Water and Wastewater, Vol. 35, No. 1, pp: 86-102

Investigating the Influence of Reliability Centered Maintenance on Water Treatment Plant Pumps (Case Study: Guilan Water Treatment Plant)

Abbas Asghari[1*], Seyed Mohammad Jafari[2]

1. Former Graduate Student, Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
(Corresponding Author) ab.asghari@Mail.sbu.ac.ir
2. Assist. Prof., Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

(Received Feb. 15, 2024 Accepted April 29, 2024)

To cite this article:
Asghari, A. and Jafari, S. M., 2024. Investigating the influence of reliability centered maintenance on water treatment plant pumps (case study: Guilan water treatment plant). *Water and Wastewater*, 35(1)**,** 86-102.
https://doi.org/10.22093/wwj.2023.444001.3400.

Abstract

With the increase in maintenance and repair costs, as well as changing expectations towards the growth of efficiency and increasing the life cycle of equipment, detecting the possibility of failures before they occur and reducing the time of breakdowns and stops, maintenance and repairs and condition monitoring of equipment have become more important. Reliability-centered maintenance is one of the methods and strategies that are systematically related to equipment maintenance and repairs. Since the pumps are the center and axis of the treatment plants, their study can be of great significance. This is because the output of the water and sewage industry is very important because of its connection with people's lives. The current research is focused on investigating the impact of RCM strategy on water treatment plant pumps by using the Analytical Hierarchy Process. Questionnaires were designed based on objectives and criteria, and the weighting of data was done by the AHP method. Also, information worksheets and RCM decision worksheets for pumps were designed and completed. In total, the MTBF index of clear water pumps was investigated in two time periods (from June 2021 to June 2022 and June 2022 to June 2023). The data analysis shows that the value of this index increased in the second period compared to the first period, which indicates the positive effect of Reliability Centered Maintenance activities.

Keywords: Maintenance, Reliability Centered Maintenance, Water Treatment Plant Pump, Analytical Hierarchy Process, MTBF Index.

1. Introduction

As our reliance on physical assets within organizations grows, so do the associated costs of ownership and operation. Maximizing the return on capital investment requires efficient utilization of these assets over their lifespan. Reliability-Centered Maintenance[1] is a strategy aimed at enhancing system reliability through the implementation of innovative maintenance and repair techniques (Moubray, 1995). It focuses on proactive fault analysis to prevent critical failures and selects the most suitable maintenance approach through effective failure management. Certain equipment, such as pumps, plays a crucial role in industries like water and wastewater management. The importance of pumps has been magnified as countries prioritize the development of pumping infrastructure. With economic growth, and increased focus on health, safety, and environmental concerns, energy efficiency has emerged as a key priority, underscoring the significance of pump-related issues. This study assesses the efficacy of implementing RCM in achieving organizational objectives, performance metrics, and the identification of optimal criteria using the Analytic Hierarchy Process[2] methodology. The application of RCM results in the development of a comprehensive maintenance and repair program. Decisions related to planning and executions for each failure are systematically grouped to streamline the overall maintenance and repair process. Fig. 1. show hierarchical model of research.

[1] Reliability-Centered Maintenance (RCM)

[2] Analytic Hierarchy Process (AHP)

2. Materials and methods

This study focuses on the AHP, which is a comprehensive system designed for multi-criteria decision-making. Since its development in the late 1970s, this method has been the foundation of numerous studies (Zanjirchi, 2011). In multi-criteria decision models, the objective is to choose the best option or solution from various alternatives using multiple criteria. The AHP allows for formulating the problem hierarchically and considering various quantitative and qualitative criteria when examining the study issue. Additionally, it enables the inclusion of different options in decision-making and the analysis of the criteria's sensitivity.

3. Discussion and analysis

In the present study, based on the expectations of the set, equipment status, needs assessment, and objectives, criteria were identified as significant through brainstorming and discussion. The criteria: 1- Flow rate criterion (C1); 2- Head criterion (C2); 3- Cost of repairs criterion (C3); 4- Number and duration of stops criterion (C4) were key factors influencing pump selection. The research options consist of 4 pumps: 1- Clear water pump (A1) 2- Raw water pump (A2) 3- Chemical pump (A3) 4- Site Water pump (A4).

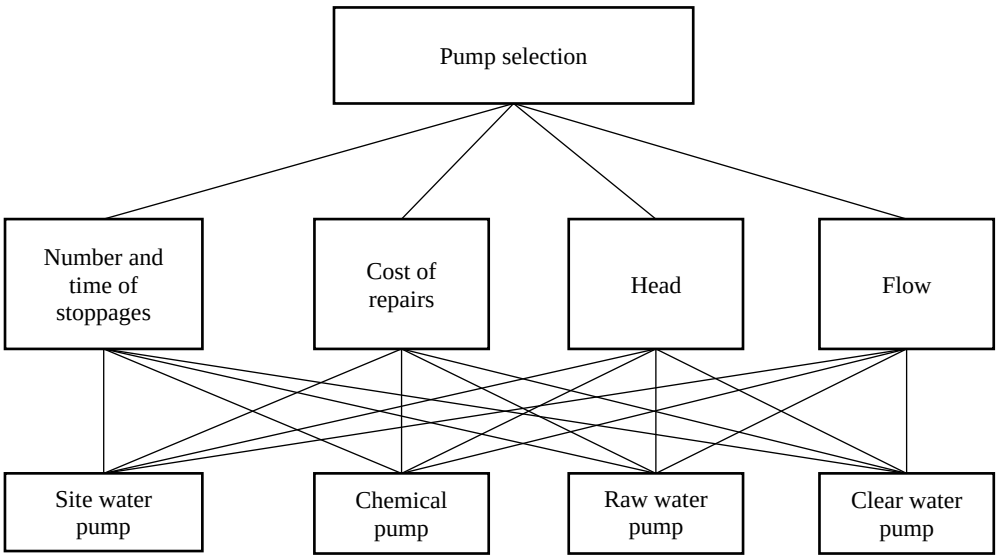

Fig. 1. Hierarchical model of research

To establish the importance and weight of research factors, pairwise comparisons of criteria were developed and shared with experts. After completing the pairwise comparison matrices, the inconsistency rate of each was calculated, all of which were below 0.1, indicating the stability and consistency of the matrices. Subsequently, experts' pairwise comparisons were aggregated using the geometric mean method and inputted into the Expert Choice software to determine the weights. The outcomes of pairwise comparisons and weights reveal that the flow rate criterion (C1) with a weight of 0.561 holds the top position, the head criterion (C2) with a weight of 0.212 secures the second position, the number and duration of stops criterion (C4) with a weight of 0.146 ranks third, and the cost of repairs criterion (C3) with a weight of 0.081 ranks fourth. The final weights of the options are calculated by multiplying the criteria weights by the relative weights of the options. Consequently, the Clear water pump (A1) with a weight of 0.552 ranks first, the Raw water pump (A2) with a weight of 0.191 secures the second position, the Chemical pump (A3) with a weight of 0.145 ranks third, and the Site Water pump (A4) with a weight of 0.112 ranks fourth (Fig. 2).

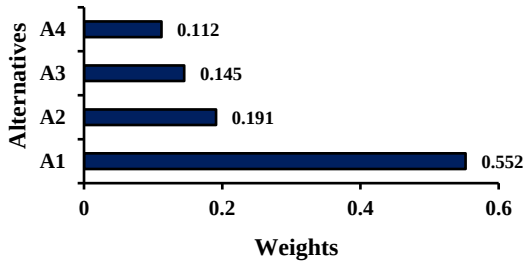

Fig. 2. The final weights of the alternatives

Therefore, it was determined that the clear water pump is more crucial in the large water treatment plant in Gilan. The RCM information sheet is a vital document for initiating the RCM process execution. This sheet includes essential information collected to serve as the foundation for decision-making. To create the information sheet for the clear water pumps, a table prepared by John Moubray and Aladon Company was utilized. The decision-making sheet is the subsequent document used to summarize the decision-making process after the information sheet. Consequently, the information sheets and decision-making sheets of RCM were prepared and finalized for the clear water pumps. Subsequently, the MTBF index was assessed.

4. Conclusion

One of the key indicators for assessing maintenance and repair based on RCM is the utilization of the MTBF indicator. This indicator calculates the average time interval between two equipment failures. In essence, it serves as a measure and indicator of reliability, indicating how long a piece of equipment typically functions before encountering a failure. This indicator illustrates the average number of hours a device can operate smoothly (without failure).

Comparing the MTBF[1] indicator across the mentioned time intervals reveals that its value has roughly doubled in the 2022–2023-time frame compared to the 2021-2022 period, which is a positive development. This signifies an enhancement in the system's reliability, indicating that the duration for which a device can operate smoothly has doubled, showcasing the effectiveness of maintenance and repair strategies based on RCM for clear water pumps. To be more specific, a higher MTBF indicator indicates an extension in the equipment's useful life due to consistent and accurate implementation of maintenance and repair plans for critical equipment, as well as highlighting the beneficial impact of monitoring techniques and status assessment methods on improving the quality of operational results.

