

بررسی ملاحظات فنی استحصال گاز CO₂ از دود خروجی نیروگاه بعثت

محمد سهرابی

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
تهران - ایران

عدنان مرادیان

پژوهشگاه نیرو
تهران - ایران

واژه‌های کلیدی: بازیافت، CO₂، بازده نیروگاه، مصرف انرژی، حلال

۱- مقدمه

تطبیق اجزای مختلف نیروگاه با واحد بازیافت CO₂ به منظور فراهم کردن نیازمندی‌های واحد بازیافت و شناسایی اثرات متقابل آن بر نیروگاه از جمله مسائلی است که بایستی جهت حفظ بازده نیروگاه در حد مطلوب، مورد توجه و بررسی قرار گیرد. یکی از روش‌های مهم جهت کاهش هزینه‌های بازیافت، به کار بردن فرآیند توسعه یافته بازیافت یعنی بهینه‌سازی آرایش برج جذب و برج دفع و بهره‌گیری از فرآیندهای مناسب جهت کاهش انرژی مصرفی جهت بازیافت حلال می‌باشد. واحد جذب CO₂ بدون در نظر گرفتن کوپل نیروگاه و بهبود واحدهای فرآیندی موجود جهت تأمین نیازمندی‌های موجود آمده امکان پذیر نخواهد بود.

در نیروگاه‌هایی با واحد جذب پس از احتراق، انتخاب آرایش‌های مختلف جذب منجر به اثرات متفاوتی روی نیروگاه می‌شود. همچنین در نظر گرفتن تغییرات فرآیند به این منظور که حلال‌ها به طور مناسب عمل کنند، بسیار مهم می‌باشد. برای مثال، میزان NO_x و SO_x بایستی در حد بسیار پایینی باشند تا از تخریب MEA جلوگیری شود. که این موارد از جمله مسائل و مشکلات سیستم بازیافت می‌باشد. دماهای

چکیده

جداسازی گاز CO₂ از دود حاصل از احتراق بویلر نیروگاه، به عنوان یک فرآیند پالایش و فراآوری گاز، به علت تأثیر متقابل واحد جذب CO₂ و نیروگاه، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. واحد جداسازی گاز CO₂ از نیروگاه بعثت با هدف جذب و جداسازی CO₂ از جریان دودکش نیروگاه، جهت مصرف خوراکی، طراحی و ساخته شده است. در این مقاله واحد جذب گاز CO₂ در نیروگاه بعثت توسط نرم افزار ترموفلو مدل‌سازی گردیده است و پارامترهای مؤثر بر عملکرد نیروگاه و واحد بازیافت، با توجه برداشت میزان معینی از دود، از محل قبل از ژانگستروم، مورد مطالعه قرار گرفته است. اثرات ناشی از برداشت دود شامل میزان کاهش بازده نیروگاه، کاهش میزان انتقال حرارت در ژانگستروم و میزان مصارف انرژی الکتریکی و بخار در واحد جذب بررسی شده است. سایر پارامترها، همچون افت فشارهای ایجاد شده، میزان بازده واحد جذب و تغییرات دمایی حلال ورودی به برج جذب، بر روی عملکرد و میزان مصارف انرژی واحد جذب تأثیر گذار می‌باشد که در این مقاله به آن پرداخته شده و راهکارهای فنی، جهت عملکرد مناسب واحد جذب ارائه گردیده است.

بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

جذب آمونیاکی را که وظیفه میعان CO₂ را بر عهده دارد تأمین می‌نماید. انرژی مورد نیاز برای تبخیر و بازیافت مینو اتانول آمین در سامانه احیاء (Reclaimer) و نیز بخار آب لازم در ریویلر MEA توسط بخشی از بخار نیروگاه تأمین می‌شود. دود خروجی از قسمت‌های ریویلر آمونیاک و ریکلایمر با دمای حدود ۲۰۰ °C وارد بخش پایین برج شستشوی دود می‌شود و در این برج با آب تماس می‌یابد. این فرآیند علاوه بر خنک کاری، سبب جدا شدن ذرات معلق و دوده جامد از دود می‌گردد. با کاهش دمای دود تا ۴۰ °C، حدود ۲۰۰۰ لیتر آب در هر ساعت از کندانس بخار آب موجود در دود حاصل می‌شود که به عنوان بخشی از آب جبرانی سیستم استفاده می‌گردد. دود پس از شستشو به حالت اشباع از بخار آب در آمده و از قسمت فوقانی برج خارج می‌شود.

دود خروجی از بالای برج شستشوی دود به فن مکنده (بلوئر) ساترفیوژ وصل می‌گردد. وظیفه این فن، جبران افت فشار دود در مسیر طولانی خود از گرم کن هوای نیروگاه تا خط استحصال CO₂ می‌باشد. دمنده به کار رفته به صورت تک مرحله‌ای بوده و قادر است فشار مورد نیاز برای عبور دود از برج سودااش (Soda Ash Tower) و جذب کننده (Absorber Tower) را ایجاد نماید.

