سامانه جداسازی آب از گازهای احتراق خروجی دودکش بویلر نیروگاه سیکل ترکیبی، به روش جذب با استفاده از جاذب های هوشمند

علی ایوبی[1]، دکتری نانو فناوری، کمال الدین مشتاقی منعم[2]، دکتری شیمی فرایندهای جداسازی ، حمیدرضا یادگاری نیارکی[3] ، مهندسی شیمی

۱- نیروگاه سیکل ترکیبی شهدای پاکدشت(دماوند)- تهران- ایران
ayoobi.dpgm@gmail.com
۲- شرکت دانش بنیان کاوشگران صنعتی پارت کیهان - تهران- ایران
kamal_monem@yahoo.com
۳- نیروگاه گازی قشم - قشم- ایران
yadegari_hr57 @gmail.com

چکیده: با توجه به میزان منابع طبیعی آب و سرانه مصرف، ایران از جمله کشورهایی است که در گروه کشورهای مواجه با کمبود فیزیکی آب قرار دارد. این گروه شامل کشورهایست که در سال ۲۰۲۵ با کمبود فیزیکی آب مواجه هستند. این بدان معناست که حتی با بالاترین راندمان و بهره‌وری ممکن در مصرف آب، برای تأمین نیازهایشان آب کافی در اختیار نخواهند داشت.[1] براساس شاخص فالکن مارک، شاخص سازمان ملل، شاخص مؤسسه بین‌المللی مدیریت آب کشور ایران در آستانه قرار گرفتن در وضعیت بحران شدید کم آبی است. با توجه به اینکه در دهه ۱۳۸۰ و ۱۳۹۰ خورشیدی حدود ۶۹ درصد از کل آب تجدیدپذیر سالیانه مورد استفاده قرار می‌گیرد، لذا بنا بر شاخص‌های ذکر شده، کشور ایران برای حفظ وضع موجود خود تا سال ۲۰۲۵ باید بتواند ۱۱۲ درصد به منابع آب قابل استحصال خود بیفزاید که این مقدار با توجه به امکانات و منابع آب موجود غیرممکن به نظر می‌رسد.[2] با رشد جمعیت و صنعت و افزایش تقاضا برای مصرف برق، نیروگاه های حرارتی در ایران که ستون فقرات تولید برق هستند باید این افزایش مصرف برق را پوشش دهند. تولید برق بیشتر به معنای مصرف آب بیشتر در نیروگاه ها می باشد. با توجه به اقلیم خشک ایران و علی الخصوص آمار منتشره میزان بارش ها در ۱۰ سال اخیر در استان تهران که روند نزولی را نشان می دهد و همینطور پایین رفتن سطح آب سفره های زیرزمینی، در چند سال آینده ممکن است علاوه بر مشکلات ژئوفیزیکی و فرونشست، تامین آب برخی از نیروگاه های کشور با بحران جدی روبرو شود. مطابق با معادلات استوکیومتری به ازای احتراق کامل هر مول متان، ۲ مول بخار آب تشکیل می شود.

با توجه به حجم بالای سوخت گاز مصرفی در نیروگاه دماوند و آنالیز رطوبت گازهای خروجی از دودکش بویلرهای این نیروگاه، می توان با استفاده از تکنولوژی جذب و نوع خاصی از جاذب های هوشمند، بخشی از بخارات آب معلق در گازهای خروجی دودکش بویلر های بازیافت این نیروگاه را از این جریان جدا نمود و بخش اعظمی از آب مورد نیاز نیروگاه را تامین نمود. بنابراین گازهای خروجی از دودکش بویلر نیروگاههای سیکل ترکیبی به عنوان یک منبع غیر متعارف و پنهان آب می باشد که می توان به عنوان یک طرح ملی در دستورکار بسیاری از صنایع بزرگ از جمله نیروگاههای کشور و فراتر از آن به عنوان یک طرح فرا ملی در کشور های خاور میانه که با مشکلات جدی کم آبی مواجه هستند مورد توجه و اهتمام قرار گیرد. از اینرو برای اثبات تئوری این طرح اقدام به طراحی و ساخت یک پایلوت تحقیقاتی نیمه صنعتی در نیروگاه دماوند گردید که در این مقاله نتایج بررسی های فنی و اقتصادی طرح به تفصیل ارایه گردیده است.

واژه های کلیدی: نیروگاه، سیکل ترکیبی، تکنولوژی جذب، جاذب، جداسازی، آب، دودکش، بویلر، گازهای احتراق

۱- مقدمه

ایران کشوری با اقلیم عمدتاً گرم و خشک است. رشد سریع جمعیت مهمترین عامل کاهش سرانه آب تجدید شونده کشور در قرن گذشته بوده است. جمعیت ایران در طی این هشت دهه، از حدود ۸ میلیون نفر در سال ۰۶–۱۳۰۰ به حدود ۸۰ میلیون نفر تا پایان سال ۱۳۹۴ رسیده است. بر این اساس میزان سرانه آب تجدیدپذیر سالانه کشور از میزان حدود۱۳۰۰۰ متر مکعب در سال ۱۳۰۰ به حدود ۱۴۰۰ متر مکعب در سال ۱۳۹۲ تقلیل یافته و در صورت ادامه این روند، وضعیت در آینده به مراتب بدتر خواهد شد.[1]

منابع آب تجدید پذیر کل ایران به ۱۳۰ میلیارد متر مکعب بالغ می‌گردد. مطالعات و بررسی‌ها نشان می‌دهد که از کل منابع آب تجدیدشونده کشور حدود ۸۹ میلیارد متر مکعب جهت مصارف بخش‌های کشاورزی، صنعت و معدن و خانگی برداشت می شده است که حدود ۸۳ میلیارد متر مکعب آن (۹۳ درصد) به بخش کشاورزی، ۵/۵ میلیارد متر مکعب (۶ درصد) به بخش خانگی و مابقی به بخش صنعت و نیازهای متفرقه دیگر اختصاص داشته است[2]

با توجه به میزان منابع آب و سرانه مصرف، ایران از جمله کشورهایی است که در گروه کشورهای مواجه با کمبود فیزیکی آب قرار دارد. این گروه شامل کشورهایست که در سال ۲۰۲۵ با کمبود فیزیکی آب مواجه هستند. این بدان معناست که حتی با بالاترین راندمان و بهره‌وری ممکن در مصرف آب، برای تأمین نیازهایشان آب کافی در اختیار نخواهند داشت. حدود ۲۵ در صد مردم جهان از جمله ایران مشمول این گروه می‌باشند[1].