[1] Mean Time Between Failures (MTBF)

dx.doi.org/10.22093/wwj.2024.444001.3400

آب و فاضلاب، دوره ۳۵، شماره ۱، صفحه: ۱۰۲-۸۶

بررسی تأثیر نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان بر پمپ‌های تصفیه‌خانه آب (مطالعه موردی: تصفیه‌خانه بزرگ آب گیلان)

عباس اصغری[۱*]، سید محمد جعفری[۲]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
(نویسنده مسئول) ab.asghari@Mail.sbu.ac.ir
۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(دریافت ۱۴۰۲/۱۱/۲۶ پذیرش ۱۴۰۳/۲/۱۰)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
اصغری، ع. و جعفری، س. م.، ۱۴۰۳، بررسی تأثیر نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان بر پمپ‌های تصفیه‌خانه آب (مطالعه موردی: تصفیه‌خانه بزرگ آب گیلان). *آب و فاضلاب*، ۳۵(۱)، ۱۰۲-۸۶. https://doi.org/10.22093/wwj.2023.444001.3400

چکیده

با افزایش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات، همچنین تغییر انتظارات به سمت رشد کارایی و افزایش چرخه عمر تجهیزات، تشخیص احتمال شکست‌ها پیش از وقوع و کاهش زمان خرابی‌ها و توقفات، نگهداری و تعمیر و پایش تجهیزات اهمیت بیشتری دارد. نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان یکی از روش‌ها و راهبردهایی است که به‌صورت سیستماتیک، روشمند و نظام‌مند به نگهداری و تعمیرات تجهیزات، مرتبط می‌شود. از آنجایی که پمپ‌ها مرکز و محور تصفیه‌خانه‌ها هستند، بنابراین بررسی آنها می‌تواند اهمیت زیادی داشته باشد، چون خروجی صنعت آب و فاضلاب، به‌دلیل ارتباطی که با زندگی افراد دارد، بسیار مهم است. این پژوهش، به بررسی تأثیر راهبرد RCM بر پمپ‌های تصفیه‌خانه آب با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی متمرکز است. پرسش‌نامه‌هایی بر اساس اهداف و معیارها طراحی شد و وزن‌دهی داده‌ها به روش AHP انجام شد. همچنین کاربرگ‌های اطلاعات و تصمیم‌گیری RCM برای پمپ‌ها طراحی و تکمیل شد. در مجموع، شاخص MTBF پمپ‌های آب صاف در دو بازه زمانی (از خرداد ۱۴۰۰ تا خرداد ۱۴۰۱ و خرداد ۱۴۰۱ تا خرداد ۱۴۰۲) بررسی شد. تحلیل داده‌ها نشان داد که مقدار این شاخص در بازه زمانی دوم نسبت به بازه زمانی اول، بیشتر شده است که این افزایش، حاکی از تأثیر مثبت فعالیت‌های مربوط به نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان است.

واژه‌های کلیدی: نت، نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان، پمپ تصفیه‌خانه آب، تحلیل سلسله مراتبی، شاخص MTBF

۱- مقدمه

نگهداری و تعمیرات (نت) در لغت به معنی «حفظ کردن چیزی» است. تغییرات نگهداری و تعمیرات که به عللی از جمله اهمیت بیش از پیش نگهداری و تعمیرات بر اثر افزایش قابل‌توجه تعداد و تنوع فیزیکی کارخانه‌ها، تجهیزات و ساختمان‌ها مربوط می‌شود، به تغییر انتظاراتی اعم از رشد سریع آگاهی درباره وسعت تأثیر شکست (خرابی) تجهیزات بر ایمنی و محیط‌زیست، رشد آگاهی درباره رابطه میان کیفیت محصول و نت، افزایش فشار برای رسیدن به تجهیزاتی با دسترس‌پذیری بالا و کنترل هزینه‌ها، واکنش نشان می‌دهد؛ به این ترتیب این تغییرات، روش‌ها و مهارت‌های صنعتی را به چالش می‌کشند. ازاین‌رو مدیران، متخصصان و مهندسان باید

dx.doi.org/10.22093/wwj.2024.444001.3400

خود را با روش‌های جدید تفکر و عملیات وفق دهند و به دنبال رویکردهای جدید نگهداری و تعمیرات باشند (Moubray, 1995).

یکی از این رویکردهای جدید، نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان[1] است. RCM درصدد است هدف دست‌یابی به حداکثر قابلیت اطمینان سیستم را با استفاده از روش‌های نگهداری و تعمیرات محقق کند (Campbell et al, 2016). در هر صنعتی، تجهیزات به‌خصوصی، اهمیت نگهداری و تعمیرات بیشتری دارند. پمپ، تجهیز کلیدی صنایع آب و فاضلاب است. چرخه عمر دیرینه این تجهیز، حکایت از این دارد که از اولین وسایلی بوده که بشر برای بهره‌گیری هرچه بیشتر از منابع آب آن را اختراع کرده و به تدریج انواع و اقسام آن را برای استفاده در شرایط مختلف ابداع کرده است (Nourbakhsh et al, 2018).

درحالی که وابستگی سازمانی ما به تجهیزات فیزیکی افزایش می‌یابد، هزینه‌های مالکیت و عملیات این دارایی‌ها نیز در حال رشد است. برای تضمین بیشترین نرخ بازگشت سرمایه، باید بتوان از دارایی‌های فیزیکی تا زمان موردنیاز به‌طور مؤثر استفاده کرد. افزایش روبه‌رشد هزینه‌های نگهداری و تعمیرات از یک طرف، رشد انتظارات جدید از نگهداری و تعمیرات از طرف دیگر، اهمیت تصمیم‌های مربوط به راهبرد نگهداری، تعمیر و پایش وضعیت تجهیزات را بیش از پیش نشان می‌دهد. در نتیجه به‌دلیل اهمیت دارایی‌های فیزیکی و تحقق اهداف سازمان، فرایند RCM برای تعیین آنچه باید انجام شود تا ادامهٔ فعالیت دارائی فیزیکی تضمین شود، مطرح می‌گردد. به‌عبارت دیگر، RCM فرایندی است که می‌کوشد نقص‌ها را قبل از آنکه بحرانی شوند، به‌طور پیوسته تحلیل کند و با مدیریت خرابی، مؤثرترین رویکرد نگهداری و تعمیرات را انتخاب کند (Moubray, 1995).

با توجه به اینکه امروزه صنعت پمپ و پمپاژ یکی از اولویت‌های توسعه‌ای کشورها واقع شده، هرچه اقتصاد و رفاه اجتماعی رونق می‌گیرد و سطح بهداشت، سلامتی و محیط‌زیست مورد توجه جوامع واقع می‌شود، هر قدر بهینه‌سازی انرژی در رده‌بندی اولویت‌ها افزایش می‌یابد و هر قدر آب، این مایه حیات اهمیت خود را در چرخه حیات بیشتر جلوه‌گر می‌سازد، موضوع پمپ و پمپاژ نیز سقف اهمیت خود را بر زندگی بشر گسترش بیشتری می‌دهد (Nourbakhsh et al, 2018). بنابر پیش‌گفته‌ها، این پژوهش به ارزیابی راهبرد منتج از اجرای RCM در نت و تأثیر این روش بر اهداف سازمان، شاخص‌ها و زیرشاخص‌ها و شناسایی معیارهای مؤثر با روش سلسله مراتبی می‌پردازد. RCM را شاید بتوان توانمندترین ابزار تعریف فعالیت‌های نت، تعیین فواصل انجام آنها و نحوه اجرای آنها دانست (Moubray, 1995).

ارزیابی راهبرد RCM و تأثیر آن در نگهداری، تعمیرات و پایش پمپ که قلب تصفیه‌خانه آب و فاضلاب محسوب می‌شود، با کاربرد، بومی‌سازی و نتایج حاصل از این روش بر اساس هفت پرسش اساسی آشکار می‌شود؛ یعنی ۱) کارکردها[2] و استانداردهای عملکرد مربوطه تجهیز در شرایط عملیاتی موجود چیست؟؛ ۲) به چه صورت‌هایی ممکن است تجهیز از انجام کارکردهایش باز ایستد؟؛ ۳) چه چیزی باعث وقوع هر کدام از شکست‌های (خرابی‌های) کارکردی می‌شود؟؛ ۴) در زمان رخداد هر شکست چه اتفاقاتی روی می‌دهد؟؛ ۵) هر شکست از چه نظرهایی اهمیت دارد؟؛ ۶) برای پیش‌بینی یا پیشگیری از هر شکستی چه می‌توان انجام داد؟؛ ۷) اگر نتوان فعالیت پیش اقدام[3] مناسبی پیدا کرد، چه باید کرد؟؛ این پرسش‌ها هم‌راستا با معیارها و شاخص‌های مدیریتی، نیروی انسانی و عوامل فنی ارزیابی می‌شود و در صورت تحقق اهداف و رسیدن به نتایج مثبت و مفید، به صنعت آب و فاضلاب کمک قابل توجهی می‌کند (Márquez, 2007).

