Investigation of Microbial, Chemical and Physicochemical Pollutants in Human Sewage Treatment Plant

Mona Afshari[1], Majid Ghahraman Afshar*[1, 2], Naser Harzandi[1]

[1]Microbilogy Department, Karaj Branch, Islamic Azad University, Alborz, Iran
[1]Chemistry and Process Research Department, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran
Corresponding author: *mghahramanafshar@nri.ac.ir*

Abstract
In this research, the water quality and the functioning mechanism of the human sewage treatment plant are evaluated at the entry, stages and outlet. In this regard, the microbial, chemical and physicochemical properties of wastewater samples are evaluated at the mentioned points. Afterwards, the relationship in between the microbial and chemical pollutants are investigated. Finally, corrective solutions are presented to improve the performance of the treatment plant by having the detailed information on the microbial, chemical and physicochemical conditions of wastewater at all the points of treatment plant. In this regard, microbial monitoring is performed using the general TBC microbial kit and specific microbial kits including APB, FP, IRB, NRB, Aero, SRB and TRB. The TBC kit is applied to measure the total number of bacteria in wastewater samples and other kits are interrogated to determine each type of bacteria. In the following step, the physicochemical and chemical parameters are monitored using reference techniques. The TBC level is 10^5 cfu/ml at the entry point of the human sewage and its level reaches to 10^3 cfu/ml at the second and third stages. Finally, the TBC value reaches to 10^2 cfu/ml in the outlet. The process of reducing TBC from the inlet to the outlet prove the ideal performance of human sewage treatment plant. The performance trend of the treatment plant is suitable for reducing other types of bacteria. In the most cases, the bacteria level is reached from high to moderate level and in some cases to low level.

Keywords: Chemical monitoring, physicochemical monitoring, microbial characteristics monitoring, human sewage treatment plant, microbial kit.

ارزیابی آلاینده‌های میکروبی، شیمیایی و فیزیکوشیمیایی تصفیه‌خانه فاضلاب انسانی

منا افشاری[۱]، مجید قهرمان افشار*[۱،۲]، ناصر هرزندی[۱]
[۱]گروه میکروبیولوژی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، البرز، ایران
[۲]گروه پژوهشی شیمی و فرآیند، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران
نویسنده مسئول: mghahramanafshar@nri.ac.ir

چکیده

در این تحقیق کیفیت آب و مکانیسم عملکرد یک واحد تصفیه‌خانه انسانی در نقاط ورودی، مراحل فرایند و خروجی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این راستا خواص میکروبی، شیمیایی و فیزیکوشیمیایی نمونه فاضلاب در نقاط ذکر شده پایش گردید. در ادامه ارتباط بین آلاینده‌های میکروبی و شیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت با داشتن مجموع شرایط میکروبی، شیمیایی و فیزیکوشیمیایی فاضلاب در نقاط ورودی، مراحل و خروجی تصفیه‌خانه، راهکارهای اصلاحی به منظور بهبود عملکرد تصفیه‌خانه نیز ارائه گردید. در این راستا پایش میکروبی با استفاده از کیت عمومی میکروبی TBC و کیتهای اختصاصی میکروبی شامل APB، FP ، IRB ، NRB، Aero ، SRB و TRB صورت گرفت. کیت TBC برای اندازه گیری کل تعداد باکتریهای موجود در نمونه‌های پساب و سایر کیتها برای اندازه گیری هر نوع باکتری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ادامه پایش پارامترهای فیزیکوشیمیای و شیمیایی با استفاده از روشهای مرجع صورت پذیرفت. در ورودی فاضلاب TBC در حدود 10^5 cfu/ml و در نقاط مربوط به خروجی مرحله دوم و سوم میزان TBC به عدد 10^3 رسیده است. در نهایت در خروجی فاضلاب مقدار کل باکتریها به 10^2 cfu/ml می‌رسد. روند کاهش TBC از ورودی تصفیه‌خانه تا خروجی نشانگر عملکرد بسیار ایده‌آل این تصفیه‌خانه می‌باشد. روند عملکرد تصفیه‌خانه بر کاهش سایر انواع باکتریها بسیار مناسب و در عمده موارد میزان باکتریها از درجه بالا به متوسط و در برخی موارد به پایین رسیده است.

کلمات کلیدی: پایش شیمیایی، پایش فیزیکوشیمیایی ، پایش مشخصه‌های میکروبی، تصفیه‌خانه انسانی، کیت میکروبی.

۱- مقدمه

فاضلاب انسانی شامل مدفوع، ادرار، دستمال توالت و سایر مایعاتی است که از دستشویی، توالت، ظرفشویی و حمام خارج می‌گردد. این نوع فاضلاب دارای سطح آلایندگی میکروبی بسیار بالایی می‌باشد. مواد موجود در فاضلاب انسانی می‌توانند به عنوان آلاینده های زیست‌محیطی عمل کرده و اثرات مخربی بر روی محیط زیست و سلامت انسان داشته باشند. این آلاینده ها می‌توانند باعث آلودگی منابع آب، مرگ و میر موجودات آبزی و انتقال بیماری‌های مختلف به انسان شوند. در بسیاری از شرکتهای بزرگ به دلیل بحران کمبود آب، تصفیه پساب امری جدی به شمار می‌آید و از این فرایند برای بازگردانی آب و کاربرد آن در اهداف درجه دوم فرایندی استفاده می‌گردد [۴-۱].

برای کنترل و حذف آلاینده‌های موجود در فاضلاب انسانی فرایندهای تصفیه گسترده‌ای وجود دارد که شامل حذف فیزیکی، تصفیه شیمیایی و تصفیه بیولوژیکی می‌شوند. در نهایت پس از تصفیه، آب مجددا به محیط زیست منتقل شود یا برای مصارف مختلف مانند آبیاری مورد استفاده قرار گیرد. تصفیه پساب عمومی شامل مراحل به شرح زیر می‌باشد [۹-۴].

۱. تصفیه مقدماتی: در این مرحله پساب جاری از منابع مختلف جمع آوری می‌گردد. در ادامه، فرایندهایی مانند رسوب‌گیری صورت می‌پذیرد تا بخشی از مواد معلق و غیر محلول از نمونه پساب حذف گردد.
۲. تصفیه ثانویه: در این مرحله پساب تصفیه شده از مراحل قبلی به فرایندهای بیولوژیکی مانند لجن فعال[۱] و فیلتراسیون انتقال می‌یابد. در اینجا مواد آلی محلول تبدیل به مواد غیرآلی می‌گردد و به صورت رسوبات سنگین جدا می‌گردد. در نهایت، پساب شفاف از بالای رآکتور سرریز و رسوبات از کف جمع‌آوری می‌گردد.
۳. تصفیه پیشرفته: در این مرحله فرایندهای شیمیایی و حذف نیتروژن و فسفر انجام می‌شود تا بهبود بخشیدن به آب و حذف آلاینده‌های باقی مانده صورت بگیرد.
۴. ضد عفونی: در مرحله آخر پساب تصفیه شده توسط زیست‌کشهای اکسنده و آلی ضدعفونی می‌گردد تا از میکروبها و ویروسها عاری شود.

