



Microbial Monitoring of Supplied Water, Wet and Dry Cooling Tower Water of Hamedan Shahid Mofatteh Power Plant

Ali Akbar Asgharinezhad¹, Majid Ghahraman Afshar^{2*}, Hossein Ghaseminejad³
Mohsen Esmailpour¹, Abbas Yousefpour¹

1. Assist. Prof. in Chemistry, Dept. of Chemistry and Process Research, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran
2. Assist. Prof. in Chemistry, Dept. of Chemistry and Process Research, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran
(Corresponding Author) mghahramanafshar@nri.ac.ir
3. MSc., Graduate Dept. of Chemistry and Process Research, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran



<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.596758.3574>

Original Paper

Abstract

The supplied water of the Shahid Mofatteh power plant is provided from the wastewater treatment plant of Hamedan. As a consequence, the microbial contamination of this power plant is significantly higher than the other power plants. Furthermore, the Mofatteh power plant is distinguished by its use of both wet and dry cooling towers which operate in a combined mode during the hot season. Based on the nature of the supplied water and the complex mechanics of the cooling towers, monitoring the microbial parameters in both wet and dry cooling tower is of critical importance. To monitor the microbial parameters of the power plant, supplied water (wastewater), dry cooling tower water, wet cooling tower water were analyzed for microbial, physicochemical, and chemical characteristics. Regarding the microbial analysis, both general and specific tests TDS for industrial microorganisms were conducted in this research. Physicochemical monitoring involved measuring conductivity, Total Dissolved Solids, salinity and pH is performed as well. Finally, chemical monitoring included the analysis of ions associated with corrosion (both causative and product ions), scale-forming ions and ions that serve as nutrients for bacterial growth were carried out. The total bacterial count value reaches approximately to 10^3 CFU/ml for the wet cooling tower and it reaches near zero for dry cooling tower. These TBC levels correspond to water conductivity of $1.15 \mu\text{S}/\text{cm}$ for the dry cooling tower and $8400 \mu\text{S}/\text{cm}$ for the wet cooling tower. The SRB level of zero in the dry cooling tower is attributable to the absence of sulfate ions (the nutrient source for SRB), whereas the "Moderate" SRB level in the wet cooling tower is consistent with the high sulfate concentration (2137.9 ppm). NRB levels remain constant at a "Moderate" range in both the wet and dry cooling towers and the primary reason for the elevated NRB levels is the source water, which contains a nitrate ion concentration of approximately 38 ppm. Operational strategies specifically optimizing oxidizing biocide dosages, applying organic biocides, utilizing reverse osmosis, employing nitrate-selective ion-exchange resins during treatment and using iron corrosion inhibitors are recommended to reduce microbial contamination and enhance the performance of wet and dry cooling towers.

Keywords:

Thermal Power Plant, Wet Cooling Tower, Dry Cooling Tower, Sulfate-Reducing Bacteria, Nitrate-Reducing Bacteria.



Received: Apr. 3, 2026
Revised: May 13, 2026
Accepted: May 23, 2026

To cite this article:

Asgharinezhad, A. A., Ghahraman Afshar, M., Ghaseminejad, H., Esmailpour, M., Yousefpour, A. 2026. Microbial monitoring of supplied water, wet and dry cooling tower water of Shahid Mofatteh power plant. *Water and Wastewater*, 37(2), 1-20. <https://doi.org/10.22093/wwj.2026.596758.3574>.

Use your device to scan and read the article online



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



1. Introduction

The Shahid Mofatteh Power Plant in Hamadan, one of the country's key thermal power plants, was designed and constructed using steam technology and a combination of wet and dry cooling towers. Natural gas serves as the primary fuel, while mazut is utilized as a backup fuel during emergencies. The facility comprises four 250 MW units, bringing the total nominal capacity to 1000 MW megawatts. Electricity generated at the plant is transmitted to the national grid via 230 and 400 kV high-voltage substations and subsequently distributed to consumers through regional power stations in the cities of Hamadan, Arak, Sanandaj, and Zanjan (Fig. 1) ([Alzahmi et al., 2024](#)).

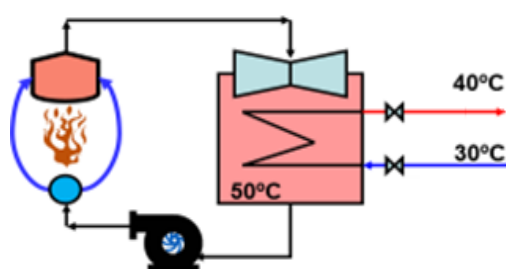


Fig. 1. Schematic layout of the heat exchanger, boiler, and turbine arranged alongside one

The supplied water for the Shahid Mofatteh power plant in Hamadan is provided from the wastewater treatment plant. Consequently, the microbial contamination in this power plant is significantly higher than the other power plants. Moreover, the operating conditions of this power plant are far more challenging than those of conventional power plants, given the use of both wet and dry cooling towers. Therefore, considering the nature of the supplied water and the complexity of the cooling tower systems, it is crucial to monitor the microbial parameters and establish a key correlation between the microbial contamination and the chemical and physicochemical parameters. As a result, this study investigates the physicochemical, chemical, and microbial properties of water samples from the Shahid Mofatteh Power Plant in Hamadan, specifically the supplied water, wet cooling tower water and dry cooling tower water. Finally, the key relationship between microbial parameters and physicochemical parameters was established and a preventive corrective solution was proposed for each microbial issue.

¹ Total Bacterial Count (TBC)

² Acid-Producing Bacteria (APB)

³ Fluorescent Pseudomonas (FP)

2. Materials and methods

2.1. Materials

Various granulated agar-based culture media components were procured from Merck (Germany). Microbial test kits for *Escherichia coli* (*E. coli*), Total Bacterial Count¹, and specific assays such as those for acid-producing bacteria², fluorescent pseudomonas³, iron-related bacteria⁴ and nitrate-reducing bacteria were obtained from Zist Kavosh Iranian, the official representative of Ibersco, Switzerland. Additionally, other chemical reagents required for monitoring kit color changes and instrument calibration were purchased from Merck in analytical grade.

2.2. Physicochemical and chemical monitoring

This study employs a benchtop conductivity meter and pH meter (HANA brand), equipped with platinum and glass electrodes, respectively. It should be noted that the equipment used to measure pH, conductivity, Total Dissolved Solids⁵, and salinity was calibrated using standard solutions prior to use. In this procedure, the calibrated pH and conductivity electrodes are immersed in the samples to assess electrical conductivity, salinity percentage, turbidity, and pH. Each Ion's determination was required to be analyzed precise in laboratory using internationally recognized standard methods.

2.3. Microbial testing using test kits

For this test, the *E. coli* and TBC kits are first immersed in the sample for 10 seconds and the kit is then shaken to remove excess liquid and stored in a sealed container until color changes are observed. Subsequently, to perform APB, IRB, NRB, Aero, SRB, and TRB tests, 20 mL of each sample is injected into the respective kit, which is then incubated for 3 days to monitor for color changes. Additionally, for the FP test, 1 mL of the sample is injected into the kit, and the kit is stored with the cap closed.

3. Results and discussion

According to the TBC test results and PCA culture media, the TBC value and TBC for demineralized water and dry cooling tower water samples are determined to be zero. These findings are corroborated by the microbial culture results. Conversely, TBC levels for the wet cooling tower are estimated at approximately 10^3 CFU/mL and

⁴ Iron-Related Bacteria (IRB)

⁵ Total Dissolved Solids (TDS)



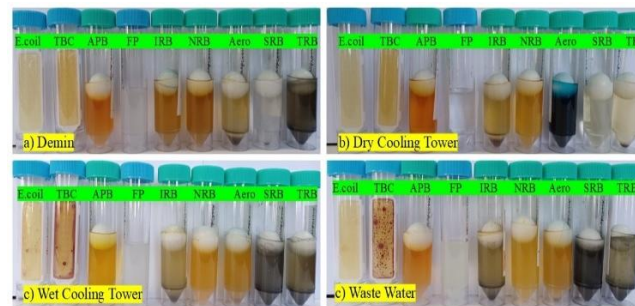


Fig. 2. Image of the microbial kit showing test results for *E. coli*, TBC, APB, FP, IRB, NRB, Aero, SRB, and TRB at the following points: a) demineralized water, b) dry tower, c) wet tower, and d) supplied water

for the supplied water at approximately 10^4 CFU/mL results that are further confirmed by the observed growth of culture halos. It was concluded that the disinfection process for the demineralized water was carried out optimally, resulting in a zero TBC level for the dry cooling tower water as well (Bonilla et al., 2017).

The disinfection of demineralized water as well as the water transfer lines leading to the dry cooling tower is carried out to the highest quality standards, ensuring the dry tower remains free of microbial contaminants. In contrast, TBC and PCA culture results for the wet cooling tower and the supplied water indicate levels ten times higher reflecting a more contaminated supplied water. Consequently, the disinfection and transfer processes for the wet tower's supplied water demonstrate only moderate effectiveness, capable of reducing the TBC count by a factor of ten specifically, from 10^4 to 10^3 CFU/mL.

The TBC results, showing zero contamination for the dry tower and 10^3 CFU/mL for the wet tower, it can be concluded that leakage of wet tower water into the shell-and-tube heat exchanger (where dry tower water flows through the tubes while the tubes themselves are submerged in the wet tower) is not occurring. Furthermore, to eliminate the bacterial load, the use of organic biocides such as isothiazolinone and glutaraldehyde in the wet tower, along with ozonation in the dry tower is recommended (Fig. 2).

The *E. coli* test was conducted to verify and complement the PCA culture medium and TBC test kit analyses. The results showed zero *E. coli* levels for demineralized water, the dry cooling tower, and the supplied water. In contrast, the *E. coli* for the wet tower was approximately 10^2 CFU/mL. The absence of *E. coli* in the demineralized water and dry tower indicates effective disinfection within the power plant's water treatment stages, while the zero count in the supplied water reflects its excellent quality. Finally, the high *E. coli* levels in the wet tower,

combined with the absence of the bacteria in the dry tower, refute the hypothesis that water from the wet and dry towers mixes within the shell-and-tube heat exchangers.

4. Conclusions

The supplied water for the Shahid Mofatteh power plant in Hamadan originates from wastewater treatment plant. As a result, the microbial properties at this facility differs significantly from that of other power plants across the country. Furthermore, the plant's operational conditions are considered highly complex due to its use of two types of cooling towers (wet and dry). Therefore, given the nature of the supplied water and the operating mechanisms of the cooling towers, it is essential to assess the microbial parameters and develop practical strategies to reduce it. In this regard, a comprehensive study was conducted to monitor the microbial, physicochemical, and chemical parameters of the supplied water and the water in the wet and dry cooling towers of this power plant. Based on the findings, the implementation of the following operational measures is recommended to reduce microbial load and improve the performance of the wet and dry cooling towers (Poon 2022).

- ✓ TBC Control: Optimization of oxidizing biocide dosage; application of organic biocides such as isothiazolinone and glutaraldehyde; implementation of reverse osmosis to reduce sodium and chloride ion concentrations.
- ✓ Reduction of APB, FP, and Aero: Application of organic biocides such as polyquats; use of strong oxidizing biocides (ozonation).
- ✓ NRB Control: Removal of nitrate ions from the supplied water using nitrate-selective ion-exchange resins during the water treatment process.
- ✓ IRB Control: Use of common organic biocides such as isothiazolinone; application of film forming iron corrosion inhibitors to control the concentration of ions that serve as bacterial nutrients.





