

Research Paper

مقاله پژوهشی

Feasibility Study of Water Consumption Reduction Strategies in Thermal Power Plants: A Case Study of Shahid Madhej Power Plant

امکان‌سنجی راه‌کارهای کاهش مصرف آب در نیروگاه‌های حرارتی: مطالعه موردی نیروگاه شهید مدحج اهواز

Hossein Sasani^{1*} and Shahrzad Ehsanmanesh²

1- Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2- M.Sc. Student., Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

*Corresponding Author, Email: h.sasani@scu.ac.ir

Received: 09/04/2025

Revised: 15/09/2025

Accepted: 27/09/2025

© IWWA

Abstract

Thermal power plants are major consumers of freshwater, exacerbating environmental and operational challenges in water-scarce regions. This study evaluates strategies to reduce water consumption at the Shahid Madahj Ahvaz Power Plant in Iran. The results indicate a current consumption rate of approximately 3 m³ per MWh, which exceeds the national average of 2.2 m³/MWh for Iranian thermal power plants. An analysis of water loss identified the following distribution: evaporation (54%), discharge (30%), leakage and overflow (15%), and drift (1%). Three mitigation strategies were evaluated: increasing cycles of concentration, treating blowdown with reverse osmosis, and installing anti-drift louvers. The implementation of a combined approach demonstrated a potential reduction in water consumption of up to 35%, achieving a rate of 2 m³/MWh. This improvement would yield annual savings of over 2.4 million cubic meters of water and reduce water supply costs by 22 billion Iranian tomans. The findings provide a practical framework for water conservation in similar power plants, particularly in arid and semi-arid regions.

Keywords: Thermal Power Plant, Cooling Tower, Water Consumption Reduction, Reverse Osmosis, Cycles of Concentration.

حسین ساسانی^{۱*} و شهرزاد احسان‌منش^۲

۱- استادیار گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

*نویسنده مسئول، ایمیل: h.sasani@scu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴/۰۶/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۵

© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

نیروگاه‌های حرارتی از مصرف‌کنندگان عمده آب شیرین هستند که در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مانند ایران، چالش‌های محیط‌زیستی و بهره‌برداری را تشدید می‌کنند. این پژوهش با هدف بررسی امکان‌سنجی کاهش مصرف آب در نیروگاه شهید مدحج اهواز انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که مصرف آب این نیروگاه در حدود ۳ مترمکعب به‌ازای هر مگاوات ساعت تولید برق است که از میانگین نیروگاه‌های حرارتی ایران (۲/۲ مترمکعب به‌ازای هر مگاوات ساعت) بیش‌تر است. تحلیل منابع اتلاف آب نشان داد که ۵۴٪ از طریق تبخیر، ۳۰٪ از طریق تخلیه، ۱٪ در اثر پرتاب و ۱۵٪ ناشی از نشست و سرریز از دست می‌رود. سه راه‌کار شامل افزایش چرخه غلظت، تصفیه آب تخلیه با اسمز معکوس و تعویض لوورهای ضدپاشش بررسی شدند که اجرای ترکیبی آن‌ها توانست مصرف آب نیروگاه را تا ۳۵٪ و معادل ۲ مترمکعب به‌ازای هر مگاوات ساعت کاهش دهد. این کاهش معادل صرفه‌جویی سالانه بیش از دو میلیون و چهارصد هزار مترمکعب آب و ۲۲ میلیارد تومان هزینه تأمین آب است. یافته‌های این پژوهش می‌توانند به‌عنوان مبنایی برای کاهش مصرف آب در نیروگاه‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: نیروگاه حرارتی، برج خنک‌کننده، کاهش مصرف آب، اسمز معکوس، چرخه غلظت.

به‌طور میانگین ۲۵۰۰۰ مترمکعب در روز آب مصرف می‌شود (اسماعیل‌پور و همکاران، ۱۴۰۲). در این راستا، مطالعات متعددی به ارزیابی راه‌کارهای کاهش مصرف آب در نیروگاه‌های حرارتی پرداخته‌اند. پژوهشی در چین با تحلیل الگوی مصرف ۳۴۵ نیروگاه نشان داد که سیستم‌های خنک‌کننده چرخشی اگرچه رایج هستند، اما مصرف آب بالایی دارند. در مقابل، سیستم‌های خشک تا ۷۵٪ صرفه‌جویی آبی ایجاد می‌کنند، هرچند هزینه‌های عملیاتی را افزایش می‌دهند (Shao et al., 2017).

تحقیق دیگری نیز نشان داد که نیروگاه‌های مناطق خشک تا ۸۴٪ آب شیرین محلی را مصرف می‌کنند و راه‌کارهایی مانند استفاده از آب‌های بازیافتی یا سیستم‌های هیبریدی می‌تواند این وابستگی را کاهش دهد (Pan et al., 2018).

در نیروگاه‌های حرارتی، نمک‌زدایی جریان تخلیه برج‌های خنک‌کننده روشی متداول اما پرهزینه برای احیای آب بازیافتی محسوب می‌شود. براساس تحلیل‌های اقتصادی با در نظر گرفتن بهای یارانه‌ای برق در ایران، کم‌ترین هزینه نمک‌زدایی مربوط به شهرهای مجاور خلیج فارس و دریای عمان است (۴۳۲ هزار ریال به‌ازای هر مترمکعب)؛ درحالی‌که با فاصله‌گرفتن از سواحل جنوبی و در مناطق کویری مانند بیرجند، این رقم معادل ۱۰۲۶ هزار ریال برآورد شده است (فدایی تهرانی و ابارشی، ۱۴۰۳)؛ البته تلفیق انرژی‌های تجدیدپذیر با این‌گونه فناوری‌ها می‌تواند هزینه‌های عملیاتی را تا ۵۰٪ کاهش دهد (ایرجی و نجفی، ۱۴۰۴).

هم‌چنین در یک مطالعه اقتصادی بر روی یک نیروگاه حرارتی مشخص شد که استفاده هم‌زمان از آب‌شیرین‌کن‌های حرارتی و اسمز معکوس، در دبی‌های بالاتر از ۸۰۰ مترمکعب بر ساعت برای آب دریا، از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر بوده و به افزایش بازدهی تولید برق کمک می‌کند (پرهیزکار و پورعلی، ۱۳۹۶).

البته فناوری اسمز معکوس منجر به تولید شورابه با املاح بالا می‌شود که دفع آن به محیط‌زیست نیازمند رعایت استانداردهای تخلیه است. بنابراین در سال‌های اخیر توجه محققین بر روی مطالعه و ارزیابی فرآیندهای نمک‌زدایی بدون پساب یا تخلیه پساب صفر مایع (ZLD) بیش‌تر شده است (رمضانی و همکاران، ۱۴۰۴).