از گذشته تا کنون مطالعات و مقالات بسیار گسترده ای در راستای بررسی کیفیت پساب خروجی تصفیه‌خانه‌های صنعتی و انسانی ارائه گردیده است. هدف اصلی از این زمینه تحقیقاتی بررسی همه جانبه خروجی تصفیه‌خانه‌ها و اثرگذاری شیمیایی و بیولوژیکی آنها بر محیط زیست می‌باشد. در عمده این تحقیقات، بررسی کیفیت آب خروجی تصفیه‌خانه‌ها از نقطه نظر انواع یونها و همچنین آلاینده‌های باکتریایی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است [۱۲-۱۰].

خروجی تصفیه‌خانه‌ها به منظور اصلاح الگوی مصرف برای اهداف درجه دوم نظیر کاربردهای صنعتی، کشاورزی و آبیاری مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عنوان مثال اگر هدف کاربرد پساب خروجی برای آبیاری باشد می‌بایست میزان تخم انگل در آن کمتر ۱ تخم در لیتر باشد و همچنین میزان کلی‌فرم‌های مدفوعی در آن کمتر از ۱۰۰۰ MPN/100 ml باشد. همچنین در ارتباط با مولفه های فیزیکوشیمیایی بر اساس استاندارد توصیه می‌گردد میزان pH در بازه ۸/۴-۶/۵ ، میزان هدایت از ۷۰۰ µS/cm تجاوز نکند. همچنین میزان BOD در حدود ۳۰ ppm و میزان TDS در حدود ۴۵۰ ppm باشد. بعلاوه در ارتباط با غلظت آنیونها و کاتیونها توصیه می‌گردد، غلظت سدیم در حدود ۷۰ ppm، کلرید در حدود ۱۰۰ ppm، بی‌کربنات در حدود ۱۰۰ ppm باشد. در ادامه بخشی از تحقیقات و مطالعات انجام شده در زمینه تصفیه آب و پساب با جزئیات ارائه گردیده است.

بونتا[۲] و همکارانش در یک پروژه، تاثیر آلاینده‌های میکروبی حاصل از بازیابی پساب یک تصفیه‌خانه را بر روی مخاطرات زیست محیطی و سلامت بشر بررسی نمودند. در این پروژه مزایای بازیابی پساب و معایب ناشی از باکتریهای ای کولای[۳] مورد مطالعه قرار

---

[۱] Activated sludge
[۲] Bonetta
[۳] E. coli

گرفت. بدین منظور، روش غشاء بیورآکتور[۴] برای تشخیص باکتری در نمونه‌های خروجی پساب مورد استفاده قرار گرفت. گروه کومار[۵] در سال ۲۰۲۳ از روش پاکسازی زیستی[۶] برای حذف آلاینده‌های باکتریایی از نمونه فاضلاب استفاده کردند. این روش نتایج بسیار کاربردی و مناسبی برای حذف دسته گسترده ای از باکتریهای سمی را نیز به همراه داشت. در نهایت خروجی این مقاله به عنوان یک روش جامع برای حذف آلاینده‌های میکروبی مورد استفاده قرار گرفت. در یک تحقیق کاربردی در سال ۲۰۲۲ توسط گروه ما[۷] یک بیوسنسور[۸] پیشرفته برای سنجش آلاینده‌های میکروبی طراحی گردید. این بیوسنسور بسیار حساس، پایدار و کاربردی در قیاس با سایر روشها می‌باشد. این تحقیق در دسته بزرگی از نمونه‌ها و بطور ویژه سنجش آلاینده‌های میکروبی نمونه‌های غذائی مورد استفاده قرار گرفت. از مزایای این روش می‌توان به قابل حمل بودن[۹] آن اشاره نمود [۱۶-۱۳].

در یک مطالعه کاربردی جامع، انجام آزمونهای پایش میکروبی، شیمیایی و فیزیکوشیمیایی بر روی چندین نمونه آب چرخه خنک‌کن واحدهای نیروگاهی گزارش گردیده است. در این مطالعه موردی، آب چرخه خنک کن از نقطه نظر میکروبی و فیزیکوشیمیایی مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین در تحقیق مذکور ارتباط بین پارامترهای هدایت، شوری، قلیاییت، سختی، pH، غلظت آنیونها و کاتیونها با عوامل میکروبی مورد ارزیابی قرار گرفته است. هدف از این مطالعه موردی بر روی آب چرخه خنک کن، پایش میکروبی آب چرخه و در نهایت ایجاد ارتباط عوامل میکروبی و عوامل مسبب خوردگی می‌باشد [۲۳-۱۷].

در این تحقیق با هدفی متفاوت پایش باکتریها، آزمونهای فیزیکوشیمیایی و آزمونهای شیمیایی بر روی ورودی، خروجی هر مرحله و خروجی نهایی تصفیه‌خانه انسانی در دستور کار قرار گرفته است. هدف اصلی از این تحقیق پایش همه جانبه کیفیت پساب تصفیه‌خانه از نقطه نظر میکروبی و فیزیکوشیمیایی می‌باشد. در نهایت با ارزیابی همه جانبه کیفیت ورودی، مرحله ای و خروجی نهایی واحد تصفیه‌خانه، راهکارهای اصلاحی جهت بهبود عملکرد تصفیه‌خانه ارائه می‌گردد. به منظور انجام این مطالعات به صورت ابتدایی واحد تصفیه‌خانه صنعتی بازدید و خلاصه ای از آن به شرح ذیل ارائه گردیده است (شکل ۱). بر اساس تحقیقات ابتدایی به عمل آمده این واحد تصفیه‌خانه دارای مراحل اصلی هوادهی، لجن فعال، چربی گیر و فیلتر شنی می‌باشد. همانطور که قابل پیش‌بینی است فرض ایده‌آل بر آن است که پس از انجام مراحل تصفیه آب خروجی عاری از آلاینده های میکروبی، شیمیایی و فیزیکی باشد.

مرحله هوادهی (a): در این مرحله ورودی فاضلاب انسانی کارخانه صنعتی به حوضچه اول با حجم ۶۵۰ m^3 ریخته می‌شود. این نقطه تمام مولفه‌های میکروبی، شیمیایی و فیزیکوشیمیایی یک نمونه فاضلاب انسانی را دارا می‌باشد. این حوضچه دارای پنج انشعاب و چهارده لوله یک اینچی می‌باشد که بر روی هر لوله از کف چهار لوله سوار شده است. در مرحله هوادهی، شرایط برای رشد میکروارگانیسمها[۱۰]، تجزیه مواد آلی و تجزیه باکتریهای هوازی فراهم می‌گردد. این فرایند به منظور جلوگیری از ایجاد بوی زننده در تصفیه‌خانه‌ها صورت می‌پذیرد. در این مرحله با ایجاد تلاطم در سطح و عمق فاضلاب از انباشته شدن گازها در فاضلاب جلوگیری می‌گردد.

