

توسعه مدل بهینه فنی - اقتصادی یکپارچه‌سازی نیروگاه هسته‌ای دو مداره PWR با آب شیرین‌کن حرارتی MED

رضا فتاحی

کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی

(نویسنده مسئول)

r. fattahi75@yahoo.com

در این تحقیق ارزیابی فنی، اقتصادی و مالی مدل بهینه دریافت حرارت از نیروگاه هسته‌ای بخاری دو مداره رآکتور آب تحت فشار (PWR) برای کاربرد در آب شیرین‌کن حرارتی تقطیری چند مرحله‌ای (MED) توسعه داده شده است. ارزیابی مدل شبیه‌ساز این طرح در نرم افزار DE-TOP نشان می‌دهد که مدل بهینه سیستم بر اساس استخراج بخشی از بخار زیرکش هیتز شماره ۳ نیروگاه برای تغذیه آب شیرین‌کن حرارتی و بازگردش آن با دمای پایین‌تر به هیتز شماره ۲ نیروگاه به عنوان گزینه برتر این یکپارچه‌سازی می‌باشد. تحلیل نتایج این مدل در نقطه بهینه یکپارچه‌سازی نیروگاه هسته‌ای به ظرفیت ۱۰۰۷MWe با آب شیرین‌کن با ظرفیت ۷۰ هزار مترمکعب، افزایش راندمان کلی بهره‌گیری از انرژی حرارتی به میزان ۳٪ و کاهش تولید توان الکتریکی خالص سیکل تولید توان به میزان ۱۶MWe را نشان می‌دهد. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه احداث تأسیسات در حدود ۱۶۵ میلیون دلار و مطابق نرخ بازده داخلی ۳۰٪ مورد انتظار سرمایه‌گذار در دوره بهره‌برداری ۱۵ ساله، قیمت تمام شده هر مترمکعب آب تولیدی برابر ۳۰,۳۷۵ ریال برآورد می‌گردد.

واژگان کلیدی: نیروگاه هسته‌ای دو مداره رآکتور آب تحت فشار (PWR)، آب شیرین‌کن حرارتی تقطیری چند مرحله‌ای (MED)، یکپارچه‌سازی نیروگاه و آب شیرین‌کن، توسعه مدل بهینه.

۱. مقدمه و مرور ادبیات

با توجه به نیاز آبی کشور و مسئله تأمین از طریق منابع پایدار آب، لازم است نیروگاه‌های حرارتی حاضر که در مجاورت منابع تأمین آب پایدار قرار گرفته‌اند و طرح توسعه آنها مورد بررسی قرار بگیرد و پتانسیل مجموعه جهت یکپارچه‌سازی واحدهای تولید توان الکتریکی با تأسیسات آب شیرین کن مورد مطالعه قرار بگیرد.

مطالعات انجام شده رشد قابل توجه نصب واحدهای تولید آب شیرین را طی ۳۰ سال گذشته نشان می‌دهند. بیشترین مقدار این رشد در مناطق نفت خیز خاورمیانه بوده است که با تکیه بر منبع نفتی خود، رو به سمت استفاده از فرآیندهای تبخیری-تقطیری آورده‌اند و نکته مهم اینکه تا پایان قرن بیستم میلادی در حدود ۹۰٪ کل ظرفیت نصب شده در جهان، محدود به منطقه خاورمیانه می‌باشد^۱. از عوامل مؤثر بر انتخاب فرآیند تولید آب شیرین، دسترسی به انرژی با قیمت مناسب است. هزینه انرژی مصرفی نیز از عوامل اصلی تعیین‌کننده هزینه تولید آب شیرین است. در کشورهای عربی حوزه خلیج فارس که منابع عظیم و ارزان انرژی را در اختیار دارند، عمده آب شیرین مورد نیاز در سیستم‌های حرارتی تولید می‌شود^۲. یکی از راه‌های کاهش هزینه احداث آب شیرین کن حرارتی، استفاده از انرژی دفع شده توسط صنایع مختلف و انرژی دفع شده توسط سیکل‌های توان می‌باشد، به طوری که سیستم‌های نوین حرارتی تولید آب شیرین توانایی استفاده از هر گونه انرژی حرارتی دفع شده در سایر فرآیندهای حرارتی را دارند.

یک نمونه استفاده از انرژی دفع شده نیروگاهی با هدف تولید آب شیرین در کشور قبرس در سال ۱۹۹۸ انجام گرفته است. در این طرح هدف تولید آب جبرانی بویلرهای نیروگاه بود که به این

1. S Gray, M Duke, A Rahardianto and Y Cohen, 2011

2. T. Mezher, H. Fath, Z. Abbas, A. Khaled, 2011

ترتیب ۸۳٪ آب جیرانی بویلرها بدون صرف هیچگونه انرژی اضافی و تنها از طریق بازیافت انرژی از بلودان بویلر تأمین می‌شود^۱.

از نظر فنی تأسیسات تولید همزمان توان و آب شیرین شامل تجهیزاتی است که در آن بخار حاصل از یک منبع حرارتی ابتدا وارد یک توربین تولید توان شده و پس مانده آن بخاری است با درجه حرارت و فشار مناسب که به عنوان بخار تغذیه به هیتر آب تغذیه تجهیزات آب شیرین کن وارد می‌شود، به بیان دیگر سیستم مذکور به صورت سری کار می‌کند و عملکرد آن با سیستم موازی متفاوت است. در سیستم‌های موازی حرارت مورد نیاز هر دو قسمت، از یک منبع حرارتی تأمین می‌شود، به این صورت که مقداری از بخار منبع حرارتی در داخل توربین به کار می‌رود و قسمتی دیگر از بخار مذکور در تجهیزات آب شیرین کن مصرف می‌شود. به طور کلی سیستم‌های تولید همزمان توان و آب شیرین موازی مناسب نیستند زیرا تأسیسات تولید توان و آب شیرین کن در شرایط دمایی و فشاری کاملاً متفاوت کار می‌کنند. به طور مثال تجهیزات تولید توان با راندمان خوب احتیاج به بخاری با درجه حرارت بیش از 500°C و فشاری بسیار بالا دارد، در حالی که تجهیزات تقطیری آب شیرین کن حرارتی سیستم‌ها حداکثر به دمای 200°C محدود می‌شوند.

در طراحی تأسیسات تولید همزمان توان و آب شیرین، روش ترکیبی ارجح بر روش‌های سری و موازی می‌باشد، روش ترکیبی باعث صرفه‌جویی در هزینه انرژی خواهد شد. هر قدر اندازه دیگ بخار بزرگتر باشد قیمت در واحد حجم بخار کمتر خواهد شد. به خاطر همین مزایا است که طرح‌های واحدهای تقطیری آب شیرین کن بزرگ را همیشه به صورت ترکیبی با واحدهای تولید انرژی در نظر می‌گیرند. البته انتخاب تجهیزات ترکیبی دو منظوره یا تجهیزات مستقل برای تولید آب و انرژی به تقاضای نسبی برای آب و انرژی و نیز هزینه‌های نسبی آنها بستگی خواهد داشت. یکی از مهمترین مسائلی که امروزه در زمینه تولید آب شیرین حائز اهمیت است، قابلیت استفاده از هر نوع جریان انرژی حرارتی در سیستم‌های آب شیرین کن حرارتی تقطیری چند مرحله‌ای MED می‌باشد.

