



Investigation of Changes in Three Key Parameters of Military Industry Wastewater Treated Using Bubble Trap Technology (BTF)

Seyed Ali Moezzi

Ph.D. Graduate in Aquatic Ecology, Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Email: moezi.sayyed.ali@ut.ac.ir

Seyed Mostafa Mirtabaei

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Aviation, Imam Ali University, Tehran, Iran (Corresponding Author)

Email: mirtabaei@iamu.ac.ir

Arash Javanshir Khoei

Associate Professor, Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Email: arashjavanshir@ut.ac.ir

Abstract

Due to population growth and the ongoing process of industrialization, the volume of wastewater production has been continuously increasing. Wastewater generated by military industries mainly originates from various activities such as maintenance, manufacturing, and assembly of military equipment, and if not properly treated, it can pose serious environmental hazards. In this study, a Bubble Trap Filtration (BTF) system combined with nanobubbling technology was employed for the treatment of wastewater produced by the Research and Self-Sufficiency Jihad Organization of the Ground Force of the Islamic Republic of Iran Army. The parameters of Biological Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), and Total Dissolved Solids (TDS) were measured in wastewater samples. The samples were then subjected to a nanobubbling process using pure oxygen. Subsequently, the wastewater entered the treatment system, and samples were collected and analyzed every 24 hours over a 10-day period. The results indicated that the initial concentrations of BOD, COD, and TDS were 7326.67 ± 226.79 , 14256.67 ± 1118.76 , and 1200.00 ± 84.35 mg/L, respectively. After the treatment process, these values decreased to 159.67 ± 25.32 , 412.00 ± 31.53 , and 157.67 ± 13.32 mg/L, respectively. The results of statistical analyses, including Mauchly's Test of Sphericity, Repeated Measures ANOVA, and the Greenhouse-Geisser and Huynh-Feldt corrections, demonstrated that time had a significant effect on the BOD, COD, and TDS parameters. Ultimately, reductions of 97.82% in BOD, 97.11% in COD, and 86.86% in TDS confirmed the positive impact of the treatment system on wastewater quality. Given its efficient performance and low construction cost, this system is proposed as an effective and economical method for wastewater treatment in defense and military industries.

Keywords: Wastewater Treatment, Bubble Trap, Industrial Wastewater, Water Quality, Nanobubbling





سال هشتم، شماره چهارم (پیاپی ۲۸)، زمستان ۱۴۰۴، صص. ۷۵-۱۰۶
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷

مقاله پژوهشی

بررسی تغییرات سه پارامتر کلیدی در پساب صنعت نظامی، تصفیه به کمک فناوری تله ذره گیر (BTF)

سید علی معزی

دانش آموخته دکتری بوم‌شناسی آبریزان، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
Email: moezzi.sayyed.ali@ut.ac.ir

سید مصطفی میرطباپی

استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی و پرواز، دانشگاه امام علی (ع)، تهران، ایران (نویسنده مسئول)
Email: mirtabaei@iamu.ac.ir

آرش جوانشیر خوئی

دانشیار گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
Email: arashjavanshir@ut.ac.ir

چکیده

با توجه به افزایش جمعیت و روند صنعتی شدن، میزان فاضلاب تولیدی به‌طور مداوم در حال افزایش است. پساب‌های صنایع نظامی عمدتاً از فعالیت‌های مختلف مانند تعمیر و نگهداری و ساخت و مونتاژ تجهیزات نظامی ناشی می‌شوند و در صورت عدم تصفیه مناسب، می‌توانند خطرات جدی زیست‌محیطی ایجاد کنند. در این تحقیق، سیستم تله ذره‌گیر به‌همراه فناوری نانوبالینگ برای تصفیه پساب سازمان تحقیقات و جهاد خودکفایی نرجا مورد استفاده قرار گرفت. پارامترهای COD، BOD و TDS در نمونه‌های پساب اندازه‌گیری شدند و سپس نمونه‌ها تحت تأثیر فرایند نانوبالینگ با اکسیژن خالص قرار گرفتند. پس از آن، پساب به سیستم تصفیه وارد شد و نمونه‌ها در طول یک دوره ۱۰ روزه هر ۲۴ ساعت یک‌بار برداشته و تحلیل شدند. نتایج نشان داد که مقدار COD، BOD و TDS در نمونه اولیه به ترتیب $۷۳۲۶/۶۷ \pm ۲۲۶/۷۹$ ، $۱۵۹/۶۷ \pm ۲۵/۳۲$ ، $۱۴۲۵۶/۶۷ \pm ۱۱۱۸/۷۶$ و $۱۲۰۰/۰۰ \pm ۸۴/۳۵$ میلی‌گرم بر لیتر بود و پس از فرایند تصفیه این مقادیر به ترتیب $۱۵۹/۶۷ \pm ۲۵/۳۲$ ، $۱۵۹/۶۷ \pm ۲۵/۳۲$ و $۴۱۲/۰۰ \pm ۳۱/۵۳$ میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافت. نتایج آزمون‌های آماری، شامل Mauchly's Test of Sphericity و Repeated Measures ANOVA و اصلاحات آماری Huynh-Feldt و Greenhouse-Geisser نشان دادند که زمان تأثیر معناداری بر پارامترهای COD، BOD و TDS دارد. در نهایت، کاهش $۹۷/۸۲\%$ در BOD، $۹۷/۱۱\%$ در COD و $۸۶/۸۶\%$ در TDS تأثیر مثبت سیستم تصفیه بر کیفیت پساب را تأیید کرد. این سیستم با عملکرد مطلوب و هزینه پایین ساخت، به‌عنوان یک روش کارآمد و اقتصادی برای تصفیه پساب در صنایع دفاعی و نظامی پیشنهاد می‌شود.

کلیدواژه‌ها: تصفیه پساب، تله ذره‌گیر، پساب صنعتی، کیفیت آب، نانوبالینگ

دانشگاه عالی دفاع ملی ♦ پژوهشکده آماد، فناوری دفاعی و عرصه‌های نوپدید / فصلنامه آماد و فناوری دفاعی



20.1001.1.28212606.1404.8.4.3.4

<https://amfad.sndu.ac.ir/> E-ISSN: 2980-8073



صحت مطالب بر عهده نویسنده مقاله است و بیانگر دیدگاه دانشگاه عالی دفاع ملی نیست.



مقدمه

در نتیجه افزایش جمعیت انسانی و روند سریع صنعتی شدن، حجم فاضلاب تولیدشده در سطح جهان به طور مداوم در حال افزایش است (Bruno et al., 2021). براساس برآوردها، در حال حاضر تولید جهانی فاضلاب حدود ۳۸۰ میلیارد مترمکعب است و پیش بینی می شود که این مقدار تا سال ۲۰۵۰ به ۵۷۴ میلیارد مترمکعب برسد (Qadir et al., 2020). این روند رشد چشمگیر، نیاز به بهبود فناوری های تصفیه فاضلاب را افزایش داده است. در دهه های اخیر، برای دستیابی به کیفیت بالاتر پساب و حذف آلاینده ها به طور مؤثرتر، استفاده از فناوری های پیشرفته و تجهیزات کارآمد افزایش یافته است. با این حال، این پیشرفت ها اغلب با افزایش مصرف انرژی در فرایندهای تصفیه همراه بوده است (Castellet-Viciano et al., 2018; Fraia et al., 2018; Wen et al., 2020).

تصفیه فاضلاب فرایندی چندمرحله ای و پیچیده است که هدف اصلی آن حذف آلاینده ها و فراهم کردن شرایط ایمن برای استفاده مجدد یا تخلیه به محیط زیست است. این مراحل به طور کلی شامل روش های زیستی، شیمیایی و فیزیکی می شوند. روش های شیمیایی شامل فرایندهایی مانند تنظیم pH، انعقاد و لخته سازی، ترسیب شیمیایی، اکسیداسیون و ختنی سازی هستند (آذرم و همکاران، ۱۳۹۹؛ Thakur et al., 2014). روش های زیستی عمدتاً مبتنی بر استفاده از میکروارگانیسم ها و جلبک ها برای تجزیه آلاینده های آلی است (پازوکی و همکاران، ۱۳۸۵؛ Satyawali and Balakrishnan, 2008). روش های فیزیکی نیز مراحل مانند آشغال گیری، شناورسازی و ته نشینی را در برمی گیرند (مانی ورنوسفادرانی، ۱۳۹۴؛ Reis and Sant'Anna Jr, 1985). بسته به نوع آلاینده ها، ترکیب این روش ها برای بهبود کارایی تصفیه ضروری است (آذرم و همکاران، ۱۳۹۹؛ شیبانی و همکاران، ۱۳۹۲؛ David, 2017).

علاوه بر چالش های عمومی تصفیه فاضلاب، حوزه پدافند غیرعامل و به ویژه پدافند زیستی نقش مهمی در مدیریت فاضلاب های خاص، از جمله پساب نظامی، ایفا می کند. فاضلاب ناشی از تأسیسات و فعالیت های نظامی می تواند حاوی آلاینده های خاص و خطرناکی باشد



که نیازمند فناوری‌های تصفیه‌ای پیشرفته و اقدامات حفاظتی ویژه هستند. استفاده از راهکارهای نوین در تصفیه پساب نظامی نه تنها موجب کاهش خطرات زیست‌محیطی و جلوگیری از انتشار عوامل شیمیایی و میکروبی می‌شود، بلکه در حفظ امنیت زیستی و پایداری منابع آبی نیز نقش بسزایی دارد. توسعه و اجرای فناوری‌های کم‌مصرف و کارآمد در این حوزه، ضمن کاهش وابستگی به انرژی، می‌تواند گامی مؤثر در راستای حفاظت از محیط‌زیست و امنیت ملی باشد. پساب این صنایع شامل آلاینده‌های گوناگونی است که ناشی از فعالیت‌هایی مانند تعمیر و نگهداری، ساخت و مونتاژ تجهیزات، بسته‌بندی و همچنین فاضلاب‌های اداری و عملیاتی است (Maloney et al., 1998). این نوع پساب‌ها اغلب شامل مواد منفجره، حلال‌ها، اسیدها و ترکیبات خاص دیگر هستند که به‌طور معمول دارای مقادیر بالایی از BOD^۱، COD^۲، TN^۳، TP^۴ و فلزات سنگین‌اند و در صورت عدم تصفیه مناسب، می‌توانند خطرات جدی زیست‌محیطی ایجاد کنند (Peyton and Glaze, 1988; Almeida et al., 2022).

