فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی

سال سوم/ شماره ۶/ بهار ۱۳۹۶/ صفحات ۸۴-۶۳

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 هیتر شماره ۳ نیروگاه برای تغذیه آب شیرین‌کن حرارتی و بازگردش آن با دمای پایین‌تر به هیتر 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.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۲/۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۳/۶

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-09-08]

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 شیرین‌کن 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[1]. 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 سیستم های حرارتی تولید می‌شود[2]. یکی از راه‌های کاهش هزینه احداث آب شیرین‌کن 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

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-09-08]

ترتیب ۸۳٪ آب جبرانی بویلرها بدون صرف هیچگونه انرژی اضافی و تنها از طریق بازیافت انرژی از بلودان بویلر تأمین می‌شد[1].

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 پس‌مانده آن بخاری است با درجه حرارت و فشار مناسب که به عنوان بخار تغذیه به هیتر آب تغذیه تجهیزات آب‌شیرین‌کن 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 آب‌شیرین‌کن مصرف می‌شود. به طور کلی سیستم‌های تولید همزمان توان و آب‌شیرین موازی مناسب نیستند زیرا تأسیسات تولید توان و آب‌شیرین‌کن 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 ۵۰۰°C و فشاری بسیار بالا دارد، در حالی که تجهیزات تقطیری آب شیرین‌کن حرارتی سیستم‌ها حداکثر به دمای ۲۰۰°C محدود می‌شوند.

در طراحی تأسیسات تولید همزمان توان و آب‌شیرین، روش ترکیبی ارجح بر روش‌های سری و موازی می‌باشد، روش ترکیبی باعث صرفه‌جویی درهزینه 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 شیرین‌کن 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 مسایلی که امروزه در زمینه تولید آب شیرین حائز اهمیت است، قابلیت استفاده از هر نوع جریان انرژی حرارتی در سیستم‌های آب شیرین‌کن حرارتی تقطیری چند مرحله‌ای MED می‌باشد.

1. Hykmat S. Aybar, 2004

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-09-08]

قابلیت کارکرد این نوع سیستم در دماهای پایین (پایین‌تر از ۷۰ °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 این‌صورت 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، زمانی‌که 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 دی اکسید 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 و 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 پیش گرمکن‌های آب تغذیه می‌شود. تکرار این

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-09-08]

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

در هر مرحله بخار در یک طرف لوله‌ها میعان 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 می شود 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 پایین‌تری می‌شود و این عمل مرحله به مرحله ادامه پیدا می‌کند. آب شور باقی‌مانده 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 یون‌زدایی شود. گازهای غیرقابل 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 عایق‌کاری 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 ۰/۸۵-۰/۷کیلوگرم بخار در هر مرحله با استفاده از یک کیلوگرم بخار به عنوان منبع اصلی انرژی در اولین مرحله می‌باشد. برای افزایش نسبت عملکرد باید تعداد مراحل را

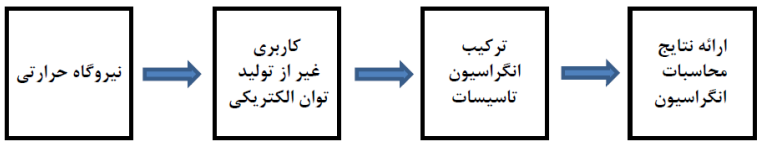
[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-09-08]

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[1].

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 شیرین‌کنی بصورت حامل‌های انرژی الکتریکی (برق جهت استفاده در آب شیرین‌کن غشائی و حرارتی) و انرژی گرمائی (در قالب آبگرم یا بخار جهت استفاده در آب شیرین‌کن 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

