

افزایش راندمان احتراق در بویلرهای نیروگاهی از طریق تنظیم هوای اضافی

امیر سهرابی کاشانی^۱

پژوهشگاه نیرو

asohrabi@nri.ac.ir

چکیده

بررسی عملکرد احتراق در بویلرهای نیروگاهی یکی از مباحث مهم در تعیین تلفات انرژی خروجی از دودکش یک نیروگاه حرارتی می باشد. عوامل موثر در وضعیت عملکرد احتراق در بویلرهای متاثر از پارامترهای متعددی می باشد که در این مقاله، مورد بحث و بررسی قرار می گیرد. در این تحقیق در ابتدا به عملکرد احتراق در یک بویلر نیروگاهی در قالب محاسبات مربوط به موازنۀ های انرژی و مواد در واکنشها و میزان هوای مورد نیاز احتراق در شرایط ایده ال و واقعی پرداخته می شود. پس از آن به اختصار به وضعیت موجود احتراق در بویلرهای نیروگاههای کشور از نظر تنظیم هوای مورد نیاز احتراق اشاره می گردد. بررسی تلفات انرژی در بویلرهای نیروگاهی به ویژه تلفات ناشی از عدم تنظیم نسبت هوا به سوخت از مهمترین مباحثی است که در این مقاله مطرح می شود. در انتهای راهکارهای مناسب بمنظور کاهش تلفات انرژی از دودکش از طریق تعیین شرایط بهینه احتراق در بویلر ارائه می گردد.

واژه های کلیدی: احتراق، بویلر، تلفات انرژی، نیروگاه، دودکش.

۱- مقدمه

امروزه بیش از ۹۵٪ انرژی مصرفی جهان از راه احتراق فراهم می شود. با وجود پژوهش‌های روز افزون برای دستیابی به انرژیهای جانشین، اما در سده های آینده نیز احتراق، به ویژه در نیروگاههای حرارتی که یکی از منابع مهم تولید انرژی الکتریکی در جهان می باشد، اهمیت خود را حفظ خواهد کرد.

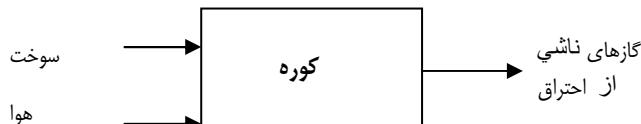
از آنجا که ذخیره سوختهای فسیلی رو به اتمام است این سوختها پیوسته گرانتر می شوند و ناگزیر می باشند به منابع دیگری روی آورد که دسترسی به آنها دشوارتر است. از این رو انجام فرایند احتراق با بازدهی هر چه بیشتر از اهمیت ویژه ای بر خوردار می گردد. بنا براین ملاحظه می گردد که بررسی فرایندهای احتراق یک موضوع مهم و گسترش یافته علمی است و پیشرفت تکنولوژی در دهه گذشته بازتاب این حقیقت بوده است. پدیده های احتراق، از تاثیر فرایندهای شیمیایی و فیزیکی ناشی می شوند، به طوری که کاربردهای آن از دامنه دانشگاهی فیزیک و شیمی فراتر رفته و دانشگاهی کاربردی دیگر مانند آئرودینامیک و مهندسی مکانیک را در بر می گیرد. فرایندهای فیزیکی که در احتراق دیده می شوند در اساس آنها یعنی هستند که از انتقال جرم و انرژی پدید می آیند. گرما رسانایی، پخش گونه های شیمیایی، و جریان توده ای گازها همگی پیامدهای آزاد شدن انرژی شیمیایی در یک واکنش گرمای زای می باشد و از برهمکنش این فرایند هاست که پدیده احتراق به وجود می آیند [۱].

از طرفی یکی از سیالاتی که به مقدار زیادی در نیروگاهها و دیگر صنایع برای انتقال انرژی حاصل از احتراق به توربین از آن استفاده می شود، بخار است. نیروگاهها از جمله صنایعی هستند که به طور وسیعی از بخار استفاده می کنند. طبق گزارش

انجمن بازیافت انرژی آمریکا، در این کشور در سال ۱۹۹۵ مجموعاً $10^{15} \times 55$ بی تی یو انرژی به صورت گرم کردن، تولید توان و الکتریسیته مصرف شده که از این مقدار دو سوم آن صرف تولید بخار شده است که معادل $10^{15} \times 34$ بی تی یو می باشد. با توجه به پر هزینه بودن تولید بخار و ارزش اقتصادی آن از حیث انرژی، بهینه سازی عملکرد بویلر در تولید بخار از مواردی است که در بحث بازیافت و صرفه جویی انرژی در الویت بررسی قرار دارد. از آنجایی که یکی از مهمترین تجهیزاتی که در شبکه تولید بخار در اکثر صنایع از جمله نیروگاهها مورد استفاده قرار می گیرد، بویلرهای هستند، بررسی و تحلیل و همچنین بهینه سازی عملکرد احتراق آنها از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد [۶].

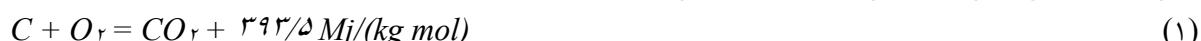
۲- احتراق در محفظه کوره بویلر

احتراق یک سوخت، تبدیل شیمیایی سوخت به محصولات احتراق همراه با آزاد سازی انرژی حرارتی ناشی از آن می باشد. اجزای محترقه یک سوخت گازی یا مایع، مثل کربن، هیدروژن، گوگرد و نیتروژن توسط واکنشهای شیمیایی گرمایش با اکسیژن هوای احتراق در می آمیزند. محصولات احتراق شامل گازهای دوکش و باقیمانده های جامد از احتراق سوختهای مایع و جامد می باشند. گازهای دودکش حاوی ترکیبات آلوده کننده زیان آور مثل اکسیدهای گوگرد، اکسیدهای نیتروژن، منو اکسید کربن، دی اکسید کربن و بخار آب هستند. که البته بخار آب نیز از جمله گازهای آلوده کننده و زیان آور بشمار نمی رود. معادلات استوکیومتری تشریح ساده ای از واکنشهای احتراق کامل اجزای قابل احتراق سوخت با اکسیژن را بهمراه موازن موارد و واکنشها بر مبنای مولی یا جرمی ارائه می کنند. شکل (۱) شماتیکی از فرایند احتراق را نشان می دهد.