دود خروجی از بالای برج سودااش وارد برج جذب می‌شود. دود در حرکت از پایین به بالای برج، در سطح پکینگ‌های استیل و پلی‌پروپیلن این برج با محلول ۲۰٪ مینو اتانول آمین که از بالا پاشش می‌شود برخورد می‌نماید. محلول مینو اتانول آمین، از پایین برج جذب خارج می‌شود و مابقی دود که عمدتاً شامل گاز نیتروژن، بخار آب و احتمالاً بخشی از CO₂ جذب نشده است به اتمسفر تخلیه می‌شود. مینو اتانول آمین سنگین توسط یک پمپ از پایین برج جذب وارد قسمت پایین یک مبدل صفحه‌ای MEA×MEA شده و دمای آن در حرکت به سمت بالا با کسب حرارت از طرف دیگر مبدل که حاوی سیال MEA سبک خروجی از ریویلر MEA است از ۴۸ °C به ۱۲۰ °C افزایش می‌یابد. MEA سنگین که بدین ترتیب پیش گرم شده است، به بالای برج

بالتر در فرآیند جذب، منجر به کاهش جذب گازهای سبک‌تر و بنابراین کاهش غلظت این اجزا در جریان جذب شده می‌شود. همچنین میزان جذب شیمیایی CO₂ با افزایش میزان بازیافت حرارتی حلال در ستون دفع افزایش می‌یابد [۱]. گرمای مورد نیاز بازیافت حلال، در بیشتر مواقع از بخار فشار پایین نیروگاه تأمین می‌شود که این میزان بخار می‌تواند به عنوان یک متغیر برای بازدهی کلی نیروگاه به شمار رود [۲]. انجام محاسبات و در نظر گرفتن تمهیدات لازم به منظور طراحی و ساخت یک نیروگاه همراه با واحد جذب CO₂ در ساخت نیروگاه‌های جدید ضروری به نظر می‌رسد. در واحدهای نیروگاهی جدید بایستی نیازمندی‌های مربوط به نصب واحد جذب CO₂ فراهم شود. به این منظور اصلی‌ترین نیازمندی‌ها شامل فضا و امکان دسترسی به تجهیزات اضافی، منابع انرژی لازم و تأمین نیازمندی‌های سیستم‌های خنک کننده می‌باشد [۳].

بازده نیروگاه همراه با واحد جذب CO₂ بیشتر تحت تأثیر مصرف انرژی گرمایی بخار و مصرف الکتریسیته می‌باشد. میزان بخار مورد نیاز، الکتریسیته و آب خنک کننده وابسته به همدیگر می‌باشند و علاوه بر آن وابسته به تغییرات فرآیند بازیافت هستند. بنابراین بررسی و بهینه‌سازی تمام سیستم‌های مورد استفاده، ضروری می‌باشد. هر فرآیند (تولید برق، بازیافت CO₂، فشرده‌سازی CO₂) نیازمند ابزارهای مدلسازی مختلفی می‌باشند. بررسی و بهینه‌سازی کل سیستم از طریق مشخص کردن مقادیر دقیق بین واحدها در شبیه‌سازی‌های مختلف فراهم می‌شود. بررسی چنین مواردی اثر جریان‌ات خروجی از نیروگاه را روی بازدهی آن نشان خواهد داد. به طور مثال، اثر ایجاد شده بر بازدهی نیروگاه ناشی از میزان بخار مورد نیاز برای دسترسی به دمای مطلوب از توابع مشخصه جهت مدلسازی واحدهای مختلف نیروگاه می‌باشد.

۲- واحد استحصال CO₂ از نیروگاه بعثت [۴]

دود دریافتی از نیروگاه با درجه حرارت ۳۸۰ °C توسط لوله فولادی عایق شده به ورودی سامانه استحصال انتقال یافته و وارد ریویلر آمونیاک شده و انرژی لازم برای سامانه

بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

تشکیل دهنده واحد در ۳ بخش اصلی زیر تقسیم بندی می‌شود:

- ۱- تجهیزات مربوط به گاز ورودی: شامل خنک کننده گاز، بلوئر و چیلر
- ۲- بازیافت CO₂ و بازیافت حلال: شامل برج جذب، برج دفع، ریویلر، مبدل حرارتی حلال سبک و سنگین، خنک کننده حلال سبک (با استفاده از آب خنک کننده) و چیلر جذبی

۳- فشرده سازی CO₂: شامل کمپرسورهای چند مرحله‌ای، مبدل‌های حرارتی داخلی و حذف کننده مایع جهت مدلسازی واحد بازیافت CO₂ از نیروگاه بعثت، ابتدا لازم است تا واحد بازیافت CO₂ در نرم افزار THERMOFLEX شبیه سازی گردد. البته در برنامه STEAM PRO مربوط به ورژن ۲۰، واحد بازیافت CO₂ قابل دسترسی است [۵]. ولی در برنامه مذکور محل برداشت دود بعد از ژانگستروم می‌باشد. از آنجاییکه محل برداشت دود در واحد بازیافت از نیروگاه بعثت قبل از ژانگستروم می‌باشد، بنابراین به منظور بررسی اثر برداشت دود از این منطقه از نرم افزار THERMOFLEX استفاده می‌شود. واحد نیروگاهی بعثت که قبلاً در STRAM PRO طراحی شده است [۶]، در برنامه THERMOFLEX استفاده می‌شود. مشخصات این نیروگاه برای دو نوع سوخت مایع و سوخت گاز و برای بار ۱۰۰٪ در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات واحد نیروگاه بعثت جهت مدلسازی [۶]

PLANT SUMMARY	Unit	Gas Fuel	Mazut fuel
Ambient pressure	bar	0.8771	0.8771
Ambient temperature	°C	40	40
Ambient RH	%	16.41	16.41
Ambient wet bulb temperature	°C	20.02	20.02
Gross power	kW	83413	83319
Gross electric efficiency(LHV)	%	35.74	36.12
Gross heat rate(LHV)	kJ/kWh	10072	9968
Net power	kW	77528	77487
Net electric efficiency(LHV)	%	33.22	33.59
Net heat rate(LHV)	kJ/kWh	10836	10718
Net fuel input(LHV)	kW	233365	230702

فرآیند جذب CO₂ طراحی شده با نرم افزار ترموفلو در شکل (۱) آورده شده است.

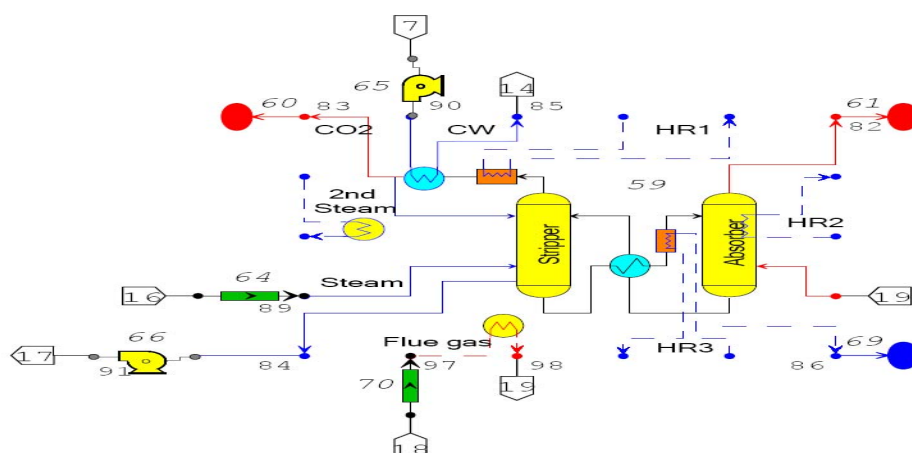
دیگری به نام برج عریان ساز (Stripper Tower) انتقال یافته و با پاشش از داخل این برج، در سطح پکینگ‌های استیل آن با بخار آب رسیده از ریویلر MEA برخورد نموده و درجه حرارت آن باز هم افزایش می‌یابد. گرمای نهان بخار آب، انرژی لازم برای جدا شدن CO₂ از MEA سنگین را فراهم می‌نماید و بدین ترتیب، در برج عریان ساز مقدار قابل ملاحظه‌ای از گاز CO₂ همراه بخار آب به طرف قسمت‌های فوقانی برج رانده می‌شود.

محلول MEA که CO₂ خود را از دست داده است در پایین برج جمع آوری و از داخل پوسته ریویلر با کویل استیل حاوی بخار ۱۵۰ °C برخورد نموده و دمای آن افزایش می‌یابد. وظیفه ریویلر MEA، آزادسازی باقیمانده گاز CO₂ از MEA و تأمین بخار آب لازم در برج عریان ساز است. بخار آب موجود در کویل ریویلر از بخار نیروگاه تأمین می‌شود. گاز CO₂ آزاد شده از برج عریان ساز، بصورت داغ و همراه با مقدار زیادی بخار آب و اندکی MEA از بالای برج خارج شده و وارد کندانسور شده و پس از میعان بخار آب، توسط کمپرسورهای دو مرحله‌ای و تحت فشار زیاد متراکم شده و وارد یک مخزن پتاسیم پرمگنات می‌گردد. گاز CO₂ پس از عبور از برج پرمگنات وارد اکونومایزر (Economizer) و خشک کن تبریدی (Freeze Dryer) می‌گردد. پس از این مرحله، گاز CO₂ وارد خشک‌کن دیگری از نوع دو لایه غربال مولکولی با روش جذب فیزیکی می‌شود تا نقطه شبنم آن از ۴۸°C- به کمتر از ۵۵°C- رسیده و پس از عبور از فیلتر کربنی به منظور جداسازی ناخالصی‌های محلول مانند اکسیژن، نیتروژن، اکسیدهای نیتروژن و غیره وارد لوله‌های ریویلر مایع CO₂ گردد. گاز CO₂ سپس وارد پوسته تبخیر کننده آمونیاک شده و در آنجا در تماس با سطح لوله‌های بسیار سرد دیگری که درون آن‌ها آمونیاک مایع جریان دارد دچار میعان می‌گردد. مایع CO₂ خالص شده پس از عبور از ریویلر CO₂ سرریز شده و به تانک ذخیره انتقال می‌یابد.

۳- مدلسازی واحد بازیافت CO₂ از نیروگاه بعثت

به منظور شبیه سازی فرآیند جذب CO₂، ابتدا اجزای

بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل (۱): فرآیند جذب CO₂ طراحی شده با نرم افزار ترموفلو

واحد بازیافت و همچنین نیروگاه استفاده خواهد شد. در این بخش سعی شده است تا شبیه‌سازی پایه بر اساس ویژگی‌های واحد طراحی شده در نیروگاه انجام شود. مشخصات کلی برای شبیه‌سازی در حالت پایه با استفاده از اطلاعات به دست آمده از واحد بازیافت CO₂ موجود در نیروگاه بعثت، در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): مشخصات کلی برای شبیه‌سازی

واحد جذب CO₂ نیروگاه بعثت در حالت پایه

PLANT SUMMARY	Unit	
CO ₂ capture efficiency	%	99
Total gas pressure drop	milibar	100
Main steam condensing P	bar	3.5
cooler exit T	°C	35
Gas exit temperature	°C	40
Rich solvent flow/CO ₂ flow		6.54
CO ₂ Compressor inlet pressure	bar	3
CO ₂ Compressor inlet temperature	°C	40
CO ₂ delivery pressure	bar	17
Heat Input (per kg of CO ₂)	KJ	4000

۴- تأثیر میزان برداشت CO₂ بر بازده کلی نیروگاه

به منظور بررسی تأثیر میزان برداشت CO₂ از نیروگاه بعثت با حالت بدون واحد بازیافت، با توجه به شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب برای سوخت مازوت و گاز، بازدهی کلی نیروگاه برای میزان برداشت ۵ تا ۹۵ درصد از دود خروجی محاسبه شده است. به عنوان مثال برای میزان برداشت ۵٪، بازدهی

واحد بازیافت در نیروگاه بعثت، بیشتر به منظور مصرف خوراکی و صنایع نوشابه‌سازی طراحی شده است و بنابراین خلوص CO₂ در آن بسیار بالا می‌باشد، به همین منظور در آن از برج‌های سودااش، پرمگنات پتاسیم و برج کربن اکتیو به منظور استحصال CO₂ با خلوص بسیار بالا استفاده می‌شود. همچنین در واحد بازیافت در نیروگاه بعثت، از حرارت دود برای میعان گاز کربنیک تولیدی استفاده می‌شود. این سیستم که توسط چیلر جذبی آمونیاکی صورت می‌گیرد با مصرف برق بسیار پایین نسبت به چیلرهای تراکمی کار می‌کند و از جمله ابداعات صورت گرفته در طراحی واحد بازیافت در نیروگاه بعثت می‌باشد و بنابراین در مدلسازی انجام شده در این تحقیق وارد طراحی CO₂ نخواهد شد. اجزای اصلی سیستم طراحی شده شامل یک برج جذب، برج عریان ساز، کمپرسور به منظور تراکم گاز CO₂، خنک کننده گاز ورودی و بلوئر جهت جبران افت فشار از محل برداشت CO₂ و همچنین انتقال گاز دودکش به برج جذب می‌باشد. همچنین در این سیستم از پمپ‌هایی به منظور انتقال آب خنک کننده به کندانسور برج عریان ساز و همچنین برگشت آب خروجی از ریویلر برج عریان ساز به سیستم نیروگاه استفاده می‌شود. با وجود اینکه سیستم طراحی شده ممکن است شامل تمام جزئیات موجود در واحد بازیافت اصلی نباشد، ولی از آنجاییکه بیشتر اجزای اصلی سیستم را در بردارد، به منظور بررسی مشخص کردن پارامترهای مهم و مؤثر تأثیر گذار بر

بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

با توجه به جدول (۳) مصرف انرژی الکتریکی عمدتاً ناشی از کمپرسور می‌باشد، بعد از آن مصرف انرژی الکتریکی بلوئر قابل توجه می‌باشد. به عنوان مثال برای تولید CO₂ به میزان در حدود ۵۰ تن در روز مطابق با نیروگاه بعثت، حدود ۵ درصد از گاز دودکش گرفته می‌شود. برای این میزان تولید، انرژی الکتریکی مصرفی کلی شامل کمپرسور، بلوئر و همچنین پمپ‌های مورد استفاده برابر ۱۷۸/۲ kW می‌باشد.

Desired flow fraction of flue gas		0.035	0.05	0.1	0.15
CO ₂ captured	kg/s	0.5785	0.8264	1.653	2.479
CO ₂ captured per day	tonne/day	49.98	71.4	142.8	214.2
Heat input	kW	2314.1	3306	6612	9917
CO ₂ compression power consumption	kW	81.72	116.8	233.7	350.7
Booster fan power consumption	kW	33.9	49.19	103.4	162.4
Total electrical power consumption	kW	124.2	178.2	361.6	549.8

جدول (۳): میزان مصارف مختلف انرژی جهت بازیافت نسبت به مقادیر مختلف برداشت دود

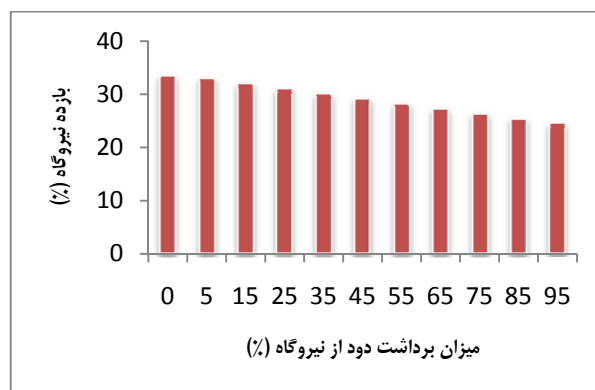
البته به منظور بررسی میزان کلی انرژی الکتریکی، بایستی دید مقدار انرژی حرارتی ورودی معادل چه میزان انرژی الکتریکی می‌باشد. از آنجا که میزان بخار آب استخراج شده به طور کامل به انرژی مکانیکی در توربین بخار تبدیل نمی‌شود، به همین منظور میزان انرژی آب استخراج شده به صورت ضریبی از انرژی مکانیکی قابل محاسبه است. بدین ترتیب برای محاسبه میزان انرژی الکتریکی کلی از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$E = \dot{Q} \times \beta + \dot{W}_{total} \quad (۱)$$

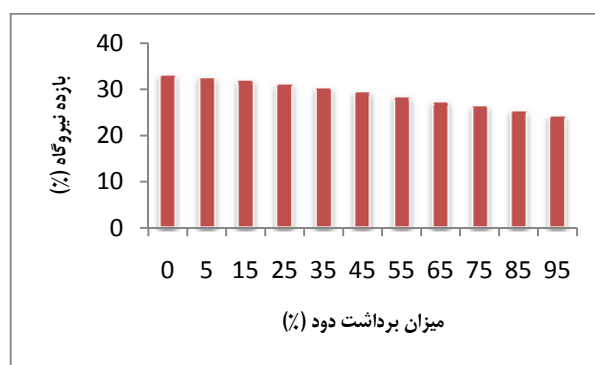
که $\dot{Q}$ انرژی حرارتی ورودی بخار آب اشباع به ریویلر برج عریان ساز (kW)، β ضریب بیان کننده تفاوت بین محتوای انرژی الکتریکی و انرژی حرارتی و در نهایت $\dot{W}_{total}$ انرژی الکتریکی کلی (kW)، شامل انرژی کمپرسور، بلوئر، پمپ‌ها و سایر تجهیزات مصرف کننده برق می‌باشد. به

نیروگاه از ۳۳/۵۹٪ در حالت پایه به میزان ۳۳/۰۸٪ برای سوخت مازوت کاهش می‌یابد که برابر ۱/۵ درصد کاهش می‌باشد. این کاهش برای ۵۰٪ برداشت از گاز دودکش ۱۴/۴ درصد و برای برداشت ۹۰ درصد به میزان ۲۶/۸ درصد خواهد بود. با توجه به اینکه حداکثر میزان برداشت CO₂ از گاز دودکش نیروگاه بعثت ۵٪ می‌باشد، به نظر می‌رسد کاهش ۱/۵ درصدی بازده برای تولید ۵۰ تن گاز CO₂ در روز قابل توجیه باشد. برای سوخت گاز این میزان کمتر نیز می‌باشد و به ۱ درصد می‌رسد.

اصلی‌ترین دلیل کاهش بازدهی نیروگاه با افزایش میزان برداشت، افزایش میزان انرژی مصرفی واحد بازیافت CO₂ می‌باشد. بیشترین مصرف انرژی گرمایی مربوط به بخار ریویلر برج عریان ساز و انرژی الکتریکی کمپرسور و بلوئر می‌باشد. با افزایش میزان برداشت میزان انرژی مورد نیاز برای بازیافت CO₂ افزایش می‌یابد. جدول (۳) میزان مصارف مختلف انرژی را جهت بازیافت CO₂ با میزان برداشت ۳/۵ تا ۱۵ درصد از گاز دودکش، برای سوخت مازوت نشان می‌دهد.



شکل (۲): تأثیر میزان برداشت دود از نیروگاه بعثت با سوخت مازوت

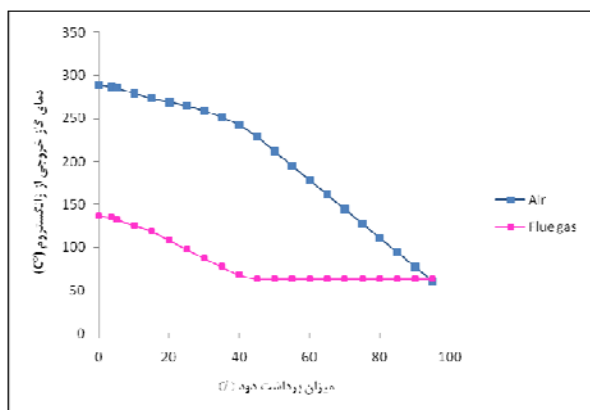


شکل (۳): تأثیر میزان برداشت دود از نیروگاه بعثت با سوخت گاز

بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

هوای ورودی به بویلر قابل چشمپوشی نیست. به عنوان مثال با برداشت ۵۰ و ۹۵ درصد از دود، کاهش دمای هوای خروجی از ژانگستروم به ترتیب ۷۷/۲ و ۲۲۸°C و به دلیل کاهش انتقال حرارت در ژانگستروم به میزان ۳۲ و ۹۴٪ می‌باشد.

بر طبق آنچه بیان شد با افزایش درصد برداشت دود خروجی، اساساً وجود ژانگستروم می‌تواند توجیه خود را از دست بدهد. با این حال می‌بایست برای رفع این مشکل نیز به دنبال راهکارهای بود تا بویلر کارایی خود را از دست ندهد. یکی از راهکارهای پیشنهادی که در منبع [۸] به آن اشاره شده است، بازگردش هوای داغ است. بازگردش هوا موجب افزایش جریان هوای عبوری از سمت سرد مبدل می‌شود و به دلیل اختلاط بخشی از هوای داغ خارج شده از ژانگستروم با هوای سرد ورودی به آن، دمای هوای ورودی به ژانگستروم افزایش خواهد یافت. بدین ترتیب می‌توان دمای هوای ورودی به سمت سرد مبدل را همزمان با افزایش جریان بهبود بخشید. توجه به این نکته مهم است که بازگردش هوا توسط یک فن خاص صورت می‌گیرد که قطعاً نیازمند صرف توان است. بنابراین به منظور بهبود کارایی حرارتی بویلر، بازگردش هوا در ژانگستروم بایستی در حدی باشد که برآیند بهبود عملکرد بویلر و افزایش مصرف انرژی الکتریکی توسط فن بازگردش، مثبت باشد.



شکل (۴): تغییرات دمای هوای ورودی به بویلر و دمای دود خروجی از ژانگستروم با میزان برداشت دود

عنوان مثال برای میزان تولید ۵۰ تن در روز از واحد نیروگاه بعثت، با قرار دادن $\beta = 0.23$ [۷]، میزان انرژی الکتریکی به میزان ۶۵۶/۴ kW می‌باشد.

$$E = 2314.1 \times 0.23 + 124.2 = 656.4 \text{ kW}$$

بنابراین میزان مصرف انرژی الکتریکی تنها شامل کمپرسور، بلوئر و پمپ‌ها نمی‌شود بلکه بیشتر مصرف انرژی ناشی از استخراج بخار آب از نیروگاه می‌باشد. در مثال بیان شده میزان انرژی ناشی از مصرف بخار در حدود ۴/۳ برابر سایر مصارف انرژی الکتریکی می‌باشد.

۵- تأثیر میزان برداشت دود بر عملکرد ژانگستروم

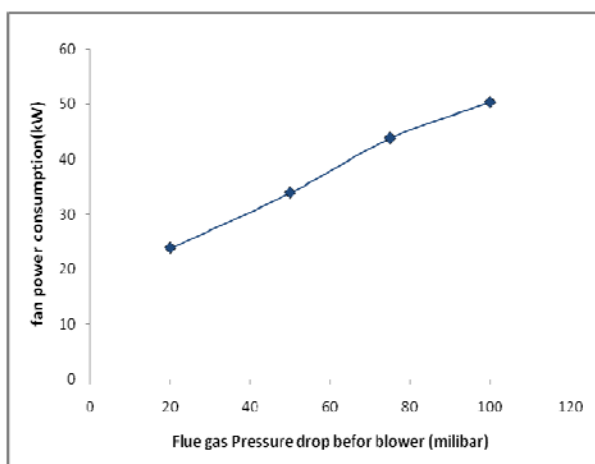
در نیروگاه بعثت، محل برداشت دود قبل از پیش‌گرم کن هوا قرار دارد. خروج درصدی از دود ورودی به ژانگستروم که به منظور پیش‌گرم کردن هوای ورودی می‌باشد، موجب کاهش جریان دود ورودی به ژانگستروم می‌شود. بنابراین ممکن است با کاهش جریان دود با دمای بالا، از میزان انتقال حرارت کاسته شود و باعث شود تا هوای ورودی نتواند به دمای مطلوب جهت احتراق برسد و موجب افزایش مصرف سوخت خواهد شد و بازدهی نیروگاه را کاهش خواهد داد. میزان کاهش دمای هوای ورودی به بویلر (دمای هوای خروجی از ژانگستروم) و دمای دود خروجی از ژانگستروم با میزان برداشت دود در شکل (۴) نشان داده شده است. همچنین در شکل (۵) کاهش انتقال حرارت در ژانگستروم نشان داده شده است. با توجه به شکل (۴)، به ازای میزان برداشت کم از دود نیروگاه، کاهش چندانی در دمای هوای خروجی از ژانگستروم ایجاد نمی‌شود. از آنجاییکه حداکثر میزان برداشت دود در واحد بازیافت CO₂ از نیروگاه بعثت، در حدود ۵ درصد می‌باشد، دمای هوای خروجی از ژانگستروم، ۳/۶°C کاهش داشته است و میزان کاهش انتقال حرارت، ۲/۷٪ بوده است. از این رو به نظر می‌رسد، برداشت دود از نیروگاه بعثت تأثیر چندانی روی عملکرد ژانگستروم و در نتیجه بازده احتراق نخواهد داشت.

با افزایش میزان برداشت دود، اثرات ناشی از کاهش دمای

بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

است روی عملکرد آن تأثیر گذار باشد. در واحد بازیافت CO₂ از نیروگاه بعثت از عایق حرارتی برای کل لوله به ضخامت ۱۰ سانتیمتر با پوشش ورق آلومینیوم به ضخامت ۱/۵ میلیمتر استفاده می‌شود که بایستی کارایی آن با اندازه‌گیری میزان تبادل حرارتی بویژه در فصل سرما مورد تأیید قرار گیرد.

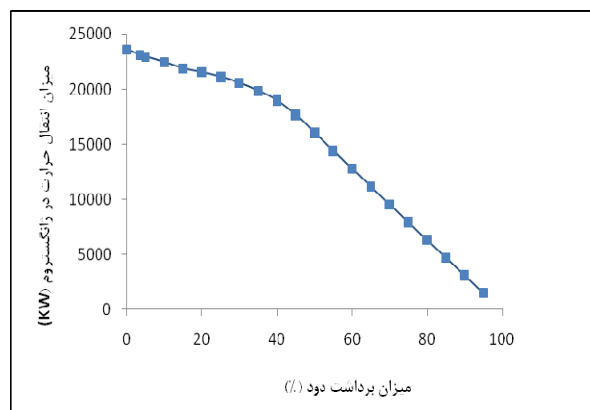
همچنین افت فشار جریان گاز در ریبویلر آمونیاک و خنک کننده گاز، بایستی مورد توجه قرار گیرد. در مبدل‌های حرارتی به ازای یک فضای معین، به منظور افزایش انتقال حرارت، نیاز به افزایش آشفته‌گی جریان می‌باشد که نتیجه جانبی آن افزایش افت فشار سیال است. بنابراین می‌بایست بین فضای موجود، هزینه اولیه (مبدل) و هزینه کارکرد (فن گاز ورودی) تعادلی برقرار نمود تا از لحاظ فنی و اقتصادی طراحی بهینه حاصل شود.



