

## کاهش نشر گازهای گلخانه‌ای با نصب بویلر بازیافت حرارتی روی توربین‌های گازی نیروگاه شرکت پتروشیمی بندرامام

\*محمد تقی جعفرزاده<sup>۱</sup>، احمد خوش‌گرد<sup>۱</sup>، معصومه مرادزاده<sup>۱</sup>، مهران سلیمانی<sup>۲</sup>

۱- شرکت ملی صنایع پتروشیمی

۲- پتروشیمی بندرامام، شرکت آب نیرو، صنایع ملی پتروشیمی

[mt\\_jafarzadeh@nipc.net](mailto:mt_jafarzadeh@nipc.net)

چکیده

روش Cogeneration یکی از تکنولوژی‌های متداول در تأمین نیازهای انرژی صنایع به شمار می‌رود. در این روش، حرارت موجود در گازهای احتراق که از طریق دودکش در محیط تخلیه می‌شوند، جهت تولید بخار بازیافت می‌شوند. در نتیجه مصرف سوخت کاهش یافته، همچنین باعث کاهش میزان انتشار CO<sub>2</sub> و سایر آلاینده‌های زیست محیطی ناشی از احتراق و می‌گردد.

در مقاله حاضر موضوع نصب بویلرهای بازیافت حرارت بر روی توربین‌های گازی واحد نیروگاه مجتمع پتروشیمی بندرامام از نظر فنی و اقتصادی مورد بررسی قرار گرفته و نقش آن در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و درآمدهای ناشی از محل فروش گواهی کاهش انتشار مورد ارزیابی قرار گرفته است.

نتیجه مطالعات نشان می‌دهد که با احداث سیستم بازیافت حرارتی، میزان ۴۶/۴ میلیارد ریال در سال در مصرف سوخت صرفه جویی شده و درآمدی معادل ۷۲ میلیارد ریال نیز از محل فروش گواهی کاهش نشر بدست می‌آید. دوره بازگشت سرمایه در دو حالت با و بدون منظور کردن درآمد ناشی از فروش گواهی کاهش نشر بترتیب معادل ۳/۸ و ۱/۵ سال بدست آمد که نشان‌دهنده تاثیر بسیار بالای فرصتهای پیش بینی شده در پروتکل کیوتو برای توجیه اقتصادی طرح‌هاست.

**کلمات کلیدی:** مکانیسم توسعه پاک (CDM) - پتروشیمی بندرامام - بازیافت حرارت - گواهی کاهش انتشار

## ۱- مقدمه

شرکت پتروشیمی بندرامام بزرگترین مجتمع پتروشیمی کشور در منطقه ویژه اقتصادی ماهشهر می باشد شرکت آب نیرو وظیفه تأمین سرویس های جانبی نظیر آب، بخار، برق، هوای فشرده و ازت مصرفی پتروشیمی بندرامام را بعهده دارد.

نیروگاه پتروشیمی بندرامام دارای ۴ دستگاه GTG از نوع ABB مدل 13D هر یک با ظرفیت تولید 64MW می باشد که برق مورد نیاز مجتمع را تأمین می نمایند. هوای ورودی جهت احتراق پس از عبور از صافی ها وارد کمپرسور شده و پس از عبور از مراحل مختلف کمپرسور، با فشار  $9/7 \text{ kg/cm}^2$  و دمای  $250^\circ \text{C}$  وارد محفظه احتراق شده و در آنجا پس از اختلاط با سوخت می سوزد. نرخ سوخت گازی ورودی به محفظه احتراق برابر  $20490 \text{ Nm}^3/\text{hr}$  می باشد. گازهای حاصل از احتراق به همراه بخش دیگری از هوای گرم خروجی از کمپرسور مخلوط شده و با دمای  $945^\circ \text{C}$  وارد توربین می شوند. مخلوط گازی ضمن به چرخش در آوردن توربین انرژی خود را روی پره های توربین آزاد می کنند. گازهای احتراق پس از خروج از توربین با دمای  $480^\circ \text{C}$  و فشار  $760 \text{ mmHg}$  و با نرخی برابر  $365 \text{ kg/s}$  از دودکش خارج می شوند.

