Journalof Farayandno – Vol. 20 – No. 91 (2025): 87-104

Research Article

DOI: 10.22034/farayandno.2025.2068814.2010

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

Technical-Economic Justification for Eliminating Clarifier Processes in Thermal Power Plants

Maryam Chinisaz [1], Majid Soleimani [1], Mohsen Esmaeilpour [2], Majid Ghahraman Afshar [2*]

[1] Chemistry Department, Faculty of Science, International Imam Khomeini University, Qazvin, Iran

[2] Chemistry and Process Research Department, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran

Received: 13 Aug 2025 **Accepted:** 18 Nov 2025

Abstract

In this study, a thermal power plant is studied from the point of view of performance and costs of clarifier-related processes on the corrosion and fouling rate of the condenser. This power plant has four cooling towers that are responsible for cooling the condensate water returned from the condenser. Examination of the results of raw water and soft water after the clarifier (injection of $FeCl_3$ and CaOH) in recent years shows that the alkalinity and hardness levels before and after the clarifier have not decreased significantly. In the current situation, chemical control with the previous chemical regime leads to an increase in the corrosion and sedimentation rate due to the increase in the conductivity of the clarifier supply water. To tackle this issue, a new chemical regime based on the elimination of clarifier processes and the use of corrosion and sedimentation inhibitor compounds are proposed here. In order to investigate the effect of the new chemical regime on the condenser performance, investigation is conducted through coupon monitoring and chemical factor monitoring. The results of the condenser coupon monitoring indicate that the condenser corrosion rate is reduced by six times by applying the new chemical regime. Moreover, the rate of destruction of the wooden structure of the cooling tower in the control unit is 1.5 times higher than in the test unit. On the other hand, based on coupon monitoring results, the rate of sedimentation in the control tower is 1.7 times higher than that of the test cooling tower. Overall results indicate that the corrosion and sedimentation rates are much more effective with the elimination of clarifier processes and the application of the new chemical regime than with the previous regime. Therefore, it is recommended to eleminate the clarifier processes and use antiscalant and anti-corrosion for other thermal power plants whose supply water has been facing a decline in quality and increased conductivity in recent years.

Keyword: Thermal Power Plant, Clarifier, Anti-Corrosion, Antiscalant, Technical-Economic Justification.

* mghahramanafshar@nri.ac.ir

Please Cite This Article Using:

Chinisaz, M., Soleimani, M., Esmaeilpour, M., Ghahraman Afshar, M., "Technical-Economic Justification for Eliminating Clarifier Processes in Thermal Power Plants", Journal of Farayandno – Vol. 20 – No. 91, pp. 87-104, In Persian, (2025).

مقاله کاربردی

DOI: 10.22034/farayandno.2025.2068814.2010

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

توجیه فنی-اقتصادی جایگزینی فرایندهای کلاریفایر با اعمال تزریقات شیمیایی بهبود دهنده عملکرد برج خنک‌کن در یک نیروگاه حرارتی منتخب

مریم چینی ساز [1]، مجید سلیمانی [1]، محسن اسماعیل پور [2]، مجید قهرمان افشار [2*]

[1] گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

[2] گروه پژوهشی شیمی و فرآیند، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

دریافت: 1404/05/22 پذیرش: 1404/08/27

چکیده

در این تحقیق یک نیروگاه حرارتی از نظر عملکرد و هزینه‌های فرایندهای مربوطبه کلاریفایر برروی نرخ خوردگی و رسوبگذاری کندانسور موردمطالعه قرار می‌گیرد. نیروگاه مورد مطالعه دارای چهار برج خنک‌کن تر است که مسئولیت خنک‌کاری آب کندانس برگشتی از کندانسور را برعهده دارد. بررسی نتایج آزمون‌های پایش آب خام و آب نرم بعد از کلاریفایر (تزریق آهک و کلروفریک) در سالیان اخیر نشان می‌دهد که میزان قلیائیت و سختی قبل و بعد از کلاریفایر کاهش قابل‌توجهی نداشته است. در شرایط کنونی به علت افزایش هدایت آب تأمینی کلاریفایر، کنترل خوردگی و رسوبگذاری با رژیم شیمیایی سابق منجربه افزایش نرخ خوردگی و رسوبگذاری می‌گردد. با توجه به عدم‌پاسخگویی عملکرد کلاریفایر، رژیم شیمیایی نوین برپایه حذف فرایندهای کلاریفایر و استفاده از ترکیبات بازدارنده خوردگی و رسوبگذاری در دستور کار قرار می‌گیرد. به‌منظور بررسی تأثیر رژیم نوین شیمیایی بر عملکرد کندانسور مطالعات از طریق پایش کوپن‌گذاری و عوامل شیمیایی دنبال می‌گردد. نتایج کوپن‌گذاری از جنس کندانسور حاکی از آن‌است که میزان خوردگی کندانسور با اعمال رژیم نوین شیمیایی به‌میزان شش‌برابر کاهش می‌یابد. همچنین میزان تخریب ساختار چوبی برج خنک‌کن در واحد کنترل نسبت به واحد آزمون 1/5برابر بیشتر است. از سوی دیگر براساس نتایج کوپن‌گذاری، میزان رسوبگذاری در برج کنترل به‌میزان 1/7برابر بیشتر از برج خنک‌کن آزمون می‌باشد. مجموع نتایج حاکی از آن‌است که نرخ خوردگی و رسوبگذاری با حذف فرایندهای کلاریفایر و اعمال رژیم نوین شیمیایی به‌مراتب مؤثرتر از رژیم پیشین است. لذا تغییر حذف فرایندهای کلاریفایر و کاربرد بازدارنده خوردگی و رسوبگذاری برای سایر نیروگاه‌های حرارتی که آب تأمینی آنها در سال‌های اخیر با کاهش کیفیت و افزایش هدایت روبروست توصیه می‌گردد.

کلمات کلیدی: نیروگاه حرارتی، کلاریفایر، بازدارنده خوردگی، بازدارنده رسوبگذاری، توجیه فنی-اقتصادی

* mghahramanafshar@nri.ac.ir

استناد به مقاله:

چینی ساز،م.، سلیمانی،م.، اسماعیل پور،م.، قهرمان افشار،م.، "توجیه فنی-اقتصادی جایگزینی فرایندهای کلاریفایر با اعمال تزریقات شیمیایی بهبود دهنده عملکرد برج خنک‌کن در یک نیروگاه حرارتی منتخب"، نشریه فرآیندنو، سال بیستم، شماره 91، صص.104-87، (پاییز 1404).

1- مقدمه

آلودگی آب خام مصرفی نیروگاه بخار باعث خوردگی شدید در سیکل خارجی و رسوبگذاری در لوله‌های کندانسور می‌گردد. از سوی دیگر، سوراخ شدن لوله‌ها به دلیل در اثر رسوبگذاری و خوردگی سطح زیررسوب از عواقب این مشکلات است. پیامد این مشکلات بالا رفتن هزینه‌های تعمیر و نگهداری و کاهش راندمان می‌باشد. علاوه بر این رسوبگذاری و خوردگی در مسیرهای انتقال آب برج خنک‌کننده است که منجر به کاهش بار، اختلال و کاهش در انتقال حرارت و افت خلا می‌شود. همچنین رسوبگذاری منجر به ایجاد نقاط داغ موضعی می‌شود. این پدیده باعث شکست مکانیکی سطح انتقال حرارت می‌شود. علاوه‌براین، از دست دادن انتقال حرارت و کاهش دمای خروجی نتیجه هدایت حرارتی پایین لایه یا لایه‌های رسوب می‌باشد. در نتیجه این هدایت حرارتی پایین، مقاومت حرارتی کلی در برابر انتقال حرارت افزایش می‌یابد و اثربخشی و بازده حرارتی کندانسور کاهش می‌یابد [1-4].

با شروع و ایجاد لایه یا لایه‌های رسوب در کندانسور، سطح مقطع لوله‌ها یا کانال‌های جریان کاهش می‌یابد. علاوه‌براین، افزایش زبری سطح ناشی از رسوب، مقاومت اصطکاکی در برابر جریان را افزایش خواهد داد. چنین اثراتی به طور اجتناب‌ناپذیری منجر به افزایش افت فشار در کندانسور خواهد شد که برای حفظ نرخ جریان در کندانسور مورد نیاز است و حتی ممکن است منجر به بلوک‌های جریان[1]شود. خوردگی و سوراخ شدگی لوله‌های کندانسور باعث ورود آب خنک‌کن با فشار زیاد به داخل محفظه تحت خلا کندانسور می‌شود که نتیجه آن افت خلا کندانسور می‌باشد. فشار زیاد خروج آب از لوله و برخورد آن با لوله‌های مجاور باعث سایش و سوراخ شدگی لوله‌های کندانسور می‌گردد. از طرف دیگر سوراخ شدن کندانسور منجر به آلودگی آب تغذیه بوسیله آب خنک‌کن خواهد شد. با بالا رفتن درجه حرارت، حلالیت این املاح در آب کم شده و رسوب یا فیلمی در این نواحی تشکیل می‌گردد. نفوذ چنین محلولی به بویلر و تغلیظ آن در زیر این املاح خود باعث تشکیل سل الکترولیتی می‌گردد. سل الکترولیتی منجر به تشدید خوردگی و ازدیاد درجه حرارت فلز لوله می‌شود [5-8].

