

## بررسی عددی احتراق و انتشار آلاینده ها در یک بویلر با سوخت گاز

کاظم بشیرنژاد<sup>1</sup>، سعید باغدار حسینی<sup>2</sup>، رامین حقیقی خوشخو<sup>3</sup>، فاطمه رضوی خبیر<sup>4</sup>

<sup>1</sup>دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، گروه مهندسی مکانیک، مشهد، ایران، [bashirnezhad@yahoo.com](mailto:bashirnezhad@yahoo.com)

<sup>2</sup>دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی (پردیس فنی شهید عباسپور)، تهران، ایران، [s\\_baghdar@sbu.ac.ir](mailto:s_baghdar@sbu.ac.ir)

<sup>2</sup>کارشناس مکانیک، دفتر پروژه های ویژه، شرکت مهندسی مشاور طوس آب، مشهد، ایران، [shosseini@toosab.net](mailto:shosseini@toosab.net)

<sup>3</sup>دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی (پردیس فنی شهید عباسپور)، تهران، ایران، [r\\_haghighi@sbu.ac.ir](mailto:r_haghighi@sbu.ac.ir)

<sup>3</sup>مدیر دفتر تحقیق و توسعه، شرکت مهندسی مشاور مونکو، تهران، ایران، [khoshkho.ramin@monenco.com](mailto:khoshkho.ramin@monenco.com)

<sup>4</sup>دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، گروه مهندسی برق، مشهد، ایران، [fatemehrazavikhabir@gmail.com](mailto:fatemehrazavikhabir@gmail.com)

چکیده - در این مقاله به مطالعه عددی احتراق و انتشار آلاینده های در یک بویلر نیروگاه بخار که با سوخت گاز کار می کند پرداخته شده است. هندسه کوره بصورت سه بعدی مدل شده و معادلات میدان جریان و انرژی با استفاده از روش سیمپل و به صورت ضمنی و در حالت دائم حل شده اند. مدل سازی احتراق متان-هوا با روش دو معادله ای و با استفاده از مفهوم اتلاف گردابه ای انجام شده است. میدان جریان توربولانسی به کمک روش  $k-\epsilon$  مدل RNG حل شده است. نتایج مدل سازی نشان می دهد که توزیع دما در داخل کوره تاثیر بسزایی بر روی میزان انتقال حرارت تشعشعی داخل کوره دارد بطوریکه در دیواره روبروی مشعل بیشترین انتقال حرارت تشعشعی و در سقف کمترین انتقال حرارت تشعشعی به وجود می آید. کسر جرمی سوخت و هوا با افزایش فاصله محوری از کوره کاهش و کسر جرمی محصولات احتراق افزایش می یابد. علاوه بر این مشاهده می شود که انتشار آلاینده های  $NO_x$  و  $CO_2$  در مناطق پر انرژی در داخل کوره به مقدار ماکزیمم خود رسیده است. نتایج حاصل از حل عددی با نتایج تجربی در طی بهره برداری توافق خوبی دارند.

کلید واژه - احتراق، آلودگی محیط زیست، بویلر نیروگاهی، مدل سازی

نیروگاه ها را  $CO$  و  $NO_x$  به خود اختصاص داده اند. اکسیدهای نیتروژن طی فرایندهای احتراقی با واکنش شیمیایی بین اکسیژن و نیتروژن هوای احتراق و یا نیتروژن موجود در سوخت در دماهای حدود  $1500\text{ }^\circ\text{C}$  تشکیل می شود. [1]. به طور عمده آلاینده های  $NO_x$  از طریق سه مکانیزم  $NO_x$  حرارتی،  $NO_x$  لحظه ای یا فوری،  $NO_x$  سوختی تشکیل می شوند. مکانیزم حرارتی مهمترین مکانیزمی است که تاکنون شناخته شده است. این مکانیزم برای اولین بار توسط زلدوویچ در سال 1946 مطرح شد. دما و غلظت بالای اکسیژن از عوامل مهم در این مکانیزم هستند و تقریباً در اکثر فرایندهای احتراقی مطرح می باشد [2-3]. مکانیزم  $NO_x$  فوری در اثر برخورد بین مولکول های نیتروژن و رادیکال های هیدروکربن به وجود می آید و بنابراین در احتراق سوخت های هیدروکربنی مطرح می باشد. تشکیل این اکسید اساساً به غلظت رادیکال هیدروکربنها در ناحیه اول شعله وابسته است.  $NO_x$  سوخت به وسیله اکسیداسیون ترکیبات نیتروژن دار سوخت در ناحیه شعله

