

مدلسازی عددی بویلر نیروگاه توس به منظور امکان سنجی افزایش راندمان: شبیه سازی جریان و احتراق داخل بویلر

مرتضی عنبرسوز*، سید محمد جوادی، محمد پسندیده فرد، حمید ایزدی

گروه مکانیک - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

*نویسنده مسئول: m.anbarsooz@gmail.com

چکیده

با توجه به توسعه روز افزون نیروگاههای حرارتی با سوختهای فسیلی، بهینه سازی فرایند احتراق در بویلرها و محفظه های احتراق جهت کاهش میزان آلاینده های زیست محیطی از اهمیت خاصی برخوردار گردیده است. در این مقاله به بررسی اثر قطر ذرات سوخت و دبی هوای ورودی بر راندمان احتراق و میزان تولید و انتشار آلاینده های اکسیدهای ازت و دوده پرداخته شده است. نتایج نشان می دهد با کاهش قطر ذرات راندمان احتراق، دمای ماکزیمم بویلر و میزان آلاینده NOx افزایش یافته و میزان انتشار دوده کاهش می یابد. همچنین بررسی اثر دبی هوا بر احتراق نشان می دهد که با توجه به سنگین بودن سوخت و اختلاط ناقص آن با هوا، بیشینه دما و راندمان بویلر در دبی هوای بالاتر از مقدار استکیومتریک رخ می دهد. در دبی بهینه هوای بدست آمده، بدلیل احتراق کامل سوخت و دمای بالای محفظه احتراق، میزان ناکس نیز حداکثر بوده و با افزایش بیشتر دبی هوا مجدداً دما و راندمان کاهش می یابد. مقایسه نتایج عددی بدست آمده از شبیه سازی شرایط فعلی بویلر با داده های آزمایشگاهی تطابق خوبی نشان می دهد.

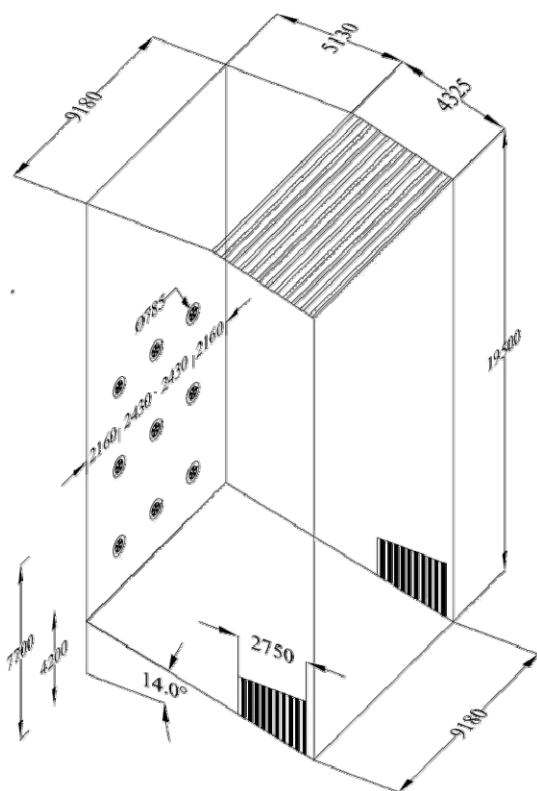
کلمات کلیدی: احتراق، آلاینده ها، سوخت مایع، راندمان، شبیه سازی

مقدمه

تواند سبب تشکیل و انتشار مقادیر زیاد اکسیدهای گوگرد و ازت گردد. با توجه به بالا بودن نسبت کربن به هیدروژن در سوخت نفت کوره نسبت به سوخت سبک مانند گاز طبیعی، بخش مهم دیگری از آلاینده های احتراق ناشی از احتراق ناقص سوخت می باشد. مهمترین این آلاینده مونوکسید کربن و دوده می باشند که انتشار این گونه ها علاوه بر اثرات مضر زیست محیطی سبب کاهش راندمان احتراق نیز می گردند. از مهمترین پارامترهای احتراقی موثر بر میزان تشکیل و انتشار آلاینده های احتراق می توان به دما و میزان اختلاط سوخت و

نیاز روز افزون جهان و به خصوص کشورهای در حال توسعه به انرژی برق سبب توسعه روز افزون نیروگاهها گردیده است. با افزایش تعداد نیروگاهها که بخش عمده آن نیروگاههای حرارتی بوده، میزان مصرف سوختهای فسیلی به خصوص نفت کوره، که جزء سوختهای سنگین می باشند، در نیروگاهها بسیار مورد استفاده قرار می گیرد. وجود درصد بالای گوگرد و ازت در سوخت مازوت (غلظت گوگرد حدود ۲/۵ تا ۳/۵ درصد و غلظت ازت حدود ۰/۲ تا ۰/۳ درصد) بر حسب شرایط احتراق می

نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود هوای ورودی به محفظه احتراق از اطراف نازلها به داخل محفظه وارد می شود. جهت اختلاط بهتر هوا و سوخت در مسیر جریان هوا از پره های مولد چرخش استفاده شده است.



