Archive of SID

مجله علوم و فنون هسته‌ای، جلد ۱۰۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱

Journal of Nuclear Science and Technology
Vol. 102, No. 1, 2023

آنالیز فنی - اقتصادی کوپلینگ سیستم هیبرید نمک‌زدایی MED-TVC و RO و نیروگاه‌های VVER-۱۰۰۰

پویان نجفی، سعید طالبی*

دانشکده‌ی مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران)، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، تهران ـ ایران

*Email: sa.talebi@aut.ac.ir

مقاله‌ی فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۴/۱۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۶/۲۰

چکیده

در این مقاله ارزیابی فنی و اقتصادی کوپلینگ نیروگاه‌های VVER-۱۰۰۰ با یک سیستم هیبرید نمک‌زدایی تقطیر چند مرحله‌ای با تراکم حرارتی بخار و اُسمز- معکوس برای ظرفیت تولید ۱۰۰،۰۰۰ متر مکعب بر روز آب شیرین صورت گرفته است. برای این منظور از ابزارهای مدل‌سازی و محاسباتی DEEP و DE-TOP که توسط IAEA برای ارزیابی پروژه‌های نمک‌زدایی هسته‌ای توسعه یافته‌اند؛ استفاده شده است. برای ارتقاء راندمان سیستم اُسمز- معکوس، کاهش هزینه آب شیرین تولید شده و آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از پساب آب شور بازگشتی حاصل از فرایند تولید آب شیرین به دریا، از پساب خروجی سیستم MED-TVC به‌عنوان تغذیه سیستم اُسمز- معکوس در نظر گرفته شد. ارزیابی آرایش اتصال سیستم MED-TVC و مدار دوم نیروگاه‌های VVER-۱۰۰۰ در ابزار DE-TOP نشان می‌دهد که حالت بهینه استخراج انرژی حرارتی لازم، بخار با دبی جرمی ۱۲۱ کیلوگرم بر ثانیه و فشار ۱٫۱ مگاپاسکال به میزان ۹۰ مگاوات حرارتی است. برای رعایت الزامات ایمنی IAEA، یک مبدل حرارت میانی برای اطمینان از عدم نشت آلودگی رادیواکتیو به آب شیرین تولید شده در نظر گرفته شد. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که در حالت بهینه، راندمان کلی نیروگاه در حالت تولید هم‌زمان از ۳۳٪ به ۳۴٪ افزایش یافت. هم‌چنین با مفروضات اقتصادی هزینه تراز شده هر متر مکعب آب شیرین تولید شده را می‌توان ۱٫۰۶ دلار بر متر مکعب تخمین زد.

کلیدواژه‌ها: نمک‌زدایی هسته‌ای، DEEP، DE-TOP، ارزیابی فنی- اقتصادی

Techno-economic assessment of coupling Hybrid MED-TVC and RO Desalination System with VVER-1000 Power Plants

P. Najafi, S. Talebi*

Department of Energy Engineering and Physics, Amirkabir University of Technology, P.O.Box: 15875-4413, Tehran – Iran

Technical Paper

Received 9.7.2021, Accepted 11.9.2021

Abstract

This paper provides a techno-economic assessment of coupling VVER-1000 Power Plants and hybrid desalination processes, including MED-TVC and RO systems, with a total 100,000 m3/day freshwater capacity. DEEP and DE-TOP tools initially developed by IAEA for evaluating nuclear desalination projects are used here. To reduce the environmental effect of rejecting waste brine and increasing the efficiency of the RO system, in the proposed hybrid desalination system, the waste of MED-TVC is used as the feed water of the RO system. DE-TOP obtained the most efficient extraction steam point to supply MED-TVC system with 90MWth at the point with a pressure of 1.1 MPa and mass flux of 121 kg/s. An intermediate circuit is considered to ensure there will be no contamination into the produced water to comply with IAEA safety requirements. In this manner, the power plant's cogeneration efficiency reaches 33% to 34%. Furthermore, the financial results show freshwater's levelized cost is almost 1.06 $/m3.

Keywords: Nuclear desalination, DEEP, DE-TOP, Techno-economic assessment

www.SID.ir

Archive of SID

۱. مقدمه

بررسی شاخص‌های منابع آبی در ایران نشان‌دهنده ورود کشور به شرایط تنش آبی شدید است و در صورت عدم اتخاذ سیاست‌های مناسب و به‌هنگام، تشدید شرایط نامطلوب وضعیت آبی کشور دور از انتظار نیست. با توجه به وضع موجود، جستجو برای منابع جدید آب شیرین در کنار روش‌های مدیریت منابع و مصرف به‌عنوان یک‌راه حل بایستی مورد ارزیابی قرار گیرد. نمک‌زدایی از آب دریا یکی از منابع غیرمتعارف آب شیرین است. در کنار استفاده از منابع فسیلی و انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌کارگیری نیروگاه‌های هسته‌ای راه حل دیگری برای کاهش آثار زیست‌محیطی فرایند نمک‌زدایی می‌توانند باشند. فرایند شیرین‌سازی آب دریا با استفاده از ظرفیت نیروگاه‌های هسته‌ای، نمک‌زدایی هسته‌ای نامیده می‌شوند.

از نیروگاه‌های هسته‌ای بیش از پنج دهه است که برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌شود. اما در حالت تولید هم‌زمان[1] بخشی از توان حرارتی و الکتریکی تولیدی در نیروگاه‌های هسته‌ای به تأسیسات جانبی منتقل می‌گردد تا برای تولید محصول دیگری علاوه بر انرژی الکتریکی مورد استفاده قرار گیرد [۱].

در نمک‌زدایی هسته‌ای، به‌منظور تأمین انرژی مورد نیاز تأسیسات تولید آب شیرین، از انرژی حرارتی و الکتریکی رآکتورهای هسته‌ای استفاده خواهد شد [۲].

