

## بهبود عملکرد بویلرهای پالایشگاه چهارم مجتمع گاز پارس جنوبی

### گاز پارس جنوبی به کمک تحلیل انرژی و انرژی

در مقاله حاضر بهبود عملکرد بویلرهای پالایشگاه چهارم مجتمع گاز پارس جنوبی با استفاده از آنالیز انرژی و انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. پس از مدل سازی، عوامل محیطی موثر در کارایی بویلرهای پالایشگاه از جمله تغییرات دمای محیط، رطوبت نسبی هوا، درصد هوای اضافی و پیش گرمایش آب تغذیه مورد بررسی قرار گرفته است. براساس نتایج بدست آمده راندمان حرارتی و راندمان انرژی بویلر در شرایط عملیاتی پالایشگاه چهارم (دمای محیط  $25^{\circ}\text{C}$ ، رطوبت نسبی  $70\%$  هوا و درصد هوای اضافی  $35\%$ )، به ترتیب  $78/78\%$  و  $39/64\%$  می باشد. همچنین با تنظیم درصد هوای اضافی در محفظه احتراق بویلر راندمان انرژی بویلر می تواند تا  $41/46\%$  افزایش پیدا کند.

سجاد کوچکی نیا<sup>۱</sup>

دانشجوی کارشناسی ارشد

مهدي ديمي بياض<sup>۲</sup>

استاديار

عباس گلناری اردکانی<sup>۳</sup>

دانشجوی کارشناسی ارشد

واژه‌های راهنما: بهینه سازی، بویلر، آنالیز انرژی، راندمان، مجتمع گاز پارس جنوبی

### ۱- مقدمه

امروزه مصرف بهینه انرژی یکی از مهمترین دغدغه های بشری است. تلاش برای شناسایی و بررسی منابع هدررفت انرژی در حوزه های مختلف صنعت به منظور بهینه سازی آنها، از اهمیت خاصی برخوردار است. در این بین بویلرها از جمله تجهیزاتی هستند که برای تولید بخار بطور گسترده ای مورد استفاده قرار می گیرند. با توجه به هزینه بر بودن تولید بخار و ارزش اقتصادی آن، بهینه سازی و بررسی عملکرد بویلرها از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. شبیه سازی عددی بویلرها براساس قوانین ترمودینامیکی یکی از روش های موثر در تحلیل عملکرد آنها می باشد، بطوریکه به کمک قوانین اول و دوم ترمودینامیک امکان محاسبه راندمان انرژی و انرژی بویلرها فراهم می گردد. تحقیقات گسترده ای در خصوص تحلیل انرژی و انرژی بویلرها انجام شده است. در یک تحقیق کانگ و همکاران [۱] فرآیند احتراق در بویلر را بررسی و روش های بهبود عملکرد آن را مورد مطالعه قرار داده اند.

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار sajad.koochakinia@gmail.com

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار m.deimi@hsu.ac.ir

<sup>۳</sup> کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، شرکت مجتمع گاز پارس جنوبی، عسلویه abbas\_golnari@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۳/۲۷، تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۰/۰۵

براساس نتایج بدست آمده شرایط محفظه احتراق، دمای دودکش و گازهای خروجی از آن تاثیر بسزایی بر راندمان احتراق بویلر دارد. همچنین بر اساس تحقیقات ایشان در میان روش های اصلاح احتراق با استفاده از تجزیه و تحلیل انژری، پارامتر تنظیم هوای اضافی موثرترین روش برای بهبود احتراق بویلرها معرفی شد. همچنین سایدرو و همکاران [۲] به بررسی و تحلیل انژری و انژری قسمت های مختلف بویلر پرداختند. بر اساس تحقیقات ایشان راندمان انژری و انژری در سیکل مورد بررسی ایشان  $72/46\%$  و  $24/89\%$  محاسبه گردید. همچنین بر اساس نتایج بدست آمده در این تحقیق مشخص گردید که محفظه احتراق<sup>۱</sup> و مبدل حرارتی عوامل اصلی تخریب انژری می باشد. عارف دهقانی و همکارش [۳] به تحلیل و تجزیه بویلرهای نیروگاه تبریز از نظر انژری و انژری پرداختند. براساس تحقیقات ایشان راندمان انژری بر اساس پایین ترین و بالاترین ارزش حرارتی سوخت به ترتیب  $91/54\%$  و  $86/17\%$  و راندمان انژری  $43/98\%$  برای بویلر محاسبه گردید. در تحقیقی دیگر دیب و همکاران [۴] به بررسی و تحلیل انژری برای نیروگاه های بخار و تولید همزمان پرداختند. در نتایج ایشان افت کارایی این نیروگاه ها در نتیجه بازگشت ناپذیری های فرآیند انتقال حرارت و احتراق در بویلر مورد بررسی قرار گرفت. همچنین پارامترهای موثر در کاهش نابودی انژری در بویلر از هوای اضافی، پیش گرم کردن هوای ورودی و گازهای برگشتی به بویلر مطالعه گردید. از سوی دیگر الجوندی [۵] به تحلیل انژری و انژری یک نیروگاه سیکل بخار در اردن پرداخت. براساس نتایج ایشان، به علت فرآیند شیمیایی احتراق، در میان تجهیزات موجود بویلر به عنوان جزئی که بیشترین تخریب انژری را دارد معرفی گردید. برای کاهش این تخریب، پیش گرم کردن هوای مورد نیاز برای احتراق و کاهش نسبت هوا به سوخت پیشنهاد شده است. راسن [۶] به تحلیل انژری و انژری جریان هوای مورد نیاز برای احتراق در نیروگاه سیکل بخار پرداخت. او به این نتیجه رسید که موثرترین جزء در تخریب انژری در یک سیکل بخار، بویلر است. همچنین عامل اصلی در افزایش بویلر را پارامتر هوای اضافی معرفی کرد و با تغییرات درصد هوای اضافی افزایش قابل توجهی در راندمان بویلر ایجاد نمود. کوپک [۷] به تجزیه و تحلیل انژری و انژری نیروگاه حرارتی کاتالانزی در ترکیه با هدف بررسی تاثیر دمای محیط بر نرخ بازگشت ناپذیری و راندمان انژری اجزای نیروگاه پرداخت. حبیب و همکاران [۸] تحلیل انژری را برای یک نیروگاه سیکل بخار انجام دادند و به شناسایی تخریب های انژری در این نیروگاه پرداختند. عامل اصلی تخریب انژری را بویلر معرفی نمودند. براساس نتایج ایشان، پارامترهای تاثیر گذار در تخریب انژری بویلر، درصد هوای اضافی و دمای دودکش می باشد. روسن و تانگ [۹] به بررسی پارامتر هوای اضافی ورودی به بویلر و تاثیر آن بر بازگشت ناپذیری ها و میزان انژری آن پرداختند. فرانکو و روس [۱۰]، به کمک تحلیل انژری به بهینه سازی بویلر بازیاب پرداختند. ایشان با استفاده از تابع هدف ترموآکونومیک<sup>۲</sup> برای بویلر بازیاب، به بهینه سازی فنی و اقتصادی آن پرداختند و توانستند که راندمان کل سیکل را به نزدیک  $60\%$  برسانند. علی بلاترک و همکاران [۱۱]، آنالیز انژری و ترموآکونومیک نیروگاه حرارتی چاییزخان ترکیه را مورد بررسی قرار دادند. آنها با کمک خواص ترمودینامیکی نقاط مختلف نیروگاه حرارتی و با کمک نرم افزار EES راندمان حرارتی و انژری نیروگاه را بدست آوردند.

<sup>1</sup> Combustion chamber

<sup>2</sup> Thermo-economic

امندرا کومارسینگ [۱۲]، علت اصلی برگشت ناپذیری در بویلرها را واکنش شیمیایی بین سوخت و هوا معرفی کرد. کاهش درصد هوای اضافی در محفظه احتراق بویلر و کاهش دمای گاز خروجی دودکش را عامل تاثیر گذار در آگرزژی محفظه احتراق بویلر معرفی نمود. همچنین بویلر را به ۴ قسمت مجزا تقسیم نمود و هر قسمت را مورد بررسی و تحلیل قرار نمود.

