

## تحلیل ترموآکونومیک و زیست محیطی بویلر چکالشی با سوخت بیومس و مقایسه ی

### آن با بویلر معمولی

میلاذ عبداللهی، اسماعیل جمالی، سید مرتضی بیاره

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی (نویسنده مسئول)

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی- دانشگاه آزاد اسلامی واحد لامرد

۳- استادیار- دانشکده فنی مهندسی- دانشگاه آزاد اسلامی واحد لامرد

Email: miladmak@yahoo.com

### چکیده

در این پژوهش به بررسی ترموآکونومیک بویلر چکالشی 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 چکالشی 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 ارایه شده است تا معین گردد آیا استفاده از بویلرهای چکالشی 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 چکالشی معرفی شده اند و به بررسی نحوه ی اثر گذاری هر یک بر روی کارکرد بویلر چکالشی پرداخته شده است.

کلمات کلیدی: تحلیل ترموآکونومیک، بویلر چکالشی، سوخت بیومس

### ۱. 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  $1000 \text{ J}$  انرژی الکتریکی بیش از  $1000 \text{ J}$  انرژی گرمایی در  $1000 \text{ k}$  و نیز بیش از  $1000 \text{ J}$  انرژی گرمایی در  $400 \text{ k}$  است. اگر این موضوع را در تحلیل سیستم ها در نظر بگیریم 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 قادراند 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 انرژی اگزرژی نامیده می شود.

مفهوم محیط در روش آگرزری 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 تعیین در فشار دما پتانسیل شیمیایی انرژی پتانسیل یاخشی است و لذا امکان تولید کار به واسطه بر همکنش 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 پارامترمتناظر 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 آگرزری 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) آگرزری همراه با انتقال کار: از آنجایی که کار معادل با شکل معینی از انرژی را معیاری از آگرزری آن تعریف کردیم واضح است که از هر حیث کار معادل با آگرزری است.

(۴) آگرزری همراه با انتقال حرارت: آگرزری 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. آگرزری همراه آهنگ انتقال حرارت جریان آگرزری حرارتی نامیده می شود.

## ۲. مروری بر کارهای گذشته

در سال ۲۰۱۵، Vigants و همکارانش [۱] به تحلیل اقتصادی استفاده از پکیج چگالشی با سوخت بیومس برای یک خانه نمونه پرداختند. 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، Sippula و همکارانش [۲] 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. 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، Comakli [۳]، به آنالیز انرژی و تحلیل اقتصادی بویلرهای معمولی و بویلرهای چگالشی و مقایسه ی نتایج آن دو با یکدیگر پرداختند. آن ها عنوان نمودند 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 Aljundi, Isam H آنالیز آگرزری و انرژی را برای یک نیروگاه بخاری در کشور اردن مورد بررسی قرار داد [۴]. 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 آگرزری نشان داد که بیشترین نابودی آگرزری مربوط به بویلر می باشد که در حدود ۷۷٪ کل آگرزری ورودی به واسطه ی سوخت می باشد و بعد از آن بیشترین تلفات آگرزری مربوط به توربین است که در حدود ۹٪ می باشد و نابودی آگرزری در کندانسور تنها ۹٪ است. راندمان حرارتی واحد نیز بر اساس آنالیز آگرزری ۲۵٪ به

دست آمد. در واقع این پژوهش نشان داد که چقدر اختلاف بین آنالیز اگزرژی و انرژی وجود دارد و آنالیز انرژی برای یک سیستم حرارتی به تنهایی حتی می تواند همراه کننده باشد.

Kanoglu, A و همکارانش نیز در سال ۲۰۰۸، روابط آنالیز اگزرژی و انرژی را برای موتورهای دیزل تولید کننده قدرت نوشته و به بهینه سازی پارامترهای آن پرداختند [۵]. آن ها ضریب بازده موتور دیزل را با استفاده از آنالیز انرژی ۴۷٪ و با استفاده از آنالیز اگزرژی ۴۴٪ محاسبه نمودند. در این آنالیز اجزایی که دارای بیشترین نابودی اگزرژی بودند مشخص شدند تا بتوان با بهینه سازی آن اجزا بازده کلی موتور را افزایش داد.