براساس شاخص فالکن مارک، کشور ایران در آستانه قرار گرفتن در بحران آبی است. با توجه به اینکه در دهه ۱۳۸۰ و ۱۳۹۰ خورشیدی حدود ۶۹ درصد از کل آب تجدیدپذیر سالیانه مورد استفاده قرار می‌گیرد، براساس شاخص سازمان ملل، ایران نیز اکنون در وضعیت بحران شدید آبی قرار دارد. بر اساس شاخص مؤسسه بین‌المللی مدیریت آب نیز، ایران در وضعیت بحران شدید آبی قرار دارد. بنا بر شاخص‌های ذکر شده، کشور ایران برای حفظ وضع موجود خود تا سال ۲۰۲۵ باید بتواند ۱۱۲ درصد به منابع آب قابل استحصال خود بیفزاید که این مقدار با توجه به امکانات و منابع آب موجود غیرممکن به نظر می‌رسد[3].

با رشد جمعیت و صنعت و افزایش تقاضا برای مصرف برق، نیروگاه های حرارتی در ایران که ستون فقرات تولید برق هستند باید این افزایش مصرف برق را پوشش دهند. تولید برق بیشتر به معنای مصرف آب بیشتر در نیروگاه می باشد. با توجه به اقلیم خشک ایران و علی الخصوص آمار منتشره میزان بارش ها در ۵ سال اخیر در استان تهران که روند نزولی را نشان می دهد و همینطور پایین رفتن سطح آب سفره های زیرزمینی، در چند سال آینده ممکن است علاوه بر مشکلات ژئوفیزیکی و فرونشست، تامین آب برخی از نیروگاه های کشور با بحران جدی روبرو شود .

مطابق با معادلات استوکیومتری به ازای احتراق کامل هر مول متان، ۲ مول آب تشکیل می شود.

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$$

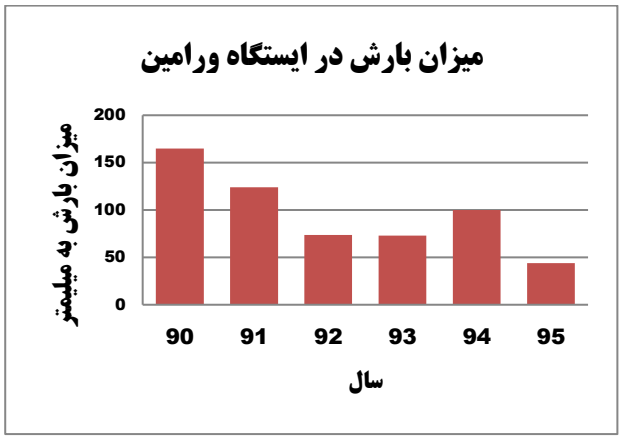
با توجه به حجم بالای گاز مصرفی در نیروگاه و طبق آنالیز گازهای خروجی از اگزوز، می توان با استفاده از تکنولوژی های بر پایه جذب، بخشی از بخار آب همراه با گازهای خروجی را از این جریان جدا نمود و تمام یا بخش اعظمی از آب مورد نیاز نیروگاه را تامین نمود. بنابراین گازهای خروجی از اگزوز نیروگاهها به عنوان یک منبع غیر متعارف بزرگ آب می باشد که با صرف هزینه و نیروی متخصص می توان به عنوان یک طرح ملی در دستورکار بسیاری از صنایع بزرگ از جمله نیروگاههای کشور و فراتر از آن به عنوان یک طرح فرا ملی در کشور های خاور میانه که با مشکلات جدی کم آبی مواجه هستند مورد توجه و اهتمام قرار گیرد.

۲- هدف و دلایل ضرورت و توجیه اجرای طرح:

۱-۲- بحران آب

یکی از نیروگاههای بزرگ و استراتژیک کشور که در منطقه دشت ورامین واقع شده است با نام نیروگاه سیکل ترکیبی شهدای پاکدشت(دماوند) از سال ۹۶ با بحران جدی کمبود آب مواجه

گردیده ا ست. بر ا ساس آمار منتشر شده تو سط وزارت نیرو برای بارش ها در نزدیکترین ایستگاه هواشناسی به نیروگاه سیکل ترکیبی دماوند که ای ستگاه ورامین می با شد ن شان از سیر نزولی بارش ها در این ناحیه از کشور را دارد(شکل ۱).



شکل ۱- میزان بارش در ۵ سال اخیر

مضاف براین سیر نزولی بارش ها در منطقه ورامین و شریف آباد ، مو ضوع کاهش بردا شت از منابع زیرزمینی بدین ترتیب می با شد که از هشت حلقه چاه تعبیه شده در نیروگاه ،تعداد شش حلقه چاه خشک و کور گردیده است و از چاه های باقی مانده مجموعا حدود ۱۲۰ مترمکعب بر ساعت آب برداشت میشود که با توجه به نیاز واحدهای سیکل ترکیبی این میزان آب جوابگو نمی باشد.

از سوی دیگر برداشت بیش از حد آب از منابع زیر زمینی در سالهای آتی موجب خشک شدن سفره های زیر زمینی و بروز مشکلات جدی در ژئوفیزیک منطقه بهره برداری نیروگاه خواهد شد که به عنوان یک مهم در توجیه و ضرورت طرح های این چنینی مد نظر قرار دارد.

۲-۲- حذف آلاینده های زیست محیطی:

با توجه به وجود ذرات معلق سمی در مح صولات احتراق خروجی از اگزوز واحدهای نیروگاهی و افزایش میزان انتشار آلاینده های زیست محیطی در سال های اخیر که به عنوان یکی از دغدغه های اصلی مالکین نیروگاه ها به شمار میرود ، لذا هر اقدامی در راستای کاهش و حذف این آلاینده ها امری اجتناب ناپذیر و ضروری است.

در این راستا تلاش گردیده تا با اجرای طرح جداسازی آب از ذرات معلق گازهای خروجی اگزوز نیروگاهها شرایط لازم برای جداسازی ذرات آلاینده پس از حذف رطوبت از محصولات احتراق فراهم آمده و با پیاده سازی سیستم جداگانه نسبت به حذف این آلاینده ها نیز اقدام نمود.

۳-۲- توسعه ظرفیت تولید نامی نیروگاه:

با توجه به اینکه یکی از فاکتور های اساسی در جانمائی و تعیین محل نصب و راه اندازی واحدهای سیکل ترکیبی بررسی منابع زیرزمینی در تامین آب مورد نیاز چرخه تولید می باشد، لذا با تکیه بر توضیحات قبلی یکی از مزایای اجرای طرح مورد نظر ایجاد فرصت برای گسترش و توسعه نیروگاه و افزایش ظرفیت عملی نیروگاه می با شد که می تواند در چشم اندازهای توسعه و سرمایه گذاری موجب سهولت در تصمیم گیری ها گردد.

۳- پیشینه طرح باز یابی آب از گاز های احتراق خروجی:

۱-۳- مرکز تحقیقات ملی آمریکا NETL یک سیستم پایلوت برای بازیابی آب از گازهای خروجی بویلر طراحی کرده اند که بر اساس تعدادی مبدل حرارتی برای کندانس کردن اب می باشد. آنها در این سیستم با خنک کردن دمای گازها تا ۴۰ درجه سانتیگراد توانستند ۱۰ تا ۳۵٪ از آب همراه با جریان را بازیابی کنند. برای خنک کاری هم از آب makeup و هم از هوا ا ستفاده شد. از نقاط ضعف این سیستم نیاز به جنس ضد خوردگی لوله های مبدل حرارتی بود[۵].

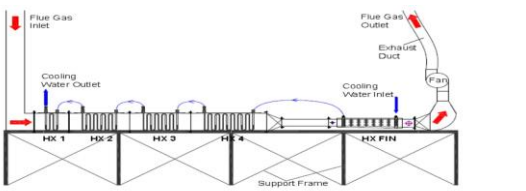


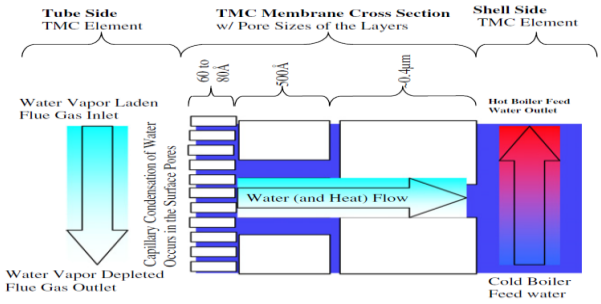
Figure 2-2: Elevation View of Test Apparatus with One Bare Tube Heat Exchanger (HX4) and One Fin Tube Heat Exchanger (HXFIN) in the Water Vapor Condensation Zone.

شکل ۲: شماتیک پایلوت تحقیقاتی مرکز تحقیقات ملی آمریکا NETL

معایب:

۱- جنس متال مبدل باید ضد خوردگی باشد.(مثل تیتانیوم یا آلیاژهای خاص فولادی)
۲- مصرف آب میکاپ بالا برای کندانس دود
۳- محصول بدست آمده اسیدی
۴- راندمان پایین
۵- هزینه ساخت بالا

۳-۲- موسسه GTI Dexin Wang نیز یک سیستم بر پایه غشاهای سرامیکی ساخته است که انتخاب پذیری بالایی نسبت به آب دارند. در سمت دیگر غشا یک جریان آب به عنوان حمل کننده عمل می کند و بخار آب با عبور انتخاب پذیر از غشا در سمت دیگر به آب در حال عبور وارد می شود. مشکل اسیدی شدن آب در این سیستم به دلیل انتخاب پذیری غشا بسیار کمتر می باشد[6].



شکل ۳: شماتیک پایلوت تحقیقاتی موسسه GTI Dexin Wang

معایب:

۱- نیاز به سرد سازی جریان گاز
۲- مصرف آب میکاپ بالا
۳- نیاز به افزایش سرعت سیال گازی

۳-۳- موسسه DNV KEMA در کشور هلند پروژه تحقیقاتی تحت عنوان Cap WA جداسازی بخارات آب از محصولات احتراق با استفاده از غشاهای کامپوزیتی را اجرا نموده است.