نخستین تأسیسات آب شیرین- کنی- هسته‌ای در دهه ۱۹۷۰ میلادی به‌صورت هم‌زمان در اتحاد جماهیر شوروی مورد بهره‌برداری قرار گرفت. رآکتور BN-۳۵۰ با توان نامی ۱۵۰ مگاوات الکتریکی از نوع رآکتورهای سریع زایا با[2] تنها رآکتوری بود که از همان مرحله طراحی مفهومی برای مقاصد تولید هم‌زمان برق و آب شیرین برای مصارف خانگی، صنعتی و جبران آب تغذیه[3] از دست رفته نیروگاه اختصاص یافته بود. ظرفیت تولید آب شیرین در نظر گرفته شده با استفاده از تکنولوژی نمک‌زدایی حرارتی MED[4] به میزان ۱۲۰،۰۰۰ متر کعب بر روز بود. در جدول ۱ خلاصه‌ای از وضعیت پروژه‌های نمک‌زدایی هسته‌ای در جهان ارایه شده است [۳]. در پژوهش پیش‌رو، در ابتدا تکنیک‌های مختلف شیرین‌سازی آب دریا در مقیاس صنعتی معرفی خواهند شد و سپس نحوه کوپلینگ سیستم‌های هیبرید نمک‌زدایی[5] به نیروگاه‌های هسته‌ای بررسی می‌شود.

جدول ۱. خلاصه‌ای از وضعیت پروژه‌های نمک‌زدایی هسته‌ای در جهان [۳]

نوع رآکتور	کشور	ظرفیت تولید توان الکتریکی (مگاوات)	ظرفیت تولید آب شیرین (متر مکعب بر روز)	وضعیت بهره‌برداری
LMFBR	قزاقستان	۱۵۰	۱۲۰،۰۰۰	تا سال ۱۹۹۹ مورد بهره‌برداری قرار گرفت
PWR	ژاپن	۵۶۶ - ۸۹۰	۲،۰۰۰-۱،۰۰۰	در حال بهره‌برداری
		۱،۱۷۵	۴،۰۰۰	
		۱،۱۷۵	۱،۰۰۰	
		۸۷۰	۱،۰۰۰	
	روسیه	۱،۰۰۰	۱۰،۰۰۰	
	آمریکا	۲×۱،۱۰۰	۲،۱۸۰	
BWR	ژاپن	۱،۱۰۰	۱،۰۰۰	تلاش‌ها در این زمینه بعد از ۱۹۸۰ متوقف شد
PHWR	هند	۴۰ (تماماً حرارتی)	۳۰	در حال بهره‌برداری
		۱۷۰	۶،۳۰۰	
	پاکستان	۱۲۵	۲،۰۰۰	
	کانادا	۶۱۰	۲۴۰،۰۰۰	تحت بررسی و طراحی
HTGR	آفریقای جنوبی	-	۱۶۰،۰۰۰	تحت بررسی و طراحی

سیستم‌های هیبرید نمک‌زدایی، متشکل از ترکیب یک سیستم نمک‌زدایی حرارتی و اُسمز- معکوس[6] هستند که تمام انرژی مورد نیاز خود را از یک منبع تأمین می‌کنند. در ادامه، با استفاده از ابزارهای محاسباتی DEEP و DE-TOP آرایش پیشنهادی کوپلینگ تأسیسات هیبرید شیرین‌سازی آب دریا و نیروگاه‌های VVER-۱۰۰۰ از منظر فنی و اقتصادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سیستم هیبرید پیشنهادی در این مقاله شامل یک سیستم MED-TVC و اُسمز- معکوس با ظرفیت ۱۰۰،۰۰۰ متر مکعب بر روز و درجه هیبریدازیسیون ٪۷۰ (نسبت ظرفیت سیستم حرارتی به کل ظرفیت کل) است که با رویکرد کاهش آلودگی پساب آب شور بازگشتی به دریا طراحی شده است. در این سیستم آب تغذیه سیستم اُسمز- معکوس از پساب سیستم MD-TVC تأمین می‌شود. در بخش نتایج با استفاده از هزینه تراز شده[7] تخمینی انرژی نیروگاه هسته‌ای VVER-۱۰۰۰ و ابزار DEEP، میزان انرژی حرارتی و الکتریکی مصرفی و درنهایت هزینه تراز شده تولید یک متر مکعب آب شیرین برای سیستم هیبرید پیشنهادی ارایه می‌شود. سپس نقاط بهینه استخراج بخار و برگشت آن (بالاترین راندمان تولید هم‌زمان) در ابزار DE-TOP برای مدل‌سازی کوپلینگ سیستم نمک‌زدایی حرارتی و سیکل بخار نیروگاه‌های VVER-۱۰۰۰ بررسی می‌شود. این نقطه به روش تکرار و سعی خطا در ابزار DE-TOP مشخص می‌شود.

1. Co-Generation
2. Fast Metal Breeder Reactor (FMBR)
3. Feedwater
4. Multi Effect Distillation (MED)
5. Hybrid Desalination Systems
6. Reverse-Osmosis (RO)
7. Levelized Cost

www.SID.ir

Archive of SID

۲. تکنولوژی‌های نمک‌زدایی و تولید آب شیرین

به‌طور کلی در حال حاضر دو فرایند عمده نمک‌زدایی و تولید آب شیرین در مقیاس صنعتی وجود دارد؛ نمک‌زدایی به روش حرارتی[۱] و فرایند غشایی[۲].

در تکنیک‌های حرارتی (تبخیری و تقطیری) که معمول‌ترین روش‌های نمک‌زدایی برای تولید آب شیرین در سراسر جهان هستند [۴] از منابع توان حرارتی برای تغییر فاز آب‌شور به بخار و سپس تقطیر آن، برای جدا کردن جز آب از مخلوط نمکی استفاده می‌شود. این منابع حرارتی می‌تواند بویلرهایی با منابع سوخت فسیلی، حرارت بازیافت شده در نیروگاه‌های تولید الکتریسیته، انرژی‌های تجدیدپذیر (مثل انرژی خورشیدی، انرژی زمین‌گرمایی) و یا حرارت استخراج شده به شکل بخار از سیکل دوم نیروگاه‌های هسته‌ای باشد. در روش اُسمز- معکوس که از شناخته‌شده‌ترین تکنیک‌های فرایند غشایی است، تنها با استفاده از توان الکتریکی در پمپ‌های فشار بالا، یک گرادیان فشار زیاد در غشاهای نیمه‌تراوا[۳] به‌منظور جدا کردن بخشی از نمک محلول در آب دریا ایجاد می‌شود.

البته روش‌های مختلف شیمیایی هم‌چون، جداسازی مایع- مایع، تبادل یونی و . . . وجود دارند که از لحاظ اقتصادی برای تولید حجم زیادی از آب شیرین در مقیاس صنعتی توجیه‌پذیر نیستند [۵].