این مقاله به بررسی اجرای طرح بویلرهای بازیافت حرارتی در نیروگاه مجتمع آب نیرو می پردازد.

## ۲- روشهای بازیافت حرارت

راندمان واحدهای نیروگاهی در محدوده تقریبی ۳۳٪ برای نیروگاه های هسته ای تا ۴۳٪ برای نیروگاه های سیکل ترکیبی متغیر است و این بدان معنی است که ۵۷٪ تا ۶۸٪ از انرژی سوخت تلف می شود. البته برخی از این تلفات نظیر تلفات ناشی از بویلرها غیر قابل بازیافت است، لیکن قسمت عمده ای از حرارت خروجی را می تواند در فرآیندهای صنعتی و یا گرمایش مورد استفاده قرار گیرد. با بکارگیری حرارت خروجی از دودکش نیروگاه، راندمان کل مجموعه به بیش از ۸۰٪ می رسد.

به طور کلی سیستم های Cogeneration به دو نوع عمده تقسیم می شوند که به Topping Cycle و Bottoming Cycle موسومند. در نوع Topping Cycle، توان قبل از تحویل حرارت به فرآیند، تولید می شود که از آنجمله می توان به سیکل های توربین بخار اشاره نمود. در نوع Bottoming Cycle توان با استفاده از حرارت بازیافتی که در حالت معمولی به محیط فرستاده می شود، تولید می شود که تولید توان با استفاده از بازیافت انرژی حرارتی نمونه ای از آن می باشد.

جنبه های اقتصادی بکارگیری توربین گاز، در فرآیندها، اغلب به استفاده موثر از حرارت خروجی آنها بستگی دارد. افزایش راندمان کلی سیستم، بواسطه کاهش دمای گاز خروجی از دودکش ها به دلیل استفاده

موثر از بازیافت حرارت خواهد بود. متداولترین شکل استفاده از این انرژی، استفاده از آن برای تولید بخار در یک بویلر بازیافت حرارت (HRSG) Heat Recovery Steam Generator می باشد.

### ۳- تشریح عملکرد بویلرهای بازیافت حرارتی (HRSG)

بویلرهای بازیافت حرارتی نوعی مبدل حرارتی هستند که با استفاده از حرارت گازهای خروجی از دودکش واحدهای نیروگاهی بخار تولید نموده و باعث افزایش راندمان توربین می شوند. استفاده از HRSG در نیروگاه سیکل ترکیبی عمومیت داشته و از حرارت گازهای احتراق بخار تولید می شود. این بخار به عنوان نیروی محرکه توربین های بخار مورد استفاده قرار می گیرد. ترکیب HRSG و نیروگاه سیکل ترکیبی راندمانی بسیار بالاتر از توربین های گازی یا توربین های بخار به تنهایی دارد.

هر واحد بازیافت حرارتی از سه قسمت تبخیر کننده، بخش فوق داغ<sup>۱</sup> و اکونومایزر<sup>۲</sup> تشکیل شده است. بویلرهای بازیافت حرارتی در یک تقسیم بندی با توجه به جهت جریان گازهای دودکش به دو دسته افقی و عمودی در تقسیم بندی دیگر به سه نوع یک فشاری (SINGLE PRESSURE)، دو فشاری (DOUBLE PRESSURE) و سه فشاری (TRIPLE PRESSURE) دسته بندی می شوند. نوع دوم دسته بندی براساس تعداد سطوح فشار مختلفی که سیستم تولید می کند و همچنین تعداد درام های بخار<sup>۳</sup> انجام می شود.

نوع TRIPLE PRESSURE دارای سه قسمت است که یکی بخش بخار فشار پایین، دومی بخش بخار فشار متوسط و سومی بخش بخار فشار بالا است. هر قسمت دارای یک درام و یک تبخیر کننده مجزاست که در آن آب به بخار تبدیل می شود.