در این تحقیق به بهبود عملکرد بویلرهای واحد ۱۲۱ پالایشگاه چهارم مجتمع گاز پارس جنوبی با استفاده از تحلیل انرژی و آگرزژی پرداخته می شود. تحلیل ترمودینامیکی براساس اطلاعات ثبت شده از بویلرها انجام می گیرد. به کمک شبیه سازی ترمودینامیکی می توان تاثیر عواملی همچون دمای محیط، رطوبت نسبی هوا، درصد هوای اضافی وارد شده به محفظه احتراق و دمای آب تغذیه بویلر<sup>۱</sup> را مورد بررسی قرار داد. همچنین در نهایت با محاسبه راندمان حرارتی بویلر، آگرزژی محفظه احتراق و راندمان آگرزژی بویلر می توان پیشنهادهای عملی با هدف بهینه سازی عملکرد بویلرها ارائه نمود.

## ۲- مشخصات پالایشگاه چهارم مجتمع گاز پارس جنوبی

### ۲-۱- طرحواره بویلرهای پالایشگاه چهارم

میدان گازی پارس جنوبی به عنوان بزرگترین پالایشگاه گازی خاورمیانه می باشد. مساحت این میدان ۹۷۰۰ کیلومتر مربع است که ۳۷۰۰ کیلومتر مربع آن در آب های ایران، شامل ۸ درصد از ذخایر گازی جهان و ۶۰۰۰ کیلومتر مربع آن در آب های قطر شامل ۲۱ درصد از ذخایر گاز دنیا می باشد. واحد ۱۲۱ آب، برق و بخار<sup>۲</sup> پالایشگاه چهارم پارس جنوبی دارای ۵ عدد بویلر (A,B,C,D,E) می باشد. شکل (۱) تصویری از بویلرهای پالایشگاه و شکل (۲) طرحواره ای از محفظه احتراق بویلرهای مجتمع می باشد، که در زیر آورده شده است:

### ۲-۲- مشخصات بویلرهای پالایشگاه چهارم

بویلرهای پالایشگاه از نوع واترتیوب<sup>۳</sup> بوده اند. بویلرهای واترتیوب یا همان دیگ لوله آبی از انواع بویلرهای فولادی است که برای کار در فشارهای بالا ساخته می شوند. در این نوع از بویلر، آب در درون لوله ها در جریان است و آتش مستقیم به لوله ها برخورد می کند. این بویلرها تا فشارهایی بالاتر از ۱۰۰ بار نیز ساخته می شوند. همچنین لازم به ذکر است سوخت مصرفی همه بویلرها گاز طبیعی می باشد. شرایط عملیاتی بویلر در جدول (۱) ارائه شده است. با توجه به گزارش پالایشگاه، آنالیز اجزای گاز طبیعی (خوراک بویلرها) و هوای مصرفی در جدول های (۲) و (۳) آورده شده است.

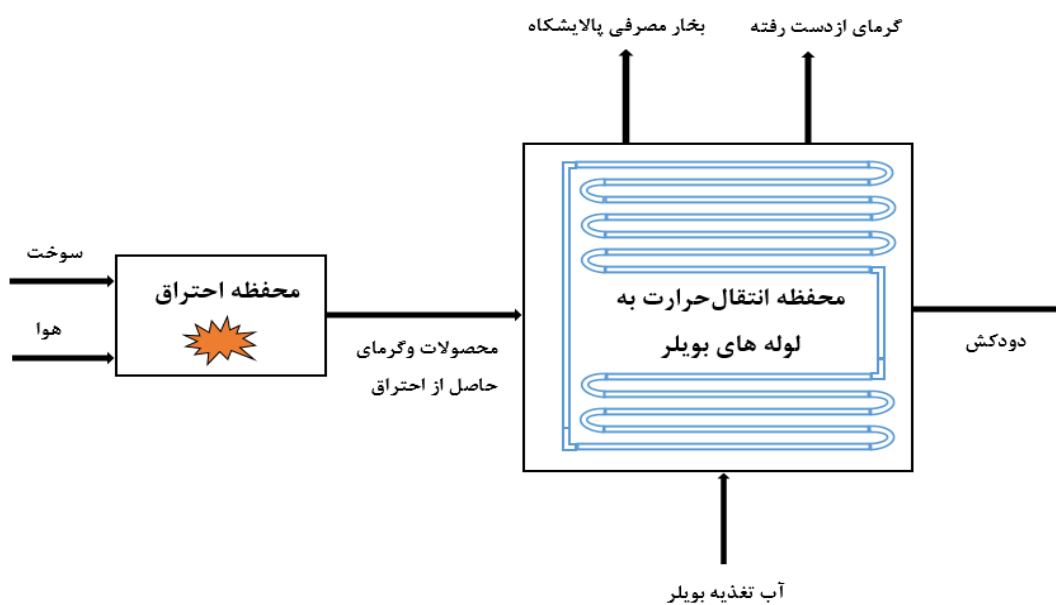
<sup>1</sup> Boiler Feed Water

<sup>2</sup> Utility

<sup>3</sup> Water tube



شکل ۱- بویلرهای پالایشگاه چهارم مجتمع گاز پارس جنوبی



شکل ۲- طرحواره<sup>۱</sup> قسمت محفظه احتراق و انتقال حرارت بویلر و قسمت های مختلف بویلر

<sup>1</sup> Schematic

## جدول ۱- مشخصات بویلر A

مقدار	مشخصه	
۱۶۵	$(t \cdot h^{-1})$ دبی	بخار تولیدی
۳۹۰	دما ( $^{\circ}C$ )	
۴۶	فشار ( $b \text{ arg}$ )	
۱۲۸	$(^{\circ}C)$ دمای آب تغذیه بویلر	
۵	$(t \cdot h^{-1})$ دبی سوخت بویلر	
۲۷۵	$(^{\circ}C)$ دمای گازهای خروجی احتراق (دودکش)	
۴۵۳۰۰	$(kj \cdot kg^{-1})$ ارزش حرارتی پایین سوخت مصرفی	

جدول ۲- درصد مولی اجزای هوا در شرایط ( $P=1 \text{ atm}$  و  $\phi_{RH}=70\%$ )

درصد مولی	عنصر
۰/۲۰۹۵	اکسیژن ( $O_2$ )
۰/۷۸۰۸	نیتروژن ( $N_2$ )
۰/۰۰۰۰۷	آب ( $H_2O$ )
۰/۰۰۰۳۳	دی اکسید کربن ( $CO_2$ )
۰/۰۰۹۳	بقیه اجزا

## جدول ۳- درصد مولی اجزای گاز طبیعی (سوخت) بویلرها

جز	(%) درصد مولی
متان ( $CH_4$ )	۹۲/۷۲۲۸
اتان ( $C_2H_6$ )	۱/۵۷۳۲
پروپان ( $C_3H_8$ )	۰/۴۰۶۶
n- بوتان ( $C_4H_{10}$ )	۰/۲۲۵۵
n- پنتان ( $C_5H_{12}$ )	۰/۰۰۱۸
کربن دی اکسید ( $CO_2$ )	۱/۴۰۳۱
نیتروژن ( $N_2$ )	۳/۴۳۲۱
بقیه اجزا	۰/۲۳۴۹
کل	۱۰۰

### ۳- روش حل و معادلات حاکم مساله

برای تولید بخار مصرفی پالایشگاه، در بویلرها سه فرآیند مهم و اساسی انجام می‌گیرد که عبارتند از:

الف) فرآیند آدیاباتیک<sup>۱</sup> احتراق

ب) فرآیند انتقال حرارت به بخار

ج) مرحله خروج گازها (دودکش)

بنابراین تلفات داخلی اگزرژی بویلر مجموع تلفات اگزرژی احتراق، انتقال حرارت و دودکش می‌باشد.

