

## آنالیز جریان در کوره قوس الکتریکی با استفاده از شبیه سازی کامپیوتری 3D جهت بررسی روشهای کاهش تولید و انتشار NOx

شهرام هاشمی مرغزار  
استادیار گروه مکانیک  
دانشگاه صنعتی شاهرود  
Marghzar@Yahoo.com

علی ارشادی  
هیئت علمی گروه مکانیک  
دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول  
Aershadi85@yahoo.com

\* دریافت: فروردین ماه ۹۱، \* اصلاح: اردیبهشت ماه ۹۱، \* تایید: تیر ماه ۹۱  
صفحه های: ۳۶ تا ۳۹  
چکیده

کوره های قوس الکتریکی فقط برای تولید فولاد مخصوص مورد استفاده قرار می گرفتند. حال آنکه امروزه این کوره ها در سطح وسیع حتی برای تولید فولادهای معمولی نیز به کار می روند. یکی از علل رشد سریع تولید فولاد در کوره های قوس الکتریکی تبدیل انرژی الکتریکی به حرارت با بازده خوب می باشد. به این ترتیب، می توان در یک کوره کوچک به قابلیت ذوب بالا دست یافت در صنعت فولاد سازی ایران نیز سهم عمده تولید فولاد مربوط به کوره های قوس الکتریکی می باشد. بعلاوه دمای بسیار بالا و شرایط کارکرد سخت در کوره های قوس الکتریکی تحلیل و بررسی آنها کار بسیار مشکل و دشواری بوده و نیازمند امکانات پیشرفته و هزینه های سنگین آزمایشگاهی می باشد. بسیاری از محققین جهت بررسی و تحلیل این نوع کوره ها از شبیه سازی کامپیوتری استفاده می کنند. تشریح شرایط کارکرد در کوره ها اهمیت استفاده از شبیه سازی کوره های قوس الکتریکی توسط دینامیک سیالات محاسباتی را نشان می دهد.

در صنعت فولاد سالیانه ۱۲۶۰۰۰ تن NOx وارد هوا می شود. در اثر کارکرد کوره مقادیر غباری به اندازه (10-20 kg/t) و گاز CO (20-60kg/t) بوجود آمده و ساعت می شوند که توسط کوره و فیلترها جمع آوری می شوند. بر اثر کارکرد در فشار منفی در زانویی کوره، هوا از میان درب سربراه و دیگر روزنه های کوره به درون آن کشیده می شود (شکل-۱). انتشار اکسیدهای نیتروژن NOx یک عامل محیطی است که نقش زیادی در ترکیب و ساختمان مه های آلوده به مواد شیمیایی و همچنین بارانهای اسیدی ایفا می کند. انتشار زیاد NOx نتیجه حرارت زیاد فرآیند در احتراق بین نیتروژن و اکسیژن می باشد. فرآیندهایی که در سیستم جهت تولید فولاد صورت می گیرند باعث تولید NOx می شوند. استفاده از قوس الکتریکی شرایطی بسیار مناسب و عالی جهت تشکیل اکسیدهای نیتروژن NOx (X=0.5, 1.2) فراهم می کند. دمای احتراق گاز خروجی با هوا در زانویی خروجی کوره بالغ بر 2000K می باشد. اطلاعات نسبتاً کمی درباره انتشار NOx در صنعت فولاد سازی منتشر شده است. اگر اول و جسیمن اظهار داشتند که به ازاء هر تن خالص تولیدی فولاد: ۰/۲۷kg

شبیه سازی کامپیوتری ابزار مفیدی برای تحلیل کوره قوس الکتریکی می باشد، دمای بالای داخلی محفظه کوره و دشواری استفاده از ابزار اندازه گیری نیاز هر چه بیشتر ما را به استفاده از شبیه سازی عددی - کامپیوتری نشان می دهد. صنعت فولاد سازی یک صنعت بسیار مضر به لحاظ بهداشت محیط زیست است، یکی از گازهای مضر تولید شده در کوره های قوس الکتریکی خانواده اکسیدهای نیتروژن (NOx) می باشند که باعث تولید بارانهای اسیدی و مه های آلوده می شوند. در نتیجه تحقیقاتی که بر روی روشهای تولید اکسیدهای نیتروژن درون کوره به لحاظ خصوصیات فیزیکی آن دیده شد که در یک دوره کارکرد کوره بیشترین NOx در مرحله تخلیه سربراه از کوره تشکیل می شود و روش تشکیل آن حرارتی یا زلدویج است، از عوامل تشکیل NOx به این روش می توان غلظت گونه های نیتروژن و اکسیژن و دمای بالا را نام برد که از طریق ورود هوا از درزهای کوره، نیتروژن و اکسیژن تأمین می گردد. در این تحقیق نیز بررسی در مرحله خروج لایه سربراه می باشد. در تحقیق پیش رو یک کوره قوس الکتریکی در همین مرحله و بصورت ۳ بعدی شبیه سازی شده و با تحلیل جریان هوای درون کوره به بررسی تشکیل NOx پرداخته شده است. در ابتدا تأثیر نوع درب سربراه و در ادامه نیز تغییر مکان آن در پوسته کوره در تشکیل NOx مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در نتیجه این بررسی دیده می شود که نوع درب سربراه تأثیر چندانی در تولید NOx نداشته و بهترین جایگاه برای درب سربراه روبروی زانویی خروجی است.

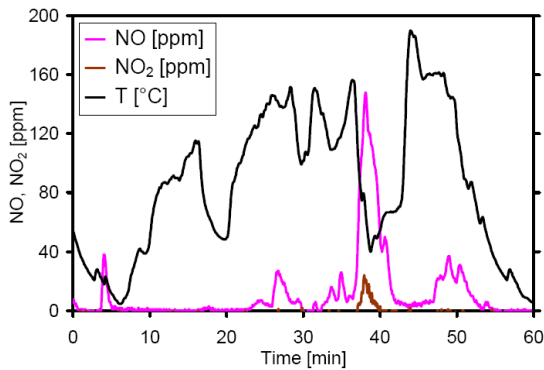
کلمات کلیدی: کوره قوس الکتریکی، کنترل آلودگی، CFD، NOx

### ۱- مقدمه

کاربرد کوره های قوس الکتریکی، از میزان تولید سالیانه فولاد آنها معلوم می شود. میزان تولید فولاد دنیا در سال ۱۹۸۸ م به ۷۷۸ میلیون تن بالغ شده که روشهای کنورتر کوره، کوره قوس و کوره روباز به ترتیب ۵۷.۵٪، ۲۷.۵٪ و ۱۴.۴٪ را به عهده داشته اند. این سهم در سال ۲۰۰۳ انجمن اروپا به ۳۸٪ از کل ۱۹۳/۱ میلیون تن فولاد تولید شده رسیده است [5]. این روند رشد نمایانگر جایگزین شدن کوره های قوس بجای کوره های روباز است. در گذشته،

هوای تازه اضافی وارد شده به کوره دارای مقدار زیادی نیتروژن و اکسیژن است که دمای بالای فضای داخل کوره نیز زمینه بسیار مناسبی برای تشکیل اکسیدهای نیتروژن را ایجاد می کند و نسبت به دو مرحله قبل مقدار NOx تولیدی بسیار زیاد است.

