dx.doi.org/10.22093/wwj.2023.364246.3288

Original Paper

Journal of Water and Wastewater, Vol. 34, No. 3, pp: 1-20

Investigation of Water Consumption in Loshan Power Plant and Technical-Economic Evaluation of the Suggested Solutions to Modify the Consumption Pattern

M. Esmaeilpour[1]*, M. Ghahraman Afshar[2], M. Faghihi[2], M. Rafiei[3]

1. Assist. Prof., Dept. of Chemistry and Process Research, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran
(Corresponding Author) mesmaeilpour@nri.ac.ir
2. Assist. Prof., Dept. of Chemistry and Process Research, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran
3. Laboratory Technician, Dept. of Chemistry, Shahid Beheshti Loshan Power Plant, Jamal Abad, Loshan, Iran

(Received Oct. 2, 2022 Accepted Feb. 19, 2023)

To cite this article:
Esmaeilpour, M., Ghahraman Afshar, M., Faghihi, M., Rafiei, M. 2023. "Investigation of water consumption in Loshan power plant and technical-economic evaluation of the suggested solutions to modify the consumption pattern" Journal of Water and Wastewater, 34(3), 1-20. Doi: 10.22093/wwj.2023.364246.3288. (In Persian)

Abstract

Lack of water is considered the most important threat to the survival of human beings and natural ecosystems. Food and energy security, health and industrial progress, which are the main components of the sustainable development of societies, depend on water more than anything else. Water consumption in Loshan power plant is 2600 L/MWh raw water, which is very high compared to the production capacity and is due to having a tower in its cooling system. Considering the high volume of water consumed in this power plant compared to the production efficiency and on the other hand, reducing the amount of rainfall and droughts that have occurred, it is necessary to provide a solution to modify the consumption pattern for this power plant. Considering the special position of this power plant, solutions to modify the water consumption pattern by recycling clean drains (blow down of boilers, back wash of sand filters and water sampling), purification and recycling the blow down of cooling towers into the water cycle and optimization of cooling towers (replacing drippers, replacing nozzles and optimizing water distribution to increase efficiency, using a rotating nozzle to increase the time and speed of the water droplets hitting the air in order to transfer more heat) are suggested. According to the experimental data, the conductivity of boiler blowdown is about 10 µs/cm and the expenses of recycling the blowdown of boiler by using heat exchanger is estimated about 324.425.000 Rials.

Keywords: Loshan Power Plant, Recycle, Clean Drain, Purification, Optimization of Cooling Tower.

dx.doi.org/10.22093/wwj.2023.364246.3288

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۴، شماره ۳، صفحه: ۲۰-۱

بررسی مصرف آب در نیروگاه لوشان و ارزیابی فنی- اقتصادی راهکارهای پیشنهادی اصلاح الگوی مصرف

محسن اسماعیل‌پور[۱]*، مجید قهرمان افشار[۲]، مرتضی فقیهی[۲]، مهدی رفیعی[۳]

۱- استادیار، گروه پژوهشی شیمی و فرایند، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران
(نویسنده مسئول) mesmaeilpour@nri.ac.ir
۲- استادیار، گروه پژوهشی شیمی و فرایند، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران
۳- کارشناس شیمی، گروه شیمی، نیروگاه شهید بهشتی لوشان، جمال‌آباد، لوشان، ایران

(دریافت ۱۴۰۱/۷/۱۰ پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۳۰)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
اسماعیل‌پور، م.، قهرمان افشار، م.، فقیهی، م.، رفیعی، م.، ۱۴۰۲، "بررسی مصرف آب در نیروگاه لوشان و ارزیابی فنی- اقتصادی راهکارهای پیشنهادی اصلاح الگوی مصرف" مجله آب و فاضلاب، ۳۴(۳)، ۲۰-۱. Doi: 10.22093/wwj.2023.364246.3288

چکیده

کمبود آب، مهمترین تهدید برای بقای بشر و اکوسیستم طبیعی به‌شمار می‌آید. امنیت غذایی و انرژی، بهداشت و پیشرفت صنایع که جزء مؤلفه‌های اصلی توسعه پایدار جوامع به‌شمار می‌آیند، بیش از هر چیزی به آب وابسته‌اند. مصرف آب در نیروگاه لوشان، ۲۶۰۰ L/MWh آب خام است که نسبت به ظرفیت تولید و به‌علت داشتن برج تر در سیستم خنک‌کن آن بسیار زیاد است. با توجه به حجم بالای آب مصرفی در این نیروگاه نسبت به بازده تولید و از طرف دیگر، کاهش میزان بارندگی و خشک‌سالی‌های به‌وجود آمده، ارائه راهکار اصلاح الگوی مصرف برای این نیروگاه امری ضروری است. در این پژوهش، با در نظر گرفتن موقعیت خاص این نیروگاه راهکارهایی برای اصلاح الگوی مصرف آب، از جمله: بازچرخانی بلودان بویلرها، تصفیه و بازچرخانی بلودان برج خنک‌کننده به سیکل آب، خرید پمپ چاه فلمن با دبی کمتر به‌منظور تنظیم دبی آب خام ورودی و جلوگیری از هدررفت آب در فصول مختلف، بهینه‌سازی برج‌های خنک‌کن، از جمله: تعویض قطره‌گیرها، تعویض نازل‌ها و بهینه‌سازی در توزیع آب برای افزایش کارایی بر افزایش سیکل تغلیظ برج‌های خنک‌کننده و استفاده از نازل چرخان به‌منظور افزایش زمان و سرعت برخورد قطرات آب با هوا و در نتیجه انتقال حرارت بیشتر با در نظر گرفتن شرایط فنی و اقتصادی پیشنهاد شد. بر اساس نتایج این پژوهش، میزان هدایت بلودان بویلر برابر ۱۰µs/cm بود که هزینه بازچرخانی بلودان بویلر با به‌کارگیری مبدل حرارتی ۳۲۴،۴۲۵،۰۰۰ ریال برآورد شد.

واژه‌های کلیدی: نیروگاه لوشان، برج‌های خنک‌کن، بلودان بویلر، بلودان برج، بهینه‌سازی برج‌های خنک‌کن

۱- مقدمه

کمبود آب، مهمترین تهدید برای بقای بشر و اکوسیستم طبیعی به‌شمار می‌آید. امنیت غذایی و انرژی، بهداشت و پیشرفت صنایع که جزء مؤلفه‌های اصلی توسعه پایدار جوامع به شمار می‌آیند، بیش از هر چیزی به آب وابسته‌اند (Bakker and Cook, 2011). در کشورهای پیشرفته مانند کانادا، ایالات متحده، فرانسه و آلمان سهم آب اختصاص یافته به صنایع به‌ترتیب ۸۰، ۴۶، ۶۹ و ۶۸ درصد از کل آب مصرفی این کشورها بوده که نشان‌دهنده نقش کلیدی منابع آبی در توسعه صنعتی کشورها است. برای کشورهایی مانند برزیل، چین و هند به‌ترتیب برابر با ۱۷، ۷ و ۴ درصد است. به‌طور مقایسه‌ای میزان آب کل مصرفی بخش صنعت در اروپا حدود ۲۵۰، در آسیا ۲۶۰ و در آمریکای شمالی و جنوبی ۳۵۰ Km^3 در سال است (Abdulla et al., 2013).

در کشورهای در حال توسعه سه رویکرد اصلی و اساسی در حوزه مدیریت منابع آبی، کاهش، بازیافت و بازچرخانی است. در بحث کاهش، تمرکز اصلی روی ایجاد تغییرات مهندسی و فرایندی در کل واحد صنعتی است، به گونه‌ای که کل میزان آب مصرفی در فرایند کاهش یابد (Unesco, 2012). برای این منظور شاخصی فیزیکی در صنایع تولیدی مختلف تعریف می‌شود که بر مبنای آن بهره‌وری آب را در هر صنعت برحسب میزان واحد تولید محصول به آب مصرفی می‌سنجد.

به‌دلیل موقعیت خاص جغرافیایی کشور ایران و کاهش ریزش‌های جوی و محدودیت‌های منابع آب، سهم ایران از کل منابع تجدیدشونده در جهان تنها ۰/۳۴ درصد است و با توجه به ساکن بودن ۱ درصد از کل جمعیت جهان در کشور، ایران جزء فقیرترین کشورها از لحاظ منابع آبی سرانه در قاره آسیا است. با توجه به قرار گرفتن ایران در نواحی خشک و نیمه‌خشک میزان بارندگی و حجم آبهای شیرین ایران به اندازه کافی نیست و ریزش‌های جوی در همه جا یکسان نیست (Hassanzadeh et al., 2021).

مصرف صنعتی آب به ۴ گروه تقسیم می‌شود: نیاز آب خنک‌کننده، نیاز صنایع مادر، نیاز صنایع بزرگ و نیاز صنایع کوچک و متوسط؛ که صنایع کوچک و متوسط کمتر از ۵۰ m^3 در روز آب مصرف می‌کنند. هرچند این رقم در نگاه نخست نسبت به صنایع بزرگ اندک به نظر می‌رسد، اما با در نظر داشتن ۸۱ هزار واحد صنعتی کوچک و متوسط در کشور، حجم انبوهی از آب لازم است (Wu et al., 2016).