شکل ۱- هندسه و ابعاد بویلر مورد مطالعه



شکل ۲- تصویر نازل پاشش سوخت، کانال ورود هوا و تجهیزات نصب شده در آن

هوا اشاره نمود. اختلاط بهتر سوخت و هوا سبب کاهش تشکیل آلاینده های کربنی (مونوکسید کربن و دوده)، افزایش دما و راندمان احتراق می گردد. از طرفی افزایش دما در نواحی داغ شعله، سبب افزایش چشمگیر میزان تشکیل اکسیدهای ازت و گوگرد می گردد. از جمله عوامل مهم دیگر در کنترل میزان آلاینده های اکسیدهای ازت و گوگرد میزان تابش می باشد. با افزایش میزان تابش، دمای ماکزیمم شعله کاهش یافته و در نتیجه میزان تشکیل این آلاینده ها کاهش چشمگیری می یابد. از عوامل موثر بر افزایش میزان تابش شعله می توان به تشکیل دوده در شعله و احتراق آن قبل از خروج از محفظه احتراق اشاره نمود. مشاهده می شود میزان تشکیل اکسیدهای ازت و گوگرد، مونوکسید کربن، دوده و راندمان احتراق شدیداً به یکدیگر وابسته بوده و با تغییر در شرایط احتراق میزان هر یک از آنها تغییر می نماید. پیچیدگی فرآیند احتراق سوخت های هیدروکربنی سنگین و اهمیت تابش و اغتشاشات جریان بر نرخ احتراق و توزیع دما، سبب شده تا برای انتخاب بهینه پارامتر های طراحی از جمله مشخصات سیستم تزریق سوخت، دبی و دمای هوای ورودی و ... نیاز به ابزاری باشد که توانایی اعمال اثر تمامی پارامتر های مذکور را بر احتراق داشته باشد. شبیه سازی رایانه ای یکی از روشهای مناسب برای مطالعه فرآیند احتراق بوده که اخیراً برای محاسبه آلاینده ها بسیار توسعه پیدا کرده و مورد استفاده قرار گرفته است و محققین مختلفی برای بهینه سازی شرایط عملکردی بویلرها به استفاده از مطالعات عددی و آزمایشگاهی پرداخته اند [۱ و ۲]. در این مقاله با شبیه سازی سه بعدی هندسه بویلر و فرآیندهای انتقال حرارت و تابش ناشی از احتراق سوخت مایع در جریان آشفته، به بررسی اثر قطر قطرات سوخت پاشش شده، میزان دبی هوای ورودی و دمای پیش گرمایش هوا بر تشکیل آلاینده های ازت و دوده و همچنین راندمان بویلر پرداخته شده است.

مشخصات بویلر

در این مطالعه برای شبیه سازی احتراق و تشکیل آلاینده ها، بویلر واحد ۱ نیروگاه طوس مورد بررسی قرار گرفت. شکل هندسی و ابعاد محفظه بویلر در شکل ۱ نشان داده شده است. این بویلر شامل ۹ مشعل مجهز به نازلهای پاشش سوخت مایع و گاز می باشند که بر اساس فصول مختلف سال مورد استفاده قرار می گیرند. در شکل ۲ ساختمان یکی از مشعلهای فوق



بالانس نیروهای خارجی از قبیل نیروهای وارده از طرف سیال، محاسبه می گردد. معادلات اندازه حرکت ذرات مایع با استفاده از موازنه نیروهای خارجی وارد بر قطره بدست می آید [۳] که در راستای فرضی X بصورت زیر می باشد:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D (\hat{u} - u_p) + \frac{g_x (\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (2)$$

که در آن، \hat{u} سرعت محوری گاز، ρ_p چگالی قطره، ρ چگالی سیال اطراف قطره و u_p سرعت محوری قطره سوخت می باشد. F_D نیز از رابطه زیر تعیین می شود [۳]:

$$F_D = \frac{18\mu_g C_D \text{Re}}{24\rho_p d_p^2} \quad (3)$$

در این رابطه، μ_g لزجت گاز، ρ_p چگالی قطره و d_p قطر قطره است. معادله بقای انرژی حاکم بر قطره سوخت مایع با فرض دمای یکنواخت داخل قطره و صرف نظر از تبخیر سطحی به صورت زیر بیان می شود:

$$m_l C_{p,l} \frac{dT_l}{dt} = \dot{Q}_l - \dot{Q}_v \quad (4)$$

که در آن، \dot{Q}_l کل حرارت منتقل شده به قطره، \dot{Q}_v انرژی که صرف تبخیر قطره سوخت شده و T_l دمای قطره می باشد. $C_{p,l}$ و m_l نیز به ترتیب، گرمای ویژه و جرم آن هستند. تا زمانیکه دمای قطره به دمای جوش آن نرسیده باشد، \dot{Q}_v صفر در نظر گرفته شده است. \dot{Q}_l را می توان به صورت زیر تعیین نمود:

$$\dot{Q}_l = -hA(T_l - T_\infty) \quad (5)$$

در این رابطه، h ضریب انتقال حرارت جابجایی بوده و $T_\infty > T_l$ می باشد. ضریب انتقال حرارت جابجایی قطره کروی سوخت را بصورت زیر می توان تعیین نمود [۳]:

$$Nu = \frac{hD}{k_g} = 2 + 0.6 \text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3} \quad (6)$$