این پژوهش بر روش تحلیل سلسله مراتبی[4] تمرکز دارد؛ فرایند AHP یکی از جامع‌ترین سیستم‌های طراحی شده برای تصمیم‌گیری معیارهای چندگانه است.

۲- مبانی نظری؛ RCM

موبری معتقد است که مدیر در رأس امور یک صنعت یا مجموعه، به دنبال رویکردهای جدیدی برای نگهداری و تعمیرات است (Moubray, 1995). در تکمیل نظر او، می‌توان افزود که در شرایط هر فرهنگ و کشور، نه تنها مدیر بلکه مهندس مطلع به این تغییرات نیز باید به دنبال و در جستجوی رویکردهای جدید و مفید و کاربردی برای نگهداری و تعمیرات یک سیستم باشد که با

[1] Reliability Centered Maintenance (RCM)

[2] Functions
[3] Proactive
[4] Analytical Hierarchy Process (AHP)

زیست‌بوم تناسب داشته باشد و کارایی و تأثیر یا عدم کارایی و عدم تأثیر آن در مجموعه، بررسی و نتیجه آن مشخص شود.

مدیران می‌خواهند از شروع‌های نادرست و عاقبت‌های ناموفقی جلوگیری کنند که همیشه با تحولات عظیم همراه هستند. همچنین آنها در پی چارچوب راهبردی و استراتژیکی هستند تا با کمک آن بتوانند تحولات جدید را در الگویی مشترک ترکیب کرده، به‌طور محسوس ارزیابی نموده و آنهایی را که احتمالاً بیشترین ارزش را خواهند داشت در شرکت‌هایشان به کار گیرند (Moubray, 1995). این مباحث به همان وظایف پیش گفته یک مهندس نت برمی‌گردد.

RCM روشی تلفیقی از کلیه روش‌های قبلی نگهداری و تعمیرات است که بر پایه تحلیل آماری خرابی‌ها و همچنین تجربیات فنی حاصل از سال‌ها فعالیت، به ارائه راهکاری مطلوب برای تدوین برنامه نگهداری و تعمیرات برای رسیدن به اهداف از پیش تعیین شده می‌پردازد. بر اساس دستاوردهای جدید حوزه نگهداری و تعمیرات، راهبردهای مختلفی پیشنهاد و اجرا شده، اما مهمترین تجربه حاصل این است که برای افزایش قابلیت اطمینان عملکردی سیستم، اتخاذ راهبرد نت واحد نمی‌تواند موفقیت کاملی داشته باشد. راهبرد یا فرایندی که به دنبال راهبردهای چندگانه نت است، راهبرد نت مبتنی بر RCM است (Mirmahdi, 2011).

از RCM به عنوان کامل‌ترین فرایند تحلیلی نام برده می‌شود که برنامه‌های نگهداری و توسعه دارایی‌های فیزیکی را بسط می‌دهد. این روش، هر حالت شکست منطقی را شناسایی می‌کند. معیارهایی برای پیش‌بینی یا جلوگیری از هر شکست در دو گروه قابل ارائه است: گروه اول مربوط به موضوع کلی انتخاب سیاست‌های مدیریت شکست است. گروه دوم معیارها مربوط به وظایف و فواصل برنامه‌ریزی شده شامل وظایف پیشگیرانه و همچنین یک اقدام پیش‌فرض (وظایف یافتن شکست) است (Mobley et al, 2008).

تعریف جامعی که بتوان در مورد قابلیت اطمینان ارائه داد عبارت است از «احتمال اینکه یک سیستم یا محصول مأموریت خود را به‌صورت رضایت‌بخشی انجام دهد» و یا به بیان دقیق‌تر، «احتمال اینکه آن سیستم یا محصول مأموریت خود را به‌صورت رضایت‌بخشی برای یک دوره زمانی مشخص و در شرایط کاری معینی انجام دهد». تابع قابلیت اطمینان با R(t) نمایش داده می‌شود. تابع توزیع عدم شکست یا تابع قابلیت اطمینان، مکمل تابع توزیع شکست است (Tavakoli Moghadam et al, 2011).

برای اندازه‌گیری اثربخشی یک برنامه RCM شاخص‌های مدیریتی وجود دارد. بنابراین روش‌های استفاده از معیارها، بخش جدایی‌ناپذیر از روند اجرای RCM است. باید معیارهایی برای اندازه‌گیری و ارزیابی میزان دستیابی به یکپارچگی / اتحاد نگهداری و تعمیرات، بهینه‌سازی نگهداری، افزایش حداکثری کارایی و بهره‌وری و کنترل هزینه چرخه عمر وجود داشته باشد. موارد فوق برای تبیین و توصیف اثربخشی اجرای RCM به یک روش نیاز دارند. معیارها، کلید اندازه‌گیری، مدیریت و محک همه مراحل فرایند اجرای RCM هستند. اغلب AHP در اولویت‌بندی و بررسی استراتژی مناسب نگهداری و تعمیرات در پژوهش‌ها به‌کار گرفته می‌شود (Asghari and Jafari, 2022). به‌دلیل اهمیت دارایی‌های فیزیکی و تحقق اهداف سازمان، فرایند RCM برای تعیین آنچه باید انجام شود تا ادامه فعالیت دارایی فیزیکی تضمین شود، مطرح می‌گردد.

این پژوهش بر اولویت‌بندی رویکرد سلسله مراتبی در برنامه‌ریزی و بر راهبردهای RCM در تصمیم‌گیری و اجرا در تصفیه‌خانه موردی گیلان متمرکز بود که از نظرات صاحب‌نظران و متخصصان مجموعه بهره گرفت تا نظرات و معیارها در RCM در یک مجموعه آگاهی حاصل شود. سپس داده‌ها با وزن‌دهی بررسی شد تا سلسله مراتب معیارها و اهداف شناسایی شود و به کمک روش RCM، تأثیر معیارها و یا عدم تأثیر آنها در اتخاذ روش‌های مناسب و بهینه نگهداری و تعمیرات بررسی شود.

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- موقعیت مکانی

مطالعه موردی این پژوهش بر روی تصفیه‌خانه بزرگ آب گیلان بود. این تصفیه‌خانه در فاصله حدود ۲۵ کیلومتری جنوب شرقی شهر رشت و در مجاورت کانال سنگر قرار گرفته است که وظیفه تأمین آب آشامیدنی ۷۰ درصد از جمعیت تحت پوشش شهرها و روستاهای مناطق مرکزی، شرق و غرب گیلان (رشت، انزلی، خمام، لاهیجان، سیاهکل، لنگرود، آستانه اشرفیه، کوچصفهان، لشت نشاء خشکبیجار، زیباکنار و روستاهای مسیر خط انتقال) را به عهده دارد.

dx.doi.org/10.22093/wwj.2024.444001.3400

۳-۲- بررسی و انتخاب پمپ با روش AHP

فرایند AHP یکی از قدرتمندترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است. این روش از زمان ابداع در اواخر دهه ۱۹۷۰، مبنای تحقیقات بسیاری واقع شده است. در مدل‌های تصمیم چندشاخصه، هدف، انتخاب بهترین گزینه یا راهکار از بین راهکارهای متعدد با استفاده از چندین معیار است (Zanjirchi, 2011).

این روش امکان فرموله کردن مسئله را به‌صورت سلسله مراتبی فراهم می‌کند و همچنین امکان در نظر گرفتن معیارهای مختلف کمّی و کیفی را در بررسی مسئله مورد مطالعه میسر می‌سازد. این فرایند گزینه‌های مختلف را در تصمیم‌گیری دخالت داده و امکان تحلیل حساسیت معیارها و زیرمعیارها را دارد (Ghodsipour, 2019).