در مرحله چهارم یعنی خروج فولاد مذاب از درون کوره نیز هوای ورودی زیادی داریم (هرچند درب سرپاره بسته است و مقدار هوای نفوذی از مرحله قبل کمتر است) ولی دمای درون کوره به اندازه مرحله قبل بالا نیست زیرا مدت زمان بیشتری از خاموشی کوره گذشته و دمای داخلی آن کاهش پیدا کرده است در نتیجه در این مرحله نیز NOx تولیدی کمتری نسبت به مرحله قبل یعنی خروج سرپاره از کوره داریم. در بررسی یک کوره قوس الکتریکی با دوره کارکرد ۶۰ دقیقه ای مقادیر NOx آن اندازه گیری شده که در شکل ۲- آورده شده است. در این نمودار بیشترین مقادیر NOx در زمان تقریباً بین ۳۵ تا ۴۰ دقیقه تشکیل شده است که همان مرحله سوم یا خروج سرپاره می باشد. بیشترین تغییرات توزیع جریان داخلی کوره نیز در این مرحله است.



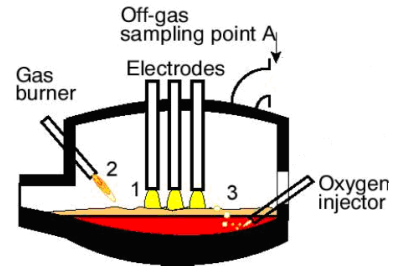
شکل ۲- پروفیل غلظت گونه های NO<sub>2</sub> و NO اندازه گیری شده [۸]

با توجه به مراحل کارکرد کوره قوس الکتریکی که در بالا به آن اشاره شد می توان نتیجه گرفت که بررسی توزیع جریان هوای ورودی به کوره به هدف تحلیل تولید و کاهش انتشار NOx در کوره را می توان با بررسی مرحله خروج لایه سرپاره تحلیل کرد که در این تحقیق یک کوره قوس الکتریکی بصورت حالت یکنواخت<sup>۱۶</sup> و فقط برای مرحله سوم شبیه سازی شده است. این شبیه سازی برای یک لحظه قبل از باز شدن درب سرپاره و همچنین زمانی که درب سرپاره باز است (یعنی فاصله بین زمانی که کوره خاموش می شود و زمانی که درب سرپاره باز می شود)، انجام شده است چون بیشترین هوای ورودی در این مرحله است و کنترل کردن آن در این مرحله، در کاهش تولید و انتشار NOx در یک دوره کارکرد کوره بسیار مؤثر می باشد.

### ۱-۱- مکانیزمهای تشکیل NOx در کوره ها و ارائه روشهای جلوگیری از تولید آن

سه فرم مکانیزم تشکیل اصلی برای NOx: دمایی، بی درنگ (سریع) و NOx سوخت وجود دارد. اولین مکانیزم تشکیل حساسیت زیادی نسبت به دما دارد از این رو فرم اصلی تشکیل NOx، دمایی نام دارد. این مکانیزم دمایی

اکسیدهای نیتروژن منتشر می شود [1]. انجمن U.S.EPA این مقدار را  $kg \text{ NO}_x / \text{ton} - 0.25$  اعلام کرد.



شکل ۱- منابع NOx در کوره های قوس الکتریکی  
۱- قوس الکتریکی، ۲- مشعل های سوخت اکسیژن

اکسیدهای نیتروژن (NOx) یک سری از آلودگی های هوا هستند که شامل: NO اکسید نیتروژن، NO<sub>2</sub> دی اکسید نیتروژن، N<sub>2</sub>O اکسید دی نیتروژن می باشند، مؤلفه اصلی NOx ها، اکسید نیتروژن NO است که ۹۰٪ آن را تشکیل می دهد.

در مدت زمان کارکرد یک کوره قوس الکتریکی از زمان شارژ قراضه تا تخلیه فولاد مذاب که یک دوره کارکرد کوره محسوب می شود، بیشترین هوای ورودی که از جمله عوامل تولید NOx ذکر شد، زمانی است که سرپاره ها خارج می شوند این مقدار هوای اضافی و تازه ورودی باعث باز بودن درب سرپاره بوده که منبع تأمین نیتروژن برای تولید NO در کوره است. مدت زمان یک دوره عملکرد کوره قوس الکتریکی را می توان به چهار مرحله عمده تقسیم بندی کرد:

- ۱- شارژ کردن کوره
- ۲- روشن کردن کوره (اتصال برق در الکترودها) و ذوب قراضه ها
- ۳- خروج لایه سرپاره
- ۴- خروج فولاد مذاب

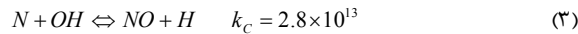
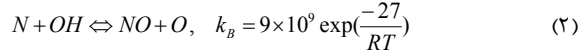
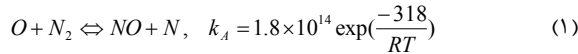
در مرحله اول یعنی شارژ کوره که دمای درون کوره پائین بوده و دیوارهای کوره را بازسازی می کنند و همچنین قراضه های درون کوره تأمین می شوند، در این مرحله تولید درون کوره NOx تولید نمی شود.

در مرحله دوم یعنی زمان روشن شدن کوره (اتصال برق به الکترودها) و مذاب کردن قراضه ها دمای درون کوره بسیار بالا می باشد ولی هوای نفوذی بدرون کوره فقط در اثر درزهای درب کوره و درزهای بین الکترودها و درب کوره می باشد که آن هم در اثر فشار منفی تولیدی توسط فن های سیستم غبارگیر و حاکم بودن فشار منفی درون فضای کوره است، در این مرحله نیز NOx تولید می شود ولی مقدار آن زیاد نیست.