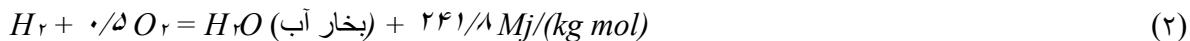
شکل ۱- شماتیکی از فرایند احتراق

واکنش اکسیداسیون کربن با اکسیژن به دی اکسید کربن عبارت است از:



$$\begin{aligned} 1 \text{ kg mol } C + 1 \text{ kg mol } O_2 &= 1 \text{ kg mol } CO_2 \\ 12 \text{ kg } C + 32 \text{ kg } O_2 &= 44 \text{ kg } CO_2 \end{aligned}$$

به طور مشابه برای احتراق هیدروژن نیز داریم:



$$\begin{aligned} 1 \text{ kg mol } H_2 + 0.5 \text{ kg mol } O_2 &= 1 \text{ kg mol } H_2O \\ 2/0.16 \text{ kg } H_2 + 16 \text{ kg } O_2 &= 1/0.16 \text{ kg } H_2O \end{aligned}$$

به طور مشابه داریم:



$$\begin{aligned} 1 \text{ kg mol } S + 1 \text{ kg mol } O_2 &= 1 \text{ kg mol } SO_2 \\ 32 \text{ kg } S + 32 \text{ kg } O_2 &= 64 \text{ kg } SO_2 \end{aligned}$$

سوختهای گازی حاوی اجزای قابل احتراق از قبیل C_4H_{10} , C_3H_8 , C_2H_6 , C_nH_m , H_2 , CO , CH_4 شامل هستند. معادلات استوکیومتری برای احتراق سوختهای گازی بر مبنای مولی نوشته می شوند. راحترا این است که ۱۰۰ مول از سوخت در نظر گرفته شود. سپس تعداد مولهای واکنش گرما و محصولات، به ترتیب برابر با درصد حجمی اجزای سوخت و محصولات احتراق هستند.

معادلات استوکیومتری زیر بر مبنای مولی را برای احتراق هیدروژن، منواکسید کربن، متان و هیدرو کربنهای بالاتر می‌توان نوشت:



$$1 mol + \frac{1}{2} mol = 1 mol$$



$$1 mol + \frac{1}{2} mol = 1 mol$$



$$1 mol + 2 mol = 1 mol + 2 mol$$



$$1 mol + (n + m/4) mol = n mol + m/2 mol$$

- هوای تئوری لازم:

مقدار حداقل هوای لازم برای احتراق کامل یک واحد جرم سوخت، هوای تئوری یا هوای استوکیومتری است. این هوای می‌توان بر اساس جرم یا مول محاسبه کرد. مبنای جرم برای سوختهای جامد و مایع و مبنای مولی برای سوختهای گازی ترجیح داده می‌شوند. نسبت جرم هوای احتراق به جرم سوخت، نسبت هوای به سوخت نامیده می‌شود:

$$AF = m_{\text{سوخت}} / m_{\text{هوای سوخت}} \quad (8)$$

بر مبنای روابط استوکیومتری - یعنی معادلات (۱) و (۲) و (۳) نسبت هوای به سوخت تئوری بر حسب kg هوای خشک بر kg سوخت به صورت زیر داده می‌شود:

$$AF_t = 1/0.232[2/67C + 1/94H + S - O] = 11/49C + 34/22H + 4/31(S - O) \quad (9)$$

که در آن C, H, O, S کسرهای جرمی در تجزیه و تحلیل نهایی سوخت جامد یا مایع هستند. حجم تئوری هوای خشک لازم برای سوزاندن ۱kg سوخت جامد یا مایع عبارت است از :

$$V_{a,t} = AF_t / \rho_{\text{هوای تئوری}} \quad (m^3/kg) \quad (10)$$

که در آن ρ دانسیته هوای در شرایط استاندارد (۰°C, ۱۰۱/۳ kPa) و برابر با $1/293 kg/m^3$ است. تعداد مولهای تئوری اکسیژن لازم برای احتراق کامل 100 مول سوخت گازی از معادله استوکیومتری داده شده در بالا محاسبه می‌شود و با ضرب در نسبت $21/476 \div 100$ هوای تئوری لازم بدست می‌آید:

$$AF_{t,m} = 4/76 [1/5(H_2 + CO) + 2CH_4 + (n + m/4)C_nH_m - O_2] \quad (11)$$

که در آن $H_2, CO, CH_4, C_nH_m, O_2$ به ترتیب کسر مولی هیدروژن، منواکسید کربن، متان، هیدرو کربنهای بالاتر، و اکسیژن در سوخت گاز هستند. در شرایط استاندارد کسر (مول سوخت/مول هوای برابر با کسر (حجم سوخت/حجم هوای) می‌باشد. فرض بر این است که H_2S در سوخت گاز موجود نیست.

- نسبت هوای اضافی:

برای رسیدن به احتراق کامل باید یک مقدار هوای اضافی علاوه بر مقدار تئوری فراهم شود. نسبت هوای به سوخت واقعی AF_a معمولاً بر حسب نسبت هوای اضافی یا درصد هوای اضافی بیان می‌گردد. از تقسیم نسبت هوای به سوخت واقعی AF_a بر نسبت هوای به سوخت تئوری AF_t (استوکیومتری)، نسبت هوای اضافی (ضریب رقیق بودن) λ تعریف می‌شود:

$$\lambda = AF_a / AF_t \quad (12)$$

درصد هوای اضافی به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\text{نسبت هوای اضافی} = \frac{100}{\lambda - 1} \quad (13)$$

نسبت هوای اضافی λ بستگی به مشخصه های سوخت، طراحی کوره و نوع مشعل دارد. بنابراین λ برای سوخت گازی $1/10^3$ بوده در حالی که برای سوخت مایع بین $1/6$ و $1/3$ قرار دارد. در جایی که در محفظه های احتراق توربین گاز می تواند حتی بالاتر (حدود ۴) باشد. نسبت هوای اضافی واقعی در یک کوره را می توان از تجزیه و تحلیل گاز دودکش آن تعیین کرد.

