

## منابع اتلاف انرژی در بویلرها و

## روش‌های بهینه‌سازی بویلر



دهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران

دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲۶ - ۲۴ آبان ماه ۱۳۸۴

مهرک محمودی\*، سعیده خطیبی‌راد، علیرضا

کاظم‌پور

تهران - خیابان آزادی - بلوار شهید اکبری - نبش کوچه

قاسمی - طبقه ۳، شرکت ایده‌پردازان شریف

mehrak\_mahmudi@yahoo.com

چکیده: بویلرها بعلت تأمین بخار مورد نیاز فرایندهای کلیدی نقش مهم و ویژه‌ای در پالایشگاه‌ها و پتروشیمی‌ها ایفا می‌کنند. با توجه به هزینه نسبتاً بالای تولید بخار، بررسی و تلاش در جهت افزایش راندمان تولید و بهینه‌سازی توزیع بخار در صنایع مختلف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در تحقیق حاضر منابع اصلی اتلاف انرژی در بویلرها و روشهای صنعتی بهینه‌سازی تولید بخار توسط بویلر بازگو شده و نشان داده شده است که بازیافت انرژی از زیرآب بویلر، بازگرداندن میعان‌ات به بویلر و استفاده از اکونومایزر روشهای مؤثر و ساده‌تری برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در بویلرها می‌باشند.

کلمات کلیدی: بویلر؛ بهینه‌سازی؛ پالایشگاه؛ اتلاف انرژی؛ بازیافت انرژی؛

## مقدمه

بخش اصلی تولید حرارت در هر پالایشگاه و پتروشیمی توسط بویلرها صورت می‌گیرد. بویلرها نقش مهم و ویژه‌ای در چنین مجتمع‌هایی ایفا می‌کنند زیرا بخار مورد نیاز فرایندهای کلیدی را تأمین می‌نمایند. بخار آب به عنوان بهترین و در دسترس‌ترین حامل انرژی در اکثر فرایندها در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد زیرا بخار آب می‌تواند مقدار قابل توجهی انرژی گرمایی در خود ذخیره کرده و در هنگام مایع شدن آن را پس دهد. با توجه به هزینه نسبتاً بالای تولید بخار، بررسی و تلاش در جهت افزایش راندمان تولید و بهینه‌سازی توزیع بخار در صنایع مختلف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. طبق یک برآورد تقریبی که توسط سازمان ASE<sup>۱</sup> در کشور آمریکا صورت پذیرفته است، با بهبود راندمان تولید و توزیع بخار در صنایع مختلف این کشور، می‌توان حدود ۳۰٪ مصرف انرژی را کاهش داد؛ بعلاوه از جهت زیست‌محیطی نیز حدود ۶۰ میلیون تن دی‌اکسیدکربن کمتری وارد اتمسفر می‌گردد. تحقیقات این سازمان بر روی پتانسیل‌ها و قابلیت‌های بازیابی و صرفه‌جویی انرژی در بخش‌های مختلف سیستم بخار، در جدول (۱)، ارائه شده است [۱].

جدول ۱- قابلیت‌های صرفه‌جویی در مصرف انرژی در سیستم بخار [۱]

درصد صرفه‌جویی	نوع قابلیت
۱-۲	تنظیم بویلر
۲-۴	نصب تجهیزات بازیافت انرژی
۱۰-۱۲	تعمیر و نگهداری
۵-۱۰	استفاده از میعانات برگشتی
۳-۵	کنترل بار بویلر
۱۰-۱۵	سیستم توزیع بخار
۳-۵	- نشت بخار
۱۰-۱۵	- تله‌های بخار
۵-۱۰	عایق‌ها
۳۰-۴۰	مجموع

در کشور ایران با توجه به بهره‌گیری از تکنولوژی پایین‌تر نسبت به کشورهای صنعتی، ضرورت پرداخت به موضوع بهینه‌سازی تولید و مصرف بخار دارای اهمیت ویژه‌ای است.

## منابع اتلاف انرژی در بویلرها

۱- سیکل کوتاه بویلر:

یک سیکل بویلر شامل مراحل افروزش، پیش‌پالایش، بیکاری، پس‌پالایش و بازگشت به دوره افروزش است. در پیش‌پالایش، فن، هوا را به داخل بویلر می‌راند تا مخلوط گازهای احتراق

<sup>1</sup> Alliance to Save Energy

جمع شده را بیرون کند. پس پالایش نیز کاری شبیه همین فرایند انجام می‌دهد. در طول پالایش حرارت بویلر صرف گرم کردن هوا شده و از بین می‌رود.