که در آن، Pr عدد پرانتل محیط گازی می باشد. معادلات نهایی پیوستگی و بقای انرژی حاکم بر ذرات سوخت مایع را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

$$\frac{dT_l}{dt} = \frac{6k_g (2 + 0.6 \text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3}) (T_\infty - T_l)}{(\rho_l D^2 C_{p,l})} \quad (7)$$

داده هائی که در شبیه سازی محفظه بویلر فوق در حالت استفاده کامل (۱۰۰ درصد MCR) از سوخت نفت کوره در شرایط توان خروجی 150 MW مورد استفاده قرار گرفته اند، به شرح زیر می باشند:

جدول ۱- پارامترهای کارکردی بویلر

مقدار	واحد	شرح داده
140	Kg/s	دبی جرمی هوای ورودی به بویلر
288	°C	دمای هوای ورودی به بویلر
82917	Kg/h	دبی جرمی جریان برگشتی به بویلر از لانگشتروم
370	mmHg	فشار داخل بویلر
37.01	ton/hr	دبی جرمی سوخت مایع
125	°C	دمای سوخت مایع در ورود به نازل
950	kg/m ³	چگالی سوخت مایع در دمای 35°C

مدل ریاضی و روش حل عددی

جریان در داخل کوره ها و محفظه های احتراق از نوع جریانهای چرخشی و مغشوش می باشند. معادلات حاکم بر این جریانها، معادلات پیوستگی، اندازه حرکت، آشفستگی، انرژی، نرخ تولید و از بین رفتن گونه های شیمیایی و تابش بوده که با حل همزمان این معادلات برای هندسه بویلر با شرایط مرزی مشخص، مشخصات جریان احتراقی در محفظه احتراق محاسبه می گردد. در احتراق سوخت مایع علاوه بر معادلات فوق، معادلات لاگرانژی مسیر ذرات سوخت و معادلات انرژی برای محاسبه نرخ تبخیر سوخت نیز حل می شوند. معادله دیفرانسیل کلی بقا در فاز گازی برای متغیر ϕ بصورت زیر می باشد [۳]:

$$\left(\rho u_i + \overline{\rho' u_i'} \right) \frac{\partial \phi_i}{\partial x_i} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j' \phi_j + u_j \rho' \phi_j + \overline{\rho' u_j' \phi_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (1)$$

که محاسبه ترمهای نوسانی $u_j' \phi_j$ وظیفه مدل های اغتشاشی می باشند [۲].

محاسبه سرعت ذرات سوخت و یافتن مسیر آنها نقش مهمی بر مسیر ذرات و در نتیجه دما و نرخ تبخیر آنها دارد. رفتار ذرات به وسیله موقعیت اولیه، جرم، دما، سرعت اولیه و سپس با



مرحله ای تسنر [۶] جهت مدل سازی نرخ هسته زایی و تشکیل دوده استفاده شده است.

فرایند تشکیل اکسیدهای نیتروژن نیز مانند دوده بسیار پیچیده می باشد. به طور عمده سه مکانیزم برای تولید NO_x در احتراق مطرح می باشد [۷] که عبارتند از مکانیزم گرمایی زلدوویچ [۳]، مکانیزم سوختی [۳] و مکانیزم فوری [۳]. مکانیزم گرمایی مهمترین مکانیزمی است که تاکنون شناخته شده است و وابستگی شدیدی به دما دارد. به همین دلیل با توجه به افزایش دمای شعله با افزایش تعداد کربنهای موجود در زنجیره سوخت، فرایند تشکیل NO_x از اهمیت بیشتری برخوردار است. NO_x سوختی، هنگامیکه حجم نیتروژن در سوخت بیش از ۰/۱ وزن سوخت باشد، به وسیله اکسیداسیون ترکیبات نیتروژن دار سوخت در ناحیه شعله تشکیل می شود و مقدار آن بسیار قابل توجه است. با توجه به درصد بالای نیتروژن موجود در سوخت مازوت (حدود ۰/۲۶ درصد) مقادیر این آلاینده نیز قابل توجه است. در مکانیزم NO_x فوری که در سال ۱۹۷۱ توسط فنیمر مطرح گردیده است در اثر برخورد بین مولکول های نیتروژن و رادیکال های هیدروکربن اکسیدهای نیتروژن تولید می گردد. تشکیل این اکسید اساسا به غلظت رادیکال در ناحیه اول شعله وابسته است و سهم آن در حالت احتراق با اکسیژن اضافی ناچیز است. در مخلوط های غنی از سوخت با وجود دماهای پایین، سهم NO_x فوری ممکن است به ۲۵ درصد کل NO_x برسد.