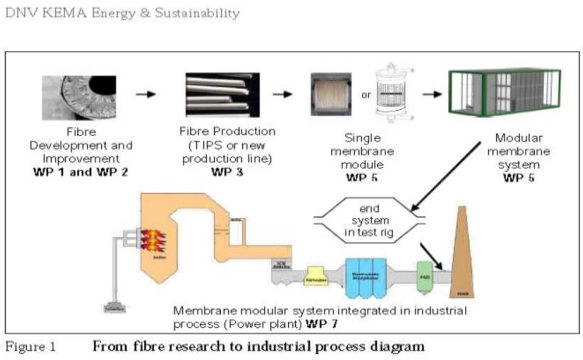


Figure 1 From fibre research to industrial process diagram

شکل ۴: شماتیک پایلوت تحقیقاتی موسسه DNV KEMA

معایب:

۱- هزینه بالای غشا و مشکل تامین
۲- نیاز به افزایش سرعت جریان گاز
۳- نیاز به سرد سازی جریان گاز

۳-۴- دردانشگاه North Dakota آمریکا نیز سیستمی را برای بازیابی آب از گازهای خروجی توربین ایجاد نمودند و توانستند ۲۳ تا ۶۳٪ حجمی از آب همراه با گازهای خروجی توربین را بازیابی نمایند. سیستم آنها نیز بر پایه مبدل های هوا خنک با سطح انتقال حرارت بالا بود. آب حاصل به دلیل اسیدی بودن نیاز به فرآیند های تصفیه بعدی داشت.

Figure 2-3: Photograph of Two Bare Tube Heat Exchanger Bundles.

شکل ۵: شماتیک پایلوت تحقیقاتی دانشگاه North Dakota آمریکا

۴- بازیابی آب از جریانات گاز خروجی اگزوز:

در نیروگاه های حرارتی مقادیر بسیار زیادی گازطبیعی سوزانده می شود که یکی از اصلی ترین محصولات احتراق آن بخار آب می باشد. در یک نیروگاه سیکل ترکیبی گازهای داغ خروجی از توربین

گازی به بویلر بازیافت وارد می شـــوند و در آنجا دمای گازهای خروجی تا حدود ۱۴۰ درجه سانتیگراد کاهش می یابد.

از آنجا که نصب کندانسور برای کندانس کردن بخار آب موجود در گازهای حاصـل احتراق بار حرارتی بسـیاری را لازم دارد مقرون به صـــرفه نیســـت که این جریان را به یک کندانســـور هدایت کرد. تکنولوژی هایی جدیدی بر پایه جذب رطوبت از جریان گازهای داغ خروجی بر پایه محلول نمک های جاذب رطوبت می تواند گزینه بهتری باشد. همچنین سیستم های بر پایه جذب رطوبت از جریان گاز به کمک جاذب های جامد نیز می توانند کاندیداهای مناسبی برای بازیابی آب از جریان گاز خروجی باشند.

۱-۴- میزان آب قابل استحصال

برطبق مدارک شـــرکت ســـازنده در طی انجام پرفورمنس تســـت واحدهای بخار ، در حالت فول لود گازهای خروجی از دودکش بویلر با فلوی جرمی ۴۵۰ Kg/s با دمای پایینتر از ۱۷۰ درجه سانتیگراد از استک خارج می شوند که با شرایط کاری جاذب مایع مورد نظر مطابقت دارد. به عنوان نمونه طبق اندازه گیری های انجام شـــده بر روی بویلر G15 نیروگاه دماوند هنگامی که توان واحد گازی ۱۰۶ مگاوات بود دمای اگزوز خروجی توربین گازی حدود ۵۲۲ درجه سانتیگراد بوده که در نهایت با دمای ۱۱۶ درجه ســانتیگراد از اســتک بویلر متناظر خارج گردید . (برمبنای آنالیز صـورت گرفته در شـهریورماه سـال۹۵ با دسـتگاه Flue Gas Analyzer-دماو رطوبت هوای ورودی به کمپرســور به ترتیب ۳۶،درجه و ۲۱درصد)

با توجه به درصـد وزنی رطوبت در اســتک بویلر مذکور که حدود ۴,۶ ٪ (برمبنـای انـدازه گیری بـا دســتگـاه Humidifier Analyzer اندازه گیری شـــده اســـت یک بویلر در اگزوز خود حدود 75 تن بر ساعت بخار آب به صورت رطوبت دارد.

450 kg/s * 0.046 water *3600 = 75000 kg/hr.

در صـــورتی که بازدهی فرآیند دفع رطوبت از جاذب ۷۰ ٪ باشـــد حجم آب دمین اسـتحصـال شـده از یک اسـتک بویلر در یک روز برابر است با:

75000*0.7*24/1000= 1260-ton Water/day

این بدان معناســت که اگر این ســیســتم برای واحدهای ابتدایی و انتهایی هر فاز که محدودیت فضایی برای احداث تاسیسات جدید ندارند سیستم بازیابی آب بر روی آنها نصب گردد می توانند آب مقطر مصرفی و مورد نیاز نیروگاه که روزانه حدود ۴۰۰۰ مترمکعب می باشد را تامین نمایند.

24.04.2010

Measurement Values and Results
Overall Performance Tests
Damavand CCPP Unit 1
(Preliminary)

		Combined Cycle		
Unit tested: Damavand CCPP				
Test No.		1		
load	%	100		
fuel		gas		
day of test		24.04.2010		
time test start	hours	06:00		
time test end	hours	08:00		
data from measurement				
ambient pressure	mbar	897.5		
ambient temperature	°C	17.2		
relative humidity	%	48.62		
speed	1/min	3000		
exhaust gas mass flow rate GT 1	kg/s	451.90		
exhaust gas mass flow rate GT 2	kg/s	455.05		
exhaust gas mass flow GT 1&2	kg/s	907.0		
exhaust gas enthalpy inlet HRSG 1 (=outlet GT1)	kJ/kg	580.52		
exhaust gas enthalpy inlet HRSG 2 (=outlet GT2)	kJ/kg	579.07		
average exhaust gas enthalpy inlet HRSG 1&2	kJ/kg	579.79		
exhaust gas enthalpy outlet HRSG 1 (=stack)	kJ/kg	117.66		
exhaust gas enthalpy outlet HRSG 2 (=stack)	kJ/kg	115.99		
average exhaust gas enthalpy outlet HRSG 1&2	kJ/kg	116.82		
fuel gas mass flow duct burner HRSG 1	kg/s	0.6271		
fuel gas mass flow duct burner HRSG 2	kg/s	0.6344		
fuel gas mass flow duct burner HRSG 1&2	kg/s	1.262		
low heat value fuel gas duct burner (1.01325bar/15°C)	kJ/kg	45963.4		
temperature fuel duct burner 1	°C	12.30		
temperature fuel duct burner 2	°C	12.75		
spez. sensible heat fuel duct burner 1 (cp = 2,2 kJ/kg*K)	kJ/kg	-5.94		
spez. sensible heat fuel duct burner 2 (cp = 2,2 kJ/kg*K)	kJ/kg	-4.94		
heat flow supplied to HRSG 1&2	kJ/s	477722		
gross power output steam turbine generator	kW	160781.4		
instrument error correction	kW	0		
power factor	kW	0.9965		
power factor correction	kW	398.4		
generator gross power corrected to power factor	kW	160382.9		
auxiliary power steam turbine	kW	38.0		
net power output steam turbine generator	kW	160344.9		
conversion related to gross power output (guar.-conditions)				
due to HP inlet pressure (90 bar)	%	0.07675	85.65	-4.8
pressure correction due to deviating HP mass flow			131.34	-2.0
pressure correction due to deviating HP temperature			513.83	-6.2
due to HP inlet temperature (520 °C)	%	0.81790	513.83	-6.2
due to LP inlet pressure (8.5 bar)	%	-0.00664	8.15	-4.1
due to LP inlet temperature (230 °C)	%	-0.01821	231.81	1.8
due to HP inlet mass flow (134 kg/s)	%	1.81757	131.34	-2.0
due to LP inlet mass flow (18 kg/s)	%	-0.42126	19.44	8.0
due to condenser pressure (0.13 bar)	%	-0.12660	0.11	
due to network frequency 50 Hz	%	0.00000	50.00	
total conversion factor	-	1.02140		
gross power output steam turbine generator conv. to guarantee	kW	163814.3		
net power output steam turbine generator conv. to guarantee	kW	**163775.5**		
generator gross power guarantee value	kW	**160730**		
deviation from guarantee	kW	**3084.3**		
the same	%	**1.9**		
ageing acc. To DIN 1943	%	0.30		
generator gross power guarantee value with ageing	kW	**160247.8**		
deviation from guarantee with ageing	kW	**3566.5**		
the same	%	**2.23**		
auxiliary power steam cycle	kW	5387.0		
cable losses	kW	0		
steam turbine transformer losses	kW	293		
net power Output Steam Cycle	kW	154665.4		
net power output steam cycle converted to guarantee conditions	kW	157974.4		

جدول ۱: مدرک شرکت مپنا، تست کارائی یک واحد بخار نمونه(نیروگاه سیکل ترکیبی دماوند)

آنالیز گازهای خروجی از اســتک بخار در جدول شـــماره ۲ آورده شده است. توضیح اینکه توربین با سوخت گاز درمدار بوده است. در صورت استفاده از سوخت گازوئیل میزان و تاثیر سایر محصولات احتمالی احتراق باید در نظر گرفته شود.

item	Parameter	Value	Corrected with 15% O_2	unit
1	O_2	16.1		%
2	CO	6	7.36	ppm
3	CO_2	2.8		%
4	NO	78	95.73	ppm
5	NO_2	4	4.91	ppm
6	NOX	82	100.64	ppm
7	SO_2	0		ppm
8	H_2S	0		ppm
9	T-Gas	115.8		°C
10	Excess Air	330		%
11	Velocity	14.5		m/s
12	Diameter	5.3		m
13	Q	1651043		m^3/hr
14	P	106		MW
15	H_2O	4.6		%
16	Ambient Temp	36		°C
17	Unit	G15		

جدول ۲: آنالیز گازهای خروجی از استک بویلر G15

۵- تئوری روش کار و تکنیک های اجرایی طرح (به طور دقیق) :

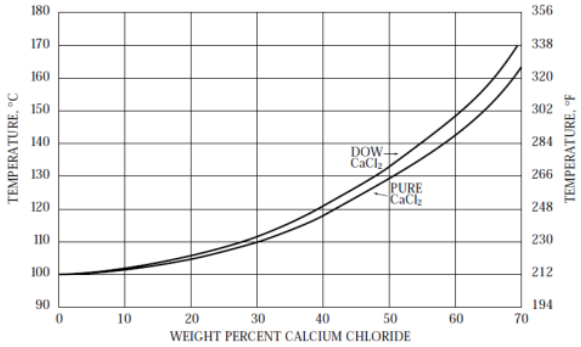
استفاده از نمک های جاذب در حالت محلول آبی می تواند گزینه بسیار مناسبی برای جذب رطوبت از جریانات گازهای احتراق خروجی از استک بویلر باشد. با بررسی پژوهش های صورت گرفته بر روی جاذب های مورد استفاده برای سیستم های بازیابی آب از گازهای خروجی نیروگاه های ذغال سنگی و سایر پژوهش های صورت گرفته، سه نوع جاذب لیتیوم برماید، کلسیم کلراید و تری اتیلن گلایکول کاندیدا های مناسبی برای انجام تست ها می باشند.در این میان چند عامل باعث می شوند تا کلسیم کلراید در اولویت شماره ۱ باری انجام فرآیند قرار گیرد.

Property	$CaCl_2$-$6H_2O$	$CaCl_2$-$4H_2O$	$CaCl_2$-$2H_2O$	$CaCl_2$-H_2O	$CaCl_2$
Composition (% $CaCl_2$)	50.66	60.63	75.49	86.03	100
Molecular Weight	219.09	183.05	147.02	129	110.99
Melting Point[1] (°C) (°F)	29.9 85.8	45.3 113.5	176 349	187 369	773 1424
Boiling Point[2] (°C) (°F)	— —	— —	174 345	183 361	1935 3515
Density at 25°C (77°F), g/cm³	1.71	1.83	1.85	2.24	2.16
Heat of Fusion (cal/g) (Btu/lb)	50 90	39 70	21 38	32 58	61.5 110.6
Heat of Solution[3] in H_2O (cal/g) (to infinite dilution) (Btu/lb)	17.2 31.0	−14.2 −25.6	−72.8 −131.1	−96.8 −174.3	−176.2 −317.2
Heat of Formation[3] at 25°C (77°F), kcal/mole	−623.3	−480.3	−335.58	−265.49	−190.10
Heat Capacity at 25°C (77°F), cal/g.°C or Btu/lb.°F	0.34	0.32	0.28	0.20	0.16

[1]Incongruent melting point for hydrates.
[2]Temperature where dissociation pressure reaches one atmosphere for hydrates.
[3]Negative sign means that heat is evolved (process exothermic).

جدول ۳: مقایسه پارامترهای آزمایشگاهی جاذبهای مایع

کلسیم کلراید یکی از جاذب هایی است که به صورت تجاری در بسیاری از فرآیند ها مورد استفاده قرار میگیرد. این ماده در خلوص مختلف و به صورت تجاری در بازار ایران موجود می باشد و قیمت بسیار نازلتری در مقایسه با سایر جاذب های ذکر شده دارد. جدول فوق مشخصات عمومی کلسیم کلراید را در حالت های مختلف خشک و هیدراته نشان می دهد.



شکل ۶: نمودار Boiling point جاذب انتخابی

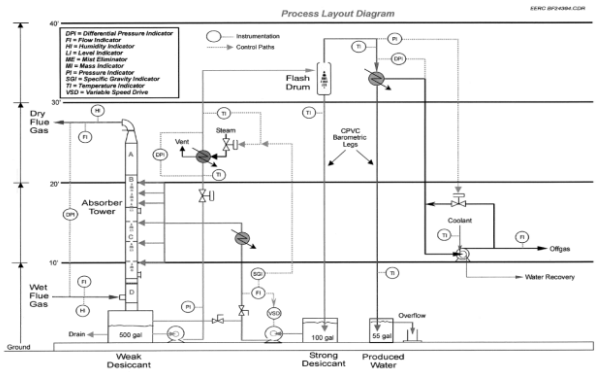
یکی از مزیت های کلسیم کلراید دمای بالای نقطه جوش محلول آن می باشد، به نحوی که محلول آبی ۷۰٪ آن نقطه جوشی حدود ۱۶۵ درجه سانتیگراد دارد و در حالتی که آب را به خود جذب نماید و رقیقتر شود، با غلظت ۴۰٪ نقطه جوشی حدود ۱۲۰ درجه سانتیگراد پیدا می کند و این محدوده با محدوده دماهای گازهای خروجی از استک بویلر که حدود ۱۳۰ تا ۱۴۰ درجه می باشد سازگارتر می باشد.

Relative Humidity Percent	Final Solution Percent $CaCl_2$	Pounds of Water Absorbed per lb DOWFLAKE (77–80%)	Pounds of Water Absorbed per lb Anhydrous Calcium Chloride 94–97% Mini-pellets
95	5.2	14.0	17.3
90	10.4	6.5	8.2
85	14.8	4.3	5.4
80	19.1	3.1	4.0
75	22.6	2.5	3.2
70	25.6	2.1	2.7
65	28.3	1.8	2.4
60	31.1	1.5	2.1
55	33.8	1.3	1.8
50	36.0	1.2	1.6
45	37.8	1.1	1.5
40	39.5	1.0	1.4
35	41.7	0.9	1.3
30	43.9	0.8	1.2

جدول۴: نسبت میزان جذب رطوبت به غلظت جاذب

یکی دیگر از مزیت های کلسیم کلراید میزان جذب بالای محلول آبی آن در مقایسه با جاذب جامد آن است، به نحوی که ۱ کیلوگرم محلول ۷۷٪ آن در مجاورت با هوایی که ۳۰٪ رطوبت نسبی داشته با شد حدود ۳۶۰ گرم آب را به خود جذب می نماید. اگر از جاذب جامد استفاده شود ۵۴۰ گرم آب جذب می شود.

برای بازیابی آب از گازهای احتراق نیروگاه ذغالسنگ سوز فلودیاگرام زیر مورد استفاده قرار گرفته است. سیستم یک پایلوت نیمه صنعتی با برج جذب به ارتفاع ۳۰ فوت است که از کلسیم کلراید برای جذب آب استفاده نموده است و شامل تجهیزات دفع نیز می باشد.



شکل۷: فلودیاگرام پایلوت تحقیقاتی مرکز تحقیقات انرژی و محیط زیست امریکا (EERC) که برای جداسازی زطوبت از گازهای خروجی دودکش نیروگاه ذغال سنگ سوز طراحی شده است.

بر این اساس در اولین گام یک پایلوت کوچک قابل حمل طراحی و ساخته می شود که شامل ستون جذب و پمپ ها و تجهیزات انتقال و کنترل سیالات می باشد .

هدف از این پایلوت کوچک این است که با کمترین هزینه از قطعیت فرآیند اطمینان حاصل کنیم. بدین منظور این پایلوت به گونه ای طراحی می شود که بتوان موارد زیر را در آن مورد مطالعه قرار داد.

۱- قابلیت تخلیه و تغییر دادن پکینگ های درون ستون به منظور بررسی تاثیر پکینگ بر میزان جذب و یافتن پکینگ بهینه

۲- مخزن مایع جاذب ۱۰۰ لیتری که می توان انواع جاذب های مایع دیگر را نیز در صورت لزوم در آن تست نمود.

۳- قابلیت تغییر دبی مایع جاذب به صورت دستی برای مطالعه تاثیر دبی فاز مایع

۴- مجهز بودن سیستم به یک بلوور در خروجی گاز با هدف مکش گاز به داخل ستون برای شرایطی که گازهای احتراق فشار لازم برای عبور از بستر آکنه را ندارند.

۵- قابلیت تغیر دبی فاز گاز به صورت دستی جهت مطالعه تاثیر دبی فاز گاز بر میزان جذب آب

۶- مجهز بودن سیستم به سنسور های دما جهت مشاهده دمای برج در پایین، وسط و بالای ستون و همچنین دمای جریانهای ورودی و خروجی جهت مطالعات دمایی فرآیند جذب

۷- مجهز بودن سیستم به گیج فشار برای جریان جاذب

۸- مجهز بودن ستون به ۳ شیر نمونه گیری در پایین، وسط و بالای ستون

۹- قابلیت اتصال سیستم دفع به پایلوت

۱۰- مجهز بودن پایلوت به هیتر کمربندی) در صورتی که در آینده از جاذب جامد استفاده شد فرآیند TSA قابل اجرا باشد(

۱۱- قابلیت حمل پایلوت به نقاط مختلف سایت نیروگاه دماوند (به عنوان مثال استک بخار یا بلودان یا دی اریتور) با هدف بررسی بهترین آپشن برای خوراک ورودی به این فرآیند.

۱۲- امکان شبیه سازی فرایند و انجام محاسبات اقتصادی در مقیاس اصلی.

۱۳- تخمین نهائی مقدار آب استحصالی از طرح.

۱۴- اقدام به دریافت گواهینامه ثبت اختراع.

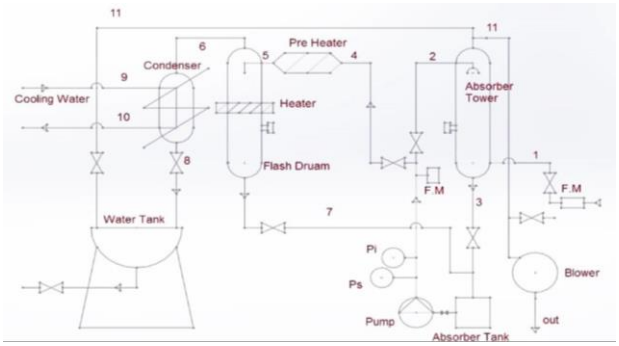
طرح پیشنهادی شامل ۳ فاز کلی عملیاتی می باشدکه در انتهای هرکدام، نقطه تصمیم گیری برای آغاز فاز بعدی قرار دارد.

- فاز ۱ : اجرای آزمایشات در پایلوت پرتابل با مقیاس کوچک
- فاز ۲ : اجرای آزمایشات در پایلوت نیمه صنعتی
- فاز ۳ : اجرای صنعتی

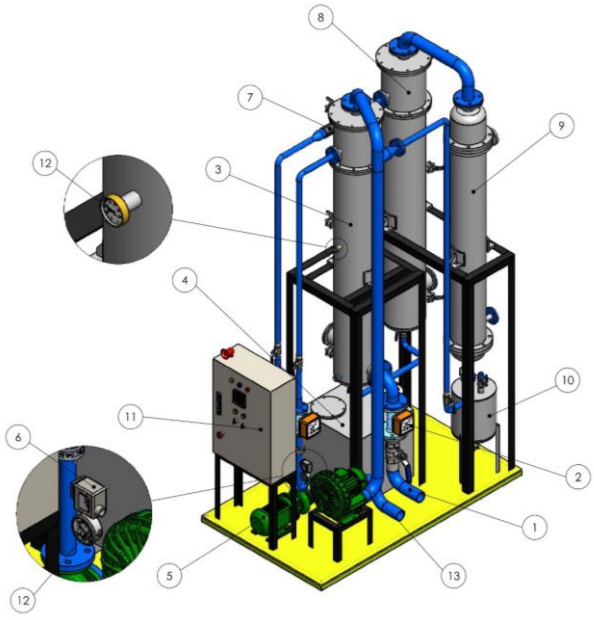
برای کاهش ریسک و کم کردن هزینه ها ابتدا در یک پایلوت پرتابل جوابهای قطعی از عملی بودن یا نبودن فرآیند جذب بخارات از گازهای خروجی مشخص می گردد. در صورتی که در فاز ۱ جذب بخارات موفقیت آمیز بود، شرایط بهینه اولیه با تغییر پارامتر های مختلف سیستم مشخص می گردد. پس از آن در فاز

۱ به پایلوت فعلی قسمت دفع و بازیابی جاذب نیز اضافه می گردد. بدین ترتیب ریســـک ها به حداقل و هزینه ها نیز در کف قرار خواهند گرفت. پس از ارزیابی اطلاعات و اطمینان از کســب نتیجه مطلوب، با پارامتر های بهینه بدســـت آمده از فاز ۱ وارد فاز ۲ می شویم. در فاز ۲ ابعاد سیستم افزایش پیدا می کند و تست های عملیاتی نزدیکتر به شـــرایط واقعی انجام میگیرد. نتایج بدســـت آمده از فاز ۲ برای شبیه سازی های فرآیندی و سیالاتی استفاده خواهند شـــد و بر مبنای این اطلاعات جواب قطعی ســـوالات زیر مشخص می گردد:

۱- مقدار آب قابل استحصال؟
۲- هزینه های یک واحد بازیابی آب؟
۳- ابعاد و اندازه های این واحد؟



شکل۸: فلودیاگرام/ شماتیک نقشه طراحی و ساخت پایلوت تحقیقاتی SWRS نیروگاه دماوند



۶- نتایج تحقیقات:

ظرفیت طراحی:

- ظرفیت دود ورودی : **350 m^3/hr**
- ظرفیت مخزن جاذب :120 liter
- ظرفیت آب قابل تولید. : **20 liter/hr.**