کنترل شیمیایی نیروگاه‌های حرارتی به‌ویژه در بخش چرخه خنک‌کن فرایند بسیار پیچیده‌ای می‌باشد. آب چرخه خنک‌کن بسته به نوع رژیم شیمیایی و pH اعمال شده همواره یا به سمت رسوبگذاری و یا به سمت خورندگی پیش می‌رود. به بیان ساده زمانی که در رژیم کنترل شیمیایی از pHهای پایین و شرایط ایده‌آل بازدارنده‌های رسوبگذار استفاده می‌شود، سیستم خورنده می‌شود و در نتیجه نرخ خوردگی افزایش و نرخ رسوبگذاری کاهش می‌یابد. از سوی دیگر زمانی که در رژیم کنترل شیمیایی از pHهای بالا و بازدارنده‌های خوردگی ایده‌آل استفاده می‌گردد، سیستم به شدت رسوبگذار می‌گردد و نرخ رسوبگذاری افزایش و نرخ خوردگی کاهش می‌یابد. در نتیجه بهینه کردن میزان pH و غلظت بازدارنده خوردگی و رسوبگذاری که سیستم آب چرخه خنک‌کن در آن pH و دوز، رسوبگذار و خورنده نباشد بسیار حائز اهمیت می‌باشد. به این منظور می‌بایست دوز ایده‌آل از بازدارنده خوردگی و رسوبگذاری در pH متعادل مورد استفاده قرار گیرد.

همچنین کاهش تولید برق یا خروج اضطراری که در برخی موارد باعث خاموشی مکرر در برخی از نقاط سطح کشور می‌شود منجر به از کار افتادن کارخانه‌ها و صنایع مختلف و وارد آمدن خسارت‌های جبران‌ناپذیر به صنعت تولید خواهد شد. از دیگر خسارت‌های وارده هزینه تعمیرات و یا تعویض قطعات آسیب دیده و نیز هزینه نیروی انسانی

[1] Block flow

جهت انجام عملیات تعمیرات و .... می‌باشد. لذا به وجود آوردن کیفیت مطلوب برای آب مورد استفاده در نیروگاه از اهمیت خاصی برخوردار است [7, 9-11].

خوردگی و نشتی آب خنک‌کن لوله‌های کندانسور به داخل آب سیکل و افزایش کنداکتیویته آب منجر به خروج اضطراری واحد و یا کاهش در میزان تولید می‌گردد. این توقف در تولید به جهت نشت‌یابی و رفع نشتی منجر خواهد شد که در نتیجه خسارت‌های اقتصادی قابل توجهی متوجه صنعت برق می‌شود. علاوه بر خسارت‌های ناشی از کاهش تولید، خسارت‌های مربوط به تخریب و از کار افتادن اجزا کندانسور و نیز دیگر اجزا نیروگاه نظیر لوله‌های بویلر، پره‌های توربین و سوپرهیترها و هیترهای آب تغذیه که در اثر نشتی‌های لوله‌های کندانسور دچار تخریب می‌شوند بایستی در نظر گرفته شود [12-14].

در خرابی‌های مرتبط با خوردگی در نیروگاه‌های برق، درک علت خرابی‌ها منجر به یافتن گزینه های مقرون‌به‌صرفه برای کنترل خوردگی می‌گردد. در طول چند سال گذشته، EPRI با استفاده از رویکردهای متعددی به حل مشکل خوردگی سمت آب در نیروگاه‌های حرارتی کمک کرده است. از جمله این راه حل‌ها می‌توان به انتخاب مواد، پوشش‌ها، کنترل شیمی آب، اصلاح تنش پسماند و نظارت بر خوردگی اشاره نمود. این رویکردها با موفقیت در سیستم‌های گوگردزدایی گاز دودکش، توربین‌های بخار کم‌فشار و لوله‌کشی راکتور آب جوش اعمال شده‌اند. یکی از معیارهای نشان دهنده موفقیت این رویکردها به شرح کنترل خوردگی و صرفه‌جویی در هزینه های مستقیم و غیرمستقیم خوردگی ثبت شده است [15].

در یک تحقیق کاربردی کنترل شیمیایی مؤثرتر چرخه آب-بخار نیروگاه‌های حرارتی به عنوان راهکار اصلی کنترل خوردگی پیشنهاد شده است. در این تحقیق، به حداقل رساندن اثرات خوردگی با تولید آب فوق خالص و کنترل دقیق آن، اساس تمام فرآیندهای مورد بررسی قرار گرفته است. این تحقیق شامل تجزیه و تحلیل نمونه‌های آب از طریق پارامترهای کلیدی کیفیت آب می‌باشد. پس از تجزیه و تحلیل کامل سیستم، رژیم نوین کنترل شیمیایی ارائه شده و پارامترهای تشخیصی و کنترلی برای اندازه‌گیری‌های سیستماتیک مداوم انتخاب شدند. بر این اساس، یون‌های سدیم و کلرید به عنوان یون‌هایی که مسبب خوردگی آب هستند معین گردید. در نهایت، غلظت این دو یون با تبدیلات شیمیایی عناصر مهم محصول خوردگی نظیر آهن و سیلیس در نظر گرفته شده و با مقادیر کمی آنها مرتبط شدند [16, 17].

کنترل شیمیایی ترکیبات آلی یک مسئله روز در بهره‌برداری از واحدهای حرارتی نیروگاه‌های حرارتی و نیروگاه‌های هسته‌ای می‌باشد. در این واحدهای نیروگاهی، کنترل پارامترهای بحرانی و فوق بحرانی با استفاده از نمک‌زدایی آب می‌تواند رسوبات نمکی را از بین ببرد. با این حال، فرآیندهای خوردگی در بخش‌های مختلف مسیر آب بخار تحت تأثیر محصولات ترمولیز مواد آلی نیز می‌باشد. به منظور مقابله با این نوع خوردگی، استفاده از رژیم‌های شیمیایی بر پایه آمین‌ها جایگزین رژیم هیدرازین-آمونیاک گردیده است. در این رژیم، اندازه‌گیری کل کربن آلی و اجزای منفرد با استفاده از آنالیزورهای TOC، کروماتوگرافی یونی، هدایت‌سنج و Phمتر صورت می‌پذیرد. در این نوع رژیم می‌بایست توجه ویژه‌ای به کنترل شیمیایی آمین‌ها از نقطه نظر غلظت، هدایت و pH صورت پذیرد [18-20].

در این تحقیق هدف اصلی مطالعه خوردگی و رسوبگذاری در کندانسور یک نیروگاه حرارتی می‌باشد. خوردگی کندانسور نوعی خوردگی تر محسوب می‌گردد. در کندانسورهای نیروگاهی عموماً خوردگی‌های سایشی، گالوانیک،

حفره‌ای، تنشی، میکروبی و شکافی اتفاق می‌افتد. در نیروگاه مورد مطالعه آب تأمینی چرخه خنک‌کن از منابع زیرزمینی (آب چاه) تأمین گردید. در این راستا و به منظور کاهش سختی، افزودن منعقدکننده‌هایی نظیر آهک و کلروفریک در کلاریفایر و تنظیم pH در دستور کار تصفیه‌خانه قرار دارد. همچنین لیستی از منعقد کننده‌های عمومی و کاربردی صنعت برق به شرح جدول 1 آورده شده است. بدین منظور، پس از افزودن آب به مخزن کلاریفایر با افزودن منعقدکننده‌ها و لخته‌گیری، سختی آب کاهش یافته و به چرخه آب خنک‌کن انتقال می‌یابد. لازم به ذکر است که افزودن منعقدکننده‌ها منجر به بالا رفتن pH آب چرخه خنک‌کن می‌گردد که این افزایش با افزودن اسید سولفوریک بهینه شده و کنترل می‌گردد [21-25].