در مرحله سوم الکترودها خاموش شده و لایه سرپاره ای که در اثر مذاب قراضه ها بوجود آمده است باید از کوره خارج شود، در این مرحله دمای درون کوره بسیار بالا می باشد، الکترودها دمایی تقریباً ۱۷۰۰-۲۰۰۰ کلوین دارند که دمای بسیار بالایی است، در این مرحله درب سرپاره باز شده تا بتوان لایه سرپاره بالای فولاد مذاب را از درون کوره خارج کرد، در اثر خروج جرم لایه سرپاره هوای بسیار زیادی نسبت به مراحل قبل وارد کوره می شود که علاوه بر درزهای اطراف الکترودها و درب کوره، درب سرپاره نیز باز است. این مقدار

۱-۲- روند تولید NOx در روش حرارتی (زولدویج)

واکنشهای تولید اکسیدهای نیتروژن در روش حرارتی [۱]:



توضیح اینکه NOx های تشکیل شده را با تولید و انتشار NO به تنهایی نیز می توان بررسی کرد چون تقریباً ۹۰ درصد NOx های تشکیل شده NO می باشند [۸].

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_A [O][N_2] + k_B [N][OH] + k_C [N][OH] \quad (4)$$

در نتیجه سرعت تشکیل NO وابستگی مستقیم به محاسبه غلظت [O], [OH] دارد.

$$\frac{d[N]}{dt} = k_A [O][N_2] - k_B [N][OH] - k_C [N][OH] \quad (5)$$

با فرض شبه پایا ( $\frac{d[N]}{dt} \cong 0$ ) نرخ تشکیل NO بصورت زیر بدست می آید

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_A [O][N_2] \quad (6)$$

۱-۳- جلوگیری از تولید و کاهش انتشار NOx در کوره قوس الکتریکی

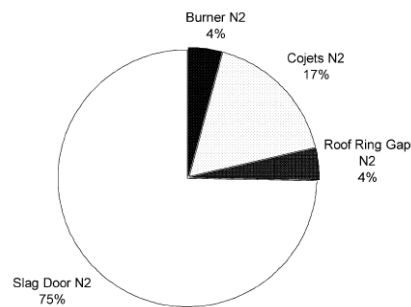
با توجه به رابطه (۶) نرخ تولید NOx فقط با در نظر گرفتن نرخ تولید NO بررسی می شود. نرخ تولید NOx بروش حرارتی رابطه مستقیم با دما و همچنین غلظت گونه های [O], [N2] دارد و چون بیشترین منبع [N2] از هوا تأمین می شود (۷۰ درصد از کل هوا نیتروژن می باشد) در نتیجه ورود هوا و در معرض دمای بالا قرار گرفتن آن بهترین زمینه را برای تشکیل NOx ایجاد می کند. در نتیجه با استفاده از توزیع دمای درون کوره و بررسی و تحلیل این عوامل می توان مناطقی که بیشترین NOx در کوره تولید می شود را پیش بینی کرده و بالتبع آن عدم تولید و کاهش انتشار آن را بررسی کرد. کاهش دمای داخلی کوره می تواند روشی برای کاهش تولید NOx باشد ولی باید توجه داشت که کاهش دما شدت راندمان کوره را پایین آورده و روش مناسب و مطلوبی نیست. کاهش غلظت های نیتروژن و اکسیژن نیز یک روش برای کاهش تولید NOx است که در صورت امکان روش بسیار مناسبی است و نمی تواند تأثیری بر راندمان کوره داشته باشد ولی محدودیتهای زیادی در این روش وجود دارد، در نتیجه بیشتر به تحلیل این عوامل پرداخته می شود. جلوگیری از ورود هوا امکان پذیر نیست ولی می توان آن را کاهش داده یا در صورت امکان نحوه حرکت آن را طوری کنترل کرد که در معرض دمای بالا قرار نگیرد یا کمتر قرار گیرد. در این راستا به بررسی نحوه توزیع جریان درون کوره و تأثیر برخی عوامل موثر بر آن با استفاده از شبیه سازی کامپیوتری پرداخته شده، از جمله این عوامل می توان تغییر نوع سطح درب سرپاره و همچنین جایگاه آن در پوسته کوره را نام برد.

چان و همکارانش در سال ۲۰۰۴ [۱] کوره قوس الکتریکی را به جهت تشکیل NOx شبیه سازی نموده و با مقادیر اندازه گیری شده مقایسه نمودند. آنها ارائه کردند که بیشترین تولید NOx در کوره در یک مقطع زمانی خاص

بالای 1600K (2500F) دارد. سرعت تشکیل NOx به صورت نمایی با دما افزایش می یابد. درون کوره های قوس الکتریکی مشعلهای سوخت اکسیژن و محلهای تولید قوس مناطق دما بالای کوره می باشند.

NOx بی درنگ (سریع) از میان شعله سوخت استفاده شده بدست می آید و باقیمانده سوخت است [۸]. در این شبیه سازی مشعلها در نظر گرفته نشده اند. مقدار سهم NOx تولیدی بوسیله مشعلها نسبت به سهم باز بودن درب سرپاره قابل چشم پوشی است (شکل-۳) و همچنین در مرحله باز بودن درب سرپاره که هدف تحلیل در این تحقیق است، مشعلها خاموش می باشند در نتیجه آنها در نظر گرفته نمی شوند.

از نتایج این مکانیزم هیدروژنهای کربن نیز می باشند که این نوع NOx از لحاظ اهمیت از NOx دمایی پایین تر است و در نظر گرفته نشده است. دمای بسیار بالا در کوره های قوس الکتریکی مشخص می کند که NOx دمایی، مکانیزم حکمفرما می باشد. سه راه جهت کنترل NOx حرارتی وجود دارد: کاهش دمای موجود، غلظت نیتروژن، غلظت اکسیژن.