بویلرهای بازیافت حرارت دارای دو نوع احتراقی (Fired) و بدون احتراق (Unfired) هستند که نوع احتراقی آنها به دو نوع احتراق تکمیلی و احتراق کامل تقسیم می شود که انتخاب نوع مناسب آن بر اساس ملاحظات فنی و اقتصادی صورت می پذیرد. نوع DUCT FIRING جهت افزایش راندمان و تولید بخار بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند. همچنین با نصب DIVERTER VALVE جهت HRSG می توان بدون از مدار خارج کردن توربین در زمانی که بخار مورد نیاز نیست سیستم HRSG را از مدار خارج نمود.

---

<sup>1</sup> SUPER HEATER

<sup>2</sup> ECONOMIZER

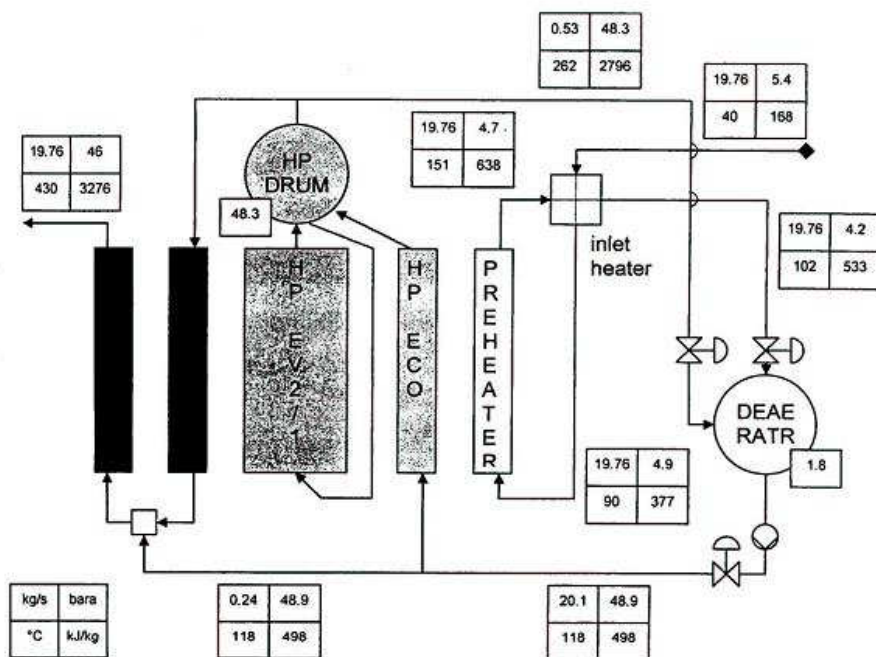
<sup>3</sup> STEAM DRUM

#### ۴- تشریح طرح پیشنهادی بازیافت حرارت

پیشنهاد برای نصب سیستم بازیافت حرارت (HRSG) برای ۴ دستگاه GTG شرکت آب نیرومی باشد. نمای بویلرهای بازیافت حرارتی پیشنهادی طرح در شکل (۱) نشان داده شده است. محاسبات بعمل آمده (جدول ۱) نشان می‌دهد که مجموعه این چهار واحد بازیافت حرارت هر یک به ظرفیت ۱۱۲ تن در ساعت می‌توانند در حدود ۳۳۰ تا ۴۴۰ تن در ساعت بخار فشار بالا که ۳۰٪ بخار فشار بالای مورد نیاز مجتمع است را تولید نمایند.

استفاده از واحدهای بازیافت حرارتی کاهش ۳۵ درصدی سوخت مصرفی واحد بخار و همچنین کاهش انتشار آلاینده‌های زیست محیطی را به همراه دارد.

از سوی دیگر با نصب توربین بخار و تبدیل بخشی از بخار فشار بالای تولیدی این مجموعه به بخار فشار متوسط، امکان تولید کل بخار فشار متوسط تامین می‌شود. بدین ترتیب می‌توان ظرفیت تولید برق را حداقل ۵ مگاوات افزایش داده و بخار فشار متوسط با کیفیت عالی نیز تولید نمود.



