

# بررسی بکارگیری مشعل‌های کم ناکس در نیروگاه منتظر قائم با هدف کاهش آلاینده‌گی و رفع محدودیت تولید

مسعود سلطانی حسینی<sup>۱</sup>، میلاد ستاره<sup>۲</sup>، رضا مداحیان<sup>۳</sup>، رامین حقیقی خوشخو<sup>۴</sup>

واحد تحقیق و توسعه

شرکت موننکو ایران

تهران، ایران

[setareh.milad@monenco.com](mailto:setareh.milad@monenco.com)<sup>۲</sup>, [soltani.masoud@monenco.com](mailto:soltani.masoud@monenco.com)<sup>۱</sup>,  
[madahian.reza@monenco.com](mailto:madahian.reza@monenco.com)<sup>۳</sup>, [khoshkho.ramin@monenco.com](mailto:khoshkho.ramin@monenco.com)<sup>۴</sup>

از وضعیت مناسب و بهینه‌ای برخوردار نبوده و پیشنهاد می‌گردد با مشعل‌های پر بازده و کم ناکس جایگزین گردند. مطابق نتایج شبیه‌سازی عددی، با افزایش میزان تیلت تا ۳۰- درجه، میزان حرارت دریافتی در کوره و به تبع آن میزان توان تولید بخار نیز افزایش پیدا خواهد کرد. لذا به منظور دستیابی به حداکثر ظرفیت تولید، زاویه تیلت مناسب ۳۰- درجه می‌باشد.

*واژه‌های کلیدی - آلودگی هوا، سوخت مازوت، سوخت گاز، مشعل کم ناکس، نیروگاه منتظر قائم، شبیه‌سازی عددی*

## ۱. مقدمه

مشعل‌ها در بویلرهای نیروگاهی وظیفه تبدیل انرژی شیمیایی سوخت به حرارت را به صورت پیوسته و ایمن بر عهده دارند. با توجه به اهمیت نقش مشعل در عملکرد بویلر، کارکرد نامناسب مشعل‌ها و احتراق غیرکامل سوخت می‌تواند منجر به افزایش آلاینده‌ها از جمله  $NO_x$  و  $CO$ ، کاهش توان تولیدی واحد و یا آسیب رسیدن به سایر المان‌های بویلر گردد.

مشعل‌ها به روش‌های مختلفی دسته‌بندی می‌گردند ولی مهمترین آنها تقسیم بندی مشعل‌ها براساس نوع سوخت، مراحل اشتعال، روش اختلاط سوخت و هوا و میزان ناکس می‌باشد. بر اساس نوع سوخت، به مشعل‌های

چکیده - مسائل زیست محیطی و آلودگی هوا در سالهای اخیر توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. نیروگاه‌های حرارتی از جمله عوامل آلوده کننده هوا می‌باشند. همین عامل باعث شده که در چند سال اخیر قوانین سختگیرانه‌ای برای نیروگاه‌ها در مورد تولید آلودگی وضع شود. از ابتدای راه اندازی، اکثر نیروگاه‌های بخار در ایران از سوخت مازوت استفاده می‌کرده اند. با توجه به اینکه تولید آلاینده‌های زیست محیطی در سوخت مازوت بیشتر از سوخت گاز می‌باشد به همین دلیل با توجه به محدودیت‌های زیست محیطی به دنبال تغییر سوخت از مازوت به گاز هستند. برای تغییر سوخت نیروگاه باید مشعل‌های مناسب با سوخت جدید استفاده شود که ملاحظات مربوط به خود را دارد. مشعل‌های جدید کم‌ناکس قابلیت تولید آلاینده‌گی کم و راندمان بالایی را دارند به همین دلیل روز به روز استفاده از این مشعل‌ها در جهان در حال گسترش است.