### 1- مقدمه

یکی از مباحثی که از دیدگاه تخصصی سبب کاهش تلفات انرژی الکتریکی می شود مسأله بهینه سازی مصرف انرژی در نیروگاه ها است. در نیروگاه ها طی فرآیند تبدیل انرژی فسیلی به انرژی الکتریکی و تولید برق، بخش قابل توجهی از انرژی نیز تلف می شود که این اتلاف بسته به نوع فن آوری و سطح طراحی نیروگاه تفاوت می کند. از عیوب نیروگاه های حرارتی انتشار آلاینده هایی مانند مونوکسید کربن ( $CO$ )، اکسید های نیتروژن ( $NO_x$ )، هیدروکربن های نسوخته (UHCs) و ... و بهمراه آن انرژی قابل بازیافت می باشد که از طریق دودکش های نیروگاه به اتمسفر تخلیه می شوند. در ایران، نیروگاه های حرارتی بیشترین سهم را در مصرف برخی از حامل های انرژی ایفا می کنند، بنابراین این نیروگاه ها از مهم ترین منابع ایجاد آلاینده های هوا از نظر کمی و کیفی هستند. بیشترین سهم آلاینده های ناشی از احتراق در

حاصل از مدل سازی با نتایج تجربی حاصل از بهره برداری نیروگاه در توافق خوبی هستند.

## 2- مشخصات کوره

کوره مورد نظر از نوع تک مسیره بوده که انتقال حرارت در آن به صورت تشعشعی انجام می شود. ورودی سوخت شامل 6 نازل سوخت می باشد که سوخت را به صورت شعاعی و محوری وارد کوره تزریق می کنند. روی هر لوله سوخت سه عدد دهانه ورودی سوخت قرار گرفته که یکی به صورت شعاعی و دو عدد دیگر به صورت ترکیبی (شعاعی و محوری) سوخت را وارد محفظه احتراق می کنند. هوا از سه مسیر شامل هوای مرکزی احتراق، هوای اولیه و هوای ثانویه وارد کوره می شود. هوای مرکزی پس از عبور از یک تثبیت کننده شعله با زاویه پره  $45^\circ$  وارد کوره می شود. ورودی های سوخت اطراف تثبیت کننده شعله قرار گرفته اند.

## 3- معادلات حاکم

نقطه شروع محاسبات در جریان های بدون احتراق حل معادلات ناویراستوکس می باشد. برای جریان های همراه با انتقال حرارت معادله انرژی اضافه می شود. تکمیل کننده این دسته از معادلات بقاء، معادله حالت و مشخصات خواص سیال می باشند. برای گازهای ایده آل و واقعی این معادلات به دینامیک سیال و ترمودینامیک جریان مرتبط هستند. با اضافه نمودن شرایط مرزی و اولیه به این معادلات، تحلیل یک جریان غیراحتراقی به طور کامل قابل بررسی می باشد. جریان های احتراقی شامل آزاد شدن انرژی حرارتی در اثر تبدیل گونه های شیمیایی به یکدیگر می باشند. این خصوصیات جریان های احتراقی نیاز به مدل سازی فرایند احتراق و اضافه نمودن آنها به معادلات ناویراستوکس را دارند. فرمول کلی معادلات جریان دائم و پایا در یک مختصات استوانه ای به صورت زیر است.

$$\frac{\partial}{\partial x}(rUj) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rrVj) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial q}(rWj) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_j \frac{\partial j}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\Gamma_j \frac{\partial j}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial q} (\Gamma_j \frac{\partial j}{\partial q}) + S_j \quad (1)$$

که در آن  $\phi$  متغیر وابسته می باشد که می تواند جرم، مومنتوم، انرژی جنبشی آشفتگی، نرخ اضمحلال انرژی جنبشی، آنتالپی و کسر جرمی اجزاء باشد.  $\Gamma_\phi$  ضریب دیفیوژن و  $S_\phi$  ترم مربوط به چشمه یا چاه حرارتی می باشد.

## 3-1 مدل سازی احتراق

در این پژوهش گاز طبیعی با فرمول شیمیایی  $CH_4$  فرض شده و

تشکیل می شود و تولید آن وقتی که حجم نیتروژن در سوخت بیش از 0/1 وزن سوخت باشد، چشم گیر است. این مکانیزم با تجزیه مولکول سوخت در ناحیه شعله آغاز می شود [4]. منواکسید کربن با فرمول شیمیایی CO گازی بی رنگ و بی بو است که از احتراق ناقص زغال و سوخت های فسیلی تولید می شود. حد طبیعی آن در هوا 0/01 تا 0/2 قسمت در میلیون (حجمی) است. در مناطق شهری معمولاً زیر 17 قسمت در میلیون است ولی در شهر تهران در ساعات ترافیک و بعضی مناطق برای کوتاه مدت تا 50ppm و حتی بیشتر هم گزارش شده است. در محیط های بسته و کارگاه ها غالباً از 100ppm هم تجاوز می نماید. CO یک محصول واسطه احتراق می باشد که عمدتاً در اثر احتراق ناقص سوخت تولید می شود، احتراق ناقص در اثر کمبود هوا و یا دمای پایین گازها صورت می گیرد. اگر احتراق کامل گردد، CO به  $CO_2$  تبدیل می شود [5]. تشکیل آلاینده ها در بویلرهای نیروگاهی و بررسی آنها امر بسیار پیچیده ای می باشد که نیازمند استفاده از ابزارهای مدل سازی (CFD) می باشد. مدل سازی کوره این بویلرها عمدتاً پیچیده بوده و تحت تأثیر پارامترهای زیادی می باشد. این پارامترها شامل نسبت هوا به سوخت، دمای هوای ورودی، زاویه هوای ورودی، زاویه پاشش سوخت و غیره می باشد. برای مدل سازی بویلرها لازم است که مدل را سه بعدی و جریان را توربولانس و انتقال حرارت را تشعشعی در نظر گیریم. حبیب و همکارانش یک بویلر صنعتی 160 MW را مدل سازی نمودند و توزیع NO در محفظه احتراق تحت شرایط متنوع نسبت هوا به سوخت، دمای هوای ورودی و زوایای چرخش مختلف هوای اولیه را بررسی نمودند. نتایج حاصل از مدل سازی نشان داد که تحت شرایط عملکردی نسبت هوای اضافی 1/2 و زاویه چرخش  $45^\circ$  کمترین میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن صورت گرفته است [6]. لی و تامپسون به مدل سازی یک بویلر نیروگاهی با سوخت مایع پرداختند، آنها از مکانیزم توسعه یافته زلادویچ برای پیش بینی تولید و انتشار  $NO_x$  استفاده کردند. آنها همچنین معادلات جریان و ترمودینامیکی را در مدل سازی خود لحاظ نمودند، نتایج مدل سازی آنها با نتایج تجربی سازگاری بسیار خوبی داشت [7]. کاکینوس و همکارانش تکنیک هایی جدید به کمک احتراق چند مرحله ای برای کاهش  $NO_x$  در بویلرهای نیروگاهی ایجاد نمودند. نتایج حاصل از مدل سازی کاهش 50% انتشار اکسید های نیتروژن را نشان می داد [8]. در این مقاله کوره یک نیروگاه بخار با سوخت گاز مدل سازی شده و فرآیندهای احتراق، انتشار آلاینده ها و توزیع حرارت مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج

بعد از کامل شدن احتراق تشکیل می شود. در رابطه فوق غلظتهای  $N_2$  و  $O_2$  از محاسبات احتراق تعیین می شود و غلظت رادیکال  $[O]$  و  $[OH]$  از روابط زیر بدست می آید [11].

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

$$[OH] = 212.9T^{-0.57} \exp\left(\frac{-4595}{T}\right) [O]^{1/2} [H_2O]^{1/2} \quad (8)$$

بنابراین بخشی از جمله چشمه معادله (2) از مکانیزم زلدوویچ به صورت زیر محاسبه می شود.

$$S_{NO,th} = M_{NO} \frac{d[NO]}{dt} \quad (9)$$

که در آن  $M_{NO}$  جرم مولکولی گاز NO است. تولید NO از سوخت، پدیده پیچیده تری است و شدیداً به استوکیومتری شعله، مشخصه های احتراق موضعی و غلظت اولیه ترکیبات نیتروژن دار وابسته است. در اثر گرم شدن و تبخیر قطرات سوخت رادیکالهای حاوی نیتروژن مانند HCN، CN و NH، در اثر تجزیه حرارتی ترکیبات حاوی نیتروژن حاصل می شود که می توانند به  $NO_x$  تبدیل شوند. با توجه به اینکه سیانید نیتروژن (HCN) رادیکال غالب است مکانیزم پذیرفته شده برای تشکیل NO سوختی، شامل تشکیل HCN از نیتروژن سوخت و سپس انجام دو واکنش اکسیداسیون آن به NO و ترکیب آن با بخشی از NO و تشکیل  $N_2$  می باشد [12].



نرخهای واکنش دو رابطه فوق بر اساس اندازه گیری های دی سوت به صورت زیر بیان می شود [12].

$$R_1 = A_1 X_{HCN} X_{O_2}^a \exp\left(\frac{-E_1}{RT}\right) \quad (12)$$

$$R_2 = A_2 X_{HCN} X_{NO} \exp\left(\frac{-E_2}{RT}\right) \quad (13)$$

که در روابط فوق  $X$  کسر مولی،  $A_1 = 3/5 \times 10^{10} \text{ 1/s}$ ،  $E_1 = 60000 \text{ cal/mol}$  و  $E_2 = 67000 \text{ cal/mol}$ ،  $A_2 = 3 \times 10^{12}$  توجه به اینکه NO در واکنش (13)، تولید و در واکنش (6) مصرف می شود جمله چشمه حاصل از NO سوختی برای معادله (2) از رابطه زیر بدست می آید

$$S_{NO} = (R_1 - R_2) \frac{M_{NO}}{RT} \quad (14)$$

#### 4- هندسه و شرایط مرزی

ابعاد شبکه محاسباتی بر دقت نتایج محاسبات عددی و زمان انجام خیلی موثر است. گرچه با افزایش تعداد گره در هنگام شبکه بندی میدان محاسباتی، دقت نتایج افزایش می یابد اما به

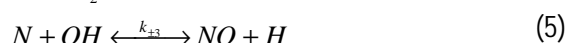
برای احتراق از مدل دو مرحله ای مگنسن (Eddy dissipation) استفاده شده است. این مدل نرخ احتراق (نرخ مصرف سوخت و آزاد شدن انرژی) را به نرخ آزاد شدن گردابهها ارتباط می دهد. در این مدل فرض می شود سوخت و اکسیدکننده در جریان متلاطم در گردابههای مجزا قرار می گیرند و ترکیب آنها وقتی انجام می شود که گردابههای بزرگتر به گردابه های کوچکتر تبدیل و گردابههای کوچک در اثر نیروی لزجی از بین بروند، به طوری که امکان آمیخته شدن سوخت و اکسیدکننده فراهم شود. به عبارت دیگر این مدل احتراق سرعت واکنشهای احتراق و در نتیجه سرعت مصرف سوخت را به سرعت اتلاف متلاطم که همان سرعت از بین رفتن گردابهها است ارتباط می دهد [9].

#### 3-2 مدل سازی اکسید نیتروژن

برای تخمین NO نیاز به حل معادله انتقال کسر جرمی آن ( $Y_{NO}$ ) می باشد. این معادله به صورت پس پردازش و پس از تعیین میدان اصلی جریان و گونه های اصلی، حل می شود. معادله انتقال جرم برای NO به صورت زیر نوشته می شود که شامل عبارت های جابجایی نفوذی، تولید و مصرف NO است.

$$r \frac{\partial Y_{NO}}{\partial t} + r u_i \frac{\partial Y_{NO}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( r D \frac{\partial Y_{NO}}{\partial x_i} \right) + S_{NO} \quad (2)$$

که در آن جمله چشمه  $S_{NO}$  با توجه به سه مکانیزم تشکیل NO: حرارتی، NO سریع و سوختی، محاسبه می شود. با توجه به اینکه در احتراق سوخته های مایع مقدار NO سریع در مقایسه با دو نوع دیگر قابل صرف نظر کردن می باشد در این تحقیق NO حرارتی و سوختی محاسبه می شوند. NO حرارتی که به وسیله اکسیداسیون نیتروژن موجود در هوا در دماهای بالا تشکیل می شود، با استفاده از مکانیزم زلدوویچ توسعه یافته بیان می گردد [2].



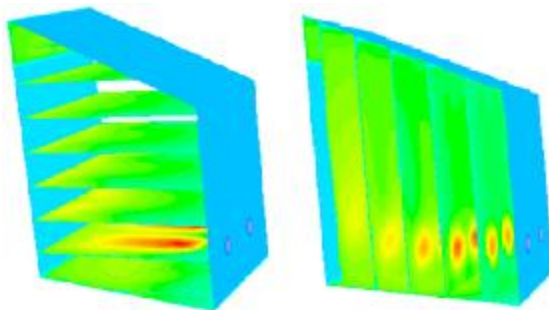
که  $K_{\pm}$  ثوابت رو به جلو و رو به عقب واکنش است. با فرض اینکه نرخ مصرف اتم های آزاد نیتروژن مساوی نرخ تولید آن است، غلظت NO از رابطه زیر به دست می آید.

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_{+1}[O][N_2] \left( \frac{1 - \frac{k_{-1}k_{-2}[NO]^2}{k_{+1}[N_2]k_{+2}[O_2]}}{1 + \frac{k_{-1}[NO]}{k_{+2}[O_2] + k_{+3}[OH]}} \right) \quad (6)$$

مقدار ثابت های نرخ واکنش های تعادلی فوق از مرجع به دست می آید [10]. با توجه به اینکه نرخ تشکیل NO بسیار کمتر از نرخ اکسیداسیون هیدروکربن اصلی است، بیشتر NO حرارتی

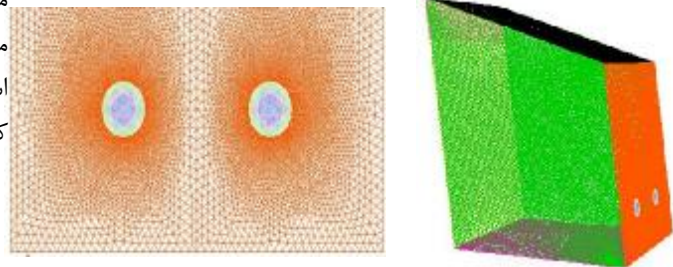
محاسباتی				
نتایج تجربی	50/5	1882	9/8	3/6
درصد خطا	8/99	4/15	2/14	5/18

در شکل 2 توزیع دما در صفحات عمودی و افقی مشعل نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که ماکزیمم دمای شعله 2580 درجه کلوین می باشد که در شکل با رنگ قرمز نشان داده شده است. دمای گاز های احتراق هر چه به سمت خروجی می روند به دلیل انتقال حرارت تشعشعی کاهش یافته است علاوه بر این مشاهده می شود که توزیع دما در داخل کوره تاثیر بسزایی بر روی میزان انتقال حرارت تشعشعی داخل کوره دارد بطوریکه در دیواره روبروی مشعل بیشترین انتقال حرارت تشعشعی و در سقف کمترین انتقال حرارت تشعشعی به وجود می آید [13]. در منطقه گردابه ای داخل مشعل به دلیل جریان چرخشی دما تقریباً ثابت است. شکل 3 توزیع آلاینده های NO<sub>x</sub> و CO<sub>2</sub> را نشان می دهد. مشاهده می شود اکسید های نیتروژن در منطقه دما بالا اندکی دورتر از شعله تشکیل شده است که این امر نشان می دهد تشکیل NO<sub>x</sub> واکنشی زمان بر و در عین حال بشدت به دما وابسته است [14]. محل ماکزیمم مقدار دی اکسید کربن در مرکز شعله تشکیل شده است، زیرا احتراق کامل بوده و انرژی لازم جهت اکسیداسیون کربن و تولید CO<sub>2</sub> وجود دارد. توزیع انتشار آلاینده CO در شکل 4 نشان داده شده است، مشاهده می شود بیشترین مقدار این آلاینده نیز در خروجی مشعل که سوخت و هوا با هم مخلوط می شوند، تشکیل شده است و پس از آن با کامل شدن احتراق میزان انتشار این آلاینده کاهش یافته است.



شکل 2: توزیع دما در صفحات عمودی و افقی مشعل

زمان و حافظه بیشتری نیاز می باشد. در این پژوهش ناحیه ورودی و نزدیک دیوارها که تغییرات خواص جریان بیشتر است، شبکه ظریفتر انتخاب شده است. در شکل شماره 1 شبکه محاسباتی محفظه احتراق نشان داده شده است. استقلال از مش بودن شبکه حل مورد بررسی قرار گرفته و تعداد 226416 برای میدان حل در نظر گرفته شده است. برای گسسته سازی عبارت های جابجایی معادلات حاکم از طرح بالادستی مرتبه اول و برای تصحیح میدان فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. برای همگرایی از ضرایب تخفیف 0/7 برای میدان جریان و برای گونه های شیمیایی از جمله آلاینده ها، 0/9 استفاده شده است. همچنین معیار همگرایی معادلات  $1 \times 10^{-6}$  فرض شده است. روش حل عددی بر پایه حجم محدود و شرایط دائمی است. به علت تقارن محوری نیمی از محفظه احتراق حل شده است. دبی حجمی گاز ورودی به مشعل  $4413 \text{ m}^3/\text{s}$  و دبی جرمی هوای ورودی  $8/364 \text{ kg/s}$  می باشد. دمای ورودی سوخت و هوا 300 درجه کلوین و فشار ورودی یک اتمسفریک در نظر گرفته شده است. دمای سطح دیواره محل نصب مشعل 667 کلوین، دیواره روبروی مشعل 800 کلوین، دمای سطح داخل بویلر دیواره های کناری 726 کلوین و دمای سطح داخل بویلر دیواره سقف 667 کلوین، با توجه به مقادیر تجربی فرض شده است. برای مدل سازی توربولانس از روش k-ε مدل RNG استفاده شده است.



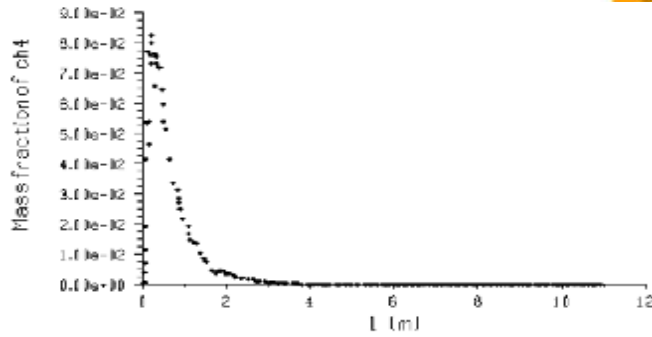
شکل 1: شبکه محاسباتی کوره آزمایشگاهی

## 5- نتایج و بحث

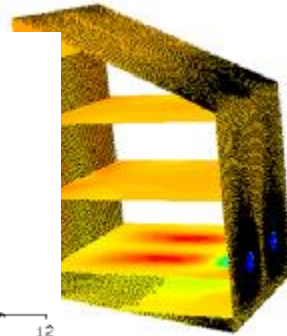
جدول شماره 1 نتایج تجربی و محاسباتی را برای آلاینده های ناشی از احتراق نشان می دهد. مشاهده می شود که در تمامی موارد درصد خطا ها کمتر از 10 % می باشد که این امر نشان دهنده توافق خوب نتایج تجربی و عددی می باشد.

جدول 1: مقایسه نتایج عددی و تجربی

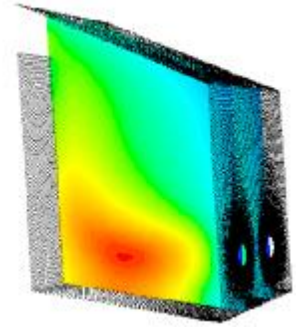
NO <sub>x</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	نوع آلاینده
ppm	ppm	%	%	
نتایج	نتایج	نتایج	نتایج	
46	1960	9/63	3/82	



شکل 6: شبکه محاسباتی کوره آزمایشگاهی

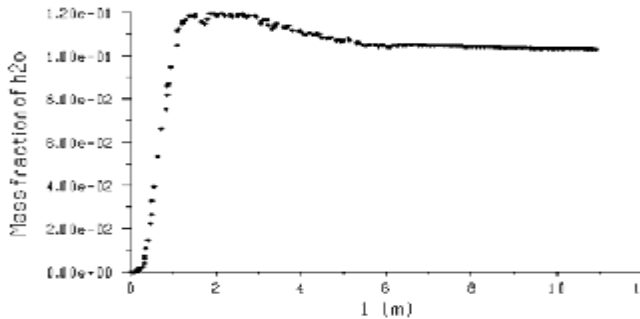


ب: توزیع آلاینده CO<sub>2</sub> در کوره

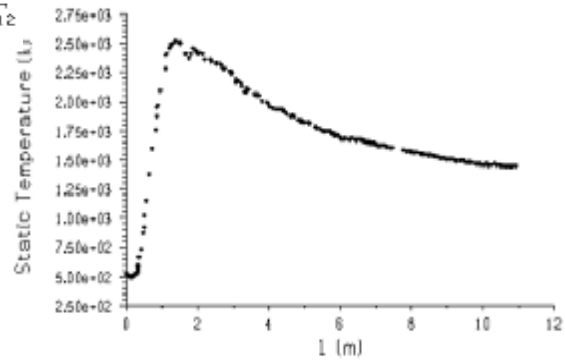
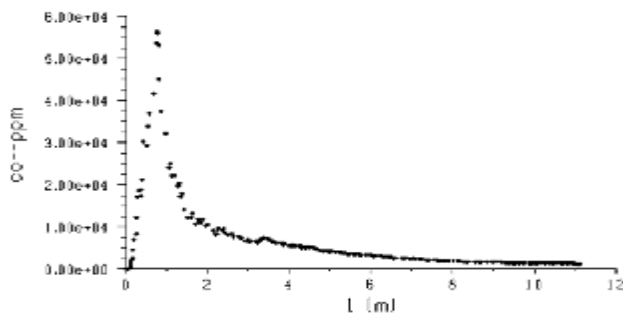


شکل 3: الف: توزیع آلاینده NO<sub>x</sub> در کوره

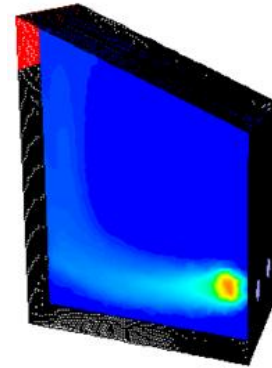
در شکل 7 تغییرات کسر جرمی بخار آب در طول کوره نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که بخار آب در ابتدا ورودی کوره صفر بوده و سپس به حداکثر مقدار خود می رسد و بعد از آن در اثر اختلاط با سایر گازهای احتراق کمی کاهش و سپس ثابت شده است. در شکل 8 و 9 تغییرات انتشار CO و CO<sub>2</sub> در طول کوره نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد در اثر احتراق ناقص در ابتدای شعله مقدار CO به حداکثر رسیده و سپس در اثر واکنش با اکسیژن و تبدیل آن به دی اکسید کربن کاهش یافته است. در حالیکه میزان دی اکسید کربن ابتدا به حداکثر رسیده و سپس ثابت مانده است. تغییرات انتشار آلاینده NO<sub>x</sub> در شکل 10 نشان داده شده است، مشاهده می شود بیشترین مقدار تولید اکسیدهای نیتروژن در ابتدای کوره و مرکز شعله می باشد و سپس مقداری از آن کاهش می یابد.



شکل 7: شبکه محاسباتی کوره آزمایشگاهی



شکل 5: شبکه محاسباتی کوره آزمایشگاهی



شکل 4: توزیع آلاینده CO در کوره

در شکل 5 تغییرات دما در طول کوره نشان داده است. نتایج نشان می دهد که ماکزیمم دما شعله حدود 2500 K می باشد. دما در اثر احتراق ابتدا افزایش شدیدی داشته و سپس در اثر انتقال حرارت کاهش می یابد. بطوریکه دمای گازهای خروجی حدود 1500 K می باشد. شکل 6 تغییرات کسر جرمی گاز را در طول کوره نشان می دهد. در ابتدای مشعل به اختلاط بین سوخت و هوا میزان کسر جرمی CH<sub>4</sub> به ماکز رسده و سپس به دلیل احتراق به شدت کاهش یافته بطوریکه فاصله 3 متری از کوره مقدار سوخت به صفر رسیده است.

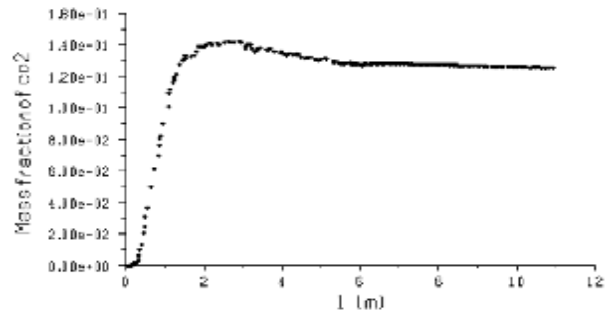
## سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می دانند تا از شرکت مدیریت نیروگاه برق مشهد به دلیل حمایت و پشتیبانی فنی و مالی از این پروژه تحقیقاتی، تشکر و قدردانی بنمایند.