پایش میکروبی آب تأمینی، برج خنک کن خشک و تر نیروگاه شهید مفتاح همدان

علی اکبر اصغری نژاد^۱، مجید قهرمان افشار^{۲*}، حسین قاسمی نژاد^۳، محسن اسماعیل پور^۱، عباس یوسف پور^۱

۱- استادیار شیمی، گروه پژوهشی شیمی و فرایند، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

۲- استادیار شیمی، گروه پژوهشی شیمی و فرایند، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

(نویسنده مسئول) mghahramanafshar@nri.ac.ir

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه پژوهشی شیمی و فرایند، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران



<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.596758.3574>

مقاله پژوهشی

چکیده

واژه‌های کلیدی:
نیروگاه حرارتی، برج
خنک کن تر، برج خنک کن
خشک، پایش میکروبی،
باکتری احیاکننده سولفات،
باکتری احیاکننده نیترات

منشأ آب تأمینی نیروگاه شهید مفتاح همدان پس از تصفیه‌خانه شهر همدان است، بنابراین بار میکروبی این نیروگاه در قیاس با سایر نیروگاه‌ها بسیار بالاتر است. همچنین شرایط این نیروگاه با توجه به داشتن برج خنک کن تر و برج خنک کن خشک و عملکرد تلفیقی این دو برج در فصل گرم، از ویژگی‌های منحصر به فرد این نیروگاه محسوب می‌شود. بنابراین با توجه به در نظر گرفتن شرایط آب تأمینی و همچنین پیچیدگی سازوکار برج‌های خنک کن، پایش بار میکروبی برج‌های خنک کن تر و خشک این نیروگاه درجه اهمیت زیادی دارد. در این راستا و به منظور پایش بار میکروبی برج‌های خنک کن نیروگاه، آب تأمینی (پساب)، آب برج خنک کن خشک، آب برج خنک کن تر و آب دمین از نقطه نظر میکروبی، فیزیکی و شیمیایی و شیمیایی مورد پایش قرار گرفت. در بحث آزمون‌های میکروبی آزمون‌های عمومی و اختصاصی میکروبی‌های صنعتی انجام شد. همچنین پارامترهای هدایت، TDS، شوری و pH در راستای پایش فیزیکی و شیمیایی سنجش شد. در نهایت یون‌های مسبب خوردگی، یون‌های محصول خوردگی، یون‌های رسوب‌گذار و یون‌های خوراک عوامل باکتریایی در راستای پایش شیمیایی مورد سنجش قرار گرفت. مقدار سنجش تعداد کل باکتری‌ها برای آب برج تر به حدود 10^3 CFU/mL و برای آب برج خشک به حدودی کمتر از حد تشخیص روش می‌رسد که این میزان TBC متناظر با میزان هدایت آب برج خشک برابر $1/15 \mu\text{S}/\text{cm}$ و برج تر $8400 \mu\text{S}/\text{cm}$ است. همچنین مقدار SRB کمتر از حد تشخیص روش برای برج خشک به دلیل عدم حضور یون سولفات (خوراک SRB) در برج خشک و همچنین میزان SRB در حدود Moderate در برج تر با توجه به غلظت بالای سولفات ($2137/9 \text{ ppm}$) در این نمونه قابل توجه است. میزان NRB در برج تر و برج خشک ثابت و در حدود Moderate است و دلیل اصلی بالا بودن میزان NRB منشأ آب تأمینی با غلظت یون نیترات در حدود 38 ppm است. در این پژوهش میزان آلاینده میکروبی آب ورودی یک نیروگاه با منشأ پساب شهری مورد پایش قرار گرفت. از سوی تأثیر عوامل میکروبی بر نرخ خوردگی و رسوب‌گذاری برج خنک کن خشک و تر نیروگاه ارزیابی شد. در ادامه با داشتن مؤلفه‌های میکروبی و عوامل تأثیرگذار شیمیایی و فیزیکی و شیمیایی مؤثر بر مؤلفه‌های میکروبی، راهکارهای اصلاحی به شرح ذیل انجام فرایندهای بهینه‌سازی دوز زیست‌کش اکسند، کاربرد زیست‌کش آلی، به کارگیری روش اسمز معکوس (از روش‌های کلیدی و پایه‌ای برای کاهش املاح آب)، به کارگیری رزین انتخاب‌گزين مبادله‌کننده یون نیترات در مراحل تصفیه‌خانه و استفاده از بازدارنده‌های خوردگی آهن برای کاهش بار میکروبی و بهبود عملکرد برج‌های خنک کن تر و خشک توصیه می‌شود.



دریافت: ۱۴۰۵/۱/۱۴

اصلاح: ۱۴۰۵/۲/۲۳

پذیرش: ۱۴۰۵/۳/۲

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

اصغری نژاد، ع. ا.، قهرمان افشار، م.، قاسمی نژاد، ح.، اسماعیل پور، م.، یوسف پور، ع.، ۱۴۰۵، پایش میکروبی آب

تأمینی، برج خنک کن خشک و تر نیروگاه شهید مفتاح همدان، آب و فاضلاب، ۳۷(۲)، ۱-۲۰.

<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.596758.3574>



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱- مقدمه

نیروگاه شهید مفتاح همدان به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نیروگاه‌های حرارتی کشور، با فناوری بخار و بهره‌گیری از برج‌های خنک‌کننده تر و خشک طراحی و اجرا شده است. سوخت اصلی این نیروگاه گاز طبیعی بوده و مازوت به‌عنوان سوخت جایگزین در شرایط اضطراری استفاده می‌شود. این مجموعه شامل چهار واحد ۲۵۰ مگاواتی است که در مجموع ظرفیت نامی آن به ۱۰۰۰ مگاوات می‌رسد. برق تولیدشده در نیروگاه از طریق پست‌های فشار قوی ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت به شبکه سراسری انتقال یافته و پس‌از آن، از مسیر ایستگاه‌های برق منطقه‌ای در شهرهای همدان، اراک، سنندج و زنجان در اختیار مصرف‌کنندگان قرار می‌گیرد (Deziani et al., 2017, Ghahraman Afshar et al., 2023a, Tork et al., 2022). با توجه به بحران منابع آبی و افت سطح آب‌های زیرزمینی در منطقه، حدود ۸۹ درصد از آب موردنیاز این نیروگاه (آب تأمین) از محل پساب شهری و صنعتی تأمین می‌شود. در همین راستا و به‌منظور مدیریت بهینه مصرف آب، برج‌های خنک‌کن تر واحدهای ۱ و ۲ با نوع خشک جایگزین شده است. اجرای این تغییرات موجب کاهش قابل توجه برداشت آب و ارتقای شاخص‌های بهره‌وری زیست‌محیطی نیروگاه شده است. نحوه بهره‌برداری از سامانه‌های خنک‌کن نیز متناسب با تغییرات فصلی تنظیم می‌شود؛ به‌گونه‌ای که در ماه‌های سرد سال (تقریباً ۷ تا ۸ ماه) از برج خشک به‌صورت کامل استفاده شده و در دوره گرم سال (از نیمه خرداد تا نیمه شهریور) عملکرد برج به‌صورت هیبریدی، یعنی ترکیبی از سامانه خشک و تر، ادامه می‌یابد (Ghahraman Afshar et al., 2023b, Esamaeilpour et al., 2023, Pakshir et al., 2002). این راهکار علاوه بر صرفه‌جویی در منابع آبی، موجب افزایش انعطاف‌پذیری عملیاتی نیروگاه در مواجهه با تغییرات دمایی و بار مصرفی می‌شود. سیستم خنک‌کن واحد یک نیروگاه به‌عنوان موضوع مورد مطالعه پژوهش حاضر از اجزای مختلفی تشکیل شده که هر یک نقش مهمی در تضمین کارکرد پایدار و کارایی مطلوب مجموعه دارند. این اجزا به شرح زیر تشکیل یافته است (Rahmani, 2017, Asgari et al., 2023, Ghahraman Afshar et al., 2023b):

- ✓ کندانسور با لوله‌هایی از جنس مس
- ✓ برج خنک‌کن خشک با لوله‌هایی از جنس آلومینیوم
- ✓ مبدل‌های میانی با لوله‌هایی از کربن استیل

- ✓ خطوط رابط سه جزء فوق از جنس کربن استیل
- ✓ دو دستگاه پمپ

سیستم برج خنک‌کن واحد ۱ نیروگاه به دو پمپ اصلی مجهز است که هر یک توانایی تأمین دبی معادل ۱۷۵۰۰ مترمکعب بر ساعت را دارند. در شرایطی که هر دو پمپ به صورت هم‌زمان وارد مدار شوند، ظرفیت کل سیستم به حدود ۳۰ هزار مترمکعب بر ساعت می‌رسد. فشار جریان آب در خطوط انتقال نیز در محدوده ۲/۵ تا ۳ بار قرار دارد. آب خنک‌کن با دمای حدود ۳۰ درجه سلسیوس وارد کندانسور شده و بخار خروجی از توربین را در خارج از لوله‌های کندانسور تقطیر می‌کند. این فرایند سبب افزایش دمای آب تا حدود ۴۰ درجه سلسیوس می‌شود. بر همین اساس، دمای میانگین آب خنک‌کن در داخل لوله‌های مبدل حرارتی، حدود ۳۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته می‌شود (Yamaguchi et al., 2017, Dos Santos et al., 2015, Carducci et al., 2010).

کندانسور این مجموعه شامل حدود ۱۴ هزار لوله با قطر ۱ اینچ است که تمامی آن‌ها از جنس مس ساخته شده‌اند. طراحی این لوله‌ها با توجه به دبی جریان، ابعاد و تعداد آن‌ها انجام شده و امکان محاسبه سرعت خطی سیال در داخل لوله‌ها را فراهم می‌کند. داده‌های مربوط به این محاسبات و روش تعیین شدت جریان آب در لوله‌ها در ادامه ارائه شده است. شکل ۱ نحوه استقرار مبدل حرارتی، بویلر و توربین را در کنار یکدیگر به صورت شماتیک نمایش می‌دهد (Afshari, 2019, Gould and Krätzig, 1999, Sylvestre et al., 2025).

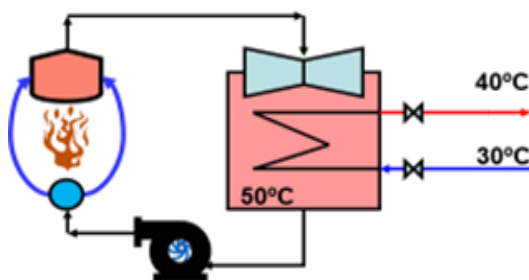


Fig. 1. Schematic layout of the heat exchanger, boiler and turbine arranged alongside together

شکل ۱- نحوه استقرار مبدل حرارتی، بویلر و توربین در کنار یکدیگر به صورت شماتیک

آب خروجی از کندانسور، به رادیاتورهای برج خشک منتقل می‌شود؛ این رادیاتورها از جنس آلومینیوم ساخته شده‌اند و فرایند





Fig. 2. Delta view and tube arrangement in the dry cooling tower

شکل ۲- نمای دلتا و نحوه قرارگیری لوله‌ها در برج خشک

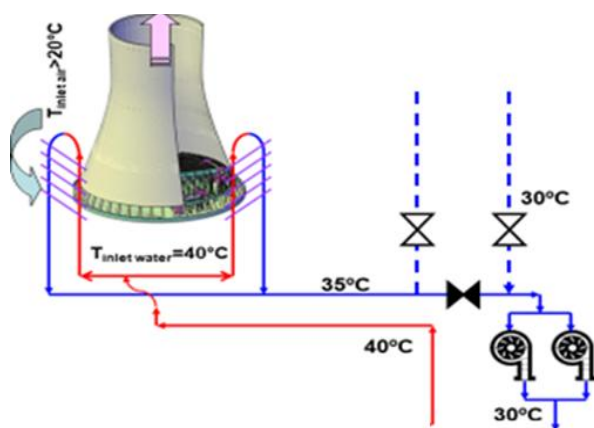


Fig. 3. Schematic of the dry cooling tower and its inlets and outlets

شکل ۳- شماتیک برج خنک‌کن خشک و ورودی و خروجی‌های آن

دمای آب می‌شود. مبدل حرارتی پوسته و لوله یکی از رایج‌ترین تجهیزات انتقال حرارت در نیروگاه‌ها است. وظیفه اصلی مبدل حرارتی پوسته و لوله این است که گرما را از یک سیال به سیال دیگر منتقل کند، بدون اینکه دو سیال مستقیماً باهم مخلوط شوند. ساختار اصلی این تجهیز شامل دو بخش اصلی به شرح لوله و پوسته است. لوله بخشی است که سیال اول از داخل آن عبور می‌کند و پوسته بخشی است که سیال دیگر در فضای اطراف لوله‌ها و داخل پوسته جریان پیدا می‌کند. در فصل زمستان، این مبدل از مدار خارج

خنک‌سازی در آن‌ها به صورت مکش طبیعی انجام می‌شود. فشار داخل لوله‌های برج خشک بین ۳ تا ۵ بار است. رادیاتورهای خشک از نوع Fin-Tube طراحی شده‌اند؛ پره‌های آن‌ها از آلومینیوم Al 99.5H و تیوب‌ها از آلومینیوم خالص Al 99.5 ساخته شده‌اند. برج خشک شامل شش سکتور است که هر سکتور حاوی ۹ واحد دلتا است. شکل ۲ نمای یک دلتا و نحوه استقرار لوله‌ها در آن را نمایش می‌دهد. در این برج، تعداد ۲۸,۸۰۰ لوله با قطر داخلی ۲۱/۱۸ میلی‌متر تعبیه شده است. جریان خروجی از کندانسور پس از عبور از هدرهای اصلی برج، در تمام این لوله‌ها تقسیم می‌شود؛ بنابراین، داده‌های موردنیاز برای طراحی این بخش و همچنین روش محاسبه شدت جریان مایع در داخل لوله‌های برج به شرح زیر ارائه می‌شود. شکل ۳، نمای برج خشک و محل ورودی و خروجی‌های آن را نشان می‌دهد (Lister, 1980, Batelić et al., 2023).

در این سیستم، تعداد مبدل‌ها مجموعاً ۸ دستگاه دوقلو است. تیوب‌های آب خنک‌کننده و پوسته^۱ و مبدل از جنس کرین استیل ساخته شده‌اند و بر اساس شرایط دمای محیط می‌توان تعداد مبدل‌ها را افزایش یا کاهش داد. برای مثال، در زمستان که دمای محیط کمتر از ۲۰ درجه سلسیوس است، نیاز به استفاده از مبدل نیست؛ اما در تابستان، زمانی که دمای هوا بیش از ۳۵ درجه سلسیوس است و اختلاف دما با آب تأمینی ۴۰ درجه سلسیوس کافی نیست، تمام بار حرارتی بر روی برج تر قرار می‌گیرد و در عمل برج خشک تنها جریان آب را منتقل می‌کند و انتقال حرارت چندانی انجام نمی‌شود (Bonilla et al., 2017, Alzahmi et al., 2024).

در فصول گرم سال، زمانی که اختلاف دمای آب برگشتی از کندانسور با دمای هوای محیط نیروگاه حدود ۲۰ درجه سلسیوس یا کمتر باشد (مثلاً آب با دمای ۴۰ درجه سلسیوس و هوای محیط با دمای ۳۰ درجه سلسیوس)، از برج تر نیز در سیستم اصلی استفاده می‌شود. در این شرایط، گرادیان دما بین آب ورودی به برج و هوای محیط کمتر از ۲۰ درجه است و هنگام تماس آب و هوا، دمای آب به حدود ۳۵ درجه سلسیوس می‌رسد. برای کاهش بیشتر دما تا ۳۰ درجه سلسیوس، یک مبدل حرارتی پوسته و لوله بین برج خنک‌کن خشک و تر تعبیه می‌شود که حدود ۵ درجه سلسیوس باعث کاهش

^۱ Shell



کارون تأمین می‌شود، بنابراین به دلیل کاهش بارش‌ها و همچنین تخلیه فاضلاب صنعتی و انسانی به این رودخانه، شرایط آب مشابه با نیروگاه مفتاح همدان و شاید به مراتب بدتر نیز است (Ghahraman Afshar et al., 2023a, Ghahraman Afshar et al., 2023b).

بنابراین با توجه به در نظر گرفتن شرایط آب تأمینی و همچنین پیچیدگی سازوکار برج‌های خنک‌کن، پایش بار میکروبی برج‌های خنک‌کن و همچنین برقراری ارتباط کلیدی بین بار میکروبی برج‌های خنک‌کن با پارامترهای شیمیایی و فیزیکوشیمیایی بسیار حائز اهمیت است. بنابراین در این پژوهش برای اولین بار خواص فیزیکوشیمیایی، شیمیایی و میکروبی انواع نمونه آب نیروگاه شهید مفتاح همدان به شرح آب تأمینی، آب برج خنک‌کن تر و آب برج خنک‌کن خشک بررسی شد. در نهایت ارتباط کلیدی بار میکروبی با پارامترهای فیزیکوشیمیایی برقرار شد و برای هر معضل میکروبی یک راهکار اصلاحی پیشگیرانه معرفی شد.

۲- تجربی

۲-۱- مواد و تجهیزات موردنیاز

انواع مواد سازنده محیط کشت شامل بر پایه آگار به صورت گرانوله از شرکت مرک آلمان تهیه شد. کیت‌های میکروبی سنجش باکتری‌های اشیریشیاکلی^۱، سنجش تعداد کل باکتری‌ها^۲ و آزمون‌های اختصاصی سنجش باکتری‌های خاص نظیر باکتری‌های تولیدکننده اسید^۳، فلورسانس سودوموناس^۴، باکتری‌های مرتبط با آهن^۵، باکتری احیاکننده نیتрат^۶ از شرکت زیست کاوش ایرانیان که نماینده رسمی شرکت ایبرسکو^۷ سوئیس است تهیه شد. همچنین سایر معرف‌های شیمیایی برای بررسی تغییر رنگ کیت‌ها و کالیبراسیون دستگاه از برند مرک^۸ در گرید تجزیه‌ای^۹ تهیه شد.

۲-۲- نمونه‌برداری

در این پژوهش از ۴ نقطه کلیدی در نیروگاه شهید مفتاح همدان به شرح آب تأمینی، آب دمین، آب برج خنک‌کن تر و خشک نمونه‌برداری انجام شد. تعداد نمونه‌ها برای هر نقطه به‌منظور انجام

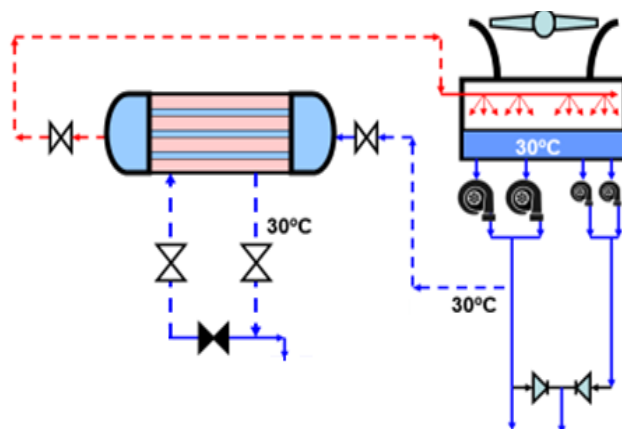


Fig. 4. Schematic of the converter with a wet cooling tower

شکل ۴- شماتیک مبدل با برج خنک‌کننده تر

می‌شود. شکل ۴ شمای این مبدل را نشان می‌دهد (Marzouk et al., 2023).

منشأ آب تأمینی نیروگاه شهید مفتاح همدان پساب تصفیه‌خانه شهر همدان است، بنابراین بار میکروبی در برج‌های خنک‌کن این نیروگاه در قیاس با سایر نیروگاه‌ها بسیار متفاوت و بالاتر است. لازم به ذکر است شرایط این نیروگاه با توجه به داشتن برج خنک‌کن تر و برج خنک‌کن خشک در قیاس با نیروگاه‌های معمول نیز به مراتب دشوارتر است. به‌عنوان مثال آب تأمینی در نیروگاه شهید منتظر قائم کرج، آب چاه عمیق است که به مراتب بار میکروبی کمتری نسبت به آب تأمینی نیروگاه مفتاح دارد. همچنین آب تأمینی نیروگاه شهید بهشتی لویشان چاه فلمن است که در عمده فصول سال (غیر از تابستان) به دلیل بارش‌های فصلی، کیفیت مناسب و بار میکروبی کمتری نسبت به نیروگاه مفتاح دارد.

از سوی دیگر در ارتباط با نیروگاه‌های شهید سلیمی نکا و نیروگاه بندرعباس به دلیل داشتن چرخه یک‌بار عبور و تأمین آب از دریای خزر و خلیج فارس (به ترتیب) شرایط بار میکروبی به مراتب نسبت به نمونه تأمینی از فاضلاب (نیروگاه مفتاح) بهتر است. تنها نیروگاهی که از حیث شرایط میکروبی با این نیروگاه برابری می‌کند، نیروگاه رامین اهواز است. آب تأمینی نیروگاه رامین از رودخانه

⁶ Nitrate Reducing Bacteria

⁷ Ibresco Company

⁸ Merck

⁹ Analytical Grade

¹ *Escherichia coli* (E. coli)

² Total Bacteria Count (TBC)

³ Acid Producing Bacteria (APB)

⁴ Fluorescence Pseudomonas (FP)

⁵ Iron Related Bacteria (IRB)

SMWW و 2320 B SMWW است (Ghahraman Afshar et al., 2023a).

۲-۵- آزمون‌های میکروبی بر پایه محیط کشت

در بحث بررسی شرایط میکروبی برای نمونه آب تأمینی (پساب)، آب برج خشک، آب برج تر و آب دمن هر دو دسته آزمون‌های کیت تعیین مقدار باکتری و محیط کشت انجام شد. از جمله مزایای روش کیت‌های میکروبی می‌توان به سریع بودن مراحل تست، سریع بودن پاسخ‌گویی و هزینه‌های پایین آن اشاره کرد. این در حالی است که در مواردی که پاسخ کیت برای یک نمونه آب کمتر از حد تشخیص کیت و یا بسیار بالا (در رنج High) خوانده می‌شود، نتایج کیت نیاز به ارزیابی و معتبرسازی دارد. به این منظور در این پروژه در تمامی موارد و به‌طور ویژه کمتر از حد تشخیص کیت و رنج‌های بسیار بالا آزمون‌های محیط کشت عمومی و انتخابی بسیار ضروری به نظر می‌رسد.

روش اصلی برای سنجش تعداد کلونی انواع باکتری‌های اختصاصی و عمومی در این پژوهش روش کیت میکروبی بود. از سوی دیگر روش محیط کشت‌های مایع و جامد نیز به‌عنوان روش مرجع برای اعتبارسنجی روش کیت میکروبی استفاده شد. در مواردی که تعداد باکتری‌های بسیار کم (پایین‌تر از حد تشخیص کیت میکروبی) بود، برای اطمینان از روش محیط کشت نیز برای تأیید داده استفاده شد. همچنین در مواردی که تعداد باکتری‌ها بسیار بیشتر از حد تشخیص روش کیت میکروبی بود، از روش محیط کشت مایع، رقیق‌سازی پله‌ای و در نهایت کشت روی محیط جامد برای شمارش تعداد کلونی‌ها برای اعتبارسنجی روش کیت میکروبی استفاده شد.

همچنین در ارتباط با محیط کشت‌های جامد و مایع موارد به شرح ذیل قابل‌ذکر است. کلونی‌ها معمولاً در محیط کشت جامد (آگار) به‌صورت یک توده قابل‌مشاهده از سلول‌ها تشکیل می‌شود و در این نوع محیط کشت قابل‌شمارش در واحد CFU/mL هستند. در محیط کشت مایع نمی‌توان کلونی‌ها را به‌طور مستقیم شمارش کرد. از سوی دیگر، در محیط مایع می‌توان تعداد تقریبی یا غلظت میکروارگانیسم‌ها را با روش‌های دیگری به شرح ذیل اندازه‌گیری کرد:

تمامی آزمون‌های میکروبی، فیزیکوشیمیایی و شیمیایی برابر با ۳ نمونه و ۳ تکرار بر روی هر نمونه بود. در این راستا، نتایج آزمون حاصل از ۳ نمونه مشابه و ۳ مرتبه پایش روی هر نمونه (مجموع ۹ آنالیز) ثبت و میانگین آن به صورت نتیجه نهایی گزارش شد. زمان نمونه‌برداری برای آب تأمینی، آب دمن، آب برج خنک‌کن تر و خشک در زمان شهریورماه سال ۱۴۰۳ بود. همچنین نمونه‌برداری در سایر فصول سال ۱۴۰۳ و ۱۴۰۴ نیز انجام شد که نتایج این نمونه برداری‌ها نیز از پترن مشابهی با این پژوهش پیروی می‌کند ولی در این پژوهش گزارش نشد.

۲-۳- پایش فیزیکوشیمیایی

در این پژوهش از دستگاه رومیزی هدایت‌سنج و pH متر برند HANA که به ترتیب مجهز به الکترود پلاتینی و شیشه‌ای هستند استفاده شد. لازم به ذکر است که تجهیزات مورد استفاده برای سنجش pH، هدایت، TDS^۱ و شوری پیش از استفاده با نمونه استاندارد کالیبره شد. در این روش با غوطه‌ور کردن الکترود pH الکترود هدایت‌سنج کالیبره در نمونه‌ها پارامترهای هدایت الکتریکی، درصد شوری، TDS و pH بررسی شد (Ghahraman Afshar et al., 2024).