از میان روش‌های مختلف تصفیه، اکسیداسیون شیمیایی یکی از کارآمدترین تکنیک‌ها برای کاهش آلاینده‌های پیچیده موجود در پساب صنایع نظامی به شمار می‌رود (Yasar et al., 2007; Van Gijn et al., 2022). همچنین در بسیاری از مطالعات جهت کاهش آلاینده‌های موجود در پساب صنایع نظامی از روش‌های مختلف اکسیداسیون شیمیایی استفاده شده است (Maloney et al., 1998). در این روش از مواد شیمیایی نظیر پراکسید هیدروژن، کلر، دی‌اکسید کلر و پرمنگنات استفاده می‌شود که هرکدام ویژگی‌های خاصی دارند (Satyawali and Balakrishnan, 2008). امروزه با عنوان «فرایند اکسیداسیون پیشرفته»^۵ از روش‌هایی مانند «نانوبابلینگ»^۶ شامل تزریق مولکول‌های اکسیژن و آزون و روش‌های فوتونی مانند تابش

-
1. Biological Oxygen Demand
 2. Chemical Oxygen Demand
 3. Total Nitrogen
 4. Total Phosphate
 5. Advanced Oxidation Process
 6. Nano-bubbling

UV^۱ با تولید رادیکال‌های هیدروکسیل برای تجزیه ترکیبات آلی سخت به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند (پازوکی و همکاران، ۱۳۸۵؛ هادوی‌فر و همکاران، ۱۳۸۹؛ Yavuz, 2007; Asaithambi et al., 2012). با توجه به پیچیدگی ترکیبات موجود در پساب صنایع نظامی و محدودیت‌های روش‌های سنتی تصفیه، این مطالعه با هدف بررسی کارایی فناوری تله ذره‌گیر (BTF)^۲ در بهبود کیفیت پساب و کاهش سه پارامتر کلیدی آلاینده‌گی شامل BOD، COD و TDS^۳ انجام می‌شود. نتایج این تحقیق می‌تواند به توسعه فناوری‌های پایدارتر و کارآمدتر برای تصفیه این نوع فاضلاب‌ها کمک کند. در ردیابی این هدف، پژوهش حاضر در پی پاسخ‌گویی به این سؤال اساسی است: چه تغییرات معناداری در مقادیر BOD، COD و TDS در طول سه دوره زمانی وجود دارد؟

۱. پیشینه پژوهش

میکوکا و زلینسکا (۲۰۲۰) متداول‌ترین روش مدیریت پساب‌های صنایع تقطیری و تخمیری را استفاده از آن‌ها برای تهویه خاک معرفی نمودند که این امر مستلزم غلیظ کردن فاضلاب است و ممکن است به دلیل نیتروژن بالای آن باعث آلودگی خاک شود. بنابراین، روش ته‌نشینی تقطیر ارجح می‌گردد. در این مطالعه روش‌های تصفیه بیولوژیکی و فیزیکوشیمیایی و فناوری‌های ترکیبی مورد بحث قرار داده شده است؛ زیرا برای تخریب مؤثر مواد آلی، به‌ویژه از نظر استفاده مجدد از آب، یک تصفیه جامع که شامل چندین فناوری متوالی است باید به‌کار گرفته شود. همچنین بهبود روش‌های تصفیه غشایی و یافتن مواد غشایی جدید که رسوب غشایی را کاهش دهد و نفوذ، مصرف انرژی و میزان احتباس مواد را بهینه نماید، ضروری است. در اینجا، در بین روش‌ها توجه ویژه‌ای به ته‌نشینی تقطیر شده است زیرا منبع ارزشمندی از پلی‌ساکاریدها و اسیدهای چرب فرار (VFAs)^۴ و همچنین آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی از جمله پلی‌فنول‌ها و سایر ترکیبات زیست‌فعال مورد علاقه در صنایع دارویی، آرایشی

-
1. Ultraviolet
 2. Bit Trap Filter
 3. Total Dissolved Solids
 4. Volatile Fatty Acids



و غذایی است. در این میان شناسایی و استفاده از حلال‌های زیست‌تخریب‌پذیر، قابل استفاده مجدد و غیرسمی برای استخراج مؤثر ترکیبات زیست‌فعال و در تعامل با فناوری‌های مبتنی بر توسعه پایدار ضروری است (Mikucka & Zielińska, 2020).

بالبوئا (۲۰۲۱) تصفیه فاضلاب حاصل از تولید اتانول را با تقطیر غشایی بررسی نموده است. این فاضلاب در دمای ۷۰-۹۰ درجه سانتی‌گراد از ستون تقطیر خارج می‌گردد و به ازای هر لیتر اتانول، ۱۲-۲۰ لیتر ته‌نشینی حاصل می‌شود. محدودیت اصلی تقطیر غشایی نیاز به انرژی برای گرم‌کردن جریانی است که باید تصفیه شود. در اینجا، آزمایش‌ها با استفاده از محلول ته‌نشینی مصنوعی و صنعتی انجام شده است. در طی مراحل تصفیه اجزای غیرفرار از غشا به‌طور کامل رد شدند درحالی‌که اجزای فرار به‌طور کامل جدا شدند که می‌توان به‌عنوان اسیداستیک بازیافت نمود. باین‌حال، حذف COD مناسب و قابل‌مقایسه با سایر روش‌های ته‌نشینی بود. تجزیه و تحلیل امکان‌سنجی فنی و اقتصادی نشان داد که تقطیر غشایی برای استفاده در کارخانه تولید اتانول و تصفیه فاضلاب مناسب است (Balbuena, 2021).

لیو و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی با عنوان «مروری بر حذف میکروپلاستیک‌ها در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب جهانی: ویژگی‌ها و مکانیسم‌ها» به بررسی رفتار میکروپلاستیک‌ها در فناوری‌های مختلف تصفیه فاضلاب پرداختند. آن‌ها از روش تحلیل کمی برای مقایسه کارایی حذف میکروپلاستیک‌ها در ۳۸ تصفیه‌خانه فاضلاب در ۱۱ کشور استفاده کردند و دریافتند که فناوری‌های مبتنی بر فیلتر عملکرد بهتری در حذف میکروپلاستیک‌ها دارند. همچنین، مشخص شد که میکروپلاستیک‌های با اندازه بزرگ‌تر به‌راحتی در مراحل اولیه ته‌نشینی جدا می‌شوند، درحالی‌که میکروپلاستیک‌های کوچک‌تر و پلی‌اتیلن توسط باکتری‌های موجود در سیستم بیورآکتور به دام می‌افتند. این مطالعه تأکید کرد که تأثیرات منفی میکروپلاستیک‌ها و محصولات ناشناخته ناشی از تغییرات آن‌ها نیازمند تحقیقات بیشتری است (Liu et al. 2021).

دانگ و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی با عنوان «مقایسه تحلیل‌های استروژنی، طیف‌سنجی و سم‌شناسی آب، فاضلاب و فاضلاب‌های فرآوری‌شده در پایگاه‌های نظامی

منتخب» به بررسی کارایی روش‌های مختلف تصفیه فاضلاب برای کاهش استروژنیسیته و سایر شاخص‌های زیستی منفی پرداختند. آن‌ها چهار فرایند تصفیه شامل روش‌های معمول و پیشرفته را آزمایش کردند و نشان دادند که فناوری‌های پیشرفته از جمله غشاهای بیولوژیکی و اکسیداسیون پیشرفته، کاهش قابل توجهی در استروژنیسیته (تا ۱۰۰٪) و سایر شاخص‌های زیستی منفی (بین ۶۵٪ تا ۱۰۰٪) ایجاد کردند.

نتایج نشان داد که استفاده از بیورآکتورهای غشایی بی‌هوازی و سیستم‌های تصفیه‌ای با فیلتراسیون غشایی و فیلتر کربن فعال، بالاترین درصد کاهش آلودگی را داشته و کیفیت آب تولیدی بهبود یافته است. همچنین، ارتباط معنی‌داری بین استروژنیسیته، سمیت سلولی و واکنش‌پذیری تیول مشاهده شد که امکان استفاده از واکنش‌پذیری تیول برای غربالگری اولیه استروژنیسیته را فراهم می‌کند (Dong et al. 2021).

تحقیقات احمد و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد که استفاده هم‌زمان از ریزجلبک‌ها برای تصفیه فاضلاب و تولید سوخت زیستی می‌تواند یک رویکرد اقتصادی برای رفع مسائل مربوط به تصفیه باشد. مطالعه ایشان کاربرد جلبک‌ها در تصفیه زیستی، تولید انرژی زیستی و تولید ترکیبات زیست‌فعال را ارائه می‌دهد. همچنین مشکلات و فرصت‌های فعلی در بخش مبتنی بر جلبک را که اخیراً بسیار امیدوارکننده شده است، نشان می‌دهد (Ahmad et al., 2022). طبق پژوهش آن و همکاران (۲۰۲۳)، مشخص شد که روش غشای مبتنی بر «اکسید گرافن»^۱ دارای خواص بسیار عالی مانند پایداری شیمیایی خوب، هزینه آماده‌سازی کم، عملکرد عالی فیلتراسیون و نگهداری و کنترل رسوب غشایی نسبتاً راحت است. براساس این ویژگی‌ها، انتظار می‌رود غشای «اکسید گرافن» در تصفیه پیشرفته فاضلاب صنعتی به کار رود (An et al., 2023).

اوکونکو و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی با عنوان «تحلیل سری زمانی TSS، TDS، BOD، COD و کدورت پساب در اتاق‌های پیش‌فیلتراسیون تانک سپتیک خانگی پیشرفته» به بررسی سیستم تانک سپتیک پیشرفته در تصفیه اولیه پساب خانگی پرداختند. در این مطالعه، نتایج

1. Graphene Oxide
2. Total Suspended Solids



نشان داد که این سیستم قادر است به طور قابل توجهی TDS، کدورت و BOD نمونه‌ها را قبل از فیلتراسیون کاهش دهد. همچنین COD و TDS نمونه‌ها با گذشت زمان کاهش و افزایش یافت که به دلیل ایجاد فشار در سیستم بود. این یافته‌ها به تعیین زمان مناسب برای انتقال مایعات به مرحله بعدی بازیافت (فیلتراسیون شنی) کمک کرد. بهینه‌سازی طراحی و عملیات سیستم تانک سپتیک پیشرفته برای دستیابی به هدف بازیافت و تبدیل بهینه بیوسماندها حائز اهمیت است (Okonkwo et al. 2023).