Hasan و همکارانش در سال ۲۰۰۹ روش های آنالیز اگزرژی و انرژی را برای یک نیروگاه با سوخت ذغال سنگ در ترکیه اعمال کردند و به خوبی ناکارآمدی روش آنالیز ترمودینامیکی در مقابل آنالیز اگزرژی را نشان دادند. آن ها بازده اگزرژی را برای اجزای مختلف محاسبه نمودند و نشان دادند که نتایج به دست آمده از آنالیز انرژی تا چه حد می تواند با واقعیت سازگار باشد [۶].

Datta و همکارانش در سال ۲۰۰۷ آنالیز اگزرژی را برای یک نیروگاه حرارتی با سوخت ذغال سنگ ارائه دادند. 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 اگزرژی مربوط به بویلر می باشد که در حدود ۶۰٪ کل بار می باشد و بعد از آن بیشترین نابودی اگزرژی در شیرهای کنترل توربین و پمپ های آب تغذیه رخ می دهد [۷].

Lazzarin و همکارش ضریب عملکرد یک سیستم گرمایشی را در صورت استفاده از بویلرهای چگالشی مورد بررسی قرار داد [۸]. آن ها نشان دادند که در صورت استفاده از بویلرهای چگالشی حداقل می توان ۱۵٪ بازده سیستم حرارتی را افزایش داد.

در سال ۲۰۱۱، Seungro Lee و همکارانش به بررسی ضریب عملکرد مبدل های چگالشی و بویلرهای چگالشی پرداختند [۹]. 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  $NO_x$  و  $CO_x$  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، Qun Chen و همکارانش به بررسی کاربردهای صنعتی بویلرهای چگالشی پرداختند [۱۰]. 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  $2.5 \text{ Kw/m}^2$  به دست آوردند. آن ها سطح انتقال حرارت لازم برای کندانس کردن محصولات احتراق خروجی از یک بویلر معین را برای حالتی که میل 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، Lazzarin و همکارانش به بررسی افزایش بازده حرارتی سیستم های گرمایشی در صورت استفاده از بویلرهای چگالشی پرداختند [۱۱].

### ۳. معادلات حاکم بر مساله

همچنین اگزرژی یک جریان پایا از ماده بیشینه کاری قابل حصول ضمن تحولی 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 اگزرژی جریانی از ماده ( $\dot{E}$ ) می تواند به اجزای مشخص تقسیم شود. در غیاب آثار مغناطیسی هسته ای الکتریسیته و کشسانی سطحی  $E$  برابر است با:

$$E = E_K + E_P + E_{PH} + E_O \quad (1)$$

که در آن  $E_K$  انرژی جنبشی  $E_P$  انرژی پتانسیل  $E_{PH}$  انرژی فیزیکی  $E_O$  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  $m$  دبی جرمی 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:

$$E_K = m \frac{C^2}{\rho} \quad , C_0 = \text{سرعت توده ای سیال نسبت به سطح زمین} \quad (3)$$

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

انرژی 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:

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

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

$$[(q \cdot \text{rev})] - [(w \cdot \text{rev})] = h_0 - h_1 \Rightarrow \epsilon_{ph} = (h_1 - T_0 S_1) - (h_0 - T_0 S_0) \quad (6)$$

می توانیم تابع انرژی ویژه را مطابق تابع گیبس به صورت  $\beta = h - T \cdot S$  تعریف کنیم.

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

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

انرژی 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 انرژی شیمیایی به این صورت است که، انرژی 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  $\epsilon_0 = RT \cdot \ln \frac{P}{P_0}$  به دست می آید که  $P_0$  (فشار جزیی مرجع گازی در اتمسفر) است. و برای اغلب سوخت های شیمیایی در جداول تنظیم شده است.

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



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

همچنین انرژی یک سیستم بسته را انرژی غیر جریانی می نامیم که آن را با نماد  $Q^1$  و برای مقادیر ویژه و مولی با  $\phi$  نشان می دهیم. انرژی غیر جریانی فیزیکی از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

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

برای بدست آوردن رابطه ی انرژی غیر جریانی باید یک رابطه ای بین انرژی سیستم باز با انرژی سیستم بسته به دست آوریم تا روابط انرژی غیر جریانی از روی روابط انرژی 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  $W_{rev} = (P - P_0) A_p x_p$  به دست می آید که اگر  $A_p$  سطح پیستون باشد  $V$  حجم مولی باشد که  $V = A_p x_p$  است آنگاه  $W_{rev} = (P - P_0) V$  و می دانیم که در غیاب هر برگشت ناپذیری انرژی سیال داخل مرز سیستم با انرژی وارد شده به سیلندر منهای کار انجام شده توسط سیستم برابر است یعنی:

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

$$\varepsilon = (h - T \cdot S) - (h_0 - T_0 \cdot S_0) + \varepsilon_0 \Rightarrow \phi = (u + P \cdot V - T \cdot S) - (u_0 + P_0 \cdot V_0 - T_0 \cdot S_0) + \varepsilon_0 \quad (11)$$

انرژی غیر جریانی را می توان جهت سهولت به دو جز انرژی غیر جریانی فیزیکی  $\phi_{ph}$  و انرژی غیر جریانی شیمیایی  $\phi$  تقسیم کرد که با تعریف تابع انرژی غیر جریانی ویژه  $\alpha = u + P \cdot V - T \cdot S$  داریم:

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

یعنی انرژی 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 انرژی غیر جریانی به دست آورد.

همچنین برای گاز ایده آل انرژی غیر جریانی از رابطه ی  $\frac{\gamma R}{\gamma-1} [(T_0 - T_1) T_0 \ln \frac{T_1}{T_0}]$  به دست می آید.

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

همچنین برای تحلیل ترمودینامیک داریم، ترمودینامیک ترکیبی از تحلیل انرژی و اقتصاد است. تحلیل انرژی قادر است که انهدام انرژی 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 انرژی 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 انرژی مطلب مهم بعدی دانستن هزینه های این اتلاف است. به هنگام بحث انرژی لازم است که بین هزینه انرژی و نرخ هزینه تفاوت قایل شویم.

مفهوم مهمی دیگری که باید به آن اشاره شود، مفهوم هزینه یابی انرژی 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 انرژی به داخل و خارج سیستم هم داشته باشند و به طور هم زمان به خاطر برگشت ناپذیری های موجود در سیستم اتلاف انرژی هم وجود خواهد داشت. از آنجاکه انرژی نشان دهنده ارزش ترمودینامیکی یک جریان است طبیعی است که هزینه این جریان ها را به نرخ انتقال انرژی آن مرتبط کنیم به این قسمت ترمودینامیک هزینه یابی برای انرژی می گویند. بسته به منشأ هزینه ها  $C_i$  برای ورودی و  $C_e$  برای خروجی  $C_w$  برای کار و  $C_q$  برای گرما نشان داده میشود یعنی:

$$\dot{C}_i = c_i \times \dot{E}_i = c_i (\dot{m}_i \times e_i)$$

$$\begin{aligned}\dot{C}_e &= c_e \times \dot{E}_e = c_e (\dot{m}_e \times e_e) \\ \dot{C}_w &= c_w \times \dot{W} \\ \dot{C}_q &= c_q \times \dot{Q}\end{aligned}\quad (13)$$

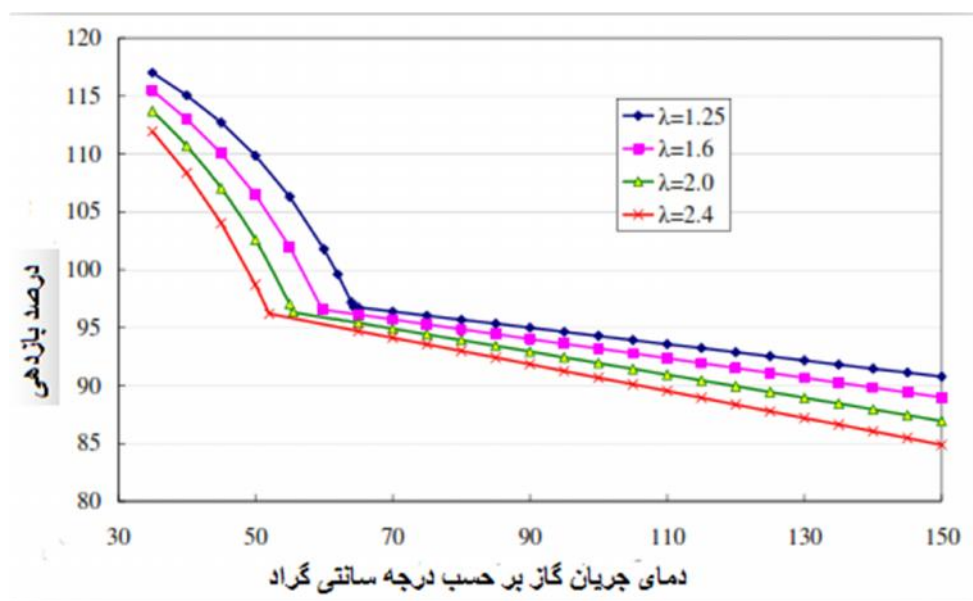
در نتیجه موازنه نرخ هزینه ها به صورت زیر می باشد:

$$\sum \dot{C}_{e,k} + \dot{C}_{w,k} = \dot{C}_{q,k} + \sum \dot{C}_{i,k} + \dot{Z}_k \quad (14)$$

با در نظر گرفتن پارامتر های بهینه سازی و همچنین تعریف تابع هدف که هزینه کل عم 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.