۲-۴- پایش شیمیایی یون‌ها

پارامترهای مهم و قابل آنالیز در نمونه‌های آب تأمینی و برج خنک‌کن تر مانند یون‌های موجود در نمونه نیازمند سنجش دقیق در آزمایشگاه است، بنابراین آنالیزهای مربوط به هر یون با روش‌های استاندارد مرسوم در دنیا انجام شده است. به‌منظور سنجش یون‌های سدیم و پتاسیم از روش فلیم فتومتری طبق استاندارد 3500-Na و 3500-K بهره گرفته شد. همچنین برای آنالیز کلسیم و منیزیم از استاندارد 3500 Ca-B و 3500 Mg-B و با روش جذب اتمی استفاده شد. آنالیز نیترات، نیتريت، فلوراید و فسفات موجود در نمونه مطابق روش استاندارد 4110 SMWW با روش طیف‌سنجی^۲ انجام شد. آنالیز یون کلرید، سولفات و قلیائیت نمونه نیز به ترتیب با روش تیتراسیون موهر، تیتراسیون باریم و تیراسیون با HCl انجام شد. استاندارد انجام این آزمون‌ها نیز روش 4110، 4500 Cl

^۱ Total Dissolved Solid (TDS)

^۲ UV-VIS

در محیط کشت SDA هدف از کشت بسیار مهم است و وابسته به این هدف افزودن آنتی‌بیوتیک‌ها نظیر جنتامایسین و یا کلرامفنیکل تصمیم‌گیری می‌شود. آنتی‌بیوتیک‌هایی نظیر جنتامایسین و کلرامفنیکل مانع رشد باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی می‌شوند و در این شرایط، محیط کشت برای قارچ و مخمر غنی می‌شود. لازم به ذکر است در مواردی که آلودگی زیاد در محیط کشت وجود دارد و هدف اصلی پژوهش بررسی قارچ و مخمر است، افزودن آنتی‌بیوتیک‌ها (جنتامایسین و کلرامفنیکل) به‌منظور ممانعت رشد باکتری و غنی‌سازی محیط کشت برای رشد قارچ و مخمر ضروری است. محیط کشت SDA برای کشت قارچ و مخمر استفاده می‌شود. محیط کشت SDA به لحاظ محتوا با محیط کشت PDA یکسان است، اما نشاسته اضافی دارد و pH آن برای رشد قارچ و مخمر تنظیم شده است.

برای کشت اختصاصی NRB محیط کشت‌هایی نظیر نیترات براث که حاوی نیترات پتاسیم، پپتون و عصاره گوشت است، به‌کار گرفته می‌شود. در نهایت پس از کشت از معرف‌های تغییر رنگ برای سنجش NRB بهره گرفته می‌شود. برای کشت IRB محیط کشت‌هایی نظیر ASA پیشنهاد می‌شود. این محیط کشت حاوی پپتون، سولفیت آهن و گلوکز است که برای کشت باکتری‌های تولیدکننده سولفید هیدروژن نیز مناسب است. محیط کشت مناسب برای باکتری‌های هوازی^۸ از خانواده آئروژینوزها شامل NA به‌عنوان محیط عمومی برای رشد بسیاری از باکتری‌های هوازی، TSA برای رشد طیف وسیعی از باکتری‌های هوازی و غیرهوازی اختیاری و PCA محیطی مناسب برای شمارش باکتری‌های هوازی مزوفیل، به‌ویژه در نمونه‌های غذایی و آب است.

برای کشت باکتری‌های از خانواده سودوموناس (FP) محیط کشت‌های NA به‌عنوان محیط عمومی و مناسب و کینگ بی آگار برای تعیین رنگ‌دانه‌ها، محیط کشت TSA به‌عنوان محیط غنی برای رشد و نگهداری سودوموناس و محیط کشت PAB به‌عنوان محیط انتخابی و اختصاصی برای جداسازی و شناسایی

✓ به کمک محیط کشت مایع به همراه روش کدورت‌سنجی تخمین تراکم کلونی انجام می‌شود ولی این روش قادر به شمارش مستقیم کلونی نیست.

✓ در کشت مایع با میکروسکوپ و لام، تعداد کلونی‌ها به‌طور مستقیم و با تخمین قابل‌شمارش است.

✓ در محیط کشت مایع به همراه رقیق‌سازی متوالی و در نهایت کشت روی محیط جامد، امکان شمارش مستقیم و تعیین تعداد واحدهای کلونی برحسب CFU/mL وجود دارد.

✓ روش محتمل‌ترین تعداد^۱ برای تخمین تعداد میکروارگانیسم‌ها در نمونه‌های مایع به‌ویژه وقتی شمارش مستقیم دشوار است، پیشنهاد می‌شود.

به‌منظور تهیه محیط کشت‌های عمومی و اختصاصی، محیط کشت شمارش کلی آگار^۲، نوترینت آگار^۳، سابرو دکستروز آگار^۴، پتیتو دکستروز آگار^۵، نیترات براث^۶، آیرون سولفیت آگار^۷، کینگ بی آگار^۸، تریپیک سوی آگار^۹، سودوموناس آگار بیس^{۱۰}، APB براث^{۱۱}، APB مدیوم^{۱۲} و پوستیج بی^{۱۳} برای تمامی نمونه‌ها به‌کار گرفته شد. برای هر نمونه ۳ محیط کشت اصلی و ۳ محیط کشت کنترل برای سنجش TBC سنتز می‌شود. برای سنجش تعداد کل باکتری‌های ۱ سری ۶ تایی محیط کشت (۳ نمونه اصلی و ۳ نمونه کنترل) PCA تهیه می‌شود. در ادامه ۱ سری ۶ تایی محیط کشت اصلی و کنترل PCA برای کشت کلونی تهیه می‌شود. برای سنجش تک باکتری‌های اختصاصی از کلونی‌های کشت PCA، ۶ سری ۶ تایی (۱۸ نمونه اصلی و ۱۸ نمونه کنترل) محیط کشت SDA تهیه می‌شود. برای سنجش میزان جلبک، کپک و قارچ ۱ سری ۶ تایی (۳ نمونه اصلی و ۳ نمونه کنترل) محیط کشت SDA تهیه می‌شود. در برخی موارد نیاز است ۲ سری ۶ تایی محیط کشت SDA تهیه شود که یک سری دارای جنتامایسین و یک سری فاقد جنتامایسین است.

⁸ King B Agar⁹ Tryptic Soy Agar (TSA)¹⁰ Pseudomonas Agar Base (PAB)¹¹ APB Broth¹² APB Medium¹³ Postage B¹⁴ Aero¹ Most Probable Number (MPN)² Plate Count Agar (PCA)³ Nutrient Agar (NA)⁴ Subro Dextrose Agar (SDA)⁵ Potato Dextrose Agar (PDA)⁶ Nitrate Broth⁷ Iron Sulfite Agar (ISA)

کشت بر روی هات پلیت^۱ قرار گرفته تا جایی که پودر کاملاً حل شده و به حالت شفاف برسد.

از جمله مراقبت‌های لازم می‌توان به این نکته اشاره کرد که پودر نباید ببندد و حالت "ته‌دیگی" پیدا کند. هم زدن سریع به شرایط تشکیل کامل و صحیح پودر کمک می‌کند. همچنین استفاده از مگنت به شرایط پایداری تشکیل محیط‌زیست کمک شایانی می‌کند. به‌منظور محیط‌سازی PCA، در حدود ۱۵ دقیقه محلول کشت در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس قرار می‌گیرد تا جایی که حباب‌های ریز به حباب‌های درشت تبدیل شود (الزاماً محیط کشت باید شفاف شود). ایجاد حباب‌های درشت به معنای تکمیل مراحل ساخت محیط کشت است.

فرایند شفاف‌سازی در ساخت محیط کشت بسیار حائز اهمیت است، زیرا از بین رفتن حالت کدورت و حباب‌های ریز نشان‌دهنده سلامت محیط کشت است. عدم شفافیت محیط کشت حکایت از انجام نشدن صحیح مراحل آماده‌سازی را دارد. شفاف‌سازی باید در مراحل آماده‌سازی انجام شود و انجام آن در مراحل بعدی نظیر استریلیزاسیون غیراصولی و امری ریسکی محسوب می‌شود.

بعد از ایجاد حالت شفاف، محیط کشت به اتوکلاو برای استریلیزاسیون انتقال داده می‌شود. برای این فرایند ۱۵ دقیقه در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس قرار می‌گیرد. بعد از استریلیزاسیون الزاماً محیط کشت فقط روی شعله و کنار هود برای آزمون استفاده می‌شود. در غیر این صورت شرایط استریل محیط کشت از بین می‌رود. دمای نمونه آب نیروگاهی که باید نمونه روی محیط کشت ریخته شود حدود ۴۰ تا ۴۵ درجه سلسیوس است. در این دما آگار جامد نمی‌شود و هم به باکتری‌های شوک وارد نمی‌شود. اگر افزودن نمونه در دمای بالاتر انجام شود، به باکتری شوک وارد شود جواب منفی کاذب خواهیم داشت.

محیط کشت قابلیت استفاده کنار شعله و زیر هود لامینار را دارد، در غیر این صورت شرایط استریل بر هم می‌خورد. اگر محیط کشت در شرایط درب باز قرا گیرد و یا چیزی نظیر همزن وارد آن شود، شرایط استریل بر هم می‌خورد. شمارش کلی میکروارگانیسم‌ها در محیط کشت بسیار کلیدی و حساس است، زیرا در صورت ورود

سودوموناس‌ها استفاده می‌شود. برای شناسایی کلی APB به‌ویژه در نمونه‌های آب صنعتی، رسوبات یا سیستم‌های مرتبط با خوردگی میکروبی، معمولاً از محیط‌های حاوی منبع کربوهیدرات مثل گلوکز و یک شاخص pH استفاده می‌شود. رشد باکتری و تولید اسید باعث کاهش pH و تغییر رنگ شاخص می‌شود. محیط‌های اختصاصی تجاری برای کشت APB شامل APB براث و APB مدیوم هستند. محیط کشت پوستیج بی یکی از انتخاب‌های متداول برای کشت SRB است، به‌خصوص اگر هدف بررسی SRB مرتبط با خوردگی میکروبی باشد. رشد SRB معمولاً با تولید سولفید هیدروژن همراه است و در محیط دارای نمک آهن، تشکیل رسوب سیاه سولفید آهن می‌تواند به‌عنوان نشانه مثبت فعالیت SRB استفاده شود. نکته مهم این است که SRB‌ها معمولاً بی‌هوازی هستند و بنابراین شرایط بی‌هوازی و روش کشت مناسب برای دریافت نتیجه قابل‌اعتماد بسیار مهم است.

پایه اصلی تمام این محیط کشت‌ها آگار است که با توجه به شرایط آزمایش و نسبت درصدی (آب: آگار) محیط کشت مایع، نیمه جامد و جامد است. محیط کشت‌های مایع برای استفاده‌های کوتاه‌مدت و محیط کشت جامد برای نگهداری‌های بلندمدت کاربرد دارد. در این پژوهش به دلیل کشت سریع کلونی باکتریایی عمومی عمدتاً محیط کشت‌های کوتاه‌مدت مایع کاربرد داشتند (Arora, 2013).

۲-۵-۱- روش تهیه محیط کشت بر پایه آگار

برای تهیه محیط کشت PCA مقدار ۲۲/۵ گرم پودر کشت PCA در یک لیتر، برای تهیه محیط کشت NA میزان ۲۰ گرم پودر محیط کشت NA در یک لیتر آب و برای تهیه محیط کشت SDA مقدار ۶۵ گرم پودر محیط کشت SDA در یک لیتر آب محلول می‌شود. طرز تهیه محیط کشت بدین ترتیب است که مقدار معین پودر و یا گرانول (محیط کشت مرکب) توزین شده در ظرف فلاسک (ظرف محیط کشت) قرار داده می‌شود. در این شرایط به نمونه پودری توزین شده آب دمین با هدایت بسیار پایین اضافه می‌شود (نیاز نیست آب استریل باشد). آب با هدایت پایین به همراه پودر محیط

^۱ Hot Plate



شود. نمونه‌های این‌چنینی حاکی از شرایط آلاینده‌ی بالای محیطی، فیزیکی، شیمیایی و میکروبی (رطوبت، باد، هوا و فلزات) هستند. محیط کشت NA یک محیط کشت مغذی برای باکتری‌های عمومی (مناسب باکتری غیرمشکل‌پسند) است. در محیط NA برای گرفتن کلونی تک از باکتری‌های کشت شده بسیار کاربرد دارد که این فرایند پاساژ نامیده می‌شود. در فرایند پاساژ، نمونه باکتری در جایی رشد پیدا کرده (به‌طورکلی در PCA) و برای رشد تکمیلی به محیط کشت مغذی نظیر NA انتقال داده می‌شود. این فرایند کشت ۴ یا ۵ منطقه‌ای نامیده می‌شود که برای ایجاد کلونی تک در دمای ۳۷ درجه سلسیوس در بازه زمانی ۱ تا ۲ روزه است. این فرایند در شرایطی انجام می‌شود که باکتری توده‌ای در یک محیط PCA وجود دارد و باکتری تک از آن در محیط NA استخراج می‌شود. برای پاساژ دادن عمده باکتری‌ها و به‌طور خاص اینجا نمونه باکتری‌های اختصاصی نیروگاهی از محیط کشت NA و کیت‌های اختصاصی استفاده می‌شود. محیط کشت SDA برای رشد اختصاصی کپک، مخمر و قارچ استفاده می‌شود. برای مهار رشد سایر انواع باکتری ترکیب کلرامفنیکول^۱ و یا جنتامایسین^۲ به محیط کشت SDA اضافه می‌شود تا کلونی اختصاصی کپک و قارچ فقط رشد داده شود. در این محیط کشت بحث انکوبه شدن یک فرایند ۳ تا ۵ روزه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس است. فرایند در ابتدا ۳ روزه بررسی می‌شود و در صورت عدم رشد ۵ روزه بررسی می‌شود. محیط کشت SDA نسبت به محیط‌های NA و PCA فرایند پیچیده‌تری محسوب می‌شود (Poon, 2022).

۲-۶- آزمون میکروبی به روش تست کیت

کیت‌های میکروبی مزایای بسیار زیادی در قیاس با محیط کشت‌های معمول و سنتی دارند که از جمله این مزایا می‌توان به عدم نیاز به تأمین تعداد کثیری از محیط کشت‌های عمومی-اختصاصی-افتراقی برای یک نوع باکتری، صرفه‌جویی در زمان، کاهش مصرف مواد شیمیایی و میکروبی، عدم نیاز به تجهیزات پیچیده و شرایط استریل اشاره کرد. در این آزمون، کیت *E. coli* و TBC به مدت ۱۰ ثانیه در نمونه اصلی و بدون رقیق‌سازی غوطه‌ور شد. پس از آن کیت از نمونه خارج شد و اضافی نمونه از سطح کیت با تکان دادن

هرگونه میکروارگانیسم حاصل از محیط که به شرایط نمونه مربوط نیست بر روی نتایج تست بسیار تأثیرگذار خواهد بود. در شرایط استریل بودن محیط کشت و انتقال صحیح نمونه به محیط کشت می‌توان اطمینان حاصل کرد که نتیجه آزمون فقط به محیط کشت مربوط است. انواع شرایطی که بعد از تزریق نمونه نیروگاهی به محیط کشت وارد می‌شود تحت نام آلودگی میکروبی ثانویه نامیده می‌شود. محیط کشت تا زمان که دارای شفافیت است قابلیت استفاده را دارد. محیط کشت‌ها برای بازه زمانی ۱ یا ۲ روزه با اطمینان قابلیت استفاده را دارند و بعد از آن استفاده از آن ریسک بالایی دارد. بنابراین باید محیط‌های کشت تازه تهیه شده و هر آزمون با تکرارهای حداقل ۳ بار و حجم ۱ لیتر انجام شود. شرایط نگهداری محیط کشت در دمای ۴۷ تا ۵۰ درجه سلسیوس است. در زمان انجام تمامی آزمون‌ها باید آزمون ۳ بار تکرار برای نمونه اصلی انجام شود. همچنین پلیت شاهد برای تمامی آزمون‌ها به تعداد تکرار ۳ بار الزامی است (Kumar et al., 2025).

۲-۵- ویژگی محیط‌های کشت

محیط کشت PCA یک محیط کشت عمومی است که برای ارزیابی یک دید کلی از وضعیت نمونه انجام نمی‌شود. آزمون PCA برای نمونه‌هایی که فاقد انواع استاندارد و برگه آنالیز است و به عبارت دیگر برای نمونه‌های ناشناخته (در این پژوهش نمونه نیروگاهی) کاربرد دارد. در این شرایط در ابتدا یک آزمون شمارش تعداد کل باکتری در محیط PCA در مدت ۳ روز در دمای ۲۵ درجه سلسیوس انجام می‌شود. این محیط کشت شناسایی انواع میکروارگانیسم شامل باکتری، کپک و قارچ را به صورت عمومی ارائه می‌دهد. در محیط PCA کلونی‌ها یکدست نیستند. نمونه‌هایی با تعداد کل بالا دارای انواع باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی، انواع قارچ‌ها و کپک‌ها هستند. در این پژوهش برای سنجش تعداد کل باکتری از محیط کشت PCA و تست کیت TBC استفاده شد. بالا بودن مقدار کلی باکتری‌ها بیانگر یک‌گونه به‌طور اختصاصی نیست. نمونه‌هایی که دارای تعداد کل باکتری بالا است، نمونه مناسب محسوب نمی‌شود. در این شرایط نیاز است این نمونه از حیث انواع باکتری‌های عمومی و اختصاصی با روش‌های کشت، کیت‌های عمومی و تخصصی آنالیز

^۱ Chloramphenicol

^۲ Gentamicin



برای برج خشک و آلاینده‌گی 10^3 CFU/mL برای برج تر محاسبه می‌شود. به دلیل بار میکروبی بسیار پایین آب سیکل در لوله و همچنین میزان بالای بار میکروبی آب خنک‌کن در پوسته، احتمال نشستی از سمت پوسته به درون لوله بسیار پایین است. از سوی دیگر و با توجه به شرایط بار میکروبی بسیار پایین آب سیکل لوله در قیاس با آب خنک‌کن پوسته (همچنین غلظت پایین انواع یون‌ها در لوله و غلظت بالای انواع یون‌ها در پوسته)، امکان بررسی احتمال نشستی از سمت لوله به پوسته میسر نیست. لازم به ذکر است که به‌منظور از بین بردن مقدار متوسط این تعداد کل باکتری‌ها زیست‌کش آلی ایزوتیازولین و گلو تار آلدهید در برج تر و همچنین ازن‌زنی در برج خشک پیشنهاد می‌شود.

ازن‌زنی از روش‌های کلیدی برای اکسیداسیون آلاینده‌ها و کنترل میکروارگانیسم‌ها بر پایه سازوکار زیست‌کش اکسند است. از مزایای ازن‌زنی می‌توان به ضدعفونی مؤثر (از بین بردن باکتری‌ها، ویروس‌ها و قارچ‌ها)، کنترل زیست‌لایه، اکسیداسیون مواد آلی، کنترل رنگ و بو اشاره کرد. همچنین لازم به ذکر است که ازن ناپایدار است و در نهایت به اکسیژن تبدیل می‌شود، بنابراین مزیت اصلی ازن عدم تولید باقیمانده پایدار است. از سوی دیگر در برج خنک‌کن، ازن می‌تواند برای کنترل رشد میکروبی (کنترل رشد باکتری‌های هوازی، SRB، APB و کاهش تشکیل زیست‌لایه) استفاده شود. از سوی دیگر، عمده زیست‌کش‌های آلی به صورت شوک دوز به برج خنک‌کن افزوده می‌شود، به‌طوری‌که غلظت ابتدایی در حدود ۱۰۰ ppm محاسبه شود و غلظت باقیمانده‌ای در حدود ۱۰ ppm ایجاد کنند. لازم به ذکر است که این حدود غلظتی تقریبی است و بسیار وابسته به شرایط برج خنک‌کن و نتایج حاصله از اعمال شوک دوز اول است.

با توجه به اینکه منشأ آب تأمین این نیروگاه خروجی تصفیه‌خانه شهری است و باکتری *E. coli* اصلی‌ترین و مهم‌ترین آلاینده فاضلاب شهری است. بنابراین بررسی این باکتری در این نیروگاه و سایر نیروگاه‌هایی که منشأ تأمین آب آن‌ها فاضلاب شهری است امری ضروری برای ردیابی منشأ باکتریایی است. آزمون *E. coli* به‌منظور تأیید و تکمیل آزمون محیط کشت PCA و تست کیت TBC انجام شده است. در انجام آزمون *E. coli* مقدار این پارامتر برای آب دمین، برج خشک و آب تأمین برابر با کمتر از حد تشخیص روش محاسبه شده است. این در حالی است که مقدار

جدا شد. در ادامه کیت در درون ظرف مخصوص قرار داده شد و درب ویال محکم بسته شد. سپس ویال به صورت افقی در دمای محیط ۲۵ درجه سلسیوس قرار داده شد و در بازه زمانی ۲۴ تا ۷۲ ساعت (بازه زمانی متغیر تا ثابت شدن تغییرات رنگ کیت) با نمونه مرجع قیاس شد. در نهایت با شمارش خانه‌های پر شده کیت نمونه و قیاس با کیت مرجع غلظت‌ها محاسبه شد. در ادامه برای انجام آزمون‌های APB، IRB، NRB، Aero، SRB و TRB به میزان ۱ mL از هر نمونه به کیت تزریق شده و به مدت ۳ روز برای تغییرات رنگ حفظ شد. همچنین به‌منظور انجام آزمون FP به میزان ۱ mL نمونه به کیت تزریق شده و کیت با درب بسته حفظ شد (Nazari et al., 2026).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمون باکتری‌های عمومی آب تأمین، آب دمین، آب برج خنک‌کن خشک و تر

بر اساس نتایج آزمون TBC و محیط کشت PCA، مقدار TBC و شمارش تعداد کل باکتری‌ها برای آزمون PCA نمونه آب دمین و آب برج خشک کمتر از حد تشخیص روش محاسبه می‌شود و نتایج کشت میکروبی نیز نتایج کیت را تأیید می‌کند. از سوی دیگر نتایج آزمون TBC و محیط کشت PCA برای برج تر در حدود 10^3 CFU/mL و برای نمونه آب تأمین در حدود 10^4 CFU/mL برآورد می‌شود که رشد قطر هاله کشت نیز این نتایج را تأیید می‌کند. بر این اساس می‌توان نتیجه‌گیری کرد که فرایند گندزدایی مربوط به آب دمین در ایده‌آل‌ترین حالت انجام شده، در نتیجه آن آب برج خشک نیز سطح TBC کمتر از حد تشخیص روش را دارد.

در ادامه می‌توان نتیجه‌گیری کرد که هم‌گندزدایی آب دمین و هم‌مسیرهای انتقال آب به برج خشک در بالاترین سطح کیفی انجام می‌شود، زیرا برج خشک نیز عاری از آلاینده‌های میکروبی است. در ادامه نتایج TBC و کشت PCA برای برج تر و نمونه آب تأمین ۱۰ مرتبه بیشتر است و شرایط برای آب تأمین آلوده‌تر محاسبه شده است. بر این اساس فرایندهای گندزدایی آب تأمین و انتقال آن به برج تر دارای عملکرد نسبی است و تنها قادر است میزان TBC را ۱۰ مرتبه کاهش دهد و از 10^4 به 10^3 CFU/mL برساند.

بر اساس نتایج TBC، آلاینده‌گی کمتر از حد تشخیص روش



می‌شود روش‌های گندزدایی پیشرفته نظیر تزریق زیست‌کش آلی برای برج تر و همچنین ازن‌زنی برای برج خشک به‌منظور کاهش بار میکروبی ناشی از FP در دستور کار قرار گیرد.

در ارتباط با باکتری APB آزمون‌ها به شرح محیط کشت APB براث و APB مدیوم و تست کیت APB انجام شد. مقدار باکتری APB در آب دمین و برج خشک برابر در حدود ۴۵۰ CFU/mL محاسبه شد. از سوی دیگر مقدار این باکتری در آب برج تر و نمونه آب تأمینی در حدود ۷۵ CFU/mL محاسبه شد. بر اساس داده‌های محیط کشت و تست کیت در مراحل تصفیه‌خانه نیروگاه و تولید آب دمین (در نهایت و انتقال آن به برج خشک) مقدار این باکتری نسبت به آب تأمینی افزایش داشت. این تغییرات نشان‌دهنده آن است که شرایط تولید دمین و مسیرها نه‌تنها مقدار این باکتری را کاهش نداده است، بلکه منجر به افزایش این باکتری از ۷۵ به ۴۵۰ CFU/mL شده است. عمده نقش APB تولید اسید است و در شرایط غلظت بالای فعالیت این باکتری منجر به اسیدی شدن آب می‌شود. در نتیجه برای فرایندهای تصفیه‌خانه نیروگاهی راهکارهای اصلاحی نظیر زیست‌کش آلی و ازن‌زنی به‌منظور حذف و کاهش مقدار این باکتری توصیه می‌شود (شکل ۵).