مراحل انعقاد شامل اختلاط سریع[2]، انعقاد[3]، لخته‌سازی[4] و ته‌نشینی[5] می‌باشد. هدف از اختلاط سریع پخش فوری مواد منعقد کننده و کمک منعقد کنندهٔ مصرفی در کل آب ورودی به این مرحله است. بعد از فرایند اختلاط سریع، عمل انعقاد و لخته‌سازی بایستی صورت پذیرد، چرا که انعقاد و لخته‌سازی مهم‌ترین فرایند حذف کلوئیدها هستند. یک سیستم کلوئیدی شامل ذرات جامد به‌صورت کاملا مجزا از هم در یک ماده پراکنده است که این ذرات را فاز پراکنده شده می‌نامند. بعد از عمل انعقاد ذرات، عملیات لخته‌سازی یا فلوکاسیون بایستی انجام پذیرد. لخته‌سازی فرایند به‌هم‌زدن آرام و مداوم آب منعقد شده است تا لخته‌ها (فلوک‌ها) تشکیل گردند. هدف از کاربرد این واحد اصلاح آب برای تشکیل فلوک و سهولت جداسازی آنها به کمک ته‌نشینی صاف‌سازی است. راندمان واحد لخته‌سازی به‌شدت وابسته به تعداد برخوردهای ذرات ریز منعقد شده در واحد زمان است. در نهایت در مرحله آخر فلوک‌ها ته نشین می‌گردد و فرایند ته‌نشینی صورت پذیرفت.

جدول 1- مشخصات منعقدکننده‌های کاربردی در صنعت برق

Name	Formula	Suitable Vessel	Solubility (g/l)	Concentration
Aluminum Sulfate	$Al_2(SO_4)_3.14H_2O$	Rubber, PVC, FRP, Stainless Steel 316	653 in 10°C	Solid 17% - Liquid 49%
Iron Chloride (III)	$FeCl_3.6H_2O$	Glass, PVC, FRP		Solid 60% - Liquid 37-47%
Iron Sulfate (II)	$FeSO_4.7H_2O$	Ceramic, Rubber, PVC, Steel 8-18		Solid 55%
Iron Sulfate (III)	$Fe_2(SO_4)_3.3H_2O$	Ceramic, Rubber, PVC, Steel 8-18	300 in 20°C	Solid 90%
Magnesium oxide	MgO	Iron, Steel		Solid 95%
Sodium Aluminate	$Na_2OAl_2O_3$	Iron, Rubber, Plastic	320 in 50°C	Solid 55%
Sodium Silicate	Na2OSiO2	Iron, Rubber	Completely soluble	Solid 38-42%

بررسی نتایج آزمون‌های پایش آب خام و آب نرم بعد از کلاریفایر (تزریق آهک و کلروفریک) در سالیان اخیر نشان می‌دهد که میزان قلیائیت و سختی قبل و بعد از کلاریفایر کاهش قابل توجهی نداشته است. در شرایط کنونی به علت افزایش هدایت آب تأمینی کلاریفایر، کنترل خوردگی و رسوبگذاری با رژیم شیمیایی سابق منجر به افزایش نرخ

[2] Rapid mixing
[3] Coagulation
[4] Flocculation
[5] Sedimentation

خوردگی و رسوبگذاری می‌گردد. از سوی دیگر، با افزودن منعقدکننده به کلاریفایر می‌توان به حجم بالای مصرف معرف‌های شیمیایی مصرفی (آهک، کلروفریک، اسید به منظور تعدیل pH) و از سوی دیگر حجم بالای رسوبات تولید شده اشاره نمود. لذا هزینه‌های گزاف خرید معرف‌های شیمیایی و دفع رسوبات این نیروگاه را به سمت تغییر رژیم شیمیایی و حذف فرایندهای کلاریفایر هدایت نموده است [26-29].

از اینرو پروژه حذف فرایندهای کلاریفایر و اعمال رژیم نوین شیمیایی بر پایه افزودن بازدارنده‌های خوردگی و رسوبگذاری در نیروگاه مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعات یک واحد که در آن فرایندهای مربوط به کلاریفایر حذف گردید و رژیم نوین شیمیایی اعمال گردید به عنوان واحد اصلی، واحد آزمون نامگذاری گردیده است. از سوی دیگر یک واحد که آب موردنیاز آن از خروجی کلاریفایر تأمین می‌گردد و رژیم نوین در آن اعمال نمی‌گردد به عنوان واحد کنترل در دست بررسی قرار می‌گیرد. سپس تمامی آزمون‌ها و به دنبال آن توجیهات فنی-اقتصادی با داشتن داده‌های مربوط به واحد آزمون و واحد کنترل در این تحقیق ارائه می‌گردد [30-32].

2- تجربی

2-1- مواد و تجهیزات

ماده EN262 شامل 1/5% ایزوتیازولین (زیست‌کش آلی) می‌باشد که توسط شرکت شیمیایی انرژی سمنان ایران تأمین می‌گردد. ماده $EN5677^{+}$ شامل ترکیب بازدارنده خوردگی و بازدارنده رسوبگذاری از شرکت انرژی سمنان ایران فرموله شده و به صورت تجاری تهیه گردیده است. این ترکیب حاوی زینک، فسفونیت و پلیمر می‌باشد که هر یک به ترتیب نقش بازدارنده خوردگی، بازدارنده رسوبگذاری و دیسپرسنت را دارند. این دو ماده پتنت شده و مجوز فرمولاسیون آن در اختیار شرکت انرژی سمنان می‌باشد.

همچنین لازم به ذکر است که شرکت‌های متعددی در حوزه طراحی و ساخت مواد بازدارنده خوردگی، بازدارنده رسوبگذاری و زیست‌کش آلی فعالیت دارند. از جمله این شرکت‌ها می‌توان به شرکت فارور صنعت هرمز، آبریزان، رسوبگیری، آرتا شیمی، محافظان بهبود آب و کیمیا لوتوس اشاره نمود. شرکت های نامبرده از معتبرترین شرکت‌ها در حوزه تولید بازدارنده خوردگی، بازدارنده رسوبگذاری و زیست‌کش آلی در حوزه چرخه آب خنک‌کن می‌باشند، فلذا بسته به شرایط مواد اشاره شده قابل تامین از تمامی شرکت‌ها نیز می‌باشند.

دستگاه رومیزی هدایت‌سنج و pH متر برند HANA که به ترتیب مجهز به الکترود پلاتینی و شیشه‌ای هستند مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین سایر معرف‌های شیمیایی از برند مرک در گرید تجزیه‌ای تهیه گردیده است. کوپن‌های خوردگی فولاد کربن، مس، ادمیرالتی و اسکیل از شرکت آب سنجش ابزار پاسارگاد تهیه گردید. همچنین کوپن چوبی با بریدن ابعاد مناسب چوب تهیه شده از چوب فراروی شده بکار رفته در ساختار برج خنک‌کن تأمین گردید.

2-2- روش انجام آزمون پایش شرایط آب و بررسی نرخ خوردگی و رسوبگذاری برج خنک کن

نمونه‌برداری: در این بخش از تحقیق در ابتدا بازدید از چرخه آب خنک‌کن صورت می‌پذیرد. در ادامه برای انجام آزمون‌ها، سه نمونه مشابه از از خروجی کندانسور به منظور بررسی پارامترهای میکروبی و شیمیایی برداشته می‌شود. انجام آزمون‌های شیمیایی نظیر pH و هدایت در محل بر روی نمونه‌های گرفته شده صورت می‌پذیرد. بخشی از نمونه‌ها نیز برای انجام آزمون‌های آنیونی و کاتیونی به آزمایشگاه انتقال داده می‌شود.

تعیین پارامترهای فیزیکوشیمیایی: به منظور سنجش پارامترهای فیزیکوشیمیایی در محل، از دستگاه هدایت‌سنج و pHمتر کالیبره استفاده می‌گردد. در این روش با غوطه‌ور کردن الکترود pH و الکترود هدایت‌سنج کالیبره در نمونه‌ها پارامترهایی نظیر هدایت الکتریکی، درصد شوری، کدورت و pH مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

سنجش آنیون‌ها و کاتیون‌ها: پارامترهای مهم و قابل آنالیز در نمونه‌های آب چرخه خنک‌کن مانند یون‌های موجود در نمونه نیازمند سنجش دقیق در آزمایشگاه می‌باشد. لذا، آنالیزهای مربوط به هر یون با روش‌های استاندارد مرسوم در دنیا انجام شده است. به منظور سنجش یون‌های سدیم و پتاسیم از روش فلیم فتومتری طبق استاندارد 3500-Na و 3500-K بهره گرفته خواهد شد. همچنین جهت آنالیز کلسیم و منیزیم از استاندارد 3500 Ca-B و 3500 Mg-B و روش جذب اتمی استفاده می‌گردد. آنالیز نیترات، نیتریت، فلوراید و فسفات موجود در نمونه مطابق روش استاندارد 4110 SMWW با روش طیف‌سنجی (UV-VIS) انجام خواهد گردید. آنالیز یون کلرید، سولفات و قلیاییت نمونه نیز به ترتیب با روش‌های تیتراسیون موهر، تیترایسیون باریم و تیتراسیون با HCl انجام خواهد گرفت. استاندارد انجام این آزمون‌ها نیز روش 4500 Cl، 4110 SMWW و 2320 B SMWW می‌باشد.