#### ۴. باز یابی گرمای نهان

مهم ترین مزیت استفاده از بویلر های چگالشی امکان باز یابی 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.



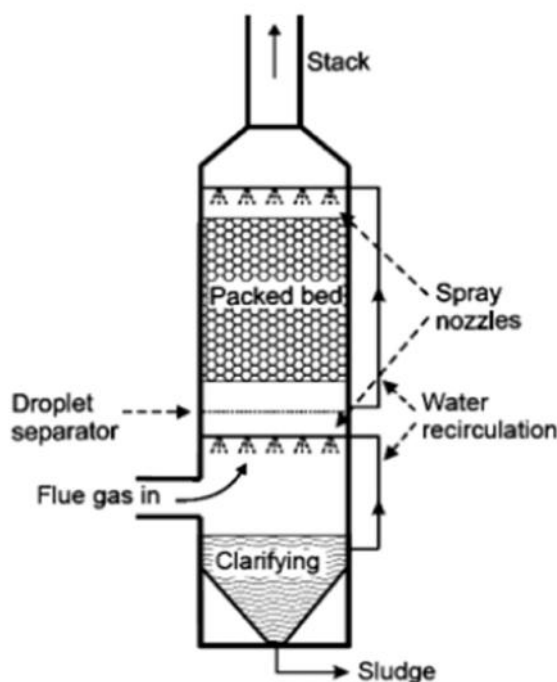
شکل ۱. بازده نظری بویلر با سوخت تراشه ی چوب و مجهز به کندانسور به ازای دمای مختلف محصولات خروجی برای نسبت هوای اضافی متفاوت

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 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 حرارات 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.

### ۵. 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 حرارت 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.

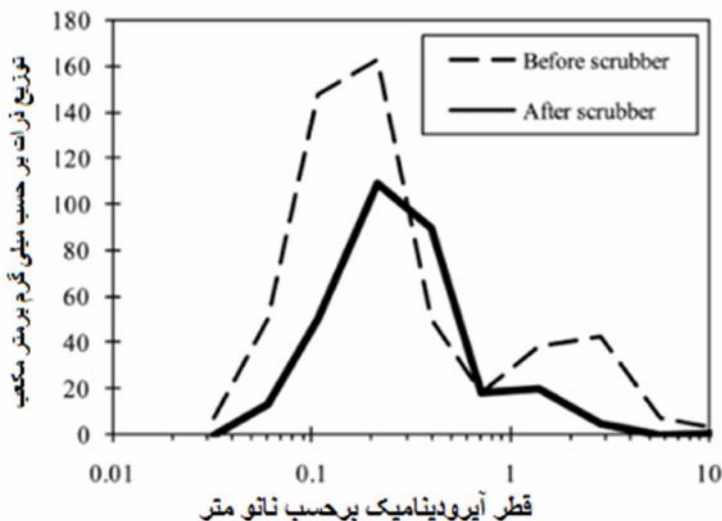


شکل ۲. نمای شماتیک سیستم مجهز به متراکم کننده Scrubber

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

Electrostatic precipitators  
Condensing flue gas scrubber

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. اخیراً 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٪ از SO<sub>2</sub>، NO<sub>x</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.