شرایط مرزی و روش حل عددی

شرایط مرزی اعمال شده برای حل در شکل ۳ آورده شده است.

$$\frac{dD}{dt} = -\frac{C_b}{2D} (1 + 0.23 \text{Re}^{1/2}) \quad (8)$$

مدل احتراق مورد استفاده در این مطالعه مدل مگنسن-هرتاگر می باشد که در شعله های پیش آمیخته و پخششی نتایج رضایت بخشی ارائه نموده است [۴]. در شبیه سازی فرآیندهای احتراقی سوخت های مایع فرض می شود که احتراق فاز مایع به صورت جداگانه وجود نداشته بلکه ابتدا سوخت مایع به حالت گازی تبدیل شده و سپس احتراق صورت می گیرد [۴]. فرمول شیمیایی سوخت مایع سنگین (مازوت) بصورت $\text{C}_{19}\text{H}_{30}$ می باشد. معادله بقای کسر جرمی هریک از گونه ها (m_i)، به صورت زیر نوشته می شود [۵]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i m_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_{mj} \frac{\partial m_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{\rho u_i m_i}) + S_{m_i} \quad (9)$$

که عبارت حاوی نوسانات سرعت، به شکل زیر مدل سازی می شود:

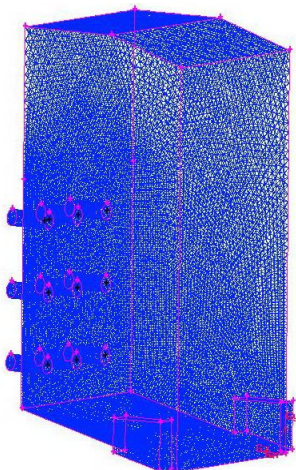
$$-\overline{\rho u_i m_j} = C_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon} \frac{\partial m_j}{\partial x_i} \quad (10)$$

عبارت $S_{m,i}$ جمله چشمه مناسب برای تولید یا مصرف گونه شیمیایی مورد نظر می باشد که با توجه به مدل احتراقی بکار رفته، از رابطه زیر تعیین می شود:

$$S_{m,i} = v_i' M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \times \min \left(\frac{Y_{\text{Fuel}}}{v_{\text{Fuel}}' M_{w,\text{Fuel}}}, \frac{Y_{\text{Oxygen}}}{v_{\text{Oxygen}}' M_{w,\text{Oxygen}}} \right) \quad (11)$$

مدلهای تشکیل آلاینده ها

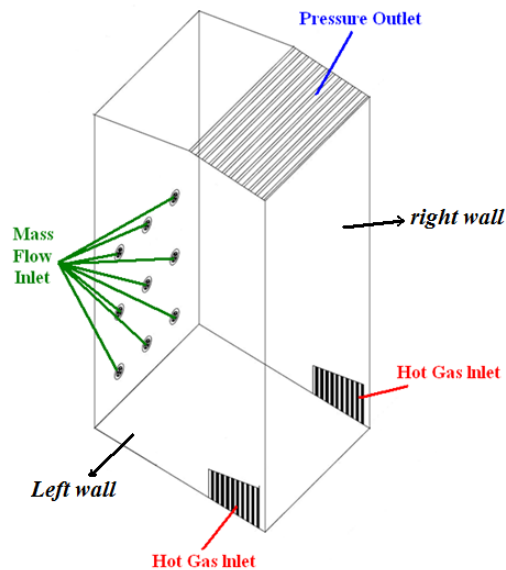
استیلین در اثر واکنشهای مختلف شیمیایی در هنگام احتراق هیدروکربن ها تشکیل می گردد و باعث تولید حلقه های بنزن اشباع شده می شود، حلقه های بنزن با یکدیگر ترکیب می شوند و تولید حلقه های بزرگتری می کنند که هیدروکربن های حلقوی و چند حلقه ای (PAH) نامیده می شوند. رشد هیدروکربن های حلقوی و چند حلقه ای سبب تشکیل ذرات جامد در فاز گاز می شود که به آنها، هسته دوده گفته می شود. با توجه به پیچیدگی فرایندهای فیزیکی و شیمیایی حاکم بر پدیده از مدل های نیمه تجربی ارائه شده برای محاسبه دوده در فرایند احتراق استفاده شده است. در این تحقیق از مدل دو



شکل ۴- شبکه محاسباتی

در شکل ۴ شبکه محاسباتی تولید شده نشان داده شده است. محیط حل (محیط داخل بویلر) به ۷۴۸۵۶۴ سلول چهاروجهی تقسیم شده است که در نقاط نزدیک به مشعل ها ریز شده است. در شکل ۵ توزیع سرعت جریان در مقاطع مختلف نشان داده شده است. بیشترین سرعت جریان در دهانه های ورودی مشعلها مشاهده شده که پس از ورود به بویلر تحت تاثیر نیروهای شناوری رو به خروجی بویلر حرکت می کند. توزیع دما، بخار سوخت و اکسیژن در مقاطع مختلف بویلر برای شرایط کارکرد فعلی نیروگاه در شکل های ۶ تا ۸ نشان داده شده اند. مشاهده می شود که بدلیل استفاده از سوخت سنگین (که دارای زمان تبخیر طولانی تری نسبت به سوخته های گازی هستند) دمای ماکزیمم شعله در نواحی دورتری از نقطه پاشش اتفاق افتاده است. همچنین ماکزیمم غلظت بخار سوخت در مقاطع میانی بویلر دیده می شود. همچنین اکسیژن پس از ورود به بویلر سریعاً مصرف شده و بیشترین مقدار را در دهانه ورودی هوا دارد.