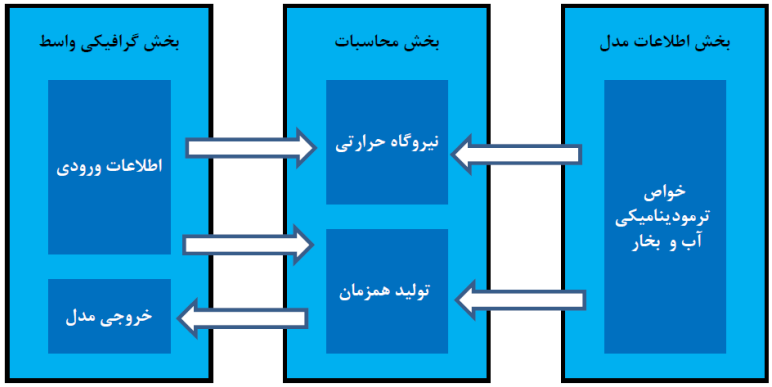
[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-09-08]

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 شیرین‌کن 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 شیرین‌کنی حرارتی و گرمایش منطقه‌ای توسعه داده شده است.

با توجه به کاربرد اختصاصی نرم‌افزار مذکور جهت امکان‌سنجی احداث آب شیرین‌کنی 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 شیرین‌کن، نرم‌افزار DE-TOP جهت تحلیل‌های فنی آب شیرین‌کن حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

فلودیاگرام شکل ۲ ساختار نرم افزار کاربرد، جهت ارزیابی کاربردهای غیر الکتریکی (آب‌شیرین‌کن حرارتی یا سیستم‌های گرمایش منطقه‌ای) سیکل بخار (سیکل رانکین) نیروگاهی را نشان می‌دهد. این نرم‌افزار در محیطی ساده، کاربری آسان و انعطاف پذیری 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 آب‌شیرین‌کن حرارتی یا سیستم‌های گرمایش منطقه‌ای انجام می‌دهد. همچنین این نرم‌افزار قابلیت تحلیل جریان جرم و انرژی و اطلاعات مورد نیاز برای آنالیز اگزرژتیک 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 PWR، BWR و SMRs) را دارا می‌باشد. شایان ذکر است که خروجی نرم‌افزار در قالب گرافیکی مناسب به تحلیل فنی و آماری امکان‌سنجی مورد نظر می‌پردازد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-09-08]



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 (رآکتور با آب تحت فشار) جهت احداث آب شیرین‌کن لازم است دیاگرام بالانس حرارتی کلیه جریان‌های جرم و انرژی نیروگاه[1] و دیاگرام جریان‌های فرآیندی[2] سیکل آب و بخار نیروگاه مورد بررسی قرار گرفته و اطلاعات مورد نیاز برای ورود به نرم‌افزار استخراج شود[3].

مطابق جدول شماره (۱) در بالانس حرارتی کلیه جریان‌های جرم و انرژی[4] یک واحد نیروگاه بخاری دو مداره PWR (رآکتور با آب تحت فشار) ظرفیت ناخالص تولید توان این واحد $۱۰۶۰MW_e$، مشخصات بخار زنده ورودی به توربین فشار شامل توان حرارتی $۳۰۰۱/۳MW_{th}$ و فشار و دمای ۵۸/۸bar و ۲۷۴/۳°C لحاظ شده است و در بخش سیستم باز گرمایش از نوع ری‌هیت متداول انتخاب شده و فشار و دما خروجی از ری‌هیتر نیز ۵/۶bar و ۲۴۹/۹°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

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-09-08]

برای خط تغذیه آب سیکل تولیدکننده بخار دمای آب ورودی به ۲۱۷/۹°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