از طرف دیگر در ایران استفاده از منابع آبی نامتعارف مانند پساب، آبهای شور، لب شور و آب باران به‌منظور تأمین آب موردنیاز بخش صنعت مغفول مانده و عمده آب موردنیاز صنایع از آبهای سطحی یا منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شوند. ازاین‌رو بیشتر کارخانجات و واحدهای صنعتی در کشور در مناطقی احداث و راه‌اندازی شده‌اند که به منابع آب تازه مانند رودخانه‌ها دسترسی داشته باشند. با توجه به اینکه رودخانه‌ها و آبخوان‌ها، منابع اصلی در تأمین آب شرب بخش شهری به‌شمار می‌روند و با توجه به بحران آب فعلی و مشکلات عدیده دولت در تأمین آب شرب در بخش‌های عمده‌ای از کشور، پیش‌بینی می‌شود که در آینده نه چندان دور شاهد بحران جدی در بخش تأمین آب صنایع و در نتیجه تعطیلی یکی پس از دیگری واحدهای صنعتی باشیم. ازاین‌رو راهکار مؤثر و عملی برای برون‌رفت از این بحران، توجه به منابع آبی جدید مانند پساب‌ها است که ضمن کاهش قابل توجه میزان نیاز صنایع به آب تازه، مشکلات محیط‌زیستی ناشی از تخلیه فاضلاب صنایع را نیز تا حد بسیاری کاهش می‌دهد (Bavar et al., 2018).

با توجه به اینکه بیش از ۶۰ درصد آب مصرفی در صنایع صرف مصارفی همچون خنک کردن و تولید برق می‌شود، بنابراین استفاده از روش‌های جایگزین مانند خنک کردن با هوا یا استفاده از انرژی باد برای تولید الکتریسته، می‌تواند تا حد چشمگیری کاهش میزان مصرف آب را به دنبال داشته باشد (Frenken, 2012). بنابراین به‌منظور تعیین سهم آب مصرفی در هر بخش از نیروگاه بررسی شرایط، میزان و نوع پساب خروجی از نقاط مختلف نیروگاه حائز اهمیت است که از جمله آنها می‌توان به مصرف زیر اشاره کرد:

- بلودان داغ واحدها
- بلودان سرد در برج خنک‌کن
- آبهای ناشی از واحد تصفیه آب و واحد زلال‌سازی آب چگالنده‌ها
- پساب‌های شستشوی شیمیایی (اسیدشویی یا قلیاشویی) لوله‌های بویلر، سوپرهیترها و سایر تجهیزات
- پساب‌های آلوده به ترکیبات نفتی و روغنی
- پساب‌های انسانی

dx.doi.org/10.22093/wwj.2023.364246.3288

- آلودگی حرارتی آب
- پساب‌های ناشی از شستشوی سطوح خارجی (سمت گاز) لوله‌های بویلر، پیش گرمکن‌ها، اکونومایز، سوپرهیتر و کوره
- پساب‌های ناشی از سیستم هیدرولیکی انتقال خاکستر در نیروگاه‌های با سوخت جامد یا زغال سنگ (Panjeshahi et al., 2009, Mariolakos, 2007, Schultz, 2008, Vanrolleghem et al., 2005)

با توجه به حجم زیاد آب مصرفی در نیروگاه‌ها نسبت به بازده تولید و از طرف دیگر کاهش میزان بارندگی و خشک‌سالی‌های به‌وجود آمده، ارائه راهکار اصلاح الگوی مصرف برای نیروگاه‌ها امری ضروری است. حجم قابل توجهی از آب در نیروگاه‌ها به‌دلیل به‌کارگیری از برج خنک‌کننده تر و عدم بازچرخانی کلین‌درین‌ها[1] (بلودان بویلر[2]، بک واش[3] سند فیلترها، آب سمپلینگ و درین نهایی شستشوی فیلترهای رزین‌ها) و بلودان برج‌ها هدر می‌رود. از طرف دیگر، بازچرخانی کلین‌درین‌ها به مخازن آب خام با توجه به کیفیت بالای آنها منجر به افزایش کیفیت آب خام ورودی به تصفیه‌خانه، افزایش ساعات کارکرد فیلترها و کاهش پساب‌های ناشی از فیلترهای تصفیه‌خانه خواهد شد و با توجه به حجم پساب‌های بیان شده، بازچرخانی این نوع پساب‌ها تأثیر قابل توجهی در کاهش مصرف آب و کارایی تولیدی با توجه به میزان آب مصرفی خواهد شد.

بنابراین در این پژوهش، در نیروگاه منتخب لوشان ابتدا سیکل آب و میزان مصرف و تلفات آن در قسمت‌های مختلف سیکل بررسی شد و در نهایت با توجه به اقدامات اصلاحی انجام شده در نیروگاه، جمع‌بندی و اولویت‌بندی راهکارهای پیشنهادی در راستای کاهش مصرف آب و جلوگیری از اتلاف و هدررفت آب با در نظر گرفتن ارزیابی فنی- اقتصادی بررسی شد.

۲- روش انجام کار

در این بخش از پژوهش، فاز عملیاتی پروژه شامل بازدید از نیروگاه، نمونه‌برداری و انجام آزمون‌های فیزیکی شد. در بازدید از نیروگاه سیکل آب- بخار و تجهیزات تصفیه‌خانه بررسی شد.

۲-۱- روش انجام آزمون‌های در محل هدایت، شوری، pH و کدورت آب خنک‌کن

به‌منظور بررسی کیفیت آب در محل، استفاده از دستگاهی که اطمینان از کالیبره بودن آن قبل از انجام آزمون حاصل شده باشد اهمیت زیادی دارد. ازاین‌رو، از پارامترهای pH، هدایت الکتریکی، درصد شوری، سختی و دمای آب با دستگاه آنالیز هدایت‌سنجی و دماسنج برند HANNA مدل (HI 2300 EC/NaCl/TDS Meter) بهره گرفته شد.

۲-۲- روش انجام آزمون‌های شیمیایی سنجش آنیون‌ها و کاتیون‌های آب خنک‌کن

پارامترهای مهم و قابل آنالیز در نمونه‌های آب چرخه خنک‌کن و آب چرخه آب- بخار مانند یون‌های موجود در نمونه نیازمند سنجش دقیق در آزمایشگاه هستند، بنابراین آنالیزهای مربوط به هر یون با روش‌های استاندارد مرسوم در دنیا انجام شد. به‌منظور سنجش یون‌های سدیم و پتاسیم از روش فلیم فوتومتری طبق استاندارد 3500-Na و 3500-K و همچنین برای آنالیز کلسیم و منیزیم از استاندارد 3500 Ca-B و 3500 Mg-B و با روش جذب اتمی استفاده شد. آنالیز نیترات، نیتریت، فلوراید و فسفات موجود در نمونه مطابق روش استاندارد4110SMWW با روش طیف‌سنجی (UV-Vis) انجام شد. آنالیز یون کلرید، سولفات و قلیاییت نمونه نیز به ترتیب با روش تیتراسیون موهر، تیتراسیون باریم وتیتراسیون با HCl انجام شد. استاندارد انجام این آزمون‌ها نیز روش 4500 Cl، 4110 SMWW و 2320 B SMWW بود.

۳- آشنایی با سیکل آب نیروگاه لوشان و بررسی میزان مصرف و تلفات آب

به‌منظور توسعه شبکه تولید برق کشور در نیمه دوم سال ۱۳۴۸، قرارداد احداث دو واحد نیروگاه بخار هر یک به قدرت ۱۲۰ مگاوات به‌نام نیروگاه منجیل منعقد و در نیمه دوم سال ۱۳۵۲ وارد شبکه سراسری شد که بعدها به‌نام نیروگاه شهید بهشتی لوشان نامیده شد و تاکنون بهره‌برداری از آن به‌عهده شرکت مدیریت تولید برق لوشان است. همچنین در سال ۱۳۵۶ نیز دو واحد گازی هر یک به قدرت ۶۰ مگاوات احداث شد که جمع تولید نیروگاه را به ۳۶۰ مگاوات رساند که شامل ۲ واحد گازی ۶۰ مگاواتی و ۲ واحد بخار

[1] Clean Drain
[2] Blowdown Boiler
[3] Back Wash

۱۲۰ مگاواتی ساخت شرکت زیمنس آلمان است. واحدهای بخش بخار در سال ۱۳۵۱ و واحدهای بخش گاز در سال ۱۳۵۶ به بهره‌برداری رسیده‌اند. سوخت این نیروگاه گاز طبیعی و سوخت پشتیبان نفت گاز (گازوئیل) است. منبع تأمینی آب نیروگاه چاه‌های حفر شده در بستر رودخانه است که آب روزانه موردنیاز نیروگاه را تأمین می‌کند.

آب استحصالی موردنیاز نیروگاه از طریق چاه فلمن (کم‌عمق) در کنار رودخانه شاهرود تأمین می‌شود که قابلیت تأمین ۱۱۰۰ m^3/h در مکانیسم ظرفیت طراحی خود را دارد. امروزه میانگین آب تأمینی موردنیاز نیروگاه حدوداً برابر با ۷۰۰ m^3/h است که در سال‌های اخیر میزان هدایت الکتریکی آن افزایش یافته و بین مقدار ۹۰۰ تا ۲۰۰۰ µs/cm با توجه به فصول سال متغیر است. با این وجود میزان هدایت الکتریکی میانگین سالیانه تقریباً برابر با ۱۲۵۰ µs/cm است. میزان هدایت الکتریکی آب در ماه‌های آبان، آذر و دی افزایش قابل توجهی داشته و به‌عنوان مثال در آبان ماه (۱۳۹۹/۰۸/۳۰) تا حدود ۱۷۰۰ µs/cm نیز رسیده است.