اگزرژی، قابلیت انجام کار تا رسیدن به تعادل با محیط (منبع حرارتی) تعریف می‌شود. [۱۳] بدین ترتیب پس از رسیدن به تعادل با محیط، محتوی اگزرژی صفر خواهد شد. برخلاف انرژی که از بین نمی‌رود و تنها از نوعی به نوع دیگر تبدیل میشود (قانون اول ترمودینامیک)، اگزرژی به واسطه بازگشت ناپذیری های حین یک فرآیند، از بین می‌رود. این هدررفت با افزایش انتروپی سیستم و محیط متناسب است و می‌توان مقدار آن را با در نظر گرفتن قانون بقای جرم رابطه (۱)، قانون اول ترمودینامیک رابطه (۲) و ترکیب آن با قانون دوم ترمودینامیک رابطه (۳) به دست آورد.

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (1)$$

که در آن  $\dot{m}$  دبی جرمی است و اندیس های  $i$  و  $e$  به ترتیب برای جریان های ورودی و خروجی به کار می‌روند.

$$\frac{dE}{dt}|_{c.v} = \dot{Q}_{c.v} - \dot{W}_{c.v} + \sum \dot{m}_i h_i - \sum \dot{m}_e h_e \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $\dot{Q}$  و  $\dot{W}$  به ترتیب نرخ حرارت داده شده به حجم کنترل و نرخ کار صورت گرفته توسط آن است.  $E$  محتوی انرژی آن و  $h$  آنتالپی بر واحد جرم جریان است.

$$\frac{dS}{dt}|_{c.v} = \sum \frac{\dot{Q}_i}{T_i} + \sum \dot{m}_i s_i - \sum \dot{m}_e s_e + \dot{S}_{gen} \quad (3)$$

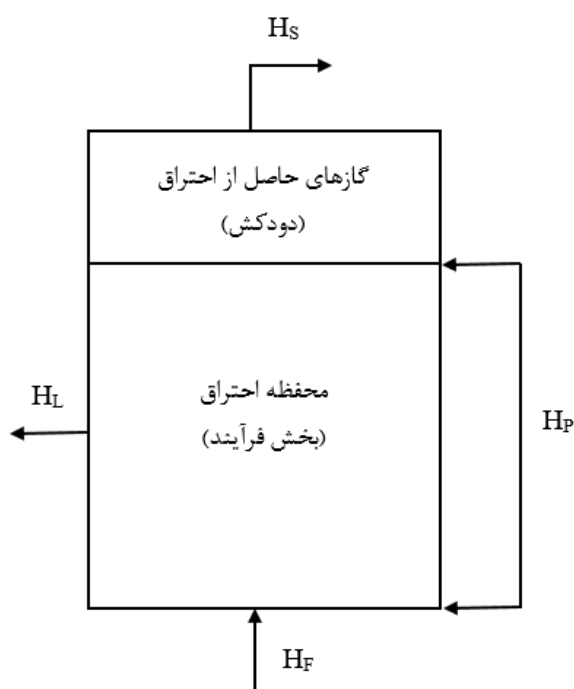
در رابطه (۳) که قانون دوم ترمودینامیک است، نرخ تغییرات آنتروپی حجم کنترل ( $S$ )، بر اساس اختلاف آنتروپی ورودی و خروجی توسط جریان و آنتروپی های تولید شده بر اثر برگشت ناپذیر ( $\dot{S}_{gen}$ ) و در اثر انتقال حرارت با منابع گرمایی مختلف ( $\dot{Q}_i$ ) با دماهای متفاوت  $T_i$  بیان می‌شود. با ترکیب قانون اول و دوم ترمودینامیک برای یک حجم کنترل، رابطه (۴) خواهیم داشت. [۱۴]

$$\frac{d\Phi}{dt}|_{c.v} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q}_{c.v} - \dot{W}_{c.v} + \sum \dot{m}_i \psi_i - \sum \dot{m}_e \psi_e - \dot{I} \quad (4)$$

که در آن  $\Phi$  اگزرژی کل سیستم،  $\dot{I}$  برگشت ناپذیری است که بیانگر اختلاف کار برگشت پذیر و کار واقعی است.  $\psi$  اگزرژی جریانی بر واحد جرم است که طبق رابطه (۵) تعریف می‌شود. [۱۴]

$$\psi = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (5)$$

<sup>1</sup> Adiabatic



شکل ۳- حجم معیار بویلر

### ۳-۱- موازنه انرژی حرارتی

برای بررسی عملکرد و انجام موازنه انرژی، بویلر به صورت یک حجم معیار در نظر گرفته میشود.

مواردی که برای موازنه انرژی بویلرها باید مشخص شوند، عبارتند از:

(الف) درصد ترکیبات سوخت ارزش حرارتی پایین<sup>۱</sup> سوخت

(ب) درصد اتلاف از بدنه بویلر نسبت به کل انرژی حرارتی آزاد شده

(ج) درصد هوای اضافی جهت انجام کامل فرایند

(د) دمای گازهای احتراق خروجی از دودکش

اگر بویلر به صورت یک حجم معیار همانند شکل شماره (۳) در نظر گرفته شود، می توان موازنه انرژی را به صورت زیر نوشت:

$$H_F = H_P + H_L + H_S \quad (۶)$$

پس از ساده سازی، رابطه (۶) به صورت زیر نوشته می شود:

$$\left( \frac{H_P}{H_F} + \frac{H_L}{H_F} + \frac{H_S}{H_F} \right) \times 100 = 100\% \quad (۷)$$

<sup>۱</sup> Low Heating Value (LHV)

که در این رابطه (۷)،  $100 \left( \frac{H_P}{H_F} \right)$  راندمان حرارتی بویلر،  $100 \left( \frac{H_L}{H_F} \right)$  درصد تلفات حرارتی از بویلر و  $100 \left( \frac{H_S}{H_F} \right)$  درصد تلفات حرارتی دودکش می باشد. راندمان حرارتی بویلر، با استفاده از نرم افزار EES و مشخص نمودن پارامترها بدست می آید.

### ۲-۳- محاسبه درصد تلفات حرارتی از سطح خارجی بویلر

تلفات حرارتی از سطح خارجی بویلر به دو طریق تشعشعی و جابجائی صورت می گیرد. بطور عمده عوامل مؤثر در تلفات حرارتی از سطح خارجی بویلر، عبارتند از:

الف) دمای جداره خارجی بویلر

ب) دمای هوای محیط، سرعت باد

ج) مساحت سطح خارجی بویلر

د) ضریب صدور تشعشعی سطح خارجی بویلر

برای محاسبه تلفات حرارتی از سطح خارجی بویلر می توان از رابطه تجربی زیر استفاده نمود: [۱۵]

$$H_L' = 0.174 \times \varepsilon (T_s^4 - T_a^4) \times 10^{-8} + 0.296 \times (T_s - T_a)^{1/25} \times \sqrt{\frac{(v_w + 69)}{69}} \quad (8)$$

$$H_L = A.H_L' \quad (9)$$

### ۳-۳- محاسبه درصد تلفات حرارتی از دودکش

تلفات حرارتی از دودکش شامل اتلاف حرارت در اثر رطوبت موجود در سوخت، اتلاف حرارت گاز خشک و اتلاف حرارت در اثر وجود رطوبت در هوای احتراق می باشد. به منظور محاسبه درصد اتلاف حرارتی از دودکش می توان از نمودارهای ارائه شده در مرجع [۱۳] جهت مشخص نمودن انتالیپی گازهای خروجی استفاده نمود. میزان درصد اتلافات انرژی حرارتی از دودکش از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$\frac{H_S}{H_F} = \frac{\text{Flue gas enthalpy}}{\text{LHV}} \times 100 = \frac{(\dot{m}_{Air} + \dot{m}_{Fuel}) h_{stack}}{\dot{m}_{Fuel} \text{LHV}} \times 100 = 0.1219 \quad (10)$$