۳-۲-۱- عوامل پژوهش

در این بخش عوامل مؤثر بر انتخاب پمپ معرفی می‌شود که شامل ۴ عامل تأثیرگذار(معیار) است:

۱- معیار دبی (C1)؛ ۲- معیار هد (C2)؛ ۳- معیار هزینه انجام تعمیرات (C3)؛ ۴- معیار تعداد و زمان توقفات (C4)

این معیارها از میان چندین معیار، با توجه به انتظارات مجموعه و وضعیت تجهیزات و نیازسنجی و اهداف مدنظر، به روش طوفان فکری و بحث و بررسی به عنوان معیارهای مهم برگزیده شدند. گزینه‌های پژوهش نیز شامل ۴ پمپ است:

۱- پمپ آب صاف (A1) با مشخصات زیر:
(BB1, Type: RDL 400-540A Power: 800 KW Q: 2700 M^3/h)

۲- پمپ آب خام (A2) با مشخصات زیر:
(OH1, Type: SPYV 500-540B Power: 160 KW Q: 3380 M^3/h)

۳- پمپ شیمیایی (A3) با مشخصات زیر:
(Mohno-Pump, Type: NU 40 B Power: 1.2 KW Q: 1.6 - 8 M^3/h)

۴- پمپ سایت واتر (A4) با مشخصات زیر:
(OH1, Type: ETANORM 125-400 Power: 45 KW Q: 150 M^3/h)

موارد پیش گفته در شکل ۱ قابل ملاحظه است.

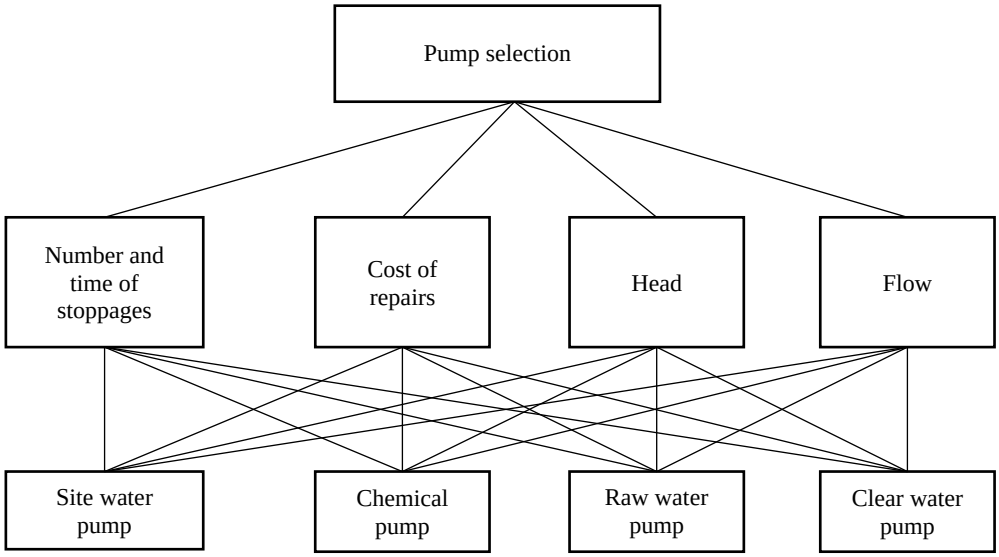

Fig. 1. Hierarchical model of research

شکل ۱- مدل سلسله مراتبی پژوهش

۳-۲-۲- نتایج روش AHP

برای تعیین اهمیت و وزن عوامل این پژوهش، از روش AHP استفاده شد. ابتدا بر اساس شکل ۱ مقایسات زوجی معیارها و زیرمعیارها ایجاد شد و در اختیار خبرگان قرار گرفت. تعداد خبرگان در این قسمت ۵ نفر بود. بعد از تکمیل ماتریس‌های مقایسات زوجی، نرخ ناسازگاری هر کدام محاسبه شد که همگی کمتر از ۰/۱ بود که نشان‌دهنده ثبات و سازگار بودن ماتریس‌ها بود. سپس مقایسات زوجی خبرگان، توسط روش میانگین هندسی ادغام شدند و برای تعیین وزن، وارد نرم‌افزار Expert Choice شد. در ادامه نتایج مقایسات زوجی و اوزان آمده است.

۳-۲-۲-۱- مقایسه زوجی معیارهای اصلی

در این بخش مقایسات زوجی ۴ معیار اصلی در جدول ۱ آورده شده است. نرخ ناسازگاری این مقایسه زوجی برابر با ۰/۰۵ بوده و چون کمتر از ۰/۱ بود، نشان‌دهنده سازگاری قابل‌قبول است.

مقایسات زوجی جدول ۱، در نرم‌افزار Expert Choice وارد شد تا اوزان معیارها محاسبه شود؛ این اوزان در شکل ۲ آمده است.

جدول ۱- مقایسات زوجی معیارهای اصلی

Table 1. Pairwise comparisons of the main criteria

	C1	C2	C3	C4
C1		2.93	4.561	5.441
C2			2.362	1.985
C3				0.32
C4				

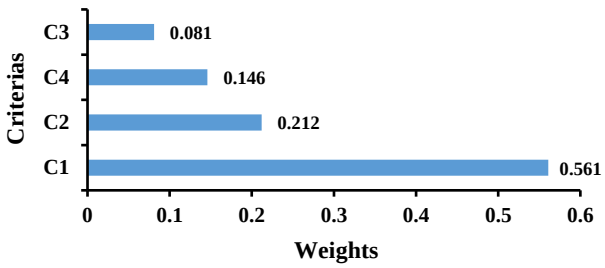

Fig. 2. The weights of the main criteria

شکل ۲- اوزان معیارهای اصلی

با توجه به شکل ۲، معیار دبی (C1) با وزن ۰/۵۶۱ رتبه اول را کسب کرد. معیار هد (C2) با وزن ۰/۲۱۲ رتبه دوم و معیار تعداد و زمان توقفات (C4) با وزن ۰/۱۴۶ رتبه سوم را کسب کرد. همچنین معیار هزینه انجام تعمیرات (C3) با وزن ۰/۰۸۱ رتبه چهارم را کسب کرد.

۳-۲-۲-۲- مقایسه زوجی گزینه‌ها نسبت به معیار دبی (C1)

در جدول ۲، مقایسه زوجی گزینه‌ها نسبت به معیار دبی (C1) آورده شده است. نرخ ناسازگاری این مقایسه زوجی برابر با ۰/۰۳ بود. مقایسات زوجی جدول ۲، در نرم‌افزار Expert Choice وارد شد تا اوزان معیارها محاسبه شود؛ این اوزان در شکل ۳ آمده است.

با توجه به شکل ۳، پمپ آب صاف (A1) با وزن ۰/۵۶۸ رتبه اول را کسب کرد. پمپ آب خام (A2) با وزن ۰/۲۱۴ رتبه دوم، پمپ شیمیایی (A3) با وزن ۰/۱۱۵ رتبه سوم و پمپ سایت واتر (A4) با وزن ۰/۱۰۲ رتبه چهارم را کسب کرد.

جدول ۲- مقایسات زوجی گزینه‌ها نسبت به معیار دبی (C1)

Table 2. Pairwise comparisons of the alternatives compared to the flow criteria (C1)

	A1	A2	A3	A4
A1		3.104	5.165	4.745
A2			2.555	1.774
A3				1.563
A4				

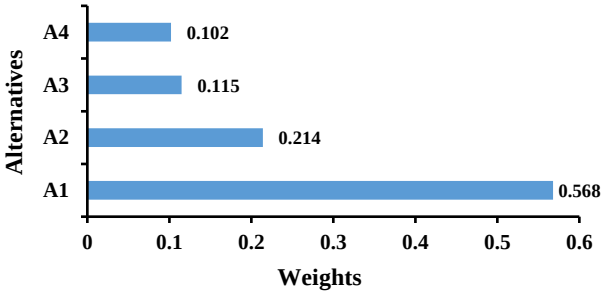

Fig. 3. The weights of the alternatives compared to the flow criteria (C1)

شکل ۳- اوزان گزینه‌ها نسبت به معیار دبی (C1)

dx.doi.org/10.22093/wwj.2024.444001.3400

۳-۲-۲-۳- مقایسه زوجی گزینه‌ها نسبت به معیار هد (C2)

در جدول ۳، مقایسه زوجی گزینه‌ها نسبت به معیار هـد (C2) آمـده است. نرخ ناسازگاری این مقایسه زوجی برابر با ۰/۰۳ بود.

مقایسات زوجی جـدول ۳، در نرم‌افـزار Expert Choice وارد شد تا اوزان معیارها محاسبه شود؛ این اوزان در شکل ۴ آورده شـده است.

با توجه به شکل ۴، پمپ آب صاف (A1) با وزن ۰/۵۱۸ رتبـه اول را کسب کرد. پمپ آب خـام (A2) بـا وزن ۰/۲۴۱ رتبـه دوم، پمپ شیمیایی (A3) با وزن ۰/۱۳۸ رتبه سوم و پمپ سـایت واتـر (A4) با وزن ۰/۱۰۴ رتبه چهارم را کسب کرد.

