dx.doi.org/10.22093/wwj.2023.387017.3327

Case Study

Journal of Water and Wastewater, Vol. 34, No. 4, pp: 97-108

Microbial Corrosion in Cooling Tower of Ramin Power Plant: Determination and Corrective Solution

M. Ghahraman Afshar[1*], M. Esmaeilpour[2], N. Namaki Shooshtari[3]

1. Assist. Prof., Dept. of Chemical and Process Engineering, Niroo, Research Institute Tehran, Iran
(Corresponding Author) mghahramanafshar@nri.ac.ir
2. Assist. Prof., Dept. of Chemical and Process Engineering, Niroo, Research Institute Tehran, Iran
3. Chemistry Manager, Dept. of Chemistry Engineering, Ramin Thermal Power Plant, Ahwaz, Iran

(Received Feb. 23, 2023 Accepted July 25, 2023)

To cite this article:
Ghahraman Afshar, M., Esmaeilpour, M., Namaki Shooshtari, N. 2023. "Microbial corrosion in cooling tower of Ramin Power Plant: determination and corrective solution"
Journal of Water and Wastewater, 34(4), 97-108. https://doi.org/10.22093/wwj.2023.387017.3327

Abstract

There is a great importance in investigating and measuring microbial corrosion in the cooling tower of thermal power plants, especially in the case of open cycles. Moreover, this issue becomes more important in the situation where the source of water supply for cooling tower is river or sea water. In this research, the cooling tower water for Ramin Power Plant, which is supplied from the Karun River, is examined as a point of of microbial growth. For this purpose, microbial tests including TBC (general test) and specific bacteria tests such as APB, FP, IRB, NRB, Aero, SRB and TRB, physicochemical tests (conductivity, salinity, pH, turbidity) and the amount anions and cations, are carried out in the water sample of the cooling tower. In the TBC test, the approximate number of bacterial colonies is 107 cfu/ml, which is in a very heavy range. The results of APB and IRB test indicate the value is much higher than the permissible limit and the presence of Aero bacteria. On the other hand, in the analysis of anion and cation, sulfate and chlorine species have a very high concentration of more than 1000 ppm. Therefore, to deal with microbial factors, and as a solution in the first priority, the method of chlorination with water shock is recommended. The second priority includes the general method based on oxidizers such as ozonation and bromination. Selective removal of sulfate and nitrate ions is suggested as the third priority solution due to the high concentration of these ions and the intense activities of SRB and NRB bacteria.

Keywords: Microbial Corrosion, Ramin Power Plant, Corrosion Prevention, Total Bacteria Count, Corrosion Monitoring.

Extended Abstract

1. Introduction

According to the previously published papers, microbial corrosions are mainly a kind of wet corrosions that occur on the contact surface of metal equipment with water. Based on these phenomena, there is a possibility of microbial corrosion occurring in the water-steam cycle and cooling tower of power plant. Therefore, considering the critical conditions of temperature and pressure of the water-steam cycle, the possibility of the presence and survival of microorganisms and macro-organisms in such conditions is impossible. On the other hand, the possibility of occurrence microbial corrosion in the cooling tower is very high.

Microbial corrosion and the phenomena affected by this kind of corrosion have a very high probability in the temperature and pressure conditions of the cooling tower, especially in cases where the cooling tower water supply is rich with microorganisms. As a result, it is expected that the presence of microbial agents is more likely in power plants where the water supply for the cooling water is sea or river water than in the power plants where the water supply for the cooling tower is supplied from the well water.

In summary, the results predict the highest probability of the presence of microorganism occurs in once through cooling tower and the lowest presence of microbial agents is predicted in closed cycles. Because the fresh water is constantly rich in microorganisms during the once through cooling tower, which greatly increases the probability of microbial corrosion. According to the wide range of animal, plant and microbial activity in sea water, most microbial corrosion happens in once through cooling tower when the water supply is sea water rather than river water. For this reason, Ramin Power Plant, whose water supply is from the Karun River, was selected for investigating microbial corrosion.

2. Experimental part

In this research, sampling and carrying out the microbial test, physicochemical and ion measurement are perfumed for the once through cooling tower of Ramin Power Plant. In this regard, after visiting the power plant, a series of physicochemical and microbial tests are performed at the place of the cooling tower, and ion measurement tests are performed in the laboratory after sampling. The samples taken are related to cooling tower water of Phase, Units 1 and 2 of Ramin Ahwaz Power Plant, dated April 2022.

In this section, a set of microbial tests is performed on the cooling tower water sample in the power plant, which includes a general test to measure the total number of bacteria and specific tests to measure specific bacteria. In order to investigate the quality of water on site, it is very important to apply a device that is calibrated before performing the test. Therefore, the pH, electrical conductivity, salinity percentage, hardness and water temperature parameters are investigated with a conductivity analyzer (HANNA) and thermometer (HI 2300 EC/NaCl/TDS Meter). Important and analyzable parameters in cooling tower water samples, such as ions in the sample, require accurate measurement in the laboratory. Therefore, the analyzes related to each ion are carried out with international standard methods.

3. Results and Discussions

In the TBC test, the approximate number of bacterial colonies was equal to 107 cfu/ml, which is in a very high range. The results of the APB test indicate that the invasion power is much higher than the permissible limit and shows a value of more than 500,000 cfu/ml. Moreover, sediment on the bottom of the vial indicates the presence of anaerobic bacteria in this sample.

In the FP test, by placing the kit under the UV lamp, the solution inside the falcon is not clouded and no shine is observed, which shows the lack of growth of Pseudomonas bacteria in this system. The results of the IRB test indicate a very high aggressiveness and the formation of a black layer around the sphere and the bottom of the vial indicates a diverse population of aerobic and anaerobic IRB bacteria. The bacteria population based on color change is reported to be more than 140000 cfu/ml. In the NRB test, sediment on the bottom of the vial indicates the presence of anaerobic bacteria with moderate functional strength. According to the Aero test, followed by the discoloration of the environment inside the vial from the bottom of the vial to the sphere, the presence of aerobic bacteria is indicated, based on very high aggressiveness. In the SRB test, the black color of the solution indicates the positive

presence of invasive bacteria. The black layer at the bottom and around the sphere indicates the presence of aerobic and anaerobic bacteria. The results of the TRB test indicate a high invasive power and the sediment on the bottom of the vial indicates the presence of high levels of anaerobic bacteria.