احمد و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی با عنوان «استراتژی‌های حذف و مدیریت میکروپلاستیک‌ها در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب» به بررسی چالش‌های مربوط به دفع میکروپلاستیک‌ها از طریق فاضلاب صنعتی و اثرات زیست‌محیطی آن‌ها پرداخته‌اند. این مطالعه نشان داد که میکروپلاستیک‌ها به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متنوع خود، تعاملات مختلفی با فناوری‌های تصفیه دارند و بازده حذف آن‌ها متفاوت است. روش‌های مختلفی مانند زیست‌پالایی، راکتورهای غشایی (MBR)، انعقاد الکتریکی و تکنیک‌های فیلتر پیشرفته برای حذف میکروپلاستیک‌ها ارزیابی شدند. از میان این روش‌ها، سیستم‌های MBR با توانایی حذف بیش از ۹۹/۹ درصد میکروپلاستیک‌ها عملکرد بهتری داشتند، هرچند هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی آن‌ها بالاست. این پژوهش تأکید دارد که برای کاهش آلودگی میکروپلاستیک‌ها، استفاده از جایگزین‌های پلاستیکی و اعمال کنترل‌های سخت‌گیرانه ضروری است. علاوه بر این، اصلاح پیش‌فرایندها به منظور کاهش اندازه و تغییر مشخصات سطحی میکروپلاستیک‌ها می‌تواند بازده حذف را افزایش دهد (Ahmed et al 2024).

حمّلائی و همکاران (۲۰۲۵) در پژوهشی با عنوان «طراحی و ساخت یک واحد تصفیه آب معکوس دوگانه برای استفاده نظامی و اضطراری» به طراحی و ساخت یک واحد تصفیه آب قابل حمل پرداختند که می‌تواند آب قابل شرب از منابع مختلف طبیعی در شرایط نظامی و اضطراری تأمین کند. این واحد تصفیه شامل فرایندهایی مانند تبادل یون واحدهای فیلتراسیون واحد نرم‌سازی آب و اسمز معکوس است. در آزمایش‌های انجام‌شده با استفاده

از نمونه‌های آب از رودخانه کادونا و دیگر منابع آب، این واحد تصفیه توانسته است با موفقیت مواد مضر و فلزات سنگین را حذف کرده و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آب را به استانداردهای ملی کیفیت آب آشامیدنی نیجریه برساند. به‌طور خاص، این واحد فیلتراسیون توانسته است کدورت آب را از ۱۱۰۵ «NTU»^۱ به ۴/۰۵ «NTU» کاهش دهد و سختی آب را از ۲۰۸ میلی‌گرم بر لیتر به ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر کاهش دهد. همچنین، عملکرد واحد اسمز معکوس در حذف یون‌های ناخواسته و فلزات سنگین، به‌ویژه کادمیوم، گزارش شده است که با افزایش تعداد واحدهای اسمز معکوس، می‌توان به بهبود کارایی در حذف فلزات سنگین دست‌یافت (Hamalai et al. 2025).

زارعی محمودآبادی و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی با عنوان «تأثیر فرایند انعقاد و لخته‌سازی همراه با جذب سطحی در حذف بور از فاضلاب صنایع؛ مطالعه موردی: صنایع کاشی و سرامیک» به بررسی فرایندهای انعقاد، لخته‌سازی و جذب سطحی برای حذف عنصر بور از فاضلاب صنعتی پرداختند. در این مطالعه آزمایشگاهی، تأثیر پارامترهایی نظیر pH، غلظت پلی آلومینیوم کلراید و استفاده از پلیمرهای آنیونی و کاتیونی بر راندمان حذف بور بررسی شد. نتایج نشان داد که با استفاده از pH بهینه ۸ و غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر پلی آلومینیوم کلراید، راندمان حذف به ۳۵/۷ درصد رسید. ترکیب این فرایند با پلیمرهای آنیونی و کاتیونی راندمان حذف را به ۵۴/۲ درصد افزایش داد. همچنین، در فرایند جذب سطحی با pH بهینه ۵ و زمان تماس ۱۵ دقیقه، راندمان حذف به ۵۰ درصد رسید. بررسی ایزوترم‌ها نشان داد که جذب بور از ایزوترم فروندلیچ و سینتیک درجه اول تبعیت می‌کند. نتایج این پژوهش نشان داد که فرایند تلفیقی انعقاد و لخته‌سازی با جذب سطحی می‌تواند یک روش مؤثر برای حذف بور از فاضلاب صنعتی باشد (زارعی محمودآبادی و همکاران، ۱۳۹۹).

اصل هاشمی و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی با عنوان «حذف مواد آلی موجود در فاضلاب چرم‌سازی به روش هوازی و بی‌هوازی» به بررسی بار آلی فاضلاب خام چرم‌سازی و تأثیر فرایندهای تصفیه هوازی و بی‌هوازی بر کاهش آن پرداختند. در این مطالعه، مقادیر



بار آلی با استفاده از شاخص‌های «DOC»^۱ و «UV₂₅₄» مشخص شد و نقش وزن مولکولی ترکیبات با استفاده از اولترافیلتراسیون بررسی گردید. نتایج نشان داد که میانگین غلظت DOC در فاضلاب خام برابر ۹۰۰ میلی‌گرم در لیتر بوده و تصفیه هوازی توانسته است به‌طور متوسط ۱۵ درصد از DOC و ۵۰ درصد از «UV₂₅₄» را کاهش دهد. این پژوهش همچنین نشان داد که مرحله هوازی در کاهش ترکیبات با وزن مولکولی کم مؤثر است. باین‌حال، برخی مواد مقاوم و سمی، حتی پس از تصفیه، باقی می‌مانند و ممکن است در طول فرایند تصفیه تغییر شکل داده و به ترکیبات جدید تبدیل شوند. این یافته‌ها اهمیت توجه به مواد مقاوم و سمی در فاضلاب چرم‌سازی را برجسته می‌سازد (اصل هاشمی و همکاران، ۱۴۰۰).

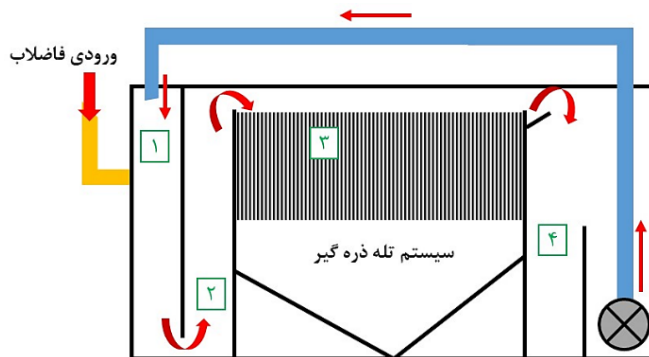
فتاحی و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی با عنوان «بررسی عملکرد حوضچه متعادل‌سازی در راندمان تصفیه فاضلاب بهداشتی به روش لجن فعال» تأثیر استفاده از حوضچه متعادل‌ساز در بهبود راندمان تصفیه فاضلاب پادگان نظامی را مورد بررسی قرار دادند. این تحقیق نشان داد که نوسانات بالای دبی ورودی به تصفیه‌خانه در اماکن کم‌جمعیت مانند پادگان‌ها می‌تواند بر کارایی فرایند لجن فعال اثر منفی بگذارد. نتایج حاکی از آن بود که بدون استفاده از حوضچه متعادل‌ساز، راندمان حذف BOD₅، COD، TSS و آمونیاک به ترتیب ۶۱٪، ۶۸٪، ۲۴٪ بود که با استانداردهای پساب خروجی سازگار نبود؛ اما با به‌کارگیری حوضچه متعادل‌ساز و تثبیت دبی ورودی، راندمان حذف این پارامترها به‌طور میانگین به ۹۰٪، ۸۹/۱۹٪ و ۸۱/۵۹٪ افزایش یافت. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه حوضچه متعادل‌سازی در بهبود فرایند تصفیه و ارتقای کیفیت پساب خروجی است (فتاحی و همکاران، ۱۴۰۰).

در پژوهش‌های پیشین، از فناوری‌های متداول تصفیه آب و پساب استفاده شده است که به دلیل محدودیت‌هایی همچون راندمان پایین یا هزینه‌های بالا، نیاز به بهبود دارند. پژوهش حاضر با معرفی سیستم تصفیه تله ذره‌گیر، به‌عنوان روشی نوآورانه تلاش می‌کند این مشکلات را حل کند. این فناوری نه تنها باعث افزایش کارایی تصفیه می‌شود، بلکه هزینه‌های عملیاتی را کاهش داده و اثرات زیست‌محیطی را به حداقل می‌رساند.

۲. روش‌شناسی تحقیق

پژوهش حاضر به لحاظ هدف و با توجه به ماهیت تبیینی خود، جزئی از تحقیقات ترکیبی بنیادی و کاربردی است و از نظر روش‌شناسی، جزو تحقیقات توصیفی-تحلیلی محسوب می‌شود. روش جمع‌آوری اطلاعات در این تحقیق به صورت تجربی و با استفاده از نمونه‌برداری از پساب انجام شده است. در این مطالعه، پساب صنایع نظامی به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تولید آلودگی مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا پساب مورد نیاز از سازمان تحقیقات و جهاد خودکفایی نراجا گرفته شده و توسط گالن‌های پلی‌اتیلنی ۲۰ لیتری به آزمایشگاه مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران جهت سنجش اولیه پارامترهای آلاینده‌گی و سپس به آزمایشگاه تخصصی هیدروبیولوژی و لیمنولوژی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران جهت تصفیه منتقل شد.

سیستم تصفیه تله ذره‌گیر با ابعاد $25 \times 15 \times 20$ سانتی‌متر از جنس شیشه مطابق با شکل (۱)، ساخته شد. این سیستم دارای سه بخش شامل بخش جداسازی مواد سطحی با چگالی کم، بخش جداسازی ذرات درشت با چگالی بالا و بخش جداسازی ذرات ریز و معلق است.