### ۴-۳- محاسبه راندمان حرارتی بویلر

با مشخص شدن میزان درصد تلفات حرارتی از بدنه دودکش می توان با استفاده از رابطه شماره (۱۱) راندمان حرارتی<sup>۱</sup> بویلر را به دست آورد: [۱۶]

$$\eta_{Boiler} = \left( \frac{H_P}{H_F} \right) \times 100 = \left\{ 1 - \left( \frac{H_L}{H_F} + \frac{H_S}{H_F} \right) \right\} \quad (11)$$

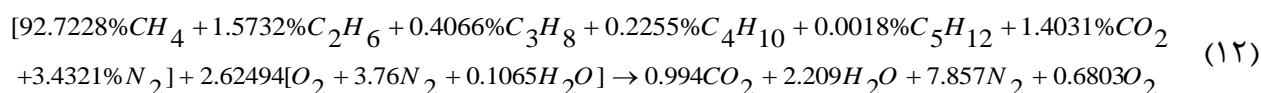
<sup>1</sup> Thermal Efficiency



### ۵-۳- اگزرژی ناشی از احتراق در محفظه احتراق بویلر

احتراق یک سوخت، تبدیل شیمیایی سوخت به محصولات احتراق همراه با آزاد سازی انرژی حرارتی ناشی از آن می باشد. اجزای محترقه یک سوخت گازی یا مایع، مثل کربن، هیدروژن، گوگرد و نیتروژن توسط واکنش های شیمیایی گرمازا با اکسیژن هوای احتراق در می آمیزند. محصولات احتراق شامل گازهای دودکش و باقیمانده های جامد از احتراق سوخت های مایع و جامد می باشند.

گازهای دودکش حاوی ترکیبات آلوده کننده زیان آور مثل اکسیدهای گوگرد، اکسیدهای نیتروژن، منو اکسید کربن، دی اکسید کربن و بخار آب هستند معادلات استوکیومتری تشریح ساده ای از واکنشهای احتراق کامل اجزای قابل احتراق سوخت با اکسیژن را به همراه موازنه مواد و واکنش ها بر مبنای مولی یا جرمی ارائه می کنند. برای محاسبه اگزرژی گازهای حاصل از سوخت، ابتدا اگزرژی ترمومکانیکی<sup>۱</sup> و سپس اگزرژی شیمیایی<sup>۲</sup> گازهای حاصل از سوخت به دست می آید. در جدول (۳) اجزای مختلف گاز طبیعی مصرفی پالایشگاه (بویلرها) ارائه شده است. بالانس معادله سوخت در حالت شرایط هوای اضافی ۳۵٪ و رطوبت نسبی ۷۰٪ به صورت زیر می باشد: [۱۷]



برای محاسبه اگزرژی بایستی درصد مولی هریک از اجزای گازهای حاصل از احتراق، محاسبه می گردد. درصد مولی محصولات احتراق را می توان از رابطه (۱۳) بدست آورد.

$$y_x = \frac{n_x}{n_{Total}} \quad (13)$$

طبق رابطه (۱۴) اگزرژی ترمومکانیکی گازهای حاصل از احتراق در دمای دودکش<sup>۳</sup> را می توان بدست آورد: [۱۷]

$$\psi_{Th} = \sum_{i=1}^n y_i \left[ h_{i,T} - h_{i,T_0} - T_0 (s_{i,T}^0 - s_{i,T_0}^0) + RT \ln \frac{P}{P_0} \right] \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)،  $y_i$  درصد مولی هریک از اجزای گازهای حاصل از احتراق،  $h_{i,T}$  آنتالپی<sup>۴</sup> هر یک از اجزای گازهای حاصل از احتراق در دمای  $T$ ، و  $h_{i,T_0}$  آنتالپی هر یک از اجزای گازهای حاصل از احتراق در دمای  $T_0$  می باشد. همچنین  $s_{i,T}^0$  آنتروپی<sup>۵</sup> هر یک از اجزای گازهای حاصل از احتراق در دمای  $T$  و  $s_{i,T_0}^0$  آنتروپی هر یک از اجزای گازهای حاصل از احتراق در دمای  $T_0$  می باشد.

اگزرژی شیمیایی گازهای حاصل از احتراق با رابطه زیر تعریف می شود: [۱۸]

<sup>1</sup> Exergy Thermomechanical

<sup>2</sup> Exergy Chemical

<sup>3</sup> Stack

<sup>4</sup> Enthalpy

<sup>5</sup> Entropy

$$\psi_{ch} = RT_0 \sum_{i=1}^n N_t \ln \frac{P_{t,0}}{P_{t,00}} = RT_0 \sum_{i=1}^n N_t \ln \frac{y_{t,0}}{y_{t,00}} \quad (15)$$

همچنین انرژی کل محفظه احتراق بویلر از مجموع انرژی ترمومکانیکی و شیمیایی، روابط (۱۴، ۱۵) محاسبه می گردد.

$$\psi_{Total} = \sum_{i=1}^n y_i \left[ h_{i,T} - h_{i,T_0} - T_0 (s_{i,T}^0 - s_{i,T_0}^0) + RT \ln \frac{P}{P_0} + RT \ln \frac{P}{P_0} \right] + RT_0 \sum_{i=1}^n N_t \left( \ln \frac{y_{t,0}}{y_{t,00}} \right) \quad (16)$$

رابطه (۱۶)، انرژی اتلافی از دودکش و محفظه احتراق بویلر می باشد.

طبق رابطه (۱۴) نسبت اتلافات انرژی گازهای احتراق به انرژی ورودی سوخت را می توان بدست آورد:

$$\frac{\psi_{stack}}{\psi_{ch,f}} = \frac{N_{gas}}{N_{Fuel}} \cdot \frac{\psi_{gas}}{\psi_{ch,f}} \quad (17)$$

### ۳-۶- محاسبه راندمان انرژی بویلر

راندمان نوع دوم (راندمان انرژی) برای بویلر نسبت اختلاف انرژی جریانی ورودی و خروجی به انرژی داده شده به سیستم (انرژی سوخت)، طبق رابطه (۱۸) محاسبه می گردد: [۱۵]

$$\eta = \frac{\dot{m}_s (ex_{out} - ex_{in})_s}{\dot{m}_{Fuel} \psi_{ch,f} + \dot{m}_{Air} \psi_{Air}} \quad (18)$$

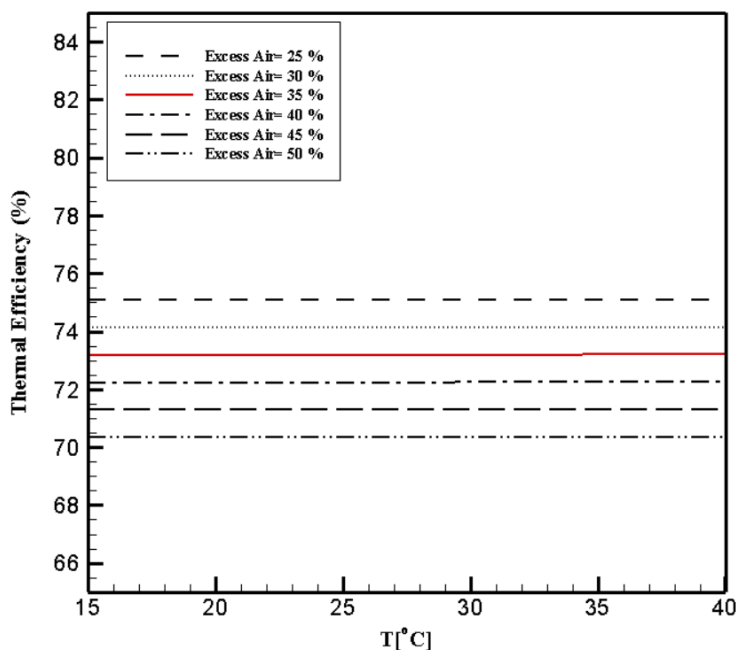
در رابطه (۱۸)، به دلیل اینکه هوای ورودی به محفظه احتراق بویلر پیش گرم نمی شود مقدار انرژی هوای ورودی به محفظه احتراق بویلر برابر صفر خواهد بود.