E. coli برای برج تر در حدود 10^2 CFU/mL محاسبه شده است. کمتر از حد تشخیص روش بودن مقدار *E. coli* برای آب دمین و برج خشک حکایت از گندزدایی ایده‌آل مراحل تصفیه‌خانه نیروگاهی دارد. کمتر از حد تشخیص روش بودن *E. coli* در نمونه آب تأمینی کیفیت ایده‌آل آب تأمینی را نشان می‌دهد. در نهایت مقدار بالای *E. coli* در برج تر و کمتر از حد تشخیص روش بودن این پارامتر در برج خشک فرضیه اختلاط آب برج تر و خشک را در مبدل شل‌اند تیوب‌ها را رد می‌کند.

۲-۳- آزمون باکتری‌های اختصاصی آب تأمینی، آب دمین، آب برج خنک‌کن خشک و تر

در ارتباط با پارامتر FP و انجام محیط کشت NA باکتری موارد به شرح ذیل محاسبه شد. بر این اساس مقدار FP برای آب دمین، آب برج خشک، آب برج تر و آب تأمینی برآورد شد. نتایج حاکی از آن بود که تصفیه‌خانه نیروگاه قادر به حذف باکتری سودوموناس نبوده است و در تمامی موارد نمونه‌های آب به این باکتری آلوده است. همچنین در ادامه لازم به ذکر است که نتایج محیط کشت NA نیز مثبت بودن باکتری سودوموناس را تأیید می‌کند. در ادامه پیشنهاد

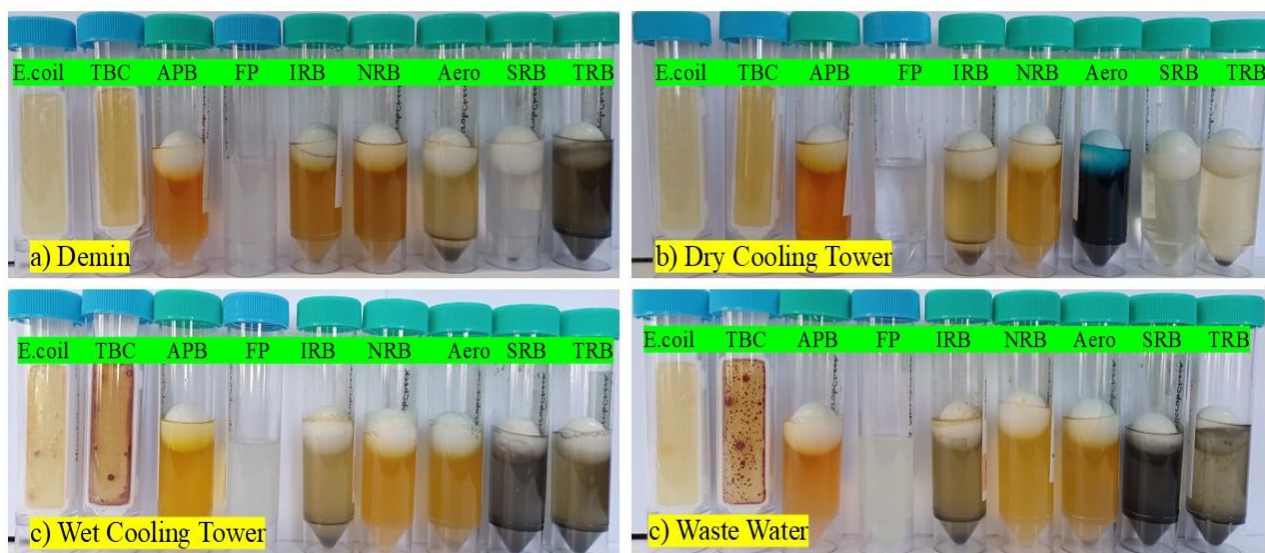


Fig. 5. Image of the microbial kit showing test results for *E. coli*, TBC, APB, FP, IRB, NRB, Aero, SRB and TRB at the following points: a) demineralized water, b) dry cooling tower, c) wet cooling tower, and d) supplied water

شکل ۵- تصویر کیت میکروبی شامل نتایج آزمون‌های *E. coli*, TBC, APB, FP, IRB, NRB, Aero, SRB و TRB برای نقاط (a) آب دمین، (b) برج خنک‌کن خشک، (c) برج خنک‌کن تر، (d) آب تأمین

اول به شرح استفاده از زیست‌کشت آلی و راهکار دوم به شرح استفاده از بازدارنده‌های خوردگی آهن با مکانیسم پوششی است.

همان‌طور که بر اساس مراجع و مقالات پیشین قابل‌ارائه است، پارامتر SRB از شناخته‌شده‌ترین عوامل میکروبی و به‌طور خاص چرخه میکروبی نیروگاه‌ها است. این باکتری تحت نام باکتری احیاکننده سولفات شناخته می‌شود و خوراک این باکتری یون سولفات است که در نتیجه تنظیم pH آب با اسیدسولفوریک، این یون به‌وفور در چرخه خنک‌کن آب‌های نیروگاهی موجود است. بنابراین به دلیل فراوانی یون سولفات در آب چرخه خنک‌کن، حضور این باکتری نیز در چرخه خنک‌کن بسیار محتمل و دارای غلظت بالا است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از محیط کشت NA و آزمون تست کیت SRB، میزان SRB در آب تأمین در بازه بالا قرار دارد که در نتیجه عملکرد تصفیه‌خانه بر روی این پارامتر میزان آن در آب برج تر به حدود متوسط می‌رسد. این درحالی است که مقدار SRB در آب دمین و برج خشک برابر، کمتر از حد تشخیص روش (نتیجه محیط کشت پوستیج بی) تخمین زده می‌شود. کمتر از حد تشخیص روش بودن آن در آب دمین و برج خشک و همچنین کاهش مقدار آن از بالا به متوسط نشانگر تأثیرگذار بودن عملکرد تصفیه‌خانه در کاهش مقدار این باکتری است. از سوی دیگر داشتن مقدار متوسط SRB در آب برج تر و همچنین مقدار کمتر از حد تشخیص روش SRB در آب برج خشک حکایت از عدم اختلاط آب برج تر و خشک در مبدل شل‌اند تیوب‌ها دارد. نکته قابل‌توجه در ارتباط با کاهش بار میکروبی SRB این است که تصفیه‌خانه از دو طریق بر کاهش مقدار SRB تأثیرگذار است. مسیر اول شامل کاهش یون سولفات خوراک از طریق سازوکارهای رسوب‌گذاری شیمیایی این یون است و مسیر دوم شامل حذف انواع باکتری‌های عمومی و اختصاصی از طریق افزودن زیست‌کشت اکسنده متداول (کلر و یا آب ژاول) و سازوکارهای میکروبی است (جدول ۱).

مقدار باکتری TRB با استفاده از محیط کشت NA و آزمون تست کیت TRB اندازه‌گیری شد. در آب دمین TRB در بازه بالا قرار داشت که میزان آن در آب برج خشک به پایین رسید. این در حالی است که مقدار TRB در آب تأمین و برج تر در حدود متوسط بود. نتایج حاکی از آن است که تصفیه‌خانه تأثیر چندانی بر مقدار TRB ندارد و فرایندهای اصلاحی برای حذف این باکتری به‌ویژه در مرحله تولید آب دمین توصیه می‌شود. همچنین بر اساس تصاویر

در ارتباط با NRB، مقدار این باکتری برای آب دمین، برج خشک، برج تر و آب تأمین بر اساس روش محیط کشت نیترا برات و تست کیت NRB در حدود متوسط به‌دست آمد. یکسان بودن NRB در نمونه آب تأمین با سایر موارد (برج خشک، برج تر و دمین) حاکی از آن بود که تصفیه‌خانه نیروگاه قادر به کاهش مقدار و حذف این عامل باکتریایی نیست. از سوی دیگر مقدار متوسط این باکتری برای فرایندهای دمین و خنک‌کن مزاحمت چندانی ایجاد نخواهد کرد. عمده نقش باکتری NRB احیای نیترا است و از آنجایی که نمونه آب تأمین این نیروگاه (به دلیل منشأ پساب داشتن) دارای مقدار نیترا بالا است، بنابراین مقدار این باکتری در حدود متوسط در تمامی نقاط تعیین می‌شود. از راهکارهای پیشگیرانه و مهندسی شده حذف این نوع باکتری، روش حذف خوراک باکتری (یون نیترا) پیشنهاد می‌شود. این بدین معنا است که در این مورد خاص با حذف یون نیترا مقدار NRB به‌شدت کاهش خواهد یافت. برای حذف یون نیترا آب تأمین راهکارهایی نظیر کاربرد رزین انتخاب‌گزینه مبادله‌کننده یون نیترا در مراحل تصفیه‌خانه پیشنهاد می‌شود.

در ارتباط با میزان Aero مقدار این پارامتر با استفاده از محیط کشت NA و تست کیت Aero به دست می‌آید. با آزمون Aero موارد به شرح ۶۱۰۰ CFU/mL برای آب دمین محاسبه شد که در رنج متوسط رو به بالا است و بر اساس شکل رسوبات به‌دست‌آمده در محیط کشت NA عمده Aero این نیروگاه از نوع هوازی است. در ادامه لازم به ذکر است که مقدار Aero برای برج خشک کمتر از حد تشخیص روش برآورد شده که دلیل اصلی آن دمای بالای آب برج خشک و حذف این نوع باکتری است. از سوی دیگر مقدار Aero برای برج تر و نمونه آب تأمین برابر و در حدود CFU/mL ۶۵۰۰ در بازه متوسط قرار داشت. نتایج حاکی از آن بود که تصفیه‌خانه نیروگاه تأثیر آن‌چنانی بر روی حذف و کاهش مقدار Aero ندارد و ارائه راهکارهای اصلاحی نظیر زیست‌کشت آلی پیشنهاد می‌شود.

میزان IRB در برج تر و خشک در حدود CFU/mL ۲۵ بود که مقدار این باکتری برای آب خام در حدود CFU/mL ۱۰۰ محاسبه شد. دلیل حضور باکتری در تمامی مراحل وجود این باکتری توأم با خوراک این باکتری (تجهیزات آهنی) بود. دو راهکار اصلی برای حذف و ممانعت از فعالیت این نوع باکتری پیشنهاد می‌شود. راهکار



جدول ۱- نتایج محیط کشت و تست کیت میکروبی شامل آزمون‌های *E. coli*, TBC, APB, FP, IRB, NRB, Aero, SRB

و TRB برای نقاط (a) آب دمین، (b) برج خشک، (c) برج تر، (d) آب تأمینی

Table 1. Culture medium and microbial test kit results including tests for *E. coli*, TBC, APB, FP, IRB, NRB, Aero, SRB and TRB for the following points: a) demineralized water, b) dry tower, c) wet tower, and d) supply water

Bacteria/ CFU/mL	DW	Dry CT	Wet CT	SW
TBC	0	0	10 ³	10 ⁴
<i>E. coli</i>	0	0	10 ²	0
FP	+	+	+	+
APB	Moderate	Moderate	Moderate	Moderate
IRB	25	25	25	100
NRB	Moderate	Moderate	Moderate	Moderate
Aero	61000	0	6500	6500
SRB	0	0	Moderate	High
TRB	High	Low	Moderate	Moderate

DW: Demin water, CT: Cooling tower, SW: Supplied water.

آب دمین است. همچنین لازم به ذکر است که درصد شوری آب تأمینی در حدود ۳/۱ درصد و آب برج تر ۱۶/۵۰ درصد نیز در تطابق با مقدار ضریب تغلیظ بود. از سوی دیگر درصد شوری بسیار پایین در حدود کمتر از حد تشخیص روش برای دمین نیز نشان‌دهنده خلوص بالای آب دمین است. از آنجایی که میزان pH در محدوده خنثی تا قلیایی، پایداری لایه غیرفعال^۱ را در تجهیزات فلزی بهبود بخشیده و از خوردگی شدید جلوگیری می‌کند. مقدار pH آب دمین، آب تأمینی و آب برج خنک‌کن تر و خشک همه در محدوده خنثی تا بازی تنظیم می‌شود که خود نیز از عوامل مؤثر در کاهش نرخ خوردگی محسوب می‌شود.

۳-۴- نتایج پایش یون‌های آب خام و آب برج خنک‌کن

پایش یون‌های موجود در آب خام و آب برج خنک‌کن در راستای بررسی اثر یون‌های تأثیرگذار در رشد عوامل میکروبی و همچنین ارتباط این یون‌ها با پارامترهای میکروبی و فیزیکوشیمیایی انجام نشده است. در یک نگاه کلی یون‌های پایش شده را از نگاه شیمیایی می‌توان به یون‌های مسبب خوردگی، یون‌های محصول خوردگی و یون‌های رسوب‌گذار تقسیم‌بندی کرد. از سوی دیگر و از نقطه نظر میکروبی یون‌ها را می‌توان به دو دسته یون‌های خوراک عوامل میکروبی و یون‌های عمومی مؤثر بر رشد عوامل میکروبی تقسیم‌بندی کرد.