در این مطالعه با بررسی شرایط مشعل‌های موجود بویلر نیروگاه منتظر قائم و شبیه‌سازی عددی انجام شده، پارامترهای اصلی جهت انتخاب مشعل‌های جدید کم ناکس مورد نیاز برای نیروگاه منتظر قائم با هدف کاهش آلاینده‌گی و رفع محدودیت تولید ارائه شده است. براساس نتایج بدست آمده، مشعل‌های موجود واحد به لحاظ راندمان و احتراق،

بیشتر و ترکیب هوا و سوخت به نحو بهتری تشکیل شود. تحقیقی که در این زمینه در یک نیروگاه ۳۰۰ مگاواتی بعمل آمده، نشان داده که با استفاده از این مشعل و تنظیم شرایط احتراق، ۳۵ تا ۳۹ درصد کاهش اکسیدهای نیتروژن را به همراه خواهد داشت [۲].

در مشعل‌های کم ناکس خشک (DLNB) مخلوط غیراستوکیومتری از هوا و سوخت تشکیل می‌شود تا دمای شعله پایین باشد. همچنین به دلیل اختلاط هوا و سوخت پیش از ورود به محفظه احتراق زمان اقامت نیز کاهش می‌یابد. اختلاط هموزن نیز مناطق غنی از سوخت را کم می‌کند. به منظور تثبیت شعله و اطمینان از احتراق کامل با حداقل انتشار منوکسید کربن، یک سیستم پایلوت به این گونه مشعل‌ها اضافه می‌شود. در صورت استفاده از سوختی با میزان نیتروژن بالا استفاده از یک سیستم مکمل ضروری است. از دیگر عوامل تاثیرگذار بر عملکرد این سیستم‌ها نسبت اختلاط هوا و سوخت است که باید در حد اشتعال نگه داشته شود تا حد انتشار ناکس حداقل باشد. انحراف از این حد سبب ناپایداری شعله شده و امنیت کار را به خطر می‌اندازد. از این رو سیستم‌های چند مرحله‌ای در اولویت هستند. این سیستم‌ها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که در بار نامی واحد، قابلیت کاربری دارند و در صورت تغییر بار، سیستم احتراق به وضعیت احتراق نفوذی تغییر وضعیت می‌دهد.

سوخت اصلی نیروگاه منتظر قائم، سوخت مازوت بوده است. با توجه به وضع قوانین جدید و بیشتر بودن تولید آلاینده‌های هوا در سوخت مازوت نسبت به سوخت گاز، سوخت اصلی نیروگاه به گاز تغییر کرده است. همانطور که مشخص است تولید آلاینده‌های زیست محیطی در سوخت‌های سبک مانند گاز کمتر از مازوت می‌باشد ولی به دلیل ماهیت متفاوت احتراق گاز نسبت به مازوت، میزان تولید نیروگاه کاهش یافته است. یکی از راهکارهای اصلی رفع این محدودیت استفاده از مشعل‌های جدید کم ناکس با راندمان و ظرفیت حرارتی بالاتر است. استفاده از مشعل‌های جدید نیازمند بررسی شرایط بویلر از نظر جانمایی، جنس و میزان سطوح حرارتی و سیستم‌های کنترل و ابزار دقیق می‌باشد. هر واحد نیروگاه منتظر قائم دارای ۱۲ مشعل جت گازی دو قلو می‌باشد<sup>۲</sup> بوده که در گوشه‌های بویلر در سه طبقه نصب شده‌اند (شکل ۱). این شیوه نصب باعث می‌شود جریان سوخت و هوا از مشعل‌ها به سمت یک گرداب آتش در مرکز کوره هدایت شوند. در شکل ۲ محل مشعل‌ها در چهار گوشه بویلر با مربع مشخص شده است و فلش‌ها نشان دهنده مسیر جریان احتراق می‌باشد. همانطور که مشخص است،

سوخت جامد، مازوت سوز و گاز سوز، دوگانه سوز و سه‌گانه سوز، بر اساس تعداد مراحل اشتعال به مشعل‌های یک مرحله‌ای، دو مرحله‌ای و سه مرحله‌ای و بر اساس روش اختلاط سوخت و هوا به مشعل‌های اتمسفریک و مشعل‌های دمنده و بر اساس ناکس به مشعل‌های کم ناکس، کم ناکس چرخشی و کم ناکس خشک (DLNB) تقسیم‌بندی می‌شوند.

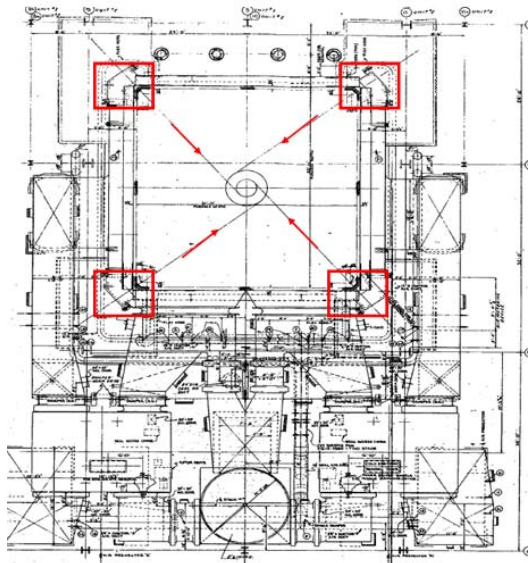
در مشعل‌های معمولی که بر اساس سیستم نفوذی کنترل می‌شوند، سوخت و هوا جداگانه به محفظه احتراق تزریق شده و در آنجا همزمان اختلاط و احتراق صورت می‌گیرد. در این صورت علاوه بر بالا بودن پیک دمای شعله، زمان اقامت نیز بالا است که هر دو از عوامل اصلی افزایش تولید ناکس هستند. از آنجا که تولید ناکس تابعی از میزان اختلاط هوا و سوخت در شعله است و در صورت بروز نقاط داغ<sup>۱</sup> اکسیدهای نیتروژن بیشتری تولید می‌شود. در نتیجه سعی بر این است که از این امر جلوگیری شود تا در کنار اختلاط صحیح هوا و سوخت از تولید اکسیدهای نیتروژن ممانعت بعمل آید. [۱]. با استفاده از مشعل‌های احتراق با ناکس پایین اثر این دو عامل را می‌توان تا حد زیادی کاهش داد. این مشعل‌ها بر اساس نوع مکانیزمشان به دو دسته مشعل کم ناکس (LNB) و مشعل کم ناکس چرخشی (LNSB) تقسیم می‌شوند. در مشعل کم ناکس (LNB) با چند منطقه‌ای کردن اختلاط و در نتیجه خارج کردن احتراق از حالت استوکیومتری و تبدیل آن به احتراق چند مرحله‌ای میزان تولید ناکس کاهش می‌یابد. با بکارگیری این مکانیزم شعله احتراقی پایدار با مناطق مختلف بوجود می‌آید. احتراق اولیه با حضور ۳۰-۴۰ درصد هوای استوکیومتری انجام می‌شود. سپس بازسوزش سوخت به‌همراه سوخت اضافه صورت گرفته و در نهایت احتراق با تزریق هوای تکمیلی که همزمان درجه حرارت احتراق را در محدوده مناسب نگه می‌دارد تکمیل می‌شود. مقدار ناکس مشعل‌های کم ناکس حدود ۵۰ ppm در ۳ درصد اکسیژن اضافی می‌باشد [۱].

روش دیگری که در ساخت مشعل‌های کم ناکس استفاده می‌شود، بهره‌گیری از چرخش هوا به وسیله موتورهای گردشی و پرتاب هوا به داخل محفظه احتراق می‌باشد. این روش را در اصطلاح مشعل کم ناکس چرخشی (LNSB) می‌نامند. هوای ورودی تحت تاثیر گردش ایجاد شده، دارای تلاطم زیادی خواهد شد که همین امر باعث ترکیب بهتر سوخت و هوا در داخل محفظه احتراق می‌گردد. در این روش می‌توان از مکانیزم‌های کمکی نیز بهره جست، مانند اضافه کردن جت فن به منظور افزایش سرعت و فشار هوای ورودی. این امر باعث خواهد شد تلاطم و آشفتنگی به وجود آمده