### ۴- بررسی نتایج

هدف در این مقاله تجزیه و تحلیل انرژی و انرژی بویلرهای واحد ۱۲۱ پالایشگاه چهارم مجتمع گاز پارس جنوبی با استفاده از داده های دریافتی از پالایشگاه می باشد. بطور کلی عوامل تاثیرگذار بر روی بویلرهای پالایشگاه عبارتند از: دمای محیط، درصد هوای اضافی وارد شده به محفظه احتراق و دمای آب تغذیه بویلر. همچنین پارامتر تاثیرگذار در راندمان انرژی بویلر رطوبت نسبی هوا می باشد که این پارامتر نیز پس از تاثیر گذاری در واکنش سوخت و هوا در محفظه احتراق و معادله استوکیومتری<sup>۲</sup> سوخت در راندمان انرژی لحاظ گردیده است. طبق روابط (۶) تا (۱۱)، راندمان حرارتی بویلر به تلفات ناشی از بدنه بویلر و تلفات خروجی از دودکش بویلر وابسته می باشد. طبق شکل (۴) نمودار راندمان حرارتی بویلر برای درصد هواهای اضافی مختلف هوا بر حسب دمای محیط آورده شده است. طبق نتایج حاصله با افزایش درصد هوای اضافی وارد به محفظه احتراق، راندمان حرارتی بویلر کاهش می یابد.

<sup>1</sup> Exergy Efficiency

<sup>2</sup> Stoichiometric Equation



شکل ۴- نمودار راندمان حرارتی بویلر نسبت به دماهای مختلف محیط در درصد هواهای اضافی مختلف

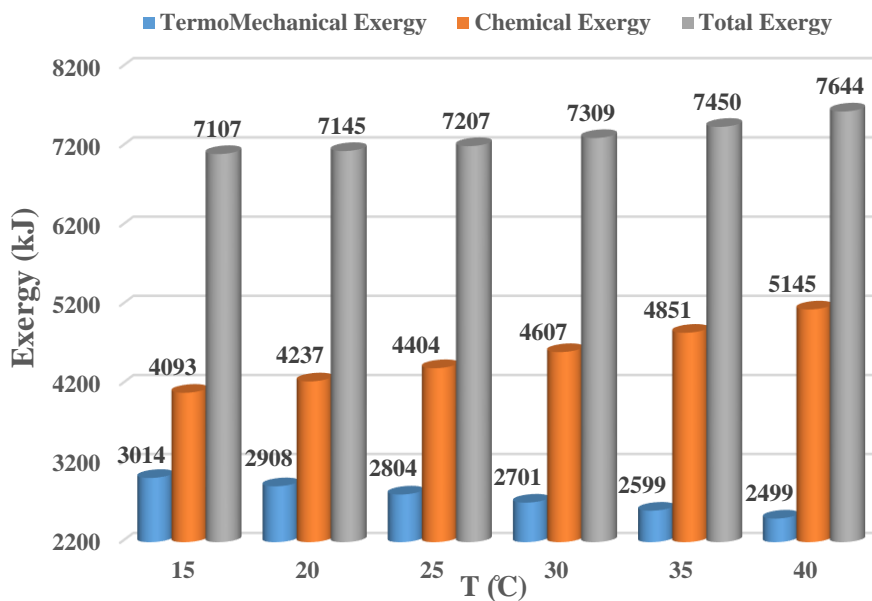
طبق روابط (۱۲) تا (۱۶)، محفظه احتراق بویلر بیشترین سهم انرژی در بویلرها را دارد. طبق اطلاعات دریافتی از پالایشگاه چهارم مجتمع گاز پارس جنوبی، بویلرهای پالایشگاه در شرایط هوای اضافی ۳۵٪ و رطوبت نسبی ۷۰٪ با سوخت گاز طبیعی در محفظه احتراق بویلر کار می‌کنند. انرژی محفظه احتراق بویلر از مجموع انرژی ترمومکانیکال و انرژی شیمیایی حاصل می‌شود.

شکل (۵) نشان دهنده نتایج بدست آمده از انرژی محفظه احتراق بویلر برای دماهای مختلف محیط می‌باشد. که طبق نتایج بدست آمده با افزایش دمای محیط و تغییر شرایط عملیاتی بویلرهای در پالایشگاه مقدار کل انرژی محفظه احتراق بویلر افزایش می‌یابد. شکل (۶) نتایج انرژی محفظه احتراق بویلر در دمای محیط  $25^{\circ}\text{C}$  برای درصد هواهای اضافی مختلف پالایشگاه، را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش درصد هوای اضافی وارد به محفظه احتراق بویلر، انرژی محفظه احتراق بویلر کاهش می‌یابد.

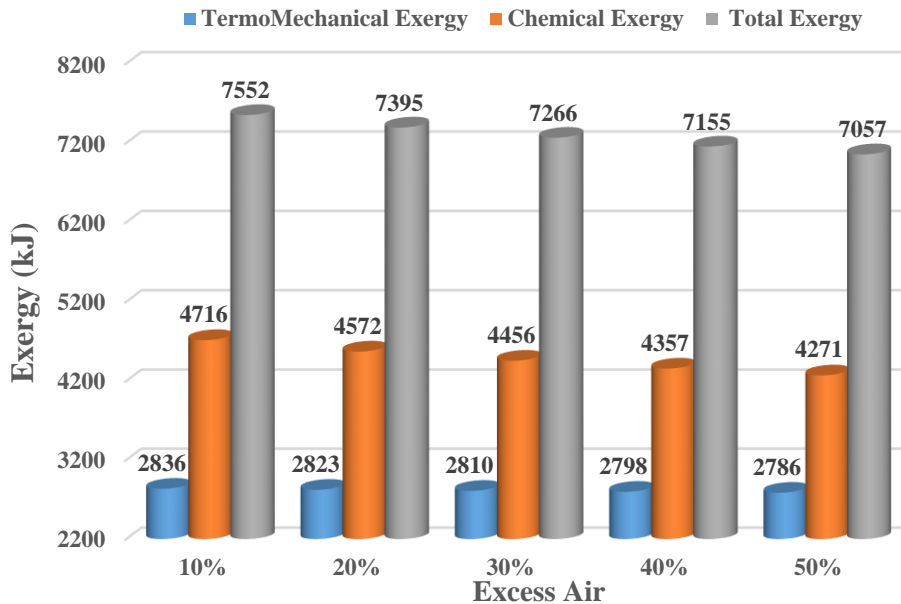
شکل (۷) نتایج انرژی محفظه احتراق بویلر بر حسب دماهای مختلف محیط در شرایط عملیاتی رطوبت نسبی های مختلف هوا را نشان می‌دهد. طبق نتایج بدست آمده با افزایش رطوبت نسبی هوا و افزایش دمای محیط، انرژی محفظه احتراق بویلر افزایش پیدا می‌کند.

شکل (۸) نتایج کل انرژی محفظه احتراق بویلر بر حسب دماهای مختلف محیط در شرایط عملیاتی درصد هواهای اضافی مختلف وارد شده در محفظه احتراق بویلر و افزایش دمای محیط، انرژی محفظه احتراق بویلر افزایش پیدا می‌کند. نسبت اتلافات انرژی گازهای احتراق به انرژی ورودی سوخت بویلرها، در شرایط رطوبت نسبی های مختلف هوا و دماهای مختلف محیط، طبق شکل (۹) ارائه شده است.