- هوای واقعی لازم:

نسبت هوای خشک به سوخت واقعی عبارت است از :

$$AF_a = \lambda AF_t \quad (14)$$

نسبت هوای تر به سوخت واقعی که بخار آب موجود در هوای اتمسفر در نظر گرفته می شود برابر است با:

$$AF_{a,w} = \lambda AF_t (I + w) \quad (15)$$

که در آن w نسبت رطوبت یا جرم بخار آب در واحد جرم هوای خشک است. حجم هوای خشک و مرتبط فراهم شده برای کوره به صورت زیر داده می شود:

$$V_a = \lambda AF_t / \rho_{هوای} \quad (16)$$

$$V_{a,w} = \lambda AF_t (I / \rho_{هوای} + w) \quad (17)$$

که در آن ρ هوا و ρ آب به ترتیب دانسیته هوا و بخار آب برابر با $1/293 \text{ m}^3/\text{kg}$ و $1/804 \text{ m}^3/\text{kg}$ در شرایط استاندارد می باشد. نسبت هوای اضافی AF_a/AF_t در سوختهای مایع و گازی به کار گرفته می شود تا تفاوت بین مخلوطهای سوخت و هوای رقیق و غنی مشخص شود. اگر این نسبت کمتر از یک باشد، مخلوط غنی و در غیر این صورت رقیق نامیده می شود.

- محصولات احتراق:

محصولات احتراق کامل یک سوخت، حاوی $\text{O}_2, \text{N}_2, \text{SO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{CO}_2, \text{NO}_2$ است. وقتی احتراق غیر کامل صورت پذیرد، گاز دودکش همچنین حاوی CO و هیدروکربنهای نسوخته است. از معادلات استوکیومتری، معادلات (۱) تا (۷)، مقدار اجزای گاز دودکش را می توان محاسبه کرد. سپس جرم هر جز برای احتراق کامل یک سوخت جامد یا مایع از معادلات استوکیومتری یعنی معادلات (۱) تا (۳) به دست می آید و سپس حجم از تقسیم جرم بر دانسیته حاصل می شود. جرم و حجم اجزای گاز دودکش برای احتراق استوکیومتری یک سوخت جامد یا مایع در جدول (۱) آمده است. حجم کلی نیتروژن در گاز دودکش برابر است با:

$$V_{N2} = 0.4N + 0.79V_a \quad (\text{m}^3/\text{kg})$$

حجم کلی بخار آب با در نظر گرفتن رطوبت هوای محیط برابر است با:

$$V_{H2O} = 1.11H + 1.24M + 1.24w\lambda AF_t \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (18)$$

جدول (۱) جرمها و حجمها اجزای گاز دودکش برای احتراق استوکیومتری سوخت جامد و مایع

محصولات احتراق		اکسیژن تئوری	جزیه و تحلیل نهایی بر مبنای شرایط سوختی
m^3/kg	kg/kg	kg/kg	
$1/867C$	$3/67C$	$2/67C$	C
$11/11H$	$8/94H$	$7/94H$	H
$0/68$	S	S	S
$0/8 N$	N	-	N
-	-	O	O
$1/24M$	M	-	رطوبت (M)

حجم اکسیژن در گاز دودکش برابر است با:

$$V_{O_2} = \frac{w}{2(\lambda-1)V_a} \quad (m^3/kg)$$

در این جا λ نسبت هوای اضافی (ضریب رقیق بودن)، w نسبت رطوبت هوای احتراق برحسب (kg/kg) ، و V_a حجم هوای واقعی برای هر kg سوخت است. تعداد مولهای اجزای گاز دودکش را نیز می توان از تعداد مولهای n عنصر N,O,S,H,C در هر kg سوخت از تجزیه و تحلیل نهایی آنالیز سوخت محاسبه کرد. موازنۀ مولی هر عنصر در سوخت و در گاز دودکش تعداد مولهای گاز دودکش را مشخص می نماید.

حجم گازی زیر (بر حسب m^3/m^3 سوخت گاز در شرایط استاندارد) در احتراق کامل سوخت گازی با هوای اضافی (برای ۱< λ >) تشکیل می شود.[۵]

$$V_{CO_2} = CO_r + CO + CH_r + nC_nH_m \quad (20)$$

$$V_{N_2} = N_r + \frac{n}{\lambda} AF_{t,m} \quad (21)$$

$$V_{O_2} = \frac{w}{2(\lambda-1)} AF_{t,m} \quad (22)$$

$$V_{H_2O} = H_r + 2CH_r + m/n C_nH_m \quad (23)$$

بنابراین حجم گاز تر دودکش از مجموع حجم تمام این اجزا به دست می آید:

$$V_g = V_{CO_2} + V_{NO_2} + V_{O_2} + V_{H_2O} \quad (24)$$

۳- وضعیت موجود احتراق در نیروگاهها

در تعدادی از نیروگاههای قدیمی هوای مورد نیاز احتراق برای مصارف مختلف سوخت یا بعبارت دیگر برای تولید مگاواتهای مختلف توسط منحنی هایی که شرکت های سازنده برای تنظیم احتراق بویلر تهیه نموده اند، تعیین می گردد. در این منحنی ها که از طرف شرکت سازنده ارائه می گردد مقادیر غلظت اکسیژن گازهای حاصل از احتراق نسبت به دامنه بار نیروگاه تعیین شده است . وظیفه اپراتور در اینگونه نیروگاهها، تنظیم دستی فرمان باز و بست دمپرهای دمنده های هوای ورودی به بویلر براساس تطابق مقادیر اکسیژن موجود در گاز خروجی و منحنی مشخصه می باشد. در اینگونه سیستمهای پس از گذشت زمان زیادی ، از حساسیت و دقت سنسورهای اکسیژن آنالایزر کاسته شده و مقدار صحیحی را نشان نمی دهد. علاوه بر این بدليل کهنگی مشعلها و فرسایش دیگر عوامل مکانیکی موثر در بهبود شرایط احتراق ، منحنی های توصیه شده از طرف شرکتهای سازنده کارایی خود را نداشته و در نهایت شرایط وضعیتی را مقتضی می نماید که اپراتور می بایستی بطور تجربی هوای مورد نیاز احتراق را تنظیم نماید. این کار بسته به تجربه کاری بهره برداران از طریق مشاهده وضعیت شعله و دود خروجی از دودکش های نیروگاه انجام می گیرد. در تعدادی دیگر از نیروگاهها، کنترل هوای مورد نیاز احتراق از طریق مدار کنترل احتراق صورت می پذیرد.