شکل-۳ منابع تأمین نیتروژن

NOx دمایی، حساسیت بسیار بالایی نسبت به دما دارد بنابراین در خیلی قسمتهای احتراق تشکیل NOx بوسیله کاهش دادن ماکزیمم دما با استفاده از اضافه کردن جرم بر هر واحد پخش حرارت کنترل می شود. کنترل دما جهت کنترل NOx برای کوره های قوس الکتریکی توصیه نمی شود چون در این کوره ها به دمای بالا جهت ذوب کردن قراضه ها نیاز است. اجزاء احتراق کارخانه ها مقدار زیادی از هوا را مصرف می کنند بنابراین آنها یک عامل اصلی در تولید NOx می باشند. هر چند در کوره های قوس الکتریکی هوا عمداً به درون سیستم تزریق نمی شود؛ بنابراین کاهش هوای نفوذی به درون کوره یک استراتژی جالب می باشد. که این عمل نیاز به مهرو موم کردن کوره تا حد امکان و انجام عملیات در یک فشار مثبت خفیف می باشد. هوا و دیگر منابع نیتروژن باید از نقاط گرم که شامل قسمت قوس الکتریکی و مشعل های سوخت اکسیژن می باشد، محفوظ بمانند.

بر اساس اطلاعاتی که در بالا آورده شده بهترین روش جهت کنترل NOx های تولید شده در کوره های قوس الکتریکی جلوگیری از ورود جریان هوا به کوره و همچنین استفاده از یک سوخت سبک و ارزشمند است. جلوگیری از تشکیل NOx در کوره های قوس الکتریکی یک امر مهم در این کوره ها محسوب می شود چون یکی از مشکلات کوره های قوس الکتریکی حذف NOx های تولیدی می باشد. تغییرات وسیع دما در کوره های قوس الکتریکی باعث پیچیده شدن مسئله کنترل این کوره ها می شوند.

آشفته می باشد که در جریان آشفته بعلت اغتشاش بوجود آمده معادلات بصورت زیر بدست می آیند: (فرض این معادلات تراکم ناپذیری سیال است)

$$\nabla \cdot \bar{V} = 0 \quad (۷) \text{ پیوستگی}$$

$$\rho \frac{D\bar{V}}{Dt} = \rho g - \nabla \bar{p} + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (۸) \text{ مومنوم}$$

$$\rho c_p \frac{D\bar{T}}{Dt} = - \frac{\partial}{\partial x_i} (q_i) + \bar{\Phi} \quad (۹) \text{ انرژی}$$

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{(u'_i u'_j)} \quad \text{جائیکه:}$$

$$q_i = -k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} + \rho c_p \overline{u'_i T'}$$

$$\bar{\Phi} = \frac{\mu}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}'_j}{\partial x_i} \right)^2$$

### ۳- مدلسازی

مدلهای دینامیک سیالات محاسباتی جهت کوره های قوس الکتریکی با استفاده از روش نرم افزاری حجم محدود انجام شده است. این مدلها برای حالتیهای مختلف هندسه کوره انجام پذیرفته است. طرحها شامل ۲ مدل با دو نوع درب سربراه (مثلثی و دایره ای)، ۴ مدل با ۴ جایگاه درب سربراه در پوسته کوره می باشد. در این دو گروه مدل، یک الکتروود معادل با ۳ الکتروود واقعی کوره در نظر گرفته شده است. این فرض بعلت کاهش زمان محاسباتی انجام شده است. تغییرات هندسه کوره و از آن جمله تغییر جایگاه درب سربراه (تغییر جایگاه ورودی نسبت به خروجی) و همچنین نوع درب سربراه (تغییر سطح ورودی) بر جریان داخلی کوره بسیار تأثیر گذار است. به همین دلیل این نوع تغییرات انتخاب شده تا بتوان تأثیرات آنها را بر نوع توزیع جریان هوای داخل کوره بررسی کرد.

#### ۳-۱- تأثیر نوع سطح درب سربراه

اولین پارامتری که مورد بررسی قرار گرفت، تأثیر نوع سطح درب سربراه و بر توزیع جریان هوا در کوره می باشد. در این تحلیل مساحت سطح درب سربراه برای مدلهای مختلف یکسان در نظر گرفته شده است. افزایش سطح درب سربراه و به دنبال آن افزایش ارتباط فضای داخلی کوره با هوای اطراف، باعث افزایش هوای ورودی بدخل کوره شده و در نتیجه آن افزایش تولید NOx را در پی خواهد داشت.

مدلهایی از کوره های قوس الکتریکی در صنعت وجود دارد که با یک الکتروود کار می کنند، در این کوره ها الکتروود و قراضه دو قطب مثبت و منفی بوده که در اثر اتصال جریان برق با ولتاژ بالا به الکتروود، قوس الکتریکی بین الکتروود و قراضه ها ایجاد شده و در اثر حرارت تولید شده قراضه های موجود در کوره به مذاب تبدیل می شوند. این مدل شامل یک استوانه بزرگ بعنوان حجم اصلی کوره و نیز یک استوانه با قطر کوچکتر، بعنوان الکتروود است که از سطح بالایی بسمت پایین کوره فرض می شود. حجم استوانه ای با ارتفاع خیلی کم در سمت راست و بالای شکل بعنوان خروجی کوره در نظر گرفته شده است. در نهایت یک حجم کوچک نیز برای درب سربراه روی پوسته کوره تعبیه شده که

(خروج لایه سربراه) انجام شده و کاهش تولید NOx باعث افزایش CO می شود. دیانکسای و همکارانش در سال ۲۰۰۳ [3] شدت تشعشع را در کوره قوس الکتریکی و الکتروودها شبیه سازی کرده و نتایج بهینه ای را برای مصرف انرژی در کوره ارائه دادند. مارکوس کیرسچن و همکارانش در سال ۲۰۰۴ [5] برای یک کوره قوس الکتریکی بلحاظ تولید و انتشار NOx مدلسازی ریاضی انجام دادند. همچنین مقادیر NOx را در کوره نیز اندازه گیری نمودند. بیشترین NOx در این تحقیق در لحظه خروج لایه سربراه ارائه شد و رویه حاکم بر تولید NOx در کوره روش حرارتی گزارش شد. مارکوس کیرسچن و همکارانش در سال ۲۰۰۴ [6] سیستم غبارگیر متصل به خروجی کوره قوس الکتریکی را مدلسازی ریاضی نمودند و نتایج آن را در دو حالت شبیه سازی و اندازه گیری، مقایسه نمودند. ارشادی و هاشمی مرغزار در سال ۲۰۰۹ [7] کوره قوس الکتریکی را بصورت دوبعدی متقارن محوری شبیه سازی کردند. این شبیه سازی برای سه حالت هندسه کوره: مرتفع، عریض و نرمال در سرعتهای ورودی هوای مختلف به کوره از طریق درب سربراه انجام شد. بهترین حالت جهت کاهش تولید NOx مدل نرمال با سرعت ورودی کم بود. مارکوس کیرسچن و همکارانش در سال ۲۰۰۳ [9] آلایندگی های کوره قوس الکتریکی را در خروجی کوره بررسی کردند. در این تحقیق تحلیلها بعد از زانوپی خروجی کوره قوس الکتریکی انجام شد. سه مدل خط لوله خروجی در نظر گرفته شد: ۱- یک لوله مستقیم ۲- محفظه احتراق بدون مصرف انرژی ۳- محفظه احتراق با مشعل و تزریق هوا و گاز. بهترین خط لوله گاز خروجی مورد ۲ بود چون کمترین آلودگی را در خروجی ارائه می داد. همچنین مقدار دمای خروجی نیز در این خط لوله از دو مورد دیگر کمتر بود. هندسه محفظه های احتراق موردهای ۲ و ۳ باهم متفاوت بود. حاجی دوآلو و همکاران در سال ۲۰۱۰ [12] تحلیل حرارتی بر گرمای گازهای خروجی انجام داده و از آن، جهت پیش گرم کردن قراضه های ورودی به کوره استفاده نمودند.