لجن فعال (b): در این حوضچه هوادهی برگشتی بک واش[۱۱] ایجاد می‌کند. این فرایند توسط دو لوله صورت می‌پذیرد که یکی وظیفه بک واش را دارد و دیگری وظیفه آبگیری استخر لجن در حوضچه را بر عهده دارد. در مرحله لجن فعال، باکتریها و میکروارگانیسمها از مواد آلی موجود در فاضلاب تغذیه نموده و منجر به حذف این مواد می‌گردد. این لجنها به صورت فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی منجر به تصفیه فاضلاب می‌گردند. لجن تولید شده در این مرحله شامل ۵۰٪ ذرات

---

[۴] Membrane Bioreactor
[۵] Kumar
[۶] Bioremediation
[۷] Ma
[۸] Biosensor
[۹] Portable
[۱۰] Microorganisms
[۱۱] Back wash

و مواد جامد و معلق می‌باشد. کلر زنی دستی نیز در این مرحله انجام می‌گیرد که یک روش معمول برای گندزدایی محسوب می‌گردد.

چربی گیر (c): در این مرحله، تیغه جدا کننده آب را از جامدات جدا می‌کند و نمونه مایع وارد استخر چربی گیر می‌شود. در استخر چربی گیر، آب از املاح لجن و چربی جدا می‌گردد. در این مرحله آب با میزان ترکیبات آلی بسیار پایین به عنوان خروجی حاصل می‌گردد. مرحله چربی گیری بسیار حائز اهمیت است زیرا چربی‌های فاضلاب با ساختاری مولکولی پیچیده و سنگین در مسیر لوله‌ها حرکت می‌کنند و به جداره چاه یا لوله‌های انتقال فاضلاب می‌چسبند. فرایند چربی زدایی از گرفتگی لوله‌ها تا درصد بالایی جلوگیری به عمل می‌آورد.

فیلتر شنی (d): جامدات موجود در نمونه پساب خروجی مرحله قبل توسط تیغه ای که در حوضچه تعبیه شده است جدا می‌گردد. در این مرحله، آب زلال به عنوان خروجی حاصل می‌گردد. نمونه آب زلال توسط لوله‌های انتقال به فیلتر شنی وارد می‌شود. مرحله فیلتر شنی تصفیه‌خانه شامل مخزنهایی استوانه ای شکل است که از دانه‌های ریز شن و ماسه است پر شده است. فرایند فیلتراسیون با فیلترهای شنی برای حذف املاح معلق در آب و کاهش میزان کدورت کاربرد دارد.

شکل ۱. تصویر تصفیه‌خانه پساب انسانی به شرح مراحل a) ورودی هوادهی، b) لجن فعال، c) چربی گیر، d) خروجی فیلتر شنی.

Figure 1. Image of a human sewage treatment plant with description of the stages: a) aeration inlet, b) activated sludge, c) grease trap, d) sand filter outlet.

در این شرکت نیز مانند سایر شرکتها تنها باقیمانده کلر (کلر آزاد[۱۲]) در خروجی آب واحد تصفیه‌خانه انسانی پایش می‌گردد. باقیمانده کلر نماینده آن مقدار از کلر است که پس از واکنش کل کلر[۱۳] با عوامل باکتریایی در محیط باقیمانده است. این عامل نشان دهنده واکنشگر اضافی زیست‌کش و اطمینان از زوال همه نوع باکتری است. این در حالی است که باقیمانده کلر، نماینده دقیقی برای همه انواع باکتری نیست زیرا بسیاری از انواع باکتری توسط کلر از بین نمی‌روند. از سوی دیگر پارامتر کلر آزاد اطلاعاتی از شرایط شیمیایی و فیزیکی آب ندارد. پساب خروجی این تصفیه‌خانه برای اهداف درجه دوم نظیر آبیاری فضای سبز کارخانه صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد و بدین ترتیب این تصفیه‌خانه نقش کلیدی در کاهش مصرف آب و اصلاح الگوی مصرف کارخانه را بر عهده دارد.

---

[۱۲] Free Chlorine

[۱۳] Total Chlorine

لذا الزامی می‌باشد غلظت انواع باکتریها بطور عمومی، غلظت هر نوع باکتری به طور اختصاصی، شرایط فیزیکوشیمیایی آب (هدایت، pH، سختی، قلیائیت و شوری) و شرایط شیمیایی آب (حضور انواع آنیونها و کاتیونهای رسوبگذار و خورنده به دقت در ورودی، خروجی هر مرحله و خروجی نهایی این شرکت مورد ارزیابی قرار گیرد. در نتیجه، آب خروجی از نقطه نظر باکتریایی، شیمیایی و فیزیکوشیمیایی ارزیابی می‌گردد. همچنین بر اساس مطالعات به عمل آمده آلودگیهای میکروبی در تعامل تنگاتنگ با شرایط شیمیایی و فیزیکو شیمیایی آب هستند. که در این تحقیق ارتباط پارامترهای هدایت، شوری، قلیاییت، سختی، pH، غلظت آنیونها و کاتیونها با عوامل میکروبی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در این پروژه تحقیقاتی دسته بزرگی از تست کیتهای میکروبی ارائه و مورد ارزیابی قرار گرفته است. این دسته تست کیتها شامل تست کیت آزمون عمومی سنجش تعداد کل باکتریها[۱۴] (TBC) و آزمونهای اختصاصی سنجش باکتریهای خاص نظیر باکتریهای تولید کننده اسید[۱۵] (APB)، فلورسانس سودوموناس[۱۶] (FP)، باکتریهای مرتبط با آهن[۱۷] (IRB)، باکتری احیاء کننده نیترات[۱۸] (NRB)، سنجش باکتری آئروبیک[۱۹] (Aero)، باکتری احیاء کننده سولفات[۲۰] (SRB) و باکتری احیاء کننده تیوسولفات[۲۱] (TRB) می‌باشد. این تحقیق یک راهکار علمی برای پایش عملکرد تصفیه خانه فاضلاب انسانی در ورودی، مراحل و خروجی واحد می‌باشد. همچنین تاکید می‌گردد دلیل اصلی عدم بهبود کارایی بسیاری از تصفیه خانه‌ها بدین شرح است که کنترل فرایند از طریق پایش میکروبی و شیمیایی صورت نمی‌گیرد. در ادامه با توجه به ایرادات تصفیه‌خانه مورد مطالعه راهکار اصلاحی بهبود عملکرد نیز ارائه گردیده است.

بر پایه مطالعات انجام شده آزمون شمارش تعداد کل باکتریها (آزمون TBC) در مبحث آزمونهای میکروبی را می‌توان به آزمون سنجش هدایت در مبحث پارامترهای شیمیایی آب تشبیه نمود. در بحث هدایت، در مواردی که هدایت آب بالا باشد سنجش تک تک آنیونها و کاتیونها به منظور یافتن آنیون و یا کاتیون بحرانی در دستور کار قرار آزمایشگاه می‌گیرد. در برخورد با عوامل میکروبی نیز در مواردی که بر اساس آزمون TBC تعداد کل باکتریها بیشتر از حدود مجاز باشد، انجام آزمونهای شامل APB، FP، IRB، NRB، Aero، SRB و TRB به منظور یافتن عامل بحرانی موثر بر افزایش تعدادکل باکتری در دستور کار قرار می‌گیرد [۲۴].

