

Journal of Water and Wastewater, Vol. 33, No. 5, pp: 34-51

Application of Ultrafiltration, UV Radiation and Ozonation as Tertiary Treatment for Effluent of Isfahan North Wastewater Treatment Plant in Pilot Scale

**M. Jamalinezhad¹, A. H. Hasani², S. M. Borghei³,
M. M. Amin⁴, S. Kheiri⁵, F. Sarjoughian Jouzdani⁶**

1. PhD. Graduated, Dept. of Environmental Engineering, Faculty of Natural Science and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
(Corresponding Author) Jamali.homework@gmail.com
2. Prof., Dept. of Environmental Engineering, Faculty of Natural Science and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
3. Prof., Dept. of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
4. Prof., Dept. of Environmental Health Engineering, School of Health, and Environment Research Center, Research Institute for Primordial Prevention of Non-Communicable Diseases, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran
5. MSc. Graduated, Dept. of Water Resources, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Ardestan Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran
6. MSc. Graduated, Dept. of Biology, Faculty of Biochemistry, Falavarjan Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

(Received Feb. 9, 2022 Accepted June 19, 2022)

To cite this article:

Jamalinezhad, M., Hasani, A. H., Borghei, S. M., Amin, M. M., Kheiri, S., Sarjoughian Jouzdani, F. 2023. "Application of ultrafiltration, UV radiation and ozonation as tertiary treatment for effluent of Isfahan North wastewater treatment plant in pilot scale" Journal of Water and Wastewater, 33(5), 34-51.
Doi: 10.22093/wwj.2022.328619.3234. (In Persian)

Abstract

The aim of this study is the pilot performance evaluation and comparison of wastewater disinfection methods consisted of ultrafiltration, ultraviolet radiation and ozonation, to tertiary treatment and effluent quality improvement in Isfahan north wastewater treatment plant. Therefore, the filtered effluent by a pretreatment unit from microscreen type entered the disinfection pilots. In this study, the membrane flux of ultrafilter (17.5-70 L/hr.m²), UV dose (400-3700 mW.s/cm²), ozone dose (10-40 mg/L) and contact time (1-15 min) with ozone were variable and TSS, Turbidity, COD, fecal and total coliform, before and after units were measured. The results showed that the total suspended solids were below the detection limits in UF effluent and it reduced at the maximum dose of UV radiation and at the highest concentration and contact time with ozone by 61.27% and 89.36%, respectively. Though the turbidity and chemical



oxygen demand were not reduced by UV, their removal percentage in UF was 76 and 39%, respectively, and their maximum removal by ozone was 80.52% and 40.74%, respectively. Also, the fecal and total coliform was reduced in UF 5.28 and 5.08 log, respectively, and at the maximum UV radiation was 3.82 and 3.79 log; at the highest concentration and contact time with ozone it was 4.11 and 3.55 log, respectively. The results showed that influent quality and the loading in UF do not have a significant effect on their effluent quality. Also, the contact time to UV radiation compared to the average intensity of MP lamp radiation has a greater effect on the removal of coliforms. In ozonation, the influent COD had a major role in reduction of turbidity and COD. According to the results, the combination of microscreen and UF is an effective process for reducing the physical parameters and coliforms in the secondary effluent. It can provide the US Environmental Protection Agency standards for many uses (TSS \leq 5 mg/L, Turbidity \leq 2 NTU, Fecal coliform \leq 14 MPN/100mL). However, only a 300W MP UV lamp with a contact time of 40 s and (3700 mW.s/cm²) an ozone dose of 40 mg/L at a contact time of 15 min can meet the fecal coliform to the EPA standards for some uses including restricted urban uses, agricultural irrigation for processed or non-food crops (Fecal coliform \leq 200 MPN/100mL).

Keywords: Ultrafiltration, UV Radiation, Ozonation, Tertiary Treatment, Disinfection, Microscreen.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۳، شماره ۵، صفحه: ۵۱-۳۴

کاربرد اولترافیلتر، اشعه فرابنفش و ازن در تصفیه ثالثه پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شمال اصفهان در مقیاس پایلوت

محمد جمالی نژاد^۱، امیر حسام حسنی^۲، سید مهدی برقی^۳، محمد مهدی امین^۴
سمیه خیری^۵، فیاضه سر جوقیان جوزدانی^۶

- ۱- دانش‌آموخته دکترا، گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
(نویسنده مسئول) Jamali.homework@gmail.com
- ۲- استاد، گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
- ۳- استاد، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
- ۴- استاد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، پژوهشکده پیشگیری اولیه از بیماری‌های غیرواگیردار، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران
- ۵- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مدیریت منابع آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، واحد اردستان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران
- ۶- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه بیوشیمی، دانشکده علوم زیستی، واحد فلاورجان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

(دریافت ۱۴۰۰/۱۱/۲۰ پذیرش ۱۴۰۱/۳/۲۹)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

جمالی نژاد، م.، حسنی، ا.ح.، برقی، س.م.، امین، م.م.، خیری، س.س.، سر جوقیان جوزدانی، ف.، ۱۴۰۱، کاربرد اولترافیلتر، اشعه فرابنفش و ازن در تصفیه ثالثه پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شمال اصفهان در مقیاس پایلوت، مجله آب و فاضلاب، ۳۳(۵)، ۵۱-۳۴. Doi: 10.22093/wwj.2022.328619.3234