شکل ۱: سیستم تصفیه تله ذره‌گیر با نمایش مسیر جریان آب (فلش‌های قرمز) و سه بخش شامل جداسازی ذرات سطحی با چگالی کم (۱)، جداسازی ذرات درشت با چگالی بالا (۲) و جداسازی ذرات ریز معلق (۳)

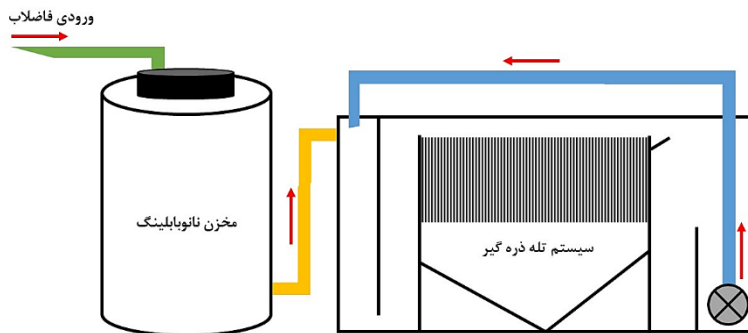


در بخش جداسازی مواد سطحی و سرنشین‌ها، مواد سبک مانند کف و مواد روغنی جدا می‌شوند. مواد سنگین در مرحله بعدی جداسازی شده و بعضاً مواد معلق که در اثر آبگیری به سنگین تبدیل شده‌اند. بخش بعدی جداسازنده، مواد معلق هستند که هم‌زمان با تبدیل جریان متلاطم به تیغه‌ای توسط تله ذره‌گیر جدا می‌شوند. نتیجه کلی آبی با حداقل آلودگی‌ها است.

در آزمایشگاه مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران پارامترهای BOD (اکسیژن‌خواهی زیستی)، COD (اکسیژن‌خواهی شیمیایی)، TDS (کل جامدات محلول) اندازه‌گیری شد. پس از سنجش اولیه، پساب در آزمایشگاه لیمنولوژی و هیدروبیولوژی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران در مخزن پلی‌اتیلنی طی سه ساعت با تأثیر فرایند نانوبابلینگ اکسیژن خالص قرار گرفت و سپس وارد سیستم تصفیه تله ذره‌گیر شد. هر ۲۴ ساعت یک نمونه از پساب تصفیه‌شده (مرحله نهایی تصفیه) گرفته شد و پارامترهای آلودگی مجدداً اندازه‌گیری شدند (شکل ۲). نمونه‌برداری‌ها به صورت تصادفی طی بازه ده روز صورت گرفت و هر آزمایش با سه تکرار انجام شد. در نهایت براساس نتایج به دست آمده، میزان عملکرد روش تصفیه به کار گرفته شده محاسبه شد.

برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از آزمون Repeated Measures ANOVA استفاده شد. این آزمون برای مقایسه تغییرات پارامترهای آلودگی در طول زمان و در مراحل مختلف تصفیه به کار رفت. آزمون Repeated Measures ANOVA به محقق این امکان را می‌دهد که تأثیرات زمان و فرایندهای مختلف تصفیه را بر روی هر یک از پارامترهای آلودگی ارزیابی کند و تغییرات آن‌ها را بررسی نماید. پس از تجزیه و تحلیل داده‌ها، عملکرد سیستم تصفیه تله ذره‌گیر با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمون Repeated Measures ANOVA محاسبه شد. از آنجاکه یکی از پیش شرط‌های این آزمون، همسانی واریانس است، برای ارزیابی این فرض از آزمون Mauchly's Test of Sphericity استفاده شد. در مواردی که این فرض نقض شد، اصلاحات Greenhouse-Geisser و Huynh-Feldt برای تنظیم درجات آزادی و افزایش دقت تحلیل به کار

گرفته شدند. به طور خاص، تغییرات در مقادیر BOD، COD و TDS در مراحل مختلف تصفیه و در زمان‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت.



شکل ۲: مراحل فرایند اعمال‌شده در تصفیه پساب سازمان تحقیقات و جهاد خودکفایی نزا

۳. تجزیه و تحلیل یافته‌ها

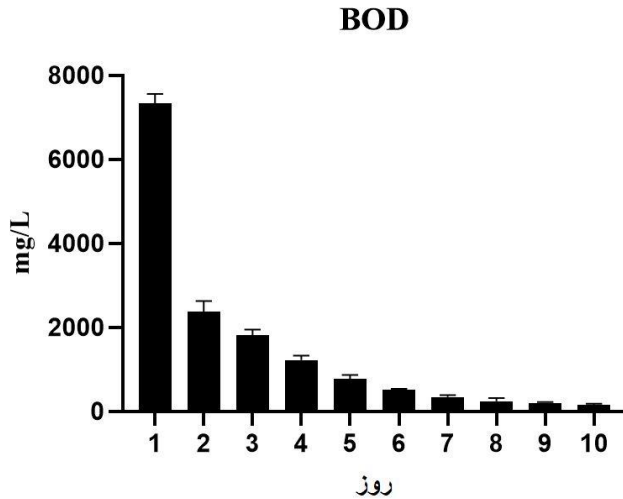
پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کارایی سیستم تصفیه تله ذره‌گیر در کاهش آلاینده‌های پساب صنایع نظامی انجام شد. این نوع پساب‌ها به دلیل مقادیر بالای آلاینده‌هایی همچون BOD، COD و TDS، خطرات محیط زیستی قابل توجهی به همراه دارند و نیازمند تصفیه مؤثر پیش از رهاسازی به محیط زیست هستند. در این راستا، آزمایش‌هایی در بازه زمانی ده روزه طراحی و اجرا شد تا تغییرات این پارامترها و عملکرد سیستم تصفیه مورد سنجش قرار گیرد. در ادامه، نتایج حاصل از این آزمایش‌ها به تفکیک ارائه و تحلیل شده است تا میزان اثربخشی این سیستم و روند کاهش آلاینده‌ها به صورت دقیق‌تر بررسی شود.

BOD

یکی از معضلات تصفیه فاضلاب و رهاسازی آن به محیط زیست وجود BOD بالا است که بوی نامطبوعی نیز با خود به همراه دارد. این پارامتر در پساب صنایع نظامی کمی بالا است و در شرایط بی‌هوایی بوی نامطبوعی ایجاد می‌نماید و یکی از فاکتورهایی است که پیش از رهاسازی به محیط لازم است اصلاح گردد. در فرایند تصفیه پساب صنایع نظامی، بیشینه



BOD پساب $7326/67 \pm 226/79$ میلی گرم بر لیتر در نمونه اول آزمایش و کمینه BOD پساب $159/67 \pm 25/32$ میلی گرم بر لیتر در نمونه دهم آزمایش ثبت شد. روند تغییرات BOD در طول دوره آزمایش در شکل (۳)، نمایش داده شده است. در مطالعات پیشین با انواع روش‌ها از جمله تصفیه زیستی (Kida et al., 1995; Mohamed et al., 2022)، لجن فعال و تصفیه بی‌هوازی (Ghosh et al., 1985; Garcia-Calderon et al., 1998; Lovato et al., 2019; Xu et al., 2021)، اسمز معکوس (Maiorella et al., 1983; Yavuz, 2007)، کربن فعال (Bernardo et al., 1997; Yang et al., 2010)، استفاده از اکسیدکننده‌ها (Patton et al., 2022; Pistocchi et al., 2022; Van Gijn et al., 2022)، پیش تصفیه کاتالیزوری (Chaudhari et al., 2008)، ته‌نشینی و تقطیر (مراغه زویک و عبدالله زاده، ۱۳۸۷؛ Gebreeyessus et al., 2019) مبادرت به کاهش BOD شده است. همچنین کارایی مؤثر سیستم تله ذره‌گیر در کاهش BOD براساس تحقیقات پیشین در فاضلاب‌های صنایع لبنی، انسانی و دامداری (۹۴٪) (مانی ورنوسفادرانی، ۱۳۹۴) و همچنین فاضلاب صنعت الکل‌سازی (۹۷٪) (معزی و همکاران، ۱۴۰۱؛ Moezzi and Javanshir Khoei, 2023) گزارش شده است. از طرف دیگر، در ارتباط با پساب نظامی Almedia و همکاران (2022) در سه مرحله تصفیه ترکیبی فیزیکی، زیستی و شیمیایی، به کاهش ۸۶٪ دست یافتند. در این تحقیق نیز با تکیه بر عملکرد نانوبالینگ و افزایش ظرفیت اکسیژنی فاضلاب و همچنین عملکرد سیستم تله ذره‌گیر در حذف ذرات و مواد اکسیدشده و کواگوله‌شده، کاهش مشخص BOD (۹۷/۸۲٪) مشاهده شد.