وظیفه سیستم کنترل احتراق ، تأمین بهینه هوای مورد نیاز برای حداکثر بازدهی احتراق در بویلر می باشد. سیگنال فرمان کنترلر حلقة احتراق توسط مدار اصلی سیگنال تقاضای بار تعیین می شود. کنترلر مربوطه با فرمان سیگنال بار و سیگنال مربوط به اکسیژن آنالایزر، سیگنال متناسب جهت تأمین اپتیمم هوای مورد نیاز احتراق را صادر می نماید . خروجی حلقة کنترل اصلی نقطه کار حلقة داخلی را مشخص می نماید. این سیگنال، میزان تقاضای دبی هوای ورودی به کوره است و با سیگنال دبی هوای محاسبه شده ، مقایسه و تفاوت آن دو وارد کننده حلقة داخلی می شود .

بدین ترتیب حلقة کنترل خارجی ، میزان هوای مورد نیاز را تعیین می کند و سیگنال هوای خروجی از فن دمنده هوای ورودی پس از تصحیح توسط کنترلر هوای اضافی ، باسیگنال هوای تئوری مقایسه و نهایتاً هوای موردنیاز بویلر برای احتراق کامل با درصد هوای اضافی طراحی شده ، کنترل کننده ، خروجی کنترل کننده ، پس از تبدیل به فرمان نیوماتیک و توسط بازوهای مکانیکی به دمنده هوای میرا کننده (سمت راست و چپ) همزمان اعمال می شود .

همانطور که قبلانیز ذکر گردید بر اثر گذشت زمان، سنسورهای سیستمهای اکسیژن آنالایزر حساسیت و دقت خود را از دست داده و سیگنالهای ارسالی به کنترلر از مقادیر واقعی منحرف شده و سیستم دچار خطا می‌گردد. در هر صورت در هنگامیکه تنظیم هوای مورد نیاز احتراق بعلی دچار اشکال گردد احتراق بویلر یا با هوای کمتر از اندازه یا با هوای بیش از اندازه انجام می‌گیرد.

- احتراق با هوای بیش از اندازه:

آنچه مسلم است با ورود بیش از حد هوای مورد نیاز احتراق در کوره و علی رغم کامل شدن احتراق (حداقل تشکیل) CO آن بخش از هوای اضافی که در واکنش احتراق سوخت داخلی نداشته از داخل شعله و کوره عبور نموده و بر اثر تماس مستقیم با محصولات احتراق قسمتی از انرژی گرمایی حاصل از واکنش را جذب نموده و دمای آن افزایش می‌یابد، به همین دلیل قسمتی از انرژی حرارتی بجای انتقال به واتروالها و سوپر هیترها از طریق دودکش به هوای محیط انتقال می‌یابد.

- احتراق با هوای کمتر از اندازه (احتراق ناقص) :

در هنگامی که هوای مورد نیاز جهت احتراق کامل در کوره تأمین نگردد (حتی در هنگامیکه هوا در حد استوکیومتری تأمین شود) اکسیژن لازم جهت اکسیداسیون تمامی کربن سوخت و تشکیل گاز دی اکسید کربن (CO_2) فراهم نشده و بخشی از آن به گاز منواکسید کربن (CO) و ذرات دوده تبدیل می‌گردد .

اگر از نظر انرژی تشکیل ، ملکولهای گاز دی اکسید کربن و منواکسید کربن را مقایسه نمائیم بدلیل پایداری بیشتر گاز دی اکسید کربن نسبت به گاز منواکسید کربن انرژی آزاد شده از واکنش تبدیل کربن به گاز دی اکسید کربن نسبت به واکنش تبدیل کربن به منواکسید کربن بیشتر می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با تولید گاز منواکسید کربن و دوده در واکنش احتراق سبب کاهش انرژی آزاد شده در کوره و افت راندمان آن می‌گردد [۷].

۴ - تلفات انرژی در بویلرها و کاهش آن

بویلرها از جمله تجهیزاتی هستند که برای تولید بخار در پالایشگاهها و صنایع شیمیایی بطور گستردگی ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به هزینه بر بودن تولید بخار و ارزش اقتصادی آن، بهینه سازی و بررسی عملکرد آنها از اهمیت ویژه ای برخوردار می‌باشد. بطور کلی تلفات انرژی در یک بویلر نیروگاهی از طریق اتلاف حرارت از بدنه، اتلاف انرژی حرارتی از طریق بلودان بویلر و اتلاف حرارت از دودکش می‌باشد [۶].

الف - اتلاف حرارت از بدنه :

اتلاف حرارت از بدنه ناشی از دو مکانیزم انتقال حرارت تشعشعی و جابجایی بوده که به علت بالاتر بودن دمای بدنه بویلر از دمای محیط ایجاد می‌شود. انتقال حرارت تشعشعی به محیط با توان چهارم بدنه و همچنین ضریب صدور سطح بستگی دارد. بنابراین با کاهش دمای بدنه می‌توان به میزان قابل ملاحظه ای اتلاف انرژی از این طریق را کاهش داد. انتقال حرارت جابجایی به محیط نیز به اختلاف دمای بدنه و محیط و سرعت باد وابسته می‌باشد. در مجموع کاهش اتلاف انرژی از بدنه تنها با کاهش دمای بدنه قابل دسترسی می‌باشد. مراجع مختلف دمای بدنه بویلرهای بزرگ را حدود $65/5$ درجه سانتیگراد پیشنهاد می‌کنند. لازم به ذکر است درصد اتلاف حرارت از بدنه بویلرهای بزرگ با توجه به نرم جهانی حدود $1/5$ درصد می‌باشد. [۶]

ب - اتلاف حرارتی بلودان بویلر:

آب تغذیه بویلرها شامل کندانسه‌ها و آب جبرانی می‌باشد. از آنجایی که در این آبها همواره مواد محلول و غیر محلول وجود دارد بمنظور جلوگیری از افزایش غلظت و بالا بردن کیفیت عملکرد بویلرها، لازم است مقداری از آب در گردش بویلر

تخلیه شود. معمولاً بلودان بویلرها بین ۱۵ - ۳ درصد ظرفیت بخار تولیدی را به خود اختصاص می‌دهد. تحقیقات نشان می‌دهد بویلرهایی که تخلیه اضطراری آن بیش از ۵ درصد نرخ تولید بخار آن باشد، برای نصب سیستم بازیافت انرژی از طریق تخلیه اضطراری مناسب هستند. بازیافت حرارت از آب تخلیه اضطراری از دیگر روشهای بازیافت انرژی بوده که از اهمیت ویژهای بر خوردار می‌باشد. با توجه به بالا بودن دمای آب تخلیه اضطراری، می‌توان با قرار دادن یک مبدل از این انرژی به منظور پیش گرم کردن آب جبرانی استفاده نمود. [۶]

ج - اقلاف حرارت از دودکش:

گازهای خروجی از دودکش یکی دیگر از مهمترین پتانسیل‌های بازیافت انرژی در بویلرها محسوب می‌شود. از آنجایی که گازهای خروجی از دودکش دارای دمای نسبتاً بالایی هستند، می‌توان از انرژی آنها برای گرم کردن آب تعذیه یا هوا و رودی به بویلر استفاده کرد. مطالعات نشان می‌دهد به ازای کاهش ۲۰ درجه سانتی گراد دمای گاز خروجی یک درصد به راندمان بویلر اضافه می‌شود. لازم به ذکر است پارامترهای محدود کننده میزان کاهش دمای گازهای خروجی از دودکش، دمای نقطه شبنم اسید سولفوریک می‌باشد. زیرا کاهش بیش از حد دما باعث ایجاد اسید سولفوریک شده و خوردگی تجهیزات را به دنبال خواهد داشت. یکی از عوامل مهم و موثر در تلفات ناشی از دودکش میزان درصد هوای اضافی در بویلر می‌باشد. در فرایند احتراق به دلیل چهار برابر بودن نسبت نیتروژن به اکسیژن، امکان بر خورد مناسب مولکول‌های سوخت با مولکولهای اکسیژن موجود در هوا نسبت به اکسیژن خالص کاهش می‌یابد. لذا جهت انجام فرایند احتراق به طور تقریباً کامل همانطور که در مباحث قبل به آن اشاره گردید باید هوای بیشتری نسبت به حالت استوکیو متری در فرایند احتراق وارد نمود. از طرفی افزایش بیش از اندازه هوای اضافی بدلیل جذب حرارت تولید شده در ناحیه کوره دمای آن افزایش یافته و بهمراه گازهای خروجی از دودکش به محیط منتقل می‌گردد بطوریکه باعث کاهش راندمان بویلر می‌شود. علاوه بر این افزایش هوای اضافی میزان اکسیژن فضای داخل بویلر را افزایش داده و به علت دمای بالا باعث خوردگی و خرابی زودرس قسمتهای داخلی آن می‌شود. [۶]

عملکرد یک بویلر نیروگاهی با ظرفیت حرارتی Q_b ، ظرفیت بخار m_s ، نرخ مصرف سوخت m_f ، و راندمان η_b مشخص می‌شود. ظرفیت حرارتی بویلر به عنوان گرمای خروجی مفید تعریف می‌شود و بر حسب کیلووات اندازه گیری می‌شود:

$$Q_b = m_s \Delta h_s + m_{rh} \Delta h_{rh} + m_{at} \Delta h_{at} + m_{bd} \Delta h_{bd} \quad (25)$$

که در آن m نرخ جریان جرم بخار یا آب در داخل بویلر و h تغییر آنتالپی بخار یا آب است. زیر نویسهای s, r, h, t, a, b به ترتیب مشخص کننده مولد بخار، بازگرم کننده، تنظیم کننده دما و خاموش کردن در یک نیروگاه هستند. ظرفیت بخار m_s نرخ تولید بخار در مولد بر حسب kg/hr است. مصرف سوخت بویلر به صورت زیر داده می‌شود:

$$m_f = Q_b / (HHV \eta_b) \quad (kg/s) \quad (26)$$

که در آن HHV مقدار ارزش حرارتی بالایی سوخت و η_b راندمان بویلر است. راندمان بویلر بر مبنای HHV سوخت برابر است با:

$$\eta_b = \frac{\text{انرژی ورودی کلی سوخت}}{\text{انرژی ورودی کلی اضافه شده به سیال}} \times 100 \quad (27)$$

یا:

$$\eta_b = \frac{\text{انرژی ورودی کلی سوخت}}{\text{انرژی ورودی کلی سوخت}} \times 100 \quad (28)$$

یا:

$$\eta_b = \frac{100}{(HHV - q)} \times 100 \quad (29)$$

اتلافهای کلی حرارت در بویلر شامل اتلاف گاز خشک (DGL)، اتلاف رطوبت (ML)، اتلاف رطوبت در هوای احتراقی (MCAL)، اتلاف احتراق ناکامل (ICL)، اتلاف کربن نسوخته (UCL) می‌باشد که اتلاف تشعشعی یا دیگر اتلافها در نظر گرفته نشده‌اند. اتلاف گاز خشک به صورت زیر داده می‌شود:

$$DGL = m_{dg} C_{pg}(t_g - t_a) \quad (kj/kg) \quad (30)$$

که در آن $m_{dg} = AF_{a,d} + 1 - R - M - 9H$ نسبت هواي خشک به سوخت واقعی بر حسب کيلو گرم گاز خشک دودکش در هر کيلو گرم سوخت، C_{pg} گرمای ويژه گاز خشک دودکش برابر با (kj/kgK) است. R کسر جرمی پس مانده در هر کيلو گرم سوخت، M کسر جرمی رطوبت در سوخت، H کسر جرمی هيدروژن در سوخت، t_f دمای گاز دودکش ترک كننده از بويلر، و t_a دمای هواي ورودی به بويلر است. اين کميت R که به داخل کوره وارد می شود، عبارت است از:

$$R = \frac{\text{جرم سوخت}}{\text{جرم پس مانده}} = A/A_f \quad (31)$$

که در آن A و A_f به ترتیب کسر جرمی خاکستر در سوخت و در پس مانده هستند. اتفاق رطوبت به صورت زیر داده می شود:

$$ML = (M + {}^9H) \Delta h_m \quad (kj/kg) \quad (32)$$

که در آن Δh_m تغییر آنتالپی ويژه رطوبت در سیستم بويلر است. اگر ${}^9H > tg$ باشد، داریم:

$$\Delta h_m = 2442 + 2/0.93t_g - 4/1.11t_f \quad (kj/kg) \quad (33)$$

اگر $tg < 300 C$ باشد:

$$\Delta h_m = 2493 + 1/926t_g - 4/1.11t_f \quad (kj/kg) \quad (34)$$

که در آن t_f دمای سوخت ورودی به سیستم بويلر است. رطوبت در اتفاق احتراق هوا بصورت زیر داده می شود:

$$MCAL = AF_{a,d}WC_{pw}(t_g-t_a) \quad (kj/kg) \quad (35)$$

که در آن w نسبت رطوبت هواي ورودی بويلر و C_{pw} گرمای ويژه بخار آب و معادل $1/926 kj/(kgK)$ است.

اتفاق احتراق ناکامل عبارت است از:

$$ICL = 23630C_b CO / (CO + CO_2) \quad (kj/kg) \quad (36)$$

که در آن $C_b = C_r - C_t$ جرم کربن نسوخته شده در جرم سوخت، C کيلوگرم کربن در کيلو گرم سوخت (تجزیه و تحلیل نهایی)، C_t کيلو گرم کربن نسوخته در هر کيلو گرم سوخت پس ماند اضافه شونده به کوره، CO و CO_2 غلظت اين ترکيبات در گاز خشک دودکش بر حسب درصد و طبق تجزیه و تحلیل آنالایزر دودکش می باشند. اتفاق کربن نسوخته برابر است با:

$$UCL = C_r HHV / C_b \quad (kj/kg) \quad (37)$$

ترم RUL بخاطر تشعشع و جابجایی از سطح خارجی بويلر به محیط اطراف و همچنین اتفاهاي گذرا، شامل اتفاهاي راه اندازي و خاموش کردن به وجود می آيد. مقدار RUL نسبتا کوچک است. بنابر اين راندمان بويلر با دانستن تمام اتفاها از معادله (29) تعیین می شود. [3]

۵- تنظیم هواي اضافي بويلر بمنظور کاهش تلفات دودکش

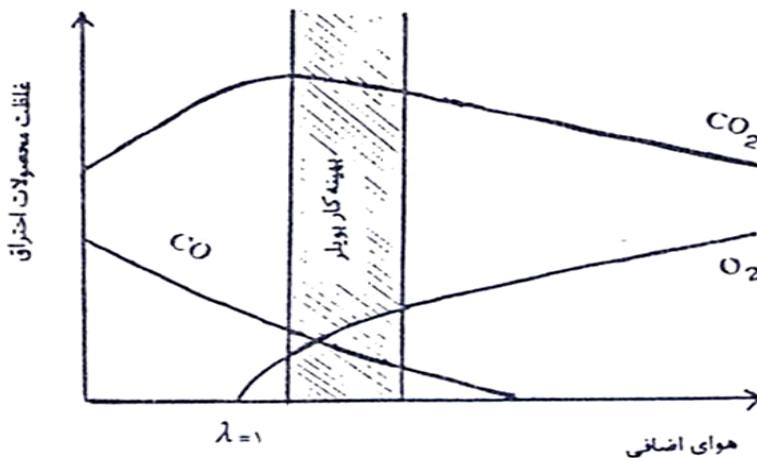
در شکل (۲) نمودار غلظتهای دی اکسید کربن، منواکسید کربن و اکسیژن بر حسب تغییرات میزان هواي اضافي رسم شده است.

همانطور که در اين شکل پيداست، محدوده بالاترين راندمان کار کوره مشخص شده است. اين محدوده مکاني است که بيشترین اختلاف غلظت ميان منحنی هاي دی اکسیدکربن و منواکسیدکربن و اکسیژن موجود است به عبارت ديگر محدوده کاري است که در آن غلظت دی اکسید کربن حداكتر و مقادير غلظت اکسیژن و منواکسید کربن در حداقل قرار دارند.

همانطور که در شکل (۲) مشاهده می شود محدوده هواي مصرفی در حالت بالاترين راندمان از مقدارهواي مصرفی در حالت استوکیومتری بيشتر و از حالتی که میزان منواکسید کربن به صفر می رسد کمتر می باشد.

به ازاي مقادير هواي اضافي بيش از محدوده بهينه کار کوره سبب افزایش تلفات انرژي حرارتی و به ازاي محدوده کمتر از آن، تلفات انرژي پتانسیل شیمیابی ناشی از خروج کربن و گاز منواکسید کربن افزایش می يابد.

منحنی فوق به ازای مصرف ثابت سوخت ترسیم شده است که میبایستی برای مصارف مختلف و یا به عبارت دیگر برای مگاواتهای مختلف بررسی گردد. جهت این امر می‌توان با نصب یک آنالایزر گازدودکش در مسیر گازهای خروجی از بویلر(قبل از پیش گرمکن های هوا) مقدار O_2, CO, CO_2 موجود در گازهای حاصل از احتراق را اندازه گیری نمود جهت رسم منحنی های مورد نیاز می بایستی از حداقل بار یا حداقل مصرف سوخت یک واحد شروع نمود. پس از ثابت شدن سوخت مصرفی و یا انرژی خروجی براحتی می توان با تغییرات هوا ای ورودی به کوره تغییرات غلظت گازهای فوق را بررسی ورسم نموده و محدوده هوا مصرفی برای وضعیت بهینه احتراق را مشخص نمود.



شکل ۲- منحنی غلظت گازهای حاصل از احتراق نسبت به تغییرات هوای اضافی در کوره

منحنی شکل (۳) نتایج حاصل از آنالیز انجام گرفته بر روی گازهای خروجی از بویلر یکی از نیروگاههای کشور را نشان می دهد.