در حد فاصل ۵۰۰ متری چاه تا نیروگاه، فلومتر عدد یکسانی را نشان می‌دهد که تأییدکننده عدم نشتی و هدررفت آب در خطوط انتقال است. سپس آب خام انتقالی از چاه فلمن وارد منبع ذخیره‌ساز هوایی شده و به‌منظور تهیه آب نرم، وارد ۲ کلاریفایر[1] می‌شود. در کلاریفایر تزریقات فریک کلرید و آب آهک صورت می‌گیرد. درین کلاریفایر به‌صورت تخلیه لجن از کف‌سازه انجام می‌شود، به‌صورتی که در طول ۲۴ ساعت سه بار و حدوداً به‌مدت ۱۵ دقیقه با دو پمپ ۴۵ m^3 بر ساعت تخلیه لجن انجام شود. در مجموع حجم تخلیه لجن هر کلاریفایر در ۲۴ ساعت ۷۰ m^3 است که حدود ۳۰ درصد کل درین لجن و مابقی آن را آب تشکیل می‌دهد. لجن تخلیه شده توسط دستگاه فیلتر پرس به‌صورت کیک درآمده و آب آن برای استفاده مجدد به حوضچه برج پمپ می‌شود (شکل ۱).

پس از کلاریفایر، آب وارد حوضچه روباز (شکل ۲) با ظرفیت ۲۰۰۰ m^3 می‌شود که از این آب به‌منظور تغذیه برج‌های خنک‌کننده تر و تصفیه‌خانه استفاده می‌شود. سپس آب از حوضچه‌های روباز وارد دو فیلتر شنی شده و بعد از تصفیه به حوضچه رو بسته (ظرفیت ۲۰۰ m^3) منتقل می‌شود. از آب موجود در حوضچه رو بسته به‌منظور مصارف آشامیدنی (حداکثر ۱۰ m^3/day) و تصفیه‌خانه نیروگاه (۳۵ m^3/h آب دمین) استفاده می‌شود (شکل ۲).

از فیلترهای شنی همیشه یکی فعال و دیگری در حالت آماده به کار قرار دارد (شکل ۳). میزان آب موردنیاز بک‌واش سند فیلترها حدوداً ۷۰ m^3/day (میانگین ۲ بار بک‌واش، هر بار ۳۵ m^3) است که در نهایت این آب به رودخانه شاهرود منتقل شده و تصفیه و برگشت آن به سیکل آب انجام نمی‌شود.

تصفیه‌خانه این نیروگاه شامل ۲ ترین است که هر ترین شامل ۲ فیلتر کاتیونی، ۲ آنیونی و یک میکسبد می‌باشد و همیشه یکی از ترین‌ها در سرویس و دیگری در حالت آماده به کار است. حجم پساب تولیدی از احیای رزین‌ها برای هر فیلتر رزینی برابر با ۱۲ m^3/day و در مجموع برای ۵ تا فیلتر (۲ کاتیونی، ۲ آنیونی و ۱ میکسبد) برابر با ۶۰ m^3/day (یک‌بار احیا در روز) است. پساب حاصل مطابق با شکل ۴ وارد حوضچه‌های خنثی‌سازی موجود در زیر تصفیه‌خانه می‌شود.

اما در سالیان اخیر خنثی‌سازی این پساب‌ها انجام نمی‌شود و در نهایت به سمت رودخانه انتقال می‌یابد. ازاین‌رو پساب‌های ناشی از احیای رزین‌ها در این نیروگاه تصفیه و بازیافت نشده و وارد سیکل آب نمی‌شوند. دلیل عدم خنثی‌سازی پساب‌های ناشی از احیای رزین‌ها خرابی pH متر و عدم تعمیر و جایگزینی آن بیان شده است. در سالیان اخیر نیز با توجه به مستهلک بودن رزین‌ها و عدم تعویض آنها تعداد دفعات احیای رزین‌ها افزایش یافته که این موضوع میزان پساب تولیدی ناشی از احیای رزین‌ها را افزایش داده است.

آب دمین تولیدی (۳۵ m^3/h)، سپس وارد مخازن ذخیره‌سازی آب دمین شده و از این آب به‌منظور تغذیه سیکل نیروگاه استفاده می‌شود. حجم بلودان تولیدی روزانه بویلرها ۲۴۰ m^3 است (۵ m^3/h برای هر بویلر) که خروجی بویلرها از طریق کانال به سمت رودخانه هدایت می‌شود. لازم به توضیح است که بلودان بویلرها در این نیروگاه تصفیه و بازیافت نشده و وارد سیکل آب نیروگاه نمی‌شود. همچنین بخارات خروجی از بلودان تانک نیز مطابق با شکل بازیافت و وارد سیکل آب نمی‌شود (شکل ۵).

[1] Reactivator

Fig. 1. Image of the elevated water storage tank, clarifier, sludge and wastewater transfer pumps, and the storage place for sludge and clarifier sediments

شکل ۱- تصویر منبع ذخیره‌ساز هوایی، کلاریفایر، پمپ‌های انتقال لجن و پساب و محل ذخیره لجن‌ها و رسوبات کلاریفایر

Fig. 2. Picture of the open pond of Loshan power plant

شکل ۲- تصویر حوضچه روباز نیروگاه لوشان

Fig. 3. The image of the sand filters and the produced water stored in the closed pond after passing through the sand filters

شکل ۳- تصویر فیلترهای شنی و آب تولیدی ذخیره شده در حوضچه رو بسته بعد از عبور از فیلترهای شنی

Fig. 4. The image of cationic, anionic and mixed-bed filters and the neutralization pond of resin regeneration effluents

شکل ۴- تصویر فیلترهای کاتیونی، آنیونی و میکسبد و حوضچه خنثی‌سازی پساب‌های احیای رزین

Fig. 5. Image of blowdown tank, blowdown outlet towards the outlet channel and blowdown vapors in Loshan power plant

شکل ۵- تصویر بلودان تانک، خروجی بلودان به سمت کانال خروجی و بخارات بلودان در نیروگاه لوشان

میزان آب سمپلینگ تولیدی حدوداً ۲ تا ۳ m^3/day است که در نهایت به سمت رودخانه شاهرود منتقل می‌شود. ازاین‌رو تصفیه آب سمپلینگ و بازیافت آن به سیکل آب نیروگاه انجام نمی‌شود. در این نیروگاه با توجه به نوع طراحی برج خنک‌کننده که به‌صورت تر جریان متقاطع است، حدود ۹۰ درصد آب مصرفی را به خود اختصاص می‌دهد (۶ سل و ۶ فن). آب موردنیاز برج از طریق حوضچه روباز تأمین می‌شود که میزان آب جبرانی هر دو برج برابر با ۴۵۰ تا ۵۰۰ m^3/h است. میزان بلودان دو برج حدوداً برابر با ۳۰۰ m^3/h است که ابتدا وارد ۳ استخر ته‌نشینی شده و در نهایت به رودخانه ریخته می‌شود. میزان تبخیر، دریفت و پاشش در برج‌های خنک‌کننده تر نیز برابر با ۱۵۰ تا ۲۰۰ m^3/h است. ازاین‌رو اقدامات اصلاحی برای کاهش تبخیر، دریفت و همچنین تصفیه و بازچرخانی بلودان‌های برج به سیکل آب در این نیروگاه انجام نشده است (شکل ۶).

شکل ۷ واحد گازی و سیستم خنک‌کاری روغن در این نیروگاه را نمایش می‌دهد که حجم کل آب خام مصرفی برابر با ۵ m^3/h است. استفاده از آب خام برای خنک‌کاری روغن منجر به ایجاد رسوبات فراوان، عملکرد کارایی کم خنک‌کاری و نشتی‌ها در

Fig. 6. The picture of the cooling tower of the cross flow and the exit path of blow down

شکل ۶- تصویر برج خنک‌کننده تر جریان متقاطع و مسیر بلودان خروجی

Fig. 7. Image of gas units and oil cooling system

شکل ۷- تصویر واحدهای گازی و سیستم خنک‌کننده روغن

سیستم‌های خنک‌کاری شده که میزان مصارف آب در این قسمت را افزایش داده است. اسیدشویی و قلیاشویی واحدها در این نیروگاه تقریباً هر ۵ سال یک‌بار انجام می‌شود که حجم قابل توجهی از پساب را به خود اختصاص نمی‌دهد و در نهایت این پساب‌های تولیدی وارد استخرهای تبخیری می‌شود.

همچنین با توجه به نوع کنترل شیمیایی AVT[1] و تزریقات آمونیاک و هیدرازین، خوردگی‌های فراوانی در بویلرها مشاهده شده، ازاین‌رو نیاز مبرم به بهینه‌سازی تزریقات با توجه به تغییر کیفیت آب در سال‌های اخیر و بازرسی‌های دوره‌ای منظم به شدت احساس می‌شود. فاضلاب‌های بهداشتی (۲۰۰ m^3 روزانه) در این نیروگاه از طریق یک لاین به سمت تصفیه‌خانه بهداشتی ارسال شده و در آنجا با به‌کارگیری از روش دیسک بیولوژیکی گردان[2] تصفیه اولیه انجام شده و پس از تزریق آب ژاول به رودخانه ریخته می‌شود. آب موردنیاز برای مصارف آتش‌نشانی، آبیاری درختان و فضای سبز از طریق آب خام ورودی تأمین می‌شود و حجم دقیقی از آن در دسترس نیست.