<sup>2</sup> Twin Torch Gas Jet Burner

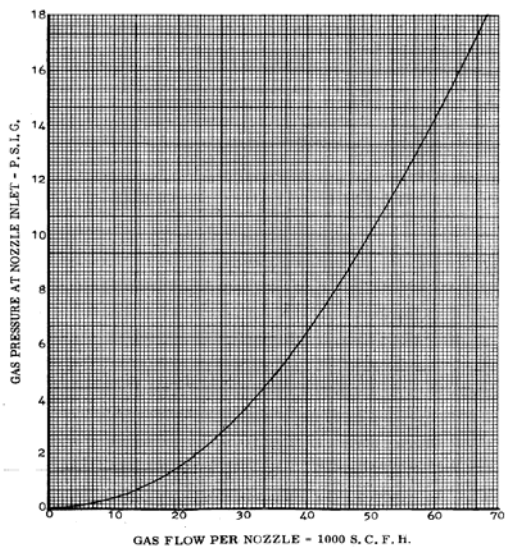
<sup>1</sup> Hot Spots

یک گرداب در مرکز کوره ایجاد می‌شود و احتراق به صورت مماسی رخ می‌دهد.



شکل ۲- آرایش قرارگیری مشعل‌ها در هر طبقه (احتراق مماسی) بویلر نیروگاه منتظر قائم [۳]

در جدول ۱، دبی سوخت مصرفی و ظرفیت حرارتی هر مشعل برای میزان بازگردانی صفر درصد دود به بویلر می‌باشد. مقدار ناکس متوسط مشعل‌های موجود براساس نتایج تست کارایی بویلر ۱۰۳ ppm می‌باشد.



شکل ۳- ظرفیت دبی سوخت مشعل‌های نیروگاه منتظر قائم [۳]

برای کنترل احتراق در بویلر، زاویه مشعل‌ها قابلیت تغییر دارد. تغییر زاویه و عمل تنظیم توسط منحرف کننده‌های مسیر هوا<sup>۳</sup> از نوع متحرک و نازل سر مشعل انجام می‌گیرد. همچنین حداکثر تغییرات زاویه  $\pm 30^\circ$  در جهت بالا و پایین است.



شکل ۱- ساختار و سیستم تیلت مشعل‌های گاز نیروگاه منتظر قائم [۳]

بر اساس نتایج تست کارایی بویلر، درصد هوای اضافی جهت احتراق سوخت گاز طبیعی در حدود ۱۶ درصد و دمای متوسط خروجی کوره (ورودی سوپرهیتر ثانویه) ۱۲۰۳ درجه سانتیگراد می‌باشد. به دلیل ورود هوای اضافی بیشتر از مقدار طراحی (۷ درصد)، راندمان بویلر نسبت به مقدار طراحی کمتر است زیرا بخش اعظمی از انرژی احتراق صرف گرم کردن هوای اضافی می‌شود. از سوی دیگر به دلیل اینکه مقدار هوای اضافی، بیشتر از مقدار مورد نیاز است، مقدار ناکس خروجی بویلر در شرایط فعلی در محدوده مجاز از لحاظ زیست‌محیطی قرار دارد. درحالی‌که با استفاده از مشعل‌های کم ناکس و سیستم کنترل مشعل، می‌توان همزمان مقدار هوای اضافی را کنترل کرد و مقدار آلاینده‌ها را نیز کاهش داد. به این ترتیب سوخت کمتری مصرف می‌شود و راندمان بویلر افزایش می‌یابد.

مشعل‌های گازی موجود نیروگاه از نوع نازلی می‌باشند. برای بدست آوردن ظرفیت حرارتی هر مشعل، به مقدار دبی و ارزش حرارتی سوخت نیاز است. شکل ۳ ظرفیت مشعل‌های گازی موجود با قطر نازل برابر با  $\frac{7}{16}$  اینچ نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با کاهش فشار دوطرف نازل، مقدار دبی سوخت گذرنده از مشعل کاهش می‌یابد [۳].

<sup>3</sup> Deflector

## ۲. مدلسازی عددی کوره و تحلیل نتایج

شایان ذکر است که کلیه شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت ویرایش ۱۶ بر روی سیستم پردازش موازی دارای ۱۶ هسته انجام پذیرفته است و میزان باقی‌مانده در شرایط همگرایی برای تمامی متغیرها کمتر از ۵- ۱۰ می‌باشد. برای مرزهای ورودی هوا با توجه به میزان دبی تأمینی F.D. فن‌ها و فرض تقسیم یکنواخت و یکسان دبی بین ورودی‌های هوا، میزان هوای ورودی بر اساس جرم مشخص در نظر گرفته شده است. میزان دبی در نظر گرفته شده برای دو حالت به ترتیب  $162 \text{ (kg/sec)}$  و  $176 \text{ (kg/sec)}$  می‌باشد که بر اساس داده‌های موجود و همچنین شبیه‌سازی‌های ترمودینامیکی در نظر گرفته شده‌اند. دمای هوای ورودی به کوره نیز با توجه به کارکرد ژانگسترم محدوده‌ای بین ۱۵۰ تا ۲۶۶ درجه‌سانتی‌گراد را دارد. مشعل‌ها در شبیه‌سازی بر اساس شرط مرزی ورود گاز طبیعی در نظر گرفته شده‌اند. میزان گاز ورودی بر اساس داده‌های در اختیار داشته برابر با  $9/1 \text{ (kg/sec)}$  می‌باشد. به منظور تحلیل فرآیند احتراق در بویلر نیروگاه چهار حالت کاری مطابق با جدول در نظر گرفته شده است. شرایط طراحی اولیه بویلر، شرایط کاری موجود، شرایط تغییرات پیش‌بینی شده به منظور بهبود عملکرد (حالات ۳ و ۴) به عنوان چهار حالت کاری مختلف در نظر گرفته شده‌اند.

نتایج نشان می‌دهد که میزان دمای ورودی به ناحیه سوپر هیترها برای حالت اول در حدود ۱۵۱۲ کلوین، حالت دوم ۱۵۲۰، حالت سوم ۱۵۴۰ کلوین و حالت چهارم ۱۵۲۳ کلوین می‌باشد. لذا کاهش تیلت و یا کاهش میزان هوای ورودی در شرایط حاضر، باعث افزایش دمای هوای ورودی به ناحیه سوپر هیترها می‌گردد. لازم به ذکر است مقدار دمای خروجی کوره در حالت چهارم (شرایط حاضر کارکرد بویلر) انطباق مناسبی (خطای ۴ درصد) با نتایج تجربی اندازه‌گیری شده دارد که مایه دقت مناسب نتایج شبیه‌سازی عددی می‌باشد.

بویلر نیروگاه منتظر قائم از نوع درام‌دار با گردش طبیعی می‌باشد. در بخش کوره، دوازده عدد مشعل که در سه ردیف چهار تایی نصب شده‌اند وظیفه احتراق را بر عهده دارند. مشعل‌ها قابلیت سوزاندن مازوت (به عنوان سوخت پایه) و همچنین گاز (به عنوان سوخت ثانویه) را دارا می‌باشند. با توجه به مباحث زیست محیطی و عدم استفاده از سوخت مازوت، سوخت گاز به عنوان سوخت پایه برای بویلر انتخاب گردیده است. نوع سوخت، میزان هوای مورد نیاز برای احتراق، میزان آلاینده‌ها در خروجی بویلر و همچنین کنترل دمای سوپرهیترها، تعیین‌کننده زاویه مشعل‌ها هستند. مشعل‌ها قابلیت تغییر زاویه بین  $30^\circ \pm$  درجه را دارا هستند. این زاویه از سطح افق اندازه‌گیری می‌گردد. با توجه اطلاعات موجود بویلر، هندسه کوره به همراه مشعل‌های گاز به صورت سه‌بعدی مدلسازی گردیده است. مدل سه بعدی کوره بویلر به همراه جانمایی مشعل‌های گازی در شکل نشان داده شده‌اند.