کیت میکروبی و کشت NA مقدار TRB این نیروگاه هم هوازی و هم بی‌هوازی (به دلیل ایجاد رسوب در کف ویال و دور گوی همچنین شرایط مشابه محیط کشت) است.

۳-۳- نتایج پایش فیزیکوشیمیایی آب تأمینی، آب دمین، آب برج خنک‌کن خشک و تر

بر اساس قیاس نتایج آب تأمینی و برج تر میزان ضریب تغلیظ برج تر در حدود ۵/۳ محاسبه می‌شود (ضریب تغلیظ = غلظت یک یون خاص و یا هدایت در برج خنک‌کن تقسیم بر غلظت همان یون یا هدایت در آب تأمینی). لازم به ذکر است که نتایج مربوط به ضریب تغلیظ بر اساس غلظت یون‌ها باید با دستورالعمل‌های اولیه زمان راه‌اندازی نیروگاه مورد بحث و بررسی قرار گیرد و شرایط کنونی نیروگاه ارزیابی شود. در مطالعه‌ای که در واحد بهره‌برداری نیروگاه شهید مفتاح همدان انجام شده است، شرایط کنونی نیروگاه در سال ۱۴۰۳ با زمان راه‌اندازی نیروگاه در تطابق است. پایش ضریب تغلیظ بسیار حائز اهمیت است، زیرا یکی از عوامل اصلی مؤثر در خوردگی برج خنک‌کن مقدار تغلیظ یون‌ها و تأثیر آن بر غلظت بالای یون‌های خورنده است (جدول ۲).

مقدار هدایت آب تأمینی در حدود ۱۶۰۰ μS و همچنین هدایت برای آب برج تر در حدود ۸۴۰۰ μS بود که با داده‌های محاسبه شده ضریب تغلیظ (عدد ۵/۳) در تطابق است. همچنین میزان هدایت برای آب برج خشک در حدود ۶ μS بود که نشان‌دهنده خلوص بالای

¹ Passive Layer



جدول ۲- پایش فیزیکوشیمیایی شامل سنجش هدایت، TDS، درصد شوری، دما و pH برای نقاط آب دمن، برج خشک، برج تر و آب تأمینی

Table 2. Physicochemical monitoring, including measurements of conductivity, turbidity, salinity percentage, temperature and pH for demineralized water, the dry tower, the wet tower, and supplied water

Sample	EC/ μ S/cm	TDS/ppm	NaCl/%	Temp./ $^{\circ}$ C	pH
DW	1.15	0.57	0.00	22.60	8.74
Dry CT	6.06	3.04	0.00	31.00	7.61
SW	1600.00	800.00	3.10	24.00	7.80
Wet CT	8400.00	4210.00	16.50	29.00	7.57
Ratio (SW/Wet CT)	5.25	5.26	5.32	-	-

EC: Electrical conductivity, DW: Demin water, CT: Cooling tower, SW: Supplied water.

گونه‌های SRB است، بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که افزودن اسیدسولفوریک در راستای بهینه‌سازی pH یک زنجیره واکنش‌های شیمیایی-میکروبی را به دنبال دارد. به همین دلیل باید راهکارهای اصلاحی ممانعت از خوردگی میکروبی و شیمیایی سولفات به طریقی دیگر در دستور کار قرار گیرد.

میزان کلیات آب در نمونه آب تأمینی برابر ۱۷۱/۱ ppm بود که این مقدار در آب برج تر به ۵۲/۲ ppm رسید. بر اساس این داده مقدار رسوب‌گذاری در برج به دلیل کاهش ۳ برابری کلیات تا حدودی کنترل می‌شود. غلظت بالای یون‌های رسوب‌گذار نظیر کلسیم با غلظت ۴۱۸/۸ ppm و منیزیم با غلظت ۱۸۸/۲ در برج تر نیز از عوامل اصلی افزایش نرخ رسوب‌گذاری محسوب می‌شوند. همچنین لازم به ذکر است که افزایش نرخ رسوب‌گذاری نیز مسبب افزایش نرخ خوردگی زیر لایه‌ای^۱ و افزایش رشد عوامل میکروبی می‌شود.

از جمله مباحث و موارد قابل‌بحث در ارتباط با غلظت یون‌ها غلظت یون نترات است که در آب تأمینی غلظت این یون در حدود ۳۸ ppm است که این غلظت بالا در آب تأمینی منشأ پساب بودن این آب را تأیید می‌کند. در تمامی تصفیه‌خانه‌های انسانی به دلیل انجام فرایند نیتریفیکاسیون^۲، غلظت یون نترات در خروجی تصفیه‌خانه به شدت افزایش می‌یابد که عدد مشاهده شده نتیجه همین فرایند است. در عمده تصفیه‌خانه‌ها به دلیل بالا بودن غلظت نترات در خروجی، فرایندهای دنیتریفیکاسیون^۳ در دستور کار قرار می‌گیرد که محتمل در تصفیه‌خانه مربوطه این فرایند یا انجام نشده و کارایی آن در حدود مناسب نبوده است. در ادامه با توجه به غلظت بالای نترات در آب تأمینی و ضریب تغلیظ ۵/۳، غلظت این یون در

غلظت بالای یون کلرید در آب برج خشک‌کن در حدود ppm ۱۱۶۹/۸ مربوط به مراحل کلرزنی بود که خود نیز از عوامل اصلی تشدید خوردگی در برج تر بود. بر اساس پژوهش‌های پیشین غلظت کلر بالاتر از میزان ppm ۶۰۰ فرایندهای شدید خوردگی آلیاژهای فلزی را به دنبال دارد. بنابراین در چنین شرایطی بسیار از فرایندهای خوردگی شیمیایی و الکتروشیمیایی را می‌توان به غلظت بالای کلرید نسبت داد. از سوی دیگر غلظت بالای یون سدیم در برج تر (۱۰۰۰ ppm) به عنوان زوج یون کلرید نیز به نوبه خود مسبب خوردگی محسوب می‌شود. همچنین مقدار بالای یون سولفات (۲۱۳۷/۹ ppm) در برج تر نیز به نوبه خود از عوامل اصلی خوردگی محسوب می‌شود. در چنین شرایطی و با توجه به غلظت بالای یون‌های کلرید و سدیم فرایندهای شیرین‌سازی آب برج خشک‌کن باید در دستور کار قرار گیرد.

غلظت سولفات در آب خام در حدود ppm ۲۰۵/۴ بود که این غلظت در آب برج به میزان ppm ۲۱۳۷/۹ رسید. افزایش ۱۰ برابری یون سولفات فرایندهای خوردگی شیمیایی، الکتروشیمیایی و میکروبی را به دنبال دارد که در ادامه مباحث مربوط به خوردگی یون سولفات از نوع میکروبی با جزئیات ارائه خواهد شد. از آنجایی که در نیروگاه‌های حرارتی از اسیدسولفوریک برای تنظیم pH استفاده می‌شود، بنابراین غلظت بالای یون سولفات در آب برج به نسبت غلظت پایین آن در آب خام را می‌توان به فرایندهای تنظیم pH آب برج با اسیدسولفوریک مرتبط ساخت که اجتناب از این فرایند غیرقابل حصول است. افزودن اسید به منظور بهینه‌سازی pH به نوبه خود سبب افزایش غلظت یون سولفات می‌شود و افزایش غلظت یون سولفات نیز از عوامل مستقیم تأثیرگذار بر رشد انواع

³ Denitrification

¹ Under-Layer Corrosion

² Nitrification



جدول ۳- پایش شیمیایی شامل سنجش آنیون‌ها و کاتیون‌ها برای نقاط آب تأمینی و آب برج تر

Table 3. Chemical monitoring including the measurement of anions and cations for supplied water and cooling tower water sampling points

Ions/ppm	Supplies water	Wet CT
Na ⁺	181.0	1000.0
K ⁺	19.0	115.0
Ca ²⁺	65.1	418.8
Mg ²⁺	33.9	188.2
NO ₃ ⁻	38.0	247.1
Cl ⁻	205.4	1169.8
SO ₄ ²⁻	207.4	2137.9
Alkalinity	171.1	52.2
PO ₄ ³⁻	1.1	8.9
F ⁻	≤0.5	≤0.5
Total Fe	0.02	0.03

مقدار NRB در تمامی مراحل به شرح آب تأمینی، برج تر و برج خشک ثابت و در حدود Moderate بود. دلیل اصلی بالا بودن مقدار NRB منشأ آب تأمینی (فرایندهای نیتریفیکاسیون) با مقدار یون نیترات در حدود ۳۸ ppm بود که این میزان در برج تر به ۲۴۷/۱ ppm رسید. عوامل بسیار زیادی به شرح غلظت یون نیترات، pH، اکسیژن محلول، BOD، COD، دما، زمان ماند و میزان زیست‌لایه بر روی نرخ رشد NRB مؤثر هستند؛ اما از آنجایی که در شرایط نیروگاهی تغییر بسیاری از عوامل مذکور به دلیل الزام به تبعیت از دستورالعمل‌های بهره‌برداری امکان‌پذیر نیست. بنابراین کاهش نرخ رشد NRB با تغییر پارامترهای مؤثر از لیست پارامترهای مذکور (پارامترهایی که بر نرخ رشد NRB تأثیر دارند و شرایط بهره‌برداری را تغییر نمی‌دهند) انجام می‌شود. در این راستا و به‌منظور کاهش نرخ رشد NRB، میزان غلظت نیترات با کمک رزین‌های مبادله‌کننده اختصاصی یون نیترات (بدون ایجاد تغییر در سایر پارامترهای مؤثر بر شرایط بهره‌برداری) تا حد امکان کاهش می‌یابد. در نتیجه این امر، نرخ رشد NRB با ثابت ماندن سایر شرایط و کاهش یون خوراک به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که در این فرایند به‌طور اختصاصی با کاهش یک پارامتر و بدون تغییر اساسی در سایر پارامترها، رشد یک‌گونه میکروبی به حداقل مقدار آن تقلیل می‌یابد.

یون سولفات به‌عنوان یک جزء پذیرنده الکترون^۱ در متابولیسم

آب برج به حدود ۲۴۷/۱ ppm رسید که در نوع خود عدد بالایی محسوب می‌شود. غلظت بالای یون نیترات انواع مکانیسم‌های خورگی میکروبی را به دنبال دارد که در ادامه با جزئیات شرح داده می‌شود (جدول ۳).

۳-۵- ارتباط کلیدی پارامترهای فیزیکوشیمیایی، شیمیایی با میکروبی در برج خنک‌کن

مقدار TBC آب تأمینی در حدود ۱۰^۴ CFU/mL است که این مقدار برای آب برج تر به حدود ۱۰^۳ و برای آب برج خشک به حدود صفر می‌رسد. مقدار TBC متناظر با مقدار هدایت است و همان‌طور که پیش‌بینی می‌شود برای برج خشک با توجه به داشتن هدایت بسیار پایین مقدار کل باکتری‌ها به صفر میل می‌کند. از سوی دیگر با توجه به هدایت بسیار بالای برج تر در حدود ۸۴۰۰ μS مقدار TBC در حدود ۱۰^۳ CFU/mL قابل پیش‌بینی است. همچنین با توجه به عدد بالای TDS و شوری نیز مقدار بالای TBC برج تر توجیه‌پذیر است.

مقدار باکتری تولیدکننده اسید در تمامی مراحل آب خام، برج تر و برج خشک در حدود Moderate ثابت است. نتایج با توجه به داده‌های pH نیز قابل پیش‌بینی است؛ زیرا این باکتری در فرایندهای تغییر pH مداخله می‌کند و ثبات pH حکایت از فعالیت ثابت این باکتری دارد.