شکل ۳: تغییرات BOD طی ۱۰ روز در سیستم تصفیه تله ذره‌گیر

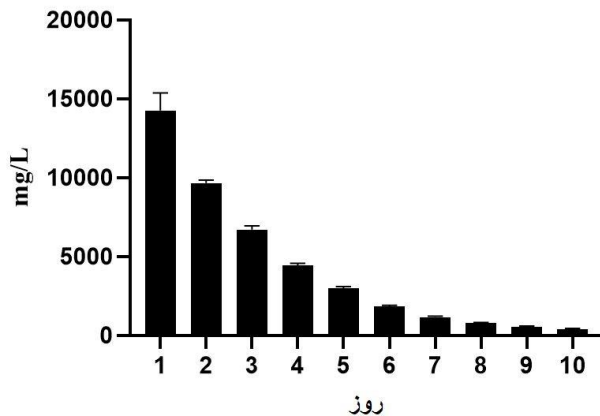
COD

وجود COD بالا در فاضلاب، علاوه بر داشتن خطرات محیط زیستی حاد، مانع پیشروی روند تصفیه فاضلاب با روش‌های معمول است. در پساب صنایع نظامی مقدار COD نیز بالا بوده و در صورت رهاسازی به محیط زیست، مخاطراتی در پیش خواهد داشت. در فرایند تصفیه پساب صنایع نظامی، بیشینه COD پساب $1118/76 \pm 14256/67$ میلی‌گرم بر لیتر در نمونه اول آزمایش و کمینه COD پساب $31/53 \pm 412/0$ میلی‌گرم بر لیتر در نمونه دهم آزمایش ثبت شد. روند تغییرات COD در طول دوره آزمایش در شکل (۴)، نمایش داده شده است. در مطالعات پیشین نیز با انواع روش‌ها از جمله تصفیه زیستی (Kida et al., 1995; Mohamed et al., 2022)، تجزیه هوازی (Thakur et al., 2014; Zhang et al., 2018)، لجن فعال و تصفیه بی‌هوازی (Ghosh et al., 1985; Fitzgibbon et al., 1995; Xu et al., 2022)، اسمز معکوس (Maiorella et al., 1983; Zhang et al., 2021)، کربن فعال (هادوی‌فر و همکاران، ۱۳۸۹؛ Lei et al., 2007; Yang et al., 2010; Hu et al., 2022)، پیش‌تصفیه حرارتی - کاتالیزوری (Lele et al., 1989; Chaudhari et al., 2008)، بستر غوطه‌ور (Reis and Sant'Anna Jr, 1985)، ته‌نشینی و تقطیر



(مراغه زویک و عبدالله زاده، ۱۳۸۷؛ Balbuena, 2021; Gebreyessus et al., 2019) و استفاده از اکسیدکننده‌ها (Vijayaraghavan et al., 1999; Mnadal et al., 2003; Yavuz, 2007; Patton et al., 2022)، مبادرت به کاهش COD شده است. همچنین کارایی مؤثر سیستم تله ذره‌گیر در کاهش COD براساس تحقیقات پیشین در فاضلاب‌های صنایع لبنی، انسانی و دامداری با کاهش ۹۴/۲۰٪ (مانی ورنوسفادرانی، ۱۳۹۴) و همچنین فاضلاب صنعت الکل‌سازی با کاهش ۹۵/۵۰٪ (معزی و همکاران، ۱۴۰۱؛ Moezzi and Javanshir Khoei, 2023) گزارش شده است. در این مطالعه نیز با تکیه بر عملکرد نانوبابلینگ و افزایش ظرفیت اکسیدنی فاضلاب و همچنین عملکرد سیستم تله ذره‌گیر در حذف ذرات و مواد اکسیدشده و کواگوله‌شده، کاهش مشخص COD (۹۷/۱۱٪) مشاهده شد.

COD



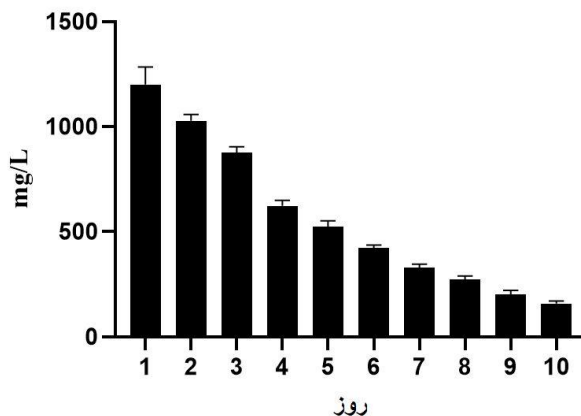
شکل ۴: تغییرات COD طی ۱۰ روز در سیستم تصفیه تله ذره‌گیر

TDS

یکی از مشخصه‌های فیزیکی فاضلاب، کل مواد جامد محلول است که دربرگیرنده مواد معدنی، نمک‌ها، فلزات محلول و سایر مواد آلی موجود در فاضلاب است. حضور این مواد خصوصاً در غلظت‌های بالا شرایط نامطبوع، در ارتباط با سلامت موجودات زنده را، ایجاد

می‌نمایند (رضایی، ۱۳۹۴). پساب صنایع نظامی غالباً بار ذرات بالایی دارند و با ورود مستقیم به محیط زیست می‌تواند موجب آلودگی و افزایش کدورت و اختلال در اکوسیستم شود. در فرایند تصفیه پساب صنایع نظامی، بیشینه TDS پساب $1200/00 \pm 84/35$ میلی‌گرم بر لیتر در نمونه اولیه آزمایش و کمینه TDS پساب $157/67 \pm 13/32$ میلی‌گرم بر لیتر در نمونه دهم ثبت شد. روند تغییرات TDS در شکل (۵)، نمایش داده شده است. در این تحقیق، کاهش TDS در اثر اکسید شدن مواد و کمک به تشکیل ذرات معلق که توسط تله ذره‌گیر از بدنه آبی جدا می‌شوند، صورت می‌گیرد (۸۶/۸۶٪). آن‌چنان‌که در مطالعات پیشین عنوان شده است کاهش TDS بر عملکرد تصفیه اثر مثبت داشته و روند کاهش آلاینده‌های موجود در فاضلاب را بهبود می‌بخشد (یزدانبخش و همکاران، ۱۳۹۸). در مطالعات دیگر این روند کاهش با روش‌های مختلف از ۷۶/۲۰٪ تا ۸۴/۱۰٪ گزارش شده‌اند (Taherizadeh et al., 2021). در سیستم طراحی شده، ذرات اکسیژن آزاد به بخشی خاصی از ترکیبات حمله نموده و با تغییر در ساختار شیمیایی، آن‌ها را به ذرات قابل ته‌نشینی تبدیل می‌کنند (Van Pistocchi et al., 2022; Gijn et al., 2022; Walpen et al., 2022). از طرف دیگر، حضور پررنگ‌تر مولکول‌های اکسیژن آزاد باعث افزایش غلظت OH و در نتیجه ایجاد اکسیدکننده‌های ثانویه که قوی‌تر و فعال‌تر هستند، می‌شود (Beltrán et al., 2001; Taherizadeh et al., 2021; Walpen et al., 2022).

TDS



شکل ۵: تغییرات TDS طی ۱۰ روز در سیستم تصفیه تله ذره‌گیر



با در نظر گرفتن راندمان روزانه سیستم تصفیه تله ذره گیر در ارتباط با فاکتور BOD، بیشترین بازده با ۶۷/۵۷٪ در روز دوم و کمترین بازده با ۱۵/۹۳٪ در روز نهم مشاهده می‌شود (جدول ۱). در نتیجه می‌توان عنوان نمود کاهش BOD در مراحل ابتدایی فرایند تصفیه به صورت مشخص تر و با شیب بیشتر در نمودار صورت گرفته است (شکل ۳). در ارتباط با فاکتور COD، بیشترین بازده با ۳۸/۰۷٪ در روز ششم و کمترین بازده با ۲۳/۸۴٪ در روز دهم مشاهده می‌شود (جدول ۱). با توجه به راندمان روزانه و شیب نمودار می‌توان عنوان نمود حذف COD با شیب ملایمی صورت گرفته است (شکل ۴). در ارتباط با فاکتور TDS، بیشترین بازده با ۲۸/۷۶٪ در روز چهارم و کمترین بازده با ۱۴/۲۸٪ در روز دوم مشاهده می‌شود (جدول ۱). با توجه به راندمان روزانه و شیب نمودار می‌توان عنوان نمود حذف TDS نیز مانند شاخص COD با شیب ملایمی طی فرایند تصفیه صورت گرفته است (شکل ۵). به صورت کلی و براساس نتایج به دست آمده میزان پارامترهای BOD، COD و TDS به ترتیب ۹۷/۸۲٪، ۹۷/۱۱٪ و ۸۶/۸۶٪ کاهش داشته‌اند که نشان از کارایی مؤثر سیستم تصفیه تله ذره گیر در تصفیه این نوع پساب دارند. در شکل (۶)، نمونه پساب اولیه و تصفیه شده نشان داده شده است.

جدول ۱: درصد راندمان روزانه سیستم تصفیه تله ذره گیر در کاهش فاکتورهای مورد سنجش

روز	BOD	COD	TDS
۲	۶۷/۵۷	۳۲/۲۴	۱۴/۲۸
۳	۲۳/۸۰	۳۰/۵۵	۱۴/۹۰
۴	۳۲/۲۹	۳۳/۹۰	۲۸/۷۶
۵	۳۶/۵۴	۳۲/۸۷	۱۶/۱۹
۶	۳۴/۱۰	۳۸/۰۷	۱۹/۲۰
۷	۳۲/۶۴	۳۶/۷۸	۲۲/۴۱
۸	۲۹/۷۳	۳۳/۶۰	۱۶/۸۹
۹	۱۵/۹۳	۳۰/۰۷	۲۶/۰۷
۱۰	۲۱/۷۳	۲۳/۸۴	۲۱/۶۹



شکل ۶: نمونه پساب تصفیه شده طی ۱۰ روز (سمت راست) و نمونه پساب اولیه (سمت چپ) در این مطالعه، به منظور تحلیل تغییرات پارامترهای کیفیت آب در طول زمان، بررسی معناداری تغییرات پارامترهای BOD، COD و TDS در سه دوره زمانی مختلف انجام شد. مقادیر سه دوره زمانی در جدول (۲)، آمده است.

جدول ۲: نتایج پارامترها طی ۱۰ روز با ۳ تکرار (دوره)

روز	BOD			COD			TDS		
	دوره اول	دوره دوم	دوره سوم	دوره اول	دوره دوم	دوره سوم	دوره اول	دوره دوم	دوره سوم
۱	۷۵۰۰	۷۴۱۰	۷۰۷۰	۱۴۸۰۰	۱۲۹۷۰	۱۵۰۰۰	۱۲۰۰	۱۲۸۴/۳۵	۱۱۱۵/۶۶
۲	۲۶۴۵	۲۱۳۷	۲۳۴۷	۹۸۰۷	۹۷۱۰	۹۴۶۵	۱۰۱۴	۱۰۰۹	۱۰۶۳
۳	۱۸۹۸	۱۸۸۲	۱۶۵۲	۶۵۹۷	۶۵۵۰	۶۹۸۰	۸۳۷	۸۹۲	۸۷۷
۴	۱۲۶۹	۱۱۰۷	۱۳۰۲	۴۵۹۲	۴۲۹۶	۴۴۱۵	۵۹۷	۶۲۷	۶۴۷
۵	۷۹۶	۸۵۹	۶۷۹	۲۸۹۴	۲۹۳۴	۳۱۰۲	۴۹۷	۵۵۴	۵۱۷
۶	۴۹۵	۵۴۰	۵۰۳	۱۷۹۴	۱۹۱۴	۱۸۲۲	۴۳۷	۴۰۹	۴۲۱
۷	۳۶۹	۳۷۲	۲۹۵	۱۲۱۳	۱۱۰۲	۱۱۸۱	۳۲۵	۳۱۱	۳۴۷
۸	۳۱۹	۲۳۵	۱۷۴	۷۹۶	۷۱۶	۸۰۹	۲۷۲	۲۵۶	۲۸۹
۹	۱۸۱	۲۱۷	۲۱۴	۶۰۳	۴۹۳	۵۲۷	۱۹۴	۲۲۳	۱۸۷
۱۰	۱۳۱	۱۶۹	۱۷۹	۳۸۰/۴۷	۴۴۳/۵۳	۴۱۲	۱۵۱	۱۷۳	۱۴۹



تغییرات این پارامترها می‌توانند اطلاعات مهمی در خصوص عملکرد سیستم‌های تصفیه آب و تأثیر آن‌ها بر کیفیت آب فراهم کنند. برای ارزیابی دقیق‌تر این تغییرات و تحلیل همسانی واریانس در داده‌های تکراری مربوط به این پارامترها، از آزمون *Mauchly's Test of Sphericity* استفاده شده است.