شکل ۱- نمای بویلرهای بازیافت حرارتی

جدول ۱- نتیجه محاسبات انجام شده روی بویلرهای بازیافت حرارت

Parameter	Unit	Value
HRSO Load	%	100
Gas Turbine Load	%	100
GT Exhaust Flue Gas Flow	Kg/hr	1.2093*106
GT Exhaust Flue Gas Temp.	°C	400 (Max.450)
Natural Gas Firing in Duct Burner	Kg/hr	4306
HRSO Inlet Flue Gas Flow	Kg/hr	1.2136*106
HP Steam Production	Kg/hr	145000
HP Steam Pressure at S.H. Outlet	Kg/hr	48
HP Steam Temp.	°C	430
MP Steam Production		37770
MP Steam Pressure at S.H. Outlet		14
MP Steam Temp.	°C	205.7

##### ۵- ارزیابی اثرات ناشی از اجرای طرح

یکی از مواردی که هنگام نصب بویلر بازیافت حرارت حائز اهمیت است، تاثیر افت فشار ایجاد شده در مسیر گازهای احتراقی بر ظرفیت تولید توان توربین گاز می‌باشد. سازندگان توربین‌های گازی معمولاً بوسیله نمودارهایی تاثیر افت فشار در مسیر ورود هوا یا خروج گازهای احتراقی را نشان می‌دهند. محاسبات نشان می‌دهد ظرفیت توان در صورت نصب بویلر بازیافت حرارت در حدود ۱/۷ درصد (معادل) نسبت به حالت بار پایه کاهش پیدا می‌کند. از سوی دیگر می‌توان با نصب سیستم پاشش مه بر روی توربین‌های گازی، این کاهش جزئی ظرفیت را نیز کمتر کرد.

بنابراین با مزایایی که از اجرای طرح انتظار می‌رود، با اطمینان می‌توان اظهار داشت که این موضوع هیچگونه نقطه ضعفی برای اجرای این پیشنهاد محسوب نمی‌شود.

بطور کلی می‌توان مزایای حاصل از اجرای طرح را بصورت زیر خلاصه نمود:

- کاهش حدود ۳۵ درصدی در مصرف سوخت واحد بخار
- تولید ۳۳۰ تا ۴۴۰ تن در ساعت بخار فوق داغ فشار بالا
- کاهش انتشار ۷۰۰ هزار تن در سال گاز دی اکسید کربن
- افزایش راندمان تبدیل انرژی
- ایجاد ظرفیت جدید تولید بخار و عدم نیاز به خرید بویلر ششم

- امکان استفاده از توربین بخار برای تولید بخار فشار متوسط با خلوص بالا
- کاهش آلودگی محیط زیست
- کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به اتمسفر (NOx , CO<sub>2</sub>)
- کسب درآمد جانبی از محل فروش گواهی کاهش نشر

## ۶- برآورد اقتصادی طرح

برآورد اقتصادی طرح با در نظر گرفتن سرمایه گذاری اولیه برای اجرای طرح، صرفه جویی حاصل از کاهش مصرف سوخت و در آمد ناشی از اجرای طرح در قالب مکانیسم توسعه پاک و درآمدهای ناشی از فروش گواهی نشر در دو حالت محاسبه و ارائه شده است.

- سرمایه گذاری اولیه

طبق برآوردهای اولیه ای که بعمل آمد، میزان سرمایه گذاری لازم برای اجرای طرح حدود ۱۷/۵ میلیون دلار یا معادل ۱۷۵ میلیارد ریال بدست آمد که در محاسبات مدنظر قرار گرفته است.

- صرفه جویی سالانه

برای محاسبه میزان صرفه جویی سالانه، هزینه انرژی تولید بخار حاصله توسط بویلرهای سیستم بازیافت حرارت با هزینه تولید آن در بویلرهای موجود مجتمع مقایسه شده است. اگر هزینه سوخت مصرفی مشعل‌های مربوطه (Duct Burners) از مقدار فوق کم شود، مقدار خالص صرفه‌جویی حاصل از اجرای پروژه بدست می آید.

