

شناسایی منابع هدررفت انرژی در یک واحد تولید بخار صنعتی و محاسبه بازدهی آن

سیدمحسن میراحمدی، فرشاد ورامینیان*

سمنان، دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی

پیام‌نگار: fvaraminian@semnan.ac.ir

چکیده

تولید بخار از مهم‌ترین بخش‌های مصرف‌کننده انرژی در فرایند است. حدود ۱/۶ انرژی مصرفی در صنعت برای تولید بخار استفاده می‌شود. در این تحقیق واحد بخار یک کارخانه شیمیایی بررسی شده و ضمن بررسی بازدهی واحد، مهم‌ترین منابع هدررفت انرژی در آن شناسایی شده‌اند. نتایج محاسبات گواه آن است که می‌توان از هدررفت حداقل ۸۴۶۹۰۲ متر مکعب استاندارد گاز طبیعی در سال جلوگیری کرد. این صرفه‌جویی (به اضافه صرفه‌جویی ناشی از بازگشت آب) حدود ۱۳۸۰۷۰۰۳۴ ریال در سال سود عاید این واحد صنعتی خواهد کرد. این مقدار معادل ۱۹/۸٪ هزینه سالانه سوخت مصرفی برای تولید بخار است.

کلمات کلیدی: بازدهی، دیگ بخار، صرفه‌جویی انرژی

۱- مقدمه

و هوایی است. به همین دلیل استقلال توسعه اقتصادی از مصرف انرژی همواره یکی از عوامل مهم در توسعه پایدار است و در سال‌های آتی هزینه‌های انرژی اثرگذارترین عامل در هزینه‌های مصارفی چون گرمایش و سرمایش، تولیدات صنعتی و هزینه‌های دیگر خواهد بود.

کشور ایران از این نظر در موقعیت مناسبی قرار ندارد و بر اساس آمار در صورت تداوم مصرف فعلی انرژی، در آینده‌ی نه چندان دوری دچار مشکل خواهد شد. در قیاس با کشوری مانند چین مصرف انرژی در کشور دو برابر است و بر اساس سند چشم‌انداز بیست ساله‌ی کشور، باید هر سال چهار درصد از شدت مصرف انرژی^۱ در کشور کم شود [۱]. از حدود بیست میلیارد دلار مصرف سالانه‌ی انرژی در کشور تقریباً یک چهارم آن قابل صرفه‌جویی است [۲].

امروزه کاهش روز افزون منابع، بشر را به تفکر درباره‌ی این مشکل اساسی واداشته است. جنگ‌های زیادی به این دلیل در گرفته و مناقشات بسیاری آغاز شده است. در مقابل این مشکل که گریبان‌گیر تقریباً تمام منابع مورد نیاز زندگی انسان است، دو راه قابل تصور است:

- تلاش برای یافتن منابع جدید
- استفاده بهینه از منابع موجود

هر چند تلاش برای یافتن منابع جدید با جدیت و خستگی‌ناپذیری ادامه دارد، اما حقیقت این است که نه تمام منابع را می‌توان جایگزین کرد و نه منابع جایگزین به این زودی برای کاربردهای صنعتی و در مقیاس بزرگ قابل استفاده خواهند شد. انرژی یکی از مهم‌ترین منابعی است که کاهش روزافزون آن به سرعت در زندگی روزانه‌ی تک‌تک افراد اثر مستقیم گذاشته است، از طرف دیگر مصرف انرژی به خصوص سوخت‌های فسیلی مهم‌ترین عامل آلودگی هوا و تغییرات آب

۱. این شاخص، نشانه‌ی مقدار مصرف انرژی بر مبنای تن نفت خام به ازای هزار دلار تولید ناخالص ملی است.

۲- واحد مورد بررسی

واحدهای پشتیبانی^۱ یکی از مهم‌ترین بخش‌های هر واحد فرایندی است که بخش مهمی از مصرف انرژی واحد را به خود اختصاص می‌دهند. در این بین تولید بخار وظیفه‌ی مشترک واحدهای پشتیبانی است. از حدود ۲/۳ مصارف انرژی در صنعت که به شکل گرمای فرایندی است، تقریباً نیمی برای تولید بخار مصرف می‌شود [۳]. بنابراین می‌توان با کاهش مصرف انرژی در فرایند تولید بخار صرفه‌جویی بسیاری را در مصرف انرژی واحد ایجاد کرد.

در این مقاله نتایج تحقیق انجام شده برای شناسایی راههای هدررفت انرژی و کاهش آن در یک واحد صنعتی ارائه شده است. مشخصات دیگ‌های مورد بررسی در جدول (۱) آمده است [۴]. تعداد دیگ‌ها در واحد دو عدد بود که به تازگی به سه دیگ افزایش یافته است.

تهیه شده بودند. این گزارش‌ها را یکی از آزمایشگاه‌های معتمد سازمان حفاظت محیط زیست کشور تهیه کرده است. این نتایج در جدول (۲) آمده است.

۳- بررسی بازدهی دیگ‌های بخار

بازدهی دیگ‌های بخار می‌تواند تا ۹۱ الی ۹۲ درصد (برحسب ارزش گرمایی خالص) و ۸۱ تا ۸۲ درصد (برحسب ارزش گرمایی ناخالص) افزایش یابد [۵]. در بررسی اقتصادی اثرات افزایش بازدهی، باید به این نکته توجه کرد که این اثرات به بازدهی قبلی بستگی دارند. اثر افزایش بازدهی در دستگاه‌های کم بازده بیشتر است. در توان خروجی ثابت، اثر افزایش بازدهی را می‌توان با رابطه‌ی (۱) نشان داد [۶]

$$E = \frac{\eta_n - \eta_o}{\eta_n} \quad (1)$$

بنابراین باید نخست بازدهی کنونی سیستم تولید بخار را به دست آورد.