از آنجا که گرمای مورد نیاز فرایند می‌تواند با زمان تغییر کند، برای تأمین نیاز احتمالی فرایندها به گرمای اضافی یا بیشتر که ممکن است هیچ‌وقت رخ ندهد، بویلرها را بزرگتر می‌سازند. سیکل کوتاه بویلر وقتی رخ می‌دهد که یک بویلر بزرگتر از اندازه، گرمای مورد نیاز فرایند را تأمین کند و تا تقاضای مجدد خاموش شود.

راندمان بویلر از تقسیم گرمای مفید حاصله، بر انرژی ورودی در طول سیکل بدست می‌آید. اگر سیکل کوتاه رخ دهد یا وقتی که بویلرهای چندتایی در نرخ‌های افروزش پایین کار کنند، این راندمان کاهش می‌یابد. علت اینست که افت‌های ثابت تحت شرایط کم باری زیاد شده‌اند. علاوه بر افت‌های تشعشعی، افت‌های مربوط به پیش‌پالایش و پس‌پالایش نیز رخ می‌دهد [۲].

۲- زیر آب<sup>۱</sup> بویلر:

خارج کردن زیر آب بویلر برای فعالیت بویلر ضروری است زیرا در غیر اینصورت غلظت مواد جامد و مواد معدنی حل نشدنی در آب بویلر بالا رفته، سبب کاهش بازده بویلر می‌شود. آب ورودی بصورت مایع اشباع با محتوای انرژی پایینی وارد بویلر می‌شود و زیر آب با محتوای انرژی بالایی خارج می‌شود که سبب خروج مقدار نسبتاً زیادی انرژی می‌گردد.

مقدار زیر آب بصورت درصد نسبت دبی جرمی زیر آب به دبی جرمی آب خوراک ورودی بیان می‌شود. مقدار زیر آب از ۱٪ تا ۲۰٪ قابل تغییر بوده و با آنالیز شیمیایی آب بویلر، تعیین و کنترل می‌شود.

زیر آب بویلرها به دو صورت تناوبی یا پیوسته خارج می‌شود. مکانیزم معمول کنترل زیر آب، اندازه‌گیری هدایت‌پذیری آب است که شاخصی برای غلظت مواد شیمیایی آب می‌باشد. خروج تناوبی زیر آب برای مدیریت و کنترل شیمی آب بویلرهای با ظرفیت پایین و فشار پایین مؤثر است. در این حالت زیر آب روزی چند مرتبه و به مدت چند ثانیه تخلیه می‌شود. در این روش نسبت به روش کنترل پیوسته، زیر آب بیشتری خارج می‌شود و معمولاً روش پیوسته در بویلرهای بزرگ اقتصادی‌تر است. مقدار صحیح زیر آب تابعی از فشار بخار، خلوص آب خوراک و برنامه‌های تصفیه شیمیایی است. نمونه‌ای از محدوده مواد شیمیایی آب بویلر در جدول (۲) آورده شده است. همچنین مشخصات آب جبرانی و زیر آب بویلر در جدول ۳، آمده است [۳]. با تعیین مقدار زیر آب، میزان اتلاف انرژی از طریق خروج زیر آب از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\lambda_{\text{blowdown}} = \frac{\text{Energy in the blowdown stream}}{\text{Total energy added to the boiler with fuel}} \quad (1)$$

$$\lambda_{\text{blowdown}} = \frac{M_{\text{blowdown}} (h_{\text{blowdown}} - h_{\text{make-up}})}{M_{\text{fuel}} \times \text{HHV}} \times 100$$

<sup>1</sup> Blowdown water

که HHV ارزش حرارتی سوخت است. این معادله درصدی از سوخت وارد شده به بویلر را که از طریق زیرآب به هدر می‌رود، محاسبه می‌کند.

و با استفاده از معادله زیر، ضرر اقتصادی ناشی از این اتلاف محاسبه می‌گردد: [۳]

$$\theta_{\text{blowdown}} = \text{total fuel cost}(\lambda_{\text{blowdown}}) \quad (2)$$

جدول ۲- مقادیر مجاز مواد شیمیایی در آب بویلر [۳]

Parameter	فشار بویلر (psig)					
	۱۵۰	۳۰۰	۶۰۰	۹۰۰	۱،۲۰۰	۱،۵۰۰
	غلظت مواد شیمیایی (mg/liter)					
TDS (maximum)	۴،۰۰۰	۳،۵۰۰	۳،۰۰۰	۲،۰۰۰	۵۰۰	۳۰۰
Phosphate(as PO <sub>4</sub> )	۳۰-۶۰	۳۰-۶۰	۲۰-۴۰	۱۵-۲۰	۱۰-۱۵	۵-۱۰
Hydroxide(as CaCO <sub>3</sub> )	۳۰۰-۴۰۰	۲۵۰-۳۰۰	۱۵۰-۲۰۰	۱۲۰-۱۵۰	۱۰۰-۱۲۰	۸۰-۱۰۰
Sulfite	۳۰-۶۰	۳۰-۴۰	۲۰-۳۰	۱۵-۲۰	۱۰-۱۵	۵-۱۰
Silica (as SiO <sub>2</sub> )	۱۰۰	۵۰	۳۰	۱۰	۵	۳
Total Iron (as Fe)	۱۰	۵	۳	۲	۲	۱
Organics	۷۰-۱۰۰	۷۰-۱۰۰	۷۰-۱۰۰	۵۰-۷۰	۵۰-۷۰	۵۰-۷۰

جدول ۳- نمونه مشخصات آب جبرانی و زیرآب بویلر [۳]

	Temperature [°F]	Pressure [psia]	Specific Volume [ft <sup>3</sup> /lbm]	Internal Energy [Btu/lbm]	Enthalpy [Btu/lbm]	Entropy [Btu/lbmR]
Boiler Outlet	۷۰۰	۴۱۴/۷	۱/۵۸۹۶۵	۱۲۳۹/۹۰	۱۳۶۱/۸۸	۱/۶۳۵۲۷
Low Pressure	۲۷۷	۲۴/۷	۱۷/۴۶۶۴۰	۱۰۹۹/۳۸	۱۱۷۹/۲۱	۱/۷۴۱۲۴
Boiler Blowdown	۴۸۸	۴۱۴/۷	۰/۰۱۹۳۹	۴۲۶/۵۵	۴۲۸/۰۴	۰/۶۲۵۶۱
Make-up Water	۶۰	۱۴/۷	۰/۰۱۶۰۰	۲۸/۰۲	۲۸/۰۷	۰/۰۵۵۵۲
Condensat Return	۲۰۰	۱۴/۷	۰/۰۱۶۶۳	۱۶۷/۹۵	۱۶۸	۰/۲۹۳۸۱
Deaerator Outlet	۲۳۹	۲۴/۷	۰/۰۱۶۹۲	۲۰۷/۶۷	۲۰۷/۷۵	۰/۳۵۲۳۴
Feedpump Exit	۲۴۲	۶۲۲/۱	۰/۰۱۶۹۲	۲۰۸/۴۷	۲۱۰/۴۲	۰/۳۵۶۱۵

۳- سطوح انتقال حرارت:

در اثر واکنش کلسیم و منیزیم و سیلیکای موجود در اکثر آبها، لایه یکپارچه‌ای از مواد واکنش داده روی سطح لوله سمت آب در بویلر تشکیل می‌شود. به این ترتیب لایه‌ای از رسوب، سطوح انتقال حرارت را در برمی‌گیرد. این رسوبات به‌عنوان عایق عمل کرده، باعث افزایش دمای لوله‌ها، شکست لوله‌ها و کاهش انتقال حرارت و بازده انرژی می‌گردند. اتلاف سوخت در

بویلرهای آب در لوله<sup>۱</sup>، ۲ درصد و در بویلرهای آتش در لوله<sup>۲</sup> حدود ۵ درصد است. در جدول (۴)، درصد انرژی اتلافی برحسب ضخامت رسوب ارائه شده است. [۴]

از طرفی تشکیل دوده سیاه روی طرف آتش خور لوله‌های داخل بویلر، انتقال حرارت را کم می‌کند. در نتیجه گرمای کمتری به آب داخل لوله منتقل می‌شود و بقیه آن به همراه گازهای حاصل از احتراق از بویلر خارج می‌گردد. همانطوریکه در جدول (۵)، مشاهده می‌شود یک لایه دوده با ضخامت یک‌سوم اینچ حدود ۲/۵ درصد از بازده بویلر می‌کاهد [۵].