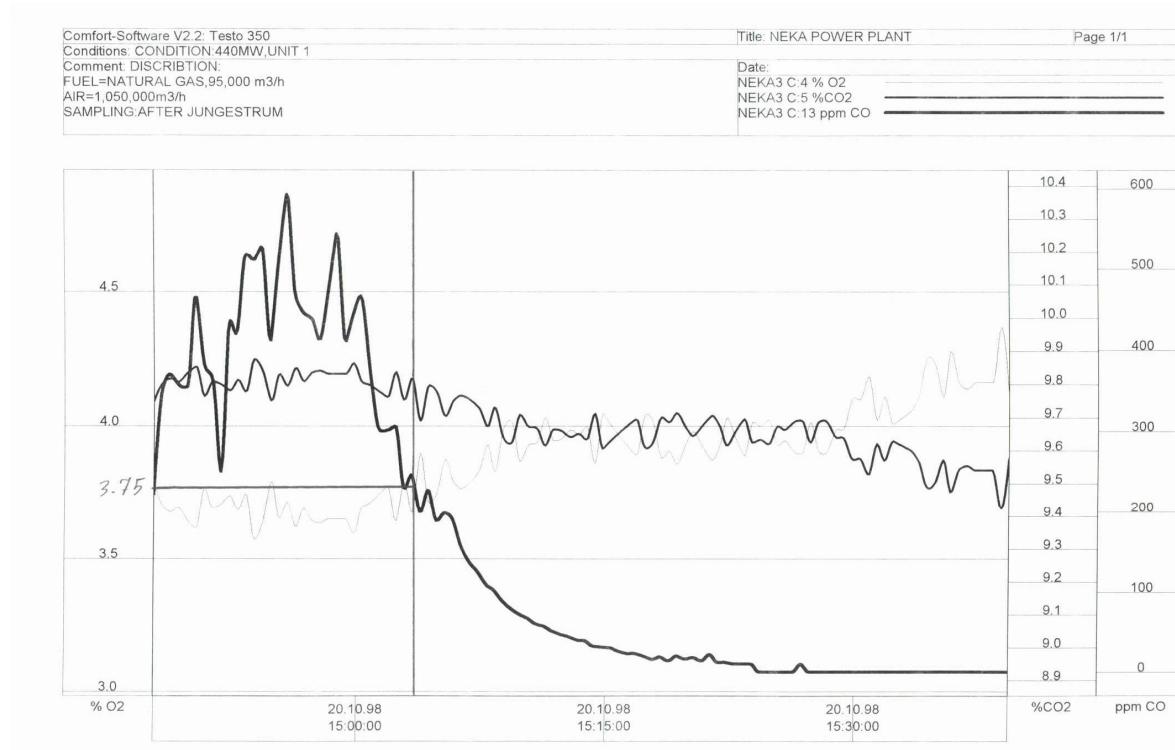
همانطور که در این منحنی نشان داده شده است با گذشت زمان دمپرهای هوای ورودی به فن های دمنده هوای بویلر بازتر شده و اکسیژن بیشتری به محفظه کوره وارد می گردد. با افزایش غلظت اکسیژن در کوره غلظت گاز CO نیز کاهش می یابد. این کاهش تا رسیدن به غلظت صفر ادامه می یابد. پس از اتمام گاز CO در محفظه کوره با افزایش هوای ورودی به کوره سبب رقیق شدن گاز CO_2 در محفظه کوره می گردد. همانطور که در منحنی شکل (۳) نشان داده شده است، خط عبوری از غلظت ۳/۷۵ درصد اکسیژن، منطقه بهینه کارکرد احتراق در بویلر را نشان می دهد. در غلظت کمتر از این مقدار اکسیژن، احتراق ناقص و در غلظت بیشتر از آن علاوه بر اتلاف حرارتی بیشتر از دودکش سبب افزایش آلاینده NO_x نیز می گردد که در هر صورت سبب کاهش راندمان احتراق در بویلر می گردد. این منحنی توسط نرم افزار دستگاه آنالایزر گازهای حاصل از احتراق ترسیم شده است که نوسانات ایجاد شده در آن ناشی از کوتاه بودن زمان ما بین اندازه گیری توسط دستگاه آنالایزر می باشد. [۷]

بطور کلی هدف اصلی در این مقاله تنظیم هوای اضافی در بویلر های نیروگاهی یا دیگر کوره های مشابه می باشد. رسم منحنی شکل (۳) تنها برای یک بویلر نیروگاهی انجام شده که با ثبت مداوم آنالایز گازهای خروجی نسبت به تغییرات هوای ورودی (با سوخت ثابت) در هر بویلر یا کوره دیگری در صنایع مختلف قابل انجام می باشد بنابراین هوای بهینه برای یک سوخت ثابت مشخص، و می توان برای مصارف دیگر سوخت نیز تعیین گردد.

بدین ترتیب بارسم منحنی های مختلف برای مصارف مختلف سوخت ، محدوده کار بهینه برای هر مگاوات مشخص و در نهایت می توان منحنی نسبت هوا به سوخت برای مگاواتهای مختلف را ترسیم و در اختیار بهره برداران قرار داد.

۶- نتیجه گیری

همانطور که در مباحث قبل به آن اشاره گردید اتلاف انرژی در یک بویلر نیروگاهی ناشی از عوامل متعددی می باشد که یکی از این عوامل میزان درصد هوای اضافی به بویلر می باشد. با تنظیم بهینه هوای اضافی به بویلر که یکی از راههای ساده و کم هزینه در کاهش تلفات ناشی از دودکش محاسب می گردد می توان به نتایج قابل توجهی دستیابی نمود. بر همین اساس در ادامه به نتایج تجربی حاصل از این آزمایشات بر روی تعدادی نیروگاهها که در هنگام نمونه برداری و آنالیز با این مشکل مواجه بوده اند اشاره می گردد.