قابلیت کارکرد این نوع سیستم در دماهای پایین (پایین‌تر از 70°C) موجب شده است که از هرگونه حرارت بازیافتی نیروگاهی نیز به عنوان منبع تأمین انرژی استفاده گردد.

فرآیند MED قدیمی‌ترین فرآیند برای شیرین‌سازی آب است که اساساً با انرژی حرارتی کار می‌کند که مشابه سیکل شیرین‌سازی آب در طبیعت می‌باشد. بنابراین، این روش دارای قابلیت استفاده از منبع انرژی گرمای تلف شده در محدوده دمایی پایین است که در این صورت هزینه عملکرد و هزینه آب تولید شده را حداقل خواهد کرد. روش MED یک تبخیرکننده است که در آن آب دریا در یک مرحله و یا تعداد بیشتر مراحل، بسته به مقدار و کیفیت مورد نظر، در دمای پایین تبخیر می‌شود و آب شیرین تولید می‌کند. اندیشه بنیادی این روش، یک فرآیند چند مرحله‌ای است که در آن یک اسپری از آب دریا مکرراً بخار و سپس تقطیر می‌شود که هر مرحله در دما و فشار پایین‌تری اتفاق می‌افتد.

روش MED از لحاظ بازده انرژی، زمانی که یک منبع بخار با فشار پایین و یا انرژی حرارتی تلف شده از یک نیروگاه و یا یک فرآیند صنعتی مناسب فراهم باشد، اقتصادی‌ترین فرآیند شیرین‌سازی آب است. فرآیند تبخیر در MED یک تکنولوژی پربازده است چون در هر مرحله برای تبخیر، از حرارت آزاد شده از چگالش بخار ایجاد شده در مرحله قبل، استفاده می‌شود. از طرف دیگر، یکی از راه‌های کاهش نرخ خروج گاز دی‌اکسید کربن از نیروگاه و همزمان افزایش کارایی ترمودینامیکی نیروگاه از طریق بازیابی انرژی گرمایی تلف شده، در یک سیستم حرارتی دیگر مانند فرآیند MED برای تولید آب شیرین است.

هر مرحله در دما و فشار پایین‌تری نسبت به مرحله قبل عمل می‌کند. اولین مرحله (بیشترین دما) توسط بخار با فشار پایین تغذیه می‌شود. منبع حرارتی مذکور ممکن است بویلر یا بخار کم فشار خروجی از توربین بخار باشد. با جریان آب شور دریا درون لوله‌های این مرحله و عبور بخار از روی آنها، درون لوله‌ها بخار تشکیل می‌شود. بخار تشکیل شده درون لوله‌ها، به عنوان منبع حرارتی و همچنین برای تقطیر شدن وارد مرحله بعد می‌شود. همچنین مقداری از این بخار، به منظور افزایش بازدهی و جلوگیری از بروز تنش حرارتی، وارد پیش‌گرمکن‌های آب تغذیه می‌شود. تکرار این

عمل در چندین مرحله به همراه در نظر گرفتن اولین مرحله به عنوان منبع انرژی، موجب نام گذاری این سیستم به عنوان سیستم تقطیر چند مرحله‌ای (MED) شده است.

در هر مرحله بخار در یک طرف لوله‌ها می‌کند و در طرف دیگر، آب شور تغذیه گرمای آزاد شده را دریافت نموده و بخار می‌شود. این عمل تا زمانی که اختلاف درجه حرارت بخار و آب تغذیه در هر مرحله به اندازه‌ای باشد که عمل تبخیر بتواند صورت گیرد، ادامه خواهد داشت. البته باید خاطر نشان کرد که مکانیزم تولید آب شیرین به روش گفته شده تنها یکی از ساختارهای مورد استفاده در سیستم‌های MED می‌باشد. تولید آب شیرین در سیستم‌های MED به روش‌های مختلفی انجام می‌شود که در ادامه مطرح خواهد شد. توضیح اینکه تنها به دلیل افت فشار هر مرحله نسبت به مرحله قبل است که گرمای نهان تبخیر و تقطیر بارها و بارها می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

کاهش فشار موجب جوشش آب تغذیه در دمای پایین تری می‌شود و این عمل مرحله به مرحله ادامه پیدا می‌کند. آب شور باقی مانده در آخرین مرحله به عنوان پساب از سیستم خارج می‌شود و بخار تشکیل شده در آخرین مرحله، در کندانسور نهایی با آب شور تغذیه به عنوان آب خنک کن تبادل حرارت می‌کند و تقطیر می‌شود. آب تغذیه ورودی باید هوازدایی و همچنین یون زدایی شود. گازهای غیر قابل تقطیر و هوا مرحله به مرحله از آب شور تغذیه گرفته می‌شود و توسط اجکتور هوا از سیستم خارج می‌شود.

از لحاظ تئوری، نسبت عملکرد واحد برابر تعداد مراحل می‌باشد. در عمل چنین چیزی صادق نیست چرا که با کاهش فشار مقدار گرمای نهان آب افزایش می‌یابد، بنابراین مقدار بخار تشکیل شده در هر مرحله از مرحله قبل کمتر می‌باشد. ایزولاسیون و عایق کاری نیز کامل نمی‌باشد و مقداری گرما به محیط داده می‌شود. همچنین مقداری از گرمای اولیه صرف پیش گرم کردن آب می‌گردد. یک حالت عملی، تولید ۰/۷-۰/۸۵ کیلوگرم بخار در هر مرحله با استفاده از یک کیلوگرم بخار به عنوان منبع انرژی در اولین مرحله می‌باشد. برای افزایش نسبت عملکرد باید تعداد مراحل را

افزایش داد. با انجام این کار اختلاف دمای داخلی مرحله کاهش می‌یابد. سرانجام به یک اختلاف دمای محدود کننده می‌رسیم که برای تولید بخار کافی نیست^۱.

این اختلاف دما به دمای جوشش و عوامل انتقال حرارت بستگی دارد. واحدهای MED از گردش مجدد استفاده نمی‌کنند و یکبار گذر هستند. همان‌طور که قبلاً اشاره شد آب دریا وارد اولین مرحله که بیشترین دما را دارد شده و غلظت آب از هر مرحله به مرحله بعدی افزایش می‌یابد. به همین دلیل کمترین غلظت آب شور در بیشترین دما، و بیشترین غلظت در کمترین دما وجود دارد. این امر باعث کاهش تشکیل رسوب و عملکرد راحت‌تر واحد می‌گردد.