According to the results including the TBC and the monitoring of microbial agents such as APB, FP, IRB, NRB, Aero, SRB and TRB, the presence of microbial agents in the cooling tower water of Ramin Ahwaz Power Plant indicates very high concentration levels. Therefore, considering the role of microbial factors in accelerating and intensifying various types of electrochemical corrosion and following the heavy costs caused by this type of corrosion, it is suggested to investigate and monitor microbial factors and especially the microbial test to count the total number of bacteria in thermal power plants.

4. Conclusion

In Ramin Ahwaz Power Plant, the water for the cooling tower is supplied from the Karun River, which has a very complex and variable case that depends on the inputs of the river. Medium concentration of sodium, calcium, magnesium and alkalinity ions is observed in the water of the cooling tower. On the other hand, the results of microbial including general and specific tests instance, total number of bacteria show the number of 107 cfu/ml, which is considered a very high value. This high amount of TBC value is attributed to the entry of human, animal and industrial sewage into the Karun River. Moreover, here, in this research, corrective solutions to deal with the microbial corrosion are briefly described as follows. In the first priority, chlorination with the shock of bleach and continuous chlorination by applying bleach shock of 12 or 24 hours with high concentration is recommended. As the second priority, ozonation and decontamination using an ozone generator device and decontamination using bleach injection facilities are suggested. In the third priority, the selective removal of sulfate by biological reduction method and copper precipitation and removal of nitrate using selective ion exchange resin is recommended.

dx.doi.org/10.22093/wwj.2023.387017.3327

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۴، شماره۴، صفحه: ۱۰۸-۹۷

خوردگی میکروبی در آب چرخه خنک‌کن نیروگاه رامین: تشخیص و ارائه راهکار اصلاحی

مجید قهرمان افشار[۱*]، محسن اسماعیل‌پور[۲]، نوید نمکی شوشتری[۳]

۱- استادیار، گروه پژوهشی شیمی و فرایند، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران
(نویسنده مسئول) mghahramanafshar@nri.ac.ir
۲- استادیار، گروه پژوهشی شیمی و فرایند، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران
۳- مدیر شیمی، گروه مهندسی شیمی، نیروگاه رامین اهواز، اهواز، ایران

(دریافت ۱۴۰۱/۱۲/٤ پذیرش ۱٤۰۲/٥/۳)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
قهرمان افشار، م.، اسماعیل‌پور، م.، نمکی شوشتری، ن.، ۱۴۰۲، "خوردگی میکروبی در آب چرخه خنک‌کن نیروگاه رامین: تشخیص و ارائه راهکار اصلاحی"
مجله آب و فاضلاب، ۳۴(۴)، ۱۰۸-۹۷. https://doi.org/10.22093/wwj.2023.387017.3327

چکیده

بررسی و سنجش خوردگی میکروبی در چرخه خنک‌کن نیروگاه‌های حرارتی و به‌طور ویژه چرخه‌های باز، درجه اهمیت زیادی دارد. همچنین در شرایط خاص که منبع تأمین آب چرخه خنک‌کن آب رودخانه و دریا است، این مسئله اهمیت دو چندان می‌یابد. در این پژوهش، آب چرخه خنک‌کن نیروگاه حرارتی رامین اهواز که منبع تأمین آب رودخانه کارون بود، از نقطه‌نظر آلودگی‌های میکروبی بررسی شد. به این منظور، آزمون‌های میکروبی شامل TBC سنجش تعداد کل باکتری‌ها (آزمون عمومی)، آزمون‌های اختصاصی سنجش باکتری‌های خاص مانند APB، FP، IRB، NRB، Aero، SRB و TRB و آزمون‌های فیزیکوشیمیایی (هدایت، شوری، pH، کدورت) و میزان آنیون‌ها و کاتیون‌ها در نمونه آب چرخه خنک‌کن انجام شد. در آزمون TBC تعداد تقریبی کلونی باکتری برابر با 10^{7} cfu/ml بود که در محدوده خیلی بالا قرار داشت. نتایج آزمون APB و IRB نشان‌دهنده قدرت تهاجم بسیار بیشتر از حد مجاز و حضور باکتری‌های بی‌هوازی بود. از سوی دیگر در سنجش آنیونی و کاتیونی گونه سولفات و کلر، غلظت بسیار زیاد و بیش از ppm ۱۰۰۰ داشت، بنابراین به‌منظور مقابله با عوامل میکروبی و به‌عنوان راهکار با اولویت اول روش کلرزنی با شوک آب ژاول توصیه می‌شود. اولویت دوم شامل روش عمومی بر پایه اکسیدکننده‌ها مانند ازن‌زنی و برم‌زنی است. حذف انتخاب‌گزین یون‌های سولفات و نیترات به‌عنوان راهکار با اولویت سوم، به‌دلیل غلظت زیاد این یون‌ها و فعالیت‌های شدید باکتری‌های SRB و NRB پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: خوردگی میکروبی، نیروگاه رامین اهواز، بازداری خوردگی، تعداد کل باکتری، پایش خوردگی

۱- مقدمه

بر اساس پژوهش‌های انجام شده، خوردگی‌های میکروبی عمدتاً از نوع خوردگی‌های تر هستند که در سطح تماس تجهیز فلزی با آب حادث می‌شوند. بر این اساس، احتمال وقوع خوردگی میکروبی در چرخه آب- بخار و خنک‌کن وجود دارد (Pope, 1987, Ghahraman Afshar et al., 2023). بنابراین با توجه به شرایط بحرانی دما و فشار چرخه آب- بخار، احتمال حضور و بقای میکروارگانیسم‌ها و ماکروارگانیسم‌ها در چنین شرایطی بسیار ناچیز است.

از سوی دیگر و بر پایه این اصول، احتمال وقوع خوردگی میکروبی در چرخه خنک‌کن بسیار زیاد است (Ilhan-Sungur and Çotuk, 2010, Allan, 1999). خوردگی میکروبی و پدیده‌های متأثر از آن در شرایط دمایی و فشار آب چرخه خنک‌کن احتمال حضور بسیار زیادی دارند، به‌ویژه در مواردی که محل تأمین آب چرخه خنک‌کن غنی از میکروارگانیسم‌ها باشد (Licina, 1988). بنابراین پیش‌بینی می‌شود در نیروگاه‌هایی که محل تأمین آب چرخه خنک‌کن، آب دریا و یا رودخانه است، احتمال حضور عوامل میکروبی نسبت به نیروگاه‌هایی که محل تأمین آب چرخه خنک‌کن از طریق آب چاه انجام می‌شود، بیشتر باشد (Di Gregorio et al., 2017).