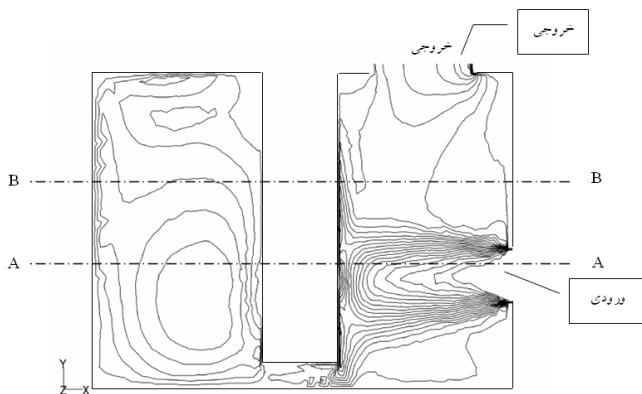
در این تحقیق هدف تحلیل جریان داخلی کوره در مرحله خروج لایه سربراه می باشد. با استفاده از نتایج توزیع جریان هوا می توان بررسی تولید و انتشار اکسیدهای نیتروژن را نیز انجام داد. در این راستا باتوجه به اینکه هندسه کوره می تواند بر روی توزیع جریان هوای ورودی از درب سربراه تأثیر گذار باشد، لذا مدلسازی در چندین شرایط هندسی مختلف انجام شده است. ابتدا نوع درب سربراه بلحاظ نوع سطح مقطع در دو حالت مثلثی و دایره ای در نظر گرفته شده، سپس جایگاه درب سربراه در پوسته کوره در چهار موقعیت مختلف در نظر گرفته شده و نتایج توزیع جریان و همچنین تأثیر آن بر روی تولید NOx در کوره ارائه شده است که در تمامی مدلها فوق یک الکتروود بصورت معادل با سه الکتروود منظور شده است.

#### ۲- معادلات هیدرو دینامیک حاکم در کوره

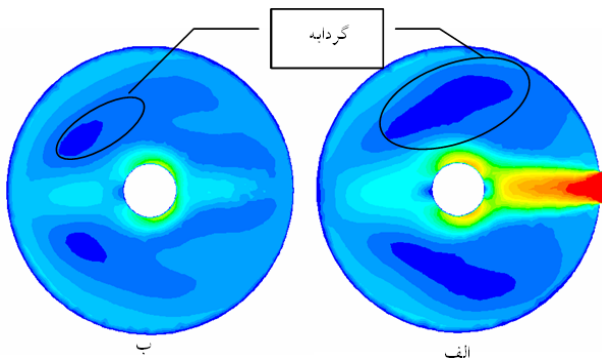
برای شبیه سازی جریان در کوره قوس الکتریکی جهت بدست آوردن کانتورهای سرعت و توزیع دما در کوره و در نهایت تحلیل این نتایج، باید معادلات اساسی از قبیل پیوستگی، مومنوم و انرژی را حل کرد که در اثر آشفته بودن جریان، نسبت به انتخاب نوع روش حل برای جریان توربولانس تعداد معادلات قابل حل متغیر می باشند. در کوره قوس الکتریکی جریان

الکترودها	سرعت	صفر
زانویی معادل (خروجی گازهای کوره)	سرعت	بصورت خروجی آزاد در نظر گرفته شده است.
	$k, \varepsilon$	صفر

حل معادلات بصورت عددی و مبتنی بر روش تکرار است. شکل-۵ برشهای عمودی از خطوط جریان در کوره می باشد. همانطور که از شکلها مشخص است در اثر ورود هوا بداخل کوره گردابه ای در بالای درب سرپاره بوجود آمده است که باعث ماندن هوا درون کوره می گردد. در این شبیه سازی بیشترین ورتیسسته در ورودی و خروجی روپداده است.



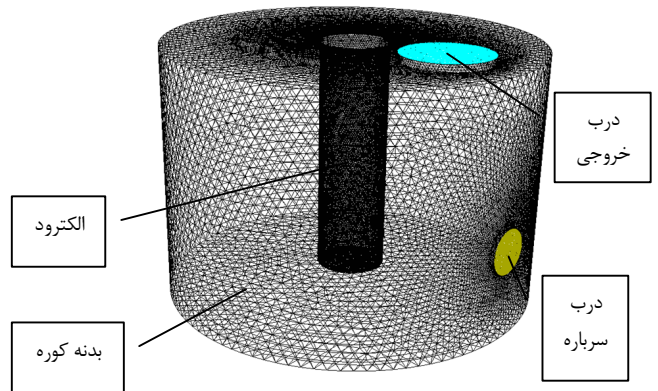
شکل-۵ برش عمودی خطوط جریان ورودی و خروجی و گردابه بوجود آمده در شکل مشخص است



شکل-۶ برشهای افقی از توزیع جریان (الف) درب سرپاره (مقطع A-A)، (ب) مقطع B-B، گردابه

در شکل-۶ (الف) گردابه هایی در بالا و پایین مقطع بشكل کاملاً متقارن دیده می شود، طبق این شکل جریان هوا بعد از مقطع ورودی بیشترین سرعت را در اطراف الکترودها داشته و حول آن متمرکز شده و بشكل چرخشی می شود. با توجه به میدان جریان در مقطع ارائه شده در شکل-۶ (ب) می توان نتیجه گرفت که جریان هوای وارد شده به کوره در مقاطع بالای درب سرپاره در کل فضای کوره پخش شده و گردابه مذکور ضعیفتر گردیده و در نهایت از بین می رود. همچنین جریان از اطراف الکترودها خارج شده و درون کوره پخش می شود. لازم بتوضیح است که هوا درون هسته گردابه دارای سرعتی بمیزان صفر است.

در شکل-۴ دیده می شود. المانهای استفاده شده در حجم بشكل چهار وجهی در نظر گرفته شده است، لذا المانهای سطحی نیز از نوع مثلثی خواهند بود. شرایط مرزی شامل جریان ورودی (مکش شده) از طریق درب سرپاره و جریان خروجی از طریق حجم کوچکی که در بالای کوره تعبیه شده است، در نظر گرفته می شوند. در طرح اول درب سرپاره زیر خروجی کوره در نظر گرفته می شود. (درب سرپاره با خروجی در کوره مدل واقعی، ۹۰ درجه در راستای ساعتگرد اختلاف دارند).



شکل-۴ شبکه بندی کوره سه بعدی تک الکترودها

حل معادلات بشكل حالت دائم صورت پذیرفته است. بقیه شرایط حل در جدول-۱ ارائه شده است.

جدول-۱ شرایط حل برای مدل سازی

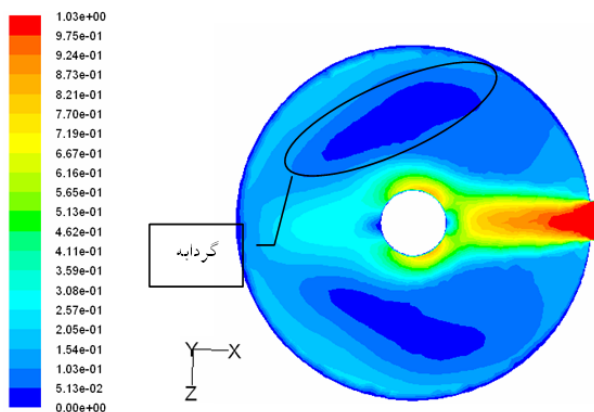
حالت دائم	زمان
ضمنی	فرمول بندی
$k - \varepsilon$	مدل توربولانس
در نظر گرفته نمی شود	ویسکوزیته حرارتی
هوا با خواص ثابت	جنس سیال
در نظر گرفته نمی شود	تراکم پذیری و گرانش

در تحلیل کوره، رژیم جریان آشفته انتخاب شده که برای مدل سازی جریان آشفته نیز از مدل استاندارد  $k - \varepsilon$  استفاده می شود، در فرایند مدل سازی ویسکوزیته حرارتی نیز در نظر گرفته نمی شود. برای شرایط ورودی میزان سرعت هوای ورودی برابر ۱ متر بر ثانیه و دمای ۳۰۰ کلوین انتخاب شده است که مقادیر ورودی  $k, \varepsilon$ ، بترتیب ۰/۰۵ و ۰/۰۱ در نظر گرفته می شوند (مقادیر اولیه ورودی برای  $k, \varepsilon$  ۵٪ شدت توربولانس است. برای خروجی نیز این مقادیر صفر در نظر گرفته می شود). شرایط مرزی در جدول-۲ ارائه شده اند.

جدول-۲ شرایط مرزی شبیه سازی

مقدار	خاصیت	مرز
$1 \text{ m/s}$	سرعت	درب سرپاره (ورودی هوا)
۵ درصد از شدت توربولانس	$k, \varepsilon$	
صفر	سرعت	دیواره های کوره

شکل ۸- کانتور سرعت در برش افقی از کوره با درب سرپاره مثلثی



شکل ۹- کانتور سرعت در برش افقی از کوره با درب سرپاره دایره ای

بیشترین مقادیر سرعت در دو نوع درب سرپاره متفاوت است، در مدل درب مثلثی مقدار بیشترین سرعت برابر (1.18m/s) در دهانه ورودی اتفاق می افتد که این مقدار در ناحیه مشابه در درب دایره ای برابر (1.03 m/s) می باشد. این اختلاف 15% سرعت در مابقی فضای کوره نیز دیده می شود. همانگونه که در شکل‌های ۸- و ۹ مشخص شده گردابه های بوجود آمده در نوع درب سرپاره مثلثی بزرگتر از گردابه های درب دایره ای می باشد، می توان چنین نتیجه گرفت که در کوره با درب سرپاره مثلثی طول گردابه ها بزرگتر و هسته گردابه بزرگتر است و هوای ورودی ماند بیشتری درون کوره داشته و نهایتاً منجر به تولید بیشتر NOx می شود.

در بیشتر کوره های صنعتی برای حرکت آسان تر لایه سرپاره، در خروجی درب سرپاره از شکل ناودانی استفاده می کنند که با استفاده از این تحلیل می توان نتیجه گرفت که نوع سطح درب سرپاره در مقدار هوای ورودی و همچنین نوع توزیع آن در کوره تأثیر زیادی نمی تواند داشته باشد. اما مدت زمان باز بودن آن می تواند باعث تغییر تولید NOx گردد. در نهایت می توان نتیجه گرفت، نوع درب سرپاره چنانچه بنحوی باشد که لایه سرپاره بتواند براحتی و با سرعت بیشتری خارج شود و باعث شود که این درب مدت زمان کمتری باز باشد، تشکیل NOx را کاهش می دهد.

### ۳-۲- تأثیر تغییر مکان درب سرپاره

در این بخش از تحلیل به بررسی تغییر مکان درب سرپاره در کوره قوس الکتریکی و تأثیر آن بر نحوه توزیع جریان، گردابه های بوجود آمده و در نهایت تولید NOx در کوره پرداخته می شود. در این قسمت نوع درب سرپاره دایره ای فرض شده است که در چهار نقطه مختلف قرار می گیرد:

۱- زیر خروجی گازهای کوره (زانویی)

۲- با اختلاف زاویه ۹۰ درجه ساعتگرد

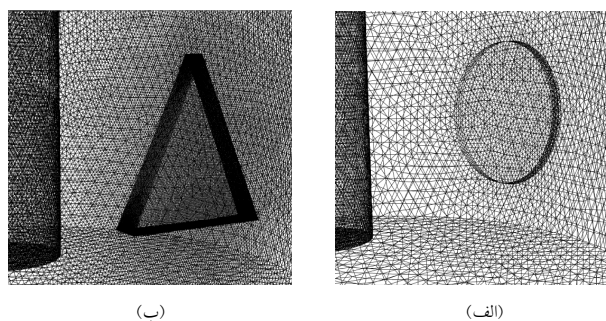
۳- روبروی خروجی گازهای کوره (زانویی)