مشخصات طراحی و بهره‌برداری نیروگاه	مقدار
°Cدمای آب خنک‌کاری خروجی از رآکتور،	۳۲۱
MPaفشار آب خنک‌کاری خروجی از رآکتور،	۱۵/۷
MPaفشار طراحی و بهره‌برداری بخار اصلی در خروجی تولید کننده بخار،	۶/۲۷ / ۷/۸۴
°Cدمای طراحی و بهره‌برداری بخار اصلی در خروجی تولید کننده بخار،	۲۷۸/۵ / ۲۹۴
MPa/°Cمشخصات (دمای و فشار) بخار در ورودی توربین فشار بالا،	۲۷۴/۳ / ۵/۸۸
t/hدبی جرمی بخار عبوری در توربین فشار بالا در حالت طراحی،	۵,۹۸۰
t/hدبی جرمی بخار عبوری در توربین فشار بالا در حالت بهره‌برداری،	۵,۹۸۰
°Cدمای بخار قبل از ال پی سی،	۲۴۰
MPaفشار بخار قبل از ال پی سی،	۰/۷۲
kPaفشار طراحی کندانسور (برای دمای آب خنک کاری ۲۸ درجه سانتیگراد)،	۷/۵۵
kPaفشار طراحی کندانسور (برای دمای آب خنک کاری ۳۶ درجه سانتیگراد)،	۱۱/۴۷
m3/hدبی حجمی آب خنک‌کاری عبوری از کندانسور،	۲۲۲,۰۰۰
t/hدبی جرمی مورد انتظار برای آب تغذیه شده سیکل تولید توان،	۵,۹۲۰
°Cدمای مورد انتظار برای آب تغذیه شده سیکل تولید توان،	۲۲۰
MWe نرخ توان الکتریکی تولیدی (با استفاده از آب خنک‌کاری با دمای ۲۸ درجه سانتیگراد)،	۱,۰۱۴

مأخذ: نتایج تحقیق

در پارامترهای پیشرفته‌تر واحد نیروگاهی نیز راندمان مربوط به اجزای اصلی و تاثیرگذار سیکل بخار نیروگاه شامل تولید کننده بخار۹۸/۶٪، ژنراتور تولید توان الکتریکی ۹۸/۵٪ و پمپ بترتیب ۸۵٪ لحاظ شده است، برای بخش مصرف داخلی نیروگاه ۵/۸٪ توان ناخالص تولیدی در نظر گرفته شده است. بر اساس آنالیز جریان‌های جرم و انرژی راندمان توربین فشار قوی ۸۵٪ و راندمان مجموع

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-09-08]

توربین‌های فشار متوسط و ضعیف ۸۰٪ جهت نیل به دسترسی به توان ناخاص تولیدی $۱۰۶۰MW_e$ برآورد شده است. شایان ذکر است که مطابق با دیاگرام بالانس حرارتی واحد نیروگاهی فشار بخار زیرکش شده از توربین‌ها جهت تغذیه هیترهای فشارضعیف (شماره‌های ۱ تا ۴)، دی‌اریتور (شماره۵) و هیترهای فشار قوی (شماره ۶ و ۷) بترتیب ۰/۲۵bar، ۰/۶۵bar، ۱/۳۲bar، ۵/۱bar، ۸/۷bar، ۱۳/۸ bar و ۲۳/۲bar لحاظ شده است. پس از تکمیل اطلاعات ورودی نرم‌افزار در قالب پارامترهای اصلی واحد نیروگاهی، مشخصات سیستم خنک‌کاری و پارامترهای 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 ۱۰۶۲/۴MWe 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 $۷۰,۰۰۰m^3/d$ 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 حداقلی در راندمان انرژتیک و اگزرژتیک 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 ۴۶/۴kg/s به میزان $۱۰۵MW_{th}$) جهت تامین حرارت مورد نیاز تاسیسات آب شیرین‌کن حرارتی انجام شده و پس از تکمیل سیکل آب شیرین‌کن در هیتر فشار ضعیف شماره ۲ تزریق شود.

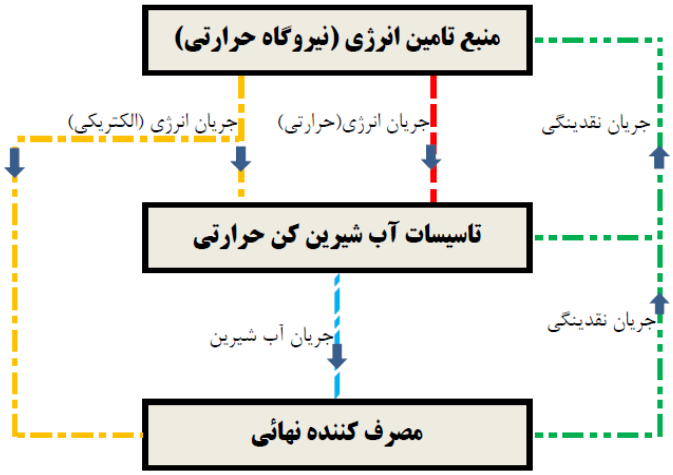
[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-09-08]

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، آذر۱۳۹۵).