جدول ۴- اتلاف انرژی به واسطه تغییر در ضخامت لوله [۴]

Scale Thickness (in)	Fuel Loss, % of Total Use		
	Scale Type		
	Normal	High Iron	Iron Plus Silica
$\frac{1}{64}$	۱/۰	۱/۶	۳/۵
$\frac{1}{32}$	۲/۰	۳/۱	۷/۰
$\frac{3}{64}$	۳/۰	۴/۷	-
$\frac{1}{16}$	۳/۹	۶/۲	-

جدول ۵- میزان کاهش بازده بویلر در اثر نشست لایه رسوبی [۵]

Soot Layer Thickness (inches)	$\frac{1}{32}$	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{8}$
Boiler Efficiency Reduction (%)	۲/۵	۴/۵	۸/۵

۴- احتراق ناقص سوخت در بویلر:

برای تأمین اکسیژن مورد نیاز فرایند احتراق در بویلر، هوا با سوخت مخلوط می‌شود. برای اطمینان از سوختن تمام سوخت، مقداری بیش از حد مورد نیاز، هوا اضافه می‌شود که به هوای اضافی معروف است. مشخص بودن کمترین مقدار هوای اضافی مورد نیاز، باعث کاهش افت حرارتی از طریق دودکش و بازده احتراق می‌گردد. علت ورود مقدار بیش از حد و غیرضروری هوای اضافی، نقص در سیستم کنترل مشعل، تغییرات در دما یا فشار یا رطوبت نسبی محفظه بویلر و یا جلوگیری از صدمه در اجزای سوخت، می‌باشد.

وقتی هوا وارد محفظه احتراق می‌شود، اکسیژن آن مصرف شده و نیتروژن که نمی‌سوزد، گرمای جذب شده را از طریق دودکش به بیرون منتقل می‌کند. اگر هوای اضافی وارد شده بیش از اندازه باشد همانطوریکه نیتروژن باعث اتلاف حرارت می‌شود، اکسیژن مصرف نشده نیز گرمای سوخت را با خود بیرون می‌برد [۶].

<sup>1</sup> Water-Tube

<sup>2</sup> Fire-Tube

## روشهای بهینه‌سازی سیستم تولید بخار بویلر

۱- جلوگیری از اتلاف انرژی در سیکل کوتاه بویلر:

همانطور که ذکر شد، سیکل کوتاه بویلر وقتی رخ می‌دهد که یک بویلر بزرگتر از اندازه، گرمای مورد نیاز فرایند را تأمین کند و تا تقاضای مجدد خاموش شود. پیشنهاد می‌شود جهت بهینه‌سازی فرایند بویلر، راندمان و هزینه عملکرد هریک از بویلرها تعیین و برای بیشینه‌کردن راندمان، عملکرد بویلرهای چندگانه با یک استراتژی کنترلی مطابقت داده شود. به همین منظور بهتر است در مواقع افزایش بار، از بویلرهای با بازدهی بیشتر استفاده شود و بویلرهای با بازدهی کمتر خاموش شوند.

با افزودن بویلرهای کوچک برای کار در بارهای متوسط یا با مهندسی مجدد واحدهایی که شامل بویلرهای کوچک چندگانه‌اند، می‌توان در مصرف سوخت صرفه‌جویی کرد. استفاده از بویلرهای کوچک چندگانه به اپراتور این اطمینان و انعطاف‌پذیری را می‌دهد تا نوسانات بار را بدون نیاز به سوخت اضافی و ایجاد سیکل کوتاه دنبال کند. کارخانه‌هایی که مقدار بخار مصرفی در آنها بسیار متغیر است بجای آنکه در تمام طول سال از بویلرهای بزرگ خود استفاده کند، در هنگام کاهش تقاضا از بویلرهای کوچک بهره می‌گیرند [۲].