۴- با اختلاف زاویه ۲۷۰ درجه ساعتگرد یا ۹۰ درجه پادساعتگرد

در شکل ۱۰- توزیع سرعت برای سه برش از کوره، ورودی هوا و همچنین خروجی کوره رسم شده است. این کانتورها، چهار موقعیت درب سرپاره در بدنه

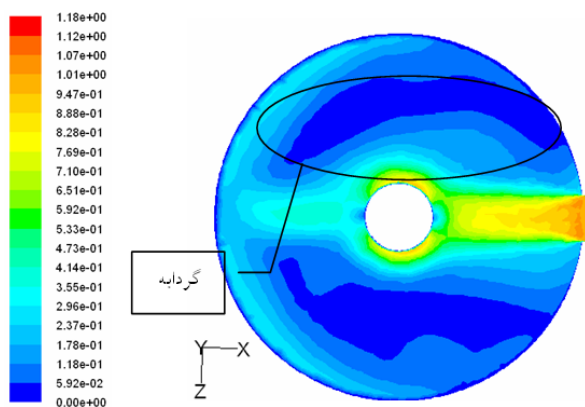
طبق شکل‌های مختلفی که از توزیع جریان در چند مقطع مختلف کوره ارائه شد، گردابه های موجود در کوره مشخص گردید. بیشترین مقدار فشار در ناحیه برخورد جریان ورودی با الکتروود تقریباً بمیزان (0.45 Pa) می باشد که در اثر برخورد جریان ورودی با الکتروود بوجود می آید. در بیشتر فضای کوره مقدار فشار بسیار کم و منفی می باشد. کمترین مقدار فشار برابر (-0.25 Pascal) و در ناحیه خروجی است.

در این بررسی که هدف از آن تغییر نوع درب سرپاره است از دو نوع درب مثلثی و دایره ای استفاده شده است. ابعاد این سه نوع درب با استفاده از مساحت معادل با درب سرپاره اصلی محاسبه شده اند و هر کدام از این دریاها بفاصله ۱ متری از کف کوره تعبیه شده اند. در شکل ۷- شبکه بندی دو نوع درب سرپاره کوره در کنار یکدیگر دیده می شود.



شکل ۷- شبکه بندی درب سرپاره در دو حالت مثلثی و دایره ای (الف) دایره ای، (ب) مثلثی

توزیع جریان در دو حالت درب سرپاره مثلثی و دایره ای در شکل ۸- و ۹ ارائه شده اند. همانگونه که ملاحظه می شود به مقدار خیلی کم تماس هوای ورودی با دیواره های کوره و الکتروود در حالت دایره ای بیشتر از حالت مثلثی است و همچنین طول گردابه های بوجود آمده نیز بیشتر است. همانگونه که در شکل‌های ۸ و ۹ نیز مشخص است تفاوت عمده ای بین نحوه توزیع جریان در دو حالت ارائه شده دیده نمی شود یعنی همان گردابه هایی که در حالت درب دایره ای بوجود آمده در نوع مثلثی نیز همان گردابه ها وجود دارند که با طول گردابه های متفاوت دیده می شود.



از نتایج مهم این بررسی می توان به موارد زیر اشاره کرد:

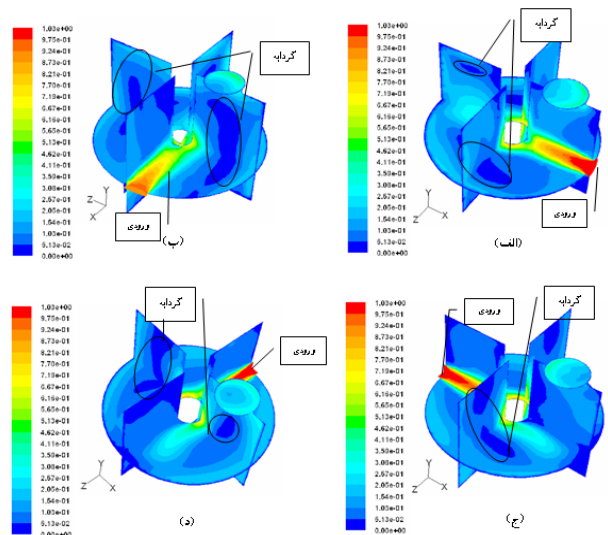
- کوره قوس الکتریکی یکی از مهمترین اجزاء صنعت فولاد سازی است که در اثر کارکرد، گازهای مضر نظیر خانواده اکسیدهای نیتروژن (NOx) تولید می شود و اثرات نامطلوب زیست محیطی بدنال دارد.
  - بیشترین تولید NOx در بازه زمانی بسیار کوچکی از کل دوره کارکرد کوره یعنی در مرحله خروج لایه سرباره ایجاد می شود.
  - رویه حاکم برای تولید NOx در مرحله خروج سرباره، رویه حرارتی یا زدوپیچ است که از ترکیب نیتروژن و اکسیژن در دمای بالا نتیجه می شود. از عوامل تولید NOx به این روش می توان حساسیت زیاد آن به دمای بالا و همچنین غلظت اکسیژن و نیتروژن را نام برد (دمای مورد نیاز برای این رویه حداقل ۱۷۰۰ کلوین می باشد).
  - کاهش دما در کوره های قوس الکتریکی به هدف کاهش تولید NOx روش مناسبی نمی باشد زیرا بشدت راندمان کوره را پایین می آورد. کاهش گونه های نیتروژن و اکسیژن روش مناسبتری است.
  - بیشترین منبع تأمین نیتروژن و اکسیژن در کوره های قوس الکتریکی از طریق ورود هوا از درزهای کوره انجام می شود که در مرحله خروج لایه سرباره باعث بازبودن درب سرباره هوا بمیزان زیادی وارد کوره شده و در معرض دمای بالای درون کوره قرار می گیرد و زمینه را برای تولید NOx فراهم می کند.
  - افزایش سرعت ورودی باعث افزایش طول گردابه ها شده که این عامل نیز در افزایش تولید NOx مؤثر است.
  - سطح مقطع درب سرباره باید بنحوی باشد که لایه سرباره بتواند براحتی و هرچه سریعتر خارج شود و درب سرباره زمان کمتری باز بماند به همین دلیل تصور می شود که نوع درب ناودانی بهترین حالت برای سریعتر تخلیه شدن لایه سرباره است.
  - در مرحله خروج لایه سرباره هوای وارد شده درون کوره مستقیماً وارد فضای اطراف الکترودها شده و در فضای بین الکترودها جریان بشکل چرخشی می شود.
- با استفاده از نتایج فوق می توان موارد زیر را برای کاهش تولید و انتشار NOx پیشنهاد کرد:
- ۱- بهترین روش برای کاهش انتشار NOx که بر روی راندمان کوره نیز تأثیر نامطلوب ندارد، کاهش ورود هوای اضافی بدرون کوره است.
  - ۲- بسته نگه داشتن درب سرباره تا حد امکان (کاهش مدت زمان لازم برای تخلیه لایه سرباره)
  - ۳- کاهش فشار منفی درون کوره که باعث مکش ضعیفتر هوای اطراف بدرون آن می شود.
  - ۴- کاهش سرعت ورودی هوا از درب سرباره که باعث کاهش طول گردابه ها و در نتیجه ماند کمتر هوا می گردد.
  - ۵- در صورت امکان پره هایی در قسمت فوقانی درب سرباره (قسمت ورود هوا) نصب شود تا بتوان هوای ورودی را مستقیماً بسمت خروجی کوره جهت داد و به آن اجازه وارد شدن به منطقه بین الکترودها و یا اطراف آنها داده نشود. با این کار هوای وارد شده مستقیماً بسمت خروجی رفته و با مناطق دما بالای