٤. تحلیل اقتصادی یکپارچه‌سازی

مطابق دیاگرام بلوکی شکل ۳ متدولوژی ارزیابی اقتصادی احداث آب شیرین کن 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 بر اساس 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.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-09-08]



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

برای تحلیل اقتصادی یکپارچه‌سازی نیروگاه و آب شیرین‌کن، لازم است اطلاعات کامل مربوط به هزینه‌های ثابت و متغییر سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری احداث و بهره‌برداری همزمان نیروگاه و آب شیرین‌کن در اختیار باشد، براساس بررسی انجام شده از منابع و مراجع هزینه سرمایه‌گذاری اولیه آب شیرین‌کن حرارتی تقطیری چند مرحله‌ای (MED) در حدود $۱۰۰۰\$/m^3$ برآورد می‌شود، لیکن لازم است سایر هزینه‌ها شامل هزینه آبگیری از دریا و بازگشت پساب، پیش تصفیه و سایر تجهیزات جانبی آب شیرین‌کن 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 شیرین‌کن حرارتی علاوه بر خود آب شیرین‌کن، سیستم تولید بخار نیز مورد نیاز می‌باشد. تأسیسات آب شیرین‌کن 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 شیرین‌کن MED به ظرفیت $۷۰,۰۰۰m^3/day$ به شرح جدول ۲ خواهد بود.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-09-08]

جدول ۲. هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه آب شیرین‌کن MED به ظرفیت$۷۰,۰۰۰ m^3/day$

نوع هزینه سرمایه‌گذاری اولیه	مبانی محاسبات	هزینه کل ($۱۰^۶$$)	هزینه ویژه ($۱۰^{-۲}$$/m^3$)
هزینه زمین*	-	-	-
هزینه تأمین تجهیزات آبگیری برداشت آب دریا و تخلیه پساب به دریا	۵۰ $/m^3/d	۳/۵	۰/۹۱
هزینه تأمین تجهیزات پیش تصفیه آب دریا	۲۵۰$/m^3/d	۱۷/۵	۴/۵۷
هزینه تأمین تجهیزات واحدهای تقطیرMED	۱,۰۰۰ $/m^3/d	۷۰	۱۸/۲۶
هزینه تأمین تجهیزات جانبی تأمین توان حرارتی و آب شیرین‌کنMED	۵۰۰ $/$kW_{el}$	۱۷/۵	۶/۲۹
	۵۵,۰۰۰ $/$MW_{th}$	۶/۶	
هزینه ساختمانی احداث تأسیسات آبگیری و پیش تصفیه آب دریا**	۱۴۹ $/m^3/d	۲۱	۵/۴۸
هزینه ساختمانی احداث تأسیسات آب شیرین‌کن***	۱۰۰ $/m^3/d	۸	۱/۸۲
هزینه‌های طراحی و مهندسی****	۱۰۲ $/m^3/d	۷/۱۴	۱/۸۶
هزینه‌های پیش‌بینی نشده *****	۲۰۴ $/m^3/d	۱۴/۲۸	۳/۷۳
کل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه در عمر مفید تأسیسات	۱,۷۲۲ $/m^3/d	۱۶۴/۵۲	۴۲/۹۲

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

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

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

****هزینه‌های طراحی و مهندسی معادل۵٪ هزینه سرمایه‌گذاری تأسیسات آبگیری، پیش تصفیه و آب‌شیرین‌کن لحاظ شده است.

*****هزینه‌های پیش‌بینی نشده معادل ۱۰٪ هزینه سرمایه‌گذاری تأسیسات آبگیری، پیش تصفیه و آب‌شیرین‌کن لحاظ شده است.

مأخذ: نتایج تحقیق

با توجه به اینکه میانگین انرژی الکتریکی تحویلی به شبکه در یک دوره بهره‌برداری (حدود ۳۰۰ روز در سال) در قدرت نامی و تولید روزانه ۲۲۲۰۰ مگاوات ساعت و درآمد ناشی از هر کیلووات ساعت برق معادل ۶۵۰ ریال ارائه شده است، کارکرد تأسیسات برای ۳۰۰ روز در سال

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-09-08]

(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 جدول۳ اعلام می گردد.