۲. ساختار مفهومی مدل شبیه‌ساز یکپارچه‌سازی

از نظر مفهومی تاسیسات یکپارچه تولید همزمان برق و آب شیرین شامل سرویس‌های جانبی مورد استفاده در زیرساخت‌های نیروگاه جهت تاسیسات آب شیرین کنی بصورت حامل‌های انرژی الکتریکی (برق جهت استفاده در آب شیرین کن غشائی و حرارتی) و انرژی گرمائی (در قالب آبگرم یا بخار جهت استفاده در آب شیرین کن حرارتی) می‌باشد. در یک متدولوژی مناسب ساختار امکان‌سنجی احداث آب شیرین کن در مجاورت نیروگاه حرارتی مطابق با شکل ۱ تعریف می‌شود (DE-TOP & DEEP 5 User's Manual, 2012 و فتاحی و همکاران، ۱۳۹۵).



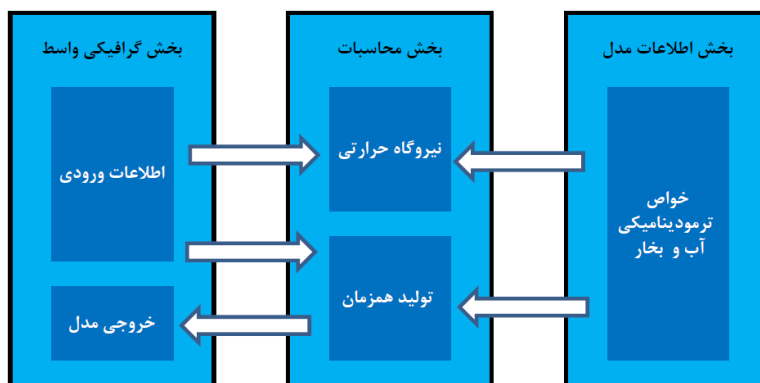
شکل ۱. متدولوژی امکان‌سنجی یکپارچه‌سازی سیکل بخاری تولید توان با انواع آب‌شیرین‌کن حرارتی

1. Khawla Abdul Mohsen Al-Shayji, 1998

بر اساس دیاگرام فوق جهت انجام مطالعه امکان‌سنجی لازم است سیکل آب و بخار نیروگاه مورد بررسی قرار گرفته و مدل شبیه‌سازی سیکل ترمودینامیکی تولید توان نیروگاه (با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز) ایجاد شده و با دیاگرام حرارتی نیروگاه انطباق داده شود. جهت امکان‌سنجی احداث آب شیرین کن و یکپارچه‌سازی آن با نیروگاه حرارتی سیکل بخار استفاده از یک نرم‌افزار مدل‌سازی مناسب ضروری است، نرم‌افزار DE-TOP جهت مدل‌سازی کاربردهای غیر از تولید توان الکتریکی انواع نیروگاه بخار با انواع سوخت و یکپارچه‌سازی سیکل‌های ترمودینامیکی برای انواع کاربردهای آب شیرین کنی حرارتی و گرمایش منطقه‌ای توسعه داده شده است.

با توجه به کاربرد اختصاصی نرم‌افزار مذکور جهت امکان‌سنجی احداث آب شیرین کنی حرارتی در مجاورت سیکل تولید توان الکتریکی و بررسی‌های انجام شده در مقالات منتشر شده مبنی بر سطح انطباق بالای خروجی نرم‌افزار با واقعیت‌های عملیاتی نیروگاه و آب شیرین کن، نرم‌افزار DE-TOP جهت تحلیل‌های فنی آب شیرین کن حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

فلودیاگرام شکل ۲ ساختار نرم‌افزار کاربرد، جهت ارزیابی کاربردهای غیر الکتریکی (آب شیرین کن حرارتی یا سیستم‌های گرمایش منطقه‌ای) سیکل بخار (سیکل رانکین) نیروگاهی را نشان می‌دهد. این نرم‌افزار در محیطی ساده، کاربری آسان و انعطاف‌پذیری فوق‌العاده امکان مدل‌سازی و یکپارچه‌سازی انواع سیکل‌های بخار با انواع توربین‌های کندانسوری و پس‌فشاری با تعداد زیرکش‌های متفاوت را فراهم آورده و ارزیابی تولید حامل انرژی برق و حرارت را برای کاربردهای مختلف آب شیرین کن حرارتی یا سیستم‌های گرمایش منطقه‌ای انجام می‌دهد. همچنین این نرم‌افزار قابلیت تحلیل جریان جرم و انرژی و اطلاعات مورد نیاز برای آنالیز اگزرتیک همه نقاط کلیدی سیکل (در ورودی و خروجی هر المان) را فراهم می‌آورد. این نرم‌افزار دارای قابلیت دریافت اطلاعات کافی جهت مدل‌سازی انواع رآکتورهای هسته‌ای و المان‌های خاص آن با کاربرد صنایع نیروگاهی (شامل BWR، PWR و SMRs) را دارا می‌باشد. شایان ذکر است که خروجی نرم‌افزار در قالب گرافیکی مناسب به تحلیل فنی و آماری امکان‌سنجی مورد نظر می‌پردازد.



شکل ۲. فلودیاگرام ساختار نرم افزار DE-TOP

۳. مدل بهینه یکپارچه‌سازی نمونه مطالعاتی

برای امکان‌سنجی استفاده از زیر ساخت‌های نیروگاه بخاری دو مداره PWR (راکتور با آب تحت فشار) جهت احداث آب شیرین کن لازم است دیاگرام بالانس حرارتی کلیه جریان‌های جرم و انرژی نیروگاه^۱ و دیاگرام جریان‌های فرآیندی^۲ سیکل آب و بخار نیروگاه مورد بررسی قرار گرفته و اطلاعات مورد نیاز برای ورود به نرم‌افزار استخراج شود^۳.

مطابق جدول شماره (۱) در بالانس حرارتی کلیه جریان‌های جرم و انرژی^۴ یک واحد نیروگاه بخاری دو مداره PWR (راکتور با آب تحت فشار) ظرفیت ناخالص تولید توان این واحد 1060 MW_e ، مشخصات بخار زنده ورودی به توربین فشار شامل توان حرارتی $3001/3 \text{ MW}_{th}$ و فشار و دمای $58/8 \text{ bar}$ و $274/3^\circ\text{C}$ لحاظ شده است و در بخش سیستم باز گرمایش از نوع ری‌هیتمتداول انتخاب شده و فشار و دما خروجی از ری‌هیتر نیز $5/6 \text{ bar}$ و $249/9^\circ\text{C}$ تکمیل گردیده است.

1. Heat Balance
2. Process Flow Diagram
3. I. G. Sánchez-Cervera, K. C. Kavvadias, I. Khamis, 2013
4. Heat Balance

برای خط تغذیه آب سیکل تولیدکننده بخار دمای آب ورودی به $217/9^{\circ}\text{C}$ و سیستم مجهز به ۷ مبدل حرارتی، مشتمل بر ۱ عدد دی‌اریتور در موقعیت مبدل ۴ ام تنظیم شده است.

جدول ۱. بالانس حرارتی کلیه جریان‌های جرم و انرژی (Heat Balance) واحد نیروگاهی

مقدار	مشخصات طراحی و بهره‌برداری نیروگاه
۳۲۱	$^{\circ}\text{C}$ دمای آب خنک‌کاری خروجی از رآکتور،
۱۵/۷	MPa فشار آب خنک‌کاری خروجی از رآکتور،
۶/۲۷ / ۷/۸۴	MPa فشار طراحی و بهره‌برداری بخار اصلی در خروجی تولیدکننده بخار،
۲۷۸/۵ / ۲۹۴	$^{\circ}\text{C}$ دمای طراحی و بهره‌برداری بخار اصلی در خروجی تولیدکننده بخار،
۲۷۴/۳ / ۵/۸۸	$^{\circ}\text{C}$ /MPa مشخصات (دمای و فشار) بخار در ورودی توربین فشار بالا،
۵،۹۸۰	h/dبی جرمی بخار عبوری در توربین فشار بالا در حالت طراحی،
۵،۹۸۰	h/dبی جرمی بخار عبوری در توربین فشار بالا در حالت بهره‌برداری،
۲۴۰	$^{\circ}\text{C}$ دمای بخار قبل از آل پی سی،
۰/۷۲	MPa فشار بخار قبل از آل پی سی،
۷/۵۵	kPa فشار طراحی کندانسور (برای دمای آب خنک‌کاری ۲۸ درجه سانتیگراد)،
۱۱/۴۷	kPa فشار طراحی کندانسور (برای دمای آب خنک‌کاری ۳۶ درجه سانتیگراد)،
۲۲۲،۰۰۰	m^3/h دبی حجمی آب خنک‌کاری عبوری از کندانسور،
۵،۹۲۰	h/dبی جرمی مورد انتظار برای آب تغذیه شده سیکل تولید توان،
۲۲۰	$^{\circ}\text{C}$ دمای مورد انتظار برای آب تغذیه شده سیکل تولید توان،
۱،۰۱۴	MWe نرخ توان الکتریکی تولیدی (با استفاده از آب خنک‌کاری با دمای ۲۸ درجه سانتیگراد)،

مأخذ: نتایج تحقیق

در پارامترهای پیشرفته تر واحد نیروگاهی نیز راندمان مربوط به اجزای اصلی و تاثیرگذار سیکل بخار نیروگاه شامل تولیدکننده بخار $98/6\%$ ، ژنراتور تولید توان الکتریکی $98/5\%$ و پمپ بترتیب 85% لحاظ شده است، برای بخش مصرف داخلی نیروگاه $5/8\%$ توان ناخالص تولیدی در نظر گرفته شده است. بر اساس آنالیز جریان‌های جرم و انرژی راندمان توربین فشار قوی 85% و راندمان مجموع

توربین‌های فشار متوسط و ضعیف ۸۰٪ جهت نیل به دسترسی به توان ناخاص تولیدی ۱۰۶۰ MW_e برآورد شده است. شایان ذکر است که مطابق با دیاگرام بالانس حرارتی واحد نیروگاهی فشار بخار زیرکش شده از توربین‌ها جهت تغذیه هیترهای فشار ضعیف (شماره‌های ۱ تا ۴)، دی‌اریتور (شماره ۵) و هیترهای فشار قوی (شماره ۶ و ۷) بترتیب ۰/۲۵bar، ۰/۶۵bar، ۱/۳۲bar، ۵/۱bar، ۸/۷bar و ۱۳/۸bar و ۲۳/۲bar لحاظ شده است. پس از تکمیل اطلاعات ورودی نرم‌افزار در قالب پارمترهای اصلی واحد نیروگاهی، مشخصات سیستم خنک‌کاری و پارمترهای پیشرفته‌تر و پس از طی مراحل زمان‌بر و حساس سعی و خطا برای انتخاب راندمان مناسب توربین‌ها در جهت حداکثر انطباق با بالانس جرم و انرژی و دسترسی به توان ناخاص تولیدی ۱۰۶۲/۴ MWe عملکرد مدل‌سازی سیکل بخار و بالانس جرم انرژی آن انجام می‌شود.

جهت بررسی کاربرد غیرالکتریکی سیکل واحد نیروگاهی و یکپارچه‌سازی آن با تأسیسات همزمان آب شیرین‌کن نوع حرارتی تقطیری چند مرحله‌ای نیز از نرم‌افزار DE-TOP کمک گرفته می‌شود. بر این نوع کاربری یکپارچه‌سازی برای تولید آب شیرین با تکنولوژی شیرین‌سازی حرارتی تقطیری چند مرحله‌ای (MED) به ظرفیت ۷۰,۰۰۰ m³/d و مشخصات آب ورودی با سختی حداکثری ۴۵ g/L و حداکثر دمای پساب برگشتی به دریا ۸۵°C طراحی انجام شده است.

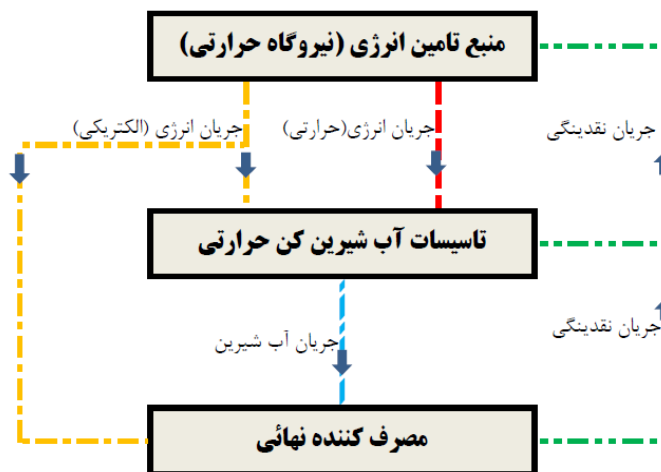
بر اساس اطلاعات مربوط به طراحی سیستم خنک‌کاری فشار کندانسور به میزان ۰/۰۴۴bar محاسبه شده است، این محاسبات بر اساس نوع سیستم خنک‌کاری یکبار گذر نیروگاه با دمای آب خنک‌کاری ورودی (آب دریا) ۱۸°C، اختلاف دمای آب برگشتی ۷/۶°C و دمای Approach برابر ۵°C برای طراحی مبدل کندانسور نتیجه شده است.

با رویکرد طراحی مدل بهینه یکپارچه‌سازی جهت استفاده حداکثری از بخار برداشت شده و کاهش حداکلی در راندمان انرژی و اگر ژنراتور سیکل نیروگاه، لازم است بر اساس مدل حاضر برداشت بخار در بالادست زیرکش هیتر فشار ضعیف شماره ۳، (با فشار و دمای ۱/۳۲bar و ۱۳۵°C و دبی ۴۶/۴ kg/s به میزان ۱۰۵ MW_{th}) جهت تامین حرارت مورد نیاز تأسیسات آب شیرین‌کن حرارتی انجام شده و پس از تکمیل سیکل آب شیرین‌کن در هیتر فشار ضعیف شماره ۲ تزریق شود.

خروجی نهائی مدل با استفاده از نرم‌افزار DE-TOP و جمع‌بندی مدل بهینه یکپارچه‌سازی نیروگاه با آب شیرین‌کن نوع حرارتی تقطیری چند مرحله‌ای (MED) نشان می‌دهد که براساس اطلاعات ارائه شده در خروجی نرم‌افزار DE-TOP برای طراحی آب شیرین‌کن تعداد مناسب استیج‌ها ۲۲ عدد و شاخص Gain output ratio برابر ۱۷/۵ گزارش شده است (فتاحی و همکاران، آذر ۱۳۹۵).

۴. تحلیل اقتصادی یکپارچه‌سازی

مطابق دیاگرام بلوکی شکل ۳ متدولوژی ارزیابی اقتصادی احداث آب شیرین‌کن در مجاورت نیروگاه حرارتی نشان داده شده است (DE-TOP & DEEP 5 User's Manual, 2012). براساس این دیاگرام انرژی مورد نیاز (الکتریکی و حرارتی) برای فرآیند شیرین‌سازی از طریق برداشت حرارت و توان از نیروگاه حرارتی تامین می‌شود. در مدل اقتصادی این یکپارچه‌سازی، لازم است هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری تاسیسات در کنار تعاملات مالی مصرف‌کننده نهائی از طریق پرداخت هزینه توان و آب شیرین به عنوان کالای تحویل شده، بالانس شود. لذا براساس اطلاعات ضروری است آنالیز هزینه ناشی از توان مصرفی و توان از دست رفته نیروگاه و فایده آب تولیدی در آب شیرین‌کن بواسطه یکپارچه‌سازی نیروگاه و آب شیرین‌کن انجام شده و تحلیل‌های فنی در قالب آنالیز هزینه فرصت انجام شود.



شکل ۳. دیاگرام بلوکی متدولوژی ارزیابی اقتصادی احداث آب شیرین کن در مجاورت نیروگاه

برای تحلیل اقتصادی یکپارچه‌سازی نیروگاه و آب شیرین کن، لازم است اطلاعات کامل مربوط به هزینه‌های ثابت و متغیر سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری احداث و بهره‌برداری همزمان نیروگاه و آب شیرین کن در اختیار باشد، براساس بررسی انجام شده از منابع و مراجع هزینه سرمایه‌گذاری اولیه آب شیرین کن حرارتی تقطیری چند مرحله‌ای (MED) در حدود $1000\$/m^3$ برآورد می‌شود، لیکن لازم است سایر هزینه‌ها شامل هزینه آبگیری از دریا و بازگشت پساب، پیش تصفیه و سایر تجهیزات جانبی آب شیرین کن به همراه هزینه‌های طراحی و مهندسی پروژه، هزینه ساختمانی و هزینه‌های حین ساخت و پیش‌بینی نشده نیز در محاسبات لحاظ شود. شایان ذکر است که برای آب شیرین کن حرارتی علاوه بر خود آب شیرین کن، سیستم تولید بخار نیز مورد نیاز می‌باشد. تأسیسات آب شیرین کن مورد بحث برای عمر مفید ۱۵ سال، بدون نیاز به هزینه بازسازی تأسیسات در طول عمر مفید تأسیسات و بهره‌برداری در کل ایام سال طراحی شده است. بر این اساس هزینه سرمایه‌گذاری اولیه احداث این آب شیرین کن MED به ظرفیت $70,000 m^3/day$ به شرح جدول ۲ خواهد بود.

جدول ۲. هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه آب شیرین کن MED به ظرفیت $70,000 \text{ m}^3/\text{day}$

هزینه ویژه ($10^{-2} \$/\text{m}^3$)	هزینه کل ($10^6 \$/$)	مبانی محاسبات	نوع هزینه سرمایه‌گذاری اولیه
-	-	-	هزینه زمین*
۰/۹۱	۳/۵	$50 \$/\text{m}^3/\text{d}$	هزینه تأمین تجهیزات آبیگری برداشت آب دریا و تخلیه پساب به دریا
۴/۵۷	۱۷/۵	$250 \$/\text{m}^3/\text{d}$	هزینه تأمین تجهیزات پیش تصفیه آب دریا
۱۸/۲۶	۷۰	$1,000 \$/\text{m}^3/\text{d}$	هزینه تأمین تجهیزات واحدهای تقطیر MED
۶/۲۹	۱۷/۵	$500 \$/\text{kW}_{el}$	هزینه تأمین تجهیزات جانبی تأمین توان حرارتی و آب
	۶/۶	$55,000 \$/\text{MW}_{th}$	شیرین‌کن MED
۵/۴۸	۲۱	$149 \$/\text{m}^3/\text{d}$	هزینه ساختمانی احداث تأسیسات آبیگری و پیش تصفیه آب دریا**
۱/۸۲	۸	$100 \$/\text{m}^3/\text{d}$	هزینه ساختمانی احداث تأسیسات آب شیرین‌کن***
۱/۸۶	۷/۱۴	$102 \$/\text{m}^3/\text{d}$	هزینه‌های طراحی و مهندسی****
۳/۷۳	۱۴/۲۸	$204 \$/\text{m}^3/\text{d}$	هزینه‌های پیش‌بینی نشده*****
۴۲/۹۲	۱۶۴/۵۲	$1,722 \$/\text{m}^3/\text{d}$	کل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه در عمر مفید تأسیسات

* هزینه زمین با توجه به مالکیت دولتی کارفرما هزینه‌ای لحاظ نشده است.