کوره را نشان می دهند. بر اساس شکلهای ارائه شده، توزیع جریان در چهار حالت مکانی درب سرباره تقریباً متفاوت بدست آمده است، از جمله این تفاوتها می توان گردابه های بوجود آمده درون کوره را نام برد که در شکلهای ۱۰ مشخص شده اند. بر اساس شکل-۱۰ (الف) بزرگترین گردابه، عرضی می باشد. با مقایسه شکلهای مذکور می توان نتیجه گرفت در حالت دوم (شکل-۱۰ ب) گردابه های بوجود آمده بزرگتر از حالتی دیگر بدست آمده است که در این حالت ماند هوای ورودی بیشتر شده و در نهایت تولید NOx افزایش پیدا می کند.

عمود بودن جریان ورودی نسبت به خروجی می تواند علت بزرگتر بودن طول گردابه ها در این مدل باشد. در مدلهای دیگر، جریان ورودی با خروجی کوره همراستا است در نتیجه طول گردابه ها در کوره کمتر بوده در نتیجه ماند هوا نیز کمتر می باشد

### نتیجه گیری و پیشنهادات

در مجموعه حاضر، روشهای تولید اکسیدهای نیتروژن و راههای کاهش تولید آنها ارائه شده که این عوامل بصورت خاص در کوره قوس الکتریکی نیز مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت عوامل اصلی تولید NOx و روشهای مورد استفاده برای کاهش تولید و انتشار آن در کوره قوس الکتریکی بدست آمد. با استفاده از شبیه سازی کامپیوتری عوامل تولید NOx در یک کوره قوس الکتریکی مورد بررسی قرار گرفت که در این بررسی تأثیر پارامترهایی نظیر: نوع درب سرباره، مکان درب سرباره و سرعت ورودی بر عوامل اصلی تولید NOx، در نظر گرفته شده است.



شکل-۱۰- کانتورهای سرعت در چهار حالت موقعیت درب سرباره (الف) اختلاف صفر درجه، (ب) اختلاف ۹۰ درجه، (ج) اختلاف ۱۸۰ درجه، (د) اختلاف ۲۷۰ درجه

کوره (اطراف و بین الکترودها) تماس کمتری دارد. در نتیجه با استفاده از این روش می توان تولید NOx را کاهش داد.

## منابع:

- [1] Chan.E, Riley.M, Thomson.M.J, Evenson.E.J, Nitrogen oxides (NOx) formation and control in an electric arc furnace (EAF): Analysis with measurements and computational fluid dynamics (CFD) modeling. ISIJ International , 2004, Vol.44 No.2 , p.429-438
- [2] Farrashkhalvat.M, Miles.J.P, Basic Structured Grid Generation, Butterworth Heinemann, 2003.
- [3] Guo.D, A.Irons.G, Modeling Of Radiation Intensity In An EAF, Third International Conference on CFD in the mineral and industries, CSIRO Australia, 2003, p223-228
- [4] Kirschen.M, Velikorodov.V, Pfeifei.H, Kuhn.R, Lenz.S, Off-gas measurements at the EAF primary dedusting system. Electric Furnace Conference. Stahl und eisen Vol.124, 2004, No.11, p73-89
- [5] Kirschen.M, Voj.L, Pfeifei.H, NOx Emission from electric arc furnace measurement and modeling. AISTech, 2005, p1-10
- [6] Kirschen.M, Velikorodov.V, Pfeifei.M, Mathematical modeling of heat tranfer in dedusting plant and comparison to off-gas measurement at electric arc furnace, Internat.J. Energy, 2006, p425-439
- [7] Hashemi Marghzar. SH, Farzaneh Gord. M, Ershadi. A, Investigation on NOX reduction 2D modeling Electric Arc Furnace (EAF), 4th International EEES, 2009, P1-8
- [8] Tang.X, Kirschen.M, Abel.M, Pfeifei.H, Modeling of EAF off-gas post combustion in dedusting system using CFD methods. Steel Research; 74(4), 2003, p201-210.
- [9] Tang.X, Kirschen.M, Abel.M, Pfeifei.H, Modeling post combustion of EAF off-gases using CFD. 60th Electric Furnace Conference, Iron and Steel Society Conf. Proc, 2002, Texas
- [10]Tang.X, Kirschen.M, Abel.M, Pfeifei.H, Modeling of EAF dedusting units CO-combustion using CFD. EEC paper2, 2005, p1-10
- [11]Tannehill.J.C, Anderson.D.A, Pletcher.R.H, Computation Fluid Mechanics and Heat Transfer, Taylor & Francis, 1798.
- [12]Hajidavalloo. E, Alagheband. A, Thermal analysis of sponge iron preheating using waste energy of EAF. journal of materials processing technology, Elsevier, 2010, p336-341
- [13]Warnatz.J, Mass.U, Dibble.R. W, Combustion, Springer-Verlag, New York, 1996, Chapter 6,7,17