بررسی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از این‌گونه سامانه‌ها می‌تواند پیامدهای محیط‌زیستی فرآیند اسمز معکوس را تا حدود ۸۰ درصد کاهش دهد (هاشم‌پور و همکاران، ۱۴۰۳). در مطالعه دیگری نیز دو راه‌کار بازیافت پساب تخلیه و نمک‌زدایی آب جبرانی به‌منظور افزایش چرخه غلظت مقایسه شده و مشخص

نیروگاه‌های حرارتی، به‌عنوان تأمین‌کنندگان اصلی انرژی الکتریکی، به‌دلیل وابستگی زیاد به آب شیرین برای خنک‌سازی، یکی از عوامل تشدید بحران جهانی آب محسوب می‌شوند. این مسئله در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران که با محدودیت‌های ذاتی منابع آبی مواجه‌اند، پیچیدگی بیش‌تری یافته و پایداری عملیاتی این تأسیسات را با مخاطرات فزاینده‌ای روبه‌رو ساخته است. یافته‌های پژوهش‌های اخیر، نشان می‌دهد که توسعه سامانه‌های نمک‌زدایی و آب‌شیرین‌کن، مدیریت مصرف و کاهش هدررفت آب و اجرای طرح‌های اضطراری تأمین و مدیریت منابع، سه راه‌کار اصلی برای سازگاری با کم‌آبی به‌شمار می‌روند (حراقی و همکاران، ۱۴۰۳).

در این میان، نیروگاه شهید مدحج به‌عنوان یکی از نیروگاه‌های کلیدی حرارتی ایران در استان خوزستان، نمونه‌ای بارز از مصرف بالای آب در بخش نیروگاهی است. داده‌های عملیاتی نشان می‌دهد که نیروگاه شهید مدحج به‌طور متوسط ۳ مترمکعب آب به‌ازای هر مگاوات ساعت برق مصرف می‌کند. این مقدار در مقایسه با میانگین نیروگاه‌های حرارتی ایران با برج خنک‌کننده تر (۲/۲ مترمکعب بر مگاوات ساعت) بیانگر مصرف بالاتر آب در این نیروگاه است (موسوی رینه و یوسفی، ۱۳۹۹).

هم‌چنین برآوردها حاکی از آن است که کل مصرف آب در زنجیره تولید برق ایران طی یک سال بیش از یک میلیارد مترمکعب است. به‌طور متوسط، نیروگاه‌های کشور برای تولید هر کیلووات ساعت برق حدود ۱/۵ لیتر آب به‌صورت مستقیم و پیش از مرحله نیروگاه حدود ۲/۵ لیتر آب به‌صورت غیرمستقیم مصرف می‌کنند؛ بنابراین مجموعاً مصرف آب در کل زنجیره تولید برق معادل ۴ لیتر به‌ازای هر کیلووات ساعت برآورد می‌شود (تهامی‌پور و اسماعیل‌زاده، ۱۴۰۲). علاوه‌بر این، تخلیه فاضلاب‌های تصفیه‌نشده حاوی آلاینده‌های شیمیایی به اکوسیستم‌های آبی، آلودگی منابع و تخریب زیستگاه‌های طبیعی را تشدید می‌کند (Meramo and González-Delgado, 2023). چنین چالش‌هایی، همراه با الزامات سخت‌گیرانه محیط‌زیستی، لزوم به‌کارگیری فناوری‌های نوین و راهبردهای مدیریتی پایدار را به‌ضرورتی اجتناب‌ناپذیر تبدیل کرده است (Nihalani and Mishra, 2020).

در صنعت نیروگاهی، به‌ویژه در نیروگاه‌های با برج خنک‌کننده تر، حجم قابل‌توجهی از آب مصرف می‌شود. به‌عنوان نمونه، در نیروگاه شهید منتظر قائم (دارای چهار واحد بخار ۶۲۵ و سه واحد سیکل ترکیبی ۳۰۰ مگاوات و شش واحد گازی ۶۹۸ مگاوات)،

کاهش مصرف آب در برج‌های خنک‌کننده نیروگاه شهید مدحج، گامی نوین در این راستا خواهد بود و می‌تواند مبنایی برای تحقیقات آینده در زمینه بهینه‌سازی مصرف آب نیروگاه‌های حرارتی فراهم سازد.

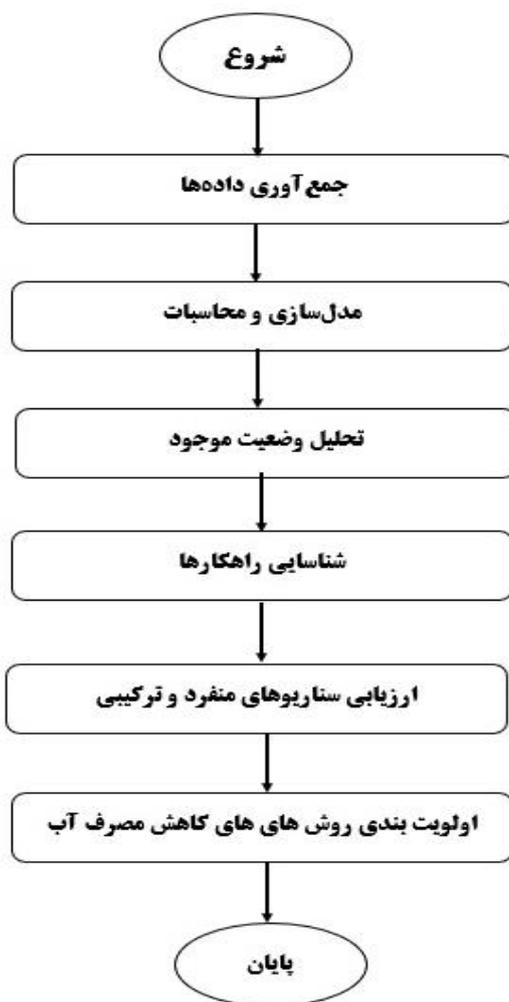
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- چارچوب روش تحقیق

به‌منظور ارائه تصویری جامع از فرآیند پژوهش در شکل ۱، چارچوب روش تحقیق این مطالعه به‌صورت فلودیگرام نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مراحل تحقیق شامل جمع‌آوری داده‌ها، مدل‌سازی و محاسبات، تحلیل وضعیت موجود، شناسایی راه‌کارها، ارزیابی سناریوهای منفرد و ترکیبی و در نهایت اولویت‌بندی روش‌های کاهش مصرف آب است. این چارچوب مبنای اجرای مراحل بعدی تحقیق در نیروگاه شهید مدحج اهواز قرار گرفته است.

شد که بازیافت پساب تخلیه در برج‌های با چرخه‌های غلظت بالاتر از ۳، ۱۳٪ صرفه‌جویی در مصرف آب به‌همراه دارد و علاوه‌بر بازدهی بیشتر، هزینه‌های کم‌تری نسبت به گزینه دوم دارد (Muller et al., 2024).