این آزمون برای ارزیابی شرایط مناسب برای انجام تحلیل‌های واریانس تکراری (*Repeated Measures ANOVA*) به کار می‌رود و بررسی می‌کند که آیا فرض همسانی واریانس برای متغیرهای مختلف برقرار است یا خیر.

در صورتی که فرض همسانی نقض شود، نتایج تحلیل واریانس ممکن است نادرست باشد و نیاز به اصلاحات آماری خواهد داشت. نتیجه آزمون *Mauchly* برای پارامتر *TDS* نشان داد که فرض همسانی واریانس نقض شده است ($p\text{-value}=0.047$)، زیرا مقدار p کمتر از سطح معنی‌داری 0.05 است. این به این معناست که داده‌های مربوط به *TDS* شرایط همسانی واریانس را ندارند. به همین دلیل، برای اصلاح این نقض و تحلیل دقیق‌تر داده‌ها، از روش‌های اصلاحی *Greenhouse-Geisser* (با مقدار 0.651) و *Huynh-Feldt* (با مقدار 0.716) استفاده شده است.

برای پارامتر *COD*، نتایج آزمون *Mauchly* نشان داد که فرض همسانی واریانس نیز نقض شده است ($p\text{-value}=0.004$) که به معنی نیاز به اصلاحات آماری است. به همین دلیل، برای این پارامتر نیز از روش‌های اصلاحی مشابه *Greenhouse-Geisser* (با مقدار 0.574) و *Huynh-Feldt* (با مقدار 0.603) استفاده شد. در مورد پارامتر *BOD*، نتایج آزمون نشان داد که فرض همسانی واریانس نقض نشده است ($p\text{-value}=0.979$)، زیرا مقدار p بسیار بزرگ‌تر از سطح معنی‌داری 0.05 است. به این معناست که داده‌های *BOD* شرایط همسانی واریانس را دارند و نیازی به اعمال اصلاحات آماری برای تحلیل دقیق‌تر این داده‌ها نیست.

مقادیر *Greenhouse-Geisser* (با مقدار 0.995) و *Huynh-Feldt* (با مقدار 1.000) نیز نشان می‌دهند که اصلاحات برای این داده‌ها اعمال نشده است (جدول ۳).

جدول ۳: نتایج آزمون Mauchly برای ارزیابی همسانی واریانس در پارامترهای مورد مطالعه

Lower-bound	Huynh-Feldt	Epsilon ^b		سطح معناداری	درجه آزادی	Approx. Chi-Square	Mauchly	Within Subjects Effect	
		Greenhouse-Geisser						TDS	Period
۰/۵۰۰	۰/۷۱۶	۰/۶۵۱		۰/۰۴۷	۲	۶/۱۲۶	۰/۴۶۵	TDS	Period
۰/۵۰۰	۰/۶۰۳	۰/۵۷۴		۰/۰۰۴	۲	۱۰/۸۸۰	۰/۲۵۷	COD	
۰/۵۰۰	۱/۰۰۰	۰/۹۹۵		۰/۹۷۹	۲	۰/۰۴۲	۰/۹۹۵	BOD	

در (جدول ۴)، نتایج آزمون‌های Multivariate نشان‌دهنده اثر معنادار زمان (Period) بر مجموعه‌ای از پارامترهای مورد بررسی است. چهار آزمون مختلف برای ارزیابی این اثر استفاده شده‌اند: Pillai's Trace، Wilks' Lambda، Hotelling's Trace و Roy's Largest Root. ابتدا، آزمون Pillai's Trace نتیجه‌ای معنادار با مقدار F برابر ۲/۴۵۱ و مقدار p برابر ۰/۰۳۴ به دست داد که نشان‌دهنده تغییرات معنادار در داده‌ها به دلیل اثر زمان است.

مقدار Partial Eta Squared برابر ۰/۳۸۰ بود که نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه زمان بر واریانس داده‌ها است. همچنین، آزمون Wilks' Lambda نیز مشابه با Pillai's Trace نتایج معناداری را با مقدار F برابر ۲/۳۰۹ و مقدار p برابر ۰/۰۴۶ ارائه داد که اثر زمان را تأیید می‌کند. مقدار Partial Eta Squared در این آزمون برابر ۰/۳۸۱ بود که نشان‌دهنده تأثیر مشابه زمان بر واریانس داده‌ها است.

در مقابل، آزمون Hotelling's Trace با مقدار F برابر ۲/۱۶۵ و مقدار p برابر ۰/۰۶۲ نتیجه‌ای غیرمعنادار به دست داد که نشان‌دهنده عدم تأثیر معنادار زمان بر پارامترهای مورد بررسی است. باین حال، مقدار Partial Eta Squared برابر ۰/۳۸۲ بود که نشان‌دهنده تأثیر نسبتاً بالا است؛ اما این نتیجه به دلیل عدم معناداری آزمون باید با احتیاط تفسیر شود. در نهایت، آزمون Roy's Largest Root مقدار F برابر ۲/۸۶۶ و مقدار p برابر ۰/۰۵۸ به دست داد که نشان‌دهنده اثر زمان بر داده‌ها است؛ اما چون مقدار p اندکی بیشتر از ۰/۰۵ است، این اثر به عنوان یک اثر معنادار ضعیف در نظر گرفته می‌شود. مقدار Partial Eta Squared برابر ۰/۴۱۷ بود که بزرگ‌ترین مقدار در بین آزمون‌ها بود و نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه زمان بر واریانس داده‌ها است.



جدول ۴: نتایج آزمون‌های چند متغیره برای بررسی اثر دوره زمانی

Partial Eta Squared	.Sig	Error df	Hypothesis df	F	Value	Within Subjects Effect	
۰/۰۳۴	۰/۳۸۰	۳۲	۸	۲/۴۵۱	۰/۷۶	Pillai's Trace	Period
۰/۰۴۶	۰/۳۸۱	۳۰	۸	۲/۳۰۹	۰/۳۸۳	Wilks' Lambda	
۰/۰۶۲	۰/۳۸۲	۲۸	۸	۲/۱۶۵	۱/۲۳۷	Hotelling's Trace	
۰/۰۵۸	۰/۴۱۷	۱۶	۴	۲/۸۶۶	۰/۷۱۷	Roy's Largest Root	

در نتیجه، نتایج این تحلیل‌ها حاکی از آن است که تغییرات در پارامترهای BOD، COD و TDS در پساب صنایع نظامی تحت تأثیر دوره‌های مختلف زمانی معنادار است و آزمون‌های Pillai's Trace و Wilks' Lambda بیشترین تأثیر زمان را تأیید می‌کنند. سایر آزمون‌ها، همچون Hotelling's Trace و Roy's Largest Root، نتایج غیرمعناداری داشتند؛ اما مقدار Partial Eta Squared نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه زمان بر واریانس داده‌ها است. این تأثیرات نشان می‌دهند که فرایند تصفیه پساب، به‌ویژه در کاهش آلاینده‌ها و بهبود کیفیت آب، در طول زمان به‌طور مؤثری عمل کرده است. به‌طور کلی، این نتایج از تأثیر معنادار دوره‌های زمانی بر تغییرات پارامترهای محیطی و کیفیت پساب حکایت دارند و حاکی از کارآمدی فرایند تصفیه در بهبود کیفیت آب در طول زمان هستند.

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

با توجه به افزایش فعالیت‌های انسانی و متعاقباً افزایش ورود آلاینده‌های انسان‌ساز به منابع آبی، مشکلات بسیاری در تأمین آب جوامع بشری ایجاد شده است. در ایران نیز به‌عنوان کشوری در حال توسعه، استفاده مجدد از پساب‌ها و فاضلاب‌ها مورد چالش است. در این تحقیق، تصفیه پساب صنعتی سازمان تحقیقات و جهاد خودکفایی نازجا با استفاده از سیستم تله ذره‌گیر مورد مطالعه قرار گرفت.

نتایج نشان داد که مقدار BOD، COD و TDS در نمونه اولیه به ترتیب $۷۳۲۶/۶۷ \pm ۲۲۶/۷۹$ ، $۱۴۲۵۶/۶۷ \pm ۱۱۱۸/۷۶$ و $۱۲۰۰/۸۴ \pm ۰۰/۳۵$ میلی‌گرم بر لیتر بود و پس از فرایند تصفیه این مقادیر به ترتیب $۱۵۷/۶۷ \pm ۱۳/۳۲$ ، $۴۱۲/۰۰ \pm ۳۱/۵۳$ ، $۱۵۹/۶۷ \pm ۲۵/۳۲$ میلی‌گرم بر لیتر کاهش

یافت. کاهش $97/82\%$ در BOD، $97/11\%$ در COD و $86/86\%$ در TDS تأثیر مثبت سیستم تصفیه بر کیفیت پساب را تأیید کرد.

نتایج همچنین نشان داد که تغییرات پارامترهای BOD، COD و TDS در پساب صنایع نظامی در طول زمان معنادار است. آزمون Mauchly نشان داد که فرض همسانی واریانس برای پارامترهای TDS و COD نقض شده و اصلاحات آماری لازم بود، درحالی‌که برای پارامتر BOD این فرض برقرار بود. همچنین، آزمون‌های Wilks' Lambda و Pillai's Trace تغییرات معناداری در هر سه پارامتر در طول زمان را نشان دادند که نشان‌دهنده تأثیر مثبت فرایند تصفیه بر کیفیت پساب است.