۲- تجربی

در این پروژه تحقیقاتی تصفیه‌خانه انسانی یک کارخانه صنعتی از نقطه نظر میکروبی، فیزیکوشیمیایی و شیمیایی مورد پایش و بررسی قرار گرفته است. بدین منظور مراحل این تصفیه‌خانه که شامل چهار مرحله اصلی هوادهی، لجن فعال، چربی گیر و فیلتر شنی به عنوان نقاط اصلی انجام آزمون در محل[۲۲] و نمونه برداری معین گردید. در این راستا در هر نقطه تعیین شده آزمونهای میکروبی، فیزیکوشیمیایی و شیمیایی انجام می‌پذیرد.

۲-۱- تجهیزات و مواد مورد نیاز

---

[۱۴] Total bacteria count
[۱۵] Acid producing bacteria
[۱۶] Fluorescence pseudomonas
[۱۷] Iron related bacteria
[۱۸] Nitrate reducing bacteria
[۱۹] Aerobic bacteria detection
[۲۰] Sulfate reducing bacteria
[۲۱] Thiosulfate reducing bacteria
[۲۲] In situ

در این تحقیق از دستگاه رومیزی هدایت سنج و pH متر برند HANA که به ترتیب مجهز یه الکترود پلاتینی و شیشه ای هستند استفاده می‌گردد. کیتهای میکروبی TBC،APB ، FP، IRB، NRB، Aero، SRB و TRB از شرکت زیست کاوش ایرانیان که نماینده رسمی شرکت ایبرسکو[۲۳] سوییس می باشد تهیه می‌گردد. همچنین سایر معرفهای شیمیایی برا بررسی تغییر رنگ کیتها و کالبراسیون دستگاه از برند مرک[۲۴] در گرید تجزیه ای[۲۵] تهیه گردیده است.

۲-۲- روش انجام کار

نمونه برداری: در این بخش از تحقیق در ابتدا بازدید از تصفیه‌خانه صورت می‌پذیرد. در ادامه برای انجام آزمونها، سه نمونه مشابه از چهار مرحله اصلی به منظور بررسی پارامتراهای میکروبی، فیزیکوشیمیایی و شیمیایی برداشته می‌گردد. انجام آزمونهای شیمیایی و میکروبی در محل بر روی نمونه‌های گرفته شده صورت می‌پذیرد. بخشی از نمونه‌های نیز برای انجام آزمونهای آنیونی و کاتیونی به آزمایشگاه[۲۶] انتقال داده می‌گردد.

آزمون میکروبی: در این آزمون در ابتدا کیت TBC را به مدت ۱۰ s در نمونه مورد نظر غوطه ور کرده و سپس با تکان دادن کیت اضافه محلول از روی آن برداشته شده و در ظرف سربسته تا مشاهده تغییرات رنگ نگهداری می‌گردد. در ادامه برای انجام آزمونهای APB، FP، IRB، NRB، Aero، SRB و TRB به میزان ۲۰ ml از هر نمونه به کیت تزریق گردیده و به مدت ۳ روز برای تغییرات رنگ حفظ می‌گردد. همچنین به منظور انجام آزمون FP به میزان ۱ ml نمونه به کیت تزریق شده و کیت با درب بسته حفظ می‌گردد.

تعیین پارامترهای فیزیکوشیمیایی: به منظور سنجش پارامترهای فیزیکوشیمیایی در محل، از دستگاه هدایت سنج و pH متر کالیبره استفاده می‌گردد. در این روش با غوطه ور کردن الکترود pH و الکترود هدایت سنج کالیبره در نمونه‌ها پارامترهای هدایت الکتریکی، درصد شوری، کدورت و pH بررسی قرار خواهد گرفت.

سنجش آنیونها و کاتیونها: پارامترهای مهم و قابل آنالیز در نمونه های آب ورودی، مرحله ای و خروجی 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 با روش جذب اتمی استفاده می‌گردد. آنالیز نیترات، نیتریت، فلوراید و فسفات موجود در نمونه مطابق روش استاندارد 4110 SMWW با روش طیف سنجی (UV-VIS) انجام خواهد گردید. آنالیز یون کلرید، سولفات و قلیاییت نمونه نیز به ترتیب با روش تیتراسیون موهر، تیترایسیون باریم و تیراسیون با HCl انجام خواهد شد. استاندارد انجام این آزمونها نیز روش 4500 Cl، 4110 SMWW و 2320 B SMWW می‌باشد.

---

[۲۳] Ibresco Company

[۲۴] Merck

[۲۵] Analytical Grade

[۲۶] In Lab.

۲-۳- روش تحلیل داده

در این تحقیق روش تجزیه و تحلیل آماری شامل چهار مرحله کلیدی و اساسی به شرح ذیل می‌باشد که هر مرحله با جزئیات گردآوری و بیان گردیده است.

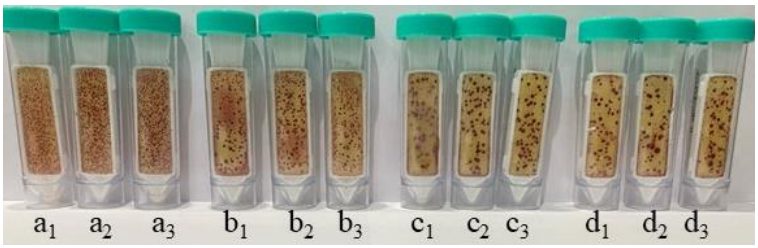
۱. در پایش کیتهای میکروبی عمومی TBC و اختصاصی APB، FP، IRB، NRB، Aero، SRB و TRB هر نوع کیت دارای یک صفحه رنگ‌بندی (تست کیت مرجع) می‌باشد. در این آزمون رنگ کیت حاصل از انجام آزمون پایش میکروبی با رنگ کیت مرجع قیاس می‌گردد و غلظت هر نوع باکتری معین می‌گردد.
۲. نمونه آبهای مراحل ورودی، مرحله ای و خروجی مورد سنجش آنلاین و اینسیتو دستگاه هدایت سنج قرار گرفته و میزان هدایت، شوری و کدورت گزارش می‌گردد.
۳. نمونه آبهای مراحل ورودی، مرحله ای و خروجی به منظور پایش آنیونها و کاتیونها به آزمایشگاه ارسال می‌گردد. غلظت یونهای خورراک باکتری شامل Fe^{2+}، Fe^{3+} ، SO_4^{2-}، NO_3^- و $S_2O_3^{2-}$ غلظت یونهای رسوبگذار Mg^{2+}، Ca^{2+} و CO_32- و غلظت یونهای خورنده Cl^- و SO_4^{2-} گزارش می‌گردد.
۴. در نهایت ارتباط میزان TBC با هدایت، شوری و کدورت، باکتریهای اختصاصی با غلظت یونهای Fe^{2+} ، Fe^{3+} ، SO_4^{2-}، NO_3^- و $S_2O_3^{2-}$ بررسی و گزارش می‌گردد.
۵. در نهایت بر اساس غلظت هر نوع باکتری و غلظت یون خوراک ان راهکار اصلاحی پیشگیرانه در راستای حذف باکتری و یا حذف خوراک باکتری ارائه می‌گردد.