همچنین آبیاری درختان در این نیروگاه هم به صورت قطره‌ای و هم غرقابی انجام می‌شود. حجم کلی پساب‌ها در این نیروگاه روزانه

[1] All Volatile Treatment (AVT)

[2] Rotating Biological Contactor (RBC)

حدود m^3 ۴۸۰۰ است که تصفیه و بازچرخانی آن به سیکل آب نیروگاه و مصارف داخلی انجام نمی‌شود.

همچنین یکی از مشکلات در زمینه برگشت کلین‌درین (بویلر، سمپلینگ و بک‌واش سند فیلترها) به آب خام این است که آب موردنیاز آشامیدنی نیروگاه از طریق آب بعد از سند فیلترها تأمین می‌شود و با توجه به تزریقات شیمیایی انجام شده در بویلرها بازگرداندن آب کلین‌درین‌ها به آب خام می‌تواند مشکل‌ساز شود. ازاین‌رو جداسازی لاین تأمینی آب آشامیدنی از آب تأمین‌کننده سیکل لازم و ضروری است.

تمامی اطلاعات موردنیاز مانند منبع تأمین آب، حجم آب تأمینی، حجم درین کلاریفایر و حجم آب موردنیاز بک‌واش سند فیلترها در جدول ۱ خلاصه شده است. همان طور که در نتایج این جدول مشاهده می‌شود، حجم آب بلودان برای برج خنک‌کننده زیاد است ($۷۲۰۰ m^3/day$). بعد از آن حجم بلودان بویلر نیز قابل توجه و به میزان $۲۴۰ m^3/day$ است. سایر موارد آب و پساب هم نشان می‌دهد که میزان هدررفت آب از نیروگاه به شکل آب مصرفی و پساب بالا بوده و اهمیت بازچرخانی این آبها را نشان می‌دهد.

۴- نتایج و دستاوردهای تجربی، اقدامات اصلاحی و راهکارهای انجام شده در نیروگاه لوشان برای اصلاح الگوی مصرف آب

- پیگیری آبیاری به روش قطره‌ای برای درختان زیتون و فضای سبز نیروگاه
- تشکیل کمیته تخصصی بهینه‌سازی مصرف آب در نیروگاه و برگزاری جلسات و تصمیم‌گیری‌های لازم
- مدیریت بهره‌برداری از فن‌های برج خنک‌کننده
- کنترل پارامترهای شیمیایی و مصرف مجدد آب هیدروتست بویلر در سیکل
- تعمیر درین ولوهای برج خنک‌کن و نصب درپوش‌های مناسب برای کنترل سرریز از حوضچه آب سرد
- تنظیم دبی آب پمپ‌های چاه فلمن متناسب با تغییرات بار واحدهای بخار
- تقاضای خرید پمپ چاه فلمن با دبی کمتر به‌منظور تنظیم دبی آب خام ورودی و جلوگیری از هدررفت آب در فصول مختلف سال

۵- بررسی میزان اثربخشی اقدامات اصلاحی انجام شده برای کاهش آب مصرفی در نیروگاه شهید بهشتی لوشان

حجم کلی پساب تولیدی در این نیروگاه $۱۴۴۰۰۰ m^3/month$ است. در این نیروگاه پساب‌ها و آب کلین‌درین ناشی از احیای رزین‌های کاتیونی، آنیونی و میکسبد، بک‌واش سند فیلترها، آب سمپلینگ، درین کلاریفایرها، بلودان بویلرها، بلودان برج‌های خنک‌کننده، آب مخلوط با روغن و اسیدشویی و قلیاشویی واحدهای تصفیه نشده و بازچرخانی آنها به سیکل آب انجام نمی‌شود. با توجه به کیفیت آب کلین‌درین بلودان بویلرها ($۷۲۰۰ m^3/month$)، آب سمپلینگ ($۷۵ m^3/month$)، بک‌واش سند فیلترها ($۲۱۰۰ m^3/month$) و همچنین بلودان برج‌های خنک‌کننده ($۲۱۶۰۰۰ m^3/month$) و با توجه به حجم قابل توجه آنها، تصفیه و بازچرخانی آب کلین‌درین‌ها به سیکل آب لازم و ضروری است.

یکی از دلایل اصلی مصرف زیاد آب در این نیروگاه، طراحی و به‌کارگیری برج‌های خنک‌کننده تر است. با توجه به اینکه حجم آب جبرانی برج‌های خنک‌کننده حدود $۱۲۰۰۰ m^3/day$ است و با در نظر گرفتن آب استحصالی روزانه ($۱۶۸۰۰ m^3/day$) حجم قابل توجهی از آب استحصالی از چاه‌ها در برج‌های خنک‌کننده از طریق بلودان، تبخیر، پاشش و دریفت مصرف می‌شود. ازاین‌رو ارائه راهکارها و اقدامات اصلاحی برای تصفیه و بازچرخانی بلودان برج‌های خنک‌کننده به سیکل آب ($۷۲۰۰ m^3/day$) با توجه به حجم قابل توجهی از هدررفت و اتلاف آب در این بخش لازم و ضروری است. به‌طور کلی با توجه به نوع طراحی نیروگاه و به‌کارگیری برج‌های خنک‌کننده تر، میزان آب استحصالی و تأمینی نیروگاه قابل توجه بوده است و از طرف دیگر با توجه به عدم تصفیه و بازچرخانی کلین‌درین‌ها و پساب‌های تولیدی به سیکل آب حجم اتلاف و هدررفت قابل ملاحظه است، بنابراین راهکارها و اقدامات اصلاحی مؤثری در زمینه کاهش هدررفت و اتلاف آب در این نیروگاه انجام نشده است.

۶- جمع‌بندی و اولویت‌بندی راهکارهای پیشنهادی در راستای کاهش اتلاف و هدررفت آب در نیروگاه لوشان

جمع‌بندی و اولویت‌بندی راهکارهای پیشنهادی با در نظر گرفتن

جدول ۱- مدارک، مستندات و اطلاعات سیکل آب نیروگاه لوشان

Table 1. Questions, reply and information about the water cycle of Loshan power plant

Question	Reply	Information and details
Power plant water supply source	Felman well	A well dug next to the Shahrood river bed
Supply water volume	1100 m^3/h (nominal capacity) 700 m^3/h (operating capacity) 5 m^3/h cooling systems of gas units	
Is there a significant difference in the volume of water extracted from the supply source and the water entering the power plant?	No	Between the Felman well and the entrance of the power plant (500 m of water transmission line), the flowmeter shows the same number (no leakage and water wastage)
The volume of the clarifier	140 m^3/day for both clarifiers	During 24 hours, the sludge is drained three times for about 15 minutes, and there is about 30% of mud in the sludge and the rest is water. The sludge discharged by the filter press is turned into a cake and its water is pumped to the tower pond for reuse
The amount of water needed to wash the filter paper	70 m^3/day (2 times backwash/ each time 35 m^3)	Failure to purify and recycle the backwash water of the filters/transfer to the Shahrood river
The volume of water required for regeneration of resin filters	60 m^3/day (2 cationic, 2 anionic and one mixed waste/production waste in regeneration of each resin 12 m^3/day	Failure to neutralize the effluent in recent years due to the failure of the pH meter and lack of repair and replacement/failure of final treatment and transfer to the river
Daily volume of boilers	240 m^3/day (5 m^3/h for each boiler)	Failure to purify and recycle the blue dust of boilers
Sampling water volume	2-3 m^3/day	No purification and recycling to the water cycle
The compensation water volume of the cooling towers	12000 m^3/day (2 cooling tower 450 m^3/h (225 m^3/h HR tower)	250 m^3/h for each cooling tower in maximum load mode
The volume of cooling towers	300 m^3/h (150 m^3/h tower)	-
Volume of evaporation, spray, drift, etc., of water in cooling towers	150-200 m^3/h (200 m^3/h at peak load)	According to the type of cooling tower design , the amount of water loss through evaporation, spraying, drift, etc., is high
The volume of wastewater resulting from acid washing and alkaline washing of units	There is no exact information	About once every 5 years and does not occupy a significant volume
The total volume of power plant effluent	4800 m^3/day	-
The volume of sanitary sewage	200 m^3/day	Sanitary water and wastewater are purified in the sanitary treatment plant by using the rotating biological disc method and after injecting the water of Javal, it is transferred to the river
Is the power plant's effluent treated? (Brief description of the water purification process)	No	The water and wastewater resulting from the washing of filter paper, resin filters, acid washing and alkali washing units, boilers and cooling towers, sampling water is finally transferred to the Shahrood river
In the case of wastewater treatment, for what purpose is the treated water used?	-	-
What is the source of water supply for green space irrigation? How are firefighting units and administrative cooling systems in the power plant are irrigated, passages washed, elements cleaned and washed?	- Raw water -In some cases, wastewater is used for irrigation	The exact amount of water required for these purposes is not available