شکل (۶): میزان مصرف انرژی الکتریکی

در بلوئر با تغییر در افت فشار قبل از بلوئر

اثر افت فشار گاز در برج جذب و برج سودااش بر روی عملکرد فن در شکل (۷) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، میزان مصرف انرژی الکتریکی فن به صورت خطی با افزایش افت فشار گاز افزایش می‌یابد. افزایش توان مصرفی فن اثر دیگری بر واحد خواهد داشت و آن افزایش دمای خروجی از فن با افزایش توان مصرفی فن می‌باشد. به عنوان مثال همانطور که در جدول (۴) نشان داده شده است با افزایش افت فشار از ۵۰ به ۱۰۰ milibar، افزایش توان به



شکل (۵): تغییرات میزان انتقال حرارت در

ژانگستروم با تغییر در میزان برداشت دود

۶- تأثیر افت فشار گاز بر عملکرد فن

در واحد جذب CO₂ در نیروگاه بعثت از فن مکند به منظور جبران افت فشار ناشی از انتقال گاز در مسیر لوله کشی از نیروگاه تا ورودی فن، شامل ریبویلر آمونیاک و برج خنک کننده، استفاده می‌شود. همچنین از این فن جهت جبران افت فشار گاز در برج جذب و برج سودااش استفاده می‌شود. در ابتدا به بررسی افت فشار گاز به دلیل انتقال گاز در مسیر لوله کشی از نیروگاه تا ورودی فن پرداخته می‌شود. میزان مصرف انرژی الکتریکی در فن، برای افت فشارهای ۲۰ تا ۱۰۰ milibar محاسبه شده و در شکل (۶) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، مصرف انرژی الکتریکی در فن بسیار تحت تأثیر افت فشار قبل از ورودی می‌باشد. در واحد بازیافت نیروگاه بعثت، جهت انتقال دود در طول مسیر ۷۰ متری، لوله فولادی به قطر ۶۰ تا ۸۰ سانتیمتر (۲۴ تا ۳۲ اینچ) استفاده می‌شود. یکی از دلایل ایجاد افت فشار در این مسیر، استفاده از اتصالات شامل زانوها، سه راه اتصال دو واحد نیروگاهی به یکدیگر، فلنج‌های اتصال به دودکش خروجی از بویلر نیروگاه می‌باشد. همچنین از آنجایی که تغییرات افت فشار گازها در لوله بستگی بسیار زیادی به تبادل حرارتی بیرون خواهد داشت، بنابراین استفاده از عایق‌های حرارتی مناسب ضروری به نظر می‌رسد. افت فشار ایجاد شده در فصل سرما ممکن است بیش‌تر مورد توجه باشد. از طرف دیگر اثر تغییرات دمای ورودی به ریبویلر آمونیاک ممکن

بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

۷- تأثیر بازده جذب CO₂ بر عملکرد واحد بازیافت

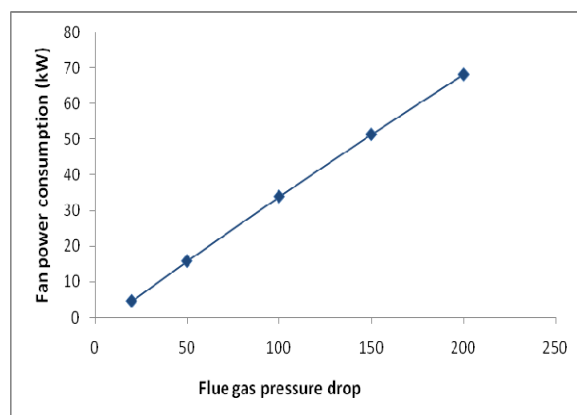
در نیروگاه بعثت به منظور دستیابی به خلوص بالای CO₂ لازم است تا طراحی‌های اولیه شامل ارتفاع برج جذب و دفع به نحوی انتخاب شود تا بازده لازم را فراهم کند. همچنین استفاده از برج‌های خالص ساز دیگر از جمله برج سودااش، برج پرمنگنات پتاسیم و برج کربن اکتیو به منظور رساندن بازده جذب CO₂ به میزان ۹۹/۹۹ درصد ضروری می‌باشد. از لحاظ هزینه‌های اولیه مورد نیاز، دستیابی به چنین بازدهی بالایی موجب افزایش هزینه‌ها خواهد شد. هزینه‌های عملیاتی اضافی که ممکن است بر واحد اعمال شود شامل مصرف سودااش، پرمنگنات پتاسیم و کربن اکتیو می‌باشد. حال نکته قابل توجه این است که این افزایش بازدهی چه اثری بر روی مصارف انرژی شامل مصرف بخار و مصارف توان الکتریکی مانند کمپرسور و بلوئر خواهد داشت. به همین منظور در این قسمت میزان انرژی‌های مصرفی برای بازده ۹۴ تا ۹۹ درصد بازیافت CO₂ محاسبه و در جدول (۵) آورده شده است. با توجه به این جدول، با افزایش بازده، میزان مصرف بخار و توان الکتریکی کمپرسور به میزان کمی افزایش می‌یابد ولی توان لازم برای بلوئر تغییری نمی‌کند. با توجه به این مطلب می‌توان نتیجه گرفت که افزایش بازدهی نیروگاه به منظور خالص‌سازی CO₂ به میزان ۹۹/۹۹ درصد جهت استفاده در صنایع غذایی اثر ناچیزی بر روی مصرف انرژی که عمدتاً از نیروگاه تأمین می‌شود، خواهد گذاشت و آنچه باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود، سایر پارامترهای غیر مرتبط با نیروگاه می‌باشد.