۳- بحث‌ها و نتایج

در این تحقیق با هدفی متفاوت میکروبی و فیزیکوشیمیایی ورودی، خروجی هر مرحله و خروجی نهایی تصفیه‌خانه انسانی یک شرکت صنعتی در دستور کار قرار گرفته است. هدف اصلی از این تحقیق پایش همه جانبه کیفیت پساب تصفیه‌خانه از نقطه نظر میکروبی و فیزیکوشیمیایی می‌باشد. در نهایت با ارزیابی همه جانبه کیفیت ورودی، مرحله ای و خروجی نهایی تصفیه‌خانه راهکارهای اصلاحی جهت بهبود عملکرد تصفیه‌خانه ارائه می‌گردد.

۱-۳- پایش میکروبی

با توجه به نتایج به دست آمده از شکل شماره ۲ و به دنبال آن تفسیر نتایج در جدول شماره ۱ مواد در مورد هر باکتری قابل بحث و بررسی است. در ارتباط با میزان TBC می‌توان گفت که در آلوده ترین نقطه (ورودی فاضلاب) در حدود 10^5 cfu/ml و در نقاط مربوط خروجی مرحله دوم و سوم میزان TBC به عدد ۱۰۰۰ رسیده است. در نهایت در خروجی فاضلاب مقدار کل باکتریها به ۱۰۰ cfu/ml می‌رسد. همانطور که از ارقام قابل پیش بینی است مقدار کل باکتریها از ورودی تصفیه‌خانه تا خروجی از ۱۰۰,۰۰۰ به ۱۰۰ رسیده است که این عملکرد تصفیه‌خانه را بسیار ایده ال و با کاهش ۱۰۰۰ برابری TBC نشان می‌دهد. همچنین میزان تکرار پذیری نتایج آزمون TBC برای هر نقطه در شکل شماره ۲ ارائه گردیده است که میزان RSD در حدود کمتر از ۵٪ گزارش می‌گردد.



شکل ۲. نتایج حاصل از تکرارپذیری آزمون TBC برای برای نقاط a) ورودی هوادهی، b) لجن فعال، c) چربی گیر، d) خروجی فیلتر شنی تصفیه‌خانه انسانی شرکت صنعتی.

Figure 2. Results from the repeatability of the TBC test for points a) aeration inlet, b) activated sludge, c) grease trap, d) sand filter outlet of the human sewage treatment plant.

در ادامه با بررسی نتایج مربوط به FP حضور FP در تمامی نمونه‌های به میزان تقریبا مشابه مشاهده می‌گردد و این نتایج حاکی از آن است که تصفیه‌خانه و عملکرد آن بر روی کاهش میزان این باکتری خاص موثر نمی‌باشد و برای این مرحله پیشنهاد اصلاحی الزامی است.

همچنین در راستای سنجش APB میزان آن در نقطه ورودی برابر ۱۴۰,۰۰۰ cfu/ml در بازه High می‌باشد و به دنبال آن در مراحل c و b به ترتیب به ۴۵۰۰ cfu/ml و ۴۵۰ cfu/ml در بازه Moderate می‌رسد. در نهایت در نقطه خروجی میزان APB به ۷۵ cfu/ml می‌رسد. سنجش مرحله ای APB و قیاس آن در ورودی و خروجی عملکرد این واحد تصفیه‌خانه را بسیار مناسب در راستای کاهش غلظت باکتری تولید کننده اسید نشان می‌دهد که روند کاهشی بسیار ایده آلی در مراحل قابل مشاهده است.

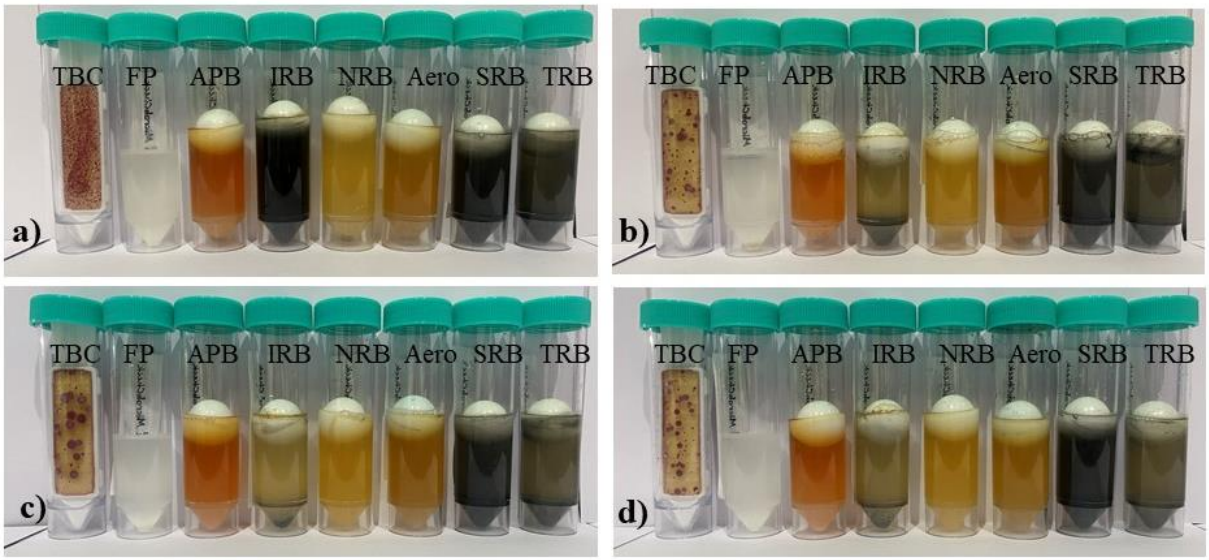
در بحث سنجش و اندازه گیری IRB، میزان این باکتری در ورودی در حدود ۱۴۰,۰۰۰ cfu/ml شامل هر دو نوع باکتری هوازی و بی هوازی مشاهده می‌گردد. این مقدار در نقطه b و c به عدد ۵۰۰ می‌رسد. نکته قابل توجه این است که عمده باکتریها در نقطه b شامل گونه های هوازی و بی هوازی می‌باشند و این در حالی است که باکتریهای نقطه c عمدتا از نوع بی هوازی هستند. در نهایت در خروجی تصفیه‌خانه میزان IRB به عدد ۲۵ cfu/ml می‌رسد که تمامی باکتریهای خروجی نیز شامل انواع بی هوازی هستند. لازم به ذکر است که عملکرد تصفیه‌خانه در کاهش میزان IRB روند بسیار مناسب با کاهش عددی از ۱۴۰,۰۰۰ به ۲۵ می‌باشد.

سنجش NRB در طی مراحل تصفیه‌خانه از نقطه a تا نقطه d میزان باکتریها را در رنج Moderate نشان می‌دهد. طی مراحل تصفیه، تغییر چشمگیری در مقدار NRB رخ نمی‌دهد. این نتایج حاکی از آن است که تصفیه‌خانه در حذف NRB موفق نبوده و می‌بایست راهکار اصلاحی برای این مرحله در نظر گرفته گردد.

در نمونه ها از نقطه a تا d میزان Aero سنجش گردیده است و نتایج نشان می‌دهد در نقطه a و b میزان Aero در حدود cfu/ml ۶۱,۰۰۰ می‌باشد که در نهایت این عدد به ۶,۵۰۰ در نقطه c و d می‌رسد. تمامی غلظتهای مربوط به Aero از a تا d در گستره Moderate قرار دارد. اما قیاس نقطه خروجی با ورودی کاهش ۱۰ برابری Aero را نشان می‌دهد. این روند کاهشی نشان دهنده عملکرد ایده آل تصفیه‌خانه در از بین بردن این نوع عامل میکروبی خاص می‌باشد.