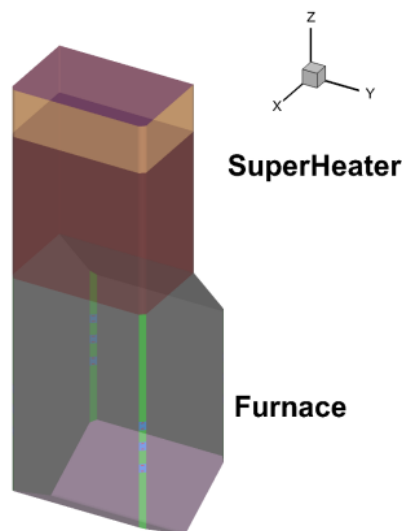
با توجه به پیچیدگی فرآیندهای سیالاتی روی داده در کوره بویلر، تنها بخش گاز و احتراق بویلر برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی احتراق در محفظه کوره از مدل انتقال گونه‌ها استفاده شده است. گونه‌های در نظر گرفته شده در گاز طبیعی ورودی شامل متان، اتان و پروپان می‌باشد که برای هر گونه یک معادله واکنش شیمیایی بر اساس ضرایب استوکیومتری در نظر گرفته شده است. به منظور افزایش دقت شبیه‌سازی‌ها از مدل خواص متغیر با دما (خصوصاً ظرفیت گرمایی در فشار ثابت متغیر) بهره گرفته شده است. جریان آشفته درون کوره نیز با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد انجام شده است. مدلسازی فرآیند انتقال حرارت تشعشی نیز با استفاده از مدل  $P1$  انجام شده است.

جدول ۱- اطلاعات مشعل‌های گاز موجود نیروگاه متظرقائم [۳]

۱۵۶۶۷	توان ناخالص خروجی (kWe)
۴۵۳۷۲	انرژی سوخت ورودی بر حسب HHV (kJ/s)
۳۷/۸۱	ارزش حرارتی بالا سوخت HHV ( $\text{MJ/m}^3$ )
۰/۷۵	ظرفیت هر مشعل (kg/s)
۳۷/۸۱	ظرفیت حرارتی هر مشعل (MW)

حرارت را افزایش خواهد داد. مقادیر میانگین تولید آلاینده در خروجی کوره برای هر چهار حالت کاری در جدول ۴ ارائه گردیده است. افزایش میزان هوای اضافی احتراق باعث کاهش دمای شعله و دمای میانگین کوره گردیده است و میزان ناکس را کاهش داده است (حالت ۲). اگرچه برای شرایط کاری حالت ۴ میزان توان حرارتی بویلر افزایش پیدا کرده، اما میزان تولید ناکس نیز به شدت بالاتر رفته است.

مقادیر دما برای یک صفحه عمودی گذرنده از میانه بویلر برای حالات مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. نواحی ماکزیمم دما و همچنین جبهه شعله به خوبی در این اشکال مشخص است. با توجه به سبک بودن محصولات احتراق ناشی از گاز طبیعی شعله تمایل به زبانه کشیدن به نواحی فوقانی بویلر را دارد. کاهش هوای اضافی احتراق از حالت ۲ به حالت ۳ باعث افزایش دمای بویلر گردیده است. افزایش دما شانس افزایش مقادیر آلاینده‌ها در خروجی بویلر را افزایش خواهد داد اما از سوی دیگر میزان حرارت منتقل شده به مجموعه واتروال‌ها افزایش پیدا خواهد کرد.