بررسی نرخ خوردگی و رسوبگذاری: به منظور بررسی تأثیر رژیم شیمیایی جدید و رژیم پیشین بر روی تجهیزات برج خنک‌کن شامل کندانسور، چوب، پمپ، لوله‌ها و سایر تجهیزات، کوپن‌هایی از جنس تجهیزات مربوطه خریداری و در صورت تجاری نبودن ساخته می‌گردد. کوپن مربوطه در رک خوردگی قرار داده می‌شود و در نهایت تأثیر رژیم شیمیایی جدید و رژیم پیشین (برج اصلی و برج کنترل) بر روی این کوپن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

2-3- روش اعمال رژیم نوین

به منظور اعمال رژیم شیمیایی جدید و با توجه به حجم بالای رسوبات مربوط به سالیان گذشته، در ابتدا دو فرآیند شویش سطح کندانسور و غیرفعال‌سازی سطح انجام می‌گیرد. در فرآیند فلاشینگ یک دیسپرسنت فرموله شده از شرکت انرژی سمنان به کار برده می‌شود که ترکیبات معدنی و آلی را در خود حل می‌کند. در این فرایند، آهن، ترکیبات مسبب TDS بالا و ترکیبات آلی به حالت محلول تبدیل می‌شود. در نهایت با یک بلودان سنگین در حدود 50% حجم آب برج خنک‌کن از سیستم خارج می‌گردد. در ادامه شوک تزریق ماده بازدارنده خوردگی و بازدارنده رسوبگذاری انجام می‌شود. در شوک بازدارنده خوردگی و بازدارنده رسوبگذاری ماده تجاری $EN5677^{+}$ به صورت یک شوک دوز 200 کیلوگرمی به برج خنک‌کن تزریق می‌گردد تا یک حدود ثابت غلظتی را ایجاد کند. سپس روند معمول به صورت تزریق پیوسته ماده $EN5677^{+}$ با شدت جریان 90 ml/min به همراه شوک تزریق ماده EN262 به میزان 160 Kg در بازه زمانی 15 روز یکبار و یا مقادیر بهینه شده در ادامه کار صورت می‌گیرد.

3- بحث‌ها و نتایج

1-3- عملکرد کلاریفایر در رژیم شیمیایی نوین و رژیم شیمیایی پیشین

نیروگاه حرارتی مورد مطالعه دارای 4 برج خنک‌کن تر می‌باشد که مسئولیت خنک‌کاری آب کندانس برگشتی از کندانسور را برعهده دارد. در شرایط کنونی به علت پایین آمدن کیفیت آب چاه‌های تأمین‌کننده، پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب نظیر سختی و هدایت الکتریکی در حدود 4 تا 6 برابر افزایش یافته است. در نتیجه این امر، کنترل خوردگی و رسوب‌گذاری با این شرایط آب و اعمال رژیم شیمیایی پیشین، امکان‌پذیر نمی‌باشد. آب با چنین کیفیتی

در دراز مدت باعث از بین رفتن تجهیزات آب گردشی و کندانسور می‌گردد. در این نیروگاه خاص، حجم ورودی آب خام در هر واحد کلاریفایر $360m^3$ در ساعت می‌باشد که با توجه به درین[6]حدود $5\ m^3$ در روز برای هر کلاریفایر تغییر چندانی در میزان آب خروجی ایجاد نمی‌شود.

در سالیان قبل و زمان راه‌اندازی (سال 1350) نیروگاه با توجه به پایین بودن میزان کنداکتیویته (کمتر از 400µs) استفاده از تزریقات آهک و فریک کلرید در کلاریفایر به منظور نرم‌سازی آب تأثیرگذار بوده است. در سالیان اخیر با توجه به افزایش مقدار کنداکتیویته (بیش از 600µs) این سیستم نرم‌سازی عملکرد مناسبی را از خود نشان نمی‌دهد. از اینرو ارزیابی پارامترهای آب در ورودی و خروجی کلاریفایر در بازه‌های زمانی ابتدایی و کنونی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج در جدول 2 آورده شده است.

نقش اساسی فرایندهای کلاریفایر کاهش سختی (حذف یون‌های کلسیم، منیزیم و کربنات) و کاهش قلیائیت می‌باشد. بررسی نتایج آزمون‌های پایش آب خام و آب نرم بعد از کلاریفایر در سالیان اخیر نشان می‌دهد که میزان کلسیم موجود قبل و بعد از کلاریفایر کاهش قابل توجهی نداشته است (کاهش میانگین حدود 22%). از طرف دیگر با توجه به تزریق فریک کلرید میزان کلر موجود در آب بعد از کلاریفایر افزایش می‌یابد که میانگین این افزایش مطابق با جدول برابر با 16/7% می‌باشد. هدایت آب نیز بعد از کلاریفایر کاهش قابل توجهی را از خود نشان نمی‌دهد. میانگین کاهش هدایت با عدد 11% عملکرد نه چندان مناسب سیستم کلاریفایر و تزریقات انجام گرفته را نمایش می‌دهد. بنابراین بکارگیری سیستم نرم‌سازی با استفاده از تزریقات فریک کلرید و آهک در کلاریفایر منجر به کاهش چندانی در سختی کل و قلیائیت نخواهد شد. لذا بالا بودن پارامترهای منیزیم، کلسیم و کلر در آب تغذیه برج خنک‌کننده منجر به افزایش رسوب‌گذاری و خوردگی‌های متعدد در کندانسور خواهد شد.

در سال 1350 کیفیت آب خام و کیفیت آب خروجی کلاریفایر در جدول شماره 2 ارائه شده و راندمان کلاریفایر محاسبه گردیده است. از سوی دیگر در سال 1401 نیز بر اساس کیفیت آب خام ورودی کلاریفایر و آب خروجی کلاریفایر نیز راندمان کلاریفایر محاسبه گردیده است. در نهایت با داشتن راندمان کلاریفایر در سال‌های 1350 و 1401، عملکرد کلاریفایر طی سال‌های جاری و همچنین کیفیت آب خروجی گزارش گردیده است.

که اگر چه میزان بازدهی کلاریفایر در اوایل راه‌اندازی (سال 1350) و سالیان اخیر (سال 1401) تقریباً یکسان بوده است اما با توجه به افزایش قابل توجه هدایت الکتریکی (بالای 600 µS) استفاده از سیستم کلاریفایر و تزریقات فریک کلرید و آب آهک تأثیر چندانی در کاهش میزان هدایت الکتریکی و سختی کل نداشته است. مطابق با جدول 2 پارامترهای هدایت، سختی کل، کلسیم، کلر و قلیاییت بعد از کلاریفایر در سال‌های اخیر نسبت به زمان راه‌اندازی نیروگاه به ترتیب به مقدار 226/66%، 321/96%، 342/26%، 205/12% و 62% افزایش یافته است که منجر به کاهش کیفیت آب تأمینی کندانسور و در نتیجه افزایش خوردگی و کاهش بازدهی خواهد شد. بنابراین این نتایج عدم کارایی کلاریفایر را با توجه به کاهش کیفیت آب خام ورودی به کلاریفایر را در سال‌های اخیر نشان می‌دهد که توانایی کاهش پارامترهای مؤثر آب (نرم‌سازی آب) و تأمین آب با کیفیت بالا به منظور نرم‌سازی را ندارد. از اینرو بکارگیری یک سیستم تغییر شیمیایی جدید به منظور کاهش سختی و کانداکتیویته آب مورد نیاز کندانسور لازم و ضروری می‌باشد.

[6] Drain

جدول 2- نتایج پارامترهای آب ورودی و خروجی کلاریفایر در سال 1401 و زمان راه‌اندازی (سال 1350) سیستم نرم‌سازی آب

Clarifier		Conduct/ ms	TotHard/ ppm	CaHard/ ppm	Cl- /ppm	TotAlka/ ppm
Presented Operation Condition	Inlet	639.17	324.83	247.67	91.33	88.50
	outlet	566.67	283.33	191.67	106.67	26.67
	Recovery/ %	11.34	12.78	22.61	-16.79	69.87
Initial Operation Condition	Inlet	275.00	120.00	80.00	15.00	106.00
	outlet	250.00	88.00	56.00	52.00	43.00
	Recovery/ %	9.09	26.67	30.00	246.67	59.43
Absolute Parameter Value Comparison	(Presented/Initial)/ %	226.66	321.96	342.26	205.12	62.01

2-3- پایش خوردگی و رسوبگذاری به روش کوپن‌گذاری در برج خنک‌کن کنترل و آزمون

کوپن خوردگی یک ابزار بسیار ساده و مؤثر در پایش خوردگی و رسوبگذاری محسوب می‌گردد. این روش شامل قرار دادن یک نمونه از متریال مشابه جنس تجهیز در یک محیط فرآیندی برای مدت زمان معین می‌باشد. کوپن خوردگی از جنس متریال سیستم می‌باشد که با توجه به شرایط در معرض خوردگی قرار می‌گیرد و کاهش وزن آن معیاری از خوردگی می‌باشد. کوپن رسوبگذاری از جنس متریال مقاوم در برابر خوردگی و دارای سوراخ‌های بر روی سطح می‌باشد. کوپن رسوبگذار دچار خوردگی نمی‌گردد و رسوب بر روی سطح آن می‌نشیند. نشست رسوبات بر روی سطح منجر به پر شدن سوراخ‌ها و افزایش وزن می‌گردد که معیاری از رسوبگذاری محسوب می‌گردد.