سنجش میزان SRB در نقاط ورودی، مرحله ای و خروجی یک روند کاهش ایده آل را از خود نشان می‌دهد. نتایج میزان SRB را در نقطه d در حدود ۱۰۰,۰۰۰ cfu/ml شامل هر دو گونه هوازی و بی هوازی نشان می‌دهد. عدد SRB در نقطه c به cfu/ml ۱۸,۰۰۰ شامل هر دو گونه هوازی و بی هوازی می‌رسد. در ادامه در نقطه b میزان SRB به ۵,۰۰۰ cfu/ml هوازی و بی هوازی میرسد که در نهایت در خروجی مقدار ۵۰۰ cfu/ml از SRB آن هم فقط گونه بی هوازی مشاهده می‌گردد. عملکرد تصفیه‌خانه بر روی کاهشSRB بسیار مناسب و مقدار آن را ۱۰۰,۰۰۰ cfu/ml به ۵۰۰ cfu/ml رسانده و همچنین طی مراحل تصفیه گونه هوازی این باکتری بطور کامل از بین رفته است.

بر اساس نتایج جاصل از سنجش TRB از مرحله a تا d، یک روند کاهش بسیار ایده آل مشاهده می‌گردد. میزان این باکتری از حدود ۱۰,۰۰۰ cfu/ml در نقطه a و b به ۱۰۰۰ cfu/ml در نقطه c رسیده است و در نهایت میزان این باکتری در خروجی به ۱۰۰ cfu/ml رسیده است. نتایج نشان دهنده عملکرد بسیار ایده آل تصفیه‌خانه در کاهش میزان TRB می‌باشد.



شکل ۳. تصویر کیت میکروبی شامل آزمونهای TBC، FP، APB، IRB، NRB، Aero، SRB و TRB برای نقاط a) ورودی هوادهی، b) لجن فعال، c) چربی گیر، d) خروجی فیلتر شنی تصفیه‌خانه انسانی شرکت صنعتی.

Figure 3. Image of the microbial kit including TBC, FP, APB, IRB, NRB, Aero, SRB, and TRB tests for points a) aeration inlet, b) activated sludge, c) grease trap, d) sand filter outlet of the human sewage treatment plant.

جدول ۱. نتایج آزمونهای میکروبی شامل TBC، FP، APB، IRB، NRB، Aero، SRB و TRB برای نقاط a) ورودی هوادهی، b) لجن فعال، c) چربی گیر، d) خروجی فیلتر شنی تصفیه‌خانه انسانی شرکت صنعتی.

Table 1. Results of microbial tests including TBC, FP, APB, IRB, NRB, Aero, SRB and TRB for points a) aeration inlet, b) activated sludge, c) grease trap, d) sand filter outlet of the human sewage treatment plant.

Bacteria/ cfu/ml	a	b	c	d
TBC	100000	1000	1000	100
FP	+	+	+	+
APB	14000	4500	450	75
IRB	140000	500	500	25
NRB	Moderate	Moderate	Moderate	Moderate
Aero	610000	61000	6500	6500
SRB	100000	18000	5000	5000
TRB	10000	10000	1000	100

+: Positive, Pretense of bacteria, -: Negative, Absence of bacteria

۳-۲- پایش فیزیکوشیمیایی

نتایج به دست آمده از پایش پارامترهای هدایت، کدورت، درصد شوری، قلیائیت و pH در جدول شماره ۲ گردآوری گردیده است. نتایج حاکی از آن است که میزان هدایت، کدورت و شوری طی مراحل a تا d در حدود ۱۰٪ افزایش یافته است. این نشان دهنده این است که فرایندهای تصفیه‌خانه میزان هدایت و در نتیجه کدورت و شوری آب را افزایش می‌دهد. یکی از دلایل این مهم انجام فرایند نیتریفیکاسیون[۲۷] طی مراحل تصفیه می‌باشد. در طی فرایند تصفیه، انواع فرمهای نیتروژن به یون نیترات تبدیل می‌گردد که افزایش غلظت نیترات در خروجی را به همراه دارد. لذا افزایش نیترات و به تبع آن NRB نیز منجر به افزایش هدایت، کدورت و شوری نیز می‌گردد. در این راستا، انجام مرحله دنیتریفیکاسیون[۲۸] برای خروجی این واحد تصفیه‌خانه الزامی می‌باشد. لازم به ذکر است که در صورت اعمال فرایندهای دنیتریفیکاسیون و کاهش غلظت نیترات، کاهش هدایت، کدورت و شوری را نیز به همراه خواهد داشت. بررسی نتایج قلیائیت نمونه ورودی عدد ppm ۵۶۹ را نشان می‌دهد که این عدد در مرحله b به ۱۷۸ و در نهایت در مرحله c و خروجی در حدود ppm ۱۰۰ ثابت می‌گردد. این نتایج حاکی از آن است که تصفیه‌خانه در کاهش قلیائیت نمونه آب بسیار موثر عمل کرده است و کاهش ۶ مرتبه ای قلیائیت مشاهده می‌گردد. این مرحله نشان دهنده آن است که تصفیه شیمیایی با راندمان مناسب صورت گرفته که این فرایند منجر به کاهش قلیائیت و سختی می‌گردد.

جدول ۲. نتایج مجموع آزمونهای بررسی پارامترهای فیزیکوشیمیایی شامل هدایت، TDS، درصد شوری، قلیائیت و pH برای نقاط a) ورودی هوادهی، b) لجن فعال، c) چربی گیر، d) خروجی فیلتر شنی تصفیه‌خانه انسانی شرکت صنعتی.

Table 2. Results of the total tests to examine physicochemical parameters including conductivity, TDS, salinity percentage, alkalinity, and pH for points a) aeration inlet, b) activated sludge, c) grease trap, d) sand filter outlet of the human sewage treatment plant.

Parameters	a	b	c	d
Conduct/ µS/cm	1382.1	1459.6	1514.5	1547.6
TDS/ ppm	690.2	732.3	757.6	774.6
NaCl/ %	2.7	2.8	3.8	3.0
T-Alkalinity ($CaCO_3$)/ ppm	569.3	178.2	99.0	100.9
pH	6.77	7.02	6.79	6.95

۳-۳- پایش شیمیایی

در بحث پایش شرایط شیمیایی، غلظت تمامی آنیونها و کاتیونهای موجود در آب بطور جداگانه مورد سنجش و بررسی قرار می‌گیرد. در طی مراحل تصفیه‌خانه میزان غلظت کاتیونهای سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم تقریبا ثابت است و تغییرات چشمگیری در روند تغییرات غلظتی این یونها مشاهده نمی‌گردد. در ارتباط با غلظت آنیونها، آنیونها شامل نیترات، نیتریت، فسفات و فلورید نیز دستخوش تغییرات چشمگیری نمی‌باشند. این در حالی است که غلظت یون سولفات در ورودی به میزان ppm ۷ به عدد ppm ۱۸۶ در خروجی می‌رسد که این تغییر ناشی از افزودن معرفهای اسیدی همانند اسید سولفوریک برای تنظیم pH می‌باشد. این روند افزایشی یون سولفات تاثیر ناخوشایندی بر رشد SRB و افزایش کلونی‌های آن دارد. همچنین غلظت یون کلرید از ppm ۱۰۰ در ورودی به ppm ۲۵۷ در خروجی می‌رسد. این روند افزایشی حاصل کلر زنی و سایر فرایندها طی مراحل می‌باشد (جدول شماره ۳).