جهت بررسی دقت نتایج عددی، غلظت CO_2 خشک، دمای محصولات احتراق و غلظت آلانده NOx در خروجی بویلر در جدول ۲ با نتایج اندازه گیری موجود مقایسه شده است. مشاهده می شود بیشترین خطا مربوط به دمای خروجی بویلر می باشد که می تواند به دلیل در نظر گرفتن واکنش یک مرحله ای احتراق باشد. همچنین اصلاح توزیع دمای دیواره بویلر می تواند سبب افزایش دقت در دمای خروجی گردد.



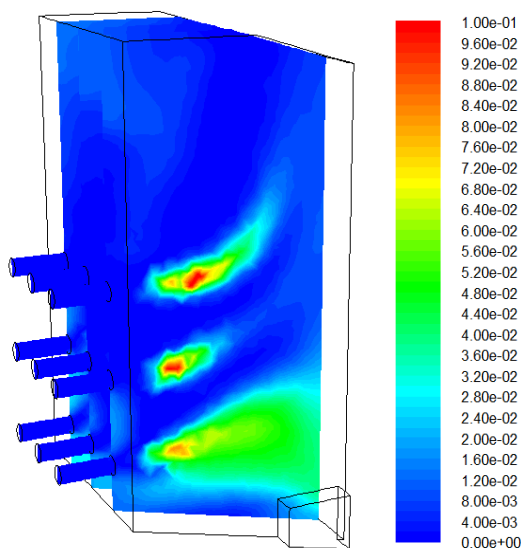
شکل ۳- شرایط مرزی مورد استفاده در حل عددی

مقادیر سرعتها و دماها بر اساس اطلاعات جدول ۱ برای هر مشعل محاسبه و اعمال شده است. همچنین شرایط مرزی دیواره بویلر با فرض جریان دو فازي بخار- مایع داخل لوله های بویلر دما ثابت فرض شده است. جهت حل عددی معادلات حاکم از روش حجمهای محدود با استفاده از کد عددی Fluent 6.3 استفاده شده است. همچنین جهت محاسبه اغتشاشات جریان از مدل $RNG\ k-\epsilon$ و برای مدل سازی تابش از مدل Discrete Ordinate استفاده شده است [۳].

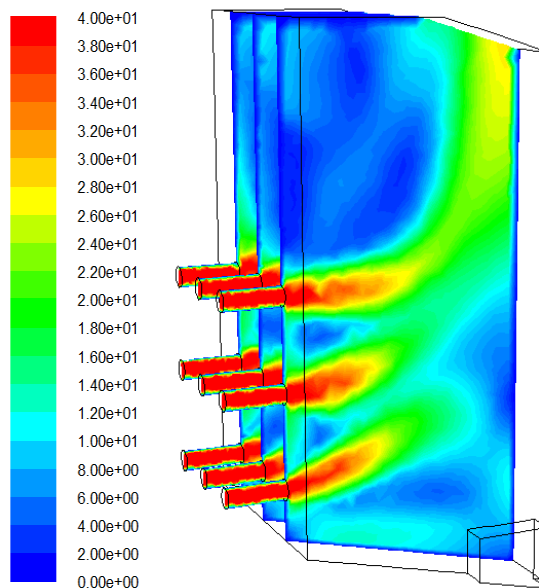
نتایج

۱- شبیه سازی وضعیت فعلی نیروگاه

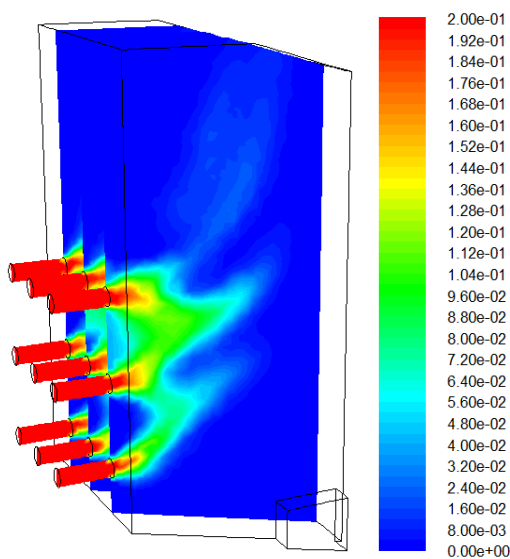
برای مطالعه فرآیند تشکیل آلانده ها، جریان احتراقی داخل بویلر یکی از واحدهای نیروگاه طوس مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا جهت بررسی دقت نتایج بدست آمده، شرایط موجود مورد شبیه سازی قرار گرفته و با نتایج تجربی موجود مقایسه گردیده است.