** هزینه ساختمانی احداث تأسیسات آبیگری و پیش تصفیه آب دریا معادل هزینه تأمین تجهیزات آبیگری و پیش تصفیه لحاظ شده است.

*** هزینه ساختمانی احداث معادل ۱۰٪ هزینه تأمین تجهیزات آب شیرین‌کن لحاظ شده است.

**** هزینه‌های طراحی و مهندسی معادل ۵٪ هزینه سرمایه‌گذاری تأسیسات آبیگری، پیش تصفیه و آب شیرین‌کن لحاظ شده است.

***** هزینه‌های پیش‌بینی نشده معادل ۱۰٪ هزینه سرمایه‌گذاری تأسیسات آبیگری، پیش تصفیه و آب شیرین‌کن لحاظ شده است.

مأخذ: نتایج تحقیق

با توجه به اینکه میانگین انرژی الکتریکی تحویلی به شبکه در یک دوره بهره‌برداری (حدود 300 روز در سال) در قدرت نامی و تولید روزانه 22200 مگاوات ساعت و درآمد ناشی از هر کیلووات ساعت برق معادل 650 ریال ارائه شده است، کارکرد تأسیسات برای 300 روز در سال

(معادل ضریب بهره‌برداری ۸۲٪) تعریف شده است، لازم است برای اختلاف زمانی ۶۵ روز در سال و مواقع اضطراری تأسیسات تأمین توان الکتریکی و حرارتی در نظر گرفته شود. مبانی طراحی تأسیسات تأمین توان الکتریکی و حرارتی به شرح جدول ۳ اعلام می‌گردد.

جدول ۳. طراحی تأسیسات تأمین توان الکتریکی و حرارتی آب شیرین‌کن به ظرفیت $70,000 \text{ m}^3/\text{day}$

مقدار	واحد	مشخصات تأمین توان الکتریکی و حرارتی برای آب شیرین‌کن
۷	MWel.	توان الکتریکی تأسیسات آبیگری و پیش تصفیه‌خانه
۶/۶	MWel.	توان الکتریکی تأسیسات و تجهیزات آب شیرین‌کن
۱۶/۱	MWel.	توان الکتریکی از دست رفته به واسطه یکپارچه‌سازی آب شیرین‌کن و نیروگاه
۱۲۰	MWth.	توان حرارتی مورد نیاز تأسیسات و تجهیزات آب شیرین‌کن

مأخذ: نتایج تحقیق

بر این اساس و با لحاظ نمودن مفروضاتی شامل احداث آب شیرین‌کن در مجاورت تأسیسات نیروگاه اتمی، احداث آبیگری مستقل برای آب شیرین‌کن، برآورد هزینه‌های انرژی الکتریکی مورد نیاز تأسیسات آبیگری، پیش تصفیه و فرآیند شیرین‌سازی از محل نیروگاه به مدت ۳۰۰ روز در سال و مابقی ایام از شبکه برق و تأمین انرژی حرارتی مورد نیاز آب شیرین‌کن MED از محل مدول طرح توسعه نیروگاه به مدت ۳۰۰ روز در سال و مابقی ایام از محل احداث بویلر مستقل و استفاده از سوخت گاز طبیعی برآورد هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای آب شیرین‌کن حرارتی تقطیری چند مرحله‌ای (MED) به همراه تأسیسات جانبی مورد نیاز به شرح جدول (۳) است. همچنین برآورد هزینه‌های بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری برای دو گزینه مذکور مطابق جدول (۴) می‌باشد.

جدول ۴. هزینه‌های بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری آب شیرین کن MED به ظرفیت $70,000 \text{ m}^3/\text{day}$

نوع هزینه بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری	مبانی محاسبات	هزینه ویژه ($10^{-2} \text{ \$/m}^3$)	هزینه سالانه ($10^2 \text{ \$}$)
هزینه انرژی مصرفی در تأسیسات آبیگری و پیش‌تصفیه در بازه زمانی 300 d/yr *	$0.02 \text{ \$/kWhel}$		۱,۰۰۸
هزینه انرژی مصرفی MED و توان از دست رفته MED در بازه زمانی 300 d/yr *	$0.02 \text{ \$/kWhel}$		۳,۲۶۹
هزینه انرژی مصرفی در تأسیسات آبیگری و پیش‌تصفیه در بازه زمانی 65 d/yr **	$0.01 \text{ \$/kWhel}$	۱۹/۴۳	۱۰۹
هزینه انرژی مصرفی الکتریکی و حرارتی MED در بازه زمانی 65 d/yr **	$0.01 \text{ \$/kWhel}$		۱۰۳
هزینه مواد شیمیایی مصرفی در پیش‌تصفیه‌خانه و آب شیرین‌کن***	$0.003 \text{ \$/kWhth}$		۴۷۵
هزینه تعویض لوله MED****	$10 \text{ \$/m}^3/\text{d}$	$2/26 \text{ S. C. } 0.25 \text{ \$/m}^3$	۵۷۸
هزینه تعمیرات و نگهداری و لوازم یدکی و نیروی انسانی*****	$34/44 \text{ \$/m}^3/\text{d}$	$2/74$	۷۰۰
کل هزینه بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری سالانه		$37/31$	۳,۲۹۰
۹,۵۳۲			

* با توجه به اطلاعات ارائه شده توسط کارفرما در دوره بهره‌برداری از نیروگاه معادل 300 روز کاری سالانه و درآمد ناشی از فروش هر کیلووات ساعت برق معادل 650 ریال محاسبه شده است.

** خارج از دوره بهره‌برداری نیروگاه معادل 65 روز کاری در سال و تعرفه فروش برق برای تأسیسات شیرین‌سازی آب دریا در صنعت برق کشور هر کیلو وات ساعت برق معادل $0.01 \text{ \$/kWhel}$ محاسبه شده است.

*** بر اساس تجربیات بهره‌برداری هزینه ویژه مواد شیمیایی مصرفی برای انواع آب شیرین‌کن در حدود $0.025 \text{ \$/m}^3$ است.

**** بر اساس تجربیات بهره‌برداری هزینه تعویض ممبران آب شیرین‌کن اسمز معکوس 5% سرمایه‌گذاری اولیه در سال و هزینه تعویض لوله‌های آب شیرین‌کن تبخیری چند مرحله‌ای 1% سرمایه‌گذاری اولیه در سال می‌باشد.

***** بر اساس تجربیات بهره‌برداری معادل 2% هزینه کل سرمایه‌گذاری اولیه تأسیسات آبیگری، پیش‌تصفیه و آب شیرین‌کن در سال می‌باشد.

مأخذ: نتایج تحقیق

در این بخش از تحقیق مدل تأمین مالی طرح احداث آب شیرین کن MED با ظرفیت 70 هزار مترمکعب در شبانه روز، مشتمل بر هزینه سرمایه‌گذاری اولیه 165 میلیون دلار (معادل $9/346,5$

میلیارد ریال در طول عمر مفید تأسیسات) و هزینه بهره‌برداری ۹/۵ میلیون دلار ریال (معادل ۳۱۰ میلیارد ریال سالیانه)، در طول دوره احداث ۱ سال و دوره بهره‌برداری ۱۵ سال در قالب خرید تضمینی آب با استفاده از پتانسیل‌های بخش خصوصی جهت سرمایه‌گذاری با مفروضات جدول ۵ مورد تحلیل مالی - اقتصادی قرار می‌گیرد.