شکل ۴- مدل هندسی سه بعدی بویلر و کوره

جدول ۲- حالت‌های مختلف در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی

حالت شماره	حالت شماره	حالت شماره	حالت شماره	واحد	
۴	۳	۲	۱	kg/sec	دبی سوخت گاز
9.1	9.1	9.1	9.1	kg/sec	دبی هوای ورودی به کوره
162	162	176	162	°C	دمای هوای ورودی
266	150	190	150	°C	دمای دیواره کوره
366	366	355	366	Deg	زاویه تیلت مشعل
-30	-15	-15	-30	%	درصد هوای اضافی
7	7	16	7		

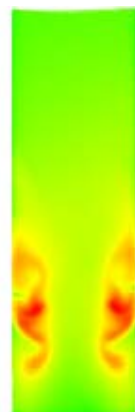
جدول ۳- مقادیر نرخ انتقال حرارت برای حالات مختلف کارکرد بویلر

حالت شماره	حالت شماره	حالت شماره	حالت شماره	واحد	
۴	۳	۲	۱	MW	نرخ انتقال حرارت تشعشی
142	127.2	118.7	131.5	MMW	نرخ انتقال حرارت جابجایی
36.3	29.2	32.1	33.1	MW	نرخ انتقال حرارت کل
178.3	156.4	150.8	164.6	%	نسبت انتقال حرارت جابجایی به کل
20	18.6	21.2	20		

جدول ۴- مقادیر نرخ تولید آلاینده ناکس برای حالات مختلف کارکرد بویلر

حالت شماره	حالت شماره	حالت شماره	حالت شماره	واحد	
۴	۳	۲	۱	ppm	میزان آلاینده ناکس
240	118	108	122		

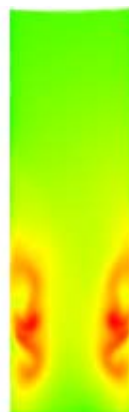
میزان تولید حرارت جذب شده توسط مجموعه واتروال‌ها برای هر چهار حالت کاری بویلر در جدول ارائه گردیده است. ماکزیمم میزان جذب حرارت برای زاویه تیلت ۳۰ درجه و میزان هوای اضافه ۷٪ در بویلر با افزایش دمای هوای ورودی به کوره (حالت ۴) روی می‌دهد. کاهش زاویه تیلت باعث کاهش میزان حرارت دریافتی واتروال‌ها در حدود ۸ مگاوات و افزایش میزان هوای اضافه جهت احتراق باعث کاهش حرارت دریافتی در حدود ۱۴/۶ مگاوات خواهد شد. در صورتی که راندمان تولید برق از حرارت جذب شده در کوره در حدود ۳۰٪ فرض گردد کاهش زاویه تیلت ۲/۵ مگاوات و افزایش هوای اضافی احتراق ۴/۵ مگاوات از توان الکتریکی تولیدی را کاهش خواهد داد. افزایش دمای هوای ورودی به بویلر باعث افزایش میزان توان تولیدی کوره گردیده است (حالت ۴). اگرچه سهم انتقال حرارت جابجایی در مقایسه با انتقال حرارت تشعشی پایین است، اما افزایش زاویه تیلت مدت زمان ماند جریان و به تبع آن میزان نرخ انتقال



Temperature (K)



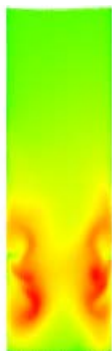
ب) حالت ۲ (زاویه تیلت ۱۵ درجه، هوای اضافه ۱۶٪)



Temperature (K)



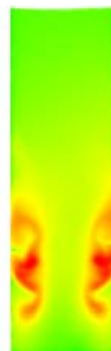
الف) حالت ۱ (زاویه تیلت ۳۰ درجه، هوای اضافه ۷٪)



Temperature (K)



د) حالت ۴ (زاویه تیلت ۳۰ درجه، هوای اضافه ۷٪)



Temperature (K)



ج) حالت ۳ (زاویه تیلت ۱۵ درجه، هوای اضافه ۷٪)