۲- بازیافت انرژی از زیر آب<sup>۱</sup> بویلر

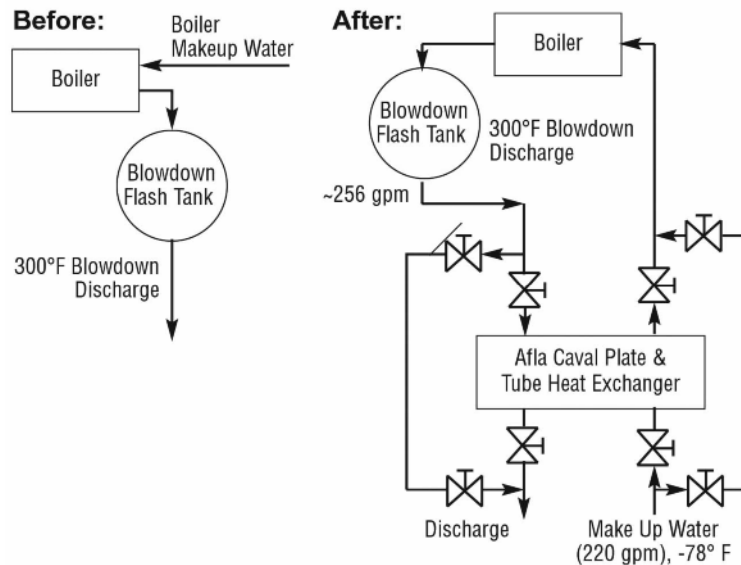
کاهش اتلاف انرژی از طریق بازیافت انرژی زیر آب از دو راه امکان‌پذیر است: اول کاهش دبی زیر آب خروجی از طریق پالایش آب جبرانی و بخار متراکم شده برگشتی و افزودن مواد شیمیایی ضد رسوب به آب بویلر و دوم بازیافت حرارت از زیر آب.

به منظور بهینه‌سازی حرارتی و در نتیجه اقتصادی بویلر، معمولاً از هر دو روش مذکور استفاده می‌شود. در مرحله اول، زیر آب که مایع اشباع فشار بالایی است به یک مخزن فشار پایین تخلیه می‌شود که در ورود به مخزن و در اثر افت فشار، بخشی از مایع به بخار تبدیل می‌شود. این بخار فشار پایین فاقد ناخالصی‌هایی است که زیر آب به همراه خود دارد و در واحدهای فرایندی قابل استفاده است. در مرحله دوم بعلاوه اختلاف دمای آب خروجی از مخزن فشار پایین و آب جبرانی ورودی به سیستم، با استفاده از یک مبدل گرمایی از گرمای زیر آب برای گرم کردن آب جبرانی استفاده می‌شود. در انتخاب مبدل گرمایی باید دقت کافی بعمل آید، چون جریان زیر آب، پتانسیل زیادی برای جرم‌گرفتنی در لوله‌ها دارد. این مبدل باید قابلیت این را داشته باشد که به طور متناوب به طریق مکانیکی تمیز شود (بخصوص سطوحی که با جریان زیر آب در تماس هستند).

این روش می‌تواند تا ۸۰ درصد انرژی باقیمانده در زیر آب را بازیابی کند و از نظر اقتصادی بسیار به صرفه است. از طرف دیگر این روش، نیاز به خنک‌سازی از طریق اختلاط با آب سرد را

<sup>1</sup> Blowdown water

برای ورود به شبکه پساب صنعتی مرتفع می‌کند. شکل (۱)، شمایی از سیستم بازیافت حرارت از زیرآب بویلر را قبل و بعد از نصب مبدل گرمایی نشان می‌دهد.



شکل ۱- شمایی از سیستم بازیابی حرارت از زیرآب بویلر قبل و بعد از نصب مبدل گرمایی [۳]  
 هر بویلر با زیرآب پیوسته بیشتر از ۵ درصد دبی بخار، یک نمونه خوب برای بازیابی حرارت است. بهینه‌سازی بیشتر انرژی با استفاده از بویلرهای فشار بالا امکان‌پذیر است. جدول (۶)، نمونه‌ای از پتانسیل بازیابی حرارت از زیرآب بویلر را نشان می‌دهد [۳].