dx.doi.org/10.22093/wwj.2023.364246.3288

شرایط فنی و اقتصادی، مذاکره با کارشناسان و بهره‌برداران نیروگاهی و شرکت‌های متخصص در زمینه تصفیه و بازچرخانی آب و پساب انجام شده که به‌طور خلاصه در جدول ۲ آمده است. همان طور که در این جدول مشاهده می‌شود، تعداد راهکارهای پیشنهادی برای کاهش اتلاف، متنوع و زیاد است. این موضوع به این دلیل است که متاسفانه در نیروگاه لوشان اقدام مؤثری برای عمده آب مصرفی و پساب انجام نشده است. در بخش‌های مختلف نیروگاه لوشان به‌ویژه برای بلودان بویلر، بلودان برج خنک‌کننده و سایر پساب‌ها نیاز است که اقدامات اساسی انجام شود. با توجه به کیفیت و میزان حجم آبهای مصرف شده و پساب‌ها که در جدول ۲ بیان شده، می‌توان گفت که دو مورد بازچرخانی کلین‌درین‌ها (به‌ویژه بلودان بویلر) و بلودان برج خنک‌کننده، اولویت بیشتری نسبت به سایر موارد دارند. ازاین‌رو در ادامه به آنالیز کیفیت بلودان بویلر و بلودان برج خنک‌کننده پرداخته می‌شود تا بتوان از بین این دو، یکی را به‌عنوان راهکار با اولویت بیشتر انتخاب کرد.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳ مربوط به آنالیز بلودان بویلر، میزان هدایت آب بلودان بویلر (۱۰/۸ µs/cm) گزارش شد که کیفیت بلودان بویلر نسبت به آب خام بسیار مناسب است، بنابراین اضافه کردن آب بلودان بویلر منجر به افزایش کیفیت آب خام ورودی در مخازن نگهداری می‌شود. در نتیجه افزودن بلودان بویلر به آب خام فشار روی فیلترهای موجود در تصفیه‌خانه را کاهش می‌دهد. همچنین این فرایند بهبود عملکرد نیروگاهی، کاهش میزان مصارف اسید و باز برای احیا و همچنین کاهش میزان پساب ناشی از احیای فیلترهای کاتیونی، آنیونی و میکسدبد را به دنبال خواهد داشت، بنابراین افزودن آب کلین‌درین به آب خام از راهکارهای اصلی اصلاح الگوی مصرف است.

با توجه به حجم بالای بلودان برج‌های خنک‌کننده و نتایج آنالیز حاصل از آن و داشتن هدایت در بازه ۴/۷۹ ms/cm بازچرخانی آب بلودان برج خنک‌کن از جمله راهکارهای اولویت‌دار اصلاح الگوی مصرف محسوب می‌شود. با توجه به غلظت زیاد یون‌های کلسیم (۵۱۷ ppm) و آلکالینیتی (۸۰/۸ ppm) اضافه کردن منعقدکننده و کمک منعقدکننده‌های ویژه مانند پلی‌آلومینیم کلرید[1] در کلاریفایر به‌منظور بازچرخانی بلودان برج خنک‌کننده نیز می‌تواند مدنظر قرار داده شود. همچنین از جمله راهکارهای دیگر و پیشرفته به‌کارگیری فیلترهای شنی، اولترافیلتراسیون و فیلترهای غشایی RO در راستای تصفیه و بازچرخانی این نوع پساب‌ها است (جدول ۴).

جمع‌بندی آنالیزهای بلودان بویلر و بلودان برج خنک‌کننده نشان می‌دهد که کیفیت بلودان بویلر بسیار بهتر از کیفیت بلودان برج خنک‌کننده است. کیفیت مناسب بلودان بویلر این امکان را می‌دهد که بدون نیاز به تصفیه بتوان آن را به آب خام ورودی برگرداند و نیازی به احداث تجهیزات خاصی نیست. این در حالی است که کیفیت پایین بلودان برج خنک‌کننده نیاز به تصفیه اساسی دارد. برای تصفیه بلودان برج خنک‌کننده نیاز به احداث سامانه‌هایی مانند فیلتر شنی، غشای اولترافیلتراسیون و اسمز معکوس یا به‌کارگیری مواد منعقدکننده و کمک منعقدکننده است که هزینه‌های بسیار زیادی دارد. مشکل هزینه‌های زیاد تصفیه‌خانه برای بلودان برج خنک‌کننده، باعث شد که با وجود حجم زیاد این بلودان، راهکار بازگردانی بلودان برج خنک‌کننده از اولویت اول کنار گذاشته شود. این در حالی است که برای بازچرخانی بلودان بویلر نیاز به صرف هزینه‌های هنگفت نیست و با توجه به حجم قالب توجه این بلودان، بازچرخانی بلودان بویلر به‌عنوان اولویت اصلی برای اجرا در نظر گرفته شد.

۷- ارزیابی فنی- اقتصادی راهکارهای با اولویت بالا در نیروگاه لوشان

از جمله راهکارهای با اولویت بالا به‌منظور جلوگیری از اتلاف و هدررفت آب در نیروگاه لوشان بازچرخانی بلودان بویلرها است، بنابراین در ادامه ابتدا به بررسی روش‌های مختلف اجرای این راهکار می‌پردازیم و در نهایت روش ارجح پیشنهاد می‌شود.

۷-۱- روش‌ها و راهکارهای بازچرخانی بلودان بویلرها

با توجه به کیفیت بالا و حجم قابل توجه بلودان بویلرها (هدایت الکتریکی کمتر از ۴۰ µs/cm)، بازچرخانی بلودان منجر به کاهش جدی در میزان مصرف آب خام ورودی، افزایش کیفیت آب ورودی به تصفیه‌خانه، به تبع آن کاهش فشار بر فیلترهای تصفیه‌خانه و در نتیجه منجر به کاهش جدی در مصرف مواد

[1] Polyaluminium Chloride (PAC)

جدول ۲- جمع‌بندی و اولویت‌بندی راهکارهای پیشنهادی

Table 2. Summary and prioritization of the proposed solutions

Suggested solutions to modify the pattern of water consumption	Description
Loshan Shahid Beheshti power plant	
Buying a Fellman well pump with a lower flow rate to regulate the flow rate of incoming raw water and prevent water wastage in different seasons of the year	
Recirculation of clean drains such as blowdown boilers, sampling water, backwash of sand filters and in the final stage of washing resin filters into the water cycle	
Refining and recirculating the cooling tower sludge the water cycle into	Reusing the water coming out of the tower using the RO system
Optimization of cooling towers	Replacing drippers, replacing nozzles and optimizing water distribution to increase tower efficiency
Increasing the condensation cycle of cooling towers	
Optimization and regular and periodic monitoring of cooling tower compensation water flow	
Performing water operations in the cooling tower	Using appropriate doses of biocide, corrosion inhibitors and anti-sediments
Changing the design and material of the fan blades from aluminum to fiberglass with wider blades	It provides the possibility of increasing the air flow rate and reducing the electricity consumption
Changing the angle of the lavers	It leads to the reduction of water drops from the body of the tower
Use of drippers with greater thickness in the tower	It leads to the reduction of water drops from the tower
Changing the type of drippers to polypropylene	Reducing the complications of failure and water loss
Using a rotating nozzle	Increasing the time and speed of water droplets hitting the air and, as a result, more heat transfer
Using ozone to purify the water of the cooling tower	
Using soft water instead of raw water in the oil cooling system in the gas unit	The use of raw water has led to the formation of a lot of sediment, the low efficiency of the cooling system and leakage, which has increased the amount of water consumed in this system. Therefore, in order to solve the aforementioned problems, it is recommended to use high quality water such as soft water
Water storage during equipment repair, especially in cooling towers	Reducing the emergency exit of steam units and water storage resulting from being out of service
Replacement of cationic, anionic and bad mix resins due to their wear and tear and the urgent need for regeneration	In recent years, due to the wear and tear of resins, the number of times resins are regenerated, and as a result, the amount of produced waste water, has increased, which itself is one of the factors of water consumption and wastage
Installation of the RO system at the inlet of the compensation water of the cooling tower	To reduce the water hardness and increase the degree of concentration in the cooling tower
Automatic tower fan speed change system	
Use of quality consumable parts and spare parts	
Use of clean water in these units for watering trees and green spaces and for firefighting purposes	In this power plant, raw water is used to irrigate trees and green spaces and for firefighting purposes, and in case of sewage treatment or use of clean drains, the need for raw water for these purposes disappears
Use and recycling of sanitary wastewater for internal uses in the power plant, such as watering trees and green spaces	In this power plant, the sanitary wastewater is purified by using the RBC method and then the raw water is injected, but it is not used for the purposes inside the power plant
Separation of drinking and administrative water in the power plant from the water cycle of the units	One of the problems in the field of returning the waste water of the units and clean drain (boiler, sampling and backwash of the sand filters) to raw water is that the drinking water required by the power plant is supplied through the water after the sand filters (covered pool); Due to the chemical injections made in the boilers, returning the clean water from the drains to the raw water can be problematic. Therefore, it is necessary

ادامه جدول ۲- جمع‌بندی و اولویت‌بندی راهکارهای پیشنهادی

Cont. Table 2. Summary and prioritization of the proposed solutions

Suggested solutions to modify the pattern of water consumption	Description
	to separate the drinking water supply line from the cycle water supply line
Performing periodic and regular inspections to control and monitor corrosion according to the risk of the equipment (Risk Based Inspection)	This issue leads to the reduction of corrosion and leaks and plays an important role in reducing water consumption and preventing its wastage
Using corrosion coupons to monitor corrosion in the water cycle, especially systems under high pressure and temperature	
Optimization and precise chemical control of injections (trisodium phosphate and hydrazine) in boilers	In recent years, the quality of water has decreased significantly compared to the design time, while the amount of injections is still according to the design and commissioning time of the power plant, and this has led to a lot of corrosion in the boilers.
Using advanced irrigation methods such as drip, spring, etc., to reduce water consumption and wastage	
Increasing the cooling capacity of the cooling tower	Pre-cooling of water entering the tower by air coolers using Haysis software
Condensation of vapors caused by clean bluedans in boilers	
Condensate steam exiting from the cooling tower	
Using a magnetic hardener in the cooling tower	
Reuse of sanitary wastewater treated in cooling tower compensation water	Using A^2O system, secondary sedimentation, ozonation, sand filter and finally activated carbon
Treatment of wastewater resulting from the regeneration of cationic, anionic and mixed-bad resins and recycling it into the water cycle	
Neutralization, purification and recycling of wastes from acid washing and alkaline washing of units	
Changing the chemical control regime from AVT to CWT	
Change of cross-flow cooling towers to direct dry towers (ACC)	