با یک جمع‌بندی کوتاه و پیش‌بینی نتایج، بیشترین احتمال حضور میکروارگانیسم در چرخه‌های یک‌بار عبور برآورد و کمترین میزان عوامل میکروبی در چرخه‌های بسته پیش‌بینی می‌شود (Regucki et al., 2016). زیرا در چرخه یک‌بار عبور آب تازه به‌طور پیوسته غنی از میکروارگانیسم‌ها است که احتمال بروز انواع خوردگی میکروبی را بسیار بالا می‌برد. از آنجایی که تنوع جانوری، گیاهی و میکروبی در نمونه‌های آب دریا به مراتب بیشتر از رودخانه‌ها است، ازاین‌رو در چرخه‌های یک‌بار عبور بیشترین خوردگی در نمونه‌های آب دریا و بعد از آن رودخانه در اولویت بعدی قرار می‌گیرد. در این پژوهش نیروگاه رامین اهواز که آب تأمینی آن از محل رودخانه کارون و چرخه آب جبرانی آن بسته است، تحت پایش خوردگی میکروبی قرار گرفت (Fiehn, 1969).

نیروگاه رامین اهواز (در شهر ویس و کیلومتر ۲۰ جاده ملاثانی اهواز، تأسیس ۱۳۵۸)، در زمینی به مساحت ۲/۵ میلیون مترمربع یکی از نیروگاه‌های ایران از نوع نیروگاه فوق بحرانی با ظرفیت تولید ۱۹/۳ مگاوات است. این نیروگاه شامل ۳ واحد ۳۰۰ مگاواتی- ۱ واحد ۳۰۵ مگاواتی و ۲ واحد ۳۱۵ مگاواتی، مجموعاً با ظرفیت نامی ۱۸۳۵ مگاوات و دو واحد توربین انبساطی ۶/۵ مگاواتی است. سوخت اصلی مصرفی این نیروگاه گاز طبیعی و سوخت اضطراری آن مازوت است. طبق آمار سال ۱۳۹۲، این نیروگاه، برق حدود ۴۲ درصد استان خوزستان و ۶ درصد ایران را تولید می‌کند (Momeni et al., 2011).

آب این نیروگاه از رودخانه کارون تأمین می‌شود. تعداد پمپ‌های مرحله اول نیروگاه ۱۵ دستگاه پمپ عمودی با ظرفیت آب‌دهی ۶۰۰ مترمکعب در ساعت و ۱۷ پمپ واقع بر ۵ سکوی شناور با ظرفیت آب‌دهی ۵۰۰ مترمکعب در ساعت و تعداد پمپ‌های مرحله دوم آن ۱۲ دستگاه است. میزان آب جبرانی موردنیاز برای هر واحد بر اساس دستورالعمل ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰ مترمکعب بر ساعت است. ۷ استخر ته‌نشینی و سیستم‌های تزریق منعقدکننده و کمک منعقدکننده یک سامانه تزریق تجهیزات جانبی سامانه تأمین آب این نیروگاه را تشکیل می‌دهند. ظرفیت تصفیه‌خانه‌های شیمیایی آب نرم نیروگاه ۲۴۰ مترمکعب در ساعت، جمعاً ۳۵۰ مترمکعب بر ساعت و تعداد فیلترهای سه بستری (مکانیکی) آن ۳ عدد ۶ فیلتر است. تعداد فیلترهای کاتیونی (مرحله اول) ۴ سری ۷ سری (دو تایی) و تعداد فیلترهای کاتیونی (مرحله دوم) ۳ سری ۶ فیلتر است که برای تولید آب نرم به‌کار می‌روند.

برج خنک‌کننده نیروگاه از نوع تر با دیفیوزرهای فلزی و بتونی و صفحات خنک‌کننده (پکینگ‌ها و قطره‌گیرهای) آن ایرانیتی سیمانی آزبستی است. میزان کاهش درجه حرارت در برج خنک‌کننده ۹/۴ درجه سلسیوس است. آب جبرانی موردنیاز برج‌های خنک‌کننده از تصفیه‌خانه‌های تأسیسات ساحلی و به‌واسطه زلال‌سازی در استخرهای ته‌نشینی با تزریق منعقدکننده فریک کلرید و کمک منعقدکننده پلی‌اکریل آمید، تأمین می‌شود. شکل ۱ چرخه آب خنک‌کن در این نیروگاه را نشان می‌دهد.

هدف اصلی از این پژوهش، آنالیز و بررسی آب چرخه خنک‌کن نیروگاه رامین از نقطه‌نظر حضور عوامل میکروبی بود. در این راستا آزمون‌های میکروبی شامل TBC سنجش تعداد کل باکتری‌ها (آزمون عمومی) و آزمون‌های اختصاصی سنجش باکتری‌های خاص مانند APB، FP، IRB، NRB، Aero، SRB و TRB بر روی نمونه آب چرخه خنک‌کن انجام شد.

از سوی دیگر داشتن اطلاعات جامع و کافی از شرایط آب چرخه خنک‌کن نیازمند جمع‌آوری اطلاعات پیرامون آزمون‌های فیزیکوشیمیایی (هدایت، شوری، pH، کدورت) و میزان آنیون‌ها و کاتیون‌ها در نمونه آب چرخه خنک‌کن است. در این پژوهش، سنجش پارامترهای فیزیکوشیمیایی و یون‌ها نیز انجام شد. در نهایت با داشتن غلظت و نوع هر عامل میکروبی و ارتباط آن با سایر پارامترهای فیزیکوشیمیایی، راهکارهای اصلاحی و پیشگیرانه

Fig. 1. a) Cooling tower, b) bleach injection line, c) H_2SO_4 injection line and d) pumps for transferring water to condenser

شکل ۱- a) برج خنک‌کننده، b) لاین تزریق آب کلر، c) تزریق اسید سولفوریک و d) پمپ‌های انتقال آب به کندانسور

به منظور مقابله با عوامل میکروبی ارائه و بر اساس توجیهات فنی- اقتصادی اولویت‌بندی شد. بنابراین هدف اصلی از این پژوهش، بررسی احتمال وقوع خوردگی میکروبی در چرخه آب خنک‌کن با ارائه راهکار پیشگیری بود.

۲- بخش تجربی

در این پژوهش، نمونه‌برداری و انجام آزمون‌های میکروبی، فیزیکوشیمیایی و سنجش یون‌ها بررسی شد. در این راستا پس از بازدید نیروگاهی، دسته آزمون‌های فیزیکوشیمیایی و میکروبی در محل چرخه آب خنک‌کن و آزمون‌های سنجش یون‌ها پس از نمونه‌برداری در آزمایشگاه انجام شد. نمونه‌برداری‌های انجام شده مربوط به آب گردشی فاز ۱ یعنی واحدهای ۱ و ۲ نیروگاه رامین اهواز مورخ اردیبهشت ماه سال ۱۴۰۱بود.

۲-۱- آزمون‌های میکروبی

در این بخش، مجموعه آزمون‌های میکروبی بر روی نمونه آب خنک‌کن در گردش نیروگاه انجام شد که این مجموعه شامل آزمون سنجش تعداد کل باکتری‌ها[1] (آزمون عمومی) و آزمون‌های اختصاصی سنجش باکتری‌های خاص مانند باکتری‌های تولیدکننده اسید[2]، فلورسانس سودوموناس[3]، باکتری‌های مرتبط با آهن[4]، باکتری احیاکننده نیترات[5]، سنجش باکتری ایروبیک[6]، باکتری احیاکننده سولفات[7] و باکتری احیاکننده تیوسولفات[8] بود.

برای انجام آزمون TBC، نمونه آب چرخه خنک‌کن به درون یک بشر بزرگ افزوده شد. در ادامه یک عدد کیت TBC به مدت ۲۰ s در درون بشر قوطه‌ور شد. سپس با تکان دادن شدید، آب روی کیت از آن جدا شد و کیت به مدت ۳ روز در ویال در بسته به‌منظور ادامه مراحل رشد و نمو باکتری‌ها قرار گرفت. در نهایت ظاهر کیت با نمونه‌های مرجع قیاس و میزان کلونی باکتری‌ها گزارش شد.

[1] Total Bacteria Count (TBC)
[2] Acid Producing Bacteria (APB)
[3] Fluorescence Pseudomonas (FP)
[4] Iron Related Bacteria (IRB)
[5] Nitrate Reducing Bacteria (NRB)
[6] Aerobic Bacteria Detection (Aero)
[7] Sulfate Reducing Bacteria (SRB)
[8] Thiosulfate Reducing Bacteria (TRB)

dx.doi.org/10.22093/wwj.2023.387017.3327

برای انجام آزمون‌های APB، IRB، NRB، Aero، SRB و TRB، به میزان ۲۰ ml از نمونه آب چرخه خنک‌کن به داخل ویال افزوده شد و به مدت ۳ روز درب ویال به‌منظور رشد و نمو باکتری‌ها و مشاهده تغییر رنگ نهایی بسته نگاه داشته شد. در نهایت تغییر رنگ کیت با نمونه مرجع قیاس و کلونی باکتری‌ها شمارش شد. برای انجام آزمون‌های FP، به میزان ۱ ml از نمونه آب چرخه خنک‌کن به داخل ویال افزوده شد و به مدت ۳ روز درب ویال به‌منظور رشد و نمو باکتری‌ها و مشاهده تغییرات نهایی بسته نگاه داشته شد. برای بررسی حضور و یا عدم حضور باکتری FP، نور UV به ویال تابیده شد، کدورت در تابش UV نشان‌دهنده حضور باکتری و شفافیت ویال در تابش UV نشان‌دهنده عدم حضور باکتری بود.

شرایط انجام هر آزمون، از طرف شرکت ایبرسکو ارائه شد که مطابق با دستورالعمل آزمون‌ها انجام شد. در نهایت با استفاده از تغییر رنگ تست کیت‌ها و مقایسه آن با درجه‌بندی رنگ نمونه مرجع، حضور، عدم حضور و میزان هر نوع عامل باکتریایی معین شد.

کیت میکروبی شاهد: نتایج برهم‌کنش میکروبی یک نمونه در لحظه افزودن نمونه (فاقد رشد عامل باکتریایی) به کیت‌های میکروبی شامل TBC، APB، FP، IRB، NRB، Aero، SRB و TRB بررسی شد که به‌عنوان نمونه شاهد (بدون تغییر رنگ) برای استفاده‌های بعدی و تشخیص تغییر رنگ‌ها در نمونه‌های نیروگاهی استفاده خواهد شد. این کیت‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.

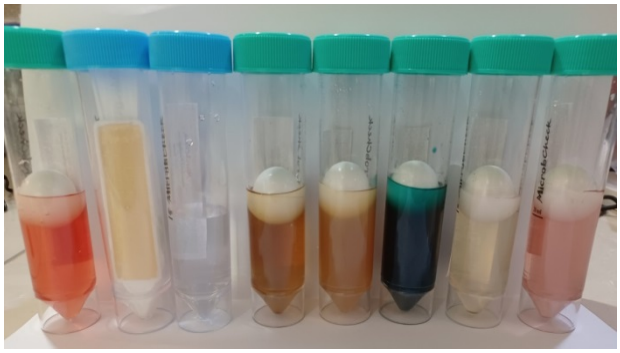

Fig. 2. Control microbial test kit of APB, TBC, FP, IRB, NRB, Aero, SRB and TRB

شکل ۲- کیت میکروبی شاهد شامل تست کیت‌های از چپ به راست APB، TBC، FP، IRB، NRB، Aero، SRB و TRB

۲-۲- 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، 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) بررسی شد.

۲-۳- آزمون‌های شیمیایی سنجش آنیون‌ها و کاتیون‌های آب خنک‌کن

پارامترهای مهم و قابل آنالیز در نمونه‌های آب چرخه خنک‌کن مانند یون‌های موجود در نمونه، نیازمند سنجش دقیق در آزمایشگاه است. بنابراین، آنالیزهای مربوط به هر یون با روش‌های استاندارد مرسوم در دنیا انجام شد. سنجش یون‌های سدیم و پتاسیم با استفاده از روش فلیم فتومتری[1] و طبق استاندارد 3500-Na و 3500-K انجام شد. همچنین برای آنالیز کلسیم و منیزیم از استاندارد 3500 Ca-B و 3500 Mg-B و روش جذب اتمی استفاده شد. آنالیز نیترات، نیتریت، فلوراید و فسفات موجود در نمونه مطابق با استاندارد SMWW 4110 و با روش طیف‌سنجی UV-VIS (PerkinElmer, Lambda 25) انجام شد. آنالیز یون کلرید، سولفات و قلیاییت نمونه نیز به‌ترتیب با روش تیتراسیون موهر، تیتراسیون باریم و تیتراسیون با HCl انجام شد. استاندارد انجام این آزمون‌ها نیز روش Cl 4500، SMWW 4110 و B 2320 SMWW بود.

۳- نتایج و بحث

در این بخش، در ابتدا نتایج آزمون‌های میکروبی و به دنبال آن سنجش پارامترهای فیزیکوشیمیایی و آنالیز کمّی و کیفی یون‌ها بررسی شد. در نهایت به دنبال آن بر اساس نتایج آزمون‌های میکروبی و بررسی خوراک، عوامل و راهکارهای اصلاحی و پیشگیرانه ارائه شد.

هدف اصلی این پژوهش، شناسایی عوامل میکروبی موجود در

[1] Flame Photometery

چرخه آب خنک‌کن بود. این عوامل، سرمنشأ ایجاد و تسریع انواع خوردگی‌های الکتروشیمیایی متأثر از عوامل میکروبی هستند. خوردگی میکروبی در چرخه خنک‌کن به شکل خوردگی‌های الکتروشیمیایی بروز پیدا می‌کند و الزاماً از ریخت‌شناسی خوردگی نمی‌توان به میکروبی بودن آن پی برد. در واقع ریخت‌شناسی خوردگی متأثر از عوامل میکروبی، الگویی متناسب با خوردگی الکتروشیمیایی دارد. رهنمون اصلی شناسایی خوردگی میکروبی شمارش TBC و سنجش عوامل میکروبی شامل APB، FP، IRB، NRB، Aero، SRB و TRB است. بنابراین با داشتن اطلاعات از تعداد کل باکتری‌ها و همچنین غلظت تک‌تک عوامل میکروبی، به راحتی می‌توان خوردگی الکتروشیمیایی متأثر از عوامل میکروبی را شناسایی کرد. سپس با حذف عوامل میکروبی و ارائه راهکارهای شیمیایی اصلاح فرایندها از خوردگی ناشی از عوامل میکروبی ممانعت به عمل آورد.

در این بخش از پژوهش، اطلاعات جامع و کاملی درباره حضور ۷ نوع عامل میکروبی شامل APB، FP، IRB، NRB، Aero، SRB و TRB و همچنین TBC در آب چرخه خنک‌کن نیروگاه رامین اهواز به‌دست آمد. همچنین به‌صورت ویژه تأثیر عوامل فیزیکوشیمیایی شامل هدایت، pH، شوری، کدورت، غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های خورنده و محصول خوردگی بر روی وجود و میزان هر عامل میکروبی بررسی شد. در نهایت جمع‌بندی کلی بر اساس نتایج آزمون‌های عمومی (pH، هدایت، شوری و کدورت)، آزمون‌های میکروبی (تست کیت‌های TBC، APB، FP، IRB، NRB، Aero، SRB و TRB) و آزمون‌های سنجش یون‌ها (سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، نیترات، کلرید، سولفات، قلیاییت، نیتریت، فسفات و فلوراید) برای این نیروگاه به‌صورت مجزا ارائه شد.

بر اساس گزارش‌های پیشین، هدایت منبع تأمین آب نیروگاه رامین اهواز (رودخانه کارون) ۳۰ سال گذشته در حدود ۶۰۰µS/cm بوده که در شرایط کنونی تا حدود ۳۰۰۰ µS/cm (به میزان ۵ برابر) افزایش یافته است.

با توجه به کیفیت مناسب آب در گذشته، احتمال حضور عوامل میکروبی به مراتب کمتر بوده و در نتیجه خوردگی‌های میکروبی حاصله نیز به تبع آن کمتر حادث شده است. بنابراین در گذشته مقابله با عوامل میکروبی با روش‌های سنتی و معمول مانند کلرزنی پاسخ‌گوی نیاز بازداری از خوردگی میکروبی در نیروگاه‌ها بوده است.

در شرایط کنونی، با پیش‌بینی احتمال رشد سریع عوامل میکروبی، سنجش و پایش عوامل میکروبی و به دنبال آن ارائه راهکارهای مقابله با آن، اهمیت زیادی دارد. بنابراین در این پژوهش ارائه روش‌های نوین سنجش پارامترهای میکروبی شامل APB، FP، IRB، NRB، Aero، SRB و TRB و همچنین TBC در آب چرخه خنک‌کن، چشم‌انداز نوینی از کاربرد علم میکروبی در صنعت برق بود. در ادامه با پایش اطلاعات جامع فیزیکوشیمیایی آب و ایجاد ارتباط آن با حضور عوامل میکروبی، با اطمینان و علم بیشتری می‌توان روش‌های ممانعت و بازداری از خوردگی میکروبی را بررسی کرد.

در ادامه، با داشتن اطلاعات جامع از حضور عوامل میکروبی و تفاسیر ویژه حاصله از نتایج فاز عملیاتی سنجش پارامترهای میکروبی، راهکارهای شیمیایی اصلاحی و پیشگیرانه برای این نیروگاه، بحث و بررسی شد. همچنین هر راهکار به صورت موردی از جنبه فنی- اقتصادی بازنگری شد. در نهایت راهکارهای دارای اولویت با توجیهات فنی- اقتصادی به اقتضای شرایط نیروگاهی ارائه شد. این راهکارها کارگشای مسائل پیچیده مربوط به بررسی و ممانعت انواع خوردگی میکروبی در نیروگاه‌ها و همچنین از همه مهمتر تمیز دادن خوردگی‌های میکروبی از انواع غیرمیکروبی آن بود.

بر پایه پژوهش‌های انجام شده، آزمون TBC در مبحث آزمون‌های میکروبی را می‌توان به آزمون سنجش هدایت در مبحث پارامترهای شیمیایی آب تشبیه کرد. در بحث هدایت، در مواردی که هدایت آب بالا باشد، سنجش تک‌تک آنیون‌ها و کاتیون‌ها به‌منظور یافتن آنیون و یا کاتیون بحرانی در آزمایشگاه بررسی می‌شود.

در برخورد با عوامل میکروبی نیز در مواردی که بر اساس آزمون TBC، تعداد کل باکتری‌ها بیشتر از حدود مجاز باشد، انجام آزمون‌های شامل APB، FP، IRB، NRB، Aero، SRB و TRB به‌منظور یافتن عامل بحرانی مؤثر بر افزایش تعداد کل باکتری بررسی می‌شود.

۳-۱- آزمون‌های میکروبی آب خنک‌کن نیروگاه رامین اهواز

در آزمون TBC، تعداد تقریبی کلونی باکتری برابر با 10^7 Cfu/ml

بود که در محدوده بسیار بالا[1] قرار داشت. نتایج آزمون APB نشان‌دهنده قدرت تهاجم بسیار بیشتر از حد مجاز بود و مقداری بیش از ۵۰۰۰۰۰ Cfu/ml را نشان می‌دهد. همچنین رسوب در کف ویال نشان‌دهنده حضور باکتری‌های بی‌هوازی در این نمونه بود.