جدول ۳. طراحی تأسیسات تأمین توان الکتریکی و حرارتی آب شیرین‌کن به ظرفیت $۷۰,۰۰۰ m^3/day$

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

مأخذ: نتایج تحقیق

بر این اساس و با لحاظ نمودن مفروضاتی شامل احداث آب شیرین کن در مجاورت تأسیسات نیروگاه اتمی، احداث آبگیر مستقل برای آب شیرین کن، برآورد هزینه‌های انرژی الکتریکی مورد نیاز تأسیسات آبگیری، 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 شیرین کن 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 شیرین کن 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 دوگزینه مذکور مطابق جدول (۴) می‌باشد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-09-08]

جدول ۴. هزینه‌های بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری آب شیرین‌کن MED به ظرفیت $۷۰,۰۰۰ m^3/day$

نوع هزینه بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری	مبانی محاسبات	هزینه ویژه ($۱۰^{-۲}$ $/m^3$)	هزینه سالیانه ($۱۰^۳$ $)
هزینه انرژی مصرفی در تأسیسات آبگیری و پیش‌تصفیه در بازه زمانی ۳۰۰ d/yr*	۰/۰۲ $/kWhel	۱۹/۴۳	۱,۰۰۸
هزینه انرژی مصرفی MED و توان از دست رفته MED در بازه زمانی ۳۰۰ d/yr*	۰/۰۲ $/kWhel		۳,۲۶۹
هزینه انرژی مصرفی در تأسیسات آبگیری و پیش‌تصفیه در بازه زمانی ۶۵ d/yr**	۰/۰۱ $/kWhel		۱۰۹
هزینه انرژی مصرفی الکتریکی و حرارتی MED در بازه زمانی ۶۵ d/yr**	۰/۰۱ $/kWhel		۱۰۳
	۰/۰۰۳ $/kWhth		۴۷۵
هزینه مواد شیمیایی مصرفی در پیش تصفیه‌خانه و آب شیرین‌کن***	S. C۰/۰۲۵ $/m3.	۲/۲۶	۵۷۸
هزینه تعویض لوله MED ****	۱۰ $/m3/d	۲/۷۴	۷۰۰
هزینه تعمیرات و نگهداری و لوازم یدکی و نیروی انسانی*****	۳۴/۴۴ $/m3/d	۱۲/۸۸	۳,۲۹۰
کل هزینه بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری سالیانه		۳۷/۳۱	۹,۵۳۲

*با توجه به اطلاعات ارائه شده توسط کارفرما در دوره بهره‌برداری از نیروگاه معادل ۳۰۰ روز کاری سالیانه و درآمد ناشی از فروش هر کیلووات ساعت برق معادل ۶۵۰ ریال محاسبه شده است.

**خارج از دوره بهره‌برداری نیروگاه معادل ۶۵ روز کاری در سال و تعرفه فروش برق برای تأسیسات شیرین‌سازی آب دریا در صنعت برق کشور هر کیلو وات ساعت برق معادل ۰/۰۱ $/kWhel محاسبه شده است.

***بر اساس تجربیات بهره‌برداری هزینه ویژه مواد شیمیایی مصرفی برای انواع آب شیرین‌کن درحدود ۰/۰۲۵ $/m3 است.

****بر اساس تجربیات بهره‌برداری هزینه تعویض ممبران آب شیرین‌کن اسمز معکوس ۵٪ سرمایه‌گذاری اولیه در سال و هزینه تعویض لوله‌های آب شیرین‌کن تبخیری چند مرحله‌ای ۱٪ سرمایه‌گذاری اولیه در سال می‌باشد.

*****بر اساس تجربیات بهره‌برداری معادل ۲٪ هزینه کل سرمایه‌گذاری اولیه تأسیسات آبگیری، پیش تصفیه و آب شیرین‌کن در سال می‌باشد.