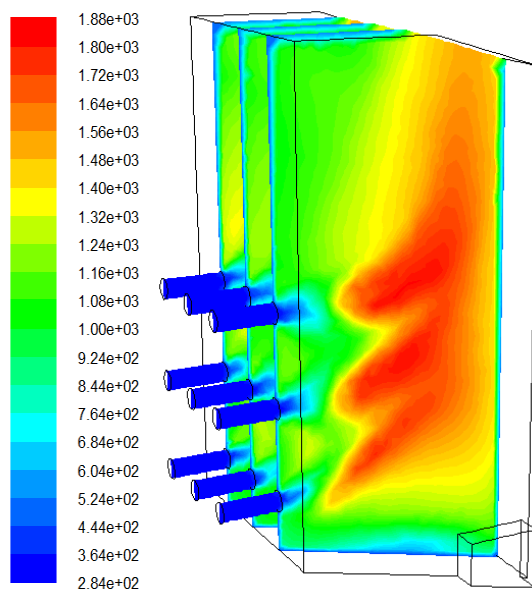
شکل ۷- توزیع بخار سوخت در مقاطع مختلف بویلر



شکل ۵- توزیع سرعت (متر بر ثانیه)



شکل ۸- توزیع کسر جرمی اکسیژن در مقاطع مختلف بویلر



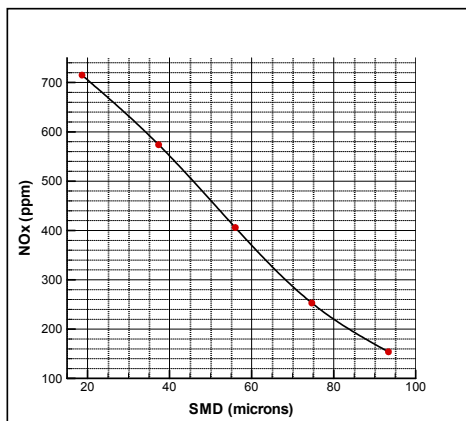
شکل ۶- توزیع دمای محاسبه شده در مقاطع مختلف بویلر

۲- بررسی راهکارهای افزایش راندمان

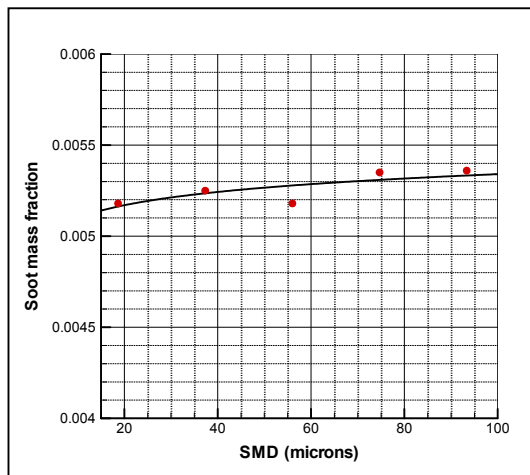
در شکل ۹ به بررسی اثر قطر متوسط ذرات سوخت پاشش شده بر راندمان احتراق پرداخته شده است. مشاهده می شود با افزایش قطر ذرات سوخت، راندمان احتراق کاهش چشمگیری می یابد. راندمان احتراق بصورت کل حرارت آزاد شده (شار دیواره ها بعلاوه شار خروجی دودکش) به ارزش حرارتی سوخت در نظر گرفته شده است. همچنین به دلیل زمان طولانی تر تبخیر قطرات با افزایش قطر، بخار سوخت در ناحیه وسیعتری داخل بویلر پخش شده و همانطور که شکل

جدول ۲- مقایسه نتایج حل عددی با نتایج تجربی موجود در نیروگاه

کمیت	مقدار تجربی	مقدار عددی	درصد خطا(%)
درصد حجمی CO_2	۱۴/۵	۱۴/۸۱	۲/۱
راندمان احتراق	۸۵/۳	۸۴/۶۹	۰/۷
دمای محصولات احتراق (کلوین)	۱۲۸۳	۱۴۱۰	۹/۹
NOx (ppm)	۳۸۶	۴۰۶	۵/۲



شکل ۱۱- اثر قطر قطرات پاشش شده بر میزان NOx در خروجی بویلر

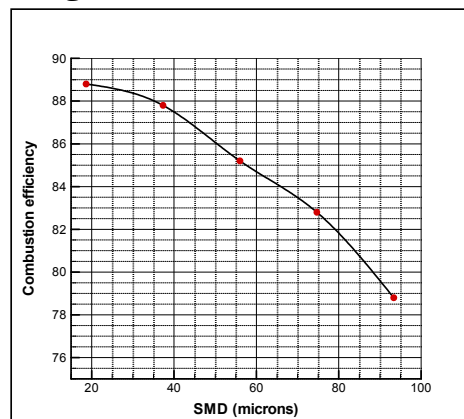


شکل ۱۲- اثر قطر قطرات پاشش شده بر کسر جرمی دوده

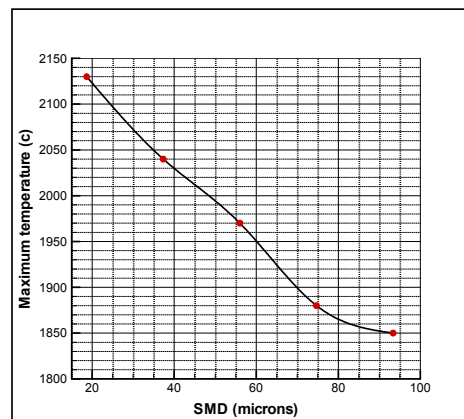
از جمله پارامترهای مهم موثر بر دمای احتراق میزان هوای اضافه است. در احتراق سوخته های سنگین بدلیل عدم اختلاط کامل سوخت و هوا، میزان هوای مورد نیاز احتراق بیش از مقدار استکیومتریکی می باشد. در شکل های ۱۳ تا ۱۵ اثر دبی هوای ورودی بر دمای ماکزیمم شعله و میزان آلاینده های ناکس و دوده نشان داده شده است. به منظور نمایش بهتر میزان تغییرات پارامتر های مختلف، محور عمودی نمودارها از اینجا به بعد با استفاده از رابطه زیر استخراج شده است:

$$\text{مقدار پارامتر در حالت پایه} - \text{مقدار جدید پارامتر} \times 100 = \frac{\text{مقدار پارامتر در حالت پایه}}{\text{مقدار جدید پارامتر}}$$