در آزمون FP، با قرار دادن کیت زیر لامپ UV، محلول درون فالکون کدر نشده و درخششی مشاهده نشد که این پدیده عدم رشد باکتری‌های سودوموناس را در این سیستم نشان می‌دهد. نتایج آزمون IRB نشان‌دهنده قدرت تهاجمی بسیار زیاد بود و تشکیل لایه سیاه رنگ در اطراف گوی و کف ویال نشان‌دهنده جمعیت متنوع از باکتری‌های IRB هوازی و بی‌هوازی بود. میزان جمعیت باکتری‌ها بر اساس تغییر رنگ، بیش از ۱۴۰۰۰۰ Cfu/ml گزارش شد. در آزمون NRB رسوب کف ویال نشان‌دهنده حضور باکتری‌های بی‌هوازی با قدرت عملکردی متوسط بود. بر اساس آزمون Aero و به دنبال آن بی‌رنگ شدن محیط داخل ویال از سمت کف ویال به سمت گوی، نشان‌دهنده حضور باکتری‌های هوازی بود که برای این باکتری‌ها بر اساس قدرت تهاجمی بسیار زیاد مشاهده شد. در آزمون SRB رنگ سیاه محلول نشان‌دهنده مثبت بودن حضور باکتری مهاجم بود. لایه سیاه در پایین و دور گوی گویای وجود باکتری‌های هوازی و بی‌هوازی بود. نتایج آزمون TRB نشان‌دهنده قدرت تهاجمی زیاد و رسوب کف ویال نشان‌دهنده حضور باکتری‌های بی‌هوازی با میزان زیاد بود.

بر اساس نتایج به‌دست آمده شامل TBC و همچنین پایش عوامل میکروبی[2] مانند APB، FP، IRB، NRB، Aero، SRB و TRB، حضور عوامل میکروبی در چرخه آب خنک‌کن نیروگاه رامین اهواز در سطوح غلظتی بسیار بالا مشاهده شد، بنابراین با توجه به نقش عوامل میکروبی در تسریع و تشدید انواع خوردگی‌های الکتروشیمیایی و به دنبال آن هزینه‌های سنگین ناشی از این نوع خوردگی‌ها، پیشنهاد می‌شود بررسی و پایش عوامل میکروبی و به‌طور ویژه آزمون TBC در نیروگاه‌های حرارتی انجام شود. در شکل شماره ۳ کیت میکروبی نیروگاه نشان داده شده است.

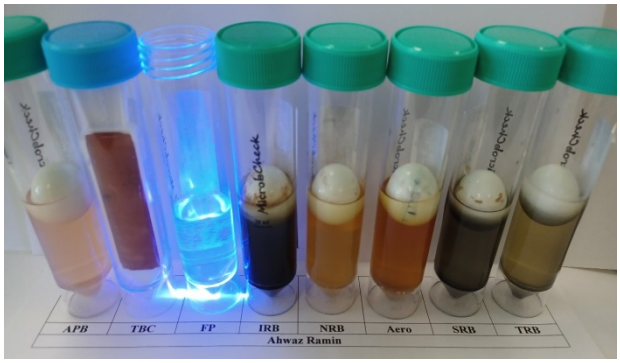

Fig. 3. Microbial test kit of APB, TBC, FP, IRB, NRB, Aero, SRB and TRB for cooling tower of Ramin Ahvaz Power Plant

شکل ۳- کیت میکروبی نیروگاه رامین اهواز شامل APB، TBC، FP، IRB، NRB، Aero، SRB و TRB

۳-۲- آزمون‌های در محل هدایت، شوری، pH و کدورت آب خنک‌کن نیروگاه رامین اهواز

با توجه به آنالیزهای انجام شده در آزمایشگاه شیمی نیروگاه رامین اهواز به‌صورت تست در محل، pH نمونه قلیایی گزارش شد. به دلیل موضوع کنترل خوردگی در چرخه خنک‌کن باید این پارامتر در محدوده قلیایی حفظ شود. همچنین برای کنترل کیفیت آب ورودی خنک‌کن، هدایت الکتریکی، درصد شوری و سختی آب نیز در این نمونه کنترل شد که در جدول ۱ قابل مشاهده است.

۳-۳- آزمون‌های شیمیایی سنجش آنیون‌ها و کاتیون‌های آب خنک‌کن نیروگاه رامین اهواز

با توجه به اینکه آب خنک‌سازی این نیروگاه از رودخانه کارون تأمین می‌شود و سیکل خنک‌کن واحدهای نیروگاه بسته است و آب جبرانی هر ۳ فاز نیروگاه از تصفیه‌خانه‌های تأسیسات ساحلی تأمین می‌شود، ورود سالانه فاضلاب شهری و صنعتی به رودخانه باعث شناسایی غلظت بسیار زیاد یون نیترات شده است. وجود این یون به‌عنوان عامل اصلی باکتری‌های احیاکننده نیترات و نیتریت است. همچنین لازم به ذکر است که غلظت زیاد سولفات عامل ایجاد رشد باکتری‌های احیاکننده سولفات در نمونه می‌شود.

۳-۴- راهکار اصلاحی شیمیایی پیشگیرانه خوردگی میکروبی در نیروگاه رامین اهواز

در نیروگاه رامین اهواز، آب چرخه خنک‌کن از رودخانه کارون

[1] Very Heavy

جدول ۱- مجموع نتایج آزمون‌های میکروبی، پارامترهای فیزیکوشیمیایی و سنجش یون‌ها در نیروگاه رامین اهواز

Table 1. The result of microbial test, physicochemical parameters and ion detection in Ramin Ahvaz Power Plant

Ions concertation		Physicochemical properties		Microbial test	
Na^{+}/ ppm	809.5				
K^{+}/ ppm	8.0			TRB/ cfu/ml	>6800000
Ca^{2+}/ ppm	352.7	pH at 25 °C	7.95	SRB/ cfu/ml	>6800000
Mg^{2+}/ ppm	143.1	T/ °C	43.3	Aero/ cfu/ml	61000-575000
NO_3^{-}/ ppm	15.8	Cond/ ms	5.87	NRB/ cfu/ml	Moderate
Cl^{-}/ ppm	1240.8	Salt/ %NaCl	9.80	IRB/ cfu/ml	>140000
SO_4^{2-}/ ppm	1345.0	Hardness/ g/L	2.95	FP/ cfu/ml	Ne-
NO_2^{-}/ ppm	0.2	T-Alka/ ppm	90.9	TBC/ cfu/ml	10^7
PO_4^{3-}/ ppm	0.04			APB/ cfu/ml	500000
F^{-}/ ppm	0.9				

تأمین می‌شود که کیفیت این آب بسیار متغیر و تابع ورودی‌های رودخانه و میزان رهاسازی آب از سدهای کارون و دز است. در آب چرخه خنک‌کن غلظت متوسط یون‌های سدیم، کلسیم، منیزیم و غلظت‌های زیاد سولفات و نیترات مشاهده می‌شود، اما نتایج آزمون‌های میکروبی بسیار بحرانی و عمده عوامل میکروبی در بیشینه مقدار خود قرار دارند. نتایج آزمون TBC مقدار بسیار زیادی را نشان می‌دهد که این امر ناشی از تخلیه فاضلاب انسانی، حیوانی و کارخانجات صنعتی به رودخانه است.