---

[۲۷] Nitrification

[۲۸] Denitrification

جدول ۳. نتایج مجموع آزمونهای سنجش آنیونهای و کاتیونهای رسوبگذار و خورنده برای نقاط a) ورودی هوادهی، b) لجن فعال، c) چربی گیر، d) خروجی فیلتر شنی تصفیه‌خانه انسانی شرکت صنعتی.

Table 3. Results of the total tests for measuring sediment-forming and corrosive anions and cations for points a) aeration inlet, b) activated sludge, c) grease trap, d) sand filter outlet of the human sewage treatment plant.

Ions/ ppm	a	b	c	d
Na^+	113.0	174.0	183.0	200.0
K^+	22.8	25.7	23.8	23.8
Ca^{2+}	72.5	69.7	75.8	76.9
Mg^{2+}	25.2	30.1	27.4	30.6
NO_3^-	-	-	106.0	96.5
Cl^-	109.9	208.2	234.5	257.2
SO_4^{2-}	7.27	143.5	192.4	186.6
NO_2^-	-	0.06	0.02	3.94
PO_4^{3-}	15.5	-	-	-
F^-	0.18	0.25	0.25	0.26

۳-۴- راهکار اصلاحی

در این بخش از مقاله تعدادی راهکار اصلاحی به منظور بهبود عملکرد واحد تصفیه‌خانه ارائه می‌گردد که حاصل از پایش پارامترهای میکروبی، فیزیکوشیمیایی و شیمیایی می‌باشد. راهکارهای ارائه شده در دو بخش کلی حذف باکتری و یا حذف خوراک آن طبقه بندی می‌گردد.

۱. بررسی و پایش میزان FP نشان دهنده این است که از مرحله ورودی تا خروجی، تصفیه‌خانه نقش موثری بر کاهش میزان FP نداشته است. تغییر میزان و همچنین غلظت زیست‌کش اکسنده بر کاهش غلظت FP بسیار مناسب عمل خواهد کرد. توصیه می‌گردد این افزایش دوز زیست‌کش اکسنده در مرحله پایانی صورت پذیرد.

۲. میزان NRB در طی مراحل تصفیه ثابت و در بازه Moderate است. به بیان ساده تصفیه‌خانه بر حذف این نوع باکتری خاص موثر نبوده است. بهترین روش برای حذف NRB، کاهش و حذف یون خوراک این باکتری (یون نیترات) می‌باشد. توصیه می‌گردد پیش از مرحله کلرزنی یون نیترات از طریق روش شیمیایی رزین تبادل یون با بکارگیری رزین‌های اختصاصی مبادله‌کننده یون نیترات حذف گردد و بعد از آن مراحل گند زدایی و کلر زنی انجام پذیرد. رزین مبادله‌کننده یون نیترات یک نوع رزین پلیمری اختصاصی برای حذف یون نیترات است که در ستونهای مبادله‌کننده یون قرار می‌گیرد. پساب خروجی تصفیه‌خانه از روی آن عبور می‌کند و یون نیترات منفی از پساب خروجی جذب رزین می‌گردد و به ازاء غلظت یون نیترات جذب شده روی رزین، یون هیدروکسی از رزین واجذب شده و به پساب خروجی افزون می‌گردد. در نهایت با فرایند تنظیم pH خروجی، پساب از نقطه نظر pH، میزان نیترات و NRB متعادل می‌گردد.

۳. تصفیه‌خانه در بحث کاهش غلظت Aero موفق بوده است اما بطور ایده‌آل این ارگانیسم حذف نگردیده است. بر اساس مطالعات و تحقیقات به عمل آمده کاربرد زیست‌کش‌های آلی نظیر ایزوتیازول در کاهش قارچ، جلبک و Aero بسیار مناسب عمل خواهد کرد. پیشنهاد می‌گردد تزریق ایزوتیازول بعد از مراحل کلر زنی و با شرط میزان کلر آزاد پایین و احتیاط‌های زیست محیطی صورت پذیرد.

۴. تصفیه‌خانه در بحث کاهش غلظت SRB بسیار موفق می‌باشد اما به هر حال میزان این باکتری بطور کامل حذف نگردیده است. یکس از دلایل اصلی غلظت بالای این باکتری غلظت بالای یون سولفات ناشی از تزریقهای شیمیایی می‌باشد. به عنوان یک راهکار عملیاتی برای حذف SRB راهکار شیمیایی ترسیب سولفات پیش از کلر زنی پیشنهاد می‌گردد.

۵. در طی مراحل تصفیه از ورودی تا خروجی میزان هدایت، سختی و شوری بسیار بالا می‌باشد به گونه‌ای که میزان هدایت متوسط برابر ۱۵۰۰ µS/cm ثابت در طی مراحل تصفیه بدون تغییر چشمگیر مشاهده می‌گردد. از آنجاییکه طی مراحل مختلف تصفیه شیمیایی و بیولوژیکی فرایند کاهش هدایت و شوری صورت نمی‌گیرد لذا پیشنهاد می‌گردد خروجی تصفیه‌خانه به واحدهای آب شیرین‌کن نظیر اسمز معکوس تجهیز گردد.

۴- جمع بندی

در این تحقیق هدف اصلی بر آن بوده است که یک تصفیه‌خانه انسانی مورد بررسی و پایش همه‌جانبه میکروبی، فیزیکوشیمیایی و شیمیایی قرار گیرد. برای دستیابی به این هدف و به منظور پایش کیفیت خروجی پساب تصفیه‌خانه، به سنجش کلر آزاد اکتفا نگردیده است. در این راستا، کیتهای میکروبی کاربردی TBC، APB، FP، IRB، NRB، Aero، SRB وTRB برای تشخیص نوع و غلظت انواع باکتری مورد استفاده قرار گرفت. همچنین پایش شرایط فیزیکوشیمیایی آب (هدایت، سختی و شوری) و آنالیز شرایط شیمیایی آب (پایش انواع آنیونها و کاتیونهای خورنده و رسوبگذار) برای تکمیل گستره داده در دستور کار قرار گرفت. در ادامه ارتباط بین عوامل میکروبی و شیمیایی مورد ارزیابی همه جانبه قرار گرفت. در نهایت با داشتن مجموع شرایط میکروبی، فیزیکوشیمیایی و شیمیایی، راهکارهای اصلاحی به منظور بهبود عملکرد تصفیه‌خانه نیز ارائه گردید. از سوی دیگر به عنوان راهکار اصلاحی پنج دسته راهکار اصلی پیشنهاد گردیده است که شامل روشهای گندزدایی با بکارگیری زیست‌کش‌های اکسنده نظیر کلر زنی، گندزدایی با زیست‌کش آلی نظیر تزریق ایزوتیازول، روشهای بر پایه حذف خوراک باکتری به روش انتخاب‌گزین حذف یون نیترات، روش بر پایه ترسیب یون سولفات و روش بر پایه سامانه‌های آب شیرین‌کن می‌باشد. خروجی این تحقیق رهنمودی برای کنترل کیفیت عملکرد عموم تصفیه‌خانه‌ها می‌باشد. به عنوان مثال در این تحقیق به وضوح معین گردیده است که بسیاری از آلودگی‌ها در مراحلی که فرض بر حذف کامل آنهاست، حذف نمی‌گردند. لذا پایش مرحله‌ای کارایی تصفیه‌خانه، امکان اصلاح و بهبود مراحل تصفیه را برای متخصصین این حوزه فراهم می‌نماید.

۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج و پژوهشگاه نیرو که در انجام مراحل تحقیق حامی و یاری‌رسان ما بودند کمال تقدیر و تشکر را دارند.

مراجع

[1] Hušek, M., Moško, J., Pohořelý, M. (2022). Sewage sludge treatment methods and P-recovery possibilities: Current state-of-the-art. *Journal of Environmental Management*, *315*: 115090.

[2] Raheem, A., Sikarwar, V. S., He, J., Dastyar, W., Dionysiou, D. D ,.Wang, W., Zhao, M. (2018). Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: a review. *Chemical Engineering Journal*, *337*: 616-641.

[3] Wear, S. L., Acuña, V., McDonald, R., Font, C. (2021). Sewage pollution, declining ecosystem health, and cross-sector collaboration. *Biological Conservation*, *255*: 109010.

[4] Ghahraman Afshar, M., Esmaeulpour, M., Zolriasatein, A., Niknam, E. (2025). Application of silica nanoparticles functionalized with amine polymer as an inhibitor for cooling tower of thermal power plants. *Iranian Chemical Engineering Journal*: e225633. [In Persian]
[5] Demirbas, A., Edris, G., Alalayah, W. M. (2017). Sludge production from municipal wastewater treatment in sewage treatment plant. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, *39*(10): 999-1006.
[6] Thorn, J., Kerekes, E. (2001). Health effects among employees in sewage treatment plants: A literature survey. *American Journal of Industrial Medicine*, *40*(2): 170-179.
[7] Berthouex, P ,.Hunter, W., Pallesen, L. (1978). Monitoring sewage treatment plants: some quality control aspects. *Journal of Quality Technology*, *10*(4): 139-149.
[8] Zarabadipour, M., Soleimani, M., Ghahraman Afshar, M. (2025). Application of functionalized Fe3O4@ SiO2 nanoparticles as an adsorbent for heavy metal removal. *Results in Chemistry*: 102514.
[9] Javadi, A., Maleki, A., Bahrami Panah, N., Ghahraman Afshar, M. (2025). Removal of nickel ions from aqueous solutions using theophylline-functionalized Fe3O4@ SiO2 magnetic nanoparticles. *Journal of Applied Research of Chemical-Polymer Engineering*, *8*(3): 40-49. [In Persian]
[10] Ghahraman Afshar, M., Barashroudi, P., Bahramipanah, N., Maleki, A. (2025). Theophylline-functionalized magnetic nanoadsorbent: synthesis, characterization, solid phase extraction of copper, modeling of isotherms and adsorption kinetics. *Applied Chemistry Today*. [In Persian]
[11] Ghahraman Afshar, M., Hamidavi, H., Maleki, A., BahramiPanah, N. (2025). Theophylline-functionalized Fe3O4@ SiO2 nanoparticles: synthesis, characterization and application as cadmium ion removal adsorbent. *Iranian Chemical Engineering Journal*: e223962. [In Persian]
[12] Esmaeilpour, M., Ghahraman Afshar, M., Yousefpour, A., Kazemnejadi, M., Ghaseminejad, H. (2025). Monitoring the physicochemical parameter and investigating the causes of destruction for thermal power plant steam cycle. *Farayandno*, *20*(89): 57-76. [In Persian]
[13] Bonetta, S., Pignata, C., Gasparro, E., Richiardi, L., Bonetta, S., Carraro, E. (2022). Impact of wastewater treatment plants on microbiological contamination for evaluating the risks of wastewater reuse. *Environmental Sciences Europe*, *34*(1): 20.
[14] Saravanan, A., Kumar, P. S., Duc, P. A., Rangasamy, G. (2023). Strategies for microbial bioremediation of environmental pollutants from industrial wastewater :a sustainable approach. *Chemosphere*, *313*: 137323.
[15] Ma, Z., Meliana, C., Munawaroh, H. S. H., Karaman, C., Karimi-Maleh, H., Low, S. S., Show, P. L. (2022). Recent advances in the analytical strategies of microbial biosensor for detection of pollutants. *Chemosphere*, *306*: 135515.
[16] Ghahraman Afshar, M., Esmaeilpour, M., Faghihi, M. (2024). Technical-economic evaluation of the proposed solutions to modify the pattern of water consumption in Tarasht power plant. *Iranian Chemical Engineering Journal*, *23*(132): 84-66. [In Persian]
[17] Ghahraman Afshar, M., Azimi, M., Habibi, N., Masihi, H., Esameilpour, M. (2023). Batch and continuous bleaching regimen in the cooling tower of Montazer Ghaem power plant. *Journal of Hazardous Materials Advances*, *11*: 100339.
[18] Ghahraman Afshar, M., Esmaeilpour, M., Ghaseminejad, H. (2024). Microbial corrosion affected by environmental factors in cooling tower of Bandar Abbas power plant. *Journal of Environmental Studies*, *49*(4): 389-400. [In Persian]
[19] Ghahraman Afshar, M., Esmaeilpour, M., Ghaseminejad, H., Esmaeili, N. (2023). Detection and Analysis of Microbial Influenced Corrosion in Cooling Tower of Shahid Mofateh Power Plant. *journal of New Materials*, *13*(50): 46-59. [In Persian]
[20] Ghahraman Afshar, M., Esmaeilpour, M., Namaki Shooshtari, N. (2023). Microbial Corrosion in Cooling Tower of Ramin Power Plant: Determination and Corrective Solution. *Journal of Water and Wastewater; Ab va Fazilab (in persian)*, *34*(4): 97-108. [In Persian]
[21] Ghahraman Afshar, M., Ghaseminejad, H., Esmaeilpour, M. (2022). Microbial Corrosion in Cooling Water of Lushan Shahid Beheshti Power Plant. *journal of New Materials*, *13*(49): 26-15. [In Persian]

[22] Ghahraman Afshar, M., Zarabadipour, M., Soleimani, M. (2025). Copper sensor based on silica nanoparticles functionalized with dendrimer polymer molecules. *Iranian Chemical Engineering Journal*: e232432. [In Persian]
[23] Ghahraman Afshar, M., Azimi, M., Habibi, N., Esmaeilpour, M. (2023). 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*: e180983. [In Persian]
[24] Ghahraman Afshar, M., Esmaeilpour, M., Ghaseminejad, H. (2024). Microbial corrosion affected by environmental factors in cooling tower of Bandar Abbas power plant. *Journal of Environmental Studies*, *49*(4). [In Persian]