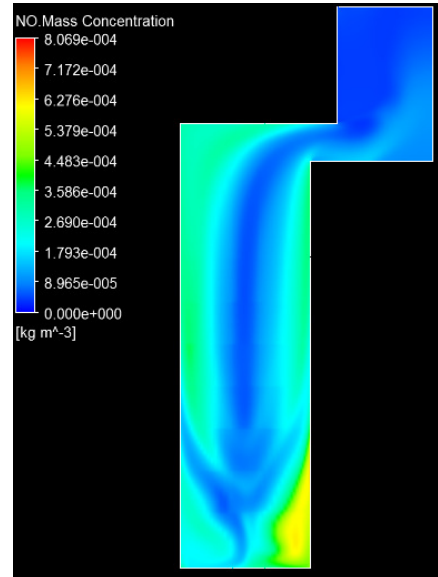
در ادامه شکل‌های (۱) و (۲) کانتورهای NO_x تولیدی درون کوره را نشان می‌دهند. با مقایسه تولید NO_x در حالت یازدهم و حالت اول مشاهده می‌شود که تولید NO_x در طبقات پایین کوره به طور محسوسی کاهش یافته است. این مساله

FCCI2012-6017

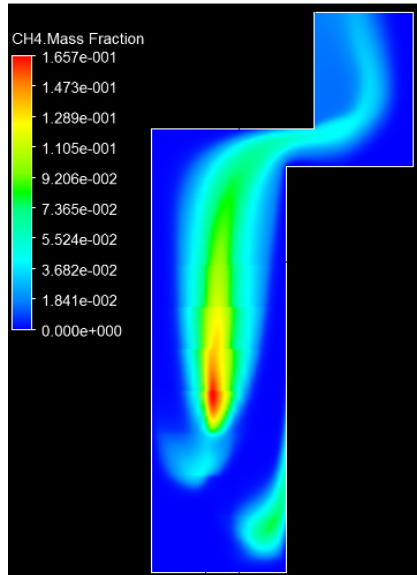
دقیقا همان چیزی است که ما به دنبال آن هستیم. با مقایسه نتایج جدول (۲) درمی‌یابیم که در تمام حالات چنین کاهشی دیده نمی‌شود و تنها در حالت‌های خاصی هدف ما که کاهش NO_x به روش بازسوزش محقق شده است. همچنین در شکل‌های (۳) و (۴) کانتورهای میزان هیدروکربنهای نسوخته را مشاهده می‌کنیم و با مقایسه حالت سیزدهم و حالت استوکیومتری یک مشاهده می‌کنیم میزان هیدروکربنهای نسوخته در حالت سیزدهم کمتر از حالت اول خواهد بود. لازم به ذکر است که تغییر در میزان هیدروکربنهای نسوخته با تغییر در مقدار NO_x تولیدی نسبت عکس دارد و از آنجا که در حالت سیزدهم میزان NO_x تولیدی افزایش داشته است، میزان هیدروکربنهای نسوخته کاهش یافته است. با دقت در نتایج جدول (۲) و مقایسه ستونهای مرتبط با دو مقدار بررسی شده اخیر، مشاهده نسبت عکس بین تغییرات ذکر شده می‌شویم.



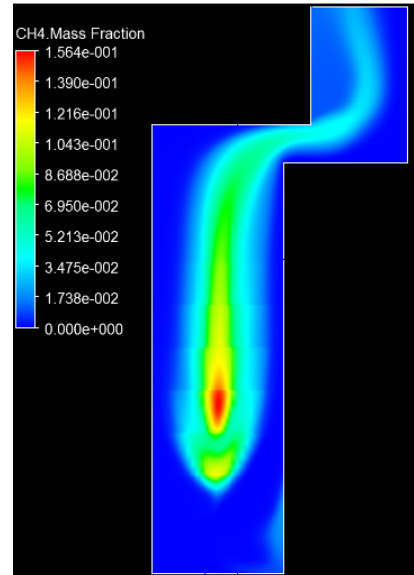
شکل ۲- توزیع NO_x تولیدی درون کوره در حالت یازدهم



شکل ۱- توزیع NO_x تولیدی درون کوره در حالت استوکیومتری



شکل ۴- توزیع کسر جرمی متان درون کوره در حالت سیزدهم



شکل ۳- توزیع کسر جرمی متان درون کوره در حالت استوکیومتری



FCCI2012-6017

چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

کاشان - دانشگاه کاشان - بهمن ماه ۱۳۹۰



۵- بهینه سازی

با مراجعه به مقادیر جدول (۲) که میزان NO_x تولیدی در حالت‌های مختلف احتراقی را نشان می‌دهد باید مقادیر بهینه‌ی نسبت‌های تعادلی مشعل‌ها را برای دستیابی به کمترین میزان تولید NO_x محاسبه نماییم. با توجه به عدم وجود تابع تئوری در این مسئله، لازم است که با استفاده از نتایج عددی بدست آمده یک تابع شبیه ساز بوسیله شبکه عصبی بوجود آید. پس از به وجود آمدن این تابع و با توجه به محدودیت‌های مسئله با استفاده از الگوریتم ژنتیک نقطه بهینه حاصل می‌آید. مشخصات شبکه عصبی به قرار زیر می‌باشد:

- تعداد ورودی‌های مسئله: ۲ نرون، تعداد خروجی‌های مسئله: ۱ نرون، تعداد لایه‌های مخفی: ۲ لایه (به علت غیر خطی بودن مسئله دو لایه مخفی انتخاب شد)، تعداد کل لایه‌ها: ۴ لایه، ترکیب شبکه: ۱-۲-۳-۲، میزان بایاس: ۰.۱-، ضریب همگرایی: ۰.۱، بهترین خطا: ۰.۱ در حالت scale شده.