جدول ۱- مشخصات دیگ‌های موجود در واحد تولید بخار [۴]

شرکت سازنده	پاکمن
نوع دیگ	لوله آتشی
فشار بخار تولیدی (طراحی)	۱۰ بار نسبی
فشار بخار تولیدی (عملیاتی)	۶ بار نسبی (میانگین) ^۲
سوخت مصرفی	گاز طبیعی
مقدار بخار تولیدی	۵ تن در ساعت
دمای آب ورودی (طراحی)	۲۰ درجه‌ی سلسیوس
دمای آب ورودی (عملیاتی)	۷۰ درجه‌ی سلسیوس

جدول ۲- نتایج آزمایش و درصد ترکیب گازهای

خروجی دودکش [۴]

عامل	واحد اندازه‌گیری	خروجی دیگ اول	خروجی دیگ دوم
O _۲	%	۳/۳۶	۴/۰۰
CO	ppm	۱۲/۵۰	۱۲۵/۰۰
CO _۲	%	۱۰/۰۰	۱۱/۰۵
NO	ppm	۸۴/۷	۱۱۲/۰
NO _۲	ppm	۰/۹	۴/۰
NO _x	ppm	۸۵/۶	۱۱۶/۰
SO _۲	ppm	۰/۰	۰/۰
C _x H _y	ppm	۰/۳۷	۰/۵۰
هوای اضافی	%	۱۶/۷	۳۸/۰

برای بررسی مصرف انرژی در دیگ‌های بخار باید از شرایط احتراق سوخت در دیگ آگاه بود. این آگاهی را می‌توان از داده‌های ترکیب درصد گازهای خروجی دیگ به دست آورد. به همین دلیل، اندازه‌گیری ترکیب درصد گازهای خروجی از دیگ، گام نخست در بررسی مصرف انرژی در وسایلی است که با احتراق سوخت سروکار دارند. برای این منظور از گزارش‌هایی استفاده شد که در فرایند مستندسازی مرتبط با اخذ استانداردهای زیست محیطی ایزو ۱۴۰۰۱

1. Utility

۲. در سیستم‌های صنعتی تولید بخار در صنایع فرایندی نسبتاً کوچک فشار بخار تولیدی به دقت کنترل نمی‌شود؛ در عمل فشار باید در بازه‌ی خاصی نگهداشته شود یعنی از یک مقدار کمینه - در اینجا ۵/۵ بار نسبی - کمتر نشود و از یک مقدار بیشینه - در این جا ۶/۵ بار نسبی - نیز بیشتر نشود.

۴- روش‌های محاسبه‌ی بازدهی دیگ‌های بخار

بازدهی دیگ بخار را می‌توان به صورت نسبت گرمای مفید خروجی از دیگ به کل انرژی ورودی به آن دانست. ارزش گرمایی سوخت، مساوی مقدار گرما یا انرژی تولیدی هنگام سوختن آن است. این عدد هم به صورت ارزش گرمایی بالا (ناخالص) و هم به صورت ارزش گرمایی پایین (خالص) بیان می‌شود. تفاوت بین این دو کمیت در مقدار گرمای نهان چگالش بخار آب تولیدی در فرایند سوختن است. در محاسبه‌ی ارزش گرمایی ناخالص فرض می‌شود که همه‌ی بخار آب تولیدی به طور کامل به مایع تبدیل شود و محتوای انرژی خود را به فرایند برگرداند. اما در محاسبه‌ی ارزش گرمایی خالص فرض می‌شود که بخار آب از فرایند خارج شده است و انرژی آن در نظر گرفته نمی‌شود.

با بررسی نتایج منتشر شده در زمینه‌ی بررسی کارکرد دیگ‌های بخار می‌توان راه‌های مطالعه‌ی این واحدها را به دو دسته‌ی کلی تقسیم کرد: دسته‌ای که از روش‌هایی مانند دینامیک سیالات محاسباتی [۷]، روش‌های نوین بهینه‌سازی (مانند الگوریتم ژنتیک) [۸] و هوش مصنوعی (مانند شبکه‌های عصبی) [۹-۱۰] و یا ترکیبی از این روش‌ها [۱۱] استفاده می‌کنند و دسته‌ای که از دید مهندسی و کاربردی به این موضوع نگاه کرده‌اند و در آنها از مدل‌سازی ریاضی (با استفاده از قوانین بقای جرم و انرژی) و یا روابط تجربی و روش‌های مهندسی برای تعیین تخمین‌هایی از مقدار هدررفت گرما و بازدهی دیگ استفاده شده است [۱۲-۱۴].

دسته‌ی نخست هرچند اطلاعات دقیقی از کارکرد دیگ و شرایط انتقال گرما و بازدهی گرمایی و انتشار آلاینده‌ها به دست می‌دهند، اما به زمان محاسباتی نسبتاً طولانی و اطلاعات دقیق، کامل و نسبتاً فراوانی از کارکرد دیگ بخار و شرایط دما، فشار و غلظت‌های در آن نیاز دارند که در بیشتر مواقع وجود ندارد. بنابراین کاربرد این روش‌ها محدود به واحدهای بزرگ تولید بخار نیروگاهها و یا واحدهای تولید همزمان برق و گرماست و کمتر در واحدهای کوچک و حتی متوسط استفاده شده‌اند. پس این روش‌ها برای یک ارزیابی سریع و نسبتاً دقیق از وضعیت دیگ بخار کاربرد ندارند.

در دسته‌ی دوم روش‌های به کار رفته از روش‌های ساده‌تر و سریع‌تر برای ارزیابی کارکرد دیگ‌ها استفاده می‌شود و بنابراین برای تعیین تخمین‌های اولیه و نخستین تصمیم‌گیری‌ها بسیار کارآمد هستند. در

این روش‌ها ارزیابی کارآمدی دیگ، یک فرایند صرفاً ریاضی نیست و بنابراین دید مهندسی مناسبی برای انتخاب واحدهای جدید و ارزیابی دقیق‌تر عوامل مؤثر بر کارکرد واحدهای موجود به دست می‌دهد. در این بین، مدل‌سازی ریاضی بر اساس قوانین بقای جرم و انرژی، ابزار مناسب و توانمندی است، اما دامنه‌ی کاری کوچکی دارد زیرا پدیده‌های موجود در دیگ‌های بخار - مانند انتقال گرمای تابشی - بسیار پیچیده هستند و حل معادلات مدل‌سازی در حالت واقعی بسیار سخت است و مدل از هدف اصلی خود دور خواهد شد. بنابراین بهترین راه برای یافتن تخمین مناسبی از بازدهی دیگ‌های بخار فرایندی کوچک و متوسط، استفاده از روش‌های مهندسی و روابط سرانگشتی است. البته استفاده از این روش‌ها در بررسی دیگ‌های بخار بزرگ نیز کاربرد دارد [۱۴].

روش‌های اصلی برای تعیین بازدهی دیگ عبارت‌اند از [۵] و [۱۵] و [۱۶]:

- تحلیل بر مبنای ورودی-خروجی^۱ یا روش مستقیم.
- تحلیل بر مبنای گرمای هدر رفته^۲ یا روش غیرمستقیم

اگر داده‌های ورودی بدون خطا باشند این دو روش باید جواب‌های هماهنگی داشته باشند. از آنجایی که در این واحد، اطلاعات کافی در اختیار نبود، از روش غیرمستقیم استفاده شد.

نکته‌ی مهم آن است که هدر رفت به دست آمده برحسب ارزش گرمایی خالص سوخت است و برای تبدیل آن به ارزش گرمایی ناخالص باید از نسبت این دو مقدار استفاده کرد.

$$L_G = \frac{L_N}{a} + 100 \times \frac{(a-1)}{a} \quad (2)$$

روش غیرمستقیم مبتنی بر اندازه‌گیری هدررفت گرما و سپس تبدیل این مقادیر به درصد هدررفت سوخت بر مبنای ارزش گرمایی (خالص و یا ناخالص) است. از رابطه‌ی (۳) به این منظور استفاده می‌شود.

$$\eta = 100 - \frac{L}{H} \times 100 \quad (3)$$

مراجع مختلف مربوط به این روش، در توضیح آن از روابط و نمودارهای نسبتاً مشابهی استفاده کرده‌اند. در این تحقیق از روابط

1. Input-Output Method
2. Heat-Loss Method

۲-۴ سوختن ناقص

سوختن ناقص، مانع استفاده از تمام ظرفیت گرمایی سوخت ورودی می‌شود. غلظت ترکیباتی مانند مونواکسیدکربن، هیدروژن و هیدروکربن‌های نسوخته (C_xH_y ها) در گاز خروجی می‌تواند تخمینی از این نوع گرمای هدررفته باشد. (به شرطی که مقدار مونواکسیدکربن کمتر از ۰/۱ درصد حجمی باشد).

$$C = k_c \frac{CO}{CO + CO_p} \quad (5)$$

اگر مبنای محاسبات، ارزش گرمایی خالص سوخت باشد، مقدار k_c برای نفت کوره ۳۷/۹ و برای گاز طبیعی ۵۹ خواهد بود.

۳-۴ تابش از سطح دیگ

هر قدر هم عایق‌کاری دیگ مناسب باشد، تابش از سطوح گرم آن می‌تواند انرژی را تلف کند. برای تخمین این مقدار، معمولاً از نمودارهایی استفاده می‌شود که یکی از معروف‌ترین آن‌ها را انجمن سازندگان دیگ بخار آمریکا^۳ ارائه کرده است. از آنجایی که در واحد صنعتی مورد نظر در این تحقیق دو دیگ کاملاً مشابه و یکسان (از نظر شرایط عملیاتی متناظر با محاسبات هدررفت تابشی) وجود دارد، محاسبات برای یک دیگ انجام شد. برای این کار از شکل (۱) استفاده شد.

۴-۴ منابع دیگر هدررفت

برای تصحیح ساده‌سازی‌های مورد استفاده در روش (مثلاً شرایط انتقال گرما و کاهش تدریجی آن و...) سایر منابع هدررفت را نیز تخمین می‌زنند و بین ۰/۵ تا ۱/۵ درصد در نظر می‌گیرند. در این تحقیق، از مقدار میانگین (یک درصد) استفاده شد.

۵- محاسبه‌ی بازدهی دیگ‌های بخار

بر اساس دمای هوای ورودی ۱۵ درجه‌ی سلسیوس و دمای گاز خروجی ۲۱۵ درجه‌ی سلسیوس و با استفاده از داده‌های جدول‌های (۲) و (۳) و روابط (۳)، (۴) و (۵) می‌توان مقادیر هدررفت انرژی از دیگ‌ها را محاسبه کرد. نتایج این محاسبات در جدول (۴) آمده است. بر این اساس، بازدهی‌های دیگ‌ها بر مبنای ارزش گرمایی ناخالص به ترتیب ۷۷/۶۶٪ و ۷۸/۲۶٪ برای دیگ‌های شماره‌ی یک و دو به دست می‌آیند. در ادامه، مقدار متوسط بازدهی ۷۸٪ در نظر گرفته می‌شود.

3. American Boiler Manufacturers Association

موجود در مرجع [۵] استفاده شده است. هدررفت گرما از دیگ بخار می‌تواند به دلایل زیر باشد:

۱-۴ خروج گازهای احتراق از دودکش

بیشتر این گرما را گاز خشک به واسطه‌ی دمای آن خارج می‌کند، اما بخشی هم به دلیل گرمای نهان لازم در تبخیر آب تولیدی در فرایند سوختن، رطوبت سوخت و رطوبت هوای ورودی هدر می‌رود. در دیگ‌های صنعتی که به تجهیزات بازیافت گرمای هدر رفته^۱ مجهز نباشند مقدار زیادی گرما از این راه هدر می‌رود. دمای گاز خروجی از این دیگ‌ها بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه‌ی سلسیوس است که می‌تواند منبع مناسبی برای صرفه جویی در مصرف انرژی باشد. پس در این شرایط می‌توان هدررفت گرما از دیگ را حاصل جمع مقادیر زیر دانست:

۱. گرمای محسوس هدررفته به واسطه‌ی خروج گاز خشک دودکش
 ۲. هدررفت ناشی از رطوبت سوخت
 ۳. هدررفت ناشی از آب تولیدی در فرایند سوختن
- در محاسبات عملی معمولاً همه‌ی این عوامل با محاسبه‌ی ساده‌ای، تقریبی تعیین می‌شود که به شرط آن که سوختن ناقص سوخت قابل چشم‌پوشی باشد، برای مقاصد مهندسی به قدر کافی دقیق است.

$$t = k_s \frac{t_s - t_a}{CO_p} \quad (4)$$

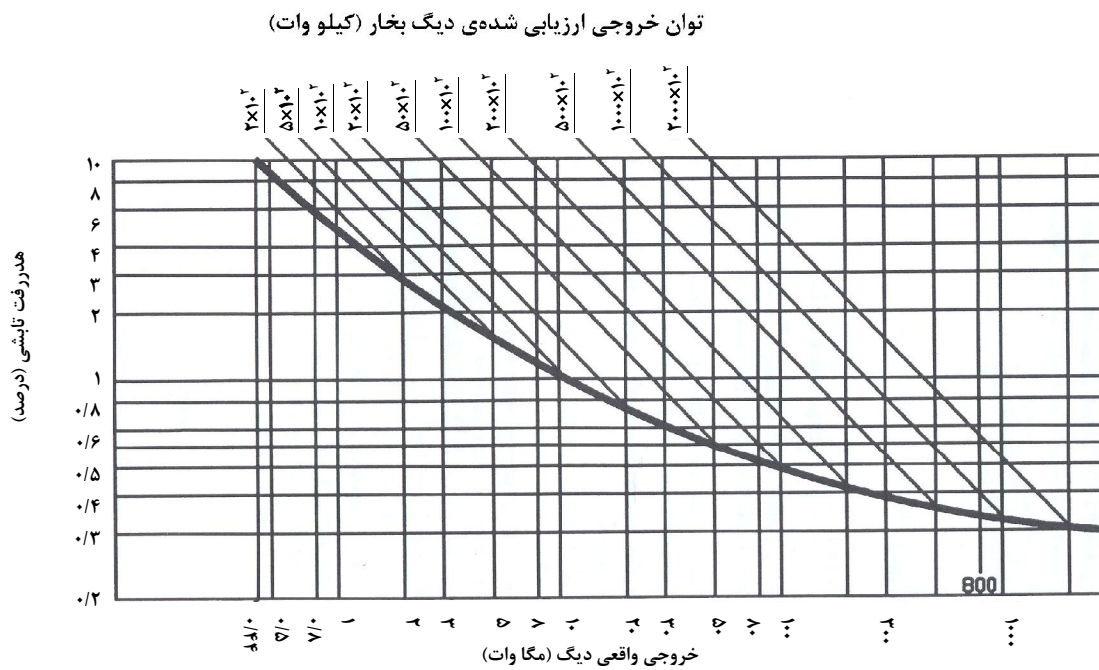
مقادیر k_s برای گاز طبیعی و گازوئیل در جدول (۳) آمده است.

جدول ۳- مقادیر ضریب هاسنتین برای گاز طبیعی و گازوئیل^۲ [۵]

گاز طبیعی	گازوئیل	درصد حجمی دی اکسیدکربن
۰/۴۵۷	۰/۵۵۰	۸
۰/۴۶۶	۰/۵۵۷	۹
۰/۴۷۶	۰/۵۶۴	۱۰
۰/۴۸۶	۰/۵۷۱	۱۱

1. Waste Heat Recovery Equipment

۲. بر مبنای ارزش گرمایی خالص سوخت ورودی و درجه‌ی سلسیوس (در صورت استفاده از درجه‌ی فارنهایت مقادیر را در ۵/۹ ضرب کنید).



شکل ۱- هدررفت تابشی: هر منحنی متناسب است با مقدار انرژی خروجی مشخصی از دیگ^۱ [۵]

تخلیه شده در زیرآب^۴ نیز استفاده می‌شود (در بخش‌های بعدی به تفصیل بررسی شده است). با استفاده از موازنه‌ی آنتالپی، مقدار انرژی مورد نیاز به دست می‌آید.

ارزش گرمایی گاز طبیعی^۳ 34325 kJ/sm^3 است. بنابراین با استفاده از بازدهی میانگین دیگ‌های بخار می‌توان معادل گاز طبیعی این گرما را به دست آورد. از طرفی براساس تعرفه‌ی سال ۱۳۸۵ قیمت گاز مصرفی صنایع ۱۵۸/۵ ریال برای هر متر مکعب بود که در سال ۱۳۸۶ طبق طرح تثبیت قیمت‌ها تغییری نکرد. بنابراین می‌توان بهای گاز مصرفی را - با فرض ادامه‌ی اجرای طرح تثبیت قیمت‌ها - محاسبه کرد. از موازنه‌ی انرژی، مقدار گاز طبیعی مورد نیاز واحد، 4395204 مترمکعب استاندارد در سال با بهای 696639767 ریال به دست آمد.

۶- راه‌های افزایش بازدهی دیگ‌ها

۶-۱ تصحیح مقدار هوای اضافی

هوای اضافی مقدار هوایی است که بیش از مقدار استوکیومتری مورد نیاز برای سوختن کامل وارد سیستم می‌شود. استفاده از هوای اضافی برای جلوگیری از سوختن ناقص سوخت است. اثر سوختن ناقص

4. Blow Down

جدول ۴- مقادیر هدررفت از دیگ‌های بخار (درصد)

راه هدررفت	دیگ شماره یک	دیگ شماره دو
گازهای خروجی از دودکش	۹/۵۲	۸/۸۰۰
سوختن ناقص	۰/۰۰۴۷	۰/۰۴۷۰
تابش از سطح دیگ	۲/۵	۲/۵۰۰
منابع دیگر هدررفت	۱	۱
مقدار کل هدررفت ^۲	۱۳/۰۲۵	۱۲/۳۵۰
مقدار کل هدررفت ^۳	۲۲/۳۴	۲۱/۷۴۰

۵- مقدار سوخت مصرفی دیگ‌های بخار

از آنجایی که در واحد مورد بحث امکان اندازه‌گیری سوخت مصرفی میسر نبود از موازنه‌ی گرمایی استفاده شد. آب اشباع در دمای ۷۰ درجه‌ی سلسیوس وارد دیگ می‌شود و بخار اشباع با فشار نسبی ۶ بار از دیگ خارج می‌گردد. از طرفی از سوخت مصرفی برای گرمایش آب

1. Boiler Power Value

۲. بر مبنای ارزش گرمایی خالص

۳. بر مبنای ارزش گرمایی ناخالص

در دیگ‌هایی که در فشارهایی پایین‌تر از فشار طراحی کار می‌کنند؛ هوای اضافی باید بیشتر از مقدار توصیه شده باشد زیرا به دلیل عدم کارکرد مشعل در شرایط طراحی، اختلاط سوخت و هوا به درستی انجام نشده و در نتیجه مقدار هوای اضافی بیشتری برای سوختن کامل، لازم است [۱۸]. از طرفی به دلیل نبود یک دستگاه اندازه‌گیری ترکیب درصد در مسیر گازهای خروجی دیگ و نبود امکان اندازه‌گیری نتایج تغییر هوای اضافی و اصلاح شرایط جدید، از تغییر هوای اضافی دیگ صرف‌نظر می‌شود.

با کاهش ده درصدی هوای اضافی، بازدهی سوختن حدود یک درصد بیشتر می‌شود [۶]. این مقدار صرفه‌جویی - به اضافه‌ی صرفه‌جویی ناشی از کاهش توان پروانه مشعل - هر چند زیاد نیست اما در یک بازه‌ی زمانی طولانی می‌تواند با توجه به افزایش تعداد دیگ‌های بخار موجود در واحد، قابل توجه شود. یک راه‌حل دیگر می‌تواند استفاده از مشعل‌هایی با هوای اضافی کم باشد. در این مشعل‌ها فرایند سوختن صرفاً نیازمند دو تا پنج درصد هوای اضافی است. کاهش هوای اضافی تا پنج درصد باعث کاهش هزینه‌های سوخت تا تقریباً دو درصد می‌شود. استفاده از این مشعل‌ها خصوصاً در شرایط عملیاتی زیر شرایط طراحی دیگ -مانند شرایط کاری این واحد- مفیدتر است.

۲-۶ کاهش دمای گاز خروجی دودکش

گاز خروجی از دودکش به طور میانگین حدود ۵۵ تا ۸۰ درجه‌ی سلسیوس گرم‌تر از بخار تولیدی است. گرم‌تر بودن گاز خروجی از این مقدار، نشانگر رسوب گرفتن لوله‌های دیگ و کاهش ضرایب انتقال گرما، اشکال در تصفیه‌ی آب ورودی و یا اشکال در کار دمنده‌ی هوای ورودی به مشعل است.

در واحد مورد بررسی، دمای گاز خروجی دیگ حدود ۲۱۵ درجه‌ی سلسیوس است که با توجه به دمای حدود ۱۵۵ درجه‌ی سلسیوس بخار خروجی، دمای مناسبی است. از گاز خروجی از دودکش می‌توان به عنوان یک منبع بالقوه‌ی انرژی گرمایی استفاده کرد. اما همان‌طور که قبلاً اشاره شد، گاز خروجی را نمی‌توان از دمای مشخصی خنک‌تر کرد. این دما به نوع سوخت و محتوای گوگرد آن بستگی دارد. برای گاز طبیعی این کمینه‌ی دمایی حدود ۱۰۴ درجه‌ی سلسیوس است. از طرفی هر ۲۵ درجه‌ی سلسیوس کاهش دمای گازهای خروجی، افزایش یک درصدی بازدهی دیگ را به دنبال دارد [۵]. برای اطمینان

بیشتر به شکل مونواکسید کربن و یا هیدروکربن‌های نسوخته در گاز خروجی نمایان می‌شود و علاوه بر کاهش بازدهی گرمایی واحد، مشکلات زیست‌محیطی فراوانی به وجود می‌آورد. افزایش بیش از حد هوای اضافی نیز زبان‌های فراوان ذکر شده‌ی زیر را در پی دارد:

- سوخت بیشتری برای گرم کردن هوای اضافی ورودی به مشعل، لازم است.
- هوای اضافی، دمای شعله و بازدهی گرمایی را کاهش می‌دهد.
- افزایش هوای اضافی شدت جریان گرمی گازهای خروجی را افزایش می‌دهد و یک فشار مثبت در محفظه‌ی سوختن ایجاد می‌کند و سبب بالا رفتن افت فشار می‌شود.
- برای اندازه‌گیری هوای اضافی باید ترکیب گازهای خروجی را در اختیار داشت. همان‌طور که اشاره شد در واحد مورد نظر مقادیر تجزیه‌ی گازهای خروجی اندازه‌گیری شده است. با این حال مجدداً و برای اطمینان از درستی اعداد گزارش شده مقادیر هوای اضافی برای دو دیگ موجود در کارخانه محاسبه می‌گردد. برای این کار از رابطه‌ی (۶) استفاده می‌شود [۱۷].

$$A = \frac{2.76 \times O_p}{(100 - CO_p) - 4.76 \times O_p} \times 100 \quad (6)$$

با استفاده از اعداد جدول (۲) و به کمک رابطه‌ی (۶) برای دیگ شماره‌ی یک، مقدار هوای اضافی ۱/۱۷٪ به دست می‌آید که با مقدار گزارش شده در جدول (۲) هماهنگ است. اما محاسبات برای دیگ شماره‌ی دو مقدار هوای اضافی را ۲/۱۵٪ به دست می‌دهد که بسیار کمتر از مقدار گزارش شده‌ی ۳/۳۸٪ است. این دو دیگ، شرایط کاری مشابهی دارند و از طرفی، ترکیب درصد اجزای گاز خروجی در هر دو دیگ تقریباً یکسان است و این اختلاف زیاد بین مقادیر هوای اضافی گزارش شده نمی‌تواند درست باشد. بنابراین از مقادیر محاسبه شده با استفاده از رابطه‌ی (۶) به جای مقادیر محاسبه شده در گزارش استفاده می‌شود.

هر چند در برخی از مراجع [۶] هوای اضافی توصیه شده برای دیگ‌های بخار گازسوز با مکش اجباری بین پنج تا ده درصد توصیه شده است، اما این مقدار هوای اضافی برای دیگ‌هایی است که در شرایط طراحی کار می‌کنند و بین شرایط طراحی (عموماً منظور فشار دیگ است) و شرایط کار متعارف، اختلاف چندانی نیست.

۴-۶ کنترل جریان تخلیه‌ی دیگ (زیرآب) و استفاده از

انرژی آن

تخلیه‌ی دیگ بخار یا زیرآب زدن یک عمل ضروری برای حفظ شرایط مناسب آب داخل دیگ‌های بخار است. آب ورودی دیگ بخار محتوی جامدات محلول است که رفته رفته با تبخیر آب در دیگ باقی مانده و غلظتشان بیش تر می‌شود. با این کار، حجم معینی از آب داخل دیگ تخلیه شده و آب تازه جایگزین آن می‌شود و مقدار کل مواد محلول در آب دیگ در حد بهینه باقی می‌ماند. تخلیه‌ی دیگ می‌تواند هدر رفت زیادی ایجاد کند زیرا آب تصفیه شده‌ای را که به دیگ پمپ شده و در آستانه‌ی تبخیر است از آن خارج می‌کند. در تخلیه‌ی دیگ باید دو نکته‌ی زیر بررسی شود:

- اولین و مهم‌ترین نکته آن است که میزان تخلیه نباید از کمینه مقدار مورد نیاز بیشتر باشد.
- بازیافت انرژی از آب تخلیه شده باید بررسی شود. به‌طور متوسط حدود ۵۰٪ انرژی گرمایی آب تخلیه شده قابل بازیابی است [۲۰].

برای این منظور با نوشتن یک رابطه‌ی موازنه‌ی جرم در مورد دیگ و با فرض نبودن مواد جامد در بخار خروجی، می‌توان رابطه‌ی (۷) را به دست آورد.

$$B = \frac{S_f}{S_b - S_f} \times 100 \quad (7)$$

رابطه‌ی (۷) هرچند مقدار واقعی تخلیه را محاسبه نمی‌کند، اما می‌تواند برای تعیین تخمینی مقدار تخلیه مورد استفاده قرار گیرد. مقدار واقعی تخلیه مسلماً از این مقدار کمتر نخواهد بود. شرایط عملیاتی آب دیگ مطابق اطلاعات اخذ شده از واحد به شرح زیر است:

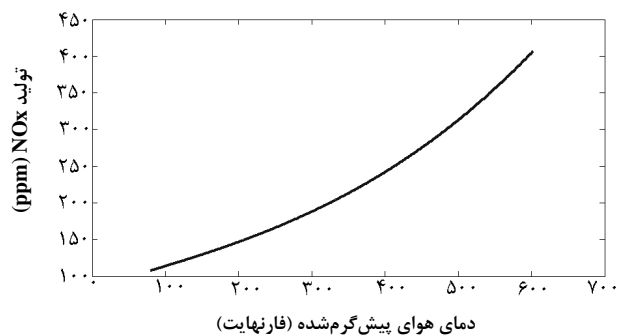
مقدار TDS آب ورودی	۱۰۰۰ ppm
مقدار پذیرفتنی TDS آب دیگ	۳۵۰۰-۴۵۰۰ ppm
فشار (میانگین) بخار دیگ	۶ بار نسبی

با استفاده از رابطه‌ی (۷) مقدار تخلیه (برحسب درصد آب ورودی) ۳۳/۳۳٪ محاسبه می‌شود. پس مقدار آب ورودی به دیگ برای تولید ۵۰۰۰ کیلوگرم در ساعت بخار ۶۶۶۶/۷ کیلوگرم در ساعت خواهد بود.

از عدم کاهش دمای گاز خروجی از دودکش در حین خروج از آن و جلوگیری از خوردگی دودکش، کاهش دمای گاز تا ۱۱۵ درجه بررسی می‌شود. هرچند در حالت عادی نیز معمولاً دهانه‌ی انتهایی دودکش به دلیل نفوذ هوای بیرون به شدت دچار خوردگی می‌شود. بر این اساس و با استفاده از رابطه‌ی (۱)، مقدار واقعی افزایش بازدهی ۴/۹٪ محاسبه می‌شود.

۳-۶ پیش گرمایش هوا

دمای هوای احتراق از عوامل مهم در بازدهی فرایند سوختن است. سوختن در دمایی بسیار بالاتر از دمای هوای ورودی انجام می‌شود. بنابراین هر قدر هوای ورودی گرمتر شود مقدار کمتری انرژی حاصل از سوختن صرف گرم کردن هوای ورودی می‌شود. به ازای هر ۲۵ درجه‌ی سلسیوس افزایش دمای هوای ورودی، بازدهی دیگ یک درصدی بیشتر خواهد شد. با این حال، با افزایش دمای هوای ورودی مقدار تولید اکسیدهای نیتروژن (NO_x) بیشتر می‌شود که از این نظر نامطلوب است. رابطه‌ی دمای هوای ورودی و مقدار تولید اکسیدهای نیتروژن در شکل (۲) آمده است. با دقت در شکل (۲) می‌توان دریافت که با افزایش دمای هوای ورودی به ۱۵۰ درجه‌ی سلسیوس مقدار اکسیدهای نیتروژن از ۲۰۰ قسمت در میلیون بیشتر نخواهد شد. (استاندارد ملی ایران در این مورد حد آلودگی را ۳۵۰ قسمت در میلیون در نظر گرفته است).



شکل ۲- رابطه‌ی دمای هوای ورودی و مقدار NO_x تولیدی [۱۹]

این افزایش دمای هوای ورودی می‌تواند صرفه‌جویی زیادی، حدود ۵/۲٪، در فرایند ایجاد کند. با استفاده از رابطه‌ی (۱) مقدار واقعی افزایش بازدهی ۶/۲۵٪ به دست می‌آید.

در واحد مورد بحث، چگالیده‌ی برگشتی دمایی نزدیک ۹۰ درجه‌ی سلسیوس دارد و حدود ۶۰٪ بخار تولیدی به چگالنده برمی‌گردد. در کارخانه از این منبع ارزشمند انرژی در یکی از برج‌های جذب واحد تولید استفاده می‌شود که نیاز به آب نسبتاً گرم قلیایی به عنوان محیط جاذب دارد.

مقدار هدررفت انرژی را می‌توان با استفاده از مقادیر آنتالپی آب اشباع در دمای ۹۰ درجه‌ی سلسیوس به دست آورد. با فرض بازدهی متوسط ۷۸ درصدی دیگ‌ها، معادل گاز طبیعی این مقدار هدررفت ۳۱۸۵۴۶ مترمکعب استاندارد گاز طبیعی در سال محاسبه می‌شود که هزینه‌ی سالانه‌ای برابر ۵۰۴۸۹۵۴۱ ریال خواهد داشت.

در واحد مورد بحث سیستم جمع‌آوری و برگشت چگالیده به درستی نصب نشده و نشتی‌هایی دارد، بنابراین چگالیده‌ی تولیدی آلوده است و نمی‌تواند به عنوان خوراک دیگ بخار استفاده شود. در استفاده از آن برای تولید بخار (تبخیر ناگهانی) هم باید توجه کرد که احتمال آلودگی بخار تولیدی از این مخزن مانع به‌کارگیری آن در سیستم هوازدا قبل از دیگ است و باید از بخار تولیدی به صورت غیر مستقیم استفاده شود. از طرفی امکان تصفیه و استفاده‌ی مجدد از چگالیده را هم نباید دور از ذهن داشت. چگالیده آبی است که - هرچند آلوده باشد- از آب ورودی به سیستم به مراتب خالص‌تر است. چگالیده مانند زیرآب قابلیت استفاده دارد و می‌توان انتظار داشت که بتوان حداقل نیمی از این گرما را بازیابی کرد، هرچند باید به دنبال راه‌هایی بود که از آب هم استفاده‌ی مجدد کرد. پس مقدار صرفه‌جویی را می‌توان سالانه حداقل ۱۵۹۲۷۳ مترمکعب استاندارد گاز طبیعی یعنی حدود ۲۵۲۴۴۷۷۰ ریال دانست.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، راه‌های هدررفت انرژی در یک واحد تولید بخار صنعتی بررسی و مقادیر آن محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهند که می‌توان سالانه از هدررفت ۸۴۶۹۰۲ مترمکعب استاندارد گاز طبیعی در این واحد جلوگیری کرد که این صرفه‌جویی (به اضافه‌ی صرفه‌جویی ناشی از بازگشت آب) حدود ۱۳۸۰۷۰۰۳۴ ریال سود عاید این واحد صنعتی خواهد کرد. این مبلغ حدود ۱۹/۸٪ هزینه‌ی سالانه‌ی سوخت برای تولید بخار واحد است.

این اقدامات علاوه بر کاهش مصرف گاز طبیعی و آب کارخانه، از دید منطقه‌ای و استانی نیز مهم است. این واحد صنعتی در ناحیه‌ای قرار

باتوجه به داده‌های آنتالپی آب اشباع در فشار شش بار نسبی و دمای ورودی ۲۰ درجه‌ی سلسیوس^۱ می‌توان مقدار هدررفت گرما را به دست آورد و با استفاده از ارزش گرمایی گاز طبیعی و بازدهی محاسبه شده مقدار معادل این هدررفت را بر اساس مترمکعب استاندارد گاز طبیعی تعیین کرد. بر این اساس مقدار هدررفت، معادل ۴۱۵۲۰۸ مترمکعب استاندارد گاز طبیعی در سال به دست می‌آید.

این هزینه‌ها تنها برای گرمایش آب مصرف می‌شوند و هزینه‌های خرید آب، تصفیه و انتقال آن به دیگ بخار محاسبه نشده است. با توجه به این‌که هزینه‌های سوخت ۹۰ تا ۹۵ درصد هزینه‌های بخار تولیدی را به خود اختصاص می‌دهند^۲ [۲۰]، می‌توان تخمینی از کل هدر رفت را به دست آورد. این مقدار، ۷۳۱۲۲۷۴۲ ریال در سال خواهد بود.

مقدار زیاد زیرآب در این دیگ ناشی از ضعف سیستم پیش تصفیه (مشکل در ستون‌های رزین، وجود نشتی و عوامل دیگر) و یا کیفیت بسیار نازل آب ورودی است و باید چاره‌ای برای آن اندیشیده شود، اما از دید صرفه‌جویی، همان‌طور که اشاره شد حداقل، نیمی از این مقدار گرما قابل بازیابی است. پس بهای گرمای قابل استفاده حداقل ۳۶۵۶۱۳۷۱ ریال در سال خواهد بود.

۵-۶ استفاده از چگالیده و مدیریت استفاده از آن

در سیستم‌های فرایندی که از بخار برای گرمایش استفاده می‌شود تنها از گرمای نهان بخار بهره‌گیری می‌شود و گرمای محسوس بخار عموماً بدون استفاده در چگالنده باقی می‌ماند. از طرفی چگالیده، آب تصفیه شده‌ای است که هوازداپی شده و بنابر این در سیستم‌های پیشرفته‌ی تولید بخار به چگالیده به چشم یک منبع ارزشمند انرژی و آب با ارزش نگاه می‌شود. اگر سیستم جمع‌آوری چگالیده به درستی کار کند، یعنی مانع آلودگی آن شده و نیز از کاهش دمای زیاد آن جلوگیری شود، می‌تواند نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی داشته باشد. با کاهش ناگهانی فشار^۳ چگالیده می‌توان بسته به اختلاف فشار چگالیده‌ی ورودی و بخار تولیدی تا ۱۵٪ جرم آب ورودی را به بخار تبدیل کرد [۲۱].

۱. دمای آب ورودی به واحد هوازدا که با بخار تولیدی از دیگ به طور غیر مستقیم از سوختن سوخت گرما می‌گیرد.

۲. در مرجع ۲۰ نسبت اشاره شده - برای کشور انگلستان - ۸۰ تا ۸۵ درصد است؛ اما با توجه به هزینه‌ی بسیار کم آب صنعتی در کشورمان به نظر می‌رسد این عدد برای نسبت هزینه‌های تولید بخار در ایران درست نباشد.

3. Flash

درصد حجمی دی اکسیدکربن در گاز خروجی (بر مبنای خشک)(%)	CO_2	گرفته که با مشکل کمبود آب دست به گریبان است و از طرفی، نیز برودت هوا و مصرف زیاد مشترکان خانگی در فصل زمستان مشکلات زیادی را در تامین گاز واحدهای صنعتی ایجاد می‌کند. از این رو واحدهای صنعتی موجود عموماً در زمستان دچار قطعی گاز می‌شوند و دارای مخازن نسبتاً بزرگی برای ذخیره‌ی گازوئیل هستند.
درصد حجمی مونوکسیدکربن در گاز خروجی (بر مبنای خشک)(%)	CO	پیشنهاد می‌شود نکات زیر در بررسی‌های آینده مد نظر قرار گیرد:
مقدار افزایش بازدهی دستگاه (%)	E	• انتخاب بهترین شرایط عملیاتی دیگ‌های بخار کارخانه
هدررفت گرما (kJ)	LV	همان‌طور که اشاره شد دیگ‌های بخار کارخانه در شرایط طراحی کار نمی‌کنند و این مسأله علاوه بر کاهش خشکی بخار تولیدی و در نتیجه افزایش مقدار چگالیده، افزایش سرعت بخار تولیدی و در نتیجه افزایش افت فشار و گرما در لوله‌ها و باعث مشکلاتی در طرز کار مناسب مشعل‌ها نیز می‌شود.
محتوای گرمایی سوخت (kJ)	H	• انتخاب بهترین روش استفاده از گرماهای هدر رفته در فرایند بررسی امکان استفاده از خنک‌کن میانی سیستم تولید هوای فشرده‌ی کارخانه برای پیش گرمایش هوای ورودی به دیگ بخار
ثابت هاسنتین	k_s	• بررسی امکان بهره‌برداری بهتر از چگالیده و زیرآب (انرژی و آب)
ثابت بدون بعد	k_c	• بررسی اقتصادی و فنی روش‌های کاهش مقدار زیرآب دیگ‌های بخار
نسبت حجمی اکسیژن در گاز خروجی (بر مبنای خشک)(%)	O_2	
سطح ذرات جامد محلول در آب تغذیه‌ی دیگ بخار (ppm)	S_f	
سطح قابل قبول ذرات جامد محلول در آب دیگ (ppm)	S_b	
هدررفت گرمای ناشی از دود خروجی (%)	t	
دمای محیط (درجه‌ی سانتی‌گراد)	t_a	
دمای دود خروجی دیگ (درجه‌ی سانتی‌گراد)	t_s	
بازدهی (%)	η	
بازدهی دیگ بر مبنای ارزش گرمایی ناخالص سوخت	η_G	
بازدهی جدید دستگاه (%)	η_n	
بازدهی دیگ بر مبنای ارزش گرمایی خالص سوخت (%)	η_N	
بازدهی قبلی دستگاه (%)	η_o	

۸- تشکر و قدردانی

از محبت‌ها و تلاش‌های فراوان آقای مهندس عربی در دفتر ارتباط با صنعت دانشکده‌ی مهندسی دانشگاه سمنان و آقایان مهندس سیادت‌پور، مهندس ملک‌علایی، مهندس ربانی و کمندی در واحد صنعتی یاد شده تشکر و قدردانی می‌شود.

فهرست نشانه‌های کوتاه

نسبت ارزش گرمایی ناخالص سوخت به ارزش گرمایی خالص آن.	a
درصد هوای اضافی (%)	A
درصد تخلیه‌ی آب دیگ (%)	B
هدررفت گرمایی (%)	L
کل هدررفت گرمایی برحسب ارزش گرمایی ناخالص سوخت (%)	L_G
کل هدررفت گرمایی برحسب ارزش گرمایی خالص سوخت (%)	L_N

مراجع

- [۱] روزنامه‌ی رسالت، شنبه اول اردیبهشت ۱۳۸۶، ص ۴، به نقل از خبرگزاری فارس از قول سیدرضا کسایی زاده، مدیر عامل [وقت] شرکت گاز.
- [۲] سخنرانی حبیب‌الله بیطرف (وزیر وقت نیرو) در پنجمین همایش ملی انرژی ایران (هفدهم و هجدهم اردیبهشت ۱۳۸۴) قابل دسترس در وب‌گاه [بررسی شده در تاریخ ۱۳۸۷/۱۰/۸]:
<http://www.iranenergy.org.ir/library/articles/5%20articles%20national%20energy%20congress/speeches/bit-araf.pdf>

- [12] HuangBJ, Yen RH, Shyu WS. "A steady-state thermal efficiency model of firetube shell boiler", ASME J Eng Gas Turbines Power, Vol.110, (1988), 173-179.
- [13] J. Bujak "Mathematical modelling of a steam boiler room to research thermal efficiency", Energy, Vol.33, (2008), 1779-1787.
- [14] W. Kaewboonsong, V.I. Kuprianov, N. Chovichien, "Minimizing fuel and environmental costs for a variable-load power plant (co-)firing fuel oil and natural gas Part 1. Modeling of gaseous emissions from boiler units", Fuel Processing Technology, Vol.87, (2006), 1085-1094.
- [15] P. Basu, K.F. Cen, L. Jestin, "Boilers and Burners", Springer, New York, (2000).
- [16] V. Ganapathy, "Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators: Design, Applications and Calculations", Marcel Dekker, Inc, New York, (2003).
- [17] راجان ج ج، "بهینه‌سازی بازدهی انرژی در صنعت"، ترجمه معتمد هاشمی میرمحمد یوسف، تهران، چ اول، نشر ذره، ۱۳۸۵.
- [18] USA Department of Energy (DOE), "Steam Digest 2002, A compendium of articles from 2002 on the technical and financial benefits of steam efficiency", (2002)
- [19] Stephen C. Wood, "Select the Right NOx Control", Chem. Eng. Prog., January (1994), 32-38
- [20] دفتر بهینه‌سازی انرژی وزارت نیرو، "راهنماهای فنی مدیریت انرژی: ج ۲۰، بخار"، چ اول، تهران، وزارت نیرو.
- [21] Spirax Sarco Inc., "Design of Fluid Systems", (2004)
- [3] بی اسمیت؛ کرگ، "اصول مدیریت انرژی"، ترجمه‌ی صادقی شهناز؛ طباطبایی مهرداد؛ ساعدی داریان داریوش؛ منصورجاء محمد حسین، نشر دانشگاه، چ اول، تهران، آذر ۱۳۷۶.
- [4] میراحمدی؛ سید محسن؛ "صرفه‌جویی مصرف انرژی در صنعت: مطالعه‌ی موردی یک واحد صنعتی"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه سمنان، ۱۳۸۶.
- [5] Giovanni Petrecca, "Industrial Energy Management: Principles and Applications", Kluwer Academic Publishers, (1993).
- [6] Wayne C. Turner, "Energy Management Handbook", 5th Ed, Fairmont Press Inc., (2005).
- [7] Charles E. Baukal, Jr. Vladimir Y. Gershten, Xianming Li, "Computational Fluid Dynamics in industrial combustion", CRC press, (2001).
- [8] Bryden, K.M., Ashlock, D.A., McCorkle, D.S. and Urban, G.L., "Optimization of heat transfer utilizing graph based evolutionary algorithms". Int. J of Heat and Fluid Flow, Vol.24, (2003), 267-277.
- [9] Zhou, H., Cen, K. and Fan, J., "Modeling and optimization of the NOx emission characteristics of a tangentially fired boiler with artificial neural networks", Energy, vol.29, (2004), 167-183.
- [10] Chu, J.-Z., Shieh, S.-S., Jang, S.-S., Chien, C.-I., Wan, H.-P. and Ko, H.-H., "Constrained optimization of combustion in a simulated coal-fired boiler using artificial neural network model and information analysis", Fuel, Vol. 82, (2003), 693-703.
- [11] A. Saario, A. Oksanen, M. Ylitalo, "Combination of genetic algorithm and computational fluid dynamics in combustion process emission minimization", Combustion Theory and Modeling, Vol.10, No.6, (2006), 1037-1047.