۱۰ نشان می دهد، دمای ماکزیمم محفظه احتراق کاهش می یابد. این کاهش دمای ماکزیمم به مقدار زیادی میزان تشکیل NOx حرارتی را کاهش می دهد (شکل ۱۱). از طرفی همانطور که شکل ۱۲ نشان می دهد به دلیل کاهش میزان اختلاط هوا با افزایش قطر، میزان دوده در خروجی بویلر افزایش یافته است. همچنین میزان انتقال حرارت به دیواره بویلر نیز با افزایش قطر ذرات سوخت کاهش می یابد که این سبب کاهش راندمان انتقال حرارت داخل بویلر می گردد.

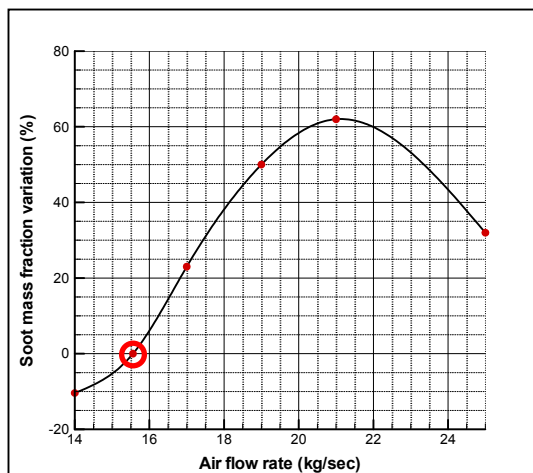


شکل ۹- اثر قطر قطرات پاشش شده بر راندمان احتراق

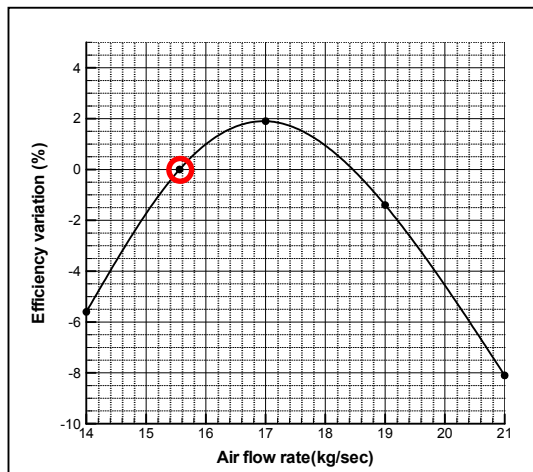


شکل ۱۰- اثر قطر قطرات پاشش شده بر دمای حداکثر محفظه احتراق

هوای ورودی، دمای ماکزیمم شعله بدلیل سرد شدن مخلوط کاهش می یابد. همچنین بدلیل وابستگی شدید آلایندة ناکس به دمای ماکزیمم شعله، همانطور که در شکل ۱۴ مشاهده می گردد آلایندة ناکس نیز با افزایش دمای ماکزیمم (ناشی از افزایش دبی هوای ورودی) ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می یابد.

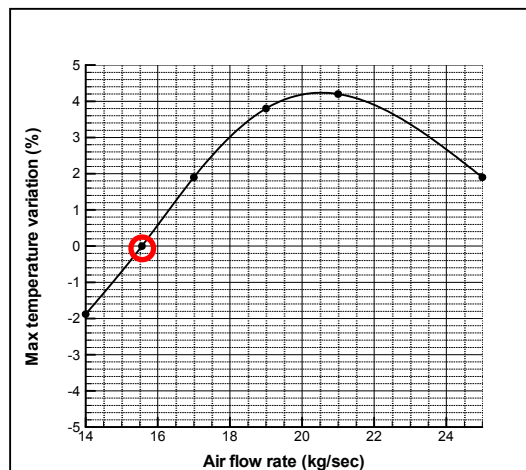


شکل ۱۳- اثر دبی هوای ورودی بر درصد تغییر کسر جرمی دوده در خروجی بویلر نسبت به حالت پایه