مطالعه دیگری، نشان داد که برج هیبریدی مرطوب/خشک نه‌تنها مصرف آب را کاهش می‌دهد، بلکه از نظر اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه است (دهقانی و احمدی‌کیا، ۱۳۹۶). علاوه‌بر این، پژوهش دیگری با ارائه مدل نرم‌کننده آهک، کاهش ۲۵ درصدی مصرف آب را از طریق بازچرخانی ۹۰۰ تا ۱۵۰۰ مترمکعب آب در ساعت امکان‌پذیر دانسته است (Biedunkova et al., 2024). باوجود مطالعات متعددی که در زمینه بهینه‌سازی مصرف آب نیروگاه‌ها انجام شده است، تاکنون پژوهشی که به‌صورت جامع و هم‌زمان اثربخشی ترکیب چهار راه‌کار تصفیه پساب جریان تخلیه با اسمز معکوس، افزایش چرخه غلظت، نصب قطره‌گیرها، و جایگزینی لوورهای ضدپاشش، را در یک نیروگاه خاص ارزیابی کند، انجام نشده است. این مطالعه، با تمرکز بر امکان‌سنجی

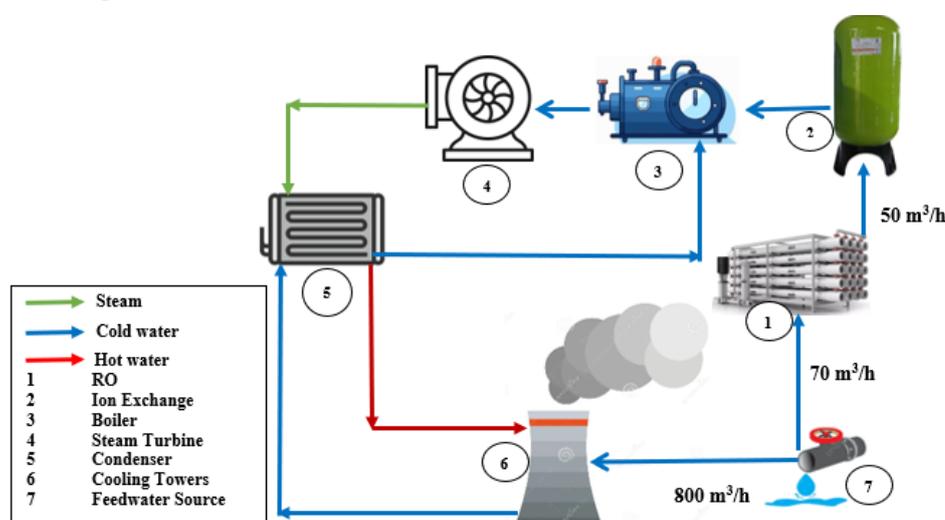


شکل ۱- روندنمای مراحل انجام تحقیق حاضر

۲-۲- معرفی نیروگاه شهید مدحج اهواز

نیروگاه شهید مدحج اهواز با ظرفیت تولیدی حدود ۸۰۰ مگاوات، متشکل از واحدهای گازی و بخاری است. آب مورد نیاز نیروگاه از خط انتقال آبی که منبع آن در شهر شوشتر است، تأمین می‌شود. با توجه به کیفیت مطلوب این آب (جدول ۱)، معادل ۷۰ مترمکعب بر ساعت به واحد نمک‌زدایی (اسمز معکوس و رزین‌های تبادل یونی) هدایت می‌شود. سپس ۵۰ مترمکعب بر ساعت آب دمین تولید شده که به‌عنوان آب تغذیه وارد بویلر می‌شود. بخار تولیدشده وارد توربین شده تا برای جریان الکتریسته استفاده شود. پس از عبور از توربین، در کندانسور

میعان یافته و مجدداً به بویلر برمی‌گردد. به‌منظور خنک کردن این جریان بخار، در حدود ۳۰۰۰۰ مترمکعب در ساعت آب از سمت برج‌های خنک‌کننده به کندانسور انتقال داده می‌شود. این جریان در کندانسور، گرمای جریان بخار را دریافت می‌کند و به‌عنوان آب گرم مجدداً به برج‌های خنک‌کننده برمی‌شود. در آن‌جا با استفاده از تماس با جریان هوا در حدود ۱۰ درجه سانتی‌گراد، خنک شده و مجدداً به کندانسور انتقال می‌یابد. در این برج‌ها، بخش قابل‌توجهی نیز به‌صورت تبخیر تلف می‌شود که برای جبران آن، ضروری است از منبع تأمین آب، جریانی تحت عنوان آب جبرانی وارد برج‌ها شود. در شکل ۲ دیاگرام جریان گردش آب در نیروگاه شهید مدحج، نشان داده شده است.



شکل ۲- دیاگرام جریان آب در نیروگاه شهید مدحج

۲-۳- ویژگی‌های برج خنک‌کننده نیروگاه شهید مدحج

برج‌های خنک‌کننده نیروگاه از نوع گردش مجدد باز بوده و به‌عنوان بزرگ‌ترین برج‌های خنک‌کننده تر در ایران شناخته می‌شوند. هر برج به ۹ فن سه‌فاز با ولتاژ ۳۸۰ ولت مجهز است که

با ایجاد جریان هوای معکوس، انتقال حرارت بین آب گرم و محیط را تسهیل می‌کنند. این فرآیند علاوه بر کاهش دمای آب ورودی به کندانسور، نقش مهمی در حفظ خلأ سیستم و افزایش راندمان چگالش بخار دارد. ابعاد هر برج ۱۸×۲۱×۱۱۰ متر (طول×عرض×ارتفاع) است.

جدول ۱- کیفیت آب خام ورودی به نیروگاه شهید مدحج

پارامتر	واحد	مقدار
بی‌کربنات	mg/L as CaCO ₃	۱۸۵/۳
نیترات	mg/L	۷
کلراید	mg/L	۳۱۸/۹
کلسیم	mg/L	۱۲۶/۶
منیزیم	mg/L	۳۵/۹
سدیم	mg/L	۱۹۶/۳
پتاسیم	mg/L	۲/۵
pH	-	۷/۸
TDS	mg/L	۱۰۱۰
EC	μmhos/cm	۱۷۱۷
کدورت	NTU	۰/۳
کل جامدات معلق	mg/L	۰/۴

۲-۴- مدل‌سازی جریان‌ها در برج خنک‌کننده

در برج‌های خنک‌کننده، جریان آب ورودی (آب جبرانی) بخشی از نیاز آبی سیستم را تأمین می‌کند. بخشی از این آب به‌صورت تبخیر و دریفت از بخش فوقانی برج از دست می‌رود و بخش دیگری تحت‌عنوان جریان تخلیه از بخش زیرین برج خارج می‌شود تا از افزایش غلظت آلاینده‌ها در آب جلوگیری شود. بر این اساس، کل میزان آب جبرانی مورد نیاز سیستم با استفاده از معادله موازنه جرم مطابق معادله (۱) محاسبه می‌شود:

$$MU = ER + BD + DR + L \quad (1)$$

که MU : مقدار کل آب جبرانی مورد نیاز سیستم (m^3/d)، ER : میزان تبخیر (m^3/d)، BD : میزان تخلیه (m^3/d)، DR : میزان تلفات دریفت (m^3/d) و L : سایر تلفات سیستم (m^3/d) است.

آب جبرانی معمولاً با استفاده از دبی‌سنج‌ها اندازه‌گیری می‌شود. در صورت عدم وجود دبی‌سنج، می‌توان مقدار آب جبرانی را با استفاده از تعداد چرخه‌های غلظت (CR) و میزان تغییرات دما تخمین زد که مطابق معادله تجربی (۲) محاسبه می‌شود (Qasim and Zhu, 2017):

$$MU = \frac{\Delta T \cdot CR}{548(CR - 1)} RR \quad (2)$$

که CR : تعداد چرخه‌های غلظت (نسبت بین مقدار مواد جامد محلول در آب در گردش به مقدار آن‌ها در آب جبرانی)، ΔT : تغییر دمای ایجادشده توسط برج خنک‌کننده (درجه سانتی‌گراد)، RR : نرخ جریان آب در گردش، بر حسب مترمکعب در ساعت (m^3/h) و MU : مقدار کل آب جبرانی مورد نیاز سیستم (m^3/d) است.

این رابطه امکان محاسبه مقدار آب جبرانی لازم را براساس نرخ تبخیر و تعداد چرخه‌های غلظت فراهم می‌کند. چرخه‌های غلظت نشان‌دهنده تعداد دفعاتی است که آب در سیستم خنک‌کننده قبل از تخلیه گردش می‌کند. این پارامتر نقش کلیدی در طراحی و بهره‌برداری بهینه برج‌های خنک‌کننده دارد و این مقدار با نسبت غلظت یک یون در آب خنک‌کننده نسبت به همان یون در آب جبرانی تعریف می‌شود که از معادله (۳) محاسبه می‌شود:

$$CR = \frac{C_{CW}}{C_{MU}} \quad (3)$$

که C_{CW} : مقدار مواد محلول در آب در گردش برج خنک‌کننده (mg/L)، C_{MU} : مقدار مواد محلول در آب جبرانی که برای جایگزینی تلفات سیستم تأمین می‌شود (mg/L) و CR : تعداد

چرخه‌های غلظت است.

بخش دیگر تلفات آب، مقدار آبی است که در اثر تبخیر، از بالای برج خنک‌کننده خارج می‌شود. با استفاده از معادله (۴) می‌توان این بخش را محاسبه نمود (Seneviratne, 2007):

$$ER = \frac{EK \times C_p \times RR \cdot \Delta T}{L_E} \quad (4)$$

که R : نرخ جریان تبخیر، بر حسب مترمکعب در ساعت (m^3/h)، EK : ضریب تبخیر ($0.75-0.85$)، C_p : گرمای ویژه آب، برابر با $4/2$ کیلوژول بر کیلوگرم بر درجه سانتی‌گراد ($kJ/kg \cdot ^\circ C$)، L_E : گرمای نهان تبخیر آب، برابر با 2431 کیلوژول بر کیلوگرم (kJ/kg) و RR : نرخ جریان در گردش بر حسب مترمکعب در ساعت (m^3/h) است.

جریان بلودان یا تخلیه (BD) نیز یکی از پارامترهای مهم در محاسبات است. این جریان به مقدار آبی اطلاق می‌شود که به‌صورت عمدی از سیستم خارج می‌شود تا غلظت مواد جامد محلول در محدوده مطلوب باقی بماند. بدین منظور معادله‌های (۵) و (۶) برای محاسبه جریان تخلیه ارائه می‌شود:

$$MU \times C_{MU} = BD \times C_{CW} \quad (5)$$

که C_{MU} : مقدار مواد محلول در آب جبرانی که برای جایگزینی تلفات سیستم تأمین می‌شود (mg/L)، C_{CW} : مقدار مواد محلول در آب در گردش برج خنک‌کننده (mg/L) و MU : مقدار کل آب جبرانی مورد نیاز سیستم (m^3/d) است.

$$BD = \frac{MU}{CR} \quad (6)$$

که MU : مقدار کل آب جبرانی مورد نیاز سیستم (m^3/d)، BD : جریان بلودان یا تخلیه (m^3/d) و CR : تعداد چرخه‌های غلظت است.

بنابراین، با توجه به معادله موازنه جرم ارائه‌شده در معادله (۱) و محاسبه جریان‌های جبرانی (MU)، تبخیر (ER) و تخلیه (BD) می‌توان مجموع تلفات ناشی از دریفت (DR) و نشت (L) را با استفاده از معادله (۷) تعیین نمود:

$$DR + L = MU - ER - BD \quad (7)$$

۲-۵- وضعیت موجود مصرف آب در برج‌های خنک‌کننده

در جدول ۲ مصارف آب در برج‌های خنک‌کننده نیروگاه شهید مدحج نشان داده شده است. تبخیر، عملکرد اصلی برج خنک‌کننده است و روشی است که حرارت را از سیستم برج خنک‌کننده حذف می‌کند. تلفات تبخیر به‌طور متوسط حدود ۱٪

توسط جریان باد انتقال پیدا کرده و از بخش فوقانی برج‌ها به‌همراه بخار آب خارج می‌شود. معمولاً نرخ پرتاب کم‌تر از ۱ درصد کل آب مورد نیاز نیروگاه برآورد می‌شود (Zhai and Rubin, 2010). بدین ترتیب می‌توان آخرین سهم تلفات یعنی نشت یا سرریز را نیز تعیین نمود. مشاهدات به‌عمل‌آمده از بهره‌برداری نیروگاه، نشان‌دهنده سرریز شدن جریان دائمی و قابل‌توجهی آب از برج‌ها است. براساس معادله (۸)، این تلفات حدود ۱۱۷ مترمکعب در ساعت بوده که مقدار قابل‌ملاحظه‌ای است. بنابراین تبخیر، تخلیه، پرتاب و نشت مهم‌ترین منابع اتلاف آب در این نیروگاه هستند که به‌ترتیب ۵۳، ۳۰، ۱ و ۱۶ درصد آب جبرانی را به خود اختصاص می‌دهند. بدین ترتیب طبق جدول ۲، نیروگاه شهید مدح با مصرف ۳ مترمکعب آب به‌ازای هر مگاوات ساعت، بیش از مصرف آب نیروگاه‌های مشابه در ایران (۲/۲ مترمکعب آب بر مگاوات - ساعت) مصرف می‌نماید. البته مصرف آب نیروگاه‌های مشابه تحت‌تأثیر فناوری‌های خنک‌سازی، شرایط اقلیمی و اختلاف دمای خنک‌سازی، متفاوت است؛ اما به‌طور متوسط مصرف آب نیروگاه‌های مبتنی بر چرخه رانکین در حدود ۲ مترمکعب بر مگاوات ساعت، گزارش شده است (Guerras and Martín, 2020; Zhai and Rubin, 2010).

جدول ۲- مصارف آب در برج‌های خنک‌کننده نیروگاه شهید مدح

ردیف	مشخصه	واحد	مقدار
۱	توان تولیدی واحدهای بخار	MW	۲۹۰
۲	آب کل در گردش	m ³ /h	۳۰۰۰۰
۳	مصرف آب برج‌های خنک‌کننده	m ³ /h	۸۰۰
۴	نسبت آب مصرفی به توان تولیدی	m ³ /MWh	۳
۵	تغییر دما	°C	۱۰
۶	نرخ جریان تبخیر (میانگین دو روش)	m ³ /h	۴۳۵
۷	چرخه‌های غلظت	-	۳/۳
۸	نرخ جریان پرتاب	m ³ /h	۶
۹	نرخ جریان تخلیه	m ³ /h	۲۴۲
۱۰	نرخ جریان نشت یا سرریز	m ³ /h	۱۱۷

۳- نتایج و بحث

آب جبرانی مجموع تبخیر، تخلیه، نشت و پرتاب است. تبخیر در برج خنک‌کننده تابع عملکرد برج خنک‌کننده است و به‌راحتی قابل‌کاهش نیست. با این‌وجود، گزینه‌هایی نظیر تبدیل برج مرطوب به برج‌های هیبریدی و استفاده از فناوری نانو سیالات در مطالعات پیشین به‌منظور کاهش تلفات تبخیر بررسی شده‌اند (Costa et al., 2014; Pozzobon et al., 2016)؛ که با توجه به

برای هر ۷ درجه سانتی‌گراد کاهش دما در آب است (Deziani et al., 2017). با این توضیحات، براساس این مقادیر و جریان آب در گردش ۳۰۰۰۰ مترمکعب در ساعت، انتظار می‌رود، مقدار تلفات ناشی از تبخیر برای برج‌های خنک‌کننده که ۱۰ درجه دمای آب را کم می‌کنند، معادل ۴۲۹ مترمکعب در ساعت باشد. این درحالی است که مطابق با معادله (۲) کل تبخیر انجام‌شده از برج‌ها معادل ۴۴۱ مترمکعب در ساعت تعیین می‌شود (جدول ۲). بنابراین، با توجه به درصد اختلاف ۳ درصدی نتیجه هر دو روش، مقادیر تعیین‌شده بسیار نزدیک به هم است که نشان‌دهنده کارایی هر دو روش در تخمین نرخ تبخیر است.

بخش دوم تلفات آب مربوط به نرخ تخلیه است که برای حذف غلظت‌های بالای مواد جامد حل‌شده مانند کلسیم، منیزیم، کلرید، سیلیکا از سیستم برج خنک‌کننده انجام می‌شود. وقتی آب تبخیر می‌شود، مواد جامد حل‌شده باقی می‌مانند و غلظت کل مواد جامد حل‌شده (TDS) در آب برج خنک‌کننده افزایش می‌یابد. غلظت‌های بالا می‌توانند باعث تشکیل رسوب شوند یا به خوردگی منجر شوند که موجب کاهش کارایی و خرابی سیستم می‌شود. غلظت TDS با حذف یعنی برداشت بخشی از آبی که دارای غلظت بالای TDS است و جایگزینی آن با آب تازه، کنترل می‌شود. براساس معادله (۶) و مطابق جدول ۲ نرخ جریان تخلیه هر دو برج، معادل ۲۴۲ مترمکعب در ساعت است که در حدود ۵۶ درصد مقدار تبخیر است. این درحالی است که در برج‌های خنک‌کننده مرطوب، در حدود ۲۰ درصد نرخ تبخیر از طریق تخلیه به هدر می‌رود (EPA, 2017). این اختلاف بالا می‌تواند ناشی از چرخه غلظت پایین در جریان آب در گردش برج‌های خنک‌کننده باشد. بخش سوم تلفات آب مربوط به پدیده پرتاب (دریفت) است که بیانگر مقدار آبی است که می‌تواند به‌صورت مه یا قطرات آب از برج خنک‌کننده خارج شود. نرخ تلفات پرتاب تابعی از پیکربندی برج، طراحی قطره‌گیرها، نرخ جریان هوا از میان برج و میزان بارگذاری آب است. با این‌وجود، معمولاً برای برآورد مقدار این اتلاف، درصدی از آب در گردش در نظر گرفته می‌شود. سیستم‌های با بازدهی پایین آن‌هایی هستند که مقادیر بین ۰/۰۸ تا ۰/۰۲ درصد تولید می‌کنند، درحالی‌که سیستم‌های با بازدهی بالا عملکردی با سطح کم‌تر از ۰/۰۸ درصد را ارائه می‌دهند (Meroney, 2006). از آن‌جا که مصرف آب نیروگاه شهید مدح بالا است، به‌طور محافظه‌کارانه، این نرخ معادل ۰/۰۲ درصد جریان آب در گردش، در نظر گرفته می‌شود. مطابق با این تحلیل، در حدود ۶ مترمکعب در ساعت (معادل ۰/۷ درصد مصرف آب نیروگاه)، قطرات آب ناشی از عملیات خنک‌کردن در برج‌ها

غلظت، برای کنترل pH و جلوگیری از رسوب‌گذاری، افزایش تزریق مواد شیمیایی تنظیم‌کننده اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.

۳-۲- بازچرخش جریان تخلیه

از آن‌جاکه برای نمک‌زدایی آب‌های لب‌شور، فرآیند اسمز معکوس (RO) از نظر اقتصادی و فنی بر سایر روش‌های حرارتی برتری دارد (Ghaffour et al., 2013) در این مطالعه، از این فرآیند برای تصفیه جریان تخلیه استفاده می‌شود. این سیستم با بهره‌گیری از ممبران‌های مناسب برای آب‌های لب‌شور و واحدهای پیش‌تصفیه، TDS را تا کم‌تر از ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر کاهش می‌دهد. مطابق با جدول ۴، چنان‌چه تصفیه جریان تخلیه و بازچرخش آن به ورودی برج‌های خنک‌کننده در دستور کار قرارگیرد، با در نظر گرفتن بازدهی ۸۰ درصد برای سیستم نمک‌زدایی با روش اسمز معکوس، در حالت موجود که چرخه غلظت ۳/۳ است، کل آب مورد نیاز نیروگاه از مقدار ۳ به ۲/۳۳ مترمکعب به‌ازای هر مگاوات ساعت کاهش می‌یابد که صرفه‌جویی قابل توجهی است (۲۴٪). اگر تلفیق دو روش (افزایش COC تا مقدار ۶ و بازچرخش جریان تخلیه) در نظر گرفته شود، این شاخص به ۲/۲۴ مترمکعب به‌ازای هر مگاوات ساعت کاهش می‌یابد.

جدول ۳- تأثیر افزایش COC بر کاهش مصرف آب جبرانی

ردیف	مشخصه	واحد	مقدار		
۱	COC	-	۳/۳	۴	۵
۲	TDS آب تخلیه	mg/L	۳۳۰۰	۴۰۰۰	۵۰۰۰
۳	کاهش آب جبرانی	%	-	۷/۱	۱۲/۹
۴	آب جبرانی جدید	m ³ /h	۸۰۰	۷۴۳	۶۹۷
۵	آب مورد نیاز نیروگاه	m ³ /MWh	۳/۰۰	۲/۸۰	۲/۶۴
۶	نرخ جریان تخلیه	m ³ /h	۲۴۲	۱۸۶	۱۱۲

جدول ۴- تأثیر تصفیه و بازچرخش جریان تخلیه بر کاهش مصرف آب

ردیف	مشخصه	واحد	۳/۳COC =	۶COC =
۱	نرخ جریان تخلیه	m ³ /h	۲۴۲	۱۱۲
۲	خروجی واحد نمک‌زدایی جریان تخلیه با ریکاوری ۸۰ درصد	m ³ /h	۱۹۴	۸۹
۳	آب جبرانی پس از بازچرخش خروجی نمک‌زدایی	m ³ /h	۶۰۶	۵۸۰
۴	نشست یا سرریز	m ³ /h	۱۱۷	۱۲۳
۵	نسبت آب مصرفی به توان تولیدی پس از بازچرخش	m ³ /MWh	۲/۳۳	۲/۲۴
۶	TDS فاضلاب نمک‌زدایی	mg/L	۱۶،۵۰۰	۳۰،۰۰۰
۷	نرخ جریان فاضلاب نمک‌زدایی	m ³ /h	۴۸	۲۲

خنک‌کننده عمدتاً در اثر پدیده پاشش رخ می‌دهد. در این زمینه، استفاده از لوورهای ضدپاشش می‌تواند نقش مهمی در کاهش این

نیاز به سرمایه‌گذاری بالا و انجام تحقیقات در مقیاس پایلوت در این تحقیق بررسی نمی‌شوند. همچنین، تلفات ناشی از پرتاب، کم‌تر از ۱٪ بوده و بدین ترتیب از دستور کار این تحقیق خارج می‌شود. بنابراین سه گزینه افزایش چرخه غلظت، کاهش تلفات سرریز و بازچرخش جریان تخلیه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱- افزایش چرخه غلظت (COC)

مطابق با معادله (۶) تلفات ناشی از تخلیه، تابعی از چرخه غلظت است که باید در سیستم حفظ شود. چرخه غلظت برای سیستم خنک‌کننده به کیفیت آب جبرانی بستگی دارد. درصد مصرف آب خنک‌کننده که می‌تواند با افزایش تعداد سیکل‌های غلظت صرفه‌جویی شود، در معادله (۸) ارائه شده است (Seneviratne, 2007).

$$POC = 100 \times \frac{(CR_n - CR_i)}{CR_i(CR_n - 1)} \quad (8)$$

که CR_n و CR_i : به ترتیب چرخه غلظت قبل و بعد از افزایش و POC : نیز درصد آب صرفه‌جویی‌شده ناشی از افزایش COC هستند.

از آن‌جا که برج‌ها می‌توانند در چرخه غلظت ۳ تا ۷، عملکرد مناسبی داشته باشند (Guerras and Martín, 2020)، لذا افزایش چرخه غلظت می‌تواند میزان تخلیه آب را کاهش دهد و منجر به کاهش آب جبرانی شود. در نیروگاه شهید مدحج، مقدار چرخه غلظت حدود ۳/۳ است. مطابق جدول ۳ چنان‌چه چرخه غلظت به ۴، ۵، ۶ افزایش یابد، نرخ آب جبرانی به ترتیب حدود ۷، ۱۳ و ۱۶ درصد کاهش می‌یابد. بدین ترتیب، در بیش‌ترین مقدار چرخه غلظت، آب جبرانی مورد نیاز از ۸۰۰ به ۶۶۹ مترمکعب در ساعت و کل آب مورد نیاز نیروگاه از ۳ به ۲/۵۵ مترمکعب به‌ازای هر مگاوات ساعت، کاهش پیدا می‌کند. البته با افزایش چرخه

۳-۳- کاهش تلفات سرریز

بررسی‌های میدانی نشان داده است که سرریزهای برج‌های

لوورها، میزان کاهش تلفات چقدر خواهد بود، نیز به بررسی بیشتری نیاز دارد. زیرا علاوه بر پدیده سرریز، نشت از اتصالات، شیرهای کنترل و خطوط لوله‌کشی نیز بر هدررفت آب مؤثر است. با این‌وجود در این مطالعه، در یک سناریوی محافظه‌کارانه، اثر تعویض لوورها، در حدود ۵۰ درصد برای کاهش این نوع تلفات در نظر گرفته می‌شود. مطابق جدول ۵، در وضعیت موجود با اجرای این روش، آب جبرانی، به ۷۴۱ مترمکعب در ساعت (حدود ۰.۷٪) کاهش می‌یابد.

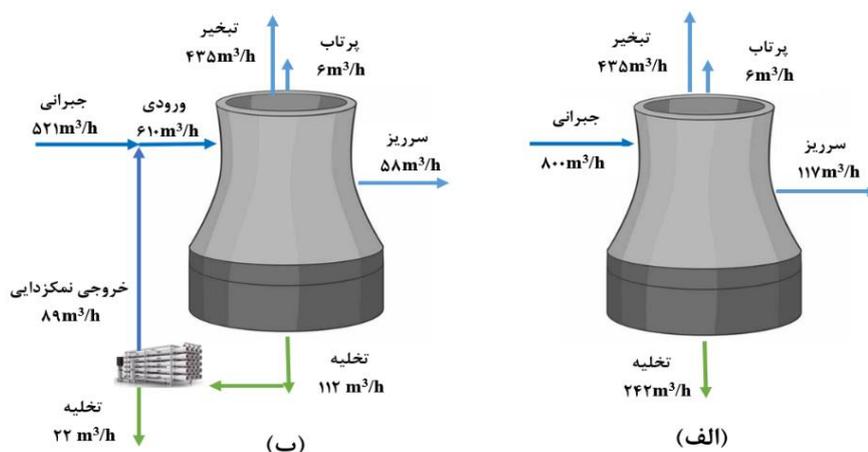
نوع اتلاف داشته باشد. این لوورها با هدایت مجدد قطرات آب به داخل برج، از هدررفت ناشی از پاشش جلوگیری می‌کنند. مشاهدات حاکی از آن است که فرسودگی این لوورها در نیروگاه شهید مدحج منجر به افزایش چشمگیر پاشش آب شده و موازنه جرم انجام‌شده نشان می‌دهد که این پدیده باعث هدررفت آب به مقدار ۱۱۷ مترمکعب در ساعت (معادل ۱۵ درصد از آب جبرانی برج‌ها) می‌شود. بنابراین، تعویض لوورهای فرسوده می‌تواند در کاهش سهم این نوع از اتلاف آب، مؤثر باشد. این‌که با تعویض

جدول ۵- اثر بخشی اجرای هر سه گزینه در کاهش تلفات آب نیروگاه شهید مدحج

مبلغ صرفه‌جویی در سال (میلیارد تومان)	صرفه‌جویی (مترمکعب در سال)	کاهش حجم آب جبرانی (%)	مصرف آب (مترمکعب به مگاوات در ساعت)	آب جبرانی مورد نیاز (مترمکعب در ساعت)	روش کاهش مصرف آب
۱۰/۵۵	۱,۱۴۶,۷۶۴	۱۶/۴	۲/۵۵	۶۶۹	۱
۱۵/۶۳	۱,۶۹۸,۹۰۹	۲۴/۲	۲/۳۳	۶۰۶	۲
۴/۷۲	۵۱۲,۵۰۵	۷/۳	۲/۸۰	۷۴۱	۳
۱۷/۷۴	۱,۹۲۸,۲۶۲	۲۷/۵	۲/۲۴	۵۸۰	۱+۲
۱۵/۲۷	۱,۶۵۹,۲۶۹	۲۳/۷	۲/۳۵	۶۱۰	۱+۳
۲۰/۳۵	۲,۲۱۱,۴۱۴	۳۱/۶	۲/۱۳	۵۴۸	۲+۳
۲۲/۴۶	۲,۴۴۰,۷۶۷	۳۴/۸	۲/۰۴	۵۲۰	۱+۲+۳

(۲ مترمکعب به‌ازای هر مگاوات ساعت) است. نسبت آب تخلیه برج‌های خنک‌کننده به نرخ تبخیر نیز از ۵۶ به ۲۶ درصد کاهش می‌یابد که نزدیک به مقدار متداول (۲۰ درصد) در ایالات متحده است (EPA, 2017). البته با بررسی دقیق‌تر پدیده نشت، سرریز و بهبود فرآیند نگهداری و تعمیرات می‌توان صرفه‌جویی بیشتری در آب مصرفی ایجاد نمود که بدین منظور باید بر روی کاهش تلفات ناشی از تبخیر تمرکز کرد. در شکل ۳، جریان‌های ورودی و خروجی برج‌های نیروگاه شهید مدحج نشان داده شده است. مطابق این شکل، در اثر اجرای هر سه روش، آب جبرانی از ۸۰۰ به ۵۲۱ مترمکعب در ساعت کاهش می‌یابد.

بدین ترتیب در صورت اجرای هر سه روش، آب مورد نیاز نیروگاه به کم‌ترین مقدار (معادل ۲ مترمکعب به‌ازای هر مگاوات ساعت) کاهش می‌یابد. اجرای هر سه روش سالانه بیش از دو میلیون و چهارصد هزار مترمکعب آب و حدود ۲۲ میلیارد تومان صرفه‌جویی را در پی دارد که با در نظر گرفتن سرانه مصرف آب خانگی معادل ۱۵۰ لیتر به‌ازای هر نفر در روز، حجم آب صرفه‌جویی‌شده معادل آب مورد نیاز روزانه حدود ۴۴۰۰۰ نفر است. بدین ترتیب آب مصرفی نیروگاه از ۳ به ۲ مترمکعب به‌ازای هر مگاوات ساعت (حدود ۳۵ درصد) کاهش می‌یابد که کم‌تر از میانگین مصرف نیروگاه‌های حرارتی مشابه ایرانی (۲/۲ مترمکعب به‌ازای هر مگاوات ساعت) و نزدیک به مقدار متوسط ایالات متحده



شکل ۳- جریان‌های ورودی و خروجی برج‌ها، (الف): وضعیت موجود، (ب): بعد از اجرای روش‌های سه‌گانه

براساس داده‌های عملیاتی و تحلیل‌های انجام‌شده در نیروگاه شهید مدحج، مشخص شد که میزان مصرف آب در بخش بخار نیروگاه معادل ۳ مترمکعب به‌ازای هر مگاوات ساعت است. این مقدار بالاتر از میانگین مصرف آب نیروگاه‌های مشابه در ایران (۲/۲ مترمکعب به‌ازای هر مگاوات ساعت) بوده و در مقایسه با استانداردهای جهانی که کاهش مصرف آب تا حدود ۲ مترمکعب بر مگاوات ساعت را هدف‌گذاری کرده‌اند، بهینه نیست. تحلیل میزان اتلاف آب نشان می‌دهد که ۵۴٪ از آب مصرفی نیروگاه در اثر تبخیر، ۳۰٪ در اثر تخلیه، ۱٪ از طریق پرتاب و ۱۵٪ به دلیل نشت هدر می‌رود. بر این اساس، سه راه‌کار اصلی برای کاهش مصرف آب مورد بررسی قرار گرفتند: (۱) افزایش چرخه غلظت (COC؛ ۲) تصفیه آب تخلیه با روش اسمز معکوس (RO)؛ و (۳) تعویض لوورهای ضد پاشش.

نتایج نشان‌داد اجرای ترکیبی این روش‌ها می‌تواند مصرف آب نیروگاه را تا ۳۵٪ کاهش دهد که معادل صرفه‌جویی بیش از دو میلیون و چهارصد هزار مترمکعب آب در سال است. با این مقدار کاهش مصرف، می‌توان آب مورد نیاز روزانه ۴۴۰۰۰ نفر را تأمین نمود و از نظر اقتصادی نیز سالانه حدود ۲۲ میلیارد تومان در تأمین آب صرفه‌جویی کرد. با توجه به یافته‌های این مطالعه، تحقیقات آینده می‌توانند بر ارزیابی اقتصادی و محیط‌زیستی این راه‌کارها در نیروگاه‌های حرارتی متمرکز شوند. در این راستا، تحلیل چرخه حیات و روش‌های اقتصاد مهندسی می‌توانند برای بررسی تعیین دوره بازگشت سرمایه، هزینه‌های عملیاتی بلندمدت و تأثیرات محیط‌زیستی فناوری‌های پیشنهادی مورد استفاده قرار گیرند. همچنین، بررسی گزینه‌های مناسب مدیریت فاضلاب واحد اسمز معکوس می‌تواند به‌عنوان یک زمینه پژوهشی ارزشمند در راستای بهبود مدیریت مصرف آب و کاهش اثرات محیط‌زیستی در نیروگاه‌های حرارتی مورد توجه قرار گیرد. با وجود نتایج ارزشمند این تحقیق، برخی محدودیت‌ها نیز وجود دارد که باید در تفسیر نتایج مدنظر قرار گیرد. داده‌های مورد استفاده صرفاً به نیروگاه شهید مدحج اهواز مربوط بوده و تعمیم نتایج به سایر نیروگاه‌ها نیازمند بررسی‌های بیشتر است. علاوه بر این، بخشی از پارامترهای مدل‌سازی تحت فرض‌ها، ثابت در نظر گرفته‌شده و تحلیل اقتصادی نیز تنها بر مبنای هزینه آب و تجهیزات صورت پذیرفته است. از سوی دیگر، سناریوهای پیشنهادی صرفاً در قالب محاسبات و تحلیل‌های مقایسه‌ای ارزیابی شدند و اجرای پایلوت یا آزمایش‌های میدانی می‌تواند اعتبار نتایج را در آینده افزایش

۵- قدردانی

نویسندگان این پژوهش از مؤسسه تحقیق و توسعه دانشمند به‌دلیل حمایت‌های ارزشمند و همچنین از مدیریت و کارکنان محترم نیروگاه شهید مدحج اهواز بابت همکاری صمیمانه و ارائه داده‌های عملیاتی مورد نیاز، صمیمانه قدردانی می‌نمایند.

۶- مراجع

ایرجی، ف.، و نجفی، پ.، (۱۴۰۴)، "بررسی کاربرد منابع آب نامتعارف در تأمین پایدار آب: مزایا، محدودیت‌ها و راه‌کارهای اجرایی"، نشریه راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی، ۳(۱)، <https://doi.org/10.30486/TSWS.2025.1206427>، ۲۰-۱.