اصطلاح رسمی برای خوردگی میکروبی همان خوردگی "تأثیرپذیر از عوامل میکروبیولوژی" است. خوردگی میکروبی خود شاخه‌ای از خوردگی زیستی است. اصولاً می‌توان چنین گفت که در هر سامانه که با آب سروکار داشته باشد، احتمال بسیار زیادی برای وقوع خوردگی میکروبی وجود دارد. در محیط‌های طبیعی مانند خاک و آب و در محیط‌های صنعتی مانند صنعت پتروشیمی، کشتی‌سازی، صنایع کاغذسازی، سازه‌های دریایی، موتور هواپیما، قسمت‌های مختلف نیروگاه فسیلی یا اتمی و قطعات جوش داده شده، بررسی خوردگی میکروبیولوژی در نیروگاه‌ها، چندان قدمتی ندارد و تنها در سالیان اخیر است که به نقش میکروارگانیسم‌ها در خوردگی توجه کرده‌اند. در بعضی از نیروگاه‌ها، گاه تا ۲۰۰ گونه مختلف از باکتری‌ها شناخته شده است. موارد خوردگی میکروبیولوژی ممکن است در سامانه‌های آب سرویس، مبدل‌های حرارتی، آب آتش‌نشانی، مخازن ذخیره آب بدون املاح و سامانه گوگردزدایی گازی مشاهده شود. خوردگی میکروبیولوژی معمولاً در نقاطی اتفاق می‌افتد که سرعت جریان آب کاهش یابد و یا مانند آب وجود داشته باشد که در این صورت گل‌ولای و مواد زائدی که وارد سامانه می‌شوند، موجب کندی یا رکود جریان در بعضی از نقاط آن می‌شوند. این نقاط محل‌های مناسبی برای اسکان باکتری‌ها و شروع خوردگی به شمار می‌روند.

بر اساس نتایج آزمون مربوط به سنجش یون‌ها، هدایت، pH، شوری و نتایج آنالیز میکروبی، شرایط نیروگاه رامین اهواز از نقطه‌نظر هدایت و مجموع غلظت یونی چندان بحرانی نیست. از نظر میزان کلراید و سختی کل نیز آب گردشی نیروگاه در شرایط غیرنرمال دستورالعمل شرکت سازنده و در محدوده با پتانسیل بالای خوردگی و رسوب‌گذاری است. از سوی دیگر، بررسی شرایط این نیروگاه حاکی از غلظت زیاد عوامل میکروبی (آزمون TBC در حدود 10^7 cfu/ml) است، بنابراین به‌عنوان راهکار با اولویت بالا یک راهکار عمومی کاهش غلظت عوامل میکروبی پیشنهاد می‌شود که روش بسیار قوی کلرزنی با شوک آب ژاول در این راستا با توجه به کارایی زیاد و قیمت کم توصیه می‌شود (کلرزنی در برج خنک کننده به‌منظور حذف مواد آلی و میکروبی و عقیم کردن میکروارگانیسم‌ها انجام می‌شود). روش کلرزنی در مقابله با عوامل میکروبی روشی کارا است و در عین حال معایبی دارد (Afshar et al., 2023). از جمله معایب آن می‌توان به سازگاری میکروارگانیسم‌ها در طول زمان، نسبت به غلظت ثابت کلر اشاره کرد. بنابراین در مواردی که میزان غلظت میکروارگانیسم‌ها و باکتری‌ها بسیار زیاد است، کلرزنی سنتی پاسخ‌گو نخواهد بود. ازاین‌رو به‌منظور اثرگذاری بهتر، تزریق آب ژاول باید به حالت شوک باشد تا توانایی کلرزنی را تا چندین برابر افزایش دهد و از

جدول ۲- اولویت‌بندی راهکارهای مبارزه با عوامل میکروبی در نیروگاه رامین اهواز

Table 2. Prioritizing solutions to prevent the microbial corrosion in Ramin Ahvaz Power Plant

Priority	Method
First	Chlorination with the shock of bleach - continuous chlorination by applying a shock of 12 or 24 hours of bleach with a high concentration.
Second	Ozonation and bromination - Ozonation using an ozone generator and bromination using chlorine injection facilities.
Third	Selective removal of sulfate by biological reduction method (copper precipitation) and nitrate removal using selective ion exchange resin

طرفی میکروارگانیسم‌ها به مواد شیمیایی عادت نکنند (Behzadi et al., 2021).

با توجه به غلظت زیاد عوامل میکروبی و همچنین شرایط نامساعد آب خنک‌کن از نظر حضور تمامی عوامل میکروبی، روش عمومی بر پایه اکسیدکننده‌ها مانند ازن‌زنی و برم‌زنی در اولویت دوم قرار می‌گیرد. ازن‌زنی به‌دلیل نداشتن محصولات جانبی (در عین حال هزینه بیشتر) و برم‌زنی به‌دلیل کارایی بسیار بالا در مقابله با عوامل میکروبی در دماهای زیاد در اولویت بعدی قرار می‌گیرند.

با بررسی پارامترهای آنیونی و کاتیونی و همچنین غلظت سایر یون‌ها در آب چرخه خنک‌کن نیروگاه رامین اهواز، غلظت یون سولفات و نیترات (به دلیل ورود فاضلاب به رودخانه) نسبت به سایر عوامل بیشتر است. غلظت زیاد این یون‌ها فعالیت‌های شدید باکتری‌های SRB و NRB را به دنبال دارد. بنابراین حذف انتخاب گزین یون‌های سولفات و نیترات به‌عنوان راهکار با اولویت سوم در دستور کار نیروگاه رامین اهواز قرار می‌گیرد.