^۱ Electron Acceptor



همچنین برخلاف باکتری‌های بی‌هوازی ORP بالا (محیط اکسیدکننده) شرایط را برای رشد بیشتر این گونه باکتری فراهم می‌کند. از سوی دیگر، هم خوردن و تلاطم جریان سیال که از مشخصه‌های اصلی برج خنک‌کن تر است، نرخ رشد Aero را تشدید می‌کند. همچنین وجود کربن آلی و معدنی سبب افزایش رشد Aero می‌شود که بر این اساس مقدار BOD و COD (به ترتیب) نیز به‌عنوان یکی از عوامل اثرگذار در نرخ رشد این دسته باکتری معرفی می‌شود. مقدار شوری بالا که در این نیروگاه در برج خنک‌کن تر در حدود ۱۶/۵ درصد بود، منجر به کاهش نرخ رشد Aero شد. همچنین دمای حدود ۴۰ درجه سلسیوس برج خنک‌کن و pH حدود ۸ نیز تأثیر به‌سزایی در روند رشد و یا ممانعت از رشد Aero نداشت. همچنین لازم به ذکر است که تشکیل زیست لایه‌های ضخیم منجر به کاهش رشد Aero می‌شود، زیرا در این شرایط اکسیژن‌رسانی به این نوع باکتری مختل شده و نرخ رشد آن به‌شدت کاهش می‌یابد. مقدار Aero برای برج خشک کمتر از حد تشخیص روش و مقدار آن برای برج تر و آب تأمینی در حدود CFU/mL ۶۵۰۰ محاسبه شد.

مقدار IRB در برج تر و خشک در حدود CFU/mL ۲۵ بود که مقدار این باکتری برای آب تأمینی در حدود CFU/mL ۱۰۰ محاسبه شد. دلیل حضور باکتری IRB در تمامی مراحل وجود این باکتری توأم با خوراک این باکتری (تجهیزات آهنی) بود. دو راهکار اصلی برای حذف و ممانعت از فعالیت این نوع باکتری پیشنهاد می‌شود. راهکار اول به شرح استفاده از زیست‌کش آلی و راهکار دوم به شرح استفاده از بازدارنده‌های خوردگی آهن با مکانیسم پوششی است.

۴- نتیجه‌گیری

منشأ آب تأمینی ورودی نیروگاه شهید مفتح همدان پساب تصفیه‌خانه شهر همدان است، در نتیجه این امر بار میکروبی این نیروگاه در قیاس با سایر نیروگاه‌های سطح کشور بسیار متفاوت است. از سوی دیگر، شرایط این نیروگاه با توجه به داشتن دو نوع برج خنک‌کن (تر و خشک) در مقایسه با نیروگاه‌های دیگر بسیار پیچیده محسوب می‌شود. بنابراین با عنایت به شرایط آب تأمینی ورودی و مکانیسم

و نرخ رشد SRB بسیار تأثیرگذار است؛ اما تنها شرط افزایش نرخ رشد SRB افزایش غلظت یون سولفات نیست و دسته گسترده‌ای از عوامل به شرح کربن آلی، pH، دما، میزان زیست‌لایه و شرایط پتانسیل اکسایش-کاهش مناسب برای باکتری‌های بی‌هوازی و احیاکننده^۱ از شرایط لازم برای رشد SRB هستند؛ بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد کاهش یا حذف هر یک از عوامل مذکور می‌تواند بر کاهش نرخ رشد SRB مؤثر باشد. در شرایط معمول عملکردی کاهش یک یا چند عامل مربوطه، کاهش نرخ رشد SRB را به دنبال دارد. این در حالی است که در شرایط نیروگاهی تغییر شرایط عملکردی به شرح pH، میزان زیست‌لایه، پتانسیل اکسایش-کاهش و دما به دلیل تبعیت از شرایط بهره‌برداری الزام شده، امکان‌پذیر نیست. بنابراین در چنین شرایطی یک یا چند عامل که تأثیری بر شرایط بهره‌برداری ندارند ولی نرخ رشد SRB را کاهش می‌دهند، بهینه‌سازی می‌شود. در این راستا با ثابت نگاه‌داشتن پارامترهای کلیدی (pH، دما، Low ORP و میزان زیست لایه)، مقدار سولفات را از طریق واکنش‌های رسوب‌گذاری کاهش داده و از این طریق به‌طور چشمگیری نرخ رشد SRB در شرایط نیروگاهی کاهش می‌یابد. در نتیجه مقدار SRB کمتر از حد تشخیص روش برای آب برج خشک به دلیل عدم حضور یون سولفات در این نمونه قابل پیش‌بینی است. از سوی دیگر، میزان SRB در حدود Moderate در نمونه برج تر با توجه به غلظت بالای سولفات در این نمونه در حدود ۲۱۳۷/۹ ppm قابل توجیه است. لازم به ذکر است که مقدار SRB در نمونه آب تأمینی در بازه High قرار دارد که به نسبت برج تر با توجه به داشتن مقدار کمتر سولفات جای بررسی دارد. دلیل اصلی افزایش نرخ SRB در آب تأمینی نسبت به آب برج انجام فرایندهای کلر زنی در برج تر است.

با توجه به این نکته که Aero از خانواده باکتری‌های هوازی است، نرخ رشد آن در حضور اکسیژن، به مجموعه‌ای از عوامل محیطی، شیمیایی و فیزیکوشیمیایی وابسته است. کلیدی‌ترین عوامل مؤثر بر نرخ رشد Aero به شرح غلظت اکسیژن محلول، پتانسیل اکسایش-کاهش، مقدار تماس با هوا، دما، pH، مواد غذایی (منبع کربن)، شوری و زیست‌لایه است. در این راستا، هرچه اکسیژن محلول بیشتر باشد، نرخ رشد Aero افزایش می‌یابد.

^۱ Low ORP



۲- کاهش APB، FP و Aero: کاربرد زیست‌کش‌های آلی نظیر پلی کوآتس - کاربرد زیست‌کش‌های اکسندۀ قوی نظیر ازن‌زنی.
 ۳- کنترل NRB: حذف یون نیترات از آب تأمینی با به‌کارگیری رزین انتخاب‌گزین مبادله‌کننده یون نیترات در مراحل تصفیه‌خانه.
 ۴- کنترل IRB: استفاده از زیست‌کش آلی متداول نظیر ایزوتیازولین - استفاده از بازدارنده‌های خوردگی آهن با مکانیسم پوششی به‌منظور کنترل غلظت یون خوراک باکتری.

۵- قدردانی

نویسندگان این پژوهش از معاونت محترم پژوهشی پژوهشگاه نیرو که در انجام مراحل پژوهش حامی و یاری‌رسان بودند کمال تقدیر و تشکر را دارند.

عملکرد برج‌های خنک‌کن، سنجش بار میکروبی این نیروگاه و ارائه راهکار عملیاتی کاهش بار میکروبی این نیروگاه امری ضروری به نظر می‌رسد. در این راستا در یک پژوهش جامع پارامترهای میکروبی، فیزیکوشیمیایی و شیمیایی آب تأمین و آب برج‌های خنک‌کن تر و خشک این نیروگاه مورد پایش قرار گرفته است. در نتیجه این بررسی راهکارهای عملیاتی به شرح انجام فرایندهای ذیل برای کاهش بار میکروبی و بهبود عملکرد برج‌های خنک‌کن تر و خشک بر اساس اولویت توصیه می‌شود.

۱- کنترل TBC: بهینه‌سازی دوز زیست‌کش اکسندۀ - کاربرد زیست‌کش آلی نظیر ایزوتیازولین و گلوآر آلدهید - به‌کارگیری روش اسمز معکوس در راستای کاهش غلظت یون‌های سدیم و کلرید.

References

- Afshari, F. and Dehghanpour, H., 2019. A review study on cooling towers; types, performance and application. *ALKU Journal of Science*, 1-10. [Link]
- Alzahmi, A., Alswat, M., El-Askary, W. A. and Ramzy, K., 2024. Harvesting waste-heat energy of shell and tube heat exchanger used for desalination purposes using thermoelectric power generation modules: numerical studies. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 156, 107569. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107569>.
- Arora, M., 2013. Cell culture media: a review. *Materials and Methods*, 3, 175. <https://doi.org/10.13070/mm.en.3.175>.
- Asgari, G., Khazaei, M., Seidmohammad, A., Mansoorizadeh, M. and Talebi, S., 2023. Reclamation of treated municipal wastewater in cooling towers of thermal power plants: determination of the wastewater quality index. *Water Resources and Industry*, 29, 100207. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2023.100207>.
- Batelić, J., Špada, V., Kršulja, M. and Martinez, S., 2023. Thermal-power-plant condenser-tube corrosion analysis. *Materials and Technology*, 57, 317-323. <https://doi.org/10.17222/mit.2023.747>.
- Bonilla, J., De La Calle, A., Rodríguez-García, M. M., Roca, L. and Valenzuela, L., 2017. Study on shell-and-tube heat exchanger models with different degree of complexity for process simulation and control design. *Applied Thermal Engineering*, 124, 1425-1440. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.129>.
- Carducci, A., Verani, M. and Battistini, R., 2010. Legionella in industrial cooling towers: monitoring and control strategies. *Letters in Applied Microbiology*, 50, 24-29. <https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2009.02750.x>.
- 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>.
- Dos Santos, V. L., Veiga, A. A., Mendonça, R. S., Alves, A. L., Pagnin, S. and Santiago, V. M., 2015. Reuse of refinery's tertiary-treated wastewater in cooling towers: microbiological monitoring. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 2945-2955. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3555-7>.
- Ghahraman Afshar, M., Azimi, M., Habibi, N., Masihi, H. and Esmailpour, M., 2023a. Batch and continuous bleaching regimen in the cooling tower of Montazer Ghaem power plant. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 11, 100339. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100339>.

- Ghahraman Afshar, M., Esmaeilpour, M. and Ghaseminejad, H., 2024. Microbial corrosion affected by environmental factors in cooling tower of Bandar Abbas power plant. *Journal of Environmental Studies*, 49, 389-400. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/JES.2023.356713.1008395>.
- Ghahraman Afshar, M., Esmaeilpour, M. and Namaki Shooshtari, N., 2023b. Microbial corrosion in cooling tower of Ramin power plant: determination and corrective solution. *Journal of Water and Wastewater*, 34(4), 97-108. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2023.387017.3327>.
- Gould, P. L. and Krätzig, W. B., 1999. Cooling Tower Structures. In Wai-Fah, C., Ed. *Structural Engineering Handbook*. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, United States. pp. 14-47. [Link]
- Kumar, N., Tripathi, K. and Srivastava, Y., 2025. Composition, Optimization, and Preparation of Culture Media for Microbiological and Biotechnological Applications. In Tripathi, K., Srivastava, Y. and Kumar, N., Eds., *Biotechnology Lab Techniques: Culture Media, Microscopy, and Microbial Analysis*. Deep Science Publishing. 19-35. https://doi.org/10.70593/978-93-49307-52-0_3.
- Lister, D., 1980. Corrosion products in power generating systems. Atomic energy of Canada Ltd., Chalk River, Ontario. Chalk River Nuclear Labs. *International Conference on the Fouling of Heat Transfer Equipment*, Troy, New York, USA. [Link]
- Marzouk, S., Abou Al-Sood, M., El-Said, E. M., Younes, M. and El-Fakharany, M. K., 2023. A comprehensive review of methods of heat transfer enhancement in shell and tube heat exchangers. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148, 7539-7578. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12265-3>.
- Nazari, S., Ghahraman Afshar, M. and Harzandi, N., 2026. Minoo industrial wastewater treatment plant: introduction, process review, chemical monitoring, physicochemical monitoring and microbial characteristics monitoring. *Desalination and Water Treatment*, 325, 101656. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2026.101656>.
- Pakshir, M., Nazarboland, A. A. and Ahmadi, A. R., 2002. Investigation of problems caused by microorganisms in cooling towers. *Journal of Water and Wastewater*, 13(1), 42-48. (In Persian). [Link]
- Poon, C., 2022. Measuring the density and viscosity of culture media for optimized computational fluid dynamics analysis of in vitro devices. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 126, 105024. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.105024>.
- Rahmani, K., 2017. Reducing water consumption by increasing the cycles of concentration and considerations of corrosion and scaling in a cooling system. *Applied Thermal Engineering*, 114, 849-856. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.075>.
- Sylvestre, É., Charron, D., Lefebvre, X., Bedard, E. and Prévost, M., 2025. Leveraging regulatory monitoring data for quantitative microbial risk assessment of Legionella pneumophila in cooling towers. *Science of The Total Environment*, 975, 179293. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179293>.
- Tork, A., Azmi, A. and Moradi, O. A., 2022. Evaluation of the effects of Shahid Mofateh power plant on Hamedan on the surrounding villages. *Journal of Rural Research*, 13, 122-139. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jrur.2022.331422.1681>.
- Yamaguchi, N., Tokunaga, Y., Goto, S., Fujii, Y., Banno, F. and Edagawa, A., 2017. Rapid on-site monitoring of Legionella pneumophila in cooling tower water using a portable microfluidic system. *Scientific Reports*, 7, 3092. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03293-9>.