مأخذ: نتایج تحقیق

در این بخش از تحقیق مدل تأمین مالی طرح احداث آب شیرین‌کن MED با ظرفیت ۷۰ هزار مترمکعب در شبانه روز، مشتمل بر هزینه سرمایه‌گذاری اولیه ۱۶۵ میلیون دلار (معادل ۵,۳۴۶/۹

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-09-08]

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 شیرین‌کن MED به ظرفیت ۷۰,۰۰۰m^3/day

شرح مفروضات	واحد	مقدار
طول دوره احداث	year	۱
هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه	۱۰۹Rials/Life Cycle	۵,۳۴۶/۹
طول دوره بهره‌برداری از تأسیسات	year	۱۵
تولید سالیانه آب شیرین طی دوره بهره‌برداری	۱۰۶m3/year	۲۵/۵۵
نرخ مالیات	٪	۲۵
هزینه‌های بهره‌برداری سالیانه	۱۰۹ Rials/year	۳۰۹/۷۹
عمر مفید تجهیزات و تأسیسات آب شیرین‌کن	year	۱۵
میزان سهم تسهیلات از کل سرمایه‌گذاری اولیه	٪	۸۰
نرخ بهره سالیانه تسهیلات دریافت شده	٪	۱۸
سال شروع بازپرداخت تسهیلات	year	۲
دوره بازپرداخت تسهیلات	year	۵
میزان سهم آورده سهامداران از کل هزینه‌های سرمایه گذاری اولیه	٪	۲۰
نرخ بهره مورد انتظار آورده سهامداران	٪	۳۰
نرخ تورم هزینه	٪	۱۸
نرخ تورم درآمد	٪	۱۸

مأخذ: نتایج تحقیق

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-09-08]

با توجه به آیین‌نامه 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 حاصل‌ضرب 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 به‌عنوان تابع هدف حاصل شود. این محاسبات از طریق مدل Goal Seek در نرم‌افزار Excel انجام شده است. برای تعیین قیمت براساس آیین‌نامه خرید تضمینی آب و پساب، قیمت فروش محصول پروژه در طول دوره قرارداد با ضریبAF (مطابق رابطه ۱) تعدیل می‌گردد:

$$AF = [\frac{CPI_1}{CPI_2}]^{\alpha}[\frac{R_1}{R_2}]^{1-\alpha} \quad (۱)$$

AF : ضریب تعدیل نرخ‌های مندرج در قراردادهای بلندمدت

CPI_1 : شاخص قیمت خرده فروش CPI درابتدای سال پرداخت

CPI_2 : شاخص قیمت خرده فروشیCPI در ابتدای سال عقد قرارداد

R_1 : متوسط نرخ تسعیر ارز (یورو) در یک ماهه قبل از موعد پرداخت

R_2 : متوسط نرخ تسعیر ارز (یورو) در یک ساله قبل از زمان عقد قرارداد

مقدار α در [۱- ۰/۵] و انتخاب مقدار آن بر عهده و انتخاب سرمایه‌گذار در زمان ارائه پیشنهاد قیمت است. در این گزارش ضریب α یک درنظر 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 درنظر گرفتن تورم برای رشد هزینه و درآمد و سناریوی تأمین مالی از طریق ۲۰٪ آورده سهامدارن و ۸۰٪ باقی‌مانده از طریق تسهیلات مطابق مفروضات لحاظ شده که قیمت هر مترمکعب آب برای بازده‌های مختلف سهامداران به شرح جدول ذیل حاصل می‌شود.