جدول ۳- آنالیز بلودان بویلر واحد ۱ بخار درسال ۱۴۰۱ نیروگاه شهید بهشتی لوشان

Table 3. Analysis of Blowdown boiler unit 1 steam in 1401 Shahid Beheshti Loshan power plant

Parameters	Values
pH at 25 ^oC	9.10
Cond. (µs/cm)	10.80
SiO_2/ppb	72.00
Fe/ ppb	25.00
P_2O_5/ ppm	0.73
N_2H_4/ ppm	0.00
NH_3/ ppb	340.00
O_2/ppb	2.00
Cu/ ppb	0.00
Load/ MW	120.00
Drum Pressure/ Kp/cm^2	134.00

جدول ۴- نتایج مجموع آزمون‌های بررسی شاخص‌های pH، هدایت، شوری، کدورت و سنجش آنیون‌ها و کاتیون‌های بلودان برج خنک‌کننده در نیروگاه لوشان

Table 4. The total results of the tests of pH parameters, conductivity, salinity, turbidity and measurement of anions and cations of blowdown cooling tower in Loshan power plant

Parameters	Values
pH at 25 °C	8.20
T/ °C	27.60
Cond/ ms	4.79
Salt Perc./ %NaCl	8.00
Hardness/ g/L	2.38
Na^{+}/ ppm	570.00
K^{+}/ ppm	12.00
Ca^{2+}/ ppm	517.00
Mg^{2+}/ ppm	128.50
NO_3^{-}/ ppm	27.60
Cl^{-}/ ppm	629.20
SO_4^{2-}/ ppm	2126.00
T-Alkalinity/ ppm	80.80
NO_2^{-}/ ppm	0.04
PO_4^{3-}/ ppm	1.6
F^{-}/ ppm	0.8

شیمیایی خواهد شد. یکی از مشکلات موجود در بازچرخانی بلودان‌ها دمای بالای آنها است که منجر به تخریب فیلترهای موجود در تصفیه‌خانه خواهد شد. بنابراین کاهش دمای بلودان بویلرها قبل از ورود به تصفیه‌خانه آب خام بسیار حائز اهمیت است. در ادامه به تعدادی از روش‌های مؤثر برای بازچرخانی بلودان بویلرها اشاره شده است.

۷-۱-۱- استخر فواره‌دار

به‌کارگیری روش فواره‌ای و انجام فرایند تبخیر در خنک‌سازی آب، منجر به بازگردانی حدود ۶۵ درصد از کل بلودان به سیکل آب خواهد شد. همچنین نتایج بررسی‌ها حاکی از آن است که با اضافه شدن آب بلودان بویلرها به آب خام، به‌طور کلی حدود ۲۵درصد از مصرف آب خام کاسته خواهد شد. همچنین یکی دیگر از راهکارها برای کاهش درجه حرارت بلودان بویلرها، اسپری با آب خام و ذخیره‌سازی در مخازن بتنی است. در صورتی که کیفیت آب بلودان بویلرها در محدوده استانداردهای لازم نباشد، بعد از عبور از یک فیلتر کارتریجی مجدداً به تانک‌های آب خام ارسال می‌شود (Ehyaei, 2014).

۷-۱-۲- مبدل حرارتی

به‌کارگیری مبدل حرارتی در خروجی بلودان تانک یکی از راهکارهای مؤثر در زمینه بازچرخانی بلودان بویلر است. استفاده از مبدل حرارتی علاوه بر کاهش دمای بلودان منجر به افزایش دمای آب تغذیه بویلر و صرفه‌جویی در انرژی خواهد شد. از طرف دیگر به‌کارگیری این روش به‌دلیل عدم اتلاف و هدررفت آب (تبخیر و پاشش) منجر به بازچرخانی با کارایی بالا خواهد شد.

۷-۱-۳- برج‌های خنک‌کننده

یکی از راهکارهای خنک‌کاری پساب بلودان بویلرها به‌کارگیری برج‌های خنک‌کننده است. در این روش نوع متریال برج خنک‌کننده، افزودن بازدارنده‌های خوردگی و مواد ضدرسوب با توجه به رسوبات و خوردگی‌های موجود حائز اهمیت است. استفاده از این روش نسبت به روش اول شامل معایبی مانند مصرف انرژی و عدم توانایی برای حذف یون‌های موجود و هزینه زیاد تعمیرات و نگهداری است.

۷-۱-۴- سامانه خنک‌کاری و بازیابی هم‌زمان آب و بخارات

بلودان بویلرهای نیروگاهی: در این روش آب تغذیه از پمپ تغذیه وارد مبدل حرارتی اول و پس از تبادل حرارت با آب خروجی از بلودان وارد مبدل حرارتی دوم می‌شود و پس از تبادل حرارت با بخارات بلودان و ونت دی اریتور از مبدل حرارتی ۲ خارج و وارد بویلر HRSG می‌شود. اما درین‌های بویلر هم به‌طور پیوسته وارد بلودان شده و در بلودان قسمتی از آبها به‌دلیل فشار و دمای زیاد تبدیل به بخار می‌شود که این بخارات با دمای ۹۸ درجه سلسیوس و فشار ۱ اتمسفر از بالای بلودان وارد مبدل حرارتی۲ و پس از کندانس وارد مبدل حرارتی ۱ می‌شود. آب خروجی از بلودان با دمای ۹۸ درجه سلسیوس و فشار ۱ اتمسفر از پایین مخزن بلودان وارد مبدل حرارتی ۱ و پس از تبادل حرارت از مبدل حرارتی ۱ خارج و با دمای مناسب و مطلوب به سمت تصفیه‌خانه ارسال می‌شود. یکی از دلایل انتخاب این نوع از مبدل‌های حرارتی، تعمیرات راحت‌تر آن نسبت به مدل‌های دیگر است. لازم به توضیح است که این طرح در نیروگاه سیکل ترکیبی کازرون بررسی و اجرایی شده است.

۷-۱-۵- چیلرهای جذبی

استفاده از گرمای بلودان بویلرها به‌منظور تأمین انرژی موردنیاز چیلرهای جذبی و کاهش دمای بلودان منجر به بازیابی حرارت اتلاف شده آب بلودان، بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش مصرف آب در نیروگاه می‌شود. خنک کردن آب بلودان قبل از ورود به تصفیه‌خانه منجر به افزایش کارایی و طول عمر رزین‌های تبادل یونی، افزایش زمان کارکرد تصفیه‌خانه و کاهش مصرف مواد شیمیایی برای احیا خواهد شد. همچنین منجر به کاهش هزینه انرژی مصرفی، مصرف آب و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری خواهد شد. روش چیلر جذبی دارای معایبی از جمله هزینه زیاد، ضریب عملکرد پایین، احتمال تشکیل بلور روی سطوح دستگاه، رسوب گرفتگی، خوردگی، گرانی بیش از حد و مصرف زیاد آب است.

از بین روش‌های بیان شده، روش برج خنک‌کننده (به‌دلیل مصرف انرژی و هزینه تعمیرات زیاد)، روش سامانه خنک‌کاری و بازیابی هم‌زمان (به‌دلیل پیچیدگی اجرا و هزینه زیاد) و روش چیلر جذبی (به دلایل هزینه و مصرف آب بالا و خوردگی) معایب و سختی اجرای بیشتری دارند و در اولویت اجرا قرار نمی‌گیرند. اما استفاده از دو روش استخر فواره‌دار و مبدل‌های حرارتی با توجه به سادگی، تأثیرگذاری و تجربه اجرایی در نیروگاه‌های دماوند (استخر فواره‌دار) و نیروگاه سیکل ترکیبی قم (مبدل حرارتی) به لحاظ فنی- اقتصادی، مورد توجه هستند. ازاین‌رو در ادامه دو روش منتخب استخر فواره‌دار و مبدل حرارتی از دید فنی و اقتصادی، بررسی شده است.

۷-۲- بررسی فنی- اقتصادی بازچرخانی بلودان بویلرها با به‌کارگیری مبدل حرارتی

به‌منظور پیاده‌سازی این روش در ابتدا، یک مبدل حرارتی در خروجی بلودان تانک قرار می‌گیرد که منجر به کاهش دمای بلودان و افزایش حرارت آب تغذیه‌ای بویلر خواهد شد. سپس این آب در یک مخزن کلین‌درین تانک ذخیره شده و پس از مخلوط با آب سمپلینگ و بک‌واش سند فیلترها به سمت تصفیه‌خانه ارسال می‌شود. در صورتی که همچنان دما زیاد باشد، به‌منظور کاهش دما در تصفیه‌خانه از یک مبدل حرارتی ثانویه استفاده می‌شود که علاوه بر کاهش دمای کلین درین منجر به افزایش حرارت آب خام ورودی به حدود ۳۵ درجه سلسیوس (بهترین عملکرد فیلترها) و در نتیجه افزایش کارایی و عملکرد تصفیه‌خانه خواهد شد.