جدول ۵. مفروضات مدل مالی خرید تضمینی در آب شیرین کن MED به ظرفیت $70,000 \text{ m}^3/\text{day}$

مقدار	واحد	شرح مفروضات
۱	year	طول دوره احداث
۵,۳۴۶/۹	۱۰۹ Rials/Life Cycle	هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه
۱۵	year	طول دوره بهره‌برداری از تأسیسات
۲۵/۵۵	۱۰۶ m^3/year	تولید سالیانه آب شیرین طی دوره بهره‌برداری
۲۵	%	نرخ مالیات
۳۰۹/۷۹	۱۰۹ Rials/year	هزینه‌های بهره‌برداری سالیانه
۱۵	year	عمر مفید تجهیزات و تأسیسات آب شیرین‌کن
۸۰	%	میزان سهم تسهیلات از کل سرمایه‌گذاری اولیه
۱۸	%	نرخ بهره سالیانه تسهیلات دریافت شده
۲	year	سال شروع بازپرداخت تسهیلات
۵	year	دوره بازپرداخت تسهیلات
۲۰	%	میزان سهم آورده سهامداران از کل هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه
۳۰	%	نرخ بهره مورد انتظار آورده سهامداران
۱۸	%	نرخ تورم هزینه
۱۸	%	نرخ تورم درآمد

مأخذ: نتایج تحقیق

با توجه به آیین نامه اجرایی قراردادهای تضمین خرید آب و پساب، قیمت فروش محصول به صورت سالیانه با اعمال ضریب AF تعدیل می‌گردد، در این سناریو هزینه‌ها و درآمدهای پروژه با نرخ تعدیلی معادل متوسط نرخ رشد شاخص خرده‌فروشی در گذشته متناسب با دوره زمانی بهره‌برداری طرح تعدیل می‌شود و قیمت فروش بر اساس مدل تعدیل یافته محاسبه می‌گردد. درآمد این طرح برای سرمایه‌گذار از حاصل ضرب حجم آب تولید شده در قیمت فروش آب محاسبه می‌شود و قیمت فروش آب طوری تعیین می‌شود که با توجه به دوره بهره‌برداری، نرخ بازده داخلی در نظر گرفته شده به عنوان تابع هدف حاصل شود. این محاسبات از طریق مدل Goal Seek در نرم‌افزار Excel انجام شده است. برای تعیین قیمت براساس آیین نامه خرید تضمینی آب و پساب، قیمت فروش محصول پروژه در طول دوره قرارداد با ضریب AF (مطابق رابطه ۱) تعدیل می‌گردد:

$$AF = \left[\frac{CPI_1}{CPI_2} \right]^\alpha \left[\frac{R_1}{R_2} \right]^{1-\alpha} \quad (1)$$

AF: ضریب تعدیل نرخ‌های مندرج در قراردادهای بلندمدت

CPI₁: شاخص قیمت خرده‌فروش CPI در ابتدای سال پرداخت

CPI₂: شاخص قیمت خرده‌فروشی CPI در ابتدای سال عقد قرارداد

R₁: متوسط نرخ تسعیر ارز (یورو) در یک ماهه قبل از موعد پرداخت

R₂: متوسط نرخ تسعیر ارز (یورو) در یک ساله قبل از زمان عقد قرارداد

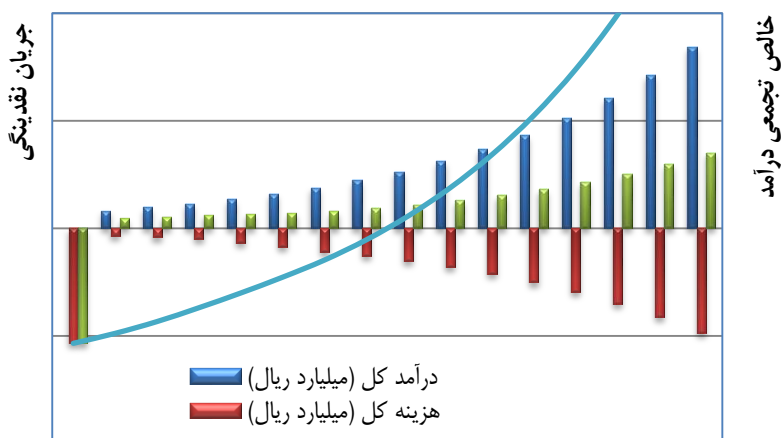
مقدار α در $[0.5 - 1]$ و انتخاب مقدار آن بر عهده و انتخاب سرمایه‌گذار در زمان ارائه پیشنهاد قیمت است. در این گزارش ضریب α یک در نظر گرفته شده است و تغییر نوسات ارز مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین بر اساس متوسط نرخ افزایش سالیانه شاخص خرده‌فروشی طی سال‌های گذشته، مشابه دوره بهره‌برداری، متوسط افزایش هزینه و درآمد سالانه در پروژه حاضر برابر ۱۸٪ لحاظ شده است. با در نظر گرفتن تورم برای رشد هزینه و درآمد و سناریوی تأمین مالی از طریق ۲۰٪ آورده سهامداران و ۸۰٪ باقی مانده از طریق تسهیلات مطابق مفروضات لحاظ شده که قیمت هر مترمکعب آب برای بازده‌های مختلف سهامداران به شرح جدول ذیل حاصل می‌شود.

جدول ۶. قیمت هر مترمکعب آب با نرخ بازده داخلی مختلف بر اساس تأمین مالی با تعدیل

نرخ بازده مورد انتظار سهام‌داران	%۲۴	%۲۵	%۲۶	%۲۷	%۲۸	%۲۹	%۳۰	%۳۱	%۳۲
قیمت هر مترمکعب آب تولیدی	۲۴,۹۰۰	۲۵,۷۴۹	۲۶,۶۲۱	۲۷,۵۱۶	۲۸,۴۲۲	۲۹,۳۶۸	۳۰,۳۷۵	۳۱,۳۹۱	۳۲,۴۲۸

مأخذ: نتایج تحقیق

بر اساس مدل تأمین مالی مذکور، نمودار جریان گردش نقدینگی آب شیرین کن بر اساس نرخ بازده داخلی ۳۰٪ سرمایه‌گذار طی دوره بهره‌برداری ۱۵ ساله مطابق نمودار شکل ۸ بوده و قیمت هر مترمکعب آب تولیدی برابر ۳۰,۳۷۵ ریال در سال پایه ۱۳۹۴ برآورد شده است.