در نیروگاه بخار مورد مطالعه پایش خوردگی ناشی از کاهش کیفیت آب در کندانسور و چرخه خنک‌کن واحد آزمون و کنترل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در برج خنک‌کن آزمون اعمال رژیم نوین شیمیایی با حذف کلاریفایر و به دنبال آن تزریق ماده‌های بازدارنده خوردگی و رسوبگذاری صورت می‌گیرد. این درحالی است که در برج خنک‌کن کنترل، آب برج خنک‌کن از کلاریفایر تأمین می‌گردد که تزریقات کلاریفایر بر پایه کلروفریک و آهک می‌باشد. برای انجام فرایند کوپن‌گذاری در برج خنک‌کن کنترل و آزمون، در ابتدا کوپن‌ها وزن شده و سپس کوپن‌ها به صورت افقی در داخل رک قرار گرفتند. در این تحقیق خوردگی بطور اختصاصی بر روی کوپن از جنس کندانسور (آدمیرالتی) و کوپن از جنس برج خنک‌کن (چوب) صورت گرفت. همچنین در این دوره کوپن اسکیل برای پایش رسوبگذاری نیز مورد استفاده قرار گرفت.

در این بخش کوپن ادمیرالتی از جنس کندانسور و کوپن چوبی از جنس برج خنک‌کن به عنوان نماینده کوپن‌های خوردگی اختصاصی استفاده شدند. کوپن اسکیل از جنس استیل ضدزنگ با ساختار سوراخدار به عنوان نماینده کوپن رسوبگذاری اختصاصی برگزیده گردید. مقدار کاهش وزنی در کوپن آدمیرالیتی نشان‌دهنده میزان خوردگی کندانسور ناشی از کیفیت آب برج می‌باشد. میزان کاهش وزن کوپن ادمیرالتی برای برج خنک‌کن آزمون حدوداً برابر mg/day 0/21 می‌باشد. میزان کاهش وزن برای کوپن ادمیرالتی در برج خنک‌کن کنترل در حدود mg/day 1/28 می‌باشد. این نتایج حاکی از آن است که میزان خوردگی کندانسور با اعمال رژیم نوین به میزان شش برابر کاهش می‌یابد.

از سوی دیگر کاهش وزنی در کوپن‌های چوبی میزان تخریب متریال چوبی برج خنک‌کننده را نشان می‌دهد. کاهش وزن کوپن چوبی در واحد کنترل برابر با mg/day 6/07 و برای واحد آزمون برابر با mg/day 3/57 می‌باشد. میزان

تخریب ساختار چوبی در کوپن‌های برج خنک‌کننده واحد کنترل نسبت به واحد آزمون 1/5 بیشتر می‌باشد. این نتایج مؤید آن است که در معرض شرایط رژیم شیمیایی پیشین، به مرور زمان حذف مواد اسید کرومیک و سولفات مس در متریال چوبی برج خنک‌کن کنترل اتفاق می‌افتد. این پدیده منجر به کاهش دوام، مقاومت و تخریب سریع برج خنک‌کن واحد کنترل می‌شود.

نتایج حاصل از بررسی افزایش وزن کوپن سوراخدار در برج‌های خنک‌کن کنترل و آزمون بیانگر میزان رسوبگذاری رژیم شیمیایی پیشین و نوین می‌باشد. میزان افزایش وزن کوپن اسکیل برای برج خنک‌کن واحد کنترل و آزمون به ترتیب برابر 6/07 mg/day و 3/57 mg/day می‌باشد. میزان رسوبگذاری در برج کنترل به میزان 1/7 برابر بیشتر از برج خنک‌کن آزمون می‌باشد. معضلات افزایش نرخ رسوبگذاری در برج های خنک‌کن به شرح کاهش انتقال حرارت در لوله‌های کندانسور، افزایش تنش حرارتی، ایجاد خوردگی زیر رسوبی، سنگینی سازه چوبی برج خنک‌کن[7]و شکستن به صورت V شکل، ایجاد گرفتگی و ناهمسانی ریزش آب و به دنبال آن افتادن خلا کندانسور در خروجی لوله های در بالای برج خنک‌کن، گرفتگی پمپ‌ها (CW Pump) و گرفتگی فیلترهای ورودی و خروجی کندانسور و به دنبال آن افتادن خلاء می‌باشد.

3-3- سنجش یون‌های آب برج خنک‌کن کنترل و آزمون

نمونه آب خام و آب برج خنک‌کن واحد آزمون و کنترل از نقطه نظر حضور تمامی آنیون‌ها و کاتیون‌ها مورد بررسی قرار گرفت. آنیون‌ها و کاتیون‌های مورد مطالعه در این تحقیق به شرح یون‌ها کنترل، یون‌های عیب‌یابی و یون‌های رسوبگذار می‌باشد. یون‌های کنترل شامل یون‌هایی مانند کلرید و سولفات است که مسبب خوردگی هستند. از سوی دیگر یون‌های عیب‌یابی شامل یون‌های مس و آهن هستند که محصول خوردگی می‌باشند. یون‌های رسوبگذار نیز به آن دسته یون‌ها نظیر منیزیم، کلسیم و کربنات‌ها اطلاق می‌گردد که در سیستم رسوب کرده و مسبب شکل‌هایی از خوردگی نظیر خوردگی زیر لایه‌ای می‌باشند.

بر اساس تئوری ارائه شده بر نحوه عملکرد بازدارنده خوردگی و رسوبگذار پیشنهادی تحت عنوان EN5677+، پیش‌بینی می‌گردد این ترکیب تأثیری بر غلظت یون‌های کنترل، عیب‌یابی و رسوبگذار نداشته باشد. زیرا مکانیزم عملکرد آن محلولسازی یون رسوبگذار بدون ایجاد تغییر در بالانس یون‌ها می‌باشد. براساس داده‌های جدول 3 تمامی کاتیون‌ها و آنیون‌ها در آب خام و آب برج‌های خنک‌کن (با در نظر گرفتن ضریب تغلیظ) داری مقادیر مشابه می‌باشند. همچنین ضریب تغلیظ آب برج خنک‌کن نسبت به آب خام در حدود 4 محاسبه گردید. نتایج غلظت آنیون‌ها و کایون‌ها در برج خنک‌کن آزمون و کنترل نشان‌دهنده آن است که اعمال رژیم نوین شیمیایی تأثیر چندانی بر غلظت یون‌ها ندارد. همچنین نتایج جدول 3 گرداوری گردیده است که قیاس بین نتایج آب خام، برج خنک‌کن کنترل و برج خنک‌کن آزمون است.

رژیم پیشین بر مبنای حذف ترکیبات رسوبگذار و قلیایی است، فلذا پیش بینی می‌گردد که کاربرد رژیم پیشین منجر به کاهش ترکیبات رسوبگذار نظیر منیزیم، کلسیم کربنات و قلیائیت گردد. اما با توجه به این نکته که راندمان عملکرد کلاریفایر بسیار پایین است، تغییر در غلظت یون‌ها در رژیم پیشین قابل ملاحظه نمی‌باشد. از سوی دیگر اعمال رژیم نوین بر مبنای محلولسازی ترکیبات رسوبگذار (بالا بردن انحلال ترکیبات رسوبگذار) می باشد، لذا اعمال این رژیم

[7] Splash bar

شیمیایی تاثیری بر غلظت یون‌ها ندارد زیرا در این رژیم با بالا بردن میزان انحلال پذیری یون‌ها فرایندهای رسوبگذاری کاهش می‌یابد. از سوی دیگر دلیل اصلی کاهش نرخ خوردگی در رژیم نوین، افزودن ترکیبات بازدارنده خوردگی است که نقش حفاظتی بر روی تجهیزاتی نظیر کندانسور را دارند. فلذا افزودن بازدارنده‌های خوردگی نیز تغییرات چندانی در غلظت یون‌ها ایجاد نمی‌کند. در یک جمع بندی کلی، اعمال رژیم نوین با محلولسازی ترکیبات رسوبگذار مانع رسوبگذاری و با افزودن بازدارنده خوردگی مانع خوردگی می‌گردد و به صورت کلی تغییرات قابل ملاحظه‌ای در غلظت یون‌ها حاصل نمی‌گردد.