چکیده

هدف از انجام این پژوهش، بررسی و مقایسه عملکرد روش‌های گندزدایی فاضلاب به روش اولترافیلتراسیون، اشعه فرابنفش و ازن زنی، به منظور تصفیه ثالثه و ارتقای کیفیت پساب ثانویه تصفیه‌خانه فاضلاب شمال اصفهان بود. به این منظور، پساب فیلتر شده توسط یک واحد پیش تصفیه از نوع میکرواسکرین به واحدهای پایلوت گندزدایی وارد شد. در این پژوهش، فلاکس عبوری از اولترافیلتر (۱۷/۷۰ تا ۵۰ L/m².hr)، دوز پرتودهی (۳۷۰۰ mW.s/cm²)، دوز ازن تزریقی (۱۰ تا ۴۰ mg/L) و زمان تماس با ازن (۱ تا ۱۵ min) متغیر بودند و پارامترهای TSS، کدورت، COD و کلیفرم مدفوعی و کل، قبل و بعد از هر واحد اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که TSS در خروجی اولترافیلتر کمتر از حد تشخیص است و در حداکثر دوز پرتودهی UV و در بیشترین غلظت و زمان تماس با ازن، به ترتیب ۶۱/۲۷ و ۸۹/۳۶ درصد حذف می‌شود. علی‌رغم ناتوانی UV در حذف کدورت و COD، درصد حذف آنها در اولترافیلتر به ترتیب ۷۶ و ۳۹ درصد و حداکثر درصد کاهش آنها توسط ازن، به ترتیب ۸۰/۵۲ و ۴۰/۷۴ درصد بود. همچنین کلیفرم مدفوعی و کل در اولترافیلتر به ترتیب ۵/۲۸ و ۵/۰۸ لگاریتم، در حداکثر دوز پرتودهی UV به ترتیب ۳/۸۲ و ۳/۷۹ لگاریتم و در بیشترین غلظت و زمان تماس با ازن به ترتیب ۴/۱۱ و ۳/۵۵ لگاریتم کاهش یافت. نتایج نشان داد که کیفیت



ورودی و سطوح بارگذاری در اولترافیلتر، تأثیر به‌سزایی در کیفیت پساب خروجی ندارد. همچنین در لامپ‌های فشار متوسط، زمان تماس با اشعه فرابنفش نسبت به پارامتر شدت متوسط پرتودهی، تأثیر بیشتری در حذف کلیفرم‌ها داشت. در روش ازن‌زنی نیز پارامتر COD پساب ورودی، نقش اساسی در کاهش پارامتر کدورت و COD داشت. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، ترکیب میکرواسکرین و اولترافیلتر، فرایندی مؤثر برای کاهش پارامترهای فیزیکی و کلیفرم‌ها در پساب ثانویه بود، به‌گونه‌ای که استاندارد آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده، به‌منظور استفاده در بسیاری از کاربری‌ها را تأمین می‌کند ($TSS \leq 5 \text{ mg/L}$ ، $2 \text{ NTU} \leq$ کدورت و $14 \text{ MPN/100 mL} \leq$ کلیفرم مدفوعی)، اما صرفاً لامپ فشار متوسط 300 وات با زمان تماس 40 ثانیه (3700 mW.s/cm^2) و ازن با دوز تزریق 40 mg/L در زمان تماس 15 دقیقه، می‌توانند کلیفرم مدفوعی را به دستورالعمل آژانس برای استفاده در برخی کاربری‌ها شامل کاربری شهری با دسترسی محدود و آبیاری محصولات کشاورزی فرآوری شده یا غیرغذایی برسانند ($200 \text{ MPN/100 mL} \leq$ کلیفرم مدفوعی).

واژه‌های کلیدی: اولترافیلتر، اشعه فرابنفش، ازن، تصفیه ثالثه، گندزدایی، میکرواسکرین



۱- مقدمه

به پارامترهای کیفی پساب ورودی بستگی دارند (Gehr et al., 2003).

حضور ذرات معلق بر میزان نفوذ اشعه UV و همچنین وجود مواد معلق و ترکیبات آلی، برگرفتگی سطح غشا در UF و میزان غلظت ازن مورد نیاز تأثیرگذار هستند، به همین دلیل استفاده از یک فرایند پیش تصفیه، قبل از گندزدایی الزامی است (Falsanisi et al., 2010, Amin et al., 2010, Lazarova et al., 2013) برخی از پارامترهای کیفی را برای ایجاد شرایط مناسب گندزدایی تعدیل کند. از جمله روش‌های پیش تصفیه، سیستم فیلتراسیون به روش میکرواسکرین است که برای جداسازی ذرات در تصفیه ثالثه پساب خروجی از تصفیه بیولوژیکی استفاده می‌شود (Ljunggren, 2006) در این پژوهش، از میکرواسکرین درام فیلتر، به منظور پیش تصفیه برای واحدهای گندزدایی UF، UV و ازن استفاده شد. لامپ‌های کم فشار^۳ به صورت گسترده در گندزدایی آب و فاضلاب استفاده می‌شوند، اما لامپ‌های فشار متوسط^۴، فشرده تر و قدرتمندتر هستند و نسبت به لامپ‌های سنتی LP، در طیف وسیعی از نور ساطع می‌شوند (Gibson et al., 2017). در این پژوهش، عملکرد لامپ‌های MP، ۱۵۰ و ۳۰۰ وات در گندزدایی و تصفیه ثالثه پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شمال اصفهان به صورت پایلوت بررسی شد. همچنین با توجه به توانایی UF و ازن در کاهش برخی پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی، گندزدایی و تصفیه ثالثه پساب توسط آنها نیز در مقیاس پایلوت بررسی شد تا علاوه بر تعیین مشخصات هر سیستم برای دستیابی به سطوح ویژه‌ای از کیفیت پساب، عملکرد فرایندی سه روش، در ارتقای کیفیت پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شمال اصفهان مقایسه شود.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، به منظور بررسی عملکرد UF، UV و ازن بر تصفیه ثالثه پساب، واحدهای پایلوت شامل: (۱) پیش تصفیه میکرواسکرین درام فیلتر، (۲) مدول غشایی UF و متعلقات مرتبط، (۳) راکتور لامپ MP، ۱۵۰ و ۳۰۰ وات و (۴) پکیج ازن‌زنی در محل خروجی پساب ثانویه تصفیه‌خانه فاضلاب شمال اصفهان

تصفیه فاضلاب شهری و استفاده مجدد از آب در آبیاری مزارع کشاورزی و فضای سبز، تغذیه مصنوعی سفره‌های زیرزمینی، آبی‌پروری و مصارف صنعتی، راهکاری مناسب برای مقابله با بحران کم‌آبی است. برای هر یک از کاربری‌های پساب، درجه و سطوح معینی از میزان تصفیه و برنامه دوره‌ای پایش کیفیت پساب پیشنهاد شده است (Hosseini, 2002). فرایندهای متداول تصفیه فاضلاب، گاهی حداقل استانداردهای کیفی را برآورده نمی‌کند؛ چون پساب حاصل از تصفیه، حاوی درصد زیادی از میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا بوده و در نتیجه نیازمند مراحل تصفیه ثالثه، مانند کاربرد فناوری‌های گندزدایی است (Koivunen et al., 2003).

فرایندهای گندزدایی طبیعی می‌توانند راهکارهای ارزشمندی را بدون استفاده از مواد شیمیایی ارائه کنند، همچنین تکنولوژی‌های پیشرفته‌ای که بسیار جذاب هستند، هنوز در مرحله پژوهش قرار داشته و استفاده از آنها در مقیاس بزرگ و صنعتی محدود شده است. در هر صورت روش‌های گندزدایی با مکانیسم‌های فرایندی مختلف در گندزدایی فاضلاب استفاده می‌شوند و هر یک دارای مزایا و معایبی هستند. از جمله روش‌های گندزدایی که به برخی پارامترهای کیفی حساس بوده و در صورت ایجاد شرایط کیفی مناسب پساب ورودی، دارای کارایی مؤثرند، گندزدایی به روش‌های اولترافیلتر^۱، اشعه فرابنفش^۲ و ازن‌زنی هستند (Collivignarelli et al., 2017). UF فرایند جداسازی غشایی است که علاوه بر حذف مواد معلق، قادر به کاهش برخی از سلول‌های باکتری و ویروس‌ها است. UV با دوز پرتودهی مناسب، یک روش گندزدایی مؤثر در حذف باکتری‌ها، پروتوزوها و ویروس‌ها، بدون تشکیل محصولات جانبی سمی است. ازن نیز یک اکسیدکننده واکنش‌پذیر و ویروس‌کش مؤثر است که در حین گندزدایی، مواد جامد محلول تولید نمی‌کند و عملکرد آن تحت تأثیر یون آمونیوم و pH پساب قرار نمی‌گیرد (Asano et al., 2007). همچنین ازن قادر است جذب اشعه UV و برخی آلاینده‌ها مانند بو، رنگ و مواد آلی را نیز کاهش دهد (Xu et al., 2002, Bataller Venta et al., 2014)، اما میزان پرتودهی مورد نیاز در روش UV و ازن مورد نیاز در روش ازن‌زنی،

³ Low Pressure (LP)

⁴ Medium Pressure (MP)

¹ Ultrafilter (UF)

² Ultraviolet (UV)



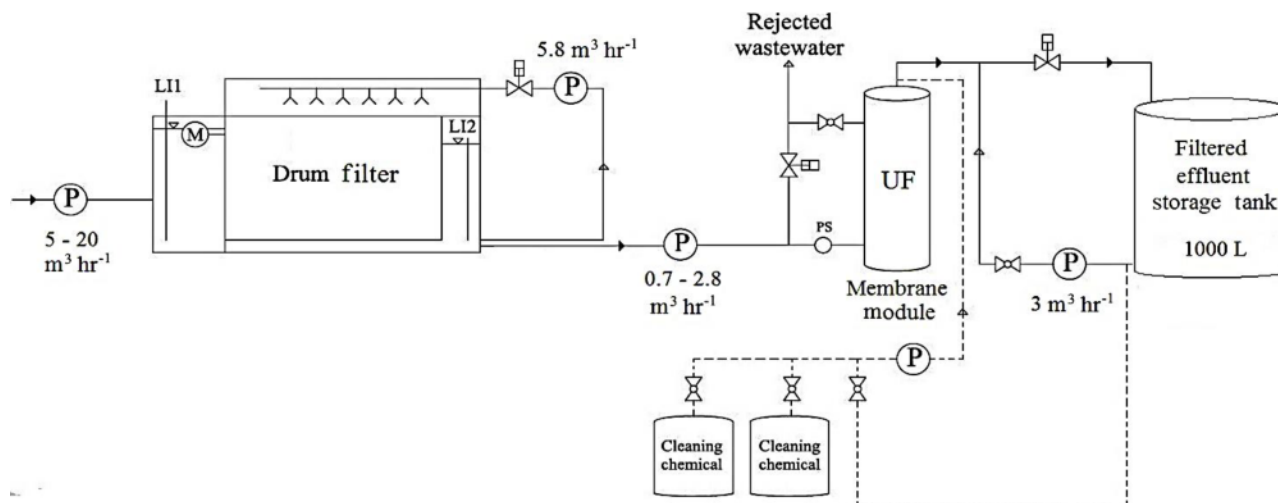


Fig. 1. Schematic diagram of UF pilot plant

شکل ۱- طرح شماتیک پایلوت UF

در شکل ۱ و مشخصات سیستم UF در جدول ۱ نشان داده شده است.

سیستم UF به صورت ترکیبی با میکرواسکرین و به صورت مداوم بهره‌برداری شدند، به گونه‌ای که پساب فیلتر شده توسط درام فیلتر در چهار سطح دبی به ترتیب ۰/۷، ۱/۴، ۲/۱، و ۲/۸ m³/hr مترمکعب در ساعت به مدول غشایی سیستم UF پمپاژ شد. به منظور ارزیابی عملکرد UF، فلاکس جریان با کنترل دبی ورودی در سطوح بیان شده، در چهار سطح ۱۷/۵، ۳۵، ۵۲/۵ و ۷۰ (به ترتیب سطوح ۱ تا ۴) تنظیم شد. با توجه به میزان فشار ورودی به سیستم و توصیه‌های شرکت سازنده، فواصل زمانی بین عملیات شستشوی معکوس ۲۰ min و مدت زمان شستشوی معکوس، ۶۰ s انتخاب شد. سپس پساب تصفیه شده به یک مخزن ۱۰۰۰ مترمکعبی وارد شد تا از بخشی از آن به منظور شستشوی معکوس غشا استفاده شود. عملیات شستشوی معکوس در درام فیلتر بدون توقف در کارکرد آن و در UF با قطع پمپاژ پساب ورودی به UF و توقف در کارکرد آن همراه بود. پساب حاصل از شستشوی معکوس در درام فیلتر توسط هاپر داخل درام و در سیستم UF نیز توسط یک شیر برقی از پایلوت خارج شد.

۲-۲- پایلوت‌های UV

لامپ‌های UV از نوع MP، ۱۵۰ و ۳۰۰ وات و ساخت شرکت ARDA فرانسه و راکتورها از جنس استیل برای هر لامپ بود.

اصفهان نصب شد. میکرواسکرین درام فیلتر با مش ۲۰ میکرون به صورت سری با هر واحد گندزدایی بهره‌برداری شد و واحدهای گندزدایی به صورت موازی مستقر شدند، سپس عملکرد هر واحد به صورت مجزا بررسی شد.

تصفیه‌خانه فاضلاب شمال اصفهان شامل دو فاز قدیم و جدید است که فاز اول به روش لجن فعال متعارف و فاز دوم به روش لجن فعال دو مرحله‌ای^۱ و در مجموع با دبی متوسط ۲/۵ مترمکعب در ثانیه بهره‌برداری می‌شود. در این پژوهش، از پساب خروجی از فاز اول تصفیه‌خانه فاضلاب شمال استفاده شد.

۱-۲- پایلوت UF

سیستم UF شامل بخش‌های اصلی از جمله پمپ تغذیه، دبی‌سنج ورودی، فشارسنج ورودی، غشای UF همراه با محفظه آن (مدول غشایی)، پمپ شستشوی معکوس، مخزن ذخیره پساب، مخازن ذخیره مواد شیمیایی برای شستشوی شیمیایی غشا، پمپ شستشوی شیمیایی غشا و سیستم کنترل بود. ماکسیمم فشار ورودی به مدول غشایی UF، ۳ بار بود. مدل دستگاه LH3-1060-V و ساخت شرکت پاساوانت کشور آلمان و نیز غشا از نوع فشار موئین داخلی و غشا از جنس پلی وینیل کلراید^۲ بود. طرح شماتیک پایلوت UF

¹ Adsorption/Bio-Oxidation (A/B)

² PolyVinyl Chloride (PVC)



جدول ۱- مشخصات UF

Table 1. Characteristics of UF

Membrane module diameter (mm)	Membrane module height (mm)	Feed pump flowrate (m ³ /hr)	Backwash flowrate (m ³ /hr)	Pore size of membrane (μm)	Membrane area (m ²)
277	1715	1-3	3	0.01	40

جدول ۲- مشخصات پایلوت لامپ‌های UV

Table 2. Characteristics of UV lamps

Total length (mm)	Effective length (mm)	Diameter (mm)	Quartz height (mm)	Quartz diameter (mm)	Useful life (hr)	Model
66	36	12	110	30	10000	UVOX150
101	56	10	170	40	10000	UVOX300

$$I_{avg} \text{ (mw / cm}^2\text{)} = I_0 \left(\frac{1-10^{-\alpha d}}{\alpha d} \right) \quad (2)$$

در این پژوهش، شدت اولیه اشعه با قرار دادن پروب C رادیومتر (IX EC Hanger) در سطح کاملاً تمیز کوارتز، پس از حدود ۵ دقیقه، برای لامپ ۱۵۰ و ۳۰۰ وات، به ترتیب ۳۷ و ۸۰ mW/cm² اندازه‌گیری شد. فاصله بین سطح خارجی کوارتز تا سطح داخلی محفظه راکتور (۵ cm)، به عنوان عمق پرتو دهی در نظر گرفته شد. میزان جذب اشعه توسط پساب نیز با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر DR5000 در طول موج ۲۵۴ nm برحسب au/cm خوانده شد. بر اساس معادله ۲، متوسط دوز دریافتی پساب برای لامپ ۱۵۰ وات، در چهار سطح ۰.۴۱۵، ۰.۸۳۰، ۱.۲۴۵ و ۱.۶۶۰ و برای لامپ ۳۰۰ وات در چهار سطح ۰.۹۲۰، ۱.۸۴۰، ۲.۷۶۰ و ۳.۶۸۰ mW.s/cm² تنظیم شد.

۲-۳- پایلوت ازن‌زنی

ازن در پایلوت ازن‌زنی در محل و به روش تخلیه الکتریکی کرونا تولید شد. اکسیژن در این پایلوت توسط دستگاه اکسیژن‌ساز تولید و به دستگاه ازن‌ژنراتور انتقال یافت و سپس ازن از طریق سیستم تزریق به روش ونتوری در معرض پساب قرار گرفت. به دلیل تأمین زمان تماس ازن با پساب، پس از تزریق ازن، پساب در یک مسیر بسته قرار گرفت. کلیه قطعات و تجهیزات در تماس با ازن از جنس استیل و سیستم ازن‌زنی ساخت شرکت ازن آب ایران بود. شماتیک

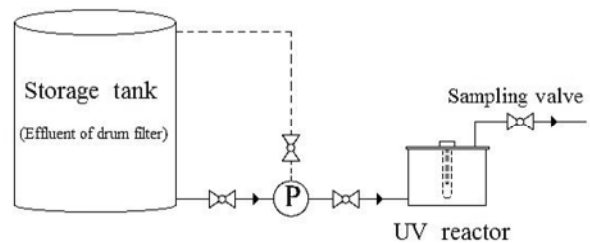


Fig. 2. Schematic of UV pilot

شکل ۲- طرح شماتیک پایلوت لامپ‌های UV

شماتیک پایلوت‌های UV در شکل ۲ و مشخصات هر دو پایلوت در جدول ۲ نشان داده شده است.

راکتورهای UV، موازی با یکدیگر و به صورت مجزا، بررسی شدند. زمان ماند هیدرولیکی به عنوان زمان پرتو دهی یا زمان تماس با اشعه، در چهار سطح ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ثانیه در نظر گرفته شد. دبی ورودی به هر راکتور، به منظور ایجاد چهار سطح زمان پرتو دهی برای لامپ ۱۵۰ وات، ۲/۲ تا ۸/۸ لیتر در دقیقه و برای لامپ ۳۰۰ وات، ۳/۶ تا ۱۴/۴ لیتر در دقیقه تنظیم شد. متوسط دوز پرتو دهی برای هر لامپ از حاصل ضرب شدت متوسط اشعه (I_{avg}) در زمان پرتو دهی (t) برحسب mW.s/cm² محاسبه شد

$$D = I_{avg} \cdot t \quad (1)$$

شدت متوسط اشعه، تابع شدت اولیه اشعه تابشی از لامپ (I_0)، عمق نمونه بررسی شده (d) و میزان جذب اشعه توسط مایع بوده و طبق معادله ۲ محاسبه شد (Metcalf et al., 2014)



خروجی از UF نمونه برداری انجام شد. با توجه به در نظر گرفتن چهار سطح برای پارامتر نرخ بار هیدرولیکی در درام فیلتر و چهار سطح برای پارامتر فلاکس جریان در UF و بر اساس روش آماری فاکتوریل، ۱۶ مرحله نمونه برداری و در هر مرحله، سه بار تکرار در نظر گرفته شد. با توجه به سه محل برداشت نمونه، در مجموع ۱۴۴ نمونه به طور لحظه‌ای برداشت شد. نمونه‌ها برای هر مرحله به صورت روزانه و در فواصل زمانی شامل قبل و بعد از شستشوی معکوس سیستم UF انجام شد.

برای هر لامپ UV، در هر چهار سطح دوز پرتودهی، قبل و بعد از راکتور، نمونه برداری با دو بار تکرار انجام شد. با توجه به کیفیت پساب ورودی یکسان در چهار سطح دوز پرتودهی هر راکتور، تعداد ۲۰ نمونه جمع آوری شد. همچنین بر اساس روش آماری فاکتوریل، در هر چهار سطح دوز تزریق ازن و هر چهار سطح زمان تماس با ازن، قبل و بعد از ازن زنی، ۱۶ مرحله نمونه برداری با دو بار تکرار انجام شد. با توجه به کیفیت پساب ورودی یکسان در هر سطح تزریق ازن و نمونه‌گیری در زمان‌های متفاوت برای هر

پایلوت ازن زنی در شکل ۳ و مشخصات پایلوت ازن زنی در جدول ۳ ارائه شده است.

در این پژوهش، دوز ازن تزریقی و مدت زمان تماس با ازن متغیر بود. دوز تزریق ازن در چهار سطح ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ mg/L و زمان تماس با ازن در چهار سطح ۱، ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه در نظر گرفته شد. به منظور تأمین سطوح دوز تزریق ازن، بر اساس ظرفیت ازن ژنراتور، مقدار مشخصی از ازن، به حجم مشخصی از پساب، در مدت زمان مشخص تزریق شد. پس از اتمام مدت زمان تزریق ازن در هر سطح، به منظور اختلاط بهتر ازن با پساب، چرخش پساب در یک مسیر گردش بسته تا زمان برداشت نمونه ادامه داشت. برای هر سطح دوز تزریق ازن، نمونه‌گیری در زمان‌های ۱، ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه، از پساب خروجی از تانک تماس با ازن انجام شد.

۴-۲- نمونه برداری

برای پایلوت UF، در سه محل شامل پساب ورودی به درام فیلتر، پساب خروجی از درام فیلتر (پساب ورودی به UF) و پساب

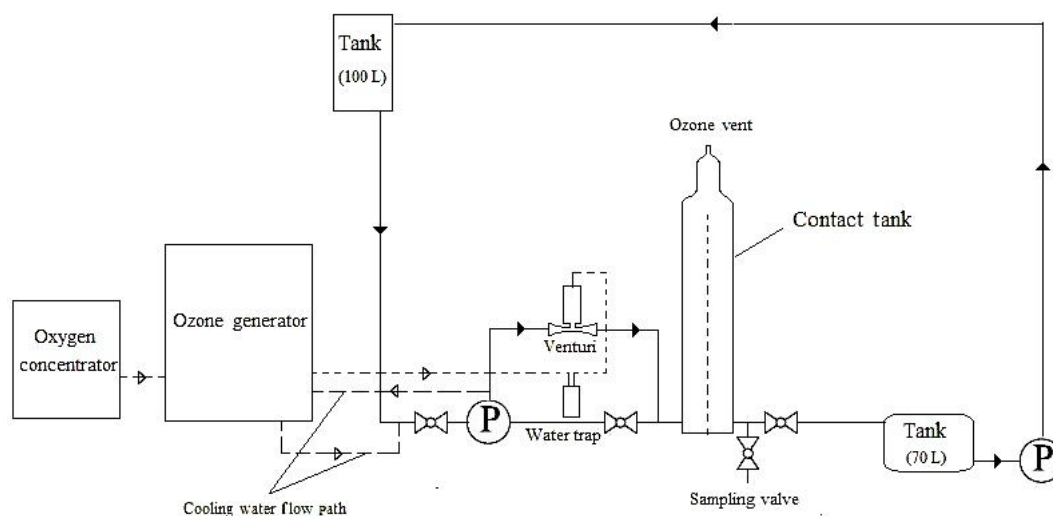


Fig. 3. Schematic of ozone pilot plant

شکل ۳- طرح شماتیک پایلوت تزریق ازن

جدول ۳- مشخصات پایلوت ازن زنی

Table 3. Characteristics of ozone pilot

Oxygenating capacity (L/min)	Ozone generator capacity (gr/hr)	Contactior diameter (cm)	Contactior height (cm)	Injector size (in)
66	36	12.7	130	0.75



جدول ۴- خصوصیات پساب ثانویه فیلتر شده تصفیه خانه فاضلاب شمال اصفهان

Table 4. Filtered secondary effluent characteristics of INWWTP

TSS (mg/L)	Turbidity (NTU)	COD (mg/L)	Fecal coliform (MPN/100mL)	Total coliform (MPN/100mL)
14 - 44	5.1 - 16.8	24 - 97	$1.7 \times 10^5 - 1.6 \times 10^6$	$3.5 \times 10^5 - 9.2 \times 10^6$

می‌رود زمان کارکرد سیستم کاهش و دفعات و مدت زمان شستشوی معکوس افزایش یابد.

در پژوهش فالسانسی و همکاران نیز مقدار TSS خروجی از UF همیشه کمتر از حد تشخیص بود (Falsanisi et al., 2010). تفاوت بین مقدار غلظت TSS، قبل و بعد از پرتودهی پساب فیلتر شده با لامپ‌های MP، معنی‌دار بود ($P\text{-value} < 0.05$)، به این معنی که برخلاف عملکرد لامپ‌های LP، شدت اشعه در لامپ‌های MP و با دوز اشعه ۴۰۰ تا 3700 mW.s/cm^2 ، قادر به حذف بخشی از ذرات معلق موجود در پساب بود و می‌توانست تا حدودی بر ساختار برخی از مواد معلق تأثیرگذار باشد و آنها را متلاشی کند. در کمترین و بیشترین سطح دوز پرتودهی، برای لامپ ۱۵۰ وات، حداقل و حداکثر درصد حذف TSS به ترتیب ۱۱/۴۳ و ۵۸/۵۷ و برای لامپ ۳۰۰ وات، به ترتیب ۱۲/۶۸ و ۶۱/۲۷ بود. بر اساس تحلیل واریانس یک طرفه، تفاوت معنی‌داری برای درصد حذف TSS در سطوح مختلف دوز پرتودهی برای هر لامپ مشاهده شد. در شکل ۴، نمودار درصد حذف TSS برحسب دوز پرتودهی برای هر لامپ ترسیم شده است.

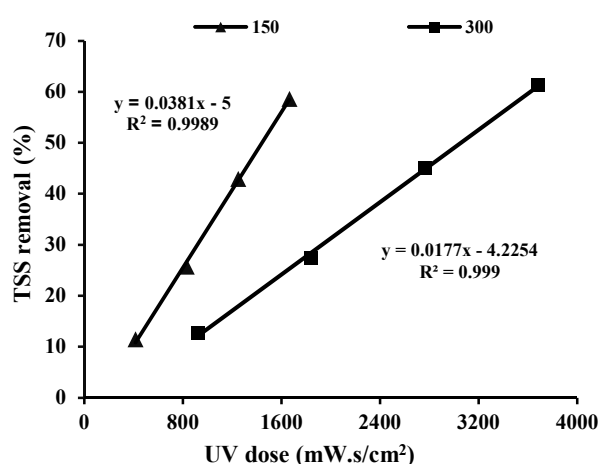


Fig. 4. TSS removal efficiency versus UV dose

شکل ۴- کارایی حذف TSS برحسب دوز پرتودهی برای هر لامپ

سطح، برای پایلوت ازن‌زنی تعداد ۴۰ نمونه گرفته شد. در این پژوهش، پارامترهای فیزیکی- شیمیایی شامل TSS، کدورت، COD و pH، مطابق کتاب روش‌های استاندارد برای آزمایش‌های آب و فاضلاب APHA اندازه‌گیری شدند (Rice et al., 2012). پارامتر کدورت به روش نفلومتری با دستگاه کدورت سنج 2100N، پارامتر COD به روش اسپکتروفوتومتری با دستگاه‌های DR2500 و راکتور DRB200 و پارامترهای بیولوژیکی شامل کلیفرم مدفوعی و کلیفرم کل، به روش محتمل‌ترین تعداد کلیفرم (MPN) و با توجه به کیفیت پساب، میزان دوز پرتودهی و تزریق ازن، در رقت‌های مختلف از صفر تا 10^{-6} انجام شد. داده‌های حاصل از آزمایش‌ها با استفاده از آنالیز واریانس^۱ و آزمون Paired t-test، تجزیه و تحلیل شدند.

۳- نتایج و بحث

جدول ۴ محدوده پارامترهای کیفی پساب ثانویه فیلتر شده تصفیه‌خانه فاضلاب شمال اصفهان (ورودی به پایلوت‌های گندزایی بررسی شده در این پژوهش) را نشان می‌دهد. مقدار pH نمونه‌ها بین ۷/۶ تا ۸/۴ اندازه‌گیری شد.

۳-۱- TSS

مقدار TSS در پساب خروجی از UF، مستقل از مقدار TSS در پساب ورودی و در تمامی مراحل کمتر از حد تشخیص بود. بنابراین با توجه به اندازه منافذ UF و خاصیت غربالی آن، افزایش TSS ورودی به UF، صرفاً باعث گرفتگی سریع منافذ فیلتر و افزایش تعداد و زمان شستشوی معکوس خواهد شد. نتایج آنالیز آماری ANOVA نشان داد که سطوح بارگذاری در UF، تأثیر به‌سزایی در کارایی حذف TSS نداشته و با افزایش آن انتظار

¹ Analysis Of Variance (ANOVA)



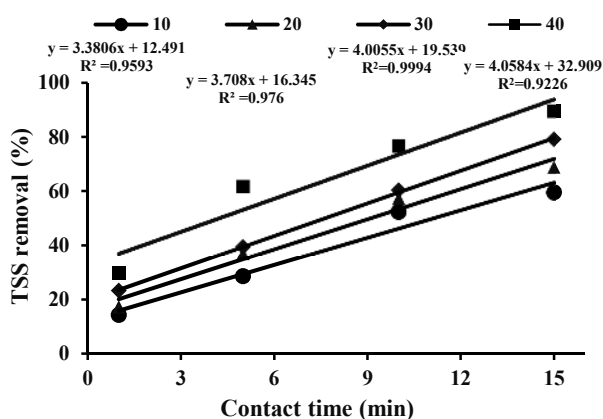


Fig. 5. TSS removal efficiency versus ozone contact time for each ozone dose level

شکل ۵- درصد حذف TSS برحسب زمان تماس با ازن برای هر سطح تزریق ازن

بر اساس شکل‌های ۴ و ۵، عملکرد UV با لامپ‌های MP در حذف TSS، تا حدی با سطوح اول و دوم دوز تزریق ازن در ازن‌زنی، قابل رقابت است و با افزایش سطوح دوز تزریق ازن، عملکرد ازن‌زنی نسبت به لامپ‌های MP بهتر بود.

۲-۳- کدورت

UF به‌طور میانگین پارامتر کدورت را ۷۶ درصد (از ۶/۵ به ۱/۶) کاهش داد که نشان از میزان کدورت ناشی از ذرات بین منافذ درام فیلتر (۲۰ μm) و غشای UF (۱ μm) در پساب مورد بررسی است. نمودار درصد حذف کدورت در UF برحسب مقدار میانگین کدورت ورودی در شکل ۶ ترسیم شده است. بر اساس این شکل، افزایش میزان کدورت ورودی به UF، باعث افزایش درصد حذف کدورت می‌شود. نتایج نشان داد که مقدار کدورت در پساب خروجی از UF، مستقل از مقدار کدورت در پساب ورودی است و افزایش کدورت پساب ورودی به UF، تأثیر چندانی بر میزان کدورت خروجی از آن ندارد. این پارامتر از NTU ۲/۳ تجاوز نخواهد کرد و احتمالاً در طولانی‌مدت صرفاً باعث افزایش تدریجی فشار جریان ورودی UF و نیاز به افزایش تعداد دفعات و مدت زمان شستشوی معکوس می‌شود. به‌عبارت دیگر، در پساب خروجی از UF، غلظت ذرات کلئیدی با قطر کمتر از ۰/۱ میکرون، از میزان معینی تجاوز نمی‌کند. اریوالو و همکاران و دایالینس و دایامادپلس نیز نشان دادند که

شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش دوز پرتودهی، درصد حذف TSS به‌صورت خطی برای هر لامپ افزایش می‌یابد. همچنین در دوز پرتودهی مشابه در هر لامپ (۹۲۰/۷۲ تا ۱۶۶۳/۸۸ mW.s/cm²)، میزان درصد حذف TSS در لامپ ۱۵۰ وات بیشتر از لامپ ۳۰۰ وات است که نشان‌دهنده تأثیر بیشتر زمان تماس اشعه با پساب در لامپ ۱۵۰ وات است. به‌عبارتی پارامتر زمان تماس با اشعه نسبت به پارامتر شدت متوسط پرتودهی، تأثیر بیشتری در حذف TSS داشته است. همچنین بر اساس شکل ۴، درصد‌های حذف TSS در سطوح مختلف دوز پرتودهی برای هر لامپ، به یکدیگر نزدیک‌اند و عملکرد دو لامپ در حذف مواد معلق تقریباً مشابه است.

نتایج آنالیز واریانس دو طرفه نشان داد که اختلاف بین میانگین درصد حذف TSS در سطوح دوز تزریق ازن و زمان تماس با ازن، معنی‌دار است و اثر متقابل بین این دو عامل وجود ندارد. بر این اساس بین سطح چهارم دوز تزریق ازن با سایر سطوح و بین سطوح سوم و چهارم زمان تماس با ازن با سایر سطوح تفاوت معنی‌دار است که نشان‌دهنده تأثیر دوز بالای تزریق ازن و زمان بیشتر تماس با ازن، در حذف مواد معلق دارد. حداقل درصد حذف TSS برای غلظت ازن ۱۰ mg/L و زمان تماس ۱ دقیقه برابر با ۱۴/۲۹ درصد و حداکثر درصد حذف TSS برای غلظت ازن ۴۰ mg/L و زمان تماس ۱۵ دقیقه برابر با ۸۹/۳۶ درصد حاصل شد. مقدار میانگین درصد حذف TSS در مقابل زمان تماس با ازن، برای هر دوز تزریق ازن در شکل ۵ ارائه شده است. بر اساس این شکل، با افزایش زمان تماس برای هر سطح دوز تزریق ازن، درصد حذف TSS به‌صورت خطی افزایش داشت. همچنین با افزایش دوز تزریق ازن، درصد حذف TSS افزایش داشته است. فاصله نسبتاً یکسان خطوط موازی در این شکل نشان‌دهنده عدم اثر متقابل عوامل مورد بررسی است.

آلفونسو-مونیزگورن و همکاران نیز نشان دادند که با اکسید شدن مواد معلق آلی توسط ازن و تولید ترکیبات آلی محلول، پارامتر TSS کاهش خواهد یافت (Alfonso-Muniozgueren et al., 2020). همچنین در نتایج پژوهش مشابه توسط مارتینز و همکاران، درصد حذف SS با غلظت ورودی کمتر از حدود ۲۰ mg/L و غلظت ازن ۱۱ تا ۱۳ mg/L، حداکثر ۷۵ درصد و به‌طور میانگین ۳۰ درصد حاصل شد (Martínez et al., 2011).



میزان حذف کدورت توسط ازن، بسته به کدورت اولیه، ۱۸/۱۲ تا ۸۰/۵۲ درصد بود. مقدار میانگین درصد حذف کدورت در مقابل زمان تماس با ازن، برای هر دوز تزریق ازن در شکل ۷ ارائه شده است. بر اساس این شکل، با افزایش زمان تماس در سایر سطوح دوز تزریق ازن، درصد حذف کدورت افزایش داشت و برای دوز تزریق ازن ۱۰ و ۴۰ mg/L، این افزایش کاملاً به صورت خطی بود. بر اساس نتایج آماری، بین سطح اول زمان تماس با ازن با سایر سطوح تفاوت معنی دار بود.

عدم افزایش درصد حذف کدورت متناسب با افزایش دوز تزریق ازن، می تواند ناشی از میزان کدورت ورودی بالاتر در سطوح تزریق ۱۰ و ۴۰ mg/L (۱۱/۴۲ و ۱۲/۱۴ NTU) نسبت به سطوح ۲۰ و ۳۰ mg/L (۵/۶۹ و ۶/۸۶ NTU) و توزیع متفاوت اندازه فلوک ها و ذرات در پساب فیلتر شده ورودی به پایلوت ازن زنی و اثر متفاوت ازن بر روی آنها باشد. بر این اساس، با توجه به غلظت کم کدورت پساب ورودی و میزان ازن تزریقی، بین سطح دوم دوز تزریق ازن با سطوح اول و سوم، تفاوت معنی دار بود. همچنین فاصله نسبتاً یکسان خطوط موازی در شکل ۷ نشان دهنده عدم اثر متقابل عوامل مورد بررسی است.

مارتینز و همکاران نیز نشان دادند که ازن باعث کاهش قابل ملاحظه کدورت، به ویژه در پساب های با کدورت زیاد می شود (Martínez et al., 2011).

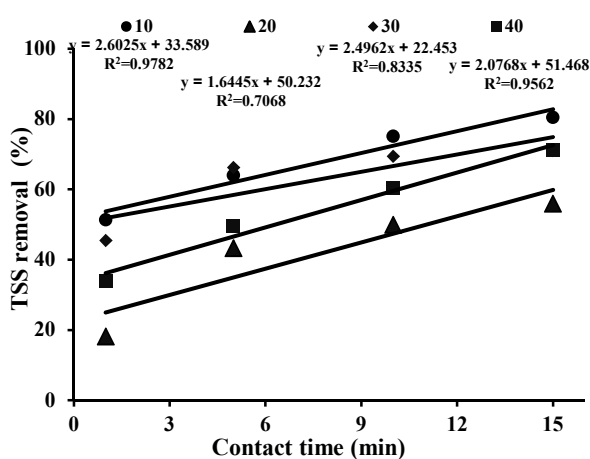


Fig. 7. Turbidity removal efficiency versus ozone contact time for each ozone dose level

شکل ۷- درصد حذف کدورت بر حسب زمان تماس با ازن برای هر سطح تزریق ازن

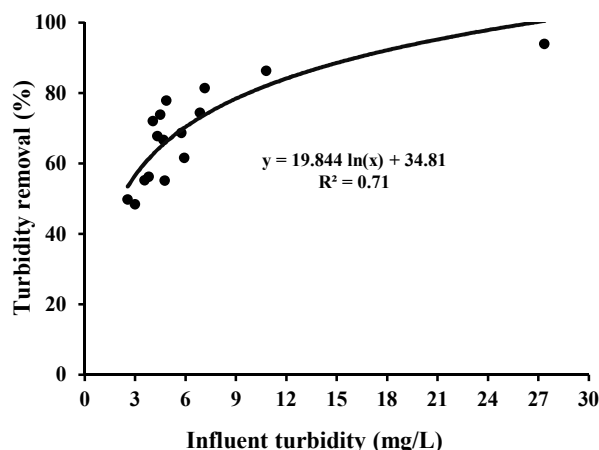


Fig. 6. Removal efficiency of turbidity in UF

شکل ۶- کارایی حذف کدورت در UF

میزان کدورت پساب خروجی، مستقل از میزان کدورت پساب ورودی به UF است (Dialynas and Diamadopoulos, 2008, Arévalo et al., 2009)

نتایج آنالیز آماری ANOVA نشان داد که سطوح فلاکس در UF نیز تأثیر به سزایی در کارایی حذف کدورت نیز نداشته و انتظار می رود با افزایش آن، میزان زمان کارکرد سیستم کاهش و میزان دفعات و مدت زمان شستشوی معکوس افزایش یابد. بنابراین از نظر پارامترهای فیزیکی، (TSS و کدورت)، UF دستