



## تحلیل ترموآکونومیک و زیست محیطی بویلر چگالشی با سوخت بیومس و مقایسه ی آن با بویلر معمولی

**ابراهیم بیدار**

دانشجوی کارشناسی ارشد ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر  
Bidar815@gmail.com

**رضا سپاهی سامیان**

استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر

**محمود نوروزی**

استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر

### چکیده

در این پژوهش به بررسی ترموآکونومیک بویلر چگالشی با سوخت بیومس پرداخته شده است. برای این منظور از دیدگاه صرفه جویی در مصرف انرژی و همچنین نیاز به سرمایه گذاری اولیه، یک واحد بویلر چگالشی نمونه که با استفاده از سوخت بیومس (تراشه های چوب) کار می کند در نظر گرفته شده است. نتایج تحلیل انرژی و تحلیل اقتصادی این واحد ارائه شده است تا معین گردد آیا استفاده از بویلرهای چگالشی به جای بویلرهای متداول و معمولی از نظر صرفه جویی در مصرف انرژی و همچنین از دیدگاه اقتصادی مقرون به صرفه می باشد یا خیر. همچنین پارامترهای مختلف تاثیر گذار بر روی کارکرد یک بویلر چگالشی معرفی شده اند و به بررسی نحوه ی اثر گذاری هر یک بر روی کارکرد بویلر چگالشی پرداخته شده است.

**واژگان کلیدی:** تحلیل ترموآکونومیک، بویلر چگالشی، سوخت بیومس



United Arab Emirates  
Dubai

21  
February  
2016

۲  
اسفند  
۱۳۹۴

دومین کنفرانس بین المللی پژوهش در

مهندسی، علوم و تکنولوژی

2nd International Conference  
on Research in  
Engineering, Science and Technology



## مقدمه

انرژی اشکال مختلفی دارد که هر یک ویژگی ها و کیفیت خاص خود را دارد. کیفیت انرژی با توانایی ایجاد تغییر مترادف است. به عنوان مثال اگر تغییر مورد نظر گرمایش یک اتاق یا تراکم یک گاز یا پیش بردن یک واکنش گرماگیر باشد توانایی  $J \cdot 1000$  انرژی الکتریکی بیش از  $J \cdot 1000$  انرژی گرمایی در  $k \cdot 1000$  و نیز بیش از  $J \cdot 1000$  انرژی گرمایی در  $k \cdot 400$  است. اگر این موضوع را در تحلیل سیستم ها در نظر نگیریم این اختلاف کیفیت های انرژی می تواند گمراه کننده باشد. بنابراین بررسی مشخصه های اشکال مختلف انرژی و کیفیت آن ها و طبقه بندی آن ها با تعریف یک استاندارد ضروری خواهد بود کیفیت یک شکل از انرژی به نحوه ی ذخیره سازی آن بستگی دارد.

ذخیره انرژی می تواند به شکل منظم یا نا منظم باشد که در حالت دوم درجات مختلفی از بی نظمی را داریم. همان طور که می دانیم آنتروپی معیاری از بی نظمی است. کیفیت (قابلیت ایجاد تغییر) اشکال نا منظم انرژی که با آنتروپی مشخص شد متغیر بوده و به شکل انرژی (شیمیایی و حرارتی و...) و پارامترهای حامل انرژی و محیط بستگی دارد. از سوی دیگر اشکال منظم انرژی کیفیتی نامتغیر داشته که با آنتروپی مشخص نمی شوند و قادرند از طریق برهم کنش کار به طور کامل به دیگر شکل های انرژی تبدیل شوند. برای احتساب کیفیت انرژی به یک معیار نیاز است. اصلی ترین و مرسوم ترین معیار کار بیشینه ای است که می توان از شکل معینی از انرژی به عنوان حالت مرجع و با استفاده از پارامترهای محیطی به دست آورد. این معیار کیفیت انرژی، آگرژی نامیده می شود.

مفهوم محیط در روش آگرژی نیز به صورت جسم یا محیطی فراگیر می باشد که در حالت تعادل ترمودینامیکی کامل قرار دارد. بنابراین این محیط فرضی عاری از گرادیان یا تغییر در فشار، دما، پتانسیل شیمیایی انرژی پتانسیل یا جنبشی است و لذا امکان تولید کار به واسطه برهمکنش میان اجزای محیط وجود ندارد. هر سیستم خارج از محیط که دارای یک پارامتر یا بیشتر باشد مثل فشار، دما، پتانسیل شیمیایی و... که با پارامتر متناظر آن در محیط تفاوت نماید دارای پتانسیل کار نسبت به محیط است. بنابراین محیط یک مبنای جامع در ارزیابی پتانسیل کار انواع مختلف سیستم ها است.

همچنین از دیدگاه آگرژی انواع تعادل برای یک محیط به صورت زیر تعریف می شود:

(۱) تعادل محدود شده: شرایطی است که تعادل مکانیکی و حرارتی بین سیستم و محیط ضمن برابری فشار و دمای سیستم و محیط برقرار می شود. در این حالت مواد به وسیله یک مانع فیزیکی از هم جدا شده اند و محیط و سیستم تعادل شیمیایی ندارند.

(۲) تعادل مرده: در این حالت علاوه بر فشار و دما باید پتانسیل های شیمیایی محیط و سیستم با یکدیگر برابر باشد.

(۳) آگرژی همراه با انتقال کار: از آنجایی که کار معادل با شکل معینی از انرژی را معیاری از آگرژی آن تعریف کردیم واضح است که از هر حیث کار معادل با آگرژی است.

(۴) آگرژی همراه با انتقال حرارت: آگرژی یک انتقال حرارت در سطح کنترل از کار بیشینه ای که میتوان با استفاده از محیط به عنوان منبع انرژی حرارت در سطح صفر به دست آید تعیین شود. آگرژی همراه با انتقال حرارت جریان آگرژی حرارتی نامیده می شود.

در سال ۲۰۱۵، ویجانتس و همکارانش به تحلیل اقتصادی استفاده از پکیج چگالشی با سوخت بیومس برای یک خانه نمونه پرداختند (Vigants et al, 2015). آن ها هدف خود را امکان سنجی اقتصادی و فنی استفاده از بویلرهای چگالشی کوچک با



سوخت بیومس برای گرم کردن خانه های روستایی عنوان نمودند. آن ها فرض نمودند که خانه ی فرضی مورد بررسی نیاز به یک سیستم سرمایشی با توان ۸ مگاوات داشته باشد. آن ها با محاسبات خود توجیه پذیری اقتصادی طرح خود را به اثبات رساندند.

در سال ۲۰۰۹، سیپولا و همکارانش به بررسی انتشار ذرات ریز و گاهای گلخانه ای منتشر شده از واحدهای حرارتی کوچک که با سوخت بیومس و براده های چوب کار می کنند پرداختند (Sippula et al, 2009). آن ها برای بررسی خود چهار واحد حرارتی مختلف را مورد بررسی قرار دادند که همگی برای گرمایش خانه های روستایی مورد استفاده قرار می گرفتند. یکی از این واحدهای گرمایشی بر خلاف سه واحد دیگر مجهز به پکیج چگالشی بوده است که آن ها نشان دادند واحدی که مجهز به پکیج چگالشی می باشد می تواند تا ۴۴٪ انتشار گازهای گلخانه ای و تا ۸۴٪ انتشار ذرات ریز معلق را نسبت به سایر واحدها کاهش دهد.

در سال ۲۰۰۸، کوماکلی، به آنالیز انرژی و تحلیل اقتصادی بویلرهای معمولی و بویلرهای چگالشی و مقایسه ی نتایج آن دو با یکدیگر پرداختند (Comakli, 2008). وی عنوان نمود که بویلر چگالشی می تواند تا بیش از ۱۰٪ به کاهش مصرف سوخت کمک کند. همچنین آنالیز اقتصادی هر دو سیستم حرارتی بر اساس روش هزینه ی چرخه ی کار نشان داد که بویلر چگالشی ارزان تر از بویلرهای معمولی می باشد.

در سال ۲۰۰۹، نیز آل جندی آنالیز انرژی و انرژی را برای یک نیروگاه بخاری در کشور اردن مورد بررسی قرار داد (Aljundi. Isam H, 2009). در این پژوهش آنالیز انرژی نشان داد که بیشترین تلفات انرژی را در کندانسور داریم که در حدود ۶۶٪ می باشد و بعد از آن بیشترین اتلاف انرژی مربوط به بویلر می باشد که در حدود ۶٪ می باشد و راندمان حرارتی واحد با استفاده از آنالیز انرژی ۲۶٪ به دست آمده است. ولی آنالیز انرژی نشان داد که بیشترین نابودی انرژی مربوط به بویلر می باشد که در حدود ۷۷٪ کل انرژی ورودی به واسطه ی سوخت می باشد و بعد از آن بیشترین تلفات انرژی مربوط به توربین است که در حدود ۹٪ می باشد و نابودی انرژی در کندانسور تنها ۹٪ است. راندمان حرارتی واحد نیز بر اساس آنالیز انرژی ۲۵٪ به دست آمد. در واقع این پژوهش نشان داد که چقدر اختلاف بین آنالیز انرژی و انرژی وجود دارد و آنالیز انرژی برای یک سیستم حرارتی به تنهایی حتی می تواند گمراه کننده باشد.

خان اغلو و همکارانش نیز در سال ۲۰۰۸، روابط آنالیز انرژی و انرژی را برای موتورهای دیزل تولید کننده قدرت نوشته و به بهینه سازی پارامترهای آن پرداختند (Kanoglu, A et al, 2008). آن ها ضریب بازده موتور دیزل را با استفاده از آنالیز انرژی ۴۷٪ وبا استفاده از آنالیز انرژی ۴۴٪ محاسبه نمودند. در این آنالیز اجزایی که دارای بیشترین نابودی انرژی بودند مشخص شدند تا بتوان با بهینه سازی آن اجزا بازده کلی موتور را افزایش داد.

حسن و همکارانش در سال ۲۰۰۹ روش های آنالیز انرژی و انرژی را برای یک نیروگاه با سوخت زغال سنگ در ترکیه اعمال کردند و به خوبی ناکار آمدی روش آنالیز ترمودینامیکی در مقابل آنالیز انرژی را نشان دادند (Hasan et al , 2009). آن ها بازده انرژی را برای اجزای مختلف محاسبه نمودند و نشان دادند که نتایج به دست آمده از آنالیز انرژی تا چه حد می تواند با واقعیت ناسازگار باشد.

داتا و همکارانش در سال ۲۰۰۷ آنالیز انرژی را برای یک نیروگاه حرارتی با سوخت ذغال سنگ ارایه دادند (Datta et al , 2007). آن ها در این روش سیکل نیروگاه را به سه ناحیه تقسیم کردند و مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش نشان داده شد که بیشترین نابودی انرژی مربوط به بویلر می باشد که در حدود ۶۰٪ کل بار می باشد و بعد از آن بیشترین نابودی انرژی در شیرهای کنترل توربین و پمپ های آب تغذیه رخ می دهد.



United Arab Emirates  
Dubai

دومین کنفرانس بین المللی پژوهش در  
مهندسی، علوم و تکنولوژی

21 February 2016  
۲ اسفند ۱۳۹۴

2nd International Conference  
on Research in  
Engineering, Science and Technology



لازارین و همکارش ضریب عملکرد یک سیستم گرمایشی را در صورت استفاده از بویلرهای چگالشی مورد بررسی قرار داد. (Lazzarin et al, 2009) آن ها نشان دادند که در صورت استفاده از بویلرهای چگالشی حداقل می توان ۱۵٪ بازده سیستم حرارتی را افزایش داد.

در سال ۲۰۱۱، لی و همکارانش به بررسی ضریب عملکرد مبدل های چگالشی و بویلرهای چگالشی پرداختند (Seungro Lee et al, 2011). آن ها تاثیر استفاده از بویلرهای چگالشی را روی ضریب عملکرد سیستم حرارتی مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که در صورت بهینه کردن مبدل حرارتی چگالشی و همچنین استفاده از مشعل میانی می توان ضریب عملکرد سیستم حرارتی را تا ۹۰٪ افزایش داد. همچنین آن ها میزان انتشار NOx و COx را نیز در صورت استفاده از مبدل های حرارتی چگالشی محاسبه نموده و با حالتی که از مبدل چگالشی استفاده نشود مقایسه کرده اند.

در سال ۲۰۱۲، چن و همکارانش به بررسی کاربردهای صنعتی بویلرهای چگالشی پرداختند (Qun Chen et al, 2012). آن ها در این پژوهش به طراحی یک مبدل حرارتی از نوع پوسته و لوله ای با یک پاس پرداختند و در این طراحی مقاومت های حرارتی مختلفی مانند رسوب گذاری سیال گاز، مقاومت هدایت حرارتی فاز گاز، مقاومت حرارتی لوله و ... را مورد بررسی قرار دادند. آن ها ضریب انتقال حرارت جابجایی را برای مبدل فرضی که طراحی کرده بودند در حدود 2.5 Kw/m2 به دست آوردند. آن ها سطح انتقال حرارت لازم برای کندانس کردن محصولات احتراق خروجی از یک بویلر معین را برای حالتی که مبدل حرارتی از جنس فولاد ضد زنگ ساخته شود و حالتی که مبدل چگالشی از جنس فولاد کربن دار با روکش ضد زنگ باشد محاسبه کرده و با هم مقایسه کردند.

در سال ۲۰۰۴، لازارین و همکارانش به بررسی افزایش بازده حرارتی سیستم های گرمایشی در صورت استفاده از بویلرهای چگالشی پرداختند (Lazzarin et al, 2004).

### معادلات حاکم بر مساله

همچنین انرژی یک جریان پایا از ماده بیشینه کاری قابل حصول ضمن تحوولی است که در آن جریان صرف بر هم کنش با محیط از حالت ابتدایی خود به حالت مرده برسد.

لازم به ذکر است که همانند انرژی، انرژی جریانی از ماده ( $\dot{E}$ ) می تواند به اجزای مشخص تقسیم شود. در غیاب آثار مغناطیسی، هسته ای، الکتریسته و کشسانی سطحی  $\dot{E}$  برابر است با:

$$\dot{E} = \dot{E}_K + \dot{E}_P + \dot{E}_{PH} + \dot{E}_O \quad (1)$$

که در آن  $\dot{E}_K$  انرژی جنبشی،  $\dot{E}_P$  انرژی پتانسیل،  $\dot{E}_{PH}$  انرژی فیزیکی،  $\dot{E}_O$  انرژی شیمیایی است. البته رابطه فوق را می توان بر حسب انرژی ویژه نوشت که در آن کافی است که همه ی ترم ها را بر  $\dot{m}$  دبی جرمی جریان تقسیم کرد که داریم:

$$\epsilon = \epsilon_K + \epsilon_P + \epsilon_{PH} + \epsilon_O \quad (2)$$

انرژی های جنبشی و پتانسیل جریانی از ماده اشکالی از انرژی منظم هستند که قابلیت تبدیل کامل به کار را دارند و برابر با:

$$\dot{E}_K = \dot{m} \frac{c^2}{\gamma}, C_0 = \text{سرعت توده ای سیال نسبت به سطح زمین} \quad (3)$$



$$E_p = \rho g z_0 \quad , z_0 = \text{ارتفاع جریان سیال در سطح دریا} \quad (4)$$

اگرژی فیزیکی معادل است با مقدار کار بیشینه قابل حصول وقتی جریان ماده از طریق فرایند های فیزیکی تنها شامل برهم کنش حرارتی با محیط از حالت ابتدایی به حالت محیط  $T_0$  و  $p_0$  می رسد. فرض می کنیم جریان سیالی در حالت  $T_1$  و  $p_1$  وارد مدول شده و در شرایط محیط  $T_0$  و  $P_0$  از آن خارج می شود در این صورت:

$$[(q_0)_{rev}] = T_0(S_0 - S_1) \quad \text{معادله انتقال حرارت به ازای واحد جرم} \quad (5)$$

در این حالت معادله ی انرژی جریان پایا برای مدول به ازای جرم به صورت مقابل است:

$$[(q_0)_{rev}] - [(wx)_{rev}] = h_0 - h_1 \Rightarrow \epsilon_{ph1} = (h_1 - T_0 S_1) - (h_0 - T_0 S_0) \quad (6)$$

می توانیم تابع اگرژی ویژه را مطابق تابع گیبس به صورت  $\beta = h - T_0 S$  تعریف کنیم.

باتوجه به روابط بالا می توان اگرژی فیزیکی گاز کامل را از رابطه زیر محاسبه کرد.

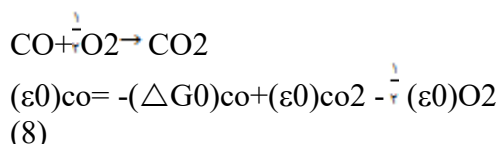
$$\epsilon_{ph} = C_p(T - T_0) - T_0(C_p \ln \frac{T}{T_0} - R \ln \frac{P}{P_0}) \quad (7)$$

اگرژی شیمیایی معادل است با مقدار کار بیشینه ی قابل حصول هر گاه ماده مورد نظر طی فرایندی که تنها شامل انتقال حرارت و مبادله مواد با محیط باشد از حالت محیط به حالت مرده می رسد.

تعریف دیگر برای اگرژی شیمیایی به این صورت است که، اگرژی شیمیایی یک ماده معادل کمینه کار مورد نیاز جهت سنتز آن از مواد محیطی طی فرایند های انتقال حرارت و مبادله مواد صرفا با محیط و عرضه آن در شرایط محیطی است. انرژی

شیمیایی مولی برای گازهای ایده آل مرجع از رابطه ی  $\epsilon_0 = RT_0 \ln \frac{P}{P_0}$  (فشار جزئی مرجع گازی در اتمسفر) است. و برای اغلب سوخت های شیمیایی در جداول تنظیم شده است.

برای به دست آوردن اگرژی شیمیایی یک سوخت گازی باید واکنش سوختن آن با اکسیژن را نوشته و سپس اگرژی شیمیایی آن را محاسبه کنیم برای مثال برای سوخت CO داریم:



برای محاسبه اگرژی شیمیایی یک مخلوط از رابطه ی  $\epsilon_{om} = \sum X_i \epsilon_{oi} + RT_0 \sum X_i \ln X_i$  استفاده می کنیم که  $X_i$  نسبت حجمی یا مولی مواد تشکیل دهنده ی مخلوط است.

همچنین اگرژی یک سیستم بسته را اگرژی غیر جریانی می نامیم که آن را با نماد  $\phi$  و برای مقادیر ویژه و مولی با  $\phi$  نشان می دهیم. اگرژی غیر جریانی فیزیکی از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$\phi_{ph} = (u + p_0 v - T_0 s) - (u_0 + p_0 v_0 - T_0 s_0) \quad (9)$$



United Arab Emirates  
Dubai

21  
February  
2016  
۲  
اسفند  
۱۳۹۴

دومین کنفرانس بین المللی پژوهش در

مهندسی، علوم و تکنولوژی

2nd International Conference  
on Research in  
Engineering, Science and Technology



برای بدست آوردن رابطه ی اگزرژی غیر جریانی باید یک رابطه ای بین اگزرژی سیستم باز با اگزرژی سیستم بسته به دست آوریم تا روابط اگزرژی غیر جریانی از روی روابط اگزرژی جریانی به دست آوریم. برای این کار سیلندر پیستون ایده آل افقی را در نظر می گیریم که هیچ گونه اصطکاکی وجود ندارد و سیال از یک دیفیوزر با قطر کم نسبت به قطر سیلندر وارد آن می شود در نتیجه سرعت سیال داخل سیلندر بسیار ناچیز است و به ازای ورود یک مول از سیال پیستون به اندازه ی  $X_p$  جابجا می شود.

می دانیم که کار خالص برگشت پذیر از رابطه ی  $W_{rev}=(P-P_0)A_pX_p$  به دست می آید که اگر  $A_p$  سطح پیستون باشد  $V$  حجم مولی باشد که  $V=A_pX_p$  است آنگاه  $W_{rev}=(P-P_0)V$  و می دانیم که در غیاب هر برگشت ناپذیری اگزرژی سیال داخل مرز سیستم با اگزرژی وارد شده به سیلندر منهای کار انجام شده توسط سیستم برابر است یعنی:

$$\phi = \varepsilon - W_{rev} = \varepsilon - (P - P_0)V \quad (10)$$

$$\varepsilon = (h - T_0S) - (h_0 - T_0S_0) + \varepsilon_0 \Rightarrow \phi = (u + P_0V - T_0S) - (u_0 + P_0V_0 - T_0S_0) + \varepsilon_0 \quad (11)$$

اگزرژی غیر جریانی را می توان جهت سهولت به دو جز اگزرژی غیر جریانی فیزیکی  $\phi_{ph}$  و اگزرژی غیر جریانی شیمیایی  $\phi_0$  تقسیم کرد که با تعریف تابع اگزرژی غیر جریانی ویژه  $\alpha = u + P_0V - T_0S$  داریم:

$$\phi_{ph} = \alpha - \alpha_0, \quad \phi_0 = \varepsilon_0 \quad (12)$$

یعنی اگزرژی شیمیایی جریانی و غیر جریانی با یکدیگر برابر هستند.

لازم به ذکر است که اگر مرز سیستم بی در رو فرایند شبه ایستا باشد حتما فرایند آنتروپی ثابت  $S = cte$  است در این حالت  $T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$  به دست می آید و در ضمن  $P_2$  را می توان از روی نموداری بعد خطوط اگزرژی غیر جریانی به دست آورد.

همچنین برای گاز ایده آل اگزرژی غیر جریانی از رابطه ی  $\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2}{P_1} \frac{R}{T_1}$  به دست می آید.

و نهایتاً برای گاز ایده آل کاهش اگزرژی غیر جریانی از رابطه ی  $\phi_1 - \phi_2 = R \left[ \frac{T_1 - T_2}{\gamma - 1} + P_0 \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]$  به دست می آید.

همچنین برای تحلیل ترمودینامیک داریم، ترمودینامیک ترکیبی از تحلیل اگزرژی و اقتصاد است. تحلیل اگزرژی قادر است که انهدام اگزرژی را برآورد کند و برای این کار باید برنامه ای تهیه کرد که کل یک سیکل را تحلیل ترمودینامیکی کرده و سپس از حل کامل معادلات بقای جرم و انرژی و تعیین خواص مختلف در کلیه گره های تعیین شده در سیکل به برآورد تلفات اگزرژی بپردازد که این کار جداگانه انجام میگیرد. به این صورت که پس از نوشتن معادلات بقای جرم و انرژی برای کلیه اجزا نیروگاه دستگاه معادلات حاکم با استفاده از روش های تکرار عددی حل میگردد. البته این قسمت چون امر شناخته شده ای است از آوردن آن خودداری شده است پس از برآورد اگزرژی مطلب مهم بعدی دانستن هزینه های این اتلاف است. به هنگام بحث اگزرژی لازم است که بین هزینه اگزرژی و نرخ هزینه تفاوت قایل شویم.

مفهوم مهمی دیگری که باید به آن اشاره شود، مفهوم هزینه یابی اگزرژی می باشد.

برای یک سیستم ترمودینامیکی میتوان تعدادی جریان جرم و انرژی در ورودی و خروجی که مبادله کار و گرما با محیط درآورد، در نظر گرفت. این جریان های جرم و انرژی میتوانند جریان های اگزرژی به داخل و خارج سیستم هم داشته باشند و به طور هم زمان به خاطر برگشت ناپذیری های موجود در سیستم اتلاف اگزرژی هم وجود خواهد داشت. از آنجاکه اگزرژی نشان دهنده ارزش ترمودینامیکی یک جریان است طبیعی است که هزینه این جریان ها را به نرخ انتقال اگزرژی آن مرتبط



United Arab Emirates  
Dubai

21 February  
2016  
۲ اسفند  
۱۳۹۴

دومین کنفرانس بین المللی پژوهش در  
مهندسی، علوم و تکنولوژی  
2nd International Conference  
on Research in  
Engineering, Science and Technology



کنیم به این قسمت ترموآکونومیک هزینه یابی برای آگرززی می گویند. بسته به منشا هزینه ها  $C_i$  برای ورودی  $C_e$  برای خروجی  $C_w$  برای کار و  $C_q$  برای گرما نشان داده میشود یعنی:

$$\begin{aligned} C_i &= c_i \times \dot{E}_i = c_i (\dot{m}_i \times e_i) \\ C_e &= c_e \times \dot{E}_e = c_e (\dot{m}_e \times e_e) \\ C_w &= c_w \times \dot{w} \\ C_q &= c_q \times \dot{Q} \end{aligned} \quad (13)$$

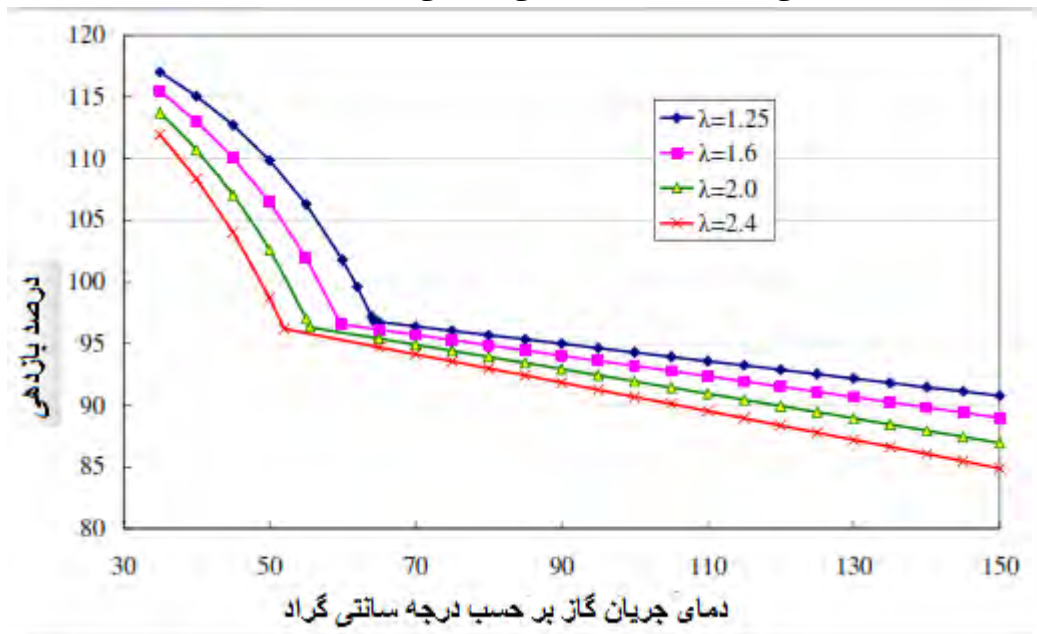
در نتیجه موازنه نرخ هزینه ها به صورت زیر می باشد:

$$\sum C_{e,k} + C_{w,k} = C_{q,k} + \sum C_{i,k} + Z_k \quad (14)$$

با در نظر گرفتن پارامتر های بهینه سازی وهمچنین تعریف تابع هدف که هزینه کل اعم از هزینه خرید تجهیزات، هزینه سوخت و تعمیرات و نگهداری می باشد و با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه سازی می توان تحلیل ترموآکونومیک را انجام داد.

### بازیابی گرمای نهان

مهم ترین مزیت استفاده از بویلرهای چگالشی امکان بازیابی گرمای نهان بخار آب موجود در محصولات احتراق می باشد. این امر موجب می شود که بازده حرارتی سیستم بسیار بهبود یابد. شکل (۱) نحوه ی تغییرات بازده حرارتی نظری سیستم ( با اشاره به ارزش گرمایی خالص) بویلری را که با سوخت تراشه های چوب کار می کند و مجهز به مبدل چگالشی می باشد در برابر دمای محصولات احتراق خروجی به ازای نسبت هوای اضافی نشان می دهد.



شکل ۱. بازده نظری بویلر با سوخت تراشه ی چوب و مجهز به کندانسور به ازای دمای مختلف محصولات خروجی برای نسبت هوای اضافی متفاوت

سوخت مورد استفاده در این بویلر (تراشه های چوب) حاوی ۵۰٪ رطوبت، ۲۵٫۶٪ کربن، ۳٫۰۵٪ هیدروژن و ۲۰٫۴۵٪ اکسیژن می باشد. با افزایش نسبت هوای اضافی، فشار جزئی بخار آب در محصولات احتراق کاهش میابد. این امر منجر به کاهش



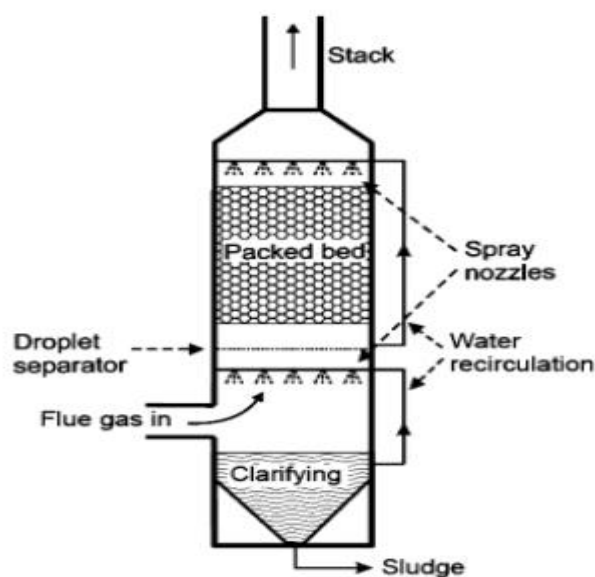
United Arab Emirates  
Dubai



دمای شبنم محصولات احتراق می شود. ضمناً حرارت محسوس بیشتری توسط اجزای تراکم ناپذیر هوا، در شرایطی که نسبت هوای اضافی بیشتر است تلف می شود. در نتیجه در درجه حرارت خروجی یکسان برای محصولات احتراق، برای نسبت هوای اضافی بیشتر بازده حرارتی کمتر می باشد. همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، مبدل حرارتی (کندانسور) چگالشی زمانی که گرمای نهان را بازیابی می کنند منجر به تقطیر بخار آب می شوند. این بازیابی گرمای نهان می تواند منجر به افزایش بهره حرارتی به بیش از ۱۰۰٪ در مقایسه با ارزش حرارتی پایین سوخت ورودی شود.

### جلوگیری از انتشار ذرات معلق و گازهای خطرناک

احتراق چوب که در بخش قبل مورد بررسی قرار گرفت، منجر به تولید ذرات ریزی می شود، در نتیجه میزان انتشار ذرات و گازهای گلخانه ای افزایش می یابد. معمولاً ذرات معلق که از احتراق چوب حاصل می شوند در ابعاد ۵۰ تا ۴۰۰ نانومتر و با غلظت نسبتاً بالایی می باشند. از مبدل های حرارتی (کندانسور) چگالشی می توان به طور هم زمان برای بازیابی تلف شده و نیز جمع آوری این ذرات معلق استفاده کرد. میعانات به صورت یک فیلم از مایع در می آیند که می توانند ذرات معلق را همراه خود حمل کنند و به شکل رسوب آن ها را ته نشین کنند. میزان انتشار ذرات معلق و گاز برای چهار بویلر مختلف با سوخت چوب که در واحدهای حرارتی مختلفی با ظرفیت هایی بین ۵ الی ۱۵ مگاوات مورد استفاده قرار گرفته اند، مورد مطالعه قرار گرفت. همه ی این واحدها مجهز به سیستم Cyclones بودند تا ذرات درشت موجود در محصولات احتراق خروجی را بگیرند. علاوه بر آن، دو تا از بویلرها به سیستم رسوب کننده الکترواستاتیک<sup>۱</sup> مجهز بودند و یکی دیگر از بویلرها به سیستم متراکم کننده جریان گاز خروجی<sup>۲</sup> مجهز بود. در شکل (۲) می توان نمای این سیستم را مشاهده کرد. نتیجه مطالعات نشان داد که بویلر مجهز به متراکم کننده گاز خروجی به طور متوسط ۴۴٪ از ذرات PM<sub>۱۰</sub> و ۸۴٪ از کل ذرات تولیدی را می تواند از بین ببرد.



شکل ۲. نمای شماتیک سیستم مجهز به متراکم کننده Scrubber

<sup>۱</sup> Electrostatic precipitators

<sup>۲</sup> Condensing flue gas scrubber

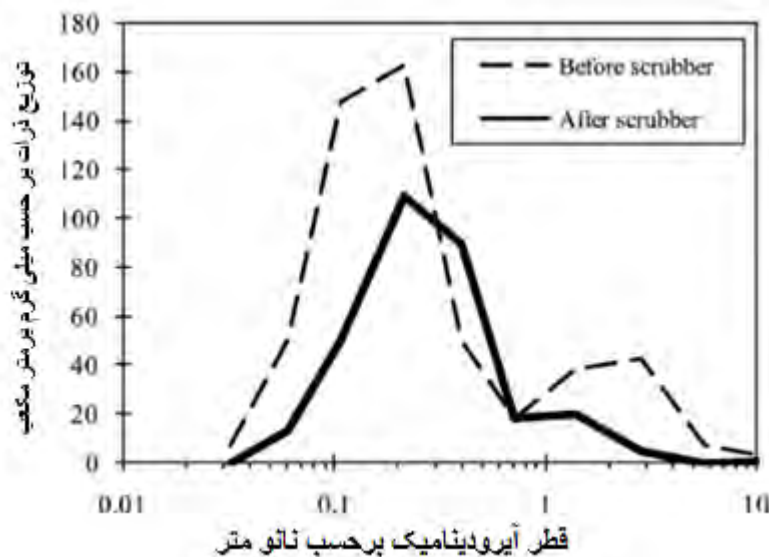




21  
February  
2016

۲  
اسفند  
۱۳۹۴

شکل (۳) نحوه ی توزیع میزان جرم ذرات را قبل و بعد از استفاده از سیستم flue gas scrubber نشان می دهد . همان طور که در شکل نشان داده شده است ، ذراتی با قطر کم تر از ۳۰۰ نانومتر و همچنین قطر ۱ الی ۱۰ میکرومتر ذراتی هستند که توسط این سیستم حذف شده اند . کاهش متوسط ۴۴٪ در ذرات ریز، به خصوص ذرات زیر ۵۰۰ نانومتر می تواند نتیجه ی ترکیب پدیده ی Thermophoresis که روی سطح سرد رخ می دهد و پدیده ی Diffusiophoresis که در اثر تراکم بخار رخ می دهد باشد . اخیرا یک فرآیند تجاری از نوع Wet scrubbing process که آن را FLUE-ACE نیز می نامند توسعه داده شده است. این فرآیند شامل یک Scrubber از نوع Condensing reactive می باشد که می تواند هم زمان برای بازیابی انرژی حرارتی موجود در محصولات احتراق و همچنین کنترل میزان انتشار ذرات معلق به کار برده شود . این سیستم می تواند بیش از ۹۶ الی ۹۹٪ از SO<sub>2</sub>، NO<sub>2</sub> و HCl موجود در محصولات احتراق را حذف کند . و همچنین بیش از ۹۸٪ ذرات با اندازه ی بیش از ۰٫۳ میکرومتر نیز توسط این سیستم حذف می شود .



شکل ۳. نحوه ی توزیع اندازه ذرات قبل و بعد از استفاده از flue gas scrubber

در حال حاضر بیش از ۱۳ مورد از سیستم FLUE-ACE در کشور کانادا نصب شده است که همه ی آن ها در ۱۶ سال اخیر در این کشور مورد بهره وری قرار گرفته اند . اغلب این تجهیزات به منظور کنترل گازهای اسیدی واحدهای تولید کننده ی کاغذ و یا کارخانه های ذوب آهن نصب شده اند.

در کشورما نیز در سال های اخیر به شکل بسیار محدود از بویلرهای چگالشی صنعتی و ساختمانی استفاده شده است . این بویلرها اغلب متعلق به چهار شرکت معروف در زمینه ی بویلرهای چگالشی می باشند که در ایران نیز نمایندگی دارند . این شرکت ها عبارت اند از : شرکت آلمانی Wolf ، شرکت کره ای daymoon ، شرکت آمریکایی Navien و نیز شرکت انگلیسی Kermi. در ادامه یک نمونه از بویلرهای چگالشی Wolf بررسی شده است.

مساله ی مورد بررسی



United Arab Emirates  
Dubai

21 February  
2016  
۲ اسفند  
۱۳۹۴

دومین کنفرانس بین المللی پژوهش در

مهندسی، علوم و تکنولوژی

2nd International Conference  
on Research in  
Engineering, Science and Technology



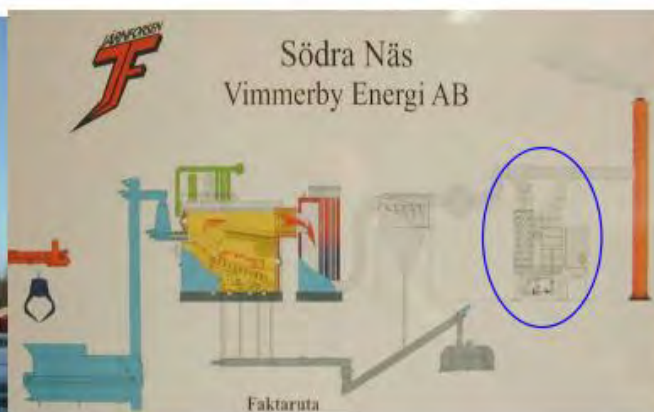
این سیستم حرارتی شامل ۷ بویلر می باشد که چهارتا از آن ها با سوخت مازوت کار می کنند ، دو بویلر با سوخت بریکت و یک بویلر با سوخت تراشه های چوب کار می کند. بویلری که با سوخت بیومس (تراشه های چوب) کار می کند، در سال ۱۹۹۹ ساخته شده و در سال ۲۰۰۰ به بهره برداری رسیده است . بویلری که با سوخت بیومس کار می کند در بین آن ۷ بویلر بزرگترین آن ها می باشد و دارای توان خروجی ۸ مگاوات می باشد . شکل (۴) نمای این واحد را نشان می دهد . جدول (۱) نیز ویژگی های این بویلر را نشان می دهد. این بویلر مجهز به یک کندانسور جریان گاز می باشد.

جدول ۱. جزئیات بویلر با سوخت بیومس

خروجی حرارتی بویلر بر حسب مگاوات	۸
بازده بویلر بر حسب درصد بر اساس استاندارد DIN 1942	۸۵
خروجی حرارتی کندانسور بر حسب مگاوات	۲
بازده حرارتی سیستم با در نظر گرفتن گرمای بازیابی شده توسط کندانسور بر حسب درصد	۱۱۰
تجهیزات احتراق	Grate
فشار بر حسب بار	16
سوخت	پوست درخت و تراشه چوب



(a)



(b)

شکل ۴. نماهایی از سیستم حرارتی

البته در این واحد در طول سال از چهار نوع سوخت بیومس مختلف برای بویلر مذکور استفاده می کنند که عبارت اند از : گاز ناشی از فاضلاب ، بریکت و پوسته های خشکیده درخت ، خاک اره و تراشه چوب . البته سوخت اصلی بویلر همان خاک اره و تراشه های چوب می باشد . این سوخت غالباً از یک کارخانه چوب بری در نزدیک آن محل تامین می شود . میزان رطوبت موجود در چوب ها به طور متوسط ۵۰٪ می باشد . ارزش حرارتی پایین چوب با ۵۰٪ رطوبت  $8000 \text{Kj/Kg}$  می باشد . سوخت توسط کامیون از کارخانه تا انباری در نزدیکی بویلر حمل می شود . سپس با استفاده از یک نوار نقاله به داخل کوره هدایت می شود . کل ظرفیت انبار  $3000 \text{m}^3$  می باشد . که این مقدار تراشه چوب برای چهار روز عملکرد بویلر کافی است.



United Arab Emirates  
Dubai

دومین کنفرانس بین المللی پژوهش در  
مهندسی، علوم و تکنولوژی

21 February 2016  
۲ اسفند ۱۳۹۴

2nd International Conference  
on Research in  
Engineering, Science and Technology



دمای خروجی بویلر ۲۰۰ درجه سانتی گراد است. در کندانسور چگالشی که بعد از بویلر قرار دارد دمای محصولات احتراق تا ۴۵ درجه سانتی گراد کاهش میابد. کل گرمایی که از محصولات احتراق بازیابی می شود در حدود ۲ مگاوات می باشد که مقدار زیادی محسوب می شود. در حدود ۲۷۰۰۰۰۰۰ کرون سوئد (حدوداً ۳۲۰۰۰۰۰ یورو) در سال ۱۹۹۹ برای این واحد سرمایه گذاری شد. این هزینه برای خرید، نصب بویلر با سوخت بیومس، کندانسور چگالشی و تمامی تجهیزات مورد نیاز آن بود. این واحد چون از سوخت های بیومس استفاده می کند بنابراین میزان تولید CO<sub>2</sub> آن نسبت به سایر بویلرها کم تر می باشد. همچنین به دلیل استفاده از کندانسور در مسیر جریان گاز خروجی، ضریب عملکرد واحد بهبود بسیاری یافته است و همچنین میزان انتشار واحد بخصوص انتشار SO<sub>x</sub> آن کاهش یافته است. تقریباً ۵۰ تن در سال از میزان انتشار SO<sub>x</sub> واحد به دلیل استفاده از سوخت بیومس و نیز کندانسور بر سر راه محصولات احتراق کاسته شده است. اگر بجای این بویلر از بویلرهایی با سوخت مازوت استفاده می شد، نیاز به سالانه ۷۰۰۰ تن مازوت برای تولیدی معادل با تولید فعلی بویلر با سوخت بیومس بود. استفاده از مازوت علاوه بر اینکه هزینه سوخت را تحمل می کرد، میزان تولید CO<sub>2</sub> را نیز در حدود ۲۱۰۰۰ تن در سال افزایش می داد. میزان انتشار انواع گازها از بویلر با سوخت بیومس در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲. میزان انتشار گازهای سیستم در سال ۲۰۰۲