در این خصوص ابتدا مقدار بخار تولیدی برحسب فشار بخار بالا محاسبه می‌شود:

$$\text{HP Steam} = 2 * 145 = 290 \text{ ton/hr}$$

$$\text{MP Steam} = 2 * 37.77 = 75.54 \text{ ton/hr}$$

$$\text{HP Steam} = 290 + 75.54 * 0.865 = 355.34 \text{ ton/hr}$$

بویلرهای موجود واحد بخار در بار نامی خود، به ازای تولید ۳۰۰ ton/hr بخار، ۲۴۵۰۰ Nm<sup>3</sup>/hr سوخت گازی مصرف می‌کنند. راندمان حرارتی این بویلرها مطابق شرایط طراحی ۸۰٪ می‌باشد، حال آنکه مقدار واقعی آن بر اساس اندازه گیریهای بعمل آمده حدود ۰/۶۵ می‌باشد. با لحاظ کردن بخار مصرفی توربین فن هوای بویلر و بخار مصرفی در هوازدا، راندمان حرارتی کلی را می‌توان در حدود ۰/۵۷ در نظر گرفت. بنابراین سوخت مصرفی بویلرهای موجود (سوخت صرفه جویی شده) برای تولید ۳۵۴/۹۳ ton/hr بصورت زیر بدست می آید:

$$\text{Fuel Saving} = 355.34 \text{ ton/hr} * [(24500 \text{ Nm}^3/\text{hr}) / (300 \text{ ton/hr})] * (0.8/0.57) * 8760 \text{ hr/year}$$

$$= 356,786,296 \text{ Nm}^3$$

با توجه به اینکه مشعلهای موجود در بویلرهای بازیافت حرارت از سوخت گازی مصرف می‌کنند، برای محاسبه میزان خالص سوخت صرفه‌جویی شده باید سوخت مصرفی سالانه این مشعلها از سوخت مصرف شده در بویلرهای موجود کم شود.

$$\text{Duct Burners Fuel Consumption} = 2 * 4306 \text{ kg/hr} * 0.8338 \text{ kg/Nm}^3 * 8760 \text{ hr/year} \\ = 62,902,806 \text{ Nm}^3$$

$$\text{Net Fuel Saving} = 356,786,296 - 62,902,806 = 293,883,490 \text{ Nm}^3/\text{year}$$

میزان صرفه جویی مالی سالانه بواسطه نصب بویلرهای بازیافت حرارت برابر است با:

$$\text{میزان صرفه جویی کل} = 293,883,490 \text{ Nm}^3/\text{year} * 158 \text{ Rials/Nm}^3 = 46,433 \text{ million Rls/year}$$

▪ درآمد ناشی از فروش گواهی نشر

اجرای طرح منجر به کاهش مصرف سوخت به میزان ۲۹۳۸۸۳۴۹۰ نرمال متر مکعب در سال می‌شود. میزان نشر CO<sub>2</sub> طبق توصیه IPCC از روی ارزش حرارتی گاز بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{میزان نشر قابل نشر} = 293,883,490 \text{ (Nm}^3/\text{year)} * 43772 \text{ (kJ/Nm}^3) * (10^{-9} \text{ TJ/kJ)} * 56.1 \text{ (ton CO}_2/\text{TJ)} \\ = 721663 \text{ ton Eq.CO}_2/\text{year} = 721663 \text{ CER}$$

با فرض حدود ۱۰ دلار برای هر CER، میزان درآمد سالیانه ناشی از فروش CER حدود ۷/۲ میلیون دلار یا حدود ۷۲ میلیارد ریال خواهد شد.

▪ زمان بازگشت سرمایه

زمان بازگشت سرمایه در دو حالت با، و بدون منظور کردن درآمد ناشی از فروش گواهی کاهش نشر محاسبه و بصورت زیر خلاصه شده است:

حالت (۱) بدون منظور کردن درآمد ناشی از فروش گواهی کاهش نشر

$$\text{زمان بازگشت سرمایه} = \text{صرفه جویی} \div \text{میزان سرمایه گذاری} = 175 \div 46/4 = 3/77$$

حالت (۲) با منظور کردن درآمد ناشی از فروش گواهی کاهش نشر

$$\text{زمان بازگشت سرمایه} = \text{صرفه جویی یا درآمد} \div \text{میزان سرمایه گذاری} = 175 \div (46/4 + 72) = 1/48$$

سرمایه

همانگونه که ملاحظه می‌شود، نرخ بازگشت سرمایه در صورت لحاظ کردن درآمدهای ناشی از فروش CER از حدود ۳/۸ سال به ۱/۵ سال کاهش می‌یابد که توجیه پذیری طرح را بسیار بالا می‌برد.