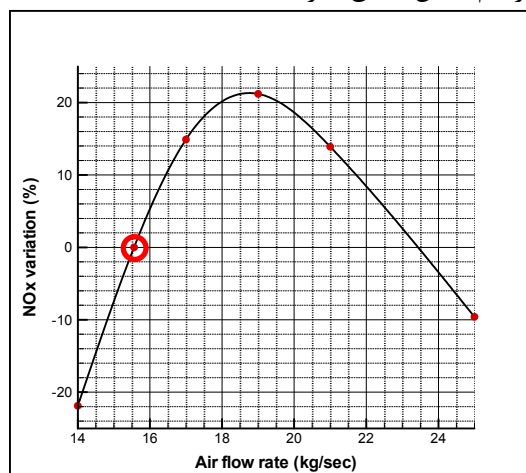
شکل ۱۴- اثر دبی هوای ورودی بر تغییر راندمان احتراق نسبت به حالت پایه

در شکل ۱۶ اثر دبی هوای ورودی بر راندمان احتراق نشان داده شده است. با افزایش دبی هوای ورودی، عمل اختلاط سوخت و هوا بهتر صورت می گیرد، اما در عین حال ورود هوای بیشتر باعث صرف شدن مقداری از انرژی حاصل از احتراق برای گرم کردن آن می شود. همانطور که مشاهده می شود با افزایش دبی هوا تا ۱۷ کیلوگرم بر ثانیه به دلیل اختلاط بهتر سوخت و



شکل ۱۵- اثر دبی هوای ورودی بر درصد تغییر دمای ماکزیمم بویلر نسبت به حالت پایه

اما افزایش دبی هوا بر میزان تشکیل دوده اثر پیچیده ای دارد. با افزایش دبی و در نتیجه افزایش دمای ماکزیمم شعله (و تجزیه سوخت ورودی) میزان تشکیل دوده در شعله افزایش می یابد. از طرفی دمای بالای محفظه احتراق سبب احتراق دوده و کاهش آن در خروجی می گردد. همچنین هوای اضافه بیشتر سبب اختلاط بهتر سوخت و هوا و کاهش میزان دوده می گردد. در شکل ۱۵ میزان دوده خروجی از بویلر با افزایش دبی هوا نشان داده شده است. مشاهده می شود نقطه ماکزیمم دوده با ماکزیمم ناکس تطابق ندارد.



شکل ۱۶- اثر دبی هوای ورودی بر درصد تغییر میزان NOx خروجی بویلر نسبت به حالت پایه

حالت پایه بر روی هر نمودار با استفاده از یک دایره متمایز شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش دبی هوا تا ۲۰ کیلوگرم بر ثانیه، بدلیل کامل شدن احتراق دمای ماکزیمم محفظه احتراق افزایش می یابد. اما با افزایش بیشتر میزان



- 6- Tesner, P.A., Tsygankova, E.I., Guilazetdinov, L.P., Zuyev, V.P. and Loshakova. G.V. (1971). "The formation of soot from aromatic hydrocarbons in diffusion flames of hydrocarbon-hydrogen mixtures", *Journal of Combustion and Flame*, Vol. 17, PP. 279-285.
- 7- Skjoth-Rasmussen, M.S., Glarborg P., Ostberg Beltrame A., Porshnev P., Merchan M. W., Saveliev A., Fridman A., Kennedy L. A., Petrova O., Zhdnok S., Amouri F., and Charon O. (2001). "Soot and NO formation in methane-oxygen enriched diffusion flames", *Journal of Combustion and Flame*, Vol. 124, PP. 295-310.

هوا، راندمان احتراق افزایش یافته است، اما با افزایش بیشتر آن، راندمان احتراق روند نزولی خواهد داشت.

بحث و نتیجه گیری

نتایج بدست آمده از شبیه سازی اثر قطر ذرات سوخت و دبی هوای احتراق نشان می دهد با افزایش قطر ذرات سوخت، زمان تبخیر قطرات سوخت بیشتر شده و مسیر طولانی تری در بویلر طی می کنند. همچنین با کوچک تر شدن قطر قطرات سوخت پاشش شده، راندمان احتراق و بطور همزمان میزان ناکس تولیدی افزایش پیدا می کند. کاهش قطر قطرات، میزان دوده تشکیل شده را به مقدار بسیار ناچیزی کاهش می دهد. افزایش دبی هوای ورودی تا ۱۷ کیلوگرم بر ثانیه برای هر مشعل، می تواند باعث افزایش راندمان بویلر تا ۲ درصد شود. اما افزایش دبی هوای ورودی به این مقدار، افزایش ۱۲ درصدی ناکس و ۲۲ درصدی دوده تشکیل شده را به همراه خواهد داشت.

مراجع

- 1- Mull, T.V. (1996). "Numerical Simulation Models for a Modern Boiler Design", *Proceedings of Power-Gen International Conference*, Orlando, Florida, USA.
- 2- Zahirovic, S., Scharler, R. and Obernberger, I., "Advanced CFD Modelling of Pulverised Biomass Combustion," *Institute for Ressource Efficient and Sustainable Systems*, Graz University of Technology, Graz, Asturia. BIOS Co. web site at: "<http://www.bios-bioenergy.at/en/>".
- 3- FLUENT 6.3. (2006) User's Guide, Fluent Inc.
- 4- Moghiman, M. and Maneshkarimi, M. R. (2000). "Effect of swirl number and droplet size on turbulent spray combustion", *Journal of Iranian Mechanical Engineering*, 5:47-59.
- 5- Werner Hofmann. (1989). Rubber technology handbook, *Hanser Publishers*, New york, 1989.