بنابراین با توجه به تجارب نیروگاه سیکل ترکیبی قم در زمینه بازچرخانی بلودان بویلرها و مشاوره انجام شده با شرکت‌های تولیدکننده مبدل‌های حرارتی (تهران مبدل، مهتاب گستر، سماسازان) ارزیابی اقتصادی و برآورد هزینه تخمینی اجرای این راهکار در نیروگاه منتخب لوشان به‌منظور کاهش دمای بلودان با به‌کارگیری مبدل‌های حرارتی انجام شد. لازم به توضیح است که تمامی قیمت‌های دریافتی مربوط به بهار سال ۱۴۰۱ بود. این روش به‌منظور بازچرخانی بلودان بویلرها با حجم $10\ m^3/h$ برای ۲ بویلر (هر بویلر $5\ m^3/h$) انجام شد. مبدل حرارتی پیشنهادی اول از نوع پوسته-لوله با ظرفیت ۱۹۵ KW و دبی $5\ m^3/h$ و جنس پوسته A 516 و جنس تیوب‌ها 304L S.S (طراحی تولید مطابق با استاندارد API660) بود. مبدل حرارتی دوم پیشنهادی از نوع صفحه‌ای آب به آب M10B-PLss316-856 KW و متریال تمامی صفحات حرارتی از نوع 316L S.S با ضخامت ۰/۵، جنس تمامی واشرها EPDM (تحمل دمای زیاد)، با دبی $30\ m^3/h$ بود.

همچنین سایر اتصالات در این مبدل ۴ inch و فشار تست

bar ۱۳ و فشار کاری bar ۱۰ بار بود. برآورد هزینه‌های تخمینی به‌منظور بازچرخانی بلودان بویلرها با به‌کارگیری از مبدل‌های حرارتی در جدول ۵ آمده است.

بنابراین برآورد هزینه تخمینی به‌منظور بازچرخانی بلودان بویلرها (m^3/h ۱۰ به ازای ۲ بویلر) با به‌کارگیری مبدل حرارتی شامل تجهیزات (پایپ، زانو، فلنج، گسکت، ولو، اتصالات، مبدل حرارتی پوسته و لوله و مبدل حرارتی صفحه‌ای)، هزینه مصالح و اجرای حوضچه بتنی کلین‌درین و هزینه‌های پیش‌بینی نشده حدوداً برابر با ۱،۲۳۳،۸۸۵،۰۰۰ تومان بود.

۷-۳- بررسی فنی- اقتصادی بازچرخانی بلودان بویلرها با استخر فواره‌دار

از آنجایی که در بلودان برگشتی بویلر موادی مثل آهن، آمونیاک و هیدرازین وجود دارد، با استفاده از روش استخر فواره‌دار امکان تبدیل Fe^{2+} به Fe^{3+} و رسوب کردن آن و جداسازی اکسیدهای آهن تولیدی از طریق فیلترهای موجود در تصفیه‌خانه و همچنین تجزیه هیدرازین در معرض هوا میسر است. لازم به توضیح است که هیدرازین در معرض اکسیژن و حرارت تبدیل به آب و N_2 می‌شود و پس از مخلوط شدن با آب خام، غلظت آن تا حد صفر کاهش می‌یابد که نتایج آزمایش‌های انجام شده در سامانه اجرا شده استخر فواره‌دار در نیروگاه دماوند نشان‌دهنده این موضوع است. باقیمانده احتمالی هیدرازین نیز در فیلترهای کاتیونی و آنیونی حذف می‌شود. در مورد فسفات و آمونیاک نیز همین وضعیت صادق است و مقدار این ترکیبات در آب مخلوط تا حد صفر کاهش می‌یابد و باقیمانده احتمالی نیز در فیلترهای کاتیونی و آنیونی حذف می‌شوند.

از طرف دیگر به‌کارگیری روش استخر فواره‌دار و انجام فرایند تبخیر در خنک‌سازی آب، منجر به بازگردانی حدود ۶۵ تا ۷۰ درصد از کل بلودان به سیکل آب خواهد شد. همچنین از آنجا که به‌کارگیری برج‌های خنک‌کننده در مقایسه با استخر فواره‌دار برای خنک‌کاری، شامل معایبی مانند هزینه زیاد تهیه و تعمیرات و نگهداری، مصرف انرژی و در نهایت عدم توانایی برای حذف یون‌های موجود است. همچنین با توجه به اینکه بلودان‌ها شامل مواد شیمیایی و یون‌ها هستند، بنابراین نوع متریال برج خنک‌کننده، افزودن بازدارنده‌های خوردگی و مواد ضدرسوب با توجه به رسوبات و خوردگی‌های موجود نیز حائز اهمیت است.

به‌منظور ارزیابی اقتصادی اجرای راهکار استخر فواره‌دار از تجربیات کارشناسان نیروگاه دماوند استفاده شد و پیرو مکاتبات مختلف انجام شده با شرکت‌های متخصص در زمینه تصفیه و بازچرخانی آب، هزینه تخمینی انجام شد که در جدول ۶ ارائه شده است.

لازم به توضیح است که برآورد هزینه استخر فواره‌دار استعلام گرفته شده شامل گودبرداری، آرماتوربندی و بتن‌ریزی حوضچه بتنی و اتاقک کلین‌درین، ساخت فواره، ساخت استخر خنک‌کننده، پمپ‌ها، اجرای لوله‌کشی، داربست، بک‌فیلد، هزینه‌های مازاد و اجرا (۳۰ درصد) به‌منظور بازچرخانی m^3/h ۱۰ (۲ بویلر) بلودان بویلر در نیروگاه منتخب لوشان حدوداً برابر با ۸۷۰،۰۰۰،۰۰۰ تومان تخمین زده شد.

جمع‌بندی ارزیابی فنی و اقتصادی نشان می‌دهد که هر دو روش استخر فواره‌دار و مبدل حرارتی در نیروگاه لوشان قابلیت اجرا دارند. روش استخر فواره‌دار مزایای سادگی، هزینه کمتر، قابلیت حذف هیدرازین و آهن موجود در بلودان را دارد. از مزایای روش مبدل حرارتی می‌توان به کارایی عملکردی بیش از ۹۵ درصد، افزایش حرارت آب تغذیه بویلر و کاهش مصرف انرژی اشاره کرد. اما توجه به این مسئله مهم است که در نیروگاه‌های با قدمت بالا مثل نیروگاه لوشان به‌دلیل خوردگی‌های موجود در تجهیزات و بویلر، میزان آهن در بلودان بویلرها بالا است که پس از مخلوط شدن بلودان با آب خام، به‌عنوان آب ورودی وارد تصفیه‌خانه می‌شود که می‌تواند منجر به تخریب فیلترها شود.

روش استخر فواره‌دار آب بلودان را در معرض هوادهی قرار می‌دهد و موجب تجزیه هیدرازین و اکسید شدن آهن و جدایش آن به‌صورت رسوب می‌شود. این در حالی است که وجود آهن در آب می‌تواند در درازمدت به مبدل حرارتی و فیلترهای تصفیه‌خانه آسیب وارد کند و این موضوع یکی از چالش‌های روش پیشنهادی مبدل حرارتی در نیروگاه لوشان خواهد بود. با در نظر گرفتن بررسی‌های فنی باید عنوان کرد که استفاده از روش استخر فواره‌دار بهتر از روش مبدل حرارتی است. در کنار این موارد ارزیابی‌های اقتصادی نیز نشان داد که هزینه اجرای روش استخر فواره‌دار (۸۷۰،۰۰۰،۰۰۰ تومان) ارزان‌تر از هزینه اجرای روش مبدل

جدول ۵- برآورد هزینه‌های تخمینی بازچرخانی بلودان بویلرها با به‌کارگیری مبدل حرارتی

Table 5. Estimated costs of recycling blowdown boilers using a heat exchanger

Tools and equipment	No.	Unit price (Toman)	Price (Toman)
Pipe 4” 304 S.S Seamless Sch 80	7	30.100.000 (6 m)	210.700.000
Pipe 4” C.S Seamless Sch 80	25	6.380.000 (6m)	159.500.000
Elbow 4” 304 S.S Seamless Sch 80	7	3.200.000	22.400.000
Elbow 4” A234 C.S Seamless Sch 80	10	830.000	8.300.000
Pentax pump U18S-250/3T (3.5 bar)	2	13.300.000	26.600.000
Shell and tube heat exchanger (design and production of Mehtab Gostar Company)	2	24.000.000	48.000.000
Plate heat exchanger (designed and produced by Mehtab Gostar Company)	1	139.000.000	139.000.000
Other equipment (flange, gasket, valve, bolt and nut, ... (15% of equipment cost)	-	-	92.175.000
Surplus and executive fee (30%)	-	-	202.785.000
Total cost of equipment and implementation			909.460.000
Estimating the cost of concrete basin and clean drain chamber			
Excavation cost			3.000.000
The cost of leveling the land by the worker			500.000
The total cost of excavation and land leveling			3.500.000
Implementation of concrete Meger			
Sand		10 ton	2.000.000
Black cement		20	1.200.000
Implementation cost		3 workers and 1 head	1.500.000
The total cost of cement and concrete execution			4.700.000
Implementation of shear wall and concrete pool foundation (3x5x10)			
Rebar 14		100 pcs	32.000.000
Screw reinforcement wire		15 kg	450.000
Molding belt			1.000.000
Foundation implementation cost			21.000.000
The cost of running a shear wall			36.000.000
Cost of ready concrete			20.00.000
Total cost of shear wall and concrete pool foundation			110.450.000
Cost of concrete pond roof			
Beam cost			10.000.000
The cost of ceiling blocks or foam			7.000.000
Rebar 14		20 pcs	7.000.000
The cost of ceiling implementation			35.000.000
The cost of concreting (ready concrete) the roof of the pond			10.000.000
The total cost of the concrete pond roof			69.000.000
Room fee (4x3)			
Shear wall			
Rebar 12		30 pcs	6.000.000
Shear wall belt			500.000
Implementation of shear wall			9.000.000
Ready concrete			4.000.000
Total cost of shear wall			19.500.000
The cost of the ceiling of the room			
Beam			5.000.000
Block			3.000.000
Implementation of the ceiling of the room			7.000.000