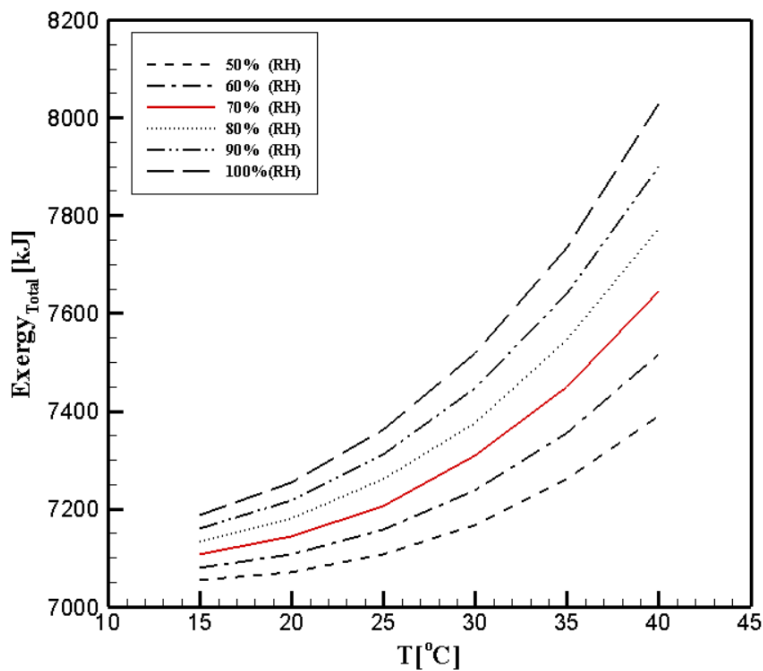
بر اساس شکل (۹) با افزایش رطوبت نسبی هوا و افزایش دمای محیط، نسبت اتلافات انرژی گازهای احتراق به انرژی ورودی سوخت بویلرها افزایش می‌یابد.



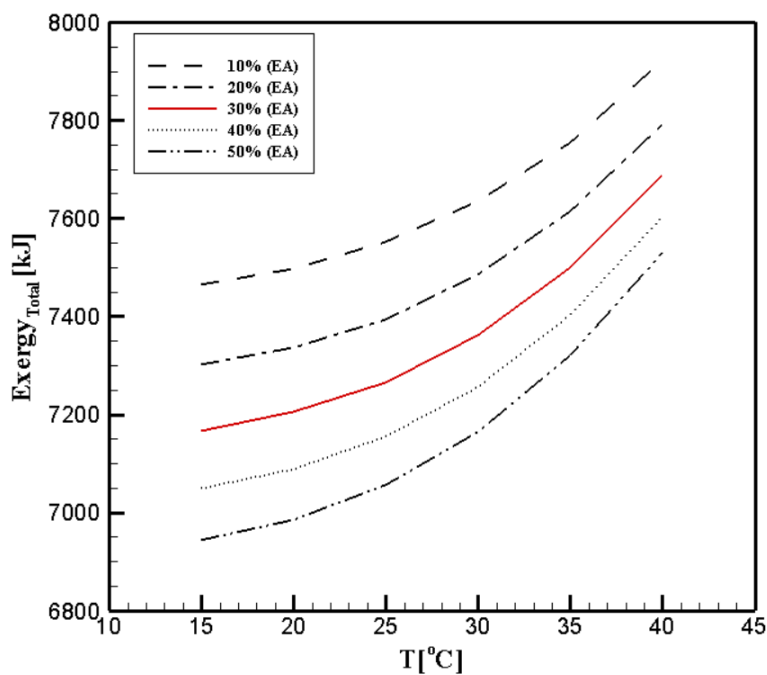
شکل ۵- نمودار انرژی محفظه احتراق بویلر نسبت به دماهای مختلف محیط



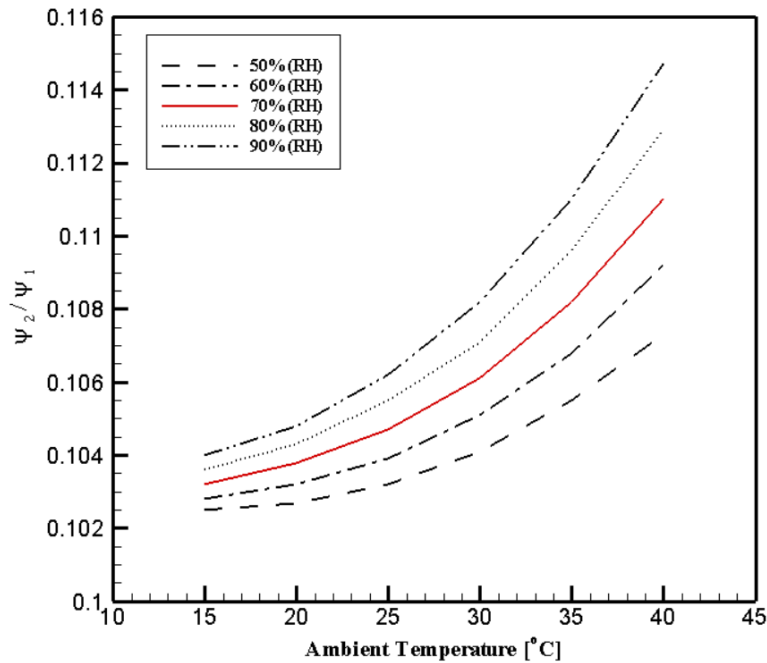
شکل ۶- نمودار انرژی محفظه احتراق بویلر نسبت به درصد هواهای اضافی



شکل ۷- نمودار اگزرژی محفظه احتراق بر حسب دماهای مختلف محیط در رطوبت نسبی های مختلف هوا

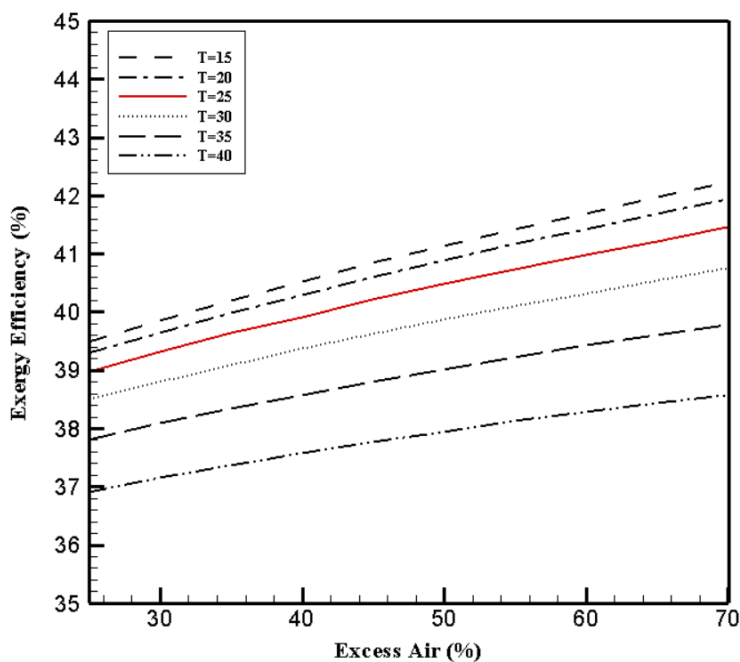


شکل ۸- نمودار اگزرژی محفظه احتراق نسبت به دمای محیط در درصد هوای اضافی وارد شده به محفظه احتراق