جدول (۵): میزان انرژی‌های مصرفی

برای بازده ۹۴ تا ۹۹ درصد بازیافت CO₂

CO ₂ capture efficiency	%	94	95	96	97	98	99
CO ₂ captured	kg/s	0.5493	0.5551	0.561	0.5668	0.5727	0.5785
CO ₂ captured per day	ton/day	47.46	47.96	48.47	48.97	49.48	49.98
Heat input	kW	2197.2	2220.6	2244	2267.3	2290.7	2314.1
CO ₂ compression power consumption	kW	77.59	78.42	79.25	80.07	80.9	81.72
Booster fan power consumption	kW	33.9	33.9	33.9	33.9	33.9	33.9
Total electrical power consumption	kW	119.6	120.5	121.4	122.4	123.3	124.2

میزان ۱/۸ kW، موجب افزایش دما در خروجی از مقدار ۳۹/۶ به ۴۴/۹ °C می‌شود. افزایش دمای خروجی از فن باعث می‌شود تا دمای گاز دودکش از میزان مطلوب که برای برج جذب طراحی شده است دور شود. میزان طراحی برای ورودی گاز دودکش به برج ۴۰ °C می‌باشد. بنابراین بایستی افزایش دمای خروجی از فن، قبل از رسیدن به برج جذب، توسط یک چیلر، خنک شود. در واحد بازیافت CO₂ بعد از فن، برج سودااش قرار دارد که علاوه بر شستشوی دود و حذف گازهای اسیدی شامل SO₂، SO₃ و NO_x باعث پایین آمدن دمای خروجی از فن (بلوئر) شود. البته با توجه به اطلاعات به دست آمده از واحد بازیافت نیروگاه بعثت، چنین عملکردی برای این برج در نظر گرفته نشده است. بنابراین لازم است تا بررسی شود اگر افزایش دمای خروجی از بلوئر زیاد باشد، لازم باشد تا از یک چیلر جهت خنک کردن دمای دود استفاده شود. آب مورد نیاز برای این نوع چیلر نیز می‌تواند از آب خنک کننده نیروگاه تأمین شود.



شکل (۷): میزان مصرف انرژی الکتریکی در بلوئر با تغییر در افت فشار گاز در برج جذب و سودااش

جدول (۴): تغییرات مصرف انرژی الکتریکی بلوئر

و دمای خروجی از آن با افزایش افت فشار گاز

Flue gas pressure drop	millibar	20	50	100	150	200
Booster fan power consumption	kW	4.58	15.79	33.9	51.34	68.17
Total electrical power consumption	kW	94.86	106.1	124.2	141.6	158.5
flue gas exit from gas cooler temperature	°C	36.34	39.6	44.88	49.95	54.85

Combustion CO₂ Capture", Siemens AG, Energy Sector Germany

[۴] گزارش "طراحی سامانه استحصال CO₂ از دود خروجی واحدهای بخار نیروگاه بعثت"، شرکت ماشین‌سازی گاز کرینیک شهر کرد، ۱۳۸۹

[5] www.thermoflow.com

[۶] گزارش "تدوین استراتژی بازتوانی نیروگاه‌های کشور"، پژوهشگاه نیرو، ۱۳۸۹

[7] Olav Bolland, Henriette Undrum, "A novel methodology for comparing CO₂ capture options for natural gas-fired combined cycle plants", *Advances in Environmental Research* 7 (2003) 901-911

[۸] گزارش "بررسی سوابق و ملاحظات فنی اجرای طرح بازیافت گاز CO₂ جهت EOR"، پژوهشگاه نیرو، دی ۱۳۸۶

۸- نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی صورت گرفته می‌توان نتیجه‌گیری کرد که برداشت دود به میزان حداکثر ۵٪ اثر قابل توجهی بر پارامترهای عملیاتی نیروگاه شامل کاهش بازده و عملکرد ژانگستروم نخواهد داشت. آنچه مورد توجه می‌باشد، کنترل پارامترهای مربوط به خالص‌سازی CO₂ مانند تنظیم و کنترل دماهای ورودی به برج جذب و همچنین تنظیم فشار و دمای برج عریان ساز به منظور جلوگیری از تخریب حلال و دستیابی به خلوص مطلوب محصول می‌باشد. از لحاظ زیست محیطی این میزان برداشت دود (حداکثر ۵٪) اثر قابل توجهی در کاهش انتشار CO₂ ندارد و مسائل اقتصادی آن مورد توجه می‌باشد. با افزایش میزان دود برداشتی جهت تزریق به مخازن نفتی با هدف ازدیاد برداشت نفت (CO₂-EOR)، قطعاً نتایج چشمگیری از لحاظ کاهش آلودگی هوا حاصل خواهد شد. علاوه بر آن، چنین کاربردی به علت عدم نیاز به خالص‌سازی و مایع‌سازی مورد نیاز در مصارف خوراکی، باعث کاهش هزینه‌های اولیه و عملیاتی خواهد گردید. با وجود این، با توجه به مدلسازی‌های صورت گرفته، نتایج نشان می‌دهد که چنانچه دود بیشتری جهت بازیافت مورد نیاز باشد، کاهش بازدهی نیروگاه را به دنبال خواهد داشت. همچنین در این موارد، با توجه به اینکه محل برداشت دود بعد از ژانگستروم می‌باشد، مسائل مربوط به خوردگی و تخریب حلال به علت حضور اکسیژن در سیستم ایجاد می‌شود. محدودیت‌های بوجود آمده نیازمند ارائه راهکارها و تمهیدات لازم جهت حل مشکلات احتمالی در رابطه با عملکرد نیروگاه می‌باشد که بایستی مورد توجه و بررسی بیشتر قرار گیرد.

مراجع

- [1] Chapel, D., Ernst, J., Mariz, C., 1999. "Recovery of CO₂ from flue gases: commercial trends", *Can. Soc. Chem. Eng*
- [2] R. Strube, G. Manfrida, "CO₂ capture in coal-fired power plants- impact on plant performance", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Article in press, 2011
- [3] Tobias Jockenhövel, Rüdiger Schneider and Michael Sandell, "Optimal Power Plant Integration of Post-