آلاینده	میزان انتشار بر حسب Kg/year	فکتور انتشار بر حسب mg/MJ
NO <sub>x</sub>	۱۱۶۰۵	۹۰
CO	۶۷۷۶	۱۰۰
گرد و غبار	۷۸۰۰	۲۵

انرژی حرارتی تولید شده در این واحد به شبکه توزیع حرارت تحویل داده می شود. حدود ۹۰٪ از ۱۹۰۰ آپارتمان و ۴۰٪ از ۱۷۰۰ خانه ی واقع در این روستا به این شبکه توزیع انرژی حرارتی متصل می باشند.

### تحلیل اقتصادی

در ادامه به تحلیل اقتصادی بویلر چگالشی پرداخته می شود. برای این منظور با فرض این که بویلر حرارتی از جنس فولاد ضد زنگ ساخته شود، به بررسی مساله پرداخته شده است.

جدول ۳. هزینه های کلی و مدت زمان برگشت سرمایه برای بویلر چگالشی ساخته شده از فولاد ضد زنگ

هزینه ی اولیه	
(دلار) هزینه ی بویلر	۲۵۶۲۰۰۰
ضریب نصب	۱,۹
(دلار) هزینه ی نصب بویلر	۴۸۶۸۰۰۰
هزینه ی فن	۴۰۰۰۰
(دلار) جمع هزینه اولیه	۴۹۰۸۰۰۰
هزینه تعمیر و نگهداری	
(دلار/KWh) هزینه ی برق مصرفی	۰,۱
(سال/دلار) هزینه ی تجهیزات الکتریکی	۵۸۰۳۰۰

United Arab Emirates  
Dubai

21  
February  
2016  
۲ اسفند  
۱۳۹۴

دومین کنفرانس بین المللی پژوهش در

مهندسی، علوم و تکنولوژی

2nd International Conference  
on Research in  
Engineering, Science and Technology



هزینه ی تصفیه ی شیمیایی (دلار/m <sup>3</sup> )	۰,۴۵
هزینه ی تصفیه میعانات (سال/دلار)	۳۷۶۰۰
ضریب هزینه ی تعمیرات (%)	۶
هزینه ی تعمیرات (سال/دلار)	۲۹۴۴۸۰
سود دهی	
صرفه جویی در مصرف سوخت چوب (t/h)	۵
هزینه ی صرفه جویی در مصرف سوخت (دلار/ton)	۶۰
کل هزینه ی صرفه جویی شده (سال/دلار)	۲۱۰۰۰۰۰
مدت زمان برگشت سرمایه (سال)	۴,۱

### نتیجه گیری

در این پژوهش نشان داده شد که استفاده از بویلرهای چگالشی نه تنها موجب بازیابی حرارت تلف شده و در نتیجه کاهش مصرف انرژی میشوند بلکه میزان انتشار ذرات آلاینده را نیز به شدت کاهش می دهند. بنابراین با توجه به مشکل آلودگی هوا که امروزه با آن مواجه می باشیم، استفاده از این نوع از بویلرها می تواند بسیار مشکل گشا باشد. همچنین امکان استفاده از سیستم های حذف ذرات معلق در این نوع از بویلرها وجود دارد. نشان داده شد که استفاده از سیستم ای حذف کننده ی ذرات معلق می تواند به شدت بر روی کاهش میزان ذرات معلق منتشر شده تاثیرگذار باشند. همچنین مدت زمان برگشت سرمایه نیز ۴,۱ سال به دست آمده است.



## منابع

- Girts Vigantsa , Ivars Veidenbergsa , Edgars Vigantsa , Dagnija Blumberga, “Cost analysis of a wood chip boiler house with a gas condenser”, Energy Procedia 75 ( 2015 ) 1214 – 1220.
- Sippula O, Hokkinen J, Puustinen H, Yli-Pirila P, Jokiniemi J. Particle emissions from small wood-fired district heating units. Energy Fuels 2009;23:2974–82.
- Comakli K. Economic and environmental comparison of natural gas fired conventional and condensing combi boilers. J Energy Inst 2008;81:242–6.
- Aljundi. Isam H, ‘Exergy and Energy Analysis of a Steam Power Plant in Jordan’, Applied Thermal Engineering, Vol. 29, pp. 324\_328, 2009.
- Kanoglu, A. Abusoglu, A. M Isik, S. K ‘ Performance characteristics of a diesel engine power plant’ Energy Conver Manage. vol. 49, pp. 2026\_2031, 2008..
- Hasan HE, Ali VA, Burhanettin, Ahmet D, Suleyman HS, Bahri S, Ismail T, Cengiz G, Selcuk A. Comparative energetic and exergetic performance analyses for coal-fired thermal power plants in Turkey. International Journal of Thermal Sciences 2009; Vol. 48:2179–86.
- Datta A, Sengupta S, Duttagupta S. Exergy analysis of a coal-based 210 MW thermal power plant. International Journal of Energy Research 2007; Vol. 31, 14–28.
- R. Lazzarin, L. Schibuola, ‘Performance analysis of heating plants equipped with condensing boiler, Heat Recovery system,2009, 269\_276.
- Seungro Lee, Sung-Min Kum, Chang –Eon Lee, Journal of Energy, 2011, vol. 36.
- Qun Chen, Karen Finney, Hanning LI, et all, Condensing boiler applications in the process industry , journal of Applied Energy, 2012, vol. 89 , pp. 30-36.
- R . Lazzarin, F. Busato, Performance analysis of different applications for condensing boiler on residential buildings in several climatic area, International conference on Sustainable Energy TEC, 2004.