## ۷- بررسی متدولوژیهای قابل کاربرد

پیشنهاد طرح حاضر بازیابی حرارت اتلاف شده است و لذا متدولوژیهایی که برای گروه ۱۴ و ۴ پروژه های CDM تصویب شده‌اند در این خصوص قابل استفاده هستند. از طرفی میزان کاهش انتشار حاصل از طرح (۷۲۱۰۰۰ CER در مقایسه با معیار CER ۶۰۰۰۰) به اندازه ای است که جزو پروژه های بزرگ مقیاس به شمار می آید. با بررسی متدولوژیهای تصویب شده، ملاحظه می شود که متدولوژی ACM0012 با عنوان "متدولوژی پایه برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از پروژه‌های بازیافت تلفات انرژی" [۴] متدولوژی مناسب پروژه پیشنهادی می باشد. لازم به ذکر است تا کنون ۲۶ پروژه با متدولوژی ACM0012 و ۴ پروژه با متدولوژی ASM-III.Q (برای پروژه های کوچک مقیاس از نوع بازیابی حرارتی) ثبت شده اند. همچنین با توجه به اینکه متدولوژی ACM0012 جایگزین متدولوژیهای AM0032 و ACM004 شده است با احتساب پروژه های ثبت شده با دو متدولوژی قبلی تعداد کل پروژه های ثبت شده در زمینه بازیافت انرژی به ۱۶۱ پروژه می‌رسد.

## ۸- بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و افزایش روزافزون قیمت انرژی در بازارهای جهانی و با در نظر گرفتن صرفه اقتصادی حاصل از اجرای طرح و همچنین سود حاصل از فروش گواهی های کاهش انتشار CO<sub>2</sub> اجرای این پروژه‌ها در صنعت مقرون به صرفه به نظر می‌رسند. همانگونه که در بخش برآورد اقتصادی طرح ذکر شد، اجرای پیشنهاد حاضر علاوه بر صرفه جویی در مصرف گاز، منجر به کسب درآمد اضافی از محل فروش CER ها خواهد شد که پس از تنها ۱/۵ سال سرمایه صرف شده را جبران خواهد نمود. توجه به این نکته بسایر جالب است که با انجام این پروژه ها می توان ضمن حفاظت از محیط زیست، به درآمد حدود ۱۲۰ میلیارد ریال در سال نیز دست یافت. همچنین باید توجه داشت که در صورت محاسبه میزان صرفه جویی ناشی از کاهش مصرف سوخت با قیمت‌های جهانی، میزان برگشت سرمایه به کمتر از یکسال تنزل یافته و سود حاصل از اجرای طرح نیز بیش از دو برابر خواهد شد. با توجه به درآمدهای قابل توجه حاصل از فروش گواهی‌های کاهش انتشار، می‌توان انتظار داشت که این نوع پروژه‌ها با سرعت بیشتری در کشور انجام شوند.

---

<sup>4</sup> Sectoral scope



## ۹- منابع و مراجع

- [۱] کتابچه طرح‌های شرکت ملی صنایع پتروشیمی، شرکت ملی صنایع پتروشیمی، سال ۱۳۸۷.
- [۲] گزارش فاز سوم پروژه ممیزی انرژی شرکت پتروشیمی بندرامام
- [3] Polley, G.T., Sarabchi, K., "Maximize Fuel Efficiency of Cogeneration System", Chemical Engineering Progress, May, 2000, 69-74.
- [4] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC); Approved consolidated baseline and monitoring methodology ACM0012 "Consolidated baseline methodology for GHG emission reductions from waste energy recovery projects"
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Greenhouse Gas Inventory Reference Manual: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, United Nations
- [6] website of European Climate Exchange: [www.exc.eu](http://www.exc.eu)