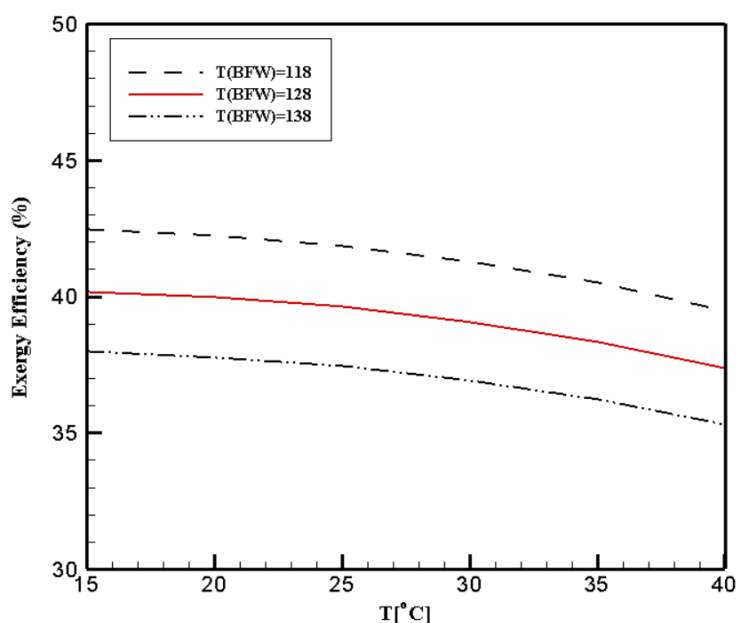
شکل ۹- نمودار نسبت اتلافات انرژی گازهای احتراق ( $\Psi_2$ ) به انرژی ورودی سوخت ( $\Psi_1$ )

طبق رابطه (۱۸)، عامل اصلی و تاثیر گذار در راندمان انرژی بویلر، انرژی محفظه احتراق و انرژی بخار تولیدی حاصل از آب تغذیه بویلر می باشد. راندمان انرژی بویلر نسبت به درصد هواهای اضافی در دماهای مختلف محیط طبق شکل (۱۰) نشان داده شده است. طبق نتایج بدست آمده با افزایش درصد هوای اضافی وارد شده به محفظه احتراق بویلر برای دماهای مختلف محیط، راندمان انرژی افزایش می یابد. طبق رابطه (۱۸)، یکی از عوامل تاثیرگذار در راندمان انرژی بویلر دمای آب تغذیه می باشد.

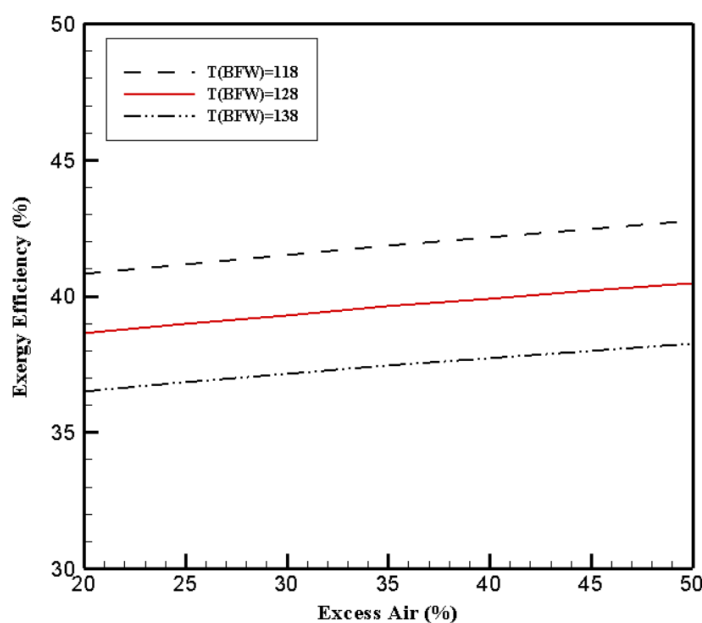


شکل ۱۰- نمودار راندمان انرژی بویلر نسبت به درصد هوای اضافی برای دماهای مختلف محیط

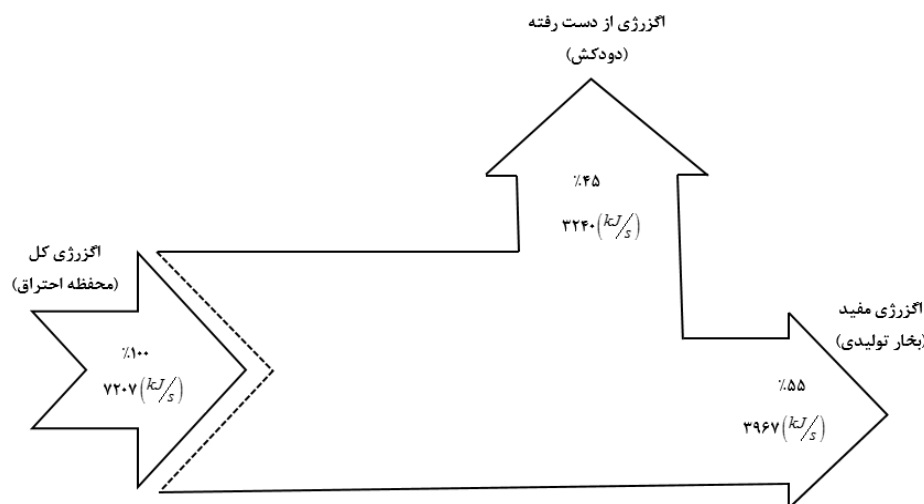
طبق شکل (۱۱) راندمان آگزرژی بویلر نسبت به دماهای مختلف محیط برای دماهای  $118^{\circ}\text{C}$ ،  $128^{\circ}\text{C}$ ،  $138^{\circ}\text{C}$  (آب تغذیه بویلر، که شرایط استفاده کنونی پالایشگاه دمای  $128^{\circ}\text{C}$  می باشد، را نشان می دهد. طبق نتایج بدست آمده راندمان آگزرژی با افزایش دماهای مختلف محیط برای دماهای مختلف آب تغذیه بویلر کاهش پیدا می کند. شکل (۱۲) راندمان آگزرژی بویلر نسبت به درصد هواهای اضافی وارده به محفظه احتراق برای دماهای  $118^{\circ}\text{C}$ ،  $128^{\circ}\text{C}$ ،  $138^{\circ}\text{C}$  آب تغذیه بویلر را نمایش می دهد. لازم به ذکر است شرایط استفاده کنونی پالایشگاه دمای  $128^{\circ}\text{C}$  است. طبق نتایج بدست آمده راندمان آگزرژی با افزایش درصد هوای اضافی مختلف برای دماهای مختلف آب تغذیه بویلر افزایش پیدا می کند.



شکل ۱۱- نمودار راندمان آگزرژی نسبت به دمای محیط برای ۳ دمای مختلف آب تغذیه بویلر



شکل ۱۲- نمودار راندمان آگزرژی نسبت به درصد هوای اضافی برای ۳ دمای مختلف آب تغذیه بویلر



شکل ۱۳- نمودار گراسمن جریان انرژی در محفظه احتراق بویلر

شکل (۱۳) انرژی محفظه احتراق بویلر بصورت نمودار گراسمن<sup>۱</sup> نشان داده شده است. نمودارهای گراسمن معمولاً به عنوان (نمودارهای انرژی) نامیده می شوند و نشان دهنده جریان های انرژی موجود در سیستم می باشد. طبق نتایج، درصد انرژی بخار تولیدی و درصد انرژی تلف شده دودکش بصورت تفکیک شده در نمودار گراسمن ارائه شده است.

## ۵- نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله به بررسی تحلیل انرژی و انرژی بویلرهای واحد ۱۲۱ پالایشگاه چهارم مجتمع گاز پارس جنوبی پرداخته شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، بخش عمده انرژی در پالایشگاه چهارم را بویلرهای این واحد تشکیل می دهند.

همانطور که در مباحث قبل به آن اشاره گردید ائتلاف انرژی در بویلرهای پالایشگاهی ناشی از عوامل متعددی می باشد، درصد هوای اضافی، آب تغذیه مصرفی، رطوبت نسبی هوا و دمای هوای محیط مهمترین و اساسی ترین پارامترهای تاثیر گذار در کاهش مصرف انرژی بویلرها و بالا بردن راندمان بویلرها می باشند.