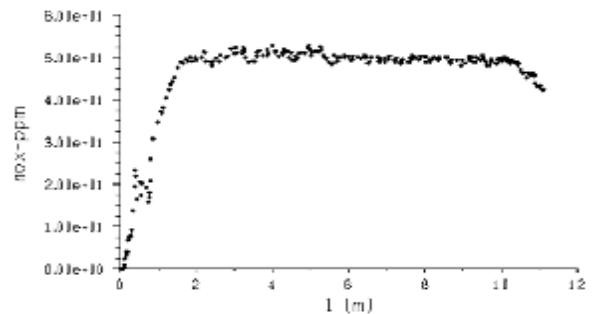
## مراجع

- [1] Y. Zhang, L.X. Zhou, X.L. Wei, H.Z. Sheng., *Studies of the effect of a coal concentrator on NO formation in swirling coal combustion.*, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49, pp. 421-426, 2007.
- [2] Zeldovich, Y.B., Sadvnikov, P.Y., "Oxidation of Nitrogen in Combustion", *Science Academy of USSR*, 1974.
- [3] Fenimore, C.P., "Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames", *International Symposium on Combustion*, 1971.
- [4] Zink, J., "Ultra low NO<sub>x</sub> Burners for Industrial Process Heater", *Second International Conference on Combustion Technology for a Clean Environment*, Lisbon, 1993.
- [5] Heinsohn, R.J. and Kabel, R.L., "Sources and control of Air pollution", *Prentice Hall*, New Jersey, pp: 652-666, 1991.
- [6] M. A. Habib, M. Elshafei, M. Dajani, "Influence of combustion parameters on NO<sub>x</sub> production in an industrial boiler", *Computers and Fluids*, 37(2008) 12-23.
- [7] Li N, Thompson S. A simplified non-linear model of NO<sub>x</sub> emissions in a power station boiler. In: *UKACC international conference on control '96*, 2-5 September, no. 427; 1996. p. 1016-21.
- [8] Kokkinos A, Wasyluk D, Brower M, Berna JJ. Reducing NO<sub>x</sub> emissions in tangentially-fired boilers – a new approach. In: *ASME international joint power generation conference*, July 24-25, Miami, FL, USA; 2000.
- [9] Magnussen, B.F., Hiertager, B.H., Olsen, J.G. and Bhaduri, D., "On the mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion", *17<sup>th</sup> Symposium (International) on Combustion*, pp: 1383-1393, *The Combustion Institute*, Pittsburg, PA, 1978.
- [10] Baulch D. L., Cobos C. J., Cox A., Hayman G., Murrels T., and Warnatz J., "Compilation of rate data for combustion modelling", *Phys Ref Data*, pp. 23-847, 1994.
- [11] Padmabhushana, R., "Subgrid Scale Model Development and Validation for Thermal Nitric Oxide Prediction in Glass Furnaces", *Department of Mechanical Engineering, University of Utah*, PHD Thesis, 2004.
- [12] De Soete, G.G., "Overall reaction rates of NO and N<sub>2</sub> formation from fuel nitrogen", *15<sup>th</sup> Symposium (International) on Combustion*, pp: 1093-1102, 1975.
- [13] Hottel, H.C., Sarofim, A.F., "Radiation Transfer", *McGraw Hill*, New York, 1967.
- [14] Young, K., Kim, H.S., "An Experimental Study on Combustion Processes and NO<sub>x</sub> Emission Characteristics of the Air-Stagd Burner", *KSME International Journal*, Vol. 13, pp: 477-486, 1999.
- [15] Kermes, V., Belohadsky, P., and Stehlik, P., "Testing of gas and liquid burners for power and process industries". *Journal of Energy*, 33, pp: 1551-1556, 2008.

شکل 8: شبکه محاسباتی کوره آزمایشگاهی



شکل 9: شبکه محاسباتی کوره آزمایشگاهی



شکل 10: شبکه محاسباتی کوره آزمایشگاهی

## 6- نتیجه گیری

در این پژوهش فرآیند احتراق و انتشار آلاینده های کوره بویلر یک نیروگاه بخار با سوخت گاز مدل سازی شده است. با توجه به مباحث ارائه شده، نتایج حاصله به شرح ذیل می باشد.

- بیشترین مقدار دمای گازهای خروجی در خروجی مشعل و در فاصله 1 متری از آن قابل مشاهده است که این امر دلالت بر وقوع احتراق کامل در بدو ورود سوخت و هوا و اختلاط آنها در کوره دارد.
- با کامل شدن احتراق کسر جرمی متان و اکسیژن کاهش می یابد در حالیکه میزان انتشار محصولات احتراق از جمله آب رو به افزایش است.
- بیشترین مقدار CO<sub>2</sub> و NO<sub>x</sub> نیز در این فاصله که ماکزیمم دما به وقوع پیوسته قابل مشاهده است.
- توزیع دما در داخل کوره تاثیر بسزایی بر روی میزان انتقال حرارت تشعشعی داخل کوره دارد بطوریکه در دیواره روبروی مشعل بیشترین انتقال حرارت تشعشعی و در سقف کمترین انتقال حرارت تشعشعی به وجود می آید.