نتایج عملی :

- دبی دود ورودی : **40 m^3/hr**
- حجم آب مقطر قابل استحصال: **1.7 liter/hr.**

گزارش برآورد اقتصادی هزینه های اجرای یک واحد استحصال آب مقطر از گازهای خروجی اســتک بویلرهای نیروگاه دماوند به روش جذب با ظرفیت تولید روزانه ۶۰۰ مترمکعب و ۳۰۰ روز کاری:

- **سرمایه گذاری ثابت و در گردش**
- ۳۶ میلیارد تومان
- **سود عملیاتی فروش سالانه آب**
- ۲۵ میلیارد تومان
- **دوره بازگشت سرمایه بدون احتساب درامد فروش انرژی**
- ۱۶ ماه (IRR 70%)
- **میزان مصرف انرژی برای استحصال یک مترمکعب آب مقطر**
- 14 kwh/m^3

نکات مهم و حایز اهمیت در طراحی یک واحد صنعتی بازیابی آب از جریانات گاز خروجی از استک بویلر:

- با توجه به حساسیت واحدهای نیروگاهی به سرعت سیال و دمای نقطه شبنم این سامانه به صورت اکسترنال (به شکل ســاکشــن تاور) طراحی شــده و به وســیله دمپر به اســتک بویلرهای بازیافت متصل می گردد تا موجب ایجاد بک پر شر در کانال اصـــلی دود نشـــود و ازطرفی در صـــورت نیاز به تعمیرات، به راحتی از استک واحد ایزوله می شود .
- دبی گازهای خروجی متناسب با نیاز تولید آب با دمپر تنظیم می شـود و گاز های احتراق خروجی از بویلر وارد ســیســتم

جذب شده و پس از انجام فرایند از بالای برج جذب به صورت گاز نیمه خشک از اگزوز سامانه که مجهز به یک فن مکنده در دهانه آن می باشد خارج می شود .

- در صورت نیاز به منظور جلوگیری از پدیده خوردگی در برج های جذب و دفع سامانه با ا ستفاده از ماده مقاوم به حرارت و خوردگی (پلی یوریا) کوتینگ شده است تا از بروز اثرات خوردگی ناشی از نقطه شبنم جلوگیری شود.
- با اجرای عملی طرح فوق در بیش از ۴۵ درصد نیروگاه های ایران علاوه بر بی نیازی این نیروگاهها از منابع طبیعی تامین آب، از بروز آسیب های جدی به اقلیم منطقه بهره برداری و انت شار آلاینده های زی ست محیطی می توان جلوگیری بعمل آورد.
- مطالعات امکان سنجی و ارزیابی های اقتصادی طرح نشان دهنده زود بازده بودن این طرح می باشد به طوری که ظرف مدت ۱۶ ماه امکان بازگشت سرمایه گذاری اولیه برای سرمایه گذاران این طرح وجود خواهد داشت.
- اثرات مطلوب اجتماعی و اشتغال زایی در منطقه، از دیگر مزایای اجرای این طرح می باشد.

۷- افتخارات و جوایز :

- اخذ جایزه ملی سال ۲۰۱۸ بنیاد جهانی انرژی
- اخذ نشان سبز سال ۲۰۱۸ جامعه مدیریت سبز اروپا
- اخذ لوح تقدیر فناوران برتر از بنیاد ملی نخبگان معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری
- اخذ تندیس حامیان انرژی و محیط زیست به نمایندگی از شرکت DPGM
- اخذ لوح تقدیرطرح پژوهشی برترنیروگاه دماوند در سال ۹۷
- اخذ گواهی نامه ثبت اختراع

۸- تقدیر و تشکر:

درپایان بر خود لازم می دانم از تمامی کسانی که در شکل گیری این هدف نقش بسزایی داشتند و این طرح با حمایت های بی دریغ این عزیزان به مرحله اجرا و معرفی رسید، کمال تشکر و قدردانی را نمایم.

- آقای پروفسور مسعود رستم آبادی ، مشاور ایرانی مقیم امریکا
- آقای مهندس سیامک میرزایی، مدیرعامل وقت شرکت مدیریت تولید برق دماوند .(در سال ۹۷)
- آقای مهندس جمال الدین عزیزی، مدیرعامل وقت شرکت تولید نیروی برق دماوند .(در سال ۹۷)
- آقای مهندس جمال آریایی، مدیرعامل فعلی شرکت مدیریت تولید برق دماوند.
- آقای دکتر محمد کبیری، مدیرعامل فعلی شرکت تولید نیروی برق دماوند.

۹- منابع و ماخذ:

[1]- ببران، صدیقه؛ هنربخش، نازلی؛ بحران وضعیت آب در ایران و جهان؛مرکز مطالعات استراتژیک. ۹۳

[2]-احسانی، مهرزاد؛ خالدی، هومن؛ شناخت و ارتقای بهره‌وری آب کشاورزی به منظور تأمین امنیت آبی و غذایی کشور؛ یازدهمین همایش ملی کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران

[3]-Madani, K. (2014). Water management in Iran: what is causing the looming crisis? Journal of Environmental Studies and Sciences, 4(4), 315-328.

[4]-Levy EK, Kwangkook J, Kessen M, Bilirgen H. Analytical nodeling of water condensation in condensing heat exchanger. Intl J Heat and Mass Transfer 2010; 53(11–12):2361–8.

[5]-Copen JH, Sulliva TB, Folkedahl BC, Carney B. Principles of flue gas water recovery system. In: Proceedings of the power-gen international conference; Las Vegas NV; December 2005.

[6]-Wang, D., Bao, A., Kunc, W., & Liss, W. (2012). Coal power plant flue gas waste heat and water recovery. Applied Energy, 91(1), 341-348.