شکل ۵- کانتور دما در صفحه عمودی میانه بویلر

جدول ۵- مشخصات مشعل‌های جدید مورد نیاز

مشخصات مشعل‌های مورد نیاز	
نوع مشعل	مشعل کم ناکس راندمان بالا مطابق با استاندارد NFPA85*
سوخت مشعل	سوخت اصلی گاز، سوخت جایگزین مازوت و سوخت راه‌انداز گازوئیل
ظرفیت حرارتی کل مشعل‌ها	48 مگاوات
تعداد مشعل‌ها	۱۲ عدد با قابلیت تیلت ۳۰ ± درجه
میزان هوای اضافی	سوخت گاز ۷٪ - سوخت مازوت ۵٪
ناکس	حداکثر ppm ۵۰ به ازای ۱/۵ درصد اکسیژن اضافی
قطر دهانه مشعل	حداکثر ۰/۵ متر و منطبق با ابعاد بویلر و فضای موجود جهت نصب مشعل‌ها
ابعاد شعله	سازگار با ابعاد و نوع بویلر جهت ایجاد الگوی احتراق مماسی و جریان مناسب
حداکثر افت فشار هوای مشعل	۱ کیلو پاسکال
حداقل نسبت کاهندگی ظرفیت مشعل	4:1

منابع

[1] <http://www.saacke.com>

[2] Hao,zhou, Tao, Ren, Yan, Huang, Shantao, Hu, Kefa, Cen "Low-NOx Modification of a Heavy Fuel Oil Swirl Burner Based on Semi-Industrial Scale Experimental Tests", Energy Fuels, Vol. 29, pp 5029-5035, 2013

[۳] کتاب "نیروگاه بخاری متتظرقائم"، میر مشکوه مجتبیایی، ۱۳۸۲.

۳. جمع بندی و نتیجه گیری

باتوجه به نتایج ارائه شده در بخش دوم پارامترهای اصلی موثر در جهت دستیابی به بار نامی بویلر واحد ۴ نیروگاه متتظرقائم با مصرف ۱۰۰٪ سوخت گازی به شرح زیر مشخص شده است.

۱. مطابق نتایج شبیه‌سازی عددی انجام شده، با افزایش میزان تیلت تا ۳۰- درجه، میزان حرارت دریافتی در کوره و به تبع آن میزان توان تولید بخار نیز افزایش پیدا خواهد کرد. لذا با توجه به محدودیت‌های کاری، زاویه تیلت ۳۰- درجه پیشنهاد گردیده است. در زاویه تیلت ۳۰- درجه نسبت به ۱۵- درجه، همانطور که در مقاله اشاره گردیده است، گردابه احتراقی دوار در نزدیکی کف کوره تشکیل خواهد شد که میزان زمان ماند جریان را در کوره افزایش می‌دهد و به تبع آن میزان توان نامی نیروگاه را افزایش خواهد داد. بایستی به این نکته اشاره نمود که جبهه شعله در زوایای تیلت بیشتر در ارتفاع پایین‌تر قرار دارد. ضمناً "میزان هوای اضافی مناسب ۷ درصد می‌باشد.

۲. مشعل‌های موجود واحد به لحاظ راندمان و احتراق، از وضعیت مناسب و بهینه‌ای برخوردار نبوده و پیشنهاد می‌گردد با مشعل‌های پر بازده و کم ناکس جایگزین گردند. مشخصات مشعل‌های کم ناکس مورد نیاز برای بالابردن راندمان حرارتی بویلر در جدول ۵ ارائه شده است.

۳. به منظور اطمینان از عملکرد مطمئن و بلند مدت، سطوح حرارتی بویلر بویژه سوپرهیتر ثانویه و ری هیتر، می‌بایست با توجه به مشخصات فنی مشعل جدید انتخابی از لحاظ دمایی مجاز کاری (دمای فلز)، مورد بازبینی مجدد قرار گرفته و در صورت نیاز نسبت به تعدیل آن‌ها (از لحاظ میزان سطح تبادل حرارت و جنس لوله) اقدام لازم به عمل آید.