➤ یکی از مهمترین عوامل تاثیر گذار، میزان درصد هوای اضافی به محفظه احتراق بویلرها می باشد. طی بررسی انجام گرفته از آنالیز گازهای خروجی از بویلرهای واحد پالایشگاه ها و نیروگاه های کشور در اکثر موارد اشکالاتی در سیستم تنظیم نسبت سوخت به هوا مشاهده گردیده است. نتایج نشان می دهد با تنظیم درصد هوای اضافی در محفظه احتراق بویلر پالایشگاه چهارم گاز پارس جنوبی راندمان انرژی بویلر می تواند تا ۴۶/۴۱٪ افزایش پیدا کند.

➤ راندمان حرارتی بویلر در شرایط عملیاتی پالایشگاه چهارم (دمای محیط  $25^{\circ}C$  با درصد هوای اضافی ۳۵٪ و رطوبت نسبی ۷۰٪ هوا) ۷۵/۷۸٪ بدست آورده شده است.

<sup>1</sup> Grassmann



- راندمان اگزرژی بویلر در شرایط عملیاتی پالایشگاه چهارم (دمای محیط  $25^{\circ}C$  با درصد هوای اضافی ۳۵٪ و رطوبت نسبی ۷۰٪ هوا) ۳۹/۶۴٪ بدست آورده شده است.
- یکی از عوامل تاثیرگذار در اگزرژی محفظه احتراق بویلر رطوبت نسبی هوا می باشد. طبق نتایج با افزایش رطوبت نسبی هوا و افزایش دمای محیط اگزرژی محفظه احتراق بویلر از مقدار ۷۱۰۷ کیلوژول به مقدار ۷۶۴۴ کیلوژول افزایش پیدا کرده است.

### سپاسگزاری

پژوهش حاضر با حمایت مالی شرکت مجتمع گاز پارس جنوبی انجام گرفته است. لذا از کلیه زحمات و پشتیبانی مسئولین آن شرکت کمال تشکر را داریم.

### مراجع

- [1] Kang, Y., and Wong, V. K. F., "Boiler Combustion Performance Coparing Different Fuels", Energy Systems Division (ASME), Vol. 33, No. 8, pp. 7-14, (1994).
- [2] Saidur, R., Ahamed, J.U., and Masjuki, H.H., "Energy, Exergy and Economic Analysis of Industrial Boilers", Energy Policy, Vol. 38, No. 5, pp. 2188-2197, (2010).
- [3] Arefdehgan, S., and Karimi Sadaghiyani, O., "Boiler Parametric Study of Thermal Power Plant to Approach to Low Irreversibility", American Journal of Energy Engineering, Vol. 3, No. 4, pp. 57-65, (2015).
- [4] Alasfour, F.N., and Alajmi, H.F., "Exergetic Destructions in Steam Generation System: Azzour Plant", Int. J. Exergy, Vol. 4, No. 3, pp. 271-285, (2007).
- [5] Aljundi, I. H., "Energy and Exergy Analysis of a Steam Power Plant in Jordan", Applied Thermal Engineering, Vol. 29, No. 3, pp. 324-328, (2008).
- [6] Rosen, M.A., and Tang, R., "Effect of Altering Combustion Air Flow on a Steam Power Plant: Energy and Exergy Analysis", Int. J. of Energy Research, Vol. 31, No. 9, pp. 219-231, (2006).
- [7] Kopac, M., and Hilalci, A., "Effect of Ambient Temperature on the Efficiency of the Regenerative and Reheat Catalagzi Power Plant in Turkey", Applied Thermal Engineering, Vol. 27, pp. 1377-1385, (2007).
- [8] Habib, M. A., and AL-Bagawi, S., "Thermodynamic Performance Analysis of the Ghazlan Power Plant", Energy, Vol. 20, No. 11, pp. 1121-1130, (1995).
- [9] Rosen, M.A., and Tang, R., "Assessing and Improving the Efficiencies of a Steam Power Plant using Exergy Analysis", Int. J. Exergy, Vol. 3, No. 4, pp. 362-390, (2006).

- [10] Franco, A., and Russo, A., "Combined Cycle Plant Efficiency Increase Based on the Optimization of the Heat Recovery Steam Generator Operating Parameter", Int. J. of Thermal Sciences, Vol. 41, No. 9, pp. 843-859, (2002).
- [11] Bolatturk, A., Coskun, A., and Geredelioglu, C., "Thermodynamic and Exergoeconomic Analysis of Çayırhan Thermal Power Plant", Energy Conversion and Management, Vol. 101, pp. 371-378, (2015).
- [12] Singh, O. K., "Assessment of Thermodynamic Irreversibility in Different Zones of a Heavy Fuel Oil Fired High Pressure Boiler", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 123, No. 1, pp. 829-840, (2016).
- [13] Cengel, Y. A., Boles, and Michael, A., "Thermodynamics an Engineering Approach", 6th Ed, McGraw-Hill, (2008).
- [14] Sonntag, R.E., Borgnakke, C., and Van Wylen, G.J., "Fundamentals of Thermodynamics", John Wiley & Sons, Inc, New York, USA, (1997).
- [15] "Steam Generation", Internet Site: [www.oit.doe.gov / bestpractic / steam /generative.shtml](http://www.oit.doe.gov/bestpractic/ec/steam/generative.shtml).
- [16] Aroa, V., "Cheek Fired Heater Performance", Hyd Proc Jour, Vol. 64, No. 5, pp. 85-87, (1985).
- [17] Norio, S., "Chimical Energy and Exergy", Elsevier, Chapter 8, 9, 10, 11, Sapporo, Japan, (2001).
- [18] Wiley, J., "Advanced Thermodynamics for Engineer", Desmond Winter Bone, pp. 36-40, (2003).

### فهرست نمادهای انگلیسی

مساحت سطح خارجی بویلر	$A$
انرژی جز آب تغذیه بویلر (kJ)	$ex_{in}$
انرژی جز بخار تولیدی بویلر (kJ)	$ex_{out}$
انرژی حرارتی آزاد شده توسط سوخت (kcal/hr)	$H_F$
اتلاف حرارت از بدنه (kcal/hr)	$H_L$
انرژی حرارتی جذب شده توسط سیال (kcal/hr)	$H_P$
انرژی حرارتی خروجی از دودکش (kcal/hr)	$H_S$
دبی هوا (kg/s)	$\dot{m}_{Air}$
دبی سوخت (kg/s)	$\dot{m}_{Fuel}$

دبی بخار تولیدی (kg/s)	$\dot{m}_s$
تعداد مول سوخت	$N_{Fuel}$
تعداد مول گاز	$N_{gas}$
درصد مولی اجزای هوا	$N_t$
فشار (Pa)	$P$
فشار محیط (Pa)	$P_0$
فشار جزئی اجزا در حالت مرگ محدود (Pa)	$P_{i0}$
فشار جزئی اجزا در شرایط محیط (Pa)	$P_{i00}$
ثابت گاز (J/kgK)	$R$
دمای محیط در شرایط استاندارد (K)	$T_0$
دمای هوای محیط (K)	$T_a$
دمای سطح خارجی بویلر (K)	$T_s$
سرعت باد (m/s)	$V_w$

### نمادهای یونانی

ضریب صدور تشعشعی سطح خارجی بویلر	$\varepsilon$
انرژی هوا (kJ)	$\psi_{air}$
انرژی شیمیایی (kJ)	$\psi_{ch}$
مجموع انرژی (kJ)	$\psi_{Total}$
انرژی ترمومکانیکال (kJ)	$\psi_{Th}$

**Abstract**

In this paper, improving the performance of the boilers 4th refinery of south pars gas complex, using energy and exergy analysis is discussed. After modeling the factors affecting the performance boilers of the refinery such as variations in ambient temperature, relative humidity, percent excess air and preheat boiler feed water are investigated. According to the results of thermal efficiency and exergy efficiency of 4the boilers 4th refinery operating conditions (ambient temperature  $25^{\circ}C$  , relative humidity of 70 % air and excess air of 35 %), respectively 75.78 % and 39.64 % has been obtained, Also by setting the percentage of excess air in the combustion chamber of the boiler, exergy efficiency of the boiler can be increased to 41.46%.