در بین روش‌های حذف انتخاب گزین یون سولفات بر اساس توضیحات ارائه شده پیشین، روش احیای بیولوژیکی و ترسیب مس در اولویت اول قرار دارد. در ارتباط با حذف انتخاب گزین یون نیترات روش‌هایی مانند استفاده از رزین‌های تبادل یونی، روش شیمیایی و روش بیولوژیکی از جمله روش‌های کاربردی هستند. در بین روش‌های ارائه شده، روش استفاده از رزین‌های تبادل یونی در اولویت اول قرار دارد. این روش نسبت به سایر روش‌ها (روش شیمیایی و روش بیولوژیکی)، درجه انتخاب گزینی بسیار بالاتری دارد. همچنین به دلیل عدم استفاده از معرف‌های شیمیایی و یا ایجاد شرایط خاص بیولوژیکی نسبت به سایر روش‌ها بسیار کارا و مقرون‌به‌صرفه‌تر محسوب می‌شود. از ویژگی‌های کلیدی روش‌های بر پایه یون می‌توان به قابلیت بازیابی آنها و استفاده چرخه‌ای اشاره کرد که در سایر روش‌ها چنین شرایطی فراهم نمی‌شود. با توجه به حجم بسیار زیاد آب چرخه گردشی نیروگاه (به ازای هر واحد تقریباً ۴۰۰۰۰ مترمکعب) امکان تصفیه رزینی آب در گردش به‌صورت عملیاتی امکان‌پذیر نیست. این در حالی است که در طرح بازتوانی نیروگاه، نصب آب شیرین‌کن اسمز معکوس برای آب جبرانی نیروگاه که در حدود $5000\ m^3/h$ است پیشنهاد شده و مورد تأیید شرکت پیمانکار (پاور ماشین روسیه، پیمانکار پروژه بازتوانی) قرار گرفته است. استفاده از روش اسمز معکوس در تصفیه آب جبرانی منجر به کاهش قابل‌توجهی از میزان یون‌ها خواهد شد. نتایج اولویت‌بندی راهکارهای مبارزه با عوامل میکروبی در نیروگاه رامین اهواز در جدول ۲ نشان داده شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در نیروگاه رامین اهواز، آب جبرانی چرخه خنک‌کن از رودخانه کارون تأمین می‌شود که مورد بسیار پیچیده و متغیری است که تابع ورودی‌های رودخانه نیز می‌باشد. در آب چرخه خنک‌کن غلظت متوسط یون‌های سدیم، کلسیم، منیزیم و قلیاییت مشاهده شد. اما از سوی دیگر، نتایج آزمون‌های میکروبی بسیار بحرانی و عمده عوامل در حدود بیشینه خود قرار داشتند. به‌طوری که نتایج آزمون TBC عدد $10^7\ cfu/ml$ را نشان داد که مقدار بسیار زیادی محسوب می‌شود. این مقدار زیاد را می‌توان به ورود فاضلاب انسانی، حیوانی و کارخانجات صنعتی به رودخانه کارون نسبت داد. همچنین در ادامه راهکارهای اصلاحی مقابله با عوامل میکروبی به اختصار شرح داده شد.

در نهایت با توجه به توضیحات کلیدی در راستای اهمیت سنجش TBC و همچنین پایش انواع باکتری‌ها شامل APB، FP، IRB، NRB، Aero، SRB و TRB، بسط و توسعه آزمون‌های

میکروبی برای تمامی نیروگاه‌های حرارتی امری ضروری به نظر می‌رسد.

با توجه به شدت حضور عوامل میکروبی در نمونه آب چرخه خنک‌کن نیروگاه‌های حرارتی، توصیه می‌شود شرکت‌های ذی‌صلاح نسبت به تدوین و تصویب دستورالعمل‌های خاص به‌منظور قرار دادن آزمون‌های میکروبی و به‌طور ویژه آزمون TBC در سرفصل آزمون‌های روتین نیروگاه‌های حرارتی اقدامات سازمان‌یافته به عمل آورند.

۵- قدردانی

نویسندگان این پژوهش، از حمایت‌های مالی شرکت مادر تخصصی برق حرارتی و پژوهشگاه نیرو مراتب قدردانی را به عمل آورده، همچنین از همکاری و مساعدت مسئولین نیروگاه رامین اهواز در راستای نمونه‌برداری و مشاوره‌های فنی کمال تشکر را دارند.

References

Afshar, M. G., Azimi, M., Habibi, N., Masihi, H. & Esameilpour, M. 2023. 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.

Allan, M. 1999. *Evaluation of Coatings and Mortars for Protection of Concrete Cooling Tower Structures from Microbiologically Influenced Corrosion in Geothermal Power Plants*. Brookhaven National Lab.(BNL), Upton, NY (United States).

Behzadi, B., Noei, M., Azimi, A., Mirzaei, M. & Anaraki Ardakani, H. 2021. Experimental optimization of the disinfection performance of sodium hypochlorite and hypochlorous acid in pilot and industrial cooling towers. *Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology*, 10**,** 1-11. https://doi.org/10.22050/ijogst.2021.265594.1578.

Di Gregorio, L., Tandoi, V., Congestri, R., Rossetti, S. & Di Pippo, F. 2017. Unravelling the core microbiome of biofilms in cooling tower systems. *Biofouling*, 33**,** 793-806.

Fiehn, A. J. 1969. Cooling tower applications in power cycle design. *Journal of the Power Division*, 95**,** 55-62. https://doi.org/10.1080/08927014.2017.1367386.

Ghahraman Afshar, M., Esmaeilpour, M. & Ghaseminejad, H. 2023. Investigation of water consumption in Shahid Montazer Ghaem steam Power Plant and technical-economic evaluation of the boilers' blowdown recycling solutions. *Nashrieh Shimi va Mohandesi Shimi Iran*. (In Persian) (In Press)

Ilhan-Sungur, E. & Çotuk, A. 2010. Microbial corrosion of galvanized steel in a simulated recirculating cooling tower system. *Corrosion Science*, 52**,** 161-171. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.08.049.

Licina, G. 1988. *A Review of Microbial Induced Corrosion in Nuclear Power Plant Systems*. National Assoc. of Corrosion Engineers Pub., Houston, USA.

Momeni, I., Danehkar, A., Karimi, S. & Khorasani, N. A. 2011. Dispersion modelling of SO_2 pollution emitted from Ramin Ahwaz Power Plant using AERMOD model. *Human and Environment*, 9**,** 3-8. (In Persian)

Pope, D. 1987. Microbial corrosion in fossil-fired power plants: a study of microbiologically influenced corrosion and a practical guide for its treatment and prevention. Workshop Proceedings, Rensselaer Polytechnic Inst., Dept. of Biology. Troy, NY (USA).

Regucki, P., Engler, B. & Szeliga, Z. 2016. Analysis of water management at a closed cooling system of a power plant. *Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing*, 012026. https://doi.org/10.1088/1742-6596/760/1/012026.

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