جدول ۶- حرارت قابل بازیافت از زیرآب بویلر\* [۳]

Rate, % Blowdown Boiler Feedwater	Heat Recovered, Million Btu per hour				
	Boiler Operating Pressure, psig				
	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۵۰	۳۰۰
۲	۰/۴۵	۰/۵	۰/۵۵	۰/۶۵	۰/۶۵
۴	۰/۹	۱/۰	۱/۱	۱/۳	۱/۳
۶	۱/۳	۱/۵	۱/۷	۱/۹	۲/۰
۸	۱/۷	۲/۰	۲/۲	۲/۶	۲/۷
۱۰	۲/۲	۲/۵	۲/۸	۳/۲	۳/۳
۲۰	۴/۴	۵/۰	۵/۶	۶/۴	۶/۶

\* ظرفیت تولید بخار ۱۰۰,۰۰۰ lb/hr و آب جبرانی ۶۰°F و ۹۰ درصد بازیافت حرارت

۳- استفاده از اکونومایزر<sup>۱</sup> برای بازیابی حرارت:

اکونومایزر دستگاهی است که حرارت را از گازهای حاصل از سوخت به آب خوراک ورودی منتقل می‌کند و بدین‌وسیله مصرف سوخت بویلر را کاهش می‌دهد. گازهای حاصل از سوخت که وارد دودکش می‌شوند دمایی بالاتر از ۱۰۰ تا ۱۵۰°F یعنی بالاتر از دمای بخار تولیدی دارند. همانطور که ذکر شد معمولاً به ازای هر ۴۰°F کاهش دمای گازهای حاصل از سوخت، بازده بویلر یک درصد افزایش می‌یابد. با استفاده از اکونومایزر با بازیافت حرارت، سوخت مورد

<sup>۱</sup> Economizer

نیاز از ۵ تا ۱۰ درصد کم می‌شود و مدت زمان برگشت سرمایه حدود ۲ سال است. جدول (۷)، مثالی از پتانسیل بازیافت حرارت را نشان می‌دهد [۷].

جدول ۷- حرارت قابل بازیافت از گازهای حاصل از سوخت در بویلر\* [۷]

Initial Stack Gas Temperature, °F	Recoverable Heat, MBtu/hr			
	Boiler Thermal Output, MBtu/hr			
	۲۵	۵۰	۱۰۰	۲۰۰
۴۰۰	۱/۳	۲/۶	۵/۳	۱۰/۶
۵۰۰	۲/۳	۴/۶	۹/۲	۱۸/۴
۶۰۰	۳/۳	۶/۵	۱۳/۰	۲۶/۱

\* سوخت: گاز طبیعی با ۱۵ درصد هوای اضافی و دمای دودکش  $250^{\circ}\text{F}$

جهت بهینه‌سازی فرایند، بعد از اینکه بویلر به شرایط تولید مشخص و موردنیاز رسید، دمای دودکش باید تعیین شود. همچنین باید بویلر با سطوح انتقال حرارت تمیز در شرایط بهینه میزان هوای اضافی، کار کند و حداقل دمایی که گازهای دودکش می‌توانند تا آن دما سرد شوند، مشخص باشد. حداقل دمایی که گازهای سوخت می‌توانند تا آن دما سرد شوند به نوع سوخت بستگی دارد. این دما برای گاز طبیعی  $250^{\circ}\text{F}$ ، برای زغال سنگ و نفت‌های با سولفور کم  $300^{\circ}\text{F}$  و برای نفت‌های با سولفور بالا  $350^{\circ}\text{F}$  می‌باشد. این محدوده‌ها با توجه به دمای شبنم و خوردگی دودکش بعثت سرد شدن گازها، بدست آمده است [۷].

#### ۴- تمیز کردن سطوح انتقال حرارت:

برای جلوگیری از اتلاف انرژی از طریق سطوح انتقال حرارت سمت جریان آب، توصیه می‌شود سختی آب ورودی به بویلر با استفاده از روشهای مختلف گرفته شود و به بویلر مواد شیمیایی ضد رسوب تزریق گردد [۴].

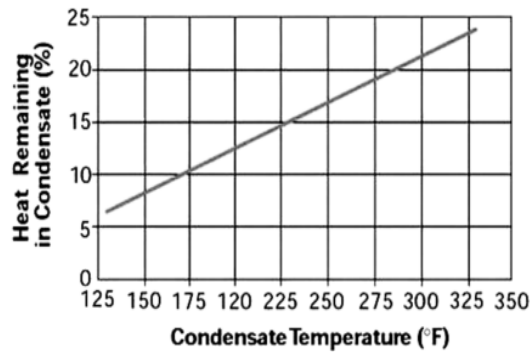
در مورد سطوح انتقال حرارت سمت آتش در لوله‌های کوچک، دوده تشکیل شده به راحتی با برس کشیدن پاک می‌شود، ولی اگر سوخت سنگین‌تری استفاده شود، دوده‌های سخت‌تری تشکیل می‌گردد. سوخت‌های جامد مانند ذغال و یا چوب، جرم خاکسترمانندی روی لوله‌ها ایجاد می‌کنند که اگر سریعاً تمیز نشوند در بلند مدت به سختی از لوله جدا می‌گردند. در بویلرهای آب در لوله بزرگ، می‌توان برای تمیز کردن سطوح جرم گرفته از بخار فشار بالا استفاده کرد. برای جلوگیری از تشکیل دوده نباید از سوخت‌های با کیفیت پایین استفاده نمود. بواسطه تشکیل دوده، دمای گاز دودکش بالا می‌رود که سبب اتلاف حرارتی می‌گردد [۵].