براساس نتایج گزارش‌شده، کارایی سیستم تله ذره‌گیر در فاضلاب صنایع دفاعی و نظامی مشخص و مورد تأیید است و با توجه به کارایی مناسب و ارزان‌قیمت بودن ساخت، سیستم تله ذره‌گیر به‌عنوان سیستمی کارآمد و مقرون‌به‌صرفه در زمینه تصفیه فاضلاب صنایع دفاعی و نظامی پیشنهاد می‌شود.



فهرست منابع

- آذرم، ل؛ جواد زاده، ن؛ جلیل زاده، ر (۱۳۹۹). بررسی توانایی جذب نیترات و فسفات از پساب استخرهای پرورش ماهیان گرمابی استان خوزستان توسط ریزجلبک *Chlorella vulgaris*. فصلنامه محیط زیست جانوری، ۱۲(۲)، ۲۹۸-۲۹۱.
- اصل هاشمی، ا (۱۴۰۰). حذف مواد آلی موجود در فاضلاب چرم سازی به روش هوازی و بی هوازی. کاربرد شیمی در محیط زیست، ۱۲ (۴۸)، ۱۱-۱۷.
- بگری، پ؛ خلیل زاده، ر (۱۳۹۵). بررسی تصفیه پساب واحدهای تولید الکل با استفاده از سیستم هیبریدی الکتروکواگولاسیون و بیج متوالی، سومین کنفرانس سراسری نوآوری های اخیر در شیمی و مهندسی شیمی، تهران.
- بیات غیاثی، ل (۱۳۹۸). مطالعه کارایی سیستم فیلتر زیستی در کاهش آلاینده های نیتروژن دار حاصل از فاضلاب های صنایع شیلانی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ص ۴۰-۵۰.
- پازوکی، م؛ شایگان، ج؛ افشاری، ع (۱۳۸۵). بررسی روش های تصفیه پساب واحدهای تولید الکل، محیط شناسی، ۳۲(۳۹)، ۱۹-۳۲.
- دهقانی، ف (۱۳۹۵). جداسازی فلز سنگین سرب از پساب خمیر کاغذ به کمک روش تصفیه فیلتر زیستی با تله ذره گیر و اثر این کار بر روی *Anodonta signea* و *Derisinae polymorpha*. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ص ۴۹-۵۸.
- رضایی، ک (۱۳۹۴). بررسی کارایی سیستم فیلتر زیستی (*Biologic Dry Oxygen Filter*) در تصفیه پساب حاصل از پرورش برخی آبزیان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ص ۸۶-۹۸.
- زارعی محمودآبادی، ط؛ ابراهیمی، ع.ا؛ احرامپوش، م.ح؛ اسلامی، ه (۱۳۹۹). تأثیر فرایند انعقاد و لخته سازی همراه با جذب سطحی در حذف بور از فاضلاب صنایع (مطالعه موردی: صنایع کاشی و سرامیک). مجله دانشگاه علوم پزشکی رفسنجان، ۱۹ (۱۰)، ۱۰۱۵-۱۰۳۴.
- شیبانی، س؛ صداقت پور، ع؛ مهربانی، م. م (۱۳۹۲). مروری بر روش های مختلف تصفیه فاضلاب های صنعتی، اولین همایش ملی و نمایشگاه تخصصی محیط زیست، انرژی و صنعت پاک، تهران.

- مانی ورنوسفادرانی، ا (۱۳۹۴). بررسی عملکرد سیستم فیلتر زیستی مبتنی بر بیوفیلم جلبکی در حذف نیتروژن، فسفر و کربن کل از فاضلاب خام شهری، دامداری و صنایع لبنی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ص ۷۹-۹۳.
- مراغه زویک، ر؛ عبدالله زاده، س (۱۳۸۷). روش نوین تصفیه پساب کارخانه الکل سازی، اولین کنفرانس بین المللی جایگاه ایمنی، بهداشت و محیط زیست در سازمان ها، اصفهان.
- معزی، س.ع؛ جوانشیر خویی، آ؛ رضایی، ک (۱۴۰۱). کارایی سیستم تله ذره گیر در تصفیه فاضلاب صنعتی کارخانه الکل سازی تخلیه شونده به سد منجیل در استان البرز، فصلنامه محیط زیست جانوری، ۱۵(۲)، ۲۶۵-۲۷۲.
- فتاحی، م.ه؛ حسینی، م؛ کرمی، س (۱۴۰۰). بررسی عملکرد حوضچه متعادل سازی در راندمان تصفیه فاضلاب بهداشتی به روش لجن فعال (مطالعه موردی: تصفیه خانه فاضلاب پادگان نظامی تیپ ۳۷). علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۶(۲)، ۳۸-۴۹.
- هادوی فر، م؛ یونسی، ح. ا؛ زینتی زاده، ع. ا (۱۳۸۹). استفاده از ازن و کربن فعال گرانولی در تصفیه پساب صنایع الکل سازی، مجله آب و فاضلاب، ۲۱(۲)، ۱۰-۱۸.
- یزدانبخش، ا. ر؛ اسلامی، ا؛ ابطحی، م؛ داننده اسکویی، م (۱۳۹۸). کارایی فرایند ازن زنی در راکتور مارپیچی با اختلاط بالا جهت حذف COD و رنگ از فاضلاب صنعت الکل سازی. فصلنامه بهداشت در عرصه، ۷(۳)، ۲۹-۳۹.



References

- Ahmad, A., Banat, F., Alsafar, H., & Hasan, S. W. (2022). Algae biotechnology for industrial wastewater treatment, bioenergy production, and high-value bioproducts. *Science of The Total Environment*, 806, 150585. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150585>
- Ahmed, S. F., Islam, N., Tasannum, N., Mehjabin, A., Momtahin, A., Chowdhury, A. A., ... & Mofijur, M. (2024). Microplastic removal and management strategies for wastewater treatment plants. *Chemosphere*, 347, 140648. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140648>
- Almeida, J., Monahan, A., Dionísio, J., Delgado, F., & Magro, C. (2022). Sustainability assessment of wastewater reuse in a Portuguese military airbase. *Science of the Total Environment*, 851, 158329. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158329>
- An, Y. C., Gao, X. X., Jiang, W. L., Han, J. L., Ye, Y., Chen, T. M., ... & Ren, N. Q. (2023). A critical review on graphene oxide membrane for industrial wastewater treatment. *Environmental Research*, 223, 115409. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115409>
- Asaithambi, P., Susree, M., Saravanathamizhan, R., & Matheswaran, M. (2012). Ozone assisted electrocoagulation for the treatment of distillery effluent. *Desalination*, 297, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.04.011>
- Balbuena, O. B. F. (2021). Sugarcane stillage treatment by membrane distillation. https://portal.peq.coppe.ufrj.br/images/documentos/Teses_e_disserta%C3%A7%C3%B5es/08_01_21_DSsc_Omayra.pdf
- Beltrán, F. J., García-Araya, J. F., & Álvarez, P. M. (2001). pH sequential ozonation of domestic and wine-distillery wastewaters. *Water Research*, 35(4), 929-936. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00358-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00358-4)
- Bernardo, E. C., Egashira, R., & Kawasaki, J. (1997). Decolorization of molasses' wastewater using activated carbon prepared from cane bagasse. *Carbon*, 35(9), 1217-1221. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(97\)00105-X](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(97)00105-X)
- Bruno, J.C., Eugénio, R., Adélio, R.G., & Álvaro, G. (2021). Energy performance factors in wastewater treatment plants: a review. *Journal of Cleaner Production*, 322, 129107. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129107>
- Cardoso, B. J., Rodrigues, E., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2021). Energy performance factors in wastewater treatment plants: A review. *Journal of Cleaner Production*, 322, 129107. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129107>
- Castellet-Viciano, L., Hernández-Chover, V., Hernández-Sancho, F., (2018). Modelling the energy costs of the wastewater treatment process: the influence of the aging factor. *Science of the Total Environment*, 625, 363-372. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.304>
- Chaudhari, P. K., Mishra, I. M., & Chand, S. (2008). Effluent treatment for alcohol distillery: catalytic thermal pretreatment (catalytic thermolysis) with energy recovery. *Chemical Engineering Journal*, 136(1), 14-24. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.03.006>
- David, M. K. (2017). A Review Paper on Industrial Waste Water Treatment Processes. University of Nigeria, Nsukka.

https://www.researchgate.net/publication/305827717_A_Review_Paper_on_Industrial_Waste_Water_Treatment_Processes