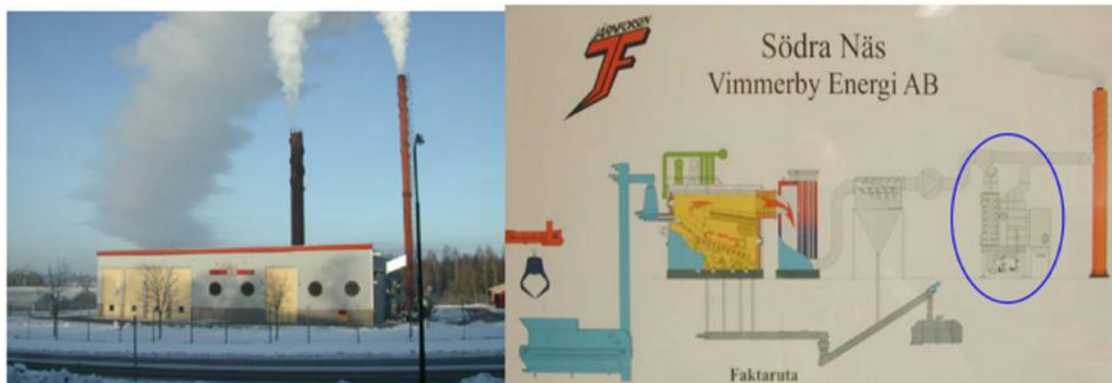
## ۶. مساله ی مورد بررسی

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 ۱۹۴۲	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	۱۶
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 میباشد. 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٪ میباشد. ارزش حرارتی پایین چوب با ۵۰٪ رطوبت  $۸۰۰\text{Kj/Kg}$  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  $۳۰۰\text{m}^۳$  می باشد. که این مقدار تراشه چوب برای چهار روز عملکرد بویلر کافی است. 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  $CO_2$  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  $SO_x$  آن کاهش یافته است. تقریباً ۵۰ تن در سال از میزان انتشار  $SO_x$  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  $CO_2$  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.

## ۷. 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 بویلرهای چگالشی

کندانسور 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	
(KWh/دلار) هزینه ی برق مصرفی	۰.۱
(سال/دلار) هزینه ی تجهیزات الکتریکی	۵۸۰۳۰۰
(m <sup>۳</sup> /دلار) هزینه ی تصفیه ی شیمیایی	۰.۴۵
(سال/دلار) هزینه ی تصفیه میعانات	۳۷۶۰۰

(%) ضریب هزینه ی تعمیرات	۶
(سال/دلار) هزینه ی تعمیرات	۲۹۴۴۸۰
سود دهی	
(t/h) صرفه جویی در مصرف سوخت چوب	۵
هزینه ی صرفه جویی در مصرف سوخت (دلار/ton) چوب	۶۰
(سال/دلار) کل هزینه ی صرفه جویی شده	۲۱۰۰۰۰
(سال) مدت زمان برگشت سرمایه	۴.۱

## ۸. 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.

## ۱۰. مراجع

۱. Girts Vigantsa , Ivars Veidenbergsa , Edgars Vigantsa , Dagnija Blumberga, "Cost analysis of a wood chip boiler house with a gas condenser", *Energy Procedia* ۷۵ ( ۲۰۱۵ ) ۱۲۱۴ – ۱۲۲۰.
۲. Sippula O, Hokkinen J, Puustinen H, Yli-Pirila P, Jokiniemi J. Particle emissions from small wood-fired district heating units. *Energy Fuels* ۲۰۰۹; ۲۳:۲۹۷۳–۸۲.
۳. Comakli K. Economic and environmental comparison of natural gas fired conventional and condensing combi boilers. *J Energy Inst* ۲۰۰۸; ۸۱:۲۴۲–۶.
۴. Aljundi. Isam H, 'Exergy and Energy Analysis of a Steam Power Plant in Jordan', *Applied Thermal Engineering*, Vol. ۲۹, pp. ۳۳۴\_۳۳۸, ۲۰۰۹.
۵. Kanoglu, A. Abusoglu, A. M Isik, S. K ' Performance characteristics of a diesel engine power plant' *Energy Conver Manage.* vol. ۴۹, pp. ۲۰۲۶\_۲۰۳۱, ۲۰۰۸.
۶. 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* ۲۰۰۹; Vol. ۴۸:۲۱۷۹–۸۶.
۷. Datta A, Sengupta S, Duttgupta S. Exergy analysis of a coal-based ۲۱۰ MW thermal power plant. *International Journal of Energy Research* ۲۰۰۲; Vol. ۳۱, ۱۴–۲۸.
۸. R. Lazzarin, L. Schibuola, 'Performance analysis of heating plants equipped with condensing boiler, Heat Recovery system, ۲۶۹\_۲۷۶.
۹. Seungro Lee, Sung-Min Kum, Chang –Eon Lee, *Journal of Energy*, ۲۰۱۱, vol. ۳۶.

۱۰. Qun Chen, Karen Finney, Hanning LI, et all, *Condensing boiler applications in the process industry* , *journal of Applied Energy*, ۲۰۱۲, vol. ۸۹, pp. ۳۰-۳۶.
۱۱. 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*, ۲۰۰۴.