#### ۵- برگشت دادن میعان‌ات به بویلر:

وقتی که بخار، حرارت خود را به فرایندهای تولیدی منتقل می‌کند به فاز مایع تبدیل می‌شود. یکی از راه‌های افزایش بازده انرژی در اینگونه تجهیزات، برگشت دادن فاز مایع شده به بویلر است. در اثر این کار، آب جبرانی کمتری نیاز است و مصرف سوخت و هزینه‌های پالایشی و شیمیایی سختی‌گیری با برگشت میعان‌ات با خلوص بالا، کاهش می‌یابد. همچنین با این کار، میزان خروج زیرآب کم شده و در نتیجه حرارت اتلافی از این طریق نیز کاهش می‌یابد. وقتی



به جای آب جبرانی با دمایی حدود ۵۰ تا ۶۰°F، میعانات با دمای ۱۳۰ تا ۲۲۵°F به بویلر بازگردانده شوند، مصرف سوخت قطعاً بهینه می‌شود (انرژی موجود در میعانات حدود ۱۰ درصد کل انرژی بخار آن است). شکل (۲)، نمودار حرارت باقیمانده در میعانات را در دماهای مختلف برای یک سیستم تولید بخار در فشار ۱۰۰ psig و آب جبرانی ۵۵°F نشان می‌دهد [۸].



شکل ۲- میزان حرارت باقیمانده در میعانات بر حسب دمای آن [۸]

۶- سیستم کنترل احتراق و اکسیژن در بویلر:

برای بهبود بازده احتراق، مقدار هوای اضافی مورد نیاز را توسط دستگاه‌های کنترلی، کنترل می‌کنند تا باعث اتلاف حرارت از طریق دودکش نیز نشود. اگر دستگاه آنالیز اکسیژن موجود در گاز خروجی دودکش نصب شود، می‌توان همواره مقدار هوای اضافی و نسبت سوخت بویلر به هوا را کنترل کرد تا بویلر در شرایط بهینه کار کند. نصب کنترل‌گر مقدار مونوکسیدکربن در کنار کنترل‌گر اکسیژن، این اطمینان را می‌دهد که به خاطر عدم هوای کافی، احتراق ناقص صورت نگیرد. این سیستم کنترل اکسیژن، برای بویلرهای با توان ۳۰۰ اسب بخار و بیشتر مفید است. کنترل هوای اضافی برای بویلرهایی که دمای گاز دودکش بالایی دارند نیز مهم است. با کنترل هوای اضافی، سالانه ۵ درصد در مصرف سوخت صرفه‌جویی می‌شود.

می‌توان با کیت‌های آزمایشی ارزان قیمت، اکسیژن موجود در گازهای حاصل از سوخت را اندازه‌گیری نمود و بطور دستی نسبت سوخت به هوا را در حالت بهینه قرار داد تا بویلر با بازدهی بالا کار کند. این کار را باید بطور متناوب انجام داد. تجهیزات کامپیوتری گرانتری وجود دارد که درصد اکسیژن، دمای گاز دودکش و بازده احتراق بویلر را نشان می‌دهد و بطور خودکار نسبت سوخت به هوا را تنظیم می‌کند. [۶]

۷- استفاده از آب بدون املاح در بویلرها:

آب شهری که محتوی مواد معدنی است به شدت در بویلرها رسوب کرده و راندمان بویلر و طول عمر آن را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد لذا حذف این مواد معدنی جهت عملکرد مؤثر بویلر، ضروری است. یکی از سختی‌گیرها آهک داغ<sup>۱</sup> است که طبق تحقیقات جایگزینی آن با واحد اسمز معکوس مزایای بسیاری دارد. از جمله این مزایا هزینه کمتر انرژی به علت کاهش

<sup>۱</sup> Hot Lime Softner

نیاز به زیرآب بویلر، هزینه کمتر نگهداری بعلت حذف کار با دوغاب و مشکلات تمیز کردن و هزینه کمتر مربوطه به مواد زائد می‌باشد [۹].