۳-۲-۲-۴- مقایسه زوجی گزینه‌ها نسبت بـه معیـار هزینـه انجـام تعمیرات (C3)

در جدول ۴، مقایسه زوجی گزینه‌ها نسـبت بـه معیـار هزینـه انجـام تعمیرات (C3) آمده است. نرخ ناسازگاری این مقایسه زوجی برابر با ۰/۰۲ بود.

مقایسات زوجی جـدول ۴، در نرم‌افـزار Expert Choice وارد شد تا اوزان معیارها محاسبه شود؛ این اوزان در شکل ۵ آورده شـده است.

با توجه به شکل ۵، پمپ آب صاف (A1) با وزن ۰/۶۶۱ رتبـه اول را کسب کرد. پمپ آب خـام (A2) بـا وزن ۰/۱۵۲ رتبـه دوم، پمپ شیمیایی (A3) با وزن ۰/۱۰۴ رتبه سوم و پمپ سـایت واتـر (A4) با وزن ۰/۰۸۳ رتبه چهارم را کسب کرد.

۳-۲-۲-۵- مقایسه زوجی گزینه‌ها نسبت به معیـار تعـداد و زمـان توقفات (C4)

در جدول ۵، مقایسه زوجی گزینه‌ها نسبت به معیـار تعـداد و زمـان توقفات (C4) آمده است. نرخ ناسازگاری این مقایسه زوجـی برابـر با ۰/۰۰۵ بود.

مقایسات زوجی جـدول ۵، در نرم‌افـزار Expert Choice وارد شد تا اوزان معیارها محاسبه شود؛ این اوزان در شکل ۶ آورده شـده است.

جدول ۳- مقایسات زوجی گزینه‌ها نسبت به معیار هد (C2)

Table 3. Pairwise comparisons of the options compared to the head criteria (C2)

	A1	A2	A3	A4
A1		3.519	2.745	4.125
A2			0.375	0.573
A3				2.012
A4				

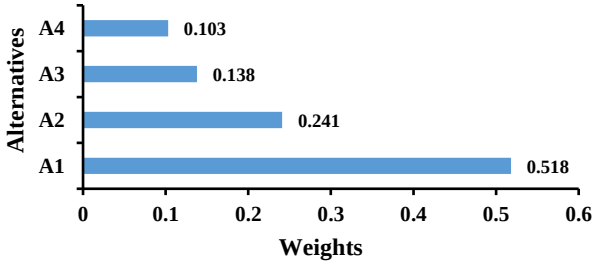

Fig. 4. The weights of the alternatives compared to the head criteria (C2)

شکل ۴- اوزان گزینه‌ها نسبت به معیار هد (C2)

جدول ۴- مقایسات زوجی گزینه‌ها نسبت به معیار هزینه انجام تعمیرات (C3)

Table 4. Pairwise comparisons of the options compared to the repair cost criteria (C3)

	A1	A2	A3	A4
A1		5	7.237	6.125
A2			1.252	2.450
A3				1.252
A4				

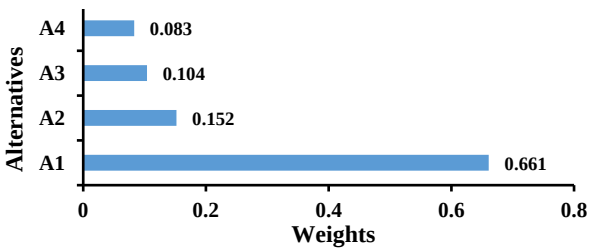

Fig. 5. The weights of the alternatives compared to the cost of repairs criteria (C3)

شکل ۵- اوزان گزینه‌ها نسبت به معیار هزینه انجام تعمیرات (C3)

جدول ۵- مقایسات زوجی گزینه‌ها نسبت به معیار تعداد و زمان توقفات (C4)

Table 5. Pairwise comparisons of the options compared to the number and time of stoppages (C4)

	A1	A2	A3	A4
A1		2.178	3.225	3.471
A2			2.045	1.985
A3				1.252
A4				

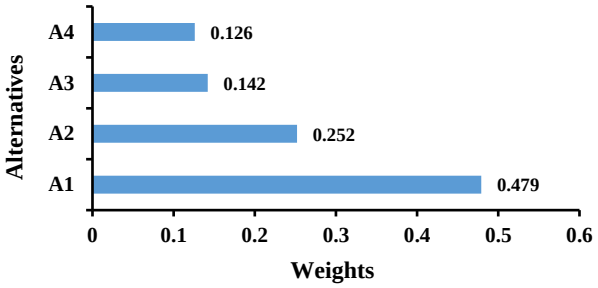

Fig. 6. The weights of the alternatives compared to the number and time of stoppages criteria (C4)

شکل ۶- اوزان گزینه‌ها نسبت به معیار تعداد و زمان توقفات (C4)

با توجه به شکل ۶، پمپ آب صاف (A1) با وزن ۰/۴۷۹ رتبه اول را کسب کرد. پمپ آب خام (A2) با وزن ۰/۲۵۲ رتبه دوم، پمپ شیمیایی (A3) با وزن ۰/۱۴۲ رتبه سوم و پمپ سایت واتر (A4) با وزن ۰/۱۲۶ رتبه چهارم را کسب کرد.

۳-۲-۲-۶- وزن نهایی گزینه‌ها

وزن نهایی گزینه‌ها از ضرب وزن معیارها در وزن نسبی گزینه‌ها حاصل شد. این فرایند توسط نرم افزار Expert Choice انجام شد که در شکل ۷ آورده شده است. بر این اساس پمپ آب صاف (A1) با وزن ۰/۵۵۲ رتبه اول را کسب کرد. پمپ آب خام (A2) با وزن ۰/۱۹۱ رتبه دوم، پمپ شیمیایی (A3) با وزن ۰/۱۴۵ رتبه سوم و پمپ سایت واتر (A4) با وزن ۰/۱۱۲ رتبه چهارم را کسب کرد. بنابراین مشخص شد که پمپ آب صاف، اهمیت بیشتری در مجموعه تصفیه‌خانه بزرگ آب گیلان دارد.

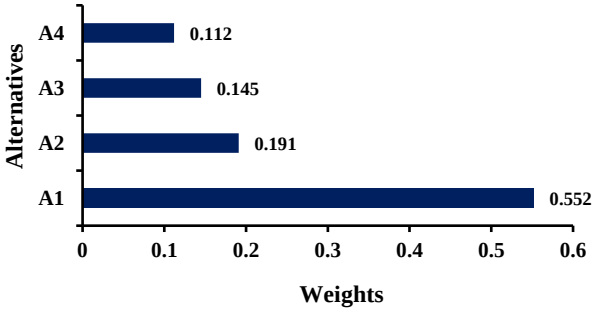

Fig. 7. The final weights of the alternatives

شکل ۷- وزن نهایی گزینه‌ها

۴- نتایج و بحث

۴-۱- پُر کردن کاربرگ اطلاعات و تصمیم‌گیری RCM

کاربرگ اطلاعات RCM به عنوان یک سند مهم برای ورود به اجرای فرایند RCM است. در این کاربرگ اطلاعات مهمی که جمع‌آوری می‌شود، درج شده و مبنای کاربرگ تصمیم‌گیری است. برای تدوین کاربرگ اطلاعات RCM برای پمپ‌های تصفیه‌خانه، جدولی که توسط جان موبرای و شرکت آلادون تهیه شده است، استفاده شد. این جدول چهار ستون اصلی دارد:

الف: در ستون اول این کاربرگ، ابتدا اطلاعات مربوط به کارکردهای ماشین وارد می‌شود. اولین گام در فرایند RCM تعریف کارکردهای هر تجهیز در شرایط عملیاتی‌شان، به‌علاوه استانداردهای عملکرد موردنظر است (آنچه کاربران ممکن است از تجهیزات انتظار داشته باشند).

ب: در ستون دوم، شکست‌های کارکردی درج می‌شود. تا زمانی که توانایی تجهیز بیشتر از استاندارد مطلوب عملکرد باشد، رضایت کاربر حاصل می‌شود. از طرفی اگر به هر دلیلی تجهیز قادر به انجام خواسته کاربر نباشد، دارای خرابی و در وضعیت شکست در نظر گرفته خواهد شد. به این ترتیب یک تعریف اساسی برای شکست این است که شکست، عدم توانایی تجهیز در انجام خواسته کاربرانش است. یا به عبارتی دیگر، عدم توانایی تجهیز در انجام کارکرد در سطح استاندارد عملکرد مورد قبول کاربر است.

ج: در ستون سوم، حالت شکست و به‌عبارتی علت‌های شکست بیان می‌شود که باز هم می‌تواند به ازای هر شکست کارکردی یک یا چند حالت شکست وجود داشته باشد.

dx.doi.org/10.22093/wwj.2024.444001.3400

پس از اینکه هر کدام از شکست‌های کارکردی شناسایی شدند، فعالیت بعدی تلاش برای شناسایی تمامی پیشامدهایی است که به‌طور معقولانه‌ای ممکن است باعث وقوع هر کدام از وضعیت‌های شکست (خرابی) شوند. از این پیشامدها می‌توان به حالات شکست تعبیر کرد. بنابراین تعریف حالت شکست عبارت است از هر پیشامدی که باعث یک شکست کارکردی شود.