- Dong, S., Page, M. A., Hur, A., Hur, K., Bokenkamp, K. V., Wagner, E. D., ... & Massalha, N. (2021). Comparison of Estrogenic, spectroscopic, and toxicological analyses of pilot-scale water, wastewaters, and processed wastewaters at select military installations. *Environmental Science & Technology*, 55(19), 13103-13112. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.3c00655>
- Fitzgibbon, F. J., Nigam, P., Singh, D., & Marchant, R. (1995). Biological treatment of distillery waste for pollution-remediation. *Journal of Basic Microbiology*, 35(5), 293-301. <https://doi.org/10.1002/jobm.3620350504>
- Fraia, S.D., Massarotti, N., & Vanoli, L. (2018). A novel energy assessment of urban wastewater treatment plants. *Energy Conversion and Management*, 163, 304-313. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.058>.
- Garcia-Calderon, D., Buffiere, P., Moletta, R., & Elmaleh, S. (1998). Anaerobic digestion of wine distillery wastewater in down-flow fluidized bed. *Water Research*, 32(12), 3593-3600. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00134-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00134-1)
- Gebreeyessus, G. D., Mekonnen, A., & Alemayehu, E. (2019). A review on progresses and performances in distillery stillage management. *Journal of Cleaner Production*, 232, 295-307. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.383>
- Ghosh, S., Ombregt, J. P., & Pipyn, P. (1985). Methane production from industrial wastes by two-phase anaerobic digestion. *Water Research*, 19(9), 1083-1088. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(85\)90343-4](https://doi.org/10.1016/0043-1354(85)90343-4)
- Gu, Y., Li, Y., Yuan, F., & Yang, Q. (2023). Optimization and control strategies of aeration in WWTPs: A review. *Journal of Cleaner Production*, 138008. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138008>
- Hamalai, R. S., Sadiq, A., & Garba, D. K. (2025). Design and Construction of a Dual Powered Reverse Osmosis Based Mobile Water Treatment Plant for Military and Emergency Use. *EDUCATUM Journal of Science, Mathematics and Technology*, 12(1), 118-133. <https://doi.org/10.37134/ejsmt.vol12.1.12.2025>
- Hu, R., Liu, Y., Zhu, G., Chen, C., Hantoko, D., & Yan, M. (2022). COD removal of wastewater from hydrothermal carbonization of food waste: Using coagulation combined activated carbon adsorption. *Journal of water process engineering*, 45, 102462. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102462>
- Khoei, A. J., Joogh, N. J. G., Darvishi, P., & Rezaei, K. (2018). Application of physical and biological methods to remove heavy metal, arsenic and pesticides, malathion and diazinon from water. *Turkish Journal of fisheries and aquatic sciences*, 19(1), 21-28. http://doi.org/10.4194/1303-2712-v19_01_03
- Kida, K., Morimura, S., Abe, N., & Sonoda, Y. (1995). Biological treatment of schochu distillery wastewater. *Process biochemistry*, 30(2), 125-132. [https://doi.org/10.1016/0032-9592\(95\)80002-6](https://doi.org/10.1016/0032-9592(95)80002-6)
- Lei, L., Gu, L., Zhang, X., & Su, Y. (2007). Catalytic oxidation of highly concentrated real industrial wastewater by integrated ozone and activated carbon. *Applied Catalysis A: General*, 327(2), 287-294. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2007.05.027>



- Lele, S. S., Rajadhyaksha, P. J., & Joshi, J. B. (1989). Effluent treatment for alcohol distillery: thermal pretreatment with energy recovery. *Environmental progress*, 8(4), 245-252. <https://doi.org/10.1002/ep.3300080418>
- Liu, W., Zhang, J., Liu, H., Guo, X., Zhang, X., Yao, X., ... & Zhang, T. (2021). A review of the removal of microplastics in global wastewater treatment plants: Characteristics and mechanisms. *Environment International*, 146, 106277. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106277>
- Lovato, G., Batista, L. P., Preite, M. B., Yamashiro, J. N., Becker, A. L., Vidal, M. F., ... & Rodrigues, J. A. (2019). Viability of using glycerin as a co-substrate in anaerobic digestion of sugarcane stillage (vinasse): effect of diversified operational strategies. *Applied biochemistry and biotechnology*, 188, 720-740. <https://doi.org/10.1007/s12010-019-02950-1>
- Maiorella, B., Blanch, H. W., & Wilke, C. R. (1983). By-product inhibition effects on ethanolic fermentation by *Saccharomyces cerevisiae*. *Biotechnology and bioengineering*, 25(1), 103-121. <https://doi.org/10.1002/bit.260250109>
- Maloney, S. W., Boddu, V. M., & Peyton, G. R. (1998). Advanced Oxidation Treatment of Army Industrial Wastewaters: Propellant Wastewater. US Army Corps of Engineers, Construction Engineering Research Laboratories. <https://agris.fao.org/search/en/providers/122415/records/647367c653aa8c89630cef06>
- Mandal, A., Ojha, K., & Ghosh, D. N. (2003). Removal of colour from distillery wastewater by different processes. *Indian Chemical Engineer*, 45(4), 264-267. https://www.researchgate.net/publication/285733502_Removal_of_Colour_from_Distillery_Wastewater_bu_different_processes
- Mikucka, W., & Zielińska, M. (2020). Distillery stillage: characteristics, treatment, and valorization. *Applied biochemistry and biotechnology*, 192, 770-793. <https://doi.org/10.1007/s12010-020-03343-5>
- Moezzi, S.A., & Javanshir Khoei, A. (2023). Treatment of industrial wastewater of alcohol factories using a particle trap system and their potentials for aquaculture using *Daphnia* (*Daphnia pulex*) and Zebrafish (*Danio rerio*) as model bioindicators. *International Journal of Aquatic Biology*, 11(4), 338-353. <https://doi.org/10.22034/ijab.v11i4.1936>
- Mohamed, A.Y.A., Siggins, A., Healy, M.G., Ó hUallacháin, D., Fenton, O., & Tuohy, P. (2022). A novel hybrid coagulation-constructed wetland system for the treatment of dairy wastewater. *Science of the Total Environment*. 847, 157567. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.157567>
- Okonkwo Victor, O., Mbachu Victor, M., Bosah Nneka, C., Mbachu Williams, A. & Alukwe Uche, J. (2023). Time Series Analysis of the TSS, TDS, BOD, COD, and Turbidity of Waste Water in a Pre-filtration Chambers of Enhanced Household Septic Tank. *Saudi Journal of Civil Engineering*, 7(5), 127-136. <http://doi.org/10.36348/sjce.2023.v07i05.001>
- Patton, S.D., Dodd, M.C., & Liu, H., (2022). Degradation of 1,4-dioxane by reactive species generated during breakpoint chlorination: proposed mechanisms and implications for water treatment and reuse. *Journal of Hazardous Materials Letters*. 3, 100054. <https://doi.org/10.1016/J.HAZL.2022.100054>

- Peyton, G. R., & Glaze, W. H. (1988). Destruction of pollutants in water with ozone in combination with ultraviolet radiation. 3. Photolysis of aqueous ozone. *Environmental science & technology*, 22(7), 761-767. <https://doi.org/10.1021/es00172a003>
- Pistocchi, A., Alygizakis, N.A., Brack, W., Boxall, A., Cousins, I.T., Drewes, J.E., Finckh, S., Gallé, T., Launay, M.A., McLachlan, M.S., Petrovic, M., Schulze, T., Slobodnik, J., Ternes, T., van Wezel, A., Verlicchi, P., & Whalley, C. (2022). European scale assessment of the potential of ozonation and activated carbon treatment to reduce micropollutant emissions with wastewater. *Science of the Total Environment*, 848, 157124. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.157124>
- Qadir, M., Drechsel, P., Jiméñez Cisneros, B., Kim, Y., Pramanik, A., Mehta, P., & Olaniyan, O. (2020). Global and regional potential of wastewater as a water, nutrient and energy source. *Natural Resources Forum*, 44 (1), 40–51. <https://doi.org/10.1111/1477-8947.12187>.
- Reis, L. C., & Sant'Anna Jr, G. L. (1985). Aerobic treatment of concentrated wastewater in a submerged bed reactor. *Water Research*, 19(11), 1341-1345. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(85\)90298-2](https://doi.org/10.1016/0043-1354(85)90298-2)
- Satyawali, Y., & Balakrishnan, M. (2008). Wastewater treatment in molasses-based alcohol distilleries for COD and color removal: a review. *Journal of environmental management*, 86(3), 481-497. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.12.024>
- Taherizadeh, H., Hashemifard, S. A., Izadpanah, A. A., & Ismail, A. F. (2021). Investigation of fouling of surface modified Polyvinyl chloride hollow fiber membrane bioreactor via Zinc oxide-nanoparticles under coagulant for municipal wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 105835. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105835>
- Thakur, C., Srivastava, V. C., & Mall, I. D. (2014). Aerobic degradation of petroleum refinery wastewater in sequential batch reactor. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 49(12), 1436-1444. <https://doi.org/10.1080/10934529.2014.928557>
- Van Gijn, K., Zhao, Y., Balasubramaniam, A., de Wilt, H.A., Carlucci, L., Langenhoff, A.A.M., Rijnaarts, H.H.M. (2022). The effect of organic matter fractions on micropollutant ozonation in wastewater effluents. *Water Research*, 222, 118933. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2022.118933>.
- Vijayaraghavan, K., Ramanujam, T. K., & Balasubramanian, N. (1999). In situ hypochlorous acid generation for the treatment of distillery spentwash. *Industrial & engineering chemistry research*, 38(6), 2264-2267. <https://doi.org/10.1021/ie980166x>
- Walpen, N., Joss, A., & von Gunten, U. (2022). Application of UV absorbance and electron donating capacity as surrogates for micropollutant abatement during full-scale ozonation of secondary-treated wastewater. *Water Research*, 209, 117858. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2021.117858>.
- Wen, J., LeChevallier, M.W., Tao, W., (2020). Nitrification kinetics and microbial communities of activated sludge as a full-scale membrane bioreactor plant



- transitioned to low dissolved oxygen operation. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119872 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119872>.
- Xu, Q., Wan, Y., Wu, Q., Xiao, K., Yu, W., Liang, S., Zhu, Y., Hou, H., Liu, B., Hu, J., Yang, Y., Yang, J., (2021). An efficient hydrodynamic-biokinetic model for the optimization of operational strategy applied in a full-scale oxidation ditch by CFD integrated with ASM2. *Water Research*, 193, 116888 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.116888>
 - Yang, K., Peng, J., Srinivasakannan, C., Zhang, L., Xia, H., & Duan, X. (2010). Preparation of high surface area activated carbon from coconut shells using microwave heating. *Bioresource technology*, 101(15), 6163-6169. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.03.001>
 - Yasar, A., Ahmad, N., Chaudhry, M. N., Rehman, M. S. U., & Khan, A.A.A. (2007). Ozone for Color and COD Removal of Raw and Anaerobically Biotreated Combined Industrial Wastewater. *Polish Journal of Environmental Studies*, 16(2). <http://doi.org/10.5555/20073132554>
 - Yavuz, Y. (2007). EC and EF processes for the treatment of alcohol distillery wastewater. *Separation and purification technology*, 53(1), 135-140. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2006.08.022>
 - Zhang, Q., Wang, C., Jiang, L., Qi, J., Wang, J., He, X. (2018). Impact of dissolved oxygen on the microbial community structure of an intermittent biological aerated filter (IBAF) and the removal efficiency of gasification wastewater. *Bioresource Technology*, 255, 198–204. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.115>.
 - Zhang, Z., Wu, Y., Luo, L., Li, G., Li, Y., Hu, H. (2021). Application of disk tube reverse osmosis in wastewater treatment: a review. *Science of the Total Environment*, 792, 148291. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.148291>.