شکل ۴. گردش نقدینگی طرح بر اساس نرخ بازده داخلی ۳۰٪ سرمایه‌گذار طی دوره بهره‌برداری

شایان ذکر است که بر اساس قیمت برآوردی فوق‌الذکر، طرح حاضر دارای جذابیت کافی برای ترقیب کارفرمای دولتی یا سرمایه‌گذاری بخش خصوصی برای مشارکت در طرح حاضر را دارا می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

نتایج حاصل از مقایسه فنی دو حالت واحد نیروگاهی تک منظوره (کاربرد منحصرأ تولید توان الکتریکی) و دو منظوره (کاربرد تولید توان الکتریکی و آب شیرین کن) و تحلیل اقتصادی مدل بهینه یکپارچه‌سازی موارد زیر مشهود است:

۱. از نقطه نظر راندمان یکپارچه‌سازی آب شیرین کن با سیکل تولید توان نیروگاهی منجر به کاهش راندمان ناخالص تولید توان الکتریکی سیکل واحد نیروگاهی از $۳۵/۹\%$ به $۳۵/۳\%$ می‌گردد، شایان ذکر است که راندمان کلی انرژی‌بری تأسیسات یکپارچه افزایش از $۳۳/۸\%$ به $۳۶/۸\%$ را در پی خواهد داشت.

۲. احداث تأسیسات آب شیرین کن در مجاورت سیکل تولید توان منجر به کاهش تولید توان الکتریکی ناخالص واحد نیروگاهی به میزان $۱۷/۱\text{MW}_e$ (از $۱۰۶۲/۴\text{MW}_e$ تا $۱۰۴۵/۳\text{MW}_e$) می‌شود. قابل ذکر است که کاهش تولید توان الکتریکی خالص مجموعه به میزان ۱۶MW_e (از $۱۰۰۰/۷\text{MW}_e$ تا $۹۸۴/۷\text{MW}_e$) برآورد می‌گردد.

۳. مصرف داخلی توان الکتریکی و مصرف انرژی حرارتی در تأسیسات آب شیرین کنی به میزان $۸/۰۸\text{MW}_e$ و $۱۰۵/۳\text{MW}_{th}$ ارزیابی می‌گردد، لازم به ذکر است که مصرف و کاهش تولید انرژی الکتریکی خالص سیکل نیروگاهی به میزان $۲۴/۰۸\text{MW}_e$ و کاهش معادل $۲/۴\%$ در سقف تولید توان واحد نیروگاهی می‌باشد.

۴. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه احداث آب شیرین کن به روش چندمرحله‌ای (MED) با ظرفیت $۷۰,۰۰۰\text{m}^3/\text{day}$ از طریق یکپارچه‌سازی با نیروگاه بخاری دو مداره PWR با کلیه امکانات مورد نیاز شامل احداث سازه آبگیری و تأسیسات مربوطه، احداث پیش تصفیه‌خانه و آب شیرین کن به همراه تأسیسات و تجهیزات تأمین انرژی و سرویس‌های جانبی ۱۶۵ میلیون دلار (معادل $۵,۳۴۶/۹$ میلیارد ریال در طول عمر مفید تأسیسات) و هزینه بهره‌برداری $۹/۵$ میلیون دلار ریال (معادل ۳۱۰ میلیارد ریال سالانه)، در طول دوره احداث ۱ سال و دوره بهره‌برداری ۱۵ سال برآورد می‌شود.

۵. با در نظر گرفتن نرخ تورم برای رشد هزینه و درآمد طرح و تحلیل تأمین مالی طرح از طریق ۲۰٪ آورده سهامداران و ۸۰٪ باقی مانده از طریق تسهیلات، بر اساس نرخ بازده داخلی ۳۰٪ مورد انتظار سرمایه گذار طی دوره بهره‌برداری ۱۵ ساله، قیمت تمام شده هر مترمکعب آب تولیدی برابر ۳۰,۳۷۵ ریال در سال پایه ۱۳۹۴ برآورد می‌گردد.
۶. اجرای طرح یکپارچه‌سازی آب شیرین کن با سیکل تولید توان نیروگاهی، ارتقای راندمان کلی انرژی‌بری مجموعه تأسیسات به میزان ۳٪ (از راندمان کلی انرژی‌بری ۳۳/۸٪ تا ۳۶/۸٪) را در پی دارد. از نقطه نظر ارزیابی تبعات زیست محیطی طرح در مقایسه با تأمین حرارت و برق مورد نیاز در تأسیسات آب شیرین کن فوق‌الذکر صرفه‌جویی سالیانه مربوط به عدم مصرف حامل گاز طبیعی در حدود $60,000 \text{ m}^3/\text{year}$ و عدم تولید گازهای گلخانه‌ای معادل ۱۲۰ تن خواهد شد.

سپاسگزاری

از زحمات کلیه مدیران و کارشناسان شرکت مادر تخصصی تولید و توسعه انرژی اتمی ایران، علی‌الخصوص آقایان دکتر خیرالهی، مهندس نجاتی و مهندس صالحیان دهکردی که در ایجاد بستر مناسب این تحقیق همکاری بسیار صمیمانه‌ای داشتند، کمال تشکر و قدردانی به عمل آورده می‌شود.

منابع

- فتاحی، رضا؛ صالحیان دهکردی، عبدالرضا؛ نجاتی، علی و سعید خیرالهی (آذر ۱۳۹۵)، "طراحی مدل بهینه انتگراسیون نیروگاه هسته‌ای دو مداره PWR با آب شیرین کن حرارتی MED"، *اولین همایش ملی مهندسی قدرت و نیروگاه‌های هسته‌ای*. ایران: بوشهر.
- فتاحی، رضا؛ نجف زاده، کیان و غلامرضا بیاتی (خرداد ۱۳۹۵)، "امکان‌سنجی انتگراسیون آب شیرین کن حرارتی تقطیری چندمرحله‌ای (MED) با نیروگاه بخاری بندرعباس"، *یازدهمین همایش بین‌المللی انرژی ایران*. ایران: تهران.

DE-TOP & DEEP 5 User's Manual (2012).

Gray S.; Duke M.; Rahardianto A. and Y. Cohen (2011), "Seawater Use and Desalination Technology", *Victoria University, Melbourne, VIC, Australia and University of California, Los Angeles, CA, USA*, book, chap: 4. 04, Elsevier B. V.

Hykmat S. Aybar (2004). "Desalination System Using Waste Heat of Power Plant", *Desalination*, V. 166, pp. 167-170

Khawla Abdul Mohsen Al-Shayji (1998), "Modeling, Simulation and Optimization of Large-Scale Commercial Desalination Plants". *PhD Thesis*, Virginia Polytechnic Institute and State University

Mezher T.; Fath H.; Abbas Z. and A. Khaled (2011), "Techno-Economic Assessment and Environmental Impacts of Desalination Technologies", *Desalination*, V. 266, pp. 263-273

Sánchez-Cervera I. G.; Kavvadias K. C. and I. Khamis (2013) "DE-TOP: A New IAEA Tool for the Thermodynamic Evaluation of Nuclear Desalination", *International Atomic Energy Agency (IAEA)*, WagramerStrasse 5, P. O. Box 100, A-1400, Vienna, Austria