د: در ستون آخر کاربرگ اطلاعات، اثرات شکست آورده می‌شود که بیانگر اتفاقاتی است که در زمان بروز شکست رخ می‌دهد. بررسی دقیق ممکن است منتهی به حالت‌های شکست احتمالی شود. این شکست‌ها هر کدام به روشی بر سازمان تأثیرگذار است و در هر مورد نوع تأثیرات نیز ممکن است متفاوت باشد؛ مثلاً ممکن است بر روی عملیات، کیفیت محصول، خدمات به مشتریان، ایمنی یا محیط‌زیست تأثیر بگذارند. این پیامدها، بیشترین نقش را در تعیین مقدار تلاش لازم برای جلوگیری از وقوع هر کدام از شکست‌ها دارند.

ستون‌های کارکرد، شکست کارکردی و حالت شکست به‌عنوان رابطی برای برقراری ارتباط میان کاربرگ اطلاعات و کاربرگ تصمیم‌گیری ایفای نقش می‌کنند.

در این کاربرگ ابتدا اطلاعات مربوط به کارکردهای تجهیز وارد و در ستون بعدی، شکست‌های کارکردی درج می‌شود. ممکن است برای هر شرح کارکرد، یک یا چند شرح شکست کارکردی اختصاص یابد. در ستون سوم، حالت شکست یا به عبارتی علت‌های شکست بیان می‌شود که باز هم می‌تواند به ازای هر شکست کارکردی، یک یا چند حالت شکست وجود داشته باشد. در ستون آخر کاربرگ اطلاعات، اثرات شکست آورده می‌شود که بیانگر اتفاقاتی است که در زمان بروز شکست رخ می‌دهد. ستون‌های کارکرد، شکست کارکردی و حالت شکست به‌عنوان رابطی برای برقراری ارتباط میان کاربرگ اطلاعات و کاربرگ تصمیم‌گیری ایفای نقش می‌کنند (Moubray, 1995).

کاربرگ اطلاعات پمپ آب صاف مربوط به این پژوهش، در جدول ۶ قابل ملاحظه است.

کاربرگ تصمیم‌گیری RCM سند دوم مورد استفاده در RCM بعد از کاربرگ اطلاعات و برای خلاصه کردن همه فرایند تصمیم‌گیری است. از طریق تکمیل کاربرگ تصمیم‌گیری RCM عملاً به سه پرسش آخر فرایند RCM پاسخ داده می‌شود. این پرسش‌ها عبارت‌اند از: ۱- هر شکست از چه نظرهایی اهمیت دارد؟؛ ۲- برای پیش‌بینی یا پیشگیری از هر شکستی چه می‌توان انجام داد؟؛ ۳- اگر نتوان فعالیت پیش‌اقدام مناسبی پیدا کرد، چه باید کرد؟

در کاربرگ تصمیم‌گیری ستون‌های دارای عناوین F، FF و FM مشخص‌کننده حالات شکست مورد بررسی هستند. (F مخفف Functional)، (FF مخفف Functional Failure)، (FM مخفف Failure Mode) است. از این ستون‌ها برای برقراری ارتباط میان کاربرگ‌های اطلاعات و تصمیم‌گیری استفاده می‌شود. عناوین ستون‌های بعدی، مربوط به سوال‌های نمودار تصمیم‌گیری RCM می‌شوند که به شرح زیر هستند:

الف: ستون‌هایی که عناوین H، S، E، O و N دارند برای ثبت پاسخ به سوال‌های مربوط به پیامدهای هر حالت شکست به کار می‌روند:

H: آیا از دست رفتن کارکرد به واسطه این حالت شکست در شرایط عادی خود به خود برای پرسنل عملیات آشکار می‌شود؟ (Yes یا No)

S: آیا این حالت شکست ممکن است باعث از دست رفتن کارکرد یا آسیب دیگری شود که بتواند کسی را کشته یا زخمی کند؟ (Yes یا No)

E: آیا این حالت شکست ممکن است باعث از دست رفتن کارکرد یا آسیب دیگری شود که بتواند یک قانون یا یک استاندارد محیط زیست را نقض کند؟ (Yes یا No)

O: آیا این حالت شکست تاثیر مستقیم نامطلوبی بر توانایی عملیاتی دارد؟ (Yes یا No)

ب: در سه ستون بعدی (با عناوین H1، H2 و H3) پاسخ به این سوال ثبت می‌شود که آیا فعالیت پیش اقدامی انتخاب شده است یا خیر؟ و اگر ثبت شده از چه نوعی است؟

۱- ستون H1 /S1 /O1 /N1 برای ثبت این است که آیا فعالیت اقتضایی مناسبی برای پیش‌بینی به موقع شکست، و کاهش یا حذف پیامدهای مربوطه یافت شده است یا نه؟

۲- ستون H2 /S2 /O2 /N2 برای ثبت فعالیت‌های مناسب زمان‌بندی شده بازسازی (تعمیر زمان‌بندی شده) برای جلوگیری از شکست است.

۳- ستون H3 /S3 /O3 /N3 نیز برای ثبت فعالیت‌های مناسب

جدول ۶- کاربرگ اطلاعات پمپ آب صاف

Table 6. Clear water pump information worksheet

Information worksheet RCM	**System: Clear Water Pump (BB1 , Type: RDL 400-540A Power: 800 KW Q: 2700 M³/h)**			
	Subsystem:			
Function	**Functional failure (loss of function)**		**Failure mode (cause of failure)**	**Failure effects (What happens when it fails)**
Transporting clear and purified water to the main urban plumbing system	A	Loss of pump flow	1 Propeller stuck and pump shaft not rotating.	Part of the strainer went into the pump casing and caused the propeller to get stuck and the pump is unable to continue pumping.
			1 Corrosion of the propeller spring due to the effect of chemicals in water (chlorine-ferric)	Reducing the amount of water flow
			2 Propeller corrosion due to cavitation	Creating vibration and noise in the pump
			3 Wear of the pump impeller	Wear of the pump impeller due to high operation (higher than the life of the impeller), which causes noise in the pump and drop-in flow rate.
	B	Flow reduction	4 Corrosion of wearing rings	Flow reduction, abnormal sound inside the casing and sometimes vibration of the casing
			5 The metal mesh of the pump housing is dirty	Stuck on small foreign objects such as pieces of wood, and even pieces of the filter

جدول ۷-کاربرگ تصمیم گیری پمپ آب صاف

Table 7. Clear water pump decision worksheet

Sheet	**Date**	**Facilitator:**	**System number:**	**System: Clear water pump**										**Decision worksheet RCM II © 1996 ALADON LTD**		
of	**Date**	**Auditor:**	**Subsystem number:**	**Subsystem:**												
Can be done by	**Initial interval**	**Proposed task**	**Default action**			**H3 S3 O3 N3**	**H2 S2 O2 N2**	**H1 S1 O1 N1**	**Consequence evaluation**				**Information reference**		
			S4	**H5**	**H4**				**O**	**E**	**S**	**H**	**FM**	**FF**	**F**
Mechanic technician – Purchasing Manager	Yearly	Dismantling the pump shell and pulling out part of the separated strainer inside the impeller and casing. Use of high-quality mesh against water pressure and corrosion.					Y	N				N	1	A	1
Mechanic technician	Yearly	Dismantling the pump shell and viewing the pump parts and replacing the impeller				Y	N	N				N	1	B	2
Mechanic technician – Purchasing Manager	Every 6 months	Measure the amount of vibration with a vibrometer. According to the experience of the personnel, the type of sound should be recognized. Ceramic coating can be used for the propeller.						Y	Y	N	N	Y	2	B	3
Mechanic technician	Yearly	Dismantling the pump shell and viewing the pump parts and replacing the impeller				Y	N	N				N	3	B	4
Mechanic technician	Every 6 months	With a vibrometer, the amount of vibration of the casing chamber is measured and if it is higher than the permissible limit, the pump shell is opened and the wear rings are replaced.						Y				N	4	B	5
Mechanic technician	Yearly	Dismantling the pump shell and cleaning the interior and removing foreign objects such as pieces of wood, plastic, etc. Installing a strainer with smaller springs.					Y	N				N	5	B	6

زمان‌بندی شده از رده خارج کردن (تعویض زمان‌بندی شده) برای جلوگیری از شکست است.

قابل توجه است که هر کدام از موارد انجام فعالیت، هنگامی مناسب است که از نظر فنی امکان‌پذیر و مقرون‌به‌صرفه باشد.

ج: اگر نیاز به پاسخ دادن به سوال‌های مربوط به اقدامات پیش‌فرض به وجود آمده باشد، از ستون‌های H4 و H5 یا S4 برای ثبت این پاسخ‌ها استفاده می‌شود. این ستون‌ها در کاربرگ برای ثبت پاسخ‌های سه سوال پیش‌فرض استفاده می‌شوند. توجه شود که سوال‌های پیش‌فرض صرفاً زمانی پرسیده می‌شوند که پاسخ به هر سه سوال قبلی خیر بوده باشد.

د: سه ستون آخر برای ثبت فعالیت انتخاب شده (اگر فعالیتی انتخاب شده باشد)، فرکانس انجام فعالیت و فردی که مسئول انجام آن است به کار می‌روند (Moubray, 1995).

کاربرگ تصمیم‌گیری پمپ آب صاف مربوط به این پژوهش، در جدول ۷ قابل ملاحظه است.

۴-۲- جمع‌بندی و ارزیابی نهایی با شاخص‌های ارزیابی

محاسبه شاخص متوسط زمان سالم کار کردن دستگاه[1] پمپ‌های آب صاف در فاصله سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۱ و ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۲:

از جمله شاخص‌های اصلی ارزیابی در نت مبتنی بر قابلیت اطمینان، استفاده از شاخص MTBF است. این شاخص متوسط بازه زمانی بین دو خرابی تجهیز را محاسبه می‌کند.

به‌عبارت دیگر، معیاری برای اندازه‌گیری قابلیت اطمینان است؛ اینکه یک تجهیز به طور معمول چه مدت کار می‌کند تا به نقطه خرابی برسد. این شاخص کمک می‌کند تا بدون اتکا به مشاهدات ذهنی، تصمیم‌هایی داده‌محور در مورد زمان‌بندی نگهداری و تعمیرات، ایمنی، مدیریت موجودی و طراحی تجهیزات گرفته شود. این شاخص نشان می‌دهد به‌طور متوسط دستگاه چند ساعت می‌تواند سالم (Up Time) کار کند (بدون خرابی). MTBF شاخصی مثبت است، به‌عبارتی دقیق‌تر در نت، افزایش این زمان یا شاخص بسیار اهمیت دارد. شاخص MTBF را شاخص قابلیت اطمینان "Reliability" نیز می‌نامند.

در این پژوهش، این شاخص مهم در فاصله سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۱ و ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۲ (به‌طور دقیق: از اول خرداد ۱۴۰۰ تا اول خرداد ۱۴۰۱ و از اول خرداد ۱۴۰۱ تا اول خرداد ۱۴۰۲) بررسی شد. ابتدا ساعت کارکرد پمپ‌ها از واحد نگهداری و تعمیرات مجموعه تصفیه‌خانه اخذ شد. اطلاعات مربوط به ساعت کارکرد پمپ‌های آب صاف در شکل ۸ و جدول ۸ تنظیم شده است.

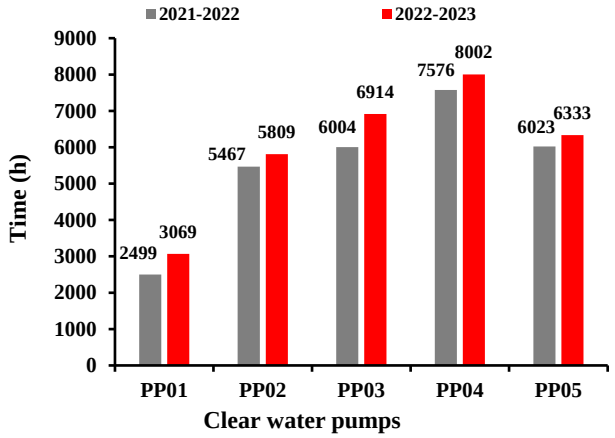

Fig. 8. Working hours of clear water pumps

شکل ۸- ساعت کارکرد پمپ‌های آب صاف

جدول ۸- ساعت کارکرد پمپ‌های آب صاف تصفیه‌خانه بزرگ آب گیلان در دو بازه زمانی

Table 8. Operating hours of clear water pumps in Guilan's large water treatment plant in two time periods

Pumps \ Operating hours	Operating hours (2021-2022)	Operating hours (2022-2023)
Clear water pump 1 (CW1-PP01)	2499	3069
Clear water pump 2 (CW1-PP02)	5467	5809
Clear water pump 3 (CW1-PP03)	6004	6914
Clear water pump 4 (CW1-PP04)	7576	8002
Clear water pump 5 (CW1-PP05)	6023	6333

تعداد توقفات پمپ‌های آب صاف تصفیه‌خانه در بازه زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۱ و ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۲ به شرح جدول ۹ است. همان طور که در جدول ۹ و شکل ۹ قابل مشاهده است، داده‌ها نشان می‌دهد که تعداد توقفات پمپ‌های آب صاف در بازه زمانی ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۲ نسبت به ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۱ سیر نزولی و کاهشی داشته و تعداد توقفات کنترل شده است.

[1] Mean Time Between Failures (MTBF)

جدول ۹- تعداد توقفات در دو بازه زمانی

Table 9. The number of stoppages in two time periods

Number of stoppages / Pumps	Number of stoppages (2021-2022)	Number of stoppages (2022-2023)
Clear water pump 1 (CW1-PP01)	1	0
Clear water pump 2 (CW1-PP02)	4	1
Clear water pump 3 (CW1-PP03)	4	4
Clear water pump 4 (CW1-PP04)	4	2
Clear water pump 5 (CW1-PP05)	3	2

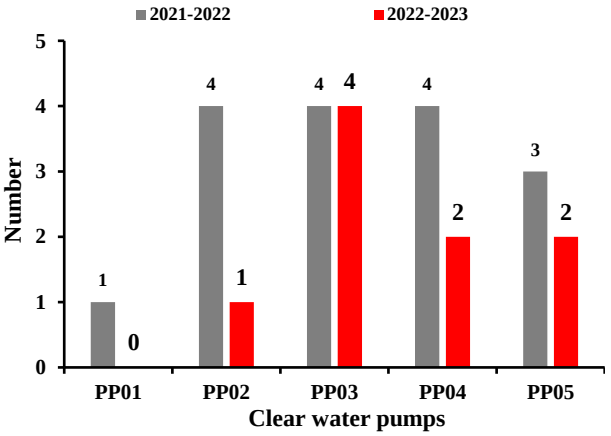

Fig. 9. The number of stoppages of clear water pumps

شکل ۹- تعداد توقفات پمپ‌های آب صاف

بر اساس معادله MTBF که در زیر آمده (Khasanah et al, 2015) این شاخص درخصوص پمپ‌های آب صاف محاسبه شد

$$MTBF = \frac{\text{Total Operating Time}}{\text{Number Of Breakdowns}} \quad (۱)$$

MTBF = 27569 / 16 = 1723.1 ساعت

(بازه زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۱)

MTBF = 30127 / 9 = 3347.4 ساعت

(بازه زمانی ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۲)

مقایسه شاخص MTBF در بازه‌های زمانی یاد شده در شکل ۱۰ مشخص می‌کند که مقدار این شاخص در بازه زمانی ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۲ نسبت به بازه زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۱ حدود ۲ برابر شده و این افزایش، نشانهٔ خوبی است؛ به عبارت دیگر در بازه زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۱ که فاصله بین دو خرابی برابر با ۱۷۲۳ ساعت بود، در بازه زمانی ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۲ به ۳۳۴۷ ساعت رسید. این موضوع نشان داد قابلیت اطمینان سیستم افزایش یافته است؛ یعنی مدت‌زمانی که دستگاه می‌تواند به‌طور سالم کار کند، حدود ۲ برابر شده و حاکی از این است که انجام RCM بر روی پمپ‌های آب صاف، در مجموع کارکرد مطلوب داشته است.

این شاخص، میزان قابلیت اطمینان به یک دارایی را مشخص می‌کند که به‌طور میانگین چه مدت‌زمان می‌تواند سالم کار کند. همچنین این شاخص به صنایع کمک می‌کند تا از کارآمدی و سالم بودن تجهیزات خود مطلع شوند که با مشکلات عملیاتی مواجه هستند یا خیر. به کمک معادله MTBF میانگین زمان بین یک خرابی تا خرابی دیگر تعیین می‌شود. این اطلاعات، به تیم‌ها کمک می‌کند تا در تصمیم‌گیری درباره فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات و برنامه‌ریزی برای آن گام‌های مؤثرتری بردارند. برای آنکه با فعالیت‌های برنامه‌ریزی شده در شاخص MTBF نتایج خوبی حاصل شود، باید این شاخص برای هر تجهیز یا دارایی به طور جداگانه بررسی شود. طی بررسی و داده‌های دریافتی، می‌توان برای فعالیت‌هایی از قبیل نگهداری و تعمیرات، افزایش عمر مفید دستگاه‌ها و به حداقل رساندن دفعات خاموش شدن آنها، برنامه‌ریزی کارآمدتری داشت.