جدول 3- قیاس سنجش آنیون‌ها و کاتیون‌های مربوط به آب خام با آب خنک کن کنترل و آزمون

Ion	Raw Water	C-CT[a]	M-CT[b]
Na^+/ ppm	15.45	103.6	77.3
K^+/ ppm	0.8	8.0	5.0
Ca^{2+}/ ppm	108.6	696.0	541.1
Mg^{2+}/ ppm	25.4	135.9	106.6
NO^{3-}/ ppm	65.3	462.3	288.5
Cl^-/ ppm	93.45	665.9	425.3
SO_4^{2-}/ ppm	127.5	1097.3	955.8
T-Alkalinity/ ppm	85.6	165.3	122.1
NO_2^-/ ppm	<0.003	0.04	0.01
PO_4^{3-}/ ppm	0.04	1.13	3.6
F^-/ ppm	0.13	2.9	1.7

C-CT: Control Cooling Tower, M-CT: Main Cooling Tower.

4-3- توجیهات فنی-اقتصادی حذف کلاریفایر

در نیروگاه مورد مطالعه چهار کلاریفایر وجود دارد که دبی اسمی هر واحد کلاریفایر در حدود $567/64\ m^3/h$ می‌باشد و دبی واقعی هر واحد در حدود $345\ m^3/h$ برآورد گردیده است. هدف اصلی از این تحقیق حذف 3 واحد کلاریفایر آب چرخه خنک‌کن و ورود مستقیم آب از منابع تأمینی به چرخه خنک‌کن می‌باشد. از چهار واحد کلاریفایر برج‌های خنک‌کن سعی بر آن است که یک واحد آن برای تأمین آب ترین[8]ها حفظ گردد.

در این بخش بررسی و انجام محاسبات مربوط به حذف کلاریفایر در دستور کار قرار دارد. پایه محاسبات در این بخش توجیهات فنی-اقتصادی سالانه با در نظر گرفتن هزینه‌های حذف هر 4 کلاریفایر و حجم آب مصرفی سالیانه می‌باشد. براساس داده‌ها و گزارش‌های ارائه شده با در نظر گرفتن 4 کلاریفایر و دبی واقعی در حدود $345\ m^3/h$ سرانه مصرف آب سالانه 4 کلاریفایر در حدود 12 میلیون لیتر محاسبه می‌گردد.

میزان مصرف سالانه آهک، فریک کلراید و کالگون در 4 واحد کلاریفایر به منظور نرم کردن آب، سختی‌زدایی و منعقدسازی در سال 1401 به ترتیب 600، 216 و 8 تن برآورد می‌گردد که با در نظر گرفتن هزینه خرید یک تن آهک به قیمت 1،500،000 تومان، یک تن فریک کلراید به قیمت 5،300،000 تومان، یک تن کالگن به قیمت 110،000،000 تومان و اسید، در صورت حذف واحدهای کلاریفایر در مجموع 3،252،400،000 تومان هزینه مربوط به خرید آهک، کلروفریک، کالگن و اسید از هزینه‌های سالانه کسر می‌گردد. همچنین تعداد پرمیت‌های تعمیرات

[8] Train

تجهیزات تولید آب نرم (کلاریفایر، تیکنر، فیلتر پرس و ....) در سال 1401 با دو نفر پرسنل تمام وقت با در نظر گرفتن حقوق 30 میلیون تومان در ماه که مجموع حق‌الزحمه پرسنل تعمیرات تجهیزات تولید آب نرم برابر با 720،000،000 تومان خواهد شد.

میزان برق مصرفی تجهیزات شامل پمپ‌های مربوط به آب نرم، همزن کلاریفایر، جاروبک کلاریفایر، کلاریواتر پمپ (2 عدد)، همزن آهک زنی، شیر آهک‌زنی، پمپ شیر آهک، پمپ کلروفریک و پمپ‌های فیلتره مربوط به یک واحد 15/851 kwh در ساعت می‌باشد. لذا مصرف برق روزانه برای یک واحد برابر با 380/4 kwh و کل مصرف سالیانه برای 4 واحد برابر با 555384 kwh خواهد بود.

همچنین میزان برق مصرفی برای پمپ‌های پساب 4 واحد در خصوص آب نرم شامل پمپ هیدرولیک (2 عدد)، پمپ SPP (2 عدد)، پمپ لجن‌کش (4 عدد)، جاروبک تیکنر (2 عدد) و پمپ TSPP (3 عدد) 11/19 kwh در ساعت می‌باشد که با توجه به کارکرد روزانه 5 ساعت این پمپ‌ها در سرویس، مجموع برق مصرفی سالیانه برای 4 واحد برابر با 20421/75 kwh می‌باشد. بنابراین مجموع مصرف سالیانه برق شامل تجهیزات مرتبط با آب نرم و پمپ‌های پساب برابر با 575805/75 kwh می‌باشد که با در نظر گرفتن هزینه 108 تومانی هر kwh مجموع هزینه‌های سالیانه مصرف برق برای 4 واحد برابر با 62187021 تومان خواهد شد. تعداد تسمه‌های همزن تعویض شده در سال 1401 برای 4 واحد برابر 50 عدد می‌باشد که با توجه به قیمت خرید هر تسمه (1،000،000 تومان) مجموع هزینه سالیانه تعویض تسمه برابر با 50،000،000 خواهد شد.

از جمله تبعات دیگر کاربرد کلاریفایرها مباحث مربوط به دفع رسوبات ایجاد شده می‌باشد. در نیروگاه مورد مطالعه دو راهکار اصلی برای دفع رسوبات متداول می‌باشد. راهکار اصلی دفع رسوبات و انتقال آنها به کارخانه تولید سیمان می‌باشد و راهکار جانبی آن دپو کردن رسوبات می‌باشد. هزینه حمل رسوبات با میزان ایجاد شده تقریبی 200 ton در سال و با در نظر گرفتن هزینه دفع هر تن به میزان 62،500 تومان و هزینه کل دفع رسوبات برابر 12،500،000 تومان برآورد می‌گردد.

در مجموع با حذف 4 واحد کلاریفایر هزینه‌ای نیز از هزینه‌های سالانه نیروگاه کسر می‌گردد. همچنین حجم کلی درین پساب و لجن ناشی از 4 کلاریفایر حدوداً برابر با 60 m^3 در روز (3 بار درین 5 m^3 برای هر کلاریفایر) می‌باشد و حجم سالیانه پساب تولیدی برابر با 21900 m^3 می‌باشد که تصفیه و بازچرخانی آن به سیکل انجام نمی‌گیرد. از طرف دیگر حجم آب خروجی روزانه پس از فیلترپرس شدن لجن برای هر کلاریفایر برابر با 10 m^3 و حجم آب خروجی روزانه 4 کلاریفایر برابر با 40 m^3 می‌باشد که حجم قابل توجهی بوده و با توجه به بحران آب در کشور بویژه در سالیان اخیر حذف کلاریفایر و تغییر رژیم شیمیایی تأثیر بسزایی در کاهش و اصلاح الگوی مصرف آب خواهد داشت.

تمامی رژیم‌های شیمیایی ایده آل ارائه شده در زمان آغاز بهره‌برداری نیروگاه به گونه‌ای طراحی می گردند که لوله‌های کندانسور در طول زمان بهره برداری نیروگاه دچار مشکل نگردد و نیازی به تعویض آنها نباشد. در این مورد خاص، رژیم شیمیایی نیروگاه مطابق دستورالعمل سازنده می‌باشد اما با توجه به توضیحات ارائه شده، رژیم اولیه که در زمان آغاز بهره‌برداری ارائه شده است به دلیل افت شدید کیفیت آب خام، قادر به حفاظت از تجهیزات بویژه کندانسور نمی‌باشد. به دلیل عدم قابلیت حفاظت از خوردگی رژیم شیمیایی پیشین و بر اساس نرخ خوردگی به دست آمده

برای کوپن خوردگی مس و کوپن خوردگی ادمیرالتی، پیش بینی می‌گردد که لوله های کندانسور در طول 10 سال دچار خوردگی شدید گردد و در نتیجه این فرایند، تعویض لوله‌ها با اعمال رژیم پیشین و کیفیت آب کنونی در بازه زمانی 10 ساله الزامی به نظر می‌رسد.