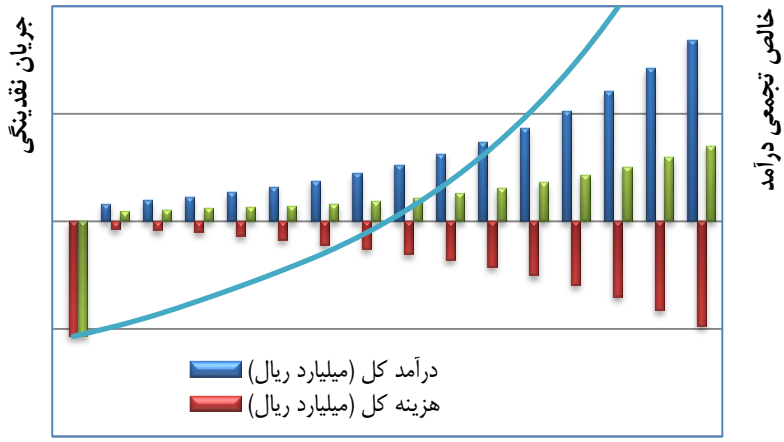
[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-09-08]

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

نرخ بازده مورد انتظارسهام‌داران	٪۲۴	٪۲۵	٪۲۶	٪۲۷	٪۲۸	٪۲۹	٪۳۰	٪۳۱	٪۳۲
قیمت هر مترمکعب آب تولیدی	۲۴,۹۰۰	۲۵,۷۴۹	۲۶,۶۲۱	۲۷,۵۱۶	۲۸,۴۳۲	۲۹,۳۶۸	۳۰,۳۷۵	۳۱,۳۹۱	۳۲,۴۲۸

مأخذ: نتایج تحقیق

بر اساس مدل تأمین مالی مذکور، نمودار جریان گردش نقدینگی آب شیرین‌کن 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 داری جذابیت کافی برای ترقیب کارفرمای دولتی یا سرمایه‌گذاری بخش خصوصی برای مشارکت در طرح حاضر را دارا می‌باشد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-09-08]

۵. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

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

۱. از نقطه نظر راندمان یکپارچه‌سازی آب شیرین‌کن 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 شیرین‌کن در مجاورت سیکل تولید توان منجر به کاهش تولید توان الکتریکی ناخالص واحد نیروگاهی به میزان $17/1MW_e$ (از $1062/4MW_e$ تا $1045/3MW_e$) می‌شود. قابل ذکر است که کاهش تولید توان الکتریکی خالص مجموعه به میزان $16MW_e$ (از $1000/7MW_e$ تا $984/7MW_e$) برآورد می‌گردد.

۳. مصرف داخلی توان الکتریکی و مصرف انرژی حرارتی در تأسیسات آب شیرین‌کنی به میزان $8/08MW_e$ و $105/37MW_{th}$ ارزیابی می‌گردد، لازم به ذکر است که مصرف و کاهش تولید انرژی الکتریکی خالص سیکل نیروگاهی به میزان $24/08MW_e$ و کاهش معادل ۲/۴٪ در سقف تولید توان واحد نیروگاهی می‌باشد.

۴. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه احداث آب شیرین‌کن به روش چندمرحله‌ای (MED) با ظرفیت $70,000m^3/day$ 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 شیرین‌کن 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 سالیانه)، در طول دوره احداث ۱ سال و دوره بهره‌برداری ۱۵ سال برآورد می‌شود.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-09-08]

۵. با درنظر گرفتن نرخ تورم برای رشد هزینه و درآمد طرح و تحلیل تأمین مالی طرح از طریق ۲۰٪ آورده سهامدارن و ۸۰٪ باقی‌مانده از طریق تسهیلات، بر اساس نرخ بازده داخلی ۳۰ ٪ مورد انتظار سرمایه‌گذار 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 شیرین‌کن 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 شیرین‌کن فوق‌الذکر صرفه‌جویی سالیانه مربوط به عدم مصرف حامل گاز طبیعی در حدود $۶۰,۰۰۰ m^3/year$ و عدم تولید گازهای گلخانه‌ای معادل ۱۲۰ تن خواهد شد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-09-08]

سپاسگزاری

از زحمات کلیه مدیران و کارشناسان شرکت مادرتخصصی 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.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-09-08]

منابع

فتاحی، رضا؛ صالحیان دهکردی، عبدالرضا؛ نجاتی، علی و سعید خیرالهی (آذر ۱۳۹۵)، "طراحی مدل بهینه انتگراسیون نیروگاه هسته‌ای دو مداره PWR با آب شیرین‌کن 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 شیرین‌کن 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

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-09-08]