از مزایای RCM افزایش عمر عملیاتی تجهیزات و کاهش تعویض است. موفقیت RCM به تجزیه‌وتحلیل داده‌های جمع‌آوری شده در مورد وضعیت و خرابی تجهیزات بستگی دارد. عملیات نگهداری و تعمیرات نمی‌تواند تصادفی یا بداهه باشد، بنابراین RCM به کمک فرایند AHP بر اساس داده‌های به‌دست آمده از مهندسان و تکنسین‌های شاغل در بخش نگهداری و تعمیرات و مباحث علمی و نظری، به شیوه‌ای علمی تنظیم می‌شود که یکی از مهمترین مزایای این روش، تحلیل آسان آن است که با تفکر منطقی انسان همگرایی دارد. این روش مبتنی بر تصمیم‌گیری چند معیاره با به کارگیری روش‌های عملی و علمی در تصمیم‌گیری است تا با

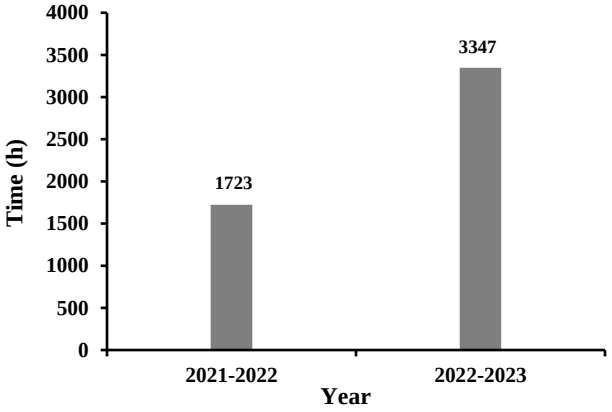

Fig. 10. MTBF in two time periods 2021-2022 and 2022-2023

شکل ۱۰- شاخص MTBF در دو بازه زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۱ و ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۲

توجه به معیارهای خاص علمی و عملی، گزینه‌های ایده‌آل از میان گروهی از گزینه‌ها انتخاب شود (Zakariya Hadi, 2022). این روش به RCM کمک می‌کند تا در برنامه‌ریزی پیش اقدام و پس از آن گام‌های مؤثر و مهم در اولویت قرار بگیرند که نوآوری پژوهش‌ها و ارتباط بین صنعت و مباحث علمی و نظری را سبب می‌شود.

با این حال قابل ذکر است که با توجه به اینکه RCM می‌تواند تغییرات گسترده‌ای در سازمان ایجاد کند، در راه شروع و سپس پیاده‌سازی RCM موانع و مشکلات متعددی وجود دارد. چند مورد از رایج‌ترین دلایلی که یک کارخانه/ شرکت از بهترین روش‌های نگهداری و تعمیرات پیروی نمی‌کند عبارت‌اند از اینکه: پرسنل نگهداری مهارت‌های لازم را ندارند؛ نیروی کار نگهداری و تعمیرات فاقد نظم و انتظام یا نظارت و خط سیر به‌منظور دنبال کردن بهترین روش‌های نگهداری و تعمیرات هستند؛ مدیریت از عواقب عدم پیروی از بهترین روش‌ها پشتیبانی نمی‌کند (Smith and Mobley, 2003). همچنین مشکلات رایجی از جمله: عدم کفایت داده‌های شکست تجهیزات؛ نتایج ضعیف تلاش‌های PM؛ عدم خرید/ تطمیع سازمانی؛ تعداد ناکافی نیروها برای برنامه؛ تمرکز کوتاه‌مدت بر تجهیزات؛ نظم سازمانی ضعیف (Wireman, 2005) وجود دارد که می‌تواند منجر به عدم موفقیت RCM شود.

۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش، به ارزیابی راهبرد منتج از اجرای RCM و تأثیر آن، با شناسایی معیارهای مؤثر از طریق روش سلسله مراتبی پرداخت. این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش انجام از نوع توصیفی و پیمایشی بود.

برای گردآوری اطلاعات، از منابع کتابخانه‌ای استناد شد و با روش میدانی از قبیل مصاحبه و پرسش‌نامه، داده‌های مربوط به گزینه‌ها و معیارها، مشخص شد. وزن‌دهی عوامل پژوهش در نرم‌افزار و تکمیل کاربرگ اطلاعات و کاربرگ تصمیم‌گیری پمپ‌های آب صاف انجام شد و همچنین فعالیت‌هایی در چارچوب RCM انجام شد.

شاخص MTBF در بازه زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۱ و ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۲ بررسی و مشخص شد که این شاخص افزایش یافته است. این شاخص، یک معیار اساسی برای قابلیت اطمینان یک سیستم است. هر چه این شاخص بیشتر باشد، قابلیت اطمینان یک تجهیز بالاتر است. به‌عبارت دقیق‌تر، هرچه شاخص MTBF بیشتر باشد، از یک طرف نشان‌دهنده افزایش عمر مفید تجهیزات به‌دلیل انجام منظم و دقیق برنامه نگهداری و تعمیرات تجهیزات استراتژیک بوده و از طرف دیگر حاکی از تأثیر مطلوب تکنیک‌ها و فنون پایش وضعیت، در ارتقای کیفیت نت اجرایی است.

۶- قدردانی

از زحمات و همراهی‌های شرکت آب و فاضلاب استان گیلان و مجموعه تصفیه‌خانه بزرگ آب گیلان که در تهیه داده‌های پژوهش همکاری کردند و همراهان دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی دانشگاه شهید بهشتی که در بررسی داده‌ها و تنظیم نتایج همگام بودند، قدرانی می‌شود.

References

Asghari, A. and Jafari, M., 2022. Research context of internal studies of pump condition monitoring with the help of reliability centered maintenance-based and AHP method. *Journal of Science and Engineering Elites*, 7(1), 65-79. (In Persian)

Campbell, J. D., Jardine, A. K. and McGlynn, J., 2016. *Asset Management Excellence. Optimizing Equipment Life-Cycle Decisions*. Second Edition, CRC Press. London, New York. [Link]

Ghodsipour, S. H., 2019. *Analytic Hierarchy Process (AHP)*. Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran. (In Persian) [Link]

Khasanah, R., Dawal, S. M. Z. and Jamasri, D., 2015. Reliability centered maintenance (RCM) evaluation method in the industry application, case study: Fertilizer Company, Indonesia. *Jurnal Teknologi Technoscientia*, 8(1), 56-60. [Link]

Márquez, A. C., 2007. *The Maintenance Management Framework. Models and Methods for Complex Systems Maintenance*. Springer Science & Business Media. Springer London. [Link]

Mirmahdi, S. V., 2011. Choosing the optimal strategy for maintenance and repairs using RCM approach (case study: implementation of maintenance and repairs using RCM approach in Saipa Diesel Company). MSc. Thesis Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran. (In Persian) [Link]

Mobley, K. R., Higgis, L. R. and Wikoff, D. J., 2008. *Maintenance Engineering Handbook*. 7th ed. McGraw-Hill Education. USA. [Link]

Moubray, J., 1995. *Reliability-centred Maintenance, Fuel and Energy Abstracts*. Industrial Press, New York. [Link]

Nourbakhsh, A., Parizi, H. B. and Payamiar, F., 2018. *Pump and Pumping*. Tehran University Pub. Tehran, Iran. (In Persian)

Smith, R. and Mobley, R. K., 2003. *Industrial Machinery Repair. Best Maintenance Practices Pocket Guide.* Butterworth-Heinemann. Elsevier Science, USA. [Link]

Tavakoli Moghadam, R., Asian, S. and Hemati, M., 2011. Appication of fuzzy multicriteria decision making method for balanced scorecard model to improve the performance of Iranian steel industries. *Iranian Journal of Trade Studies*, 61, 51-80. (In Persian). https://dorl.net/dor/20.1001.1.17350794.1390.16.61.3.6.

Wireman, T., 2005. *Developing Performance Indicators for Managing Maintenance.* Second Edition. In Wireman, T. eds. Developing Maintenance and Asset Management Strategies. Industrial Press Inc. pp. 1-36. [Link]

Zakariya Hadi, M., 2022. Critical Component Identification in Reliability Centered Maintenance of Distribution Substations Using AHP. MSc. Thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (In Persian) [Link]

Zanjirchi, S. M., 2011. *Fuzzy Analytic Hierarchy Process*. Sanei Shahmirzadi Pub., Tehran, Iran. (In Persian)

© The Author(s)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License