۸- استفاده از مشعل پایدار تابشی در بویلرهای صنعتی:

مشعل پایدار تابشی (RSB)<sup>۱</sup> برای تأمین راندمان بالا و انتشار کم  $CO_x$ ,  $NO_x$  در بویلرهای صنعتی و گرم‌کن‌های فرایندی طراحی شده است. مشخصه‌های RSB که عملکرد مشعل را نسبت به مشعل‌های مرسوم بهبود می‌دهد، عبارتند از: پیش اختلاط کامل هوا و سوخت، تثبیت سطح هنگام استفاده از مناطق تابشی سطح و مناطقی با شار زیاد و کنترل شکل شعله در بالای سطح مشعل. هدف استفاده از RSB آن است که بدون از دست‌دادن راندمان حرارتی بویلر، مقدار  $NO_x$  به زیر ۹ ppm و مقدار  $CO_x$  به زیر ۵۰ ppm برسد [۱۰].

### نتیجه‌گیری

از آنجا که بویلرها یکی از مهمترین تأمین‌کننده‌های حرارت در پالایشگاه‌ها و پتروشیمی‌ها می‌باشند، با بهبود راندمان آنها می‌توان مصرف انرژی را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. برای بهینه‌سازی مصرف انرژی بویلر لازم است ابتدا منابع اتلاف انرژی در بویلر شناخته شوند و سپس روشهای مناسب برای کاهش اتلاف انرژی با توجه به علت اتلاف اعمال گردند.

در این تحقیق منابع اتلاف انرژی در بویلرها و روشهای بهینه‌سازی تولید بخار توسط بویلر بیان شده است. مهمترین منابع اتلاف انرژی در بویلرها عبارتند از: (۱) وقوع سیکل کوتاه بویلر، (۲) زیرآب بویلر و (۳) سطوح انتقال حرارت. برای بهینه‌سازی مصرف انرژی بویلرها می‌توان روشهای زیر را بکار برد: (۱) جلوگیری از اتلاف انرژی در سیکل کوتاه بویلر، (۲) بازیافت انرژی از زیر آب بویلر، (۳) استفاده از اکونومایزر برای بازیابی حرارت، (۴) تمیزکردن سطوح انتقال حرارت، (۵) برگشت دادن میعان‌ات به بویلر، (۶) استفاده از آب بدون املاح در بویلرها، (۷) استفاده از مشعل پایدار تابشی در بویلرهای صنعتی.

### مراجع

- 1-T. Jones, Energy-Efficient steam systems can generate savings through reduced fuel consumption, steam challenge, [www.powerspecialties.com](http://www.powerspecialties.com).
- 2-Minimize boiler short cycling losses, Petroleum, Energy, [www.oit.doe.gov](http://www.oit.doe.gov), Dec 2000.
- 3- Greg Harrell, "Boiler blowdown energy recovery", [www.oit.doe.gov](http://www.oit.doe.gov).
- 4-"Clean boiler water-side heat transfer surfaces", [www.energystar.gov](http://www.energystar.gov).
- 5-"Clean boiler fire-side heat transfer surfaces", [www.oit.doe.gov](http://www.oit.doe.gov).
- 6-"Boiler combustion monitoring & oxygen trim systems", [www.energy.wsu.edu](http://www.energy.wsu.edu).
- 7-"Use feedwater economizer for waste heat recovery", [www.oit.doe.gov](http://www.oit.doe.gov).
- 8-"Return condensate to the boiler", [www.energystar.gov](http://www.energystar.gov).
- 9-"Installation of Reverse osmosis unit reduces Refinery consumption", Petroleum/Best practices/Case study, [www.oit.doe.gov](http://www.oit.doe.gov), August 2001.
- 10-"Very low emissions: Radiation stabilized burner", Petroleum, project fact sheet, [www.oit.doe.gov](http://www.oit.doe.gov), January 1990.

<sup>1</sup> Radiation Stabilized Burner