با توجه به محدودیت‌های مناسب در مسئله و همچنین تابع بدست آمده در قسمت قبل، بهینه سازی این مسئله بوسیله الگوریتم ژنتیک (با مشخصات زیر) انجام شده و نقطه بهینه به صورت زیر حاصل می‌آید:

- جمعیت (کروموزوم) اولیه: ۴۰۰، تعداد ژنها: ۲، ضریب جهش: ۴ درصد

جدول ۲- نتایج بهینه سازی

مقدار خروجی	ورودی دوم	ورودی اول
۲۵۲/۵۵	۱/۰۶۷	۰/۹۹۱

نتایج بهینه سازی نشان می‌دهد که در صورتی که مقادیر نسبت‌های تعادلی مطابق جدول (۳) در نظر گرفته شود، مقدار NO_x تولیدی کاهش چشمگیری خواهد داشت که این کاهش در حدود ۲۰٪ خواهد بود. با اعمال این نسبت‌های تعادلی در مدل محاسباتی موجود نتیجه بدست آمده با اختلاف قابل قبول، میزان کاهش NO_x تولیدی را حدود ۱۶٪ نشان می‌دهد که نتیجه‌ای مطلوب برای ما خواهد بود.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق کاهش آلاینده NO_x ناشی از احتراق درون کوره با استفاده از روش بازسوزش بررسی شده است. پس از رسیدن به نتایج صحیح در شرایط کارکرد نرمال کوره، به عنوان مساله پردازش ثانویه، تولید NO_x بررسی و محاسبه شده است. به منظور کاهش میزان تولید NO_x با تغییر در شرایط نسبت هوا و سوخت با استفاده از روش بازسوزش از نسبت‌های مختلف تعادلی برای مشعل‌های طبقات مختلف به منظور ایجاد شرایط غنی و فقیر از سوخت، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن نسبت‌های تعادلی بهینه برای مشعل‌های غنی و فقیر از سوخت که با بهینه‌سازی انجام گرفته بدست آمده است، NO_x تولیدی به میزان ۱۶٪ کاهش یافته است. این در حالی است که توان حرارتی کوره به عنوان یک قید در مساله تقریباً ثابت باقی مانده است. با این وجود مشاهده می‌شود که در برخی نسبت‌های تعادلی میزان NO_x تولیدی افزایش یافته است. این امر نشان می‌دهد که نسبت‌های تعادلی باید با دقت و بهینه‌سازی انتخاب شوند تا هدف مورد نظر قابل دستیابی باشد.

مراجع

- ۱- صالحی غلامرضا، حامدی محمد حسین، " شبیه سازی و مدل سازی فرایند شکست حرارتی جهت کاهش تولید آلاینده NO_x " دومین کنفرانس بین المللی محیط زیست تهران، ۱۳۸۹



FCCI2012-6017

- 2- Patrick M.Plehiers, Geert C.Reyniers, and Gilbert F.Fromert “*Simulation of the Run Length of an Ethane Cracking Furnace*” Ind. Eng. Chem., 1990, pp 636-641
- 3- G.F. Froment “*Thermal Cracking for Olefins Production Fundamentals and their Application to Industrial Production*” Chem. Eng. Sci. 1991, Vol.36, pp1271
- 4- Ramana Rao, M.V., P.M. Plehiers, and G.F. Froment. “*The Coupled Simulation of Heat Transfer and Reaction in a Pyrolysis Furnace.*” Chem. Eng. Sci. Vol. 43: 6, 1223-1229 (1988)
- 5- A. Habibi a, B. Merci a, b, G.J. Heynderickx c. “*Impact of radiation models in CFD simulations of steam cracking furnaces*” Computers and Chemical Engineering 2007
- 6- G.D. Stefanidis, K.M. Van Geem, G.J. Heynderickx, G.B. Marin. “*Evaluation of high-emissivity coatings in steam cracking furnaces using a non-grey gas radiation model*” Chemical Engineering Journal xxx (2007)
- 7- Thangamani Arunvel, “*A NOx Reduction Model for Advanced Reburn Process Using Biomass*”, Final Project, Department Of Mechanical Energy, Texas A&M University, December 2002
- 8- Stephen R. Turns, “*An Introduction To Combustion Concepts Ans Application*”, McGraw-Hill Book Co., 1990
- 9- A. Habibi a, B. Merci a, b, G.J. Heynderickx c. “*Multiscale Modeling of Turbulent Combustion and NOx Emission in Steam Crackers*” , DOI 10.1002/aic.11243, Wiley InterScience, 2007
- 10- A. J. M. Oprins, G. J. Heynderickx, “*Calculation of three-dimensional flow and pressure fields in cracking furnaces*” , Chemical Engineering Science 58 (2003) 4883 – 4893