تقطیر چند مرحله‌ای با تراکم حرارتی بخار (MED-TVC)[۴] از شناخته شده‌ترین تکنیک‌های حرارتی نمک‌زدایی است. این سیستم‌ها معمولاً از ۲ تا ۱۶ مرحله (اواپراتور[۵]) تشکیل می‌شوند. فشار در هر مرحله نسبت به مرحله قبلی کم‌تر است تا دمای جوشش آب پایین‌تر باشد. دمای عملیاتی این فرایند حدود ۷۰ درجه سانتی‌گراد است و معمولاً ظرفیتی بین ۶۰۰ تا ۳۰،۰۰۰ متر مکعب بر روز آب شیرین را دارد [۶].

در این سیستم‌ها، بخشی از آب شور تغذیه در هر مرحله با دریافت گرمای حاصل از چگالش بخار مرحله قبل، تبخیر شده و سپس به وسیله تقطیر جمع‌آوری می‌شود. در اولین مرحله، بخار متراکم شده وارد سیستم تقطیر چند مرحله‌ای می‌شود. بخار تولید شده از تبخیر آب شور در این مرحله، در مراحل بعدی استفاده می‌شود که این مراحل با اندکی فشار پایین‌تر و دمای کم‌تر همراه هستند. در این سیستم‌ها می‌توان با ایجاد خلأ به‌وسیله استفاده از کمپرسور حرارتی راندمان آن را افزایش داد.

فرایند غشایی به شیوه‌های فیزیکی برای جداسازی حلال از نمک‌های محلول در آن با استفاده از غشاهای سلولی نیمه‌تراوا[۶] اشاره دارد. اگر بین دو محلول با غلظت متفاوت (مانند آب شور و آب خالص)، یک غشای نیمه‌تراوا قرار گیرد، به طور طبیعی محلول از میان غشای نیمه‌تراوا از سمت رقیق به سمت محلول غلیظ جریان می‌یابد تا زمانی که غلظت در دو سمت غشا برابر شود. این فرایند، فرایند اُسمز نام دارد [۷]. اُسمز- معکوس یک فیلتراسیون فشار بالا است. در این روش غشاهای نیمه‌تراوا تنها به آب بدون املاح اجازه عبور می‌دهند و املاح نمکی نمی‌توانند از آن عبور کنند. در جدول ۲ ویژگی‌های مختلفِ تکنیک‌های شیرین‌سازی آب دریا در مقیاس صنعتی ارایه شده است.

۳. سیستم‌های هیبرید آب شیرین‌کنی

سیستم‌های هیبرید آب شیرین‌کنی متشکل از ترکیب یک سیستم نمک‌زدایی حرارتی در کنار سیستم اُسمز- معکوس هستند که با استفاده از مزیت‌های نسبی یک‌دیگر می‌توانند به‌عنوان یک راه‌حل عملیاتی برای افزایش راندمان در نظر گرفته شوند [۸]. این سیستم‌ها یا به‌صورت مجزا از هم طراحی می‌شوند و یا عملکرد هر کدام بر دیگری تأثیرگذار خواهند بود که اصطلاح دارای کوپلینگ هستند. به طور مثال می‌توان جهت کاهش آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از بازگرداندن پساب آب شور سیستم MED-TVC که دارای غلظت نمک بالایی است؛ آن را به ورودی سیستم اُسمز- معکوس متصل کرد.

جدول ۲. مقایسه تکنولوژی‌های مختلف نمک‌زدایی با یک‌دیگر [۲]

	RO	MSF[۷]	MED+TVC
حداکثر ظرفیت واحد تولیدی (متر مکعب بر روز)	۳۰،۰۰۰	۵۰،۰۰۰	-
غلظت نمک محلول در آب خروجی (ppm)	۵۰۰-۲۵۰	۲۰-۱۰	۲۰-۱۰
مقدار انرژی الکتریکی مخصوص مصرفی (کیلووات ساعت بر متر مکعب)	۶-۴	۲-۱	۷٫۵- ۸٫۵
مقدار انرژی حرارتی مصرفی مخصوص (کیلووات ساعت بر متر مکعب)	۰	۱۰۰	۵۰
عامل محدودکننده بهره‌برداری	پمپ‌ها	پمپ‌ها	سیستم تراکم حرارتی بخار
اهمت عملیات پیش‌تصفیه	ضروری	متوسط	کم
نیاز به سرمایه‌گذاری	کم	زیاد	متوسط
ضرورت تعمیر و نگه‌داری	زیاد	کم	متوسط

1. Thermal Distillation
2. Membrane
3. Membrane
4. Multi Effect Distillation-Thermal Vapor Compression (MED-TVC)
5. Evaporator
6. Membrane
7. Multi Stage Flash (MSF)

www.SID.ir

Archive of SID

همچنین، با توجه به اساس کار سیستم اُسمز- معکوس که دمای آب تغذیه بر راندمان کلی این سیستم تأثیر می‌گذارد؛ در آرایش سیستم هیبرید پیشنهادی، استفاده از پساب خروجی سیستم MED-TVC که دارای دمایی بالاتر از آب دریا به‌عنوان آب تغذیه است برای ورودی سیستم اُسمز- معکوس است باعث افزایش راندمان کلی سیستم نیز می‌شود. در رابطه (۱) اثر دمای آب تغذیه ورودی بر پارامتر نسبت بازیابی[1] سیستم اُسمز- معکوس نشان داده شده است.

$$Rr = ۱ - \frac{۰/۰۰۱۵}{P_{\max}} \times X_{\text{discharge}}^{MED-TVC} \times \left(\frac{\mu(T)}{\mu\left(T_{\text{discharge}}^{MED-TVC\,en}\right)} \right) \qquad (۱)$$

در این رابطه، P_{max} بیشینه فشار هیدرواستاتیکی سیستم اُسمز- معکوس برحسب بار، $X_{\text{discharge}}^{MED-TVC}$ غلظت نمک پساب خروجی سیستم *MED-TVC* برحسب ppm است که به‌عنوان آب تغذیه سیستم اُسمز- معکوس در نظر گرفته شده است. همچنین μ ویسکوزیته دینامیکی آب شور در دمای T است. بر اساس خواص فیزیکی آب شور، افزایش دمای آب تغذیه منجر به افزایش پارامتر Rr و راندمان کلی سیستم اُسمز- معکوس می‌شود.

در شکل ۱ شماتیکی از آرایش کوپلینگ سیستم هیبرید پیشنهادی و نیروگاه VVER-۱۰۰۰ نشان داده شده است. در این شکل، جریان شماره ۱ آب شور تغذیه ورودی به تأسیسات MED-TVC است. جریان شماره ۲ پساب خروجی سیستم MED-TVC و همان جریان آب تغذیه سیستم اُسمز- معکوس است. جریان شماره ۳ و ۴ به ترتیب آب شیرین خروجی سیستم MED-TVC و اُسمز- معکوس است. در نهایت، جریان شماره ۵ مخلوط آب شیرین تولید شده توسط سیستم هیبرید است.

۱.۳ تحلیل فنی و اقتصادی سیستم‌های هیبرید آب شیرین‌کنی هسته‌ای با استفاده از ابزار محاسباتی DEEP

ابزار محاسباتی DEEP[2] توسط IAEA به منظور ارزیابی قیمت تمام شده آب شیرین تولید شده در نیروگاه‌های تولید هم‌زمان توسعه داده شده است؛ توانایی ارایه گزارش کاملی از جزییات فنی و اقتصادی هزینه تراز شده (دلار بر کیلووات ساعت) انرژی الکتریکی و حرارتی تولید شده در نیروگاه‌های سیکل بخار با منابع فسیلی و هسته‌ای را دارا است. این ابزار توانایی مدل‌سازی سیستم‌های حرارتی تولید آب شیرین از قبیل MED-TVC و MSF و سیستم غشایی اُسمز- معکوس و همچنین سیستم‌های هیبریدی تولید آب شیرین را دارا است [۹].

با این وجود ابزار DEEP توانایی مدل‌سازی سیستم‌های هیبریدی پیچیده‌تر با کوپلینگ داخلی مثل شکل ۱ را ندارد. بنابراین نیاز است تا تغییراتی در ساختار برنامه اصلی صورت گیرد تا این ابزار را مناسب مدل‌سازی سیستم هیبریدی پیشنهادی در این پژوهش بکند. تغییرات اعمال شده شامل در نظر گرفتن دبی، غلظت نمک و دمای جریان پساب خروجی سیستم MED-TVC برابر با مشخصات ترمودینامیکی و ترموفیزیکی آب شور تغذیه سیستم اُسمز- معکوس است. این کار، ابزار DEEP را قادر می‌سازد تا برای تحلیل و ارزیابی سیستم‌های هیبرید نمک‌زدایی پیچیده‌تر مورد استفاده قرار گیرد.

در رابطه (۲) دبی پساب خروجی سیستم MED-TVC و در رابطه (۳) غلظت نمک محلول در پساب خروجی بر حسب غلظت نمک آب شور تغذیه (آب دریا) سیستم MED-TVC و در انتها در رابطه (۵) دمای دبی پساب خروجی سیستم MED-TVC ارایه شده است که همگی به‌عنوان مشخصات جریان تغذیه سیستم اُسمز- معکوس در نظر گرفته می‌شوند.

$$W_{\text{discharge}}^{MED-TVC}(kg/s) = W_{\text{feedwater}}^{RO}(kg/s) = \frac{Wdr_{MED-TVC}}{CF - ۱} \qquad (۲)$$

در این رابطه، CF ضریب غلظت و برابر با ۲ است. همچنین $Wdr_{MED-TVC}$ ظرفیت تولید آب شیرین سیستم MED-TVC برحسب کیلوگرم بر ثانیه است و از نسبت هیبریدیزاسیون ۷۰٪ برابر با ۷۰،۰۰۰ متر مکعب بر روز تعیین می‌شود.

$$X_{\text{discharge}}^{MED-TVC}(ppm) = X_{\text{feedwater}}^{RO}(ppm) = \frac{X_{sw} \cdot W_{in-take}^{MED-TVC} - X_{P}^{MED-TVC} \cdot Wdr_{MED-TVC}}{W_{\text{discharge}}^{MED-TVC}} \qquad (۳)$$

در رابطه فوق، X_{sw} و $X_P^{MED-TVC}$ به ترتیب غلظت نمک محلول در آب شور تغذیه (آب دریا) و آب شیرین تولیدی (۲۵ ppm) است. همچنین، $W_{in-take}^{MED-TVC}$ دبی ورودی آب دریا و از رابطه (۴) به دست می‌آید.

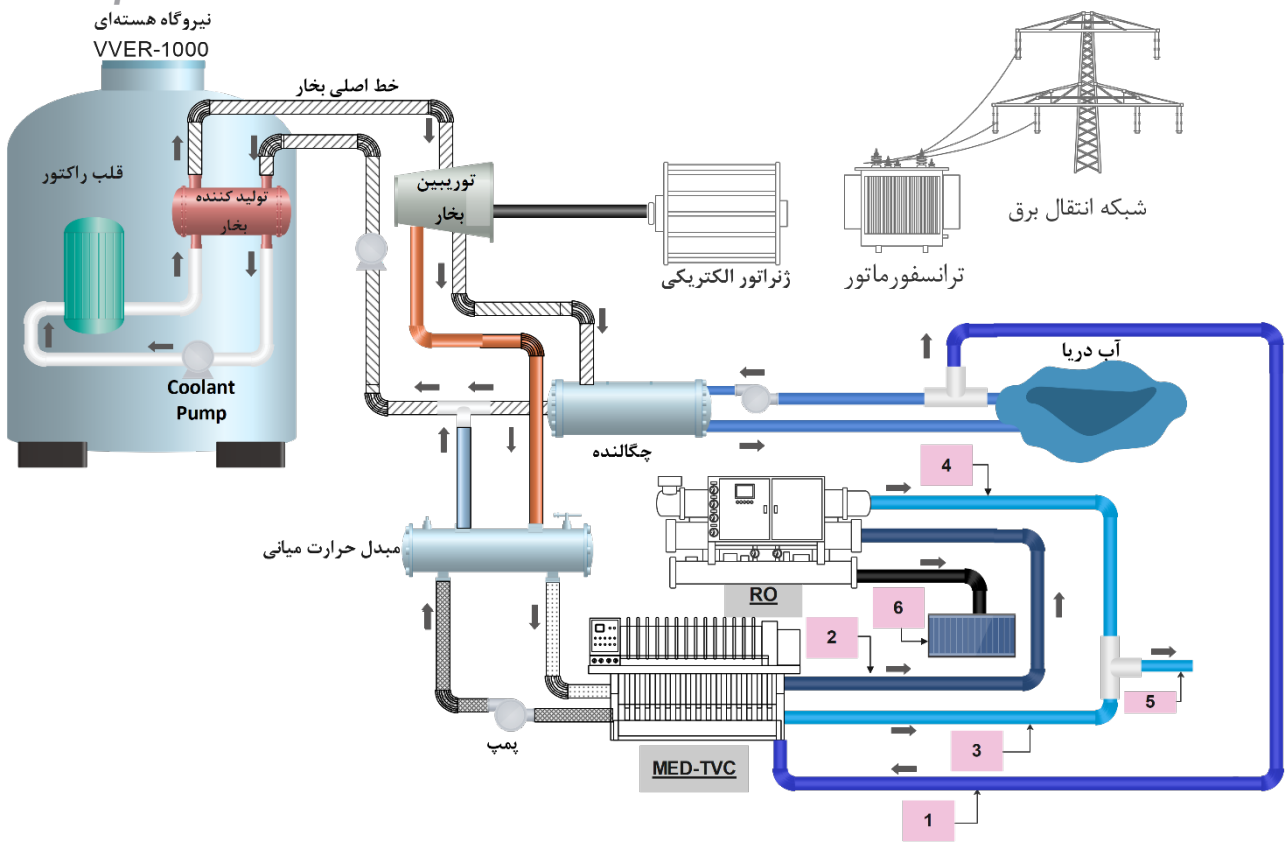
$$W_{in-take}^{MED-TVC}(kg/s) = \frac{CF}{CF - ۱} \cdot Wdr_{MED-TVC} \qquad (۴)$$

$$T_{\text{discharge}}^{MED-TVC}(^{\circ}\text{C}) = T_{\text{feedwater}}^{RO}(^{\circ}\text{C}) = T_{sea\ water} + \Delta T_{dcr} \qquad (۵)$$

1. Recovery Ratio (Rr)
2. Desalination Economic Evaluation Program (DEEP)

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱. شماتیک کوپلینگ سیستم هیبرید آب شیرین‌کنی و نیروگاه هسته‌ای.

در رابطه (۵)، $T_{sea\ water}$ دمای آب شور تغذیه (آب دریا) و ΔT_{dcr} تغییرات دمای کندانسور در سیستم MED-TVC است.

روش DEEP در تحلیل اقتصادی سیستم‌های آب شیرین‌کنی هسته‌ای، مبتنی بر هزینه تراز شده است. این روش مبتنی بر محاسبه ارزش فعلی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری تولید انرژی در کل دوره عمر پروژه است که هزینه تولید یک از تقسیم ارزش فعلی کل هزینه‌های انجام شده برای تولید برق (آب شیرین) به یک کیلووات ساعت انرژی تحویلی (یک متر مکعب آب شیرین) در طول عمر تأسیسات به‌دست می‌آید. در رابطه (۶) معادله اصلی هزینه تراز شده انرژی الکتریکی (LOCE) و در رابطه (۷) هزینه تراز شده آب شیرین تولیدی (LCOW) توصیف شده است.

$$LCOE\left(\$/kWh\right)=\frac{\sum_{t=1}^{n}\left(I_t+O\&M_t+F_t+C_t\right)}{\sum_{t=1}^{n}Elec_t} \quad (۶)$$

$$LCOW\left(\$/m^3\right)=\frac{\sum_{t=1}^{m}\left(I_t+O\&M_t+E_t\right)}{\sum_{t=1}^{m}W_t} \quad (۷)$$

در این روابط؛ I_t ارزش فعلی هزینه سرمایه‌گذاری برحسب دلار در سال t، $O\&M_t$ ارزش فعلی هزینه‌های مرتبط با تعمیر و نگه‌داری برحسب دلار در سال t، F_t ارزش فعلی هزینه‌های مرتبط با سوخت برحسب دلار در سال t، C_t ارزش فعلی هزینه‌های پیش‌بینی نشده برحسب دلار در سال t، E_t ارزش فعلی هزینه انرژی مصرفی سیستم آب شیرین‌کنی برحسب دلار در سال t، n و m به ترتیب عمر اقتصادی نیروگاه و تأسیسات آب شیرین‌کنی است. هم‌چنین، $Elec_t$ برق تولیدی سالیانه در سال t، بر حسب کیلووات ساعت و W_t آب شیرین تولیدی سالیانه در سال t، برحسب متر مکعب است.

در تأسیسات نمک‌زدایی هسته‌ای، نرخ انرژی الکتریکی مصرفی برابر با هزینه تراز شده انرژی تولیدی نیروگاه هسته‌ای است و نرخ انرژی حرارتی مصرفی معادل با هزینه تراز شده انرژی الکتریکی قابل استحصال از توان حرارت مصرفی در تأسیسات نمک‌زدایی در نظر گرفته می‌شود.

برای ارایه یک تحلیل اقتصادی یکپارچه از آب شیرین‌کنی هسته‌ای نیاز است تا اطلاعات کامل مربوط به هزینه‌های ثابت و متغیر سرمایه‌گذاری، هزینه‌های مرتبط با بهره‌برداری و تعمیرات دوره‌ای نیروگاه و تأسیسات آب شیرین‌کنی، سوخت مصرفی و

www.SID.ir

Archive of SID

هزینه‌های پیش‌بینی نشده مرتبط با سرمایه‌گذاری در دسترس باشد. با توجه به این موضوع که داده‌های محدودی در زمینه ارزیابی اقتصادی نیروگاه‌های VVER-۱۰۰۰ وجود دارد؛ نیاز است از نتایج پژوهش‌های مشابه برای تخمین LOCE انرژی تولیدی این نیروگاه استفاده کرد. Xoubi در سال ۲۰۱۹ LOCE را برای VVER-۱۰۰۰ را در کشورهای در حال توسعه اردن (۰٫۰۲۷) دلار بر کیلووات ساعت تخمین زد [۱۰].

آژانس انرژی هسته‌ای اروپا این رقم را ۰٫۰۵۷ دلار بر کیلووات ساعت در کشور روسیه تخمین زده است [۱۱]. در قسمت اول جدول ۳، مشخصات طراحی و بهره‌برداری از سیستم هیبریدی پیشنهادی که برای مدل‌سازی در ابزار DEEP ضروری است ارایه شده است. در قسمت دوم این جدول، پارامترهای مهم اقتصادی سیستم هیبرید آب شیرین‌کنی ارایه شده است. هم‌چنین، برای اطمینان از عدم انتشار آلودگی رادیواکتیو احتمالی موجود در مدار اولیه به آب شیرین تولیدی از یک مبدل حرارت میانی استفاده می‌شود.

جدول ۳. مشخصات فنی و اقتصادی سیستم هیبرید آب شیرین‌کنی در سناریو پیشنهادی

پارامتر	مقدار
ظرفیت تولید آب شیرین (متر مکعب بر روز)	۱۰۰،۰۰۰
درصد هیبریدازیسون	٪۷۰
غلظت نمک آب دریا (ppm)	۴۵۰۰۰
دمای آب دریا (درجه سانتی‌گراد)	۳۸
دوره کاری تأسیسات (سال)	۲۰
فاکتور در دسترس‌پذیر بودن	٪۹۰
مشخصات فنی و اقتصادی سیستم MED-TVC	
حداکثر دمای آب شور (درجه سانتی‌گراد)	۷۰
میزان غلظت نمک آب شیرین خروجی (جریان ۳) (ppm)	۲۵
تعداد مراحل	۸
هزینه مخصوص سرمایه‌گذاری (دلار بر متر مکعب بر روز)	۹۰۰
هزینه مخصوص تعمیر و نگه‌داری (دلار بر متر مکعب بر روز)	۰٫۰۸
مشخصات فنی و اقتصادی سیستم اُسمز- معکوس	
حداکثر فشار پمپ‌ها در سیستم (مگاپاسکال)	۶٫۹
حداکثر افت فشار (مگاپاسکال)	۰٫۲
میزان غلظت نمک آب شیرین خروجی (جریان ۴) (ppm)	۲۵ ppm
هزینه مخصوص سرمایه‌گذاری (دلار بر متر مکعب بر روز)	۹۰۰
هزینه مخصوص تعمیر و نگه‌داری (دلار بر متر مکعب بر روز)	۰٫۱۵

۲.۳ امکان‌سنجی فنی کوپلینگ MED-TVC و نیروگاه‌های هسته‌ای با استفاده از ابزار محاسباتی DE-TOP

بر اساس شماتیک شکل ۱، امکان‌سنجی کوپلینگ سیستم آب شیرین‌کن‌های حرارتی و نیروگاه‌های هسته‌ای سیکل رانکین بخار نیاز به مدل‌سازی سیکل ترمودینامیکی این دو سیستم دارد. برای این منظور از ابزار محاسباتی DE-TOP[1] که توسط IAEA توسعه یافته است؛ استفاده می‌گردد. این ابزار جهت مدل‌سازی کاربردهای غیرالکتریک تولید هم‌زمان نیروگاه‌های هسته‌ای از قبیل آب شیرین‌کنی حرارتی و گرمایش ناحیه‌ای توسعه یافته است و توانایی محاسبه جریان جرم و انرژی در نقاط کلیدی نیروگاه (ورودی و خروجی هر المان)، تخمین میزان توان حرارتی مورد نیاز برای ظرفیت مشخص تولید آب شیرین، ارزیابی راندمان کلی نیروگاه تولید هم‌زمان برای استخراج بخار از نقاط مختلف زیرکش توربین‌های کندانسوری و یا پس‌فشاری[2] و بازگرداندن آن اشاره کرد. در جدول ۴ مشخصات طراحی و بالانس جریان‌های جرمی و انرژی مدار اول و سیکل بخار نیروگاه‌های VVER-۱۰۰۰ ارایه شده است.

۴. نتایج

در شکل ۲ نمایی از خروجی مدل‌سازی DE-TOP در بررسی اتصال سیستم MED-TVC به ظرفیت ۷۰،۰۰۰ متر مکعب بر روز و آب شور ورودی با سختی ۴۵،۰۰۰ppm و دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد به زیرساخت‌های نیروگاه VVER-۱۰۰۰ جهت استفاده حداکثری از بخار برداشت شده و کاهش حداقلی در راندمان انرژتیک سیکل نیروگاه نشان داده شده است. بر اساس مدل حاضر، جهت تأمین انرژی حرارتی سیستم آب شیرین‌کن از طریق یک مبدل حرارتی میانی، نقطه بهینه استخراج بخار از زیرکش مبدل حرارتی بازگرمایش شماره ۲ با فشار ۱٫۱ مگاپاسکال و دمای ۱۸۵ درجه سانتی‌گراد و دبی جرمی ۱۲۱ کیلوگرم بر ثانیه به میزان ۹۰ مگاوات حرارتی و نقطه بازگشت آن بالادست مبدل حرارتی بازگرمایش شماره ۵ با فشار ۰٫۱ مگاپاسکال و دمای ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد است. در این حالت خروجی نیروگاه ۹۸۹ مگاوات الکتریکی خواهد بود راندمان نیروگاه به مقدار ٪۳۴ در حالت تولید هم‌زمان می‌رسد. کوپلینگ تأسیسات نمک‌زدایی حرارتی باعث کاهش ۲۵٫۸ مگاوات

1. Desalination Thermodynamic Optimization Program (DE-TOP)
2. Back Pressure

www.SID.ir

Archive of SID

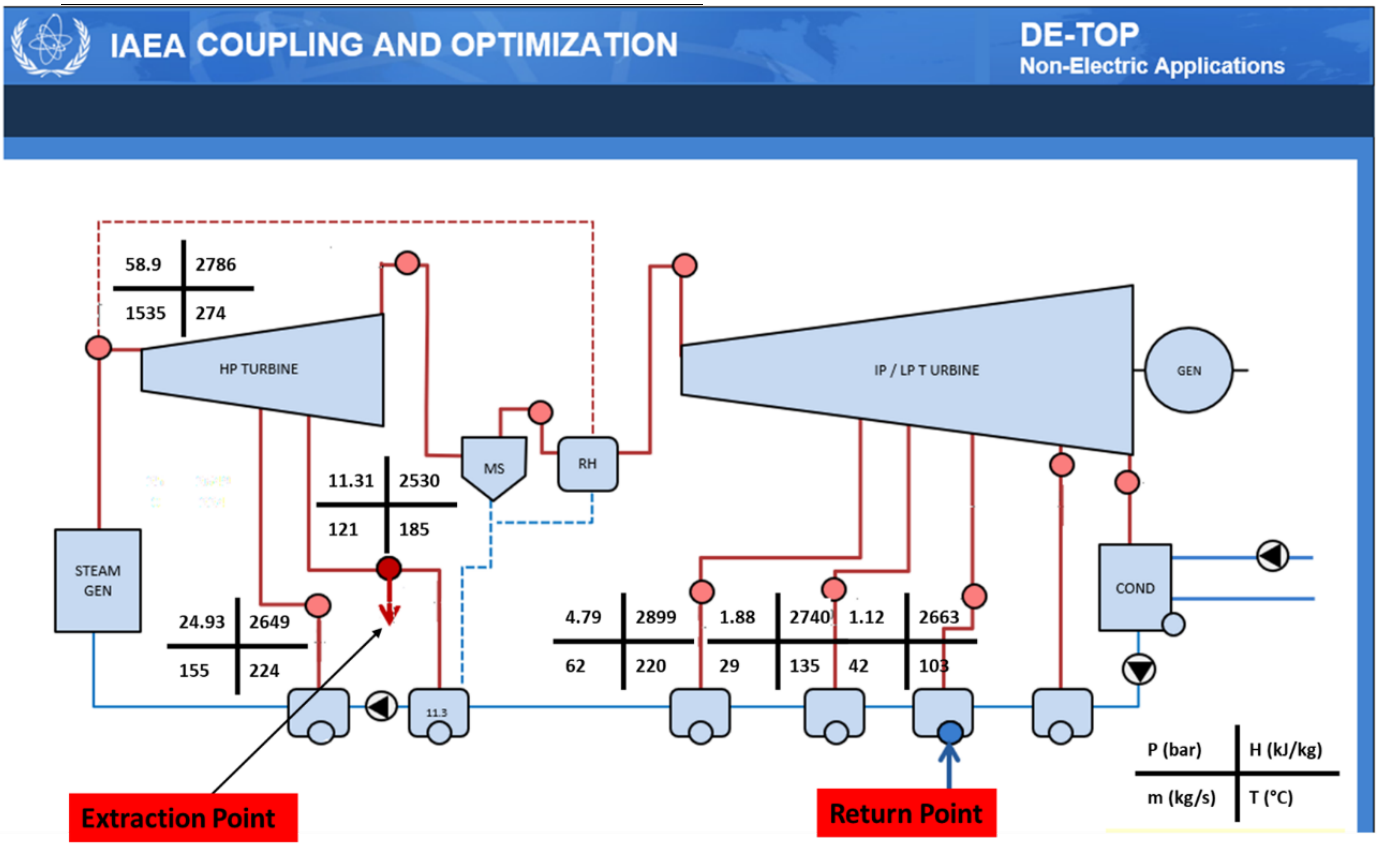
الکتریکی توان خروجی نیروگاه خواهد شد. در ادامه و در بخش اول جدول ۵ نتایج مربوط به ارزیابی فنی و اقتصادی سیستم هیبرید ساده (بدون کوپلینگ) MED-TVC و اُسمز- معکوس ارایه شده است و در بخش دوم جدول نتایج مربوط به ارزیابی فنی و اقتصادی سیستم هیبرید پیشنهادی در این پژوهش ارایه شده است.

جدول ۴. پارامترهای طراحی و بهره‌برداری سیکل بخار VER-۱۰۰۰ [۱۲]

پارامتر	مقدار
فشار طراحی و بهره‌برداری بخار در خروجی تولیدکننده بخار (مگاپاسکال)	۶۲/۷ – ۰/۷۴
دمای طراحی و بهره‌برداری بخار در خروجی تولیدکننده بخار (درجه سانتی‌گراد)	۲۸۷/۵ – ۲۹۴
دما و فشار ورودی به توربین فشار بالا	۲۷۴/۳ درجه سانتی‌گراد - ۵/۸ مگاپاسکال
دبی جرمی بخار از توربین فشار بالا (تُن بر ساعت)	۵۹۸۰
دما و فشار ورودی به توربین فشار پایین	۲۴۰ درجه سانتی‌گراد – ۷۲ مگاپاسکال
نرخ توان الکتریکی تولیدی (مگاوات الکتریکی)	۱۰۱۴

جدول ۵. نتایج ارزیابی فنی- اقتصادی سیستم آب شیرین‌کنی هیبریدی با استفاده از ابزار DEEP

سیستم هیبریدی ساده			
MED-TVC		اُسمز- معکوس	
دمای آب تغذیه (درجه سانتی‌گراد)	۲۸	دمای آب تغذیه (درجه سانتی‌گراد)	۲۸
توان حرارتی مصرفی (مگاوات حرارتی)	۹۰	توان الکتریکی مصرفی (مگاوات الکتریکی)	۴/۷
دبی آب شیرین تولید شده (کیلوگرم بر ثانیه)	۸۱۰	دبی آب شیرین تولید شده (کیلوگرم بر ثانیه)	۳۴۷/۲
دبی پساب بازگشتی (مگاوات حرارتی)	۸۱۰	دبی پساب بازگشتی (کیلوگرم بر ثانیه)	۱۰۴۱
غلظت نمک پساب خروجی (ppm)	۹۰،۰۰۰	غلظت نمک پساب خروجی (ppm)	۶۰،۰۰۰
هزینه تراز شده آب شیرین تولید شده: ۱/۰۷ (دلار بر متر مکعب)			
سیستم هیبریدی پیشنهادی			
MED-TVC		اُسمز- معکوس	
دمای آب تغذیه (درجه سانتی‌گراد)	۲۸	دمای آب تغذیه (درجه سانتی‌گراد)	۳۸
توان حرارتی مصرفی (مگاوات حرارتی)	۹۰	توان الکتریکی مصرفی (مگاوات الکتریکی)	۳/۶
دبی آب شیرین تولید شده (کیلوگرم بر ثانیه)	۸۱۰	دبی آب شیرین تولید شده (کیلوگرم بر ثانیه)	۳۴۷/۲
دبی پساب بازگشتی (مگاوات حرارتی)	۸۱۰	دبی پساب بازگشتی (کیلوگرم بر ثانیه)	۴۶۳
غلظت نمک پساب خروجی (ppm)	۹۰،۰۰۰	غلظت نمک پساب خروجی (ppm)	۱۳۸،۰۰۰
هزینه تراز شده آب شیرین تولید شده: ۱/۰۶۲ (دلار بر متر مکعب)			



شکل ۲. مدل‌سازی مدار بخار نیروگاه‌های VVER-۱۰۰۰ برای تعیین نقاط بهینه استخراج بخار توسط ابزار DE-TOP.

www.SID.ir

Archive of SID

بر اساس ارزیابی‌های صورت گرفته ظرفیت سالانه آب شیرین سیستم MED-TVC ۲۰،۶۹۵،۵۰۰ متر مکعب و سیستم اُسمز- معکوس ۹،۸۹۵،۰۰۰ متر مکعب و ظرفیت سیستم هیبرید در مجموع ۳۰،۵۵۰،۵۰۰ متر مکعب در سال است. اشاره شد که افزایش دمای آب تغذیه سیستم اُسمز- معکوس باعث بهبود راندمان می‌شود. در جدول ۵ مشاهده می‌شود که در سیستم هیبریدی پیشنهادی، افزایش دمای آب تغذیه باعث کاهش انرژی الکتریکی مصرفی می‌شود. همین امر باعث کاهش جزیی در هزینه تراز شده آب شیرین تولیدی در این سیستم خواهد شد. هزینه تراز شده آب شیرین تولیدی برای سیستم MED-TVC برابر با ۱٫۲۲ دلار بر مترمکعب و برای سیستم اُسمز- معکوس برابر ۰٫۷۲ دلار بر مترمکعب تخمین زده شده است. در حالی‌که، هزینه تراز شده مجموع آب شیرین تولید شده در این آرایش ۱٫۰۶ دلار بر مترمکعب محاسبه شد. این مقدار برای آرایش سیستم هیبرید ساده ۱٫۰۷ دلار بر مترمکعب به دست آمد.

در انتها مشاهده می‌شود که در سیستم هیبرید پیشنهادی، دبی جریان پساب بازگشتی به دریا برابر است با ۴۶۳ کیلوگرم برثانیه است که در مقایسه با دبی ۱۸۵۱(=۸۱۰+۱۰۴۱) کیلوگرم برثانیه پساب بازگشتی به دریا در سیستم هیبرید ساده به مراتب کم‌تر است که با توجه به غلظت بالای نمک پساب خروجی این امر به معنی ایجاد آلودگی کم‌تر محیط زیستی برای تولید هر متر مکعب آب شیرین است.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش عملکرد فنی و اقتصادی کوپلینگ یک سیستم هیبرید آب شیرین‌کنی متشکل از MED-TVC و اُسمز- معکوس با ظرفیت ۱۰۰،۰۰۰ مترمکعب بر روز و نیروگاه‌های VVER-۱۰۰۰ با استفاده از ابزارهای محاسباتی DEEP و DE-TOP که توسط IAEA برای ارزیابی فنی- اقتصادی سناریوهای تولید هم‌زمان انرژی الکتریکی و یک محصول جانبی دیگر در نیروگاه‌های هسته‌ای و فسیلی توسعه یافته‌اند؛ مورد بررسی قرار گرفت.

برای ارزیابی اقتصادی از روش هزینه تراز شده استفاده شد. هزینه تراز شده یک ابزار مناسب برای محاسبه هزینه تمام شده انرژی الکتریکی و آب شیرین تولید شده است. با توجه به محدودیت‌های موجود برای دست‌یابی به داده‌های قابل اطمینان در رابطه با هزینه‌های نیروگاه‌های VVER-۱۰۰۰، از نتایج پژوهش سایر محققین در زمینه ارزیابی اقتصادی این نیروگاه‌ها برای تخمین هزینه تراز شده انرژی تولیدی استفاده شد (۰٫۰۶۸ دلار بر کیلووات ساعت انرژی الکتریکی).

در سیستم هیبریدی پیشنهادی این پژوهش، پساب خروجی سیستم MED-TVC که دمای بالاتری نسبت به دمای آب دریا دارد به‌عنوان آب تغذیه سیستم اُسمز- معکوس مورد استفاده قرار گرفت. از آن‌جایی‌که پیش گرم کردن آب تغذیه سیستم اُسمز- معکوس باعث افزایش راندمان و کاهش انرژی الکتریکی مصرفی می‌شود. بنابراین، هزینه تراز شده آب شیرین تولید شده در این آرایش کمی کم‌تر از سیستم هیبرید ساده است. اما مزیت اصلی سیستم پیشنهادی کاهش چشمگیر پساب خروجی سیستم هیبریدی به دریا است که باعث کاهش آلودگی زیست محیطی نمک‌زدایی هسته‌ای می‌شود.

از ابزار DE-TOP نیز برای شناسایی نقاط استخراج بخار و بازگشت به سیکل بخار نیروگاه‌های VVER-۱۰۰۰ استفاده شد. در این حالت راندمان سیستم تولید انرژی الکتریکی از حدودی بیش‌تر از ۳۳٪ به ۳۴٪ برای راندمان تولید هم‌زمان افزایش پیدا کرد.

www.SID.ir

Archive of SID

مراجع

1. G. Locatelli, et al, *Cogeneration: An option to facilitate load following in Small Modular Reactors*, Prog. Nucl. Energy., **97**, 153 (2017). doi: 10.1016/j.pnucene.2016.12.012.
2. IAEA, *Introduction of Nuclear Desalination-Technical Reports Series No. 400*, (IAEA, Vienna, 2000).
3. Al-Othman. Amani, et al., *Nuclear desalination: A state-of-the-art review*, Desalination., **457**, 39 (2019). doi: 10.1016/j.desal.2019.01.002.
4. J. Miller, *Review of water resources and desalination technologies*, Sandia Natl. Lab. Report, SAND., **800**, 3 (2003).
5. Shannon Omari Liburd, *Solar-driven humidification dehumidification desalination for potable use in haiti*, (Massachusetts Institute of Technology, 2010).
6. A. Al-Karaghouli, L.L. Kazmerski, *Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes*, Renew. Sustain. Energy Rev., **24**, 343 (2013). doi: 10.1016/j.rser.2012. 12. 064.
7. H.T. El-Dessouky, M.E. Hisham, *Fundamentals of Salt Water Desalination*, (Elsevier, 2002).
8. Sadeghi Khashayar, et al., *Comprehensive techno-economic analysis of integrated nuclear power plant equipped with various hybrid desalination systems*, Desalination., **493**, 150 (2020). doi: 10.1016/j.desal.2020.114623.
9. K.C. Kavvadias, I. Khamis, *The IAEA DEEP desalination economic model: a critical review*, Desalination, **257**, 150 (2010).
10. N. Xoubi, *Economic assessment of nuclear electricity from VVER-1000 reactor deployment in a developing country*, Energy., **175**, 14 (2019). doi: 10.1016/j.energy.2019.03.071.
11. *Nuclear Energy Agency and International Energy Agency*, Projected Costs of Generating Electricity 2020. NEA. 112 (2020).
12. AEOI, *Final Safety Analysis Report*, Moscow, (2007).

COPYRIGHTS
©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

استناد به این مقاله
پویان نجفی، سعید طالبی (۱۴۰۱)، آنالیز فنی - اقتصادی کوپلینگ سیستم هیبرید نمک‌زدایی MED-TVC و RO و نیروگاه‌های VVER-۱۰۰۰، ۱۰۲، ۱۷۲-۱۸۰

DOI: 10.24200/nst.2022.1480 **Url**: https://jonsat.nstri.ir/article_1504.html

www.SID.ir