اسماعیل‌پور، م.، قهرمان‌افشار، م.، و قاسمی‌نژاد، ح.، (۱۴۰۲)، "بررسی مصرف آب در نیروگاه بخار شهید منتظر قائم و ارزیابی فنی-اقتصادی راه‌کارهای بازچرخانی زیرآب بویلرها"، شیمی و مهندسی شیمی / ایران، ۴۲(۴)، ۱۷۷-۱۸۹.

پرهیزکار، ف.، و پورعلی، ا.، (۱۳۹۶)، "بهینه‌سازی تولید هم‌زمان آب شیرین و توان در نیروگاه‌های حرارتی"، علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۲(۱)، ۳۸-۴۵، <https://doi.org/10.22112/jwwse.2017.87963.1029>.

تهامی‌پور زرنندی، م.، و اسماعیل‌زاده هنجی، ع.، (۱۴۰۲)، "ارزیابی پیوند آب-انرژی در صادرات و واردات برق ایران با استفاده از رویکرد آب مجازی"، علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۸(۳)، ۳۵-۴۶، <https://doi.org/10.22112/jwwse.2023.366738.1331>.

حراقی، م.، درویشی، ع.، و حراقی، م.، (۱۴۰۳)، "شناسایی و اولویت‌بندی راه‌کارهای سازگاری با کم‌آبی با بهره‌گیری از روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی و تاپسیس (مطالعه موردی استان بوشهر)"، علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۹(۲)، ۱۷-۳۰.

رمضانی، م.، نظری، م.، و نظری، م.، (۱۴۰۴)، "مدل‌سازی ترمودینامیکی و اعتبارسنجی تجربی بلورساز تحت خلا با گردش اجباری در فرآیند نمک‌زدایی بدون پساب"، نشریه مهندسی مکانیک / امیرکبیر، ۵۷(۱)، ۲۵-۴۲، <https://doi.org/10.22060/mej.2025.23686.7799>.

فدائی‌تهرانی، م.، و ابارشی، م.، (۱۴۰۳)، "بررسی فنی،

- <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100373>.
- Meroney, R.N., (2006), "CFD prediction of cooling tower drift", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 94(6), 463-490, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2006.01.015>.
- Müller, S.I., Chapanova, G., Diekow, T., Kaiser, C., Hamelink, L., Hitsov, I.P., Wyseure, L., Moed, D.H., Palmowski, L., and Wintgens, T., (2024), "Comparison of cooling tower blowdown and enhanced make up water treatment to minimize cooling water footprint", *Journal of Environmental Management*, 367, 121949, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121949>.
- Nihalani, S.A., and Mishra, Y.D., (2020), "Water consumption management for thermal power plant", in: *Environmental Processes and Management: Tools and Practices*, Springer, Cham, 135-153, https://doi.org/10.1007/978-3-030-38152-3_9.
- Pan, S.Y., Snyder, S.W., Packman, A.I., Lin, Y.J., and Chiang, P.C., (2018), "Cooling water use in thermoelectric power generation and its associated challenges for addressing water-energy nexus", *Water-Energy Nexus*, 1(1), 26-41, <https://doi.org/10.1016/j.wen.2018.04.002>.
- Pozzobon, J.C., Mantelli, M.B., and da Silva, A.K., (2016), "Experimental study of unstructured porous media inserts for water recovery in a reduced scale, crossflow cooling tower", *Applied Thermal Engineering*, 96, 632-639, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.039>.
- Qasim, S.R., and Zhu, G., (2017), *Wastewater treatment and reuse theory and design examples*, Volume 2: Post-Treatment, Reuse, and Disposal, CRC Press.
- Seneviratne, M., (2007), *A practical approach to water conservation for commercial and industrial facilities*, Elsevier, Amsterdam.
- Shao, W., Feng, J., Liu, J., Yang, G., Yang, Z., and Wang, J., (2017), "Research on the status of water conservation in the thermal power industry in China", *Energy Procedia*, 105, 3068-3074, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.639>.
- Zhai, H., and Rubin, E.S., (2010), "Performance and cost of wet and dry cooling systems for pulverized coal power plants with and without carbon capture and storage", *Energy Policy*, 38(10), 5653-5660, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.013>.
- محیط‌زیستی و اقتصادی نمک‌زدایی آب شور و تحلیل شرایط برای ایران"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۹(۱)، ۷۱-۸۵، <https://doi.org/10.22112/jwwse.2023.394456.1362>.
- موسوی رینه، س.م.، و یوسفی، ح.، (۱۳۹۹)، "بررسی رد پای آب در تولید برق با تأکید بر انرژی‌های تجدیدپذیر"، *اکوهیدرولوژی*، ۷(۴)، ۱۰۰۷-۱۰۱۹، <https://doi.org/10.22059/ije.2020.308067.1373>.
- هاشم‌پور، ف.، پرداختی، ع.، و جمشیدی، ش.، (۱۴۰۳)، "برآورد پیامدهای محیط‌زیستی تجمعی سامانه‌های نمک‌زدایی بر مبنای شاخص‌های ReCiPe مورد استفاده در ارزیابی چرخه حیات"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۹(۱)، ۱۹-۳۱، <https://doi.org/10.22112/jwwse.2023.364061.1328>.
- Biedunkova, O., Kuznietsov, P., and Korbutiak, V., (2024), "Evaluation of return cooling water reuse in the wet cooled power plant to minimise the impact of water intake and drainage", *Sustainable Chemistry for the Environment*, 7, 100151, <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2024.100151>.
- Costa, C.A.S., Miranda, V., Mantelli, M.B.H., Da Silva, A.K., Modenesi, C.R., and Furlan, L.T., (2014), "Experimental study of flexible, unstructured metal foams as condensation structures", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 57, 102-110, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.04.012>.
- Dehaghani, S.T., and Ahmadikia, H., (2017), "Retrofit of a wet cooling tower in order to reduce water and fan power consumption using a wet/dry approach", *Applied Thermal Engineering*, 125, 1002-1014, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.069>.
- Deziani, M., Rahmani, K., Roudaki, S.M., and Kordloo, M., (2017), "Feasibility study for reduce water evaporative loss in a power plant cooling tower by using air to air heat exchanger with auxiliary fan", *Desalination*, 406, 119-124, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.12.007>.
- EPA, (2017), *Water efficiency management guide mechanical systems*, U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC., www.epa.gov/watersense/commercial-buildings.
- EPRI, (2008), *Water use for electric power generation*, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA., <https://www.epri.com/research/products/000000000001014026>.
- Ghaffour, N., Missimer, T.M., and Amy, G.L., (2013), "Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability", *Desalination*, 309, 197-207, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.10.015>.
- Guerras, L.S., and Martín, M., (2020), "On the water footprint in power production: Sustainable design of wet cooling towers", *Applied Energy*, 263, 114620, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114620>.
- Meramo, S., and González-Delgado, Á.D., (2023), "Exergy and economic optimization of heat-integrated water regeneration networks", *Energy Conversion and Management*: X, 18, 100373,



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.