ادامه جدول ۵- برآورد هزینه‌های تخمینی بازچرخانی بلودان بویلرها با به‌کارگیری مبدل حرارتی

Cont. Table 5. Estimated costs of recycling blowdown boilers using a heat exchanger

Tools and equipment	No.	Unit price (Toman)	Price (Toman)
Wall post with corner and rough execution pottery			3.000.000
Clay		110 psc	2.500.000
Implementation of the clay wall			1.200.000
Cement and sand for making clay wall			700.000
Insulation by Isogum along with installation			18.000.000
Transport fare (approximate total)			10.000.000
The total cost of the roof of the Clean Drain room			52.400.000
Possible unforeseen expenses (25%)			64.875.000
The total cost of running a concrete basin and a clean drain chamber			324.425.000

جدول ۶- برآورد هزینه تخمینی برای انجام استخر فواره‌دار

Table 6. Estimation of the estimated cost for making a fountain pool

Cost	Unit	Price (Toman)
Excavation	m^3	250.000
Backfield	m^3	150.000
Reinforcement	m^2	750.000
Concrete pouring	m^3	1.250.000
Scaffolding	m^2	90.000
4-inch polyethylene pipe	m	550.000
Implementation of plumbing	m	200.000
Construction of cooling pool	m^3	2.000.000
Building a fountain	m	1.200.000
Total price	6.440.0000	

حرارتی (۱،۲۳۳،۸۸۸،۰۰۰ تومان) است که عامل مهمی برای تعیین روش اولویت راهکار اصلاح الگوی مصرف آب است. بنابراین جمع‌بندی فنی و اقتصادی نشان می‌دهد که بهترین روش برای بازچرخانی بلودان بویلرها در نیروگاه لوشان، روش استخر فواره‌دار است.

۸- نتیجه‌گیری

با توجه به کمبود و بحران آب در کشور، عمده آب موردنیاز برای مصارف مختلف از طریق آبهای شیرین و زیرزمینی تأمین می‌شود. این مسئله موجب شده که سطح آبخوان‌های کشور با افت چشمگیری همراه شود. ازاین‌رو در سال‌های اخیر، سیاست‌های وزارت نیرو بر بررسی و ایجاد راهکارهای مؤثر در زمینه کاهش و جلوگیری از اتلاف و هدررفت آب در نیروگاه‌های کشور متمرکز شده است. با توجه به اینکه نیروگاه‌های کشور به‌ویژه نیروگاه‌های با برج خنک‌کننده‌تر حجم قابل توجهی از آب را مصرف می‌کنند، بنابراین در این پژوهش، نیروگاه لوشان به‌عنوان نیروگاه منتخب به‌منظور بررسی راهکارهای اصلاح الگوی مصرف، بررسی شد. در ابتدا بررسی‌ها در خصوص هدررفت آبها در نیروگاه لوشان انجام شد و نتایج نشان داد که بلودان برج خنک‌کننده و بلودان بویلرها سهم به‌سزایی در هدررفت آب نیروگاه لوشان دارند. بررسی‌های فنی و بازدیدهای میدانی دلالت بر این امر داشت که متأسفانه اقدام مؤثری در بازچرخانی انواع بلودان‌ها در نیروگاه لوشان انجام نشده است.

از آنجا که کیفیت بلودان برج خنک‌کننده کم است، بازچرخانی آن نیازمند تصفیه با استفاده از مواد منعقدکننده و کمک منعقدکننده یا احداث تصفیه‌خانه با به‌کارگیری فیلترهای شنی، اولترافیلتراسیون و فیلترهای غشایی اسمز معکوس دارد که منجر به تحمیل هزینه‌های زیاد می‌شود. این در حالی است که آب بلودان بویلر کیفیت بالایی

داشته و می‌تواند بدون انجام عملیات تصفیه، به آب خام ورودی اضافه شود. ازاین‌رو راهکار بازچرخانی کلین‌درین‌ها به‌عنوان اولویت اول برای اصلاح الگوی مصرف در این نیروگاه مدنظر قرار داده شد. کلین درین‌ها شامل بلودان بویلرها، آب سمپلینگ، بک‌واش سند فیلترها و درین نهایی احیا رزین‌ها است که سهم عمده کلین‌درین را بلودان بویلرها تشکیل می‌دهد. ازاین‌رو راهکار بازچرخانی بلودان بویلر به‌عنوان راهکار پیشنهادی انتخاب شد. در ادامه روش‌های اجرایی بازچرخانی بلودان بویلر بررسی شد که شامل روش‌های استخر فواره‌دار، مبدل حرارتی، برج خنک‌کننده، خنک کاری و بازیابی هم‌زمان و چیلرهای جذبی است. بررسی‌ها نشان داد که دو روش استخر فواره‌دار و مبدل حرارتی برتری‌های بیشتری نسبت به سایر روش‌ها دارند. ازاین‌رو ارزیابی‌های فنی و اقتصادی دو روش استخر فواره‌دار و مبدل حرارتی برای اجرای راهکار بازچرخانی بلودان بویلر انجام شد.

نتایج ارزیابی فنی نشان داد که در روش استخر فواره‌دار امکان جدایش آهن موجود در بلودان از طریق اکسیداسیون و ایجاد رسوب و حذف هیدرازین وجود دارد. این در حالی است که وجود آهن در بلودان می‌تواند آسیب‌های جدی به مبدل حرارتی وارد کند و از نقطه‌نظر فنی روش استخر فواره‌دار ارجح است. بررسی‌های اقتصادی نیز برتری روش استخر فواره‌دار نسبت به روش مبدل حرارتی را تأیید کرد. نتایج نشان داد که برای بازچرخانی ۱۰ m^3/h بلودان بویلرها، هزینه روش استخر فواره‌دار ۸۷۰،۰۰۰،۰۰۰ تومان و این هزینه برای روش مبدل حرارتی ۱،۲۳۳،۸۸۵،۰۰۰ تومان بود که هزینه روش استخر فواره‌دار حدود ۳۰ درصد کمتر بود. با جمع‌بندی بررسی‌ها و پژوهش‌های فنی و اقتصادی می‌توان بیان کرد که اولویت نخست برای اصلاح الگوی مصرف آب در نیروگاه لوشان، بازچرخانی بلودان بویلر از طریق روش استخر فوراه‌دار است.

۹- قدردانی

نویسندگان پژوهش، از حمایت‌های معاونت پژوهشی پژوهشگاه نیرو و نیروگاه لوشان صمیمانه تشکر می‌کنند.

References

Abdulla, M., Martin, R., Gooch, M. & Jovel, E. 2013. The importance of quantifying food waste in Canada. *Journal of Agriculture, Food Systems, and Community Development,* 3**,** 137-151. https://doi.org/10.5304/jafscd.2013.032.018.

Bakker, K. & Cook, C. 2011. Water governance in Canada: innovation and fragmentation. *Water Resources Development,* 27**,** 275-289. https://doi.org/10.1080/07900627.2011.564969.

Bavar, M., Sarrafzadeh, M. H., Asgharnejad, H. & Norouzi-Firouz, H. 2018. Water management methods in food industry: corn refinery as a case study. *Journal of Food Engineering,* 238**,** 78-84. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.06.018.

Ehyaei, M. A. 2014. Estimation of condensate mass flow rate during purging time in heat recovery steam generator of combined cycle power plant. *Thermal Science,* 18**,** 1389-1397. https://doi.org/10.2298/TSCI111031102E.

Frenken, K. 2012. *Irrigation in Southern and Eastern Asia in figures: AQUASTAT Survey-2011*. FAO Publishing, Rome, Italy.

Hassanzadeh, R., Asadi Davoodabadi, M. H. & Roshanaei, A. 2021. Comparing the role of male and female managers of environmental organizations in achieving the goals of sustainable development: (case study of Markazi Province). *Human and Environment*, 19(3)**,** 171-187. (In Persian)

Mariolakos, I. 2007. Water resources management in the framework of sustainable development. *Desalination,* 213**,** 147-151. https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.05.062.

Panjeshahi, M., Ataei, A., Gharaie, M. & Parand, R. 2009. Optimum design of cooling water systems for energy and water conservation. *Chemical Engineering Research and Design,* 87**,** 200-209. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2008.08.004.

Schultz, T. 2008. Water reuse and conservation in the CPI. *Chemical Engineering,* 115**,** 44.

UNESCO, W. W. A. P. 2012. *Managing Water under Uncertainty and Risk*, UNESCO.

Vanrolleghem, P. A., Benedetti, L. & Meirlaen, J. 2005. Modelling and real-time control of the integrated urban wastewater system. *Environmental Modelling and Software,* 20**,** 427-442. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.02.004.

Wu, B., Zeng, W., Chen, H. & Zhao, Y. 2016. Grey water footprint combined with ecological network analysis for assessing regional water quality metabolism. *Journal of Cleaner Production,* 112**,** 3138-3151. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.009.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License