جدول 4- مجموع هزینه‌های سالیانه حفظ کلاریفایر برای 4 واحد برج خنک‌کن نیروگاه حرارتی مورد مطالعه

مجموع هزینه‌ها				
مواد	مصرف سالیانه برای 4 برج / تن	قیمت واحد تن/ تومان	قیمت کل/ تومان	مجموع/ تومان
آهک	600	1.500.000	900.480.000	
فریک کلراید	216	5.300.000	1.146.920.000	
کالگن	8	130.000.000	1.040.000.000	
اسید	300	550.000	165.000.000	3.252.400.000
هزینه پرسنلی	تعداد ماه در سال	حقوق ماهیانه/ تومان	تعداد نفر تعمیرات	هزینه کل/ تومان
حق الزحمه پرسنلی	12	30.000.000	2	720.000.000
هزینه مصرف برق	مصرف سالیانه/ kwh	هزینه هر kwh/ تومان	هزینه کل / تومان	مجموع/ تومان
تمام تجهیزات	555/384	108	59.981.472	
پمپ های پساب	20421/75	108	2.205.549	62.187.021
هزینه تجهیزات	تعداد در سال	قیمت واحد/ تومان	هزینه کل/ تومان	مجموع/ تومان
تسمه‌های همزن	50	1.000.000	50.000.000	50.000.000
هزینه رسوبات	تعداد سالیانه/ سرویس	هزینه هر سرویس/ تومان	هزینه کل/ تومان	مجموع/ تومان
دفع رسوبات و انتقال	400	625.000	250.000.000	250.000.000
کاهش مصرف آب	مصرف آب تخلیه 4 کلاریفایر/ m^3	مصرف آب سالانه/ m^3	هزینه هر m^3 آب/ تومان	هزینه کل/ تومان
	40	14.600	1.966	28.703.600

تعداد لوله	تعداد برج	قیمت هر لوله به تومان	قیمت کل در طول 10 سال	هزینه سالانه
11000	4	7.500.000	330.000.000.000	33.000.000.000
				4.363.290.621

در ادامه نتایج اعمال تغییر رژیم شیمیایی جدید مورد بررسی قرار می‌گیرد. اعمال این رژیم در ابتدا با دو فرایند فلاشینگ و پسیفیشن همراه است. که در فرایند فلاشینگ با کاربرد دیسپرسنت ترکیبات معدنی و آلی سعی بر آن است که میزان آهن، کدورت و ترکیبات آلی تا آنجا که ممکن است به حالت محلول در آمده و در نهایت با یک بلودان سنگین برج عاری از آلودگی گردد. در ادامه شوک تزریق ماده بازدارنده خوردگی و بازدارنده رسوبگذاری را به همراه دارد. در ادامه روند معمول به صورت تزریق پیوسته ماده $EN5677^{+}$ با جریان 90 ml/min به همراه شوک تزریق ماده 262 به میزان 160 Kg در بازه زمانی 15 روز یکبار می‌باشد.

جدول 5- مجموع هزینه‌های سالیانه حذف کلاریفایر و اعمال رژیم شیمیایی برای 4 واحد برج خنک نیروگاه حرارتی

مجموع هزینه‌ها							
مواد	**فلو/ ml/min**	**ماهانه/ ml**	**ماهانه یک برج/ Kg**	**سالانه یک برج/ Kg**	**قیمت واحد/ kg**	**قیمت کل سالیانه یک برج/ تومان**	**قیمت کل سالیانه 4 برج/ تومان**
5677+	90	3.880.000	4.666	55.987	61.000	3.415.219.200	13.660.876.800
262			320	3.840	44.000	168.960.000	168.960.004
اسید			400		550.000		220.000.000
							14.049.836.804

بنابراین نتایج بررسی‌های رژیم پیشین و نوین به شرح ذیل می‌باشد:

1. در بحث بررسی هزینه‌ها، میزان هزینه های سالانه حفظ کلاریفایر برابر 37.000.0000.000 تومان می‌باشد و هزینه های اعمال رژیم شیمیایی جدید در حدود 14.000.000.000 تومان می‌باشد. در نتیجه اعمال تغییر رژیم شیمیایی و حذف کلاریفایر حدود 60% کاهش هزینه‌ها را به دنبال دارد. از سوی دیگر با در نظر گرفتن نرخ خوردگی مس در طول 10 سال تمامی لوله‌های مسی کندانسور می‌بایست تعویض گردد. با توجه به قیمت هر لوله مسی 150 یورو، براساس محاسبات قیمت کل لوله‌های مسی کندانسور با احتساب 11.000 لوله برابر 330.000.000.000 می‌گردد که می‌بایست در طول 10 سال تعویض گردد. بر این اساس هزینه سالیانه تعویض لوله‌های مسی کندانسور 33.000.000.000 محاسبه می‌گردد که حدود 250% از هزینه‌های اعمال تغییر رژیم شیمیایی (14.0000.000) بیشتر می‌باشد.

2. از جمله مزایای کوتاه مدت سیستم می‌توان به نرخ پایین رسوب‌گذاری، توانایی انتقال حرارت بهتر آب چرخه خنک‌کن کنترل شیمیایی سهل‌تر نسبت به شرایط حفظ کلاریفایر و نرخ خوردگی کوتاه مدت پایین‌تر اشاره نمود.

3. از جمله مزایای بلند مدت سیستم می‌توان به کاهش نرخ خوردگی، کاهش کار زاید به منظور جبران زیان‌های ناشی از خوردگی، کاهش هزینه‌های توقف و کاهش راندمان تولید، کاهش هزینه و کار زاید حفظ کلاریفایر و اتوماسیون سیستم می‌توان اشاره کرد.

4. در ارتباط با خوردگی مس و آهن، میزان خوردگی مس و آهن در رژیم شیمیایی پیشین با حفظ کلاریفایر در قیاس با اعمال تغییر رژیم شیمیایی خوردگی مس به میزان 14 برابر و خوردگی آهن به میزان 150 برابر بیشتر است. براساس این محاسبات و با در نظر گرفتن شرایط یک لوله کندانسور مسی در نیروگاه، مدت زمان لازم برای سوراخ شدن لوله محاسبه گردید. مدت زمان سوراخ شدن لوله مسی کندانسور (خوردگی 30% لوله و فرا رسیدن زمان تعویض) در رژیم پیشین 5 سال و در شرایط کنونی با اعمال تغییر رژیم 75 سال پیش‌بینی می‌گردد. بر این اساس افزایش طول عمر لوله‌های کندانسور به میزان 1500% رقم قابل توجه و بسیار مقرون به صرفه‌ای است.

5. براساس نتایج حاصل از سنجش آنیون‌ها و کاتیون‌های موجود در نمونه آب خام، آب خنک‌کن برج 4 (آزمون اصلی) و آب خنک کن برج 3 (آزمون کنترل)، میزان سولفات موجود در آب چرخه خنک‌کن برج خنک‌کن واحد 3 (1373 ppm) و برج خنک‌کن واحد 4 (903 ppm) می‌باشد. افزایش میزان سولفات به دلیل افزودن مقادیر بیشتر اسید سولفوریک در راستای کاهش pH و قلیائیت می‌باشد. افزایش میزان سولفات در برج خنک‌کن 3 و به طبع آن کاهش آلکالینیتی به عنوان عوامل تشدید خوردگی در برج خنک‌کن واحد 3 به حساب می‌آید که نتایج حاصل از کوپن‌گذاری نیز مؤید این مهم می‌باشد.

4- جمع‌بندی

در این تحقیق به دلیل افت شدید کیفیت آب خام تأمینی و عدم کارایی کلاریفایر، اعمال رژیم نوین شیمیایی در یک نیروگاه حرارتی در دستور کار قرار گرفت. به منظور اعمال رژیم نوین شیمیایی، تزریق پیوسته ماده بازدارنده خوردگی و بازدارنده رسوبگذاری انجام گرفت. در طول دوره تغییر رژیم شیمیایی برج خنک‌کن واحد آزمون و کنترل روزانه از نقطه نظر خوردگی (بررسی کوپن آدمیرالتی و چوب)، رسوب‌گذاری (بررسی کوپن سوراخ‌دار)، مجموع پارامترهای مربوط به سختی، قلیاییت، غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌ها، کلر آزاد و ماده مؤثره مورد بررسی قرار گرفت. نتایج کوپن-گذاری از جنس کندانسور حاکی از آن است که میزان خوردگی کندانسور با اعمال رژیم شیمیایی نوین به میزان شش برابر کاهش می‌یابد. همچنین میزان تخریب ساختار چوبی برج خنک‌کن در واحد کنترل نسبت به واحد آزمون 1/5 برابر بیشتر می‌باشد. از سوی دیگر براساس نتایج کوپن‌گذاری اسکیل، میزان رسوبگذاری در برج کنترل به میزان 1/7 برابر بیشتر از برج خنک‌کن آزمون می‌باشد. از جمله مزایای بلند مدت اعمال رژیم نوین شیمیایی می‌توان به کاهش نرخ خوردگی، کاهش کار زاید به منظور جبران زیان‌های ناشی از خوردگی، کاهش هزینه‌های توقف و کاهش راندمان تولید، کاهش هزینه و کار زاید حفظ کلاریفایر و اتوماسیون سیستم می‌توان اشاره کرد. لذا تغییر حذف فرایندهای کلاریفایر و کاربرد ترکیبات بازدارنده خوردگی و بازدارنده رسوبگذاری و زیست‌کش آلی برای سایر نیروگاه‌های حرارتی که آب تأمین آنها در سال‌های اخیر با کاهش کیفیت و افزایش هدایت روبرو است توصیه می‌گردد.

5- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از معاونت پژوهشی دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) و پژوهشگاه نیرو که در انجام مراحل تحقیق حامی و یاری‌رسان ما بودند کمال تقدیر و تشکر را دارند.

6- منابع

[1] M. Zarabadipour, M. Soleimani, and M. G. Afshar, "Application of functionalized Fe3O4@ SiO2 nanoparticles as an adsorbent for heavy metal removal," *Results in Chemistry*, pp. 102514, 2025.

[2] M. Esmaeilpour, M. G. Afshar, A. Yousefpour, M. Kazemnejadi ,and H. Ghaseminejad, "Monitoring the physicochemical parameter and investigating the causes of destruction for thermal power plant steam cycle," *Farayandno*, vol. 20, no. 89, pp. 57-76, 2025.

[3] B. Radojković *et al.*, "Corrosion of metal parts in the power plant," *Materials and Corrosion*, vol. 74, no. 10, pp. 1499-1513, 2023.

[4] J. A. Beavers, A. K. Agrawal, and W. E. Berry, "Corrosion Related Failures in Power Plant Condensers," in *CORROSION 1981*, Association for Materials Protection and Performance, pp. 1-29, 1981.

[5] M. Esmaeilpour, M. G. Afshar, and M. Faghihi, "Technical-Economic Evaluation of the Proposed Solutions to Modify the Pattern of Water Consumption in Tarasht Power Plant," 2024.

[6] M. G. Afshar, M. Esmaeilpour, and H. Ghaseminejad, "Microbial corrosion affected by environmental factors in cooling tower of Bandar Abbas power plant," *Journal of Environmental Studies*, vol. 49, no. 4, 2024.

[7] R. Kumar, R. Singh, and S. Kumar, "Erosion and hot corrosion phenomena in thermal power plant and their preventive methods: a study," *Asian Review of Mechanical Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 38-45, 2018.

[8] T. S. Rao and S. Bera, "Protective layer dissolution by chlorine and corrosion of aluminum brass condenser tubes of a nuclear power plant," *Engineering Failure Analysis*, vol. 123, pp. 105307, 2021.

[9] M. Ghahraman Afshar, M. Esmaeilpour, and H. Ghaseminejad, "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*, 2023.

[10] A. Kumar and J. Singh, "Overview on corrosion in automotive industry and thermal power plant," *Proc. Eng. Sci*, vol. 4, pp. 13-22, 2022.

[11] G. Yang, Y. Gou, X. Liu, X. Zhang, and T .Zhang, "Failure analysis of the corroded water wall tube in a 50MW thermal power plant," *High Temperature Materials and Processes*, vol. 37, no. 9-10, pp. 995-999, 2018.

[12] M. Ghahraman Afshar, M. Esmaeilpour, and N. Namaki Shooshtari, "Microbial corrosion in cooling tower of ramin power plant: determination and corrective solution," *Journal of Water and Wastewater; Ab va Fazilab (in persian)*, vol. 34, no. 4, pp. 97-108, 2023.

[13] A. M. Ghahraman, H. Ghaseminejad, and M. Esmaeilpour, "Microbial Corrosion in Cooling Water of Lushan Shahid Beheshti Power Plant," 2022.

[14] D. Ghosh, H. Roy, S. Ray, and A. Shukla, "High temperature corrosion failure of a secondary superheater tube in a thermal power plant boiler," *High Temperature Materials And Processes* ,vol. 28, no. 1-2, pp. 109-114, 2009.

[15] B. C. Syrett, "Corrosion control in electric power plants—success stories," *Corrosion science*, vol. 35, no. 5-8, pp. 1189-1198, 1993.

[16] V. N. Rajaković-Ognjanović, D. Z. Živojinovic, B. N. Grgur, and L. V. Rajaković, "Improvement of chemical control in the water-steam cycle of thermal power plants," *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, no. 1, pp. 119-128, 2011.

[17] M. Ghahraman Afshar, H. Hamidavi, A. Maleki, and N. BahramiPanah, "Theophylline-functionalized Fe3O4@ SiO2 nanoparticles: synthesis, characterization and application as cadmium ion removal adsorbent," *Iranian Chemical Engineering Journal*, pp. e223962, 2025.

[18] B. Larin *et al.*, "Chemical Control of Organic Substances for Correction of Water-Chemical Regimes at TPPs," *Power Technology and Engineering*, vol. 58, no. 3, pp. 479-487, 2024.

[19] M. Ghahraman Afshar, P. Barashroudi, N. Bahramipanah, and A. Maleki, "Theophylline-functionalized magnetic nanoadsorbent: synthesis, characterization, solid phase extraction of copper, modeling of isotherms and adsorption kinetics," *Applied Chemistry Today*, 2025.

[20] M. Ghahraman Afshar, M. Esmaeulpour, A. Zolriasatein, and E. Niknam, "Application of silica nanoparticles functionalized with amine polymer as an inhibitor for cooling tower of thermal power plants," *Iranian Chemical Engineering Journal*, pp. e225633, 2025.

[21] M. G. Afshar, M. Azimi, N. Habibi, H. Masihi, and M. Esameilpour, "Batch and continuous bleaching regimen in the cooling tower of Montazer Ghaem Power Plant," *Journal of Hazardous Materials Advances*, vol. 11, pp. 100339, 2023.

[22] M. G. Afshar, M. Esmaeilpour, H. Ghaseminejad, and N. Esmaeili, "Detection and Analysis of Microbial Influenced Corrosion in Cooling Tower of Shahid Mofateh Power Plant," *Journal of New Materials Winter*, vol. 13, no. 50, 2023.

[23] M. G. Afshar, M. Tercier-Waeber, B. Wehrli, and E. Bakker, "Direct sensing of total alkalinity profile in a stratified lake," *Geochem. Perspect. Lett*, vol. 3, no. 1, pp. 85-93, 2017.

[24] N. Pankratova, M. Ghahraman Afshar, D. Yuan, G. A. Crespo, and E. Bakker, "Local acidification of membrane surfaces for potentiometric sensing of anions in environmental samples," *ACS sensors*, vol. 1, no. 1, pp. 48-54, 2016.

[25] A. Javadi, A. Maleki, N .Bahrami Panah, and M. Ghahraman Afshar, "Removal of nickel ions from aqueous solutions using theophylline-functionalized Fe3O4@ SiO2 magnetic nanoparticles," *Journal of Applied Research of Chemical-Polymer Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 40-49, 2025.

[26] M. Ghahraman Afshar, M. Azimi, N. Habibi, and M. Esmaeilpour, "Providing Operational Solution to Reduce Water Consumption of Cooling Water Cycle in Montazer Ghaem Power Plant by Chemical Modification of Clarifier Water," *Iranian Chemical Engineering Journal*, 2023.

[27] M. Esamaeilpour, M. Ghahraman Afshar, M. Faghihi, and M. Rafiei, "Investigation of Water Consumption in Loshan Power Plant and Technical-Economic Evaluation of the Suggested Solutions to Modify the Consumption Pattern," *Journal of Water and Wastewater; Ab va Fazilab (in persian)*, vol. 34, no. 3, pp. 1-20, 2023.

[28] M. G. Afshar, G. A. Crespo, and E. Bakker, "Thin-layer chemical modulations by a combined selective proton pump and ph probe for direct alkalinity detection," *Angewandte Chemie*, vol. 127, no. 28, pp. 8228-8231, 2015.

[29] Z. Hradil, J. Spacil, and J. Vilim, "Chemical regimen of secondary circuit of nuclear power plant with WWER-440 reactors during start-up," *Provoz.-Vyvoj. Pr. ORGREZ;(Czechoslovakia)*, vol. 52, 1987.

[30] W. N .Lubega and A. S. Stillwell, "Analyzing the economic value of thermal power plant cooling water consumption," *Water Resources and Economics*, vol. 27, pp. 100137, 2019.

[31] K. Risthaus and R. Madlener, "Economic analysis of electricity storage based on heat pumps and thermal storage units in large-scale thermal power plants," *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 2816-2823, 2017.

[32] S. Farghal, R. El-Dewieny, and A. Riad, "Economic justification of cogeneration systems for industrial steam users and utility systems," in *IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution)*, vol. 136, no. 2: IET, pp. 100-107, 1989.