شکل (۳) منحنی نتایج حاصل از آنالیز انجام گرفته بر روی گازهای خروجی از بویلر

طی مراجعه و اندازه گیری و آنالیز گازهای خروجی از بویلر واحدهای نیروگاههای کشور در اکثر موارد اشکالاتی در سیستم تنظیم نسبت سوخت به هوا مشاهده گردید . نیروگاه زرگان بدلیل خرابی اکسیژن آنالایزرهای موجود در مسیر دود خروجی از واحد، در لحظه آزمایش بعلت کمبود هوای اضافی مورد نیاز، غلظت منواکسید کربن از مرز ۹ گرم بر متر مکعب تجاوز نموده بود که با تنظیم مقطعي آن سبب ۳ مگاوات افزایش بار را در پی داشت .

نیروگاه بندرعباس نیز در لحظه آزمایش بدلیل افزایش هوای اضافی مورد نیاز میزان اکسیژن و گازهای اکسید ازت موجود در گاز خروجی از بویلر آن افزایش یافته و باعث تلفات انرژی و در نتیجه افت نسبی راندمان شده است که با کم نمودن نسبت هوا به سوخت به میزان ۵ مگاوات افزایش بار را نشان داده است .

نیروگاه شهید منتظری اصفهان نیز همانند نیروگاه زرگان با همین مشکل مواجه بود که طی اندازه گیری بعمل آمده میزان گاز منواکسید کربن اندازه گیری شده در گاز خروجی از بویلر آن از مرز ۴۰۰۰ پی ام گذشته بود که با تنظیم نسبت سوخت به هوا برای همان مگاوات تولیدی سبب صرفه جویی ۱ تن در ساعت در مصرف سوخت گردید. جداول (۲) و (۳) و (۴) آنالیز کامل گازهای حاصل از احتراق نیروگاههای مورد آزمایش را بهمراه شرایط کارکرد بویلر در وضعیت قبل (۱) و بعد از اصلاحات (۲) نشان می دهد. همچنین میزان تغییرات راندمان و درصد هوای اضافی به بویلر نیز محاسبه شده است.

جدول ۲- نتایج آنالیز انجام گرفته بر روی گاز خروجی از بویلر نیروگاه زرگان

درصد هوا اضافه	SO ₂ ppm	NO _x ppm	NO ₂ ppm	NO ppm	CO ppm	راندمان به درصد	% CO ₂	% O ₂	دماهی گاز خروجی C	دماهی گاز خروجی C	صرف سوخت m ³ /hr	نوع سوخت	بار MW	شماره
۳	۰	۲۳۴	۰	۲۳۴	۱۰۴۰۴	۸۱/۳	۱۰/۸	۰/۶	۳۴	۱۶۱/۴	۳۵۲۵۰	گاز	۱۴۱	۱
۵/۵	۰	۳۰۹	۰	۳۰۹	۵	۸۴/۳	۹/۹	۱/۱	۳۴	۱۶۴	۳۵۲۵۰	گاز	۱۴۴	۲

جدول ۳- نتایج آنالیز انجام گرفته بر روی گاز خروجی از بویلر نیروگاه منتظری

درصد هوا اضافه	SO ₂ ppm	NO _x ppm	NO ₂ ppm	NO ppm	CO ppm	راندمان به درصد	% CO ₂	% O ₂	دماهی گاز خروجی C	دماهی گاز خروجی C	صرف سوخت ton/hr	نوع سوخت	بار MW	شماره
۷	۱۳۵۵	۲۱۳	۰	۳۱۳	۸۹۴	۸۶	۱۱/۹	۵/۱	۳	۱۶۱/۸	۴۸/۵	مازوت	۲۰۰	۱
۱۱	۱۳۵۵	۳۸۰	۰	۳۸۰	۸	۸۹	۱۲/۱	۵/۳	۳	۱۶۵/۲	۴۷/۵	مازوت	۲۰۰	۲

جدول ۴- نتایج آنالیز انجام گرفته بر روی گاز خروجی از بویلر نیروگاه بندر عباس

درصد هوا اضافه	SO ₂ ppm	NO _x ppm	NO ₂ ppm	NO ppm	CO ppm	راندمان به درصد	% CO ₂	% O ₂	دماهی گاز C	دماهی گاز C	صرف سوخت ton/hr m ³ /hr	نوع سوخت	بار MW	شماره
۱۶	۲۵۰	۱۱۳	۰	۱۱۳	۰	۸۲/۳	۱۲/۹	۶	۲۲	۱۵۵/۳	۴۲/۷ ۲۷۰۰۰	مازوت و گاز	۳۱۰	۱
۱۲	۲۵۰	۹۵	۰	۹۵	۳	۸۴/۵	۱۲/۷	۵	۲۲	۱۶۰	۴۲/۷ ۲۷۰۰۰	مازوت و گاز	۳۱۵	۲

همانطور که در جداول فوق مشاهده می گردد با تغییر (افزایش یا کاهش) میزان هوای اضافی به بویلر این سه نیروگاه، میزان تلفات انرژی از طریق دودکش کاهش یافته و راندمان احتراق به میزان قابل توجهی افزایش داشته است. کاهش این تلفات در برخی نیروگاهها بصورت افزایش بار الکتریکی و در برخی با کاهش مصرف سوخت نمایان می گردد. برخی از آلینده های منتشره از دودکش نیز به شکل قابل توجهی کاهش پیدا نموده اند [۷].

مراجع

- [۱] - J.A.Barnard, J.N, Bradley, Flame & Combustion second edition,1985.
- [۲] - Gerd Knope, Flue Gas Analysis, 1989.
- [۳] - Dr. Andrew K.Jonws, Opimized Combustion Using Computational Modeling Combustion Unit,A.B.B
- [۴] - Anthony R.Martin,Maximizing Furnace Combustion Efficiency , Die Casting Engineer Magazine , July/August 1988.
- [۵] - نیکولای خارچنکو، سیستمهای انرژی پیشرفته، ترجمه اصغر برادران رحیمی، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۰
- [۶] - رسول سلفیان، فریبرز کریمی، ملک ارسلان صدری، مقاله بررسی عملکرد و میزان تلفات انرژی بویلر های پالایشگاه اصفهان، همایش ملی انرژی، ۱۳۸۲،
- [۷] - دکتر منصور غیاث الدین، پروژه ملی بررسی اثرات زیست محیطی نیروگاههای سوخت فسیلی کشور، آنالیز گاز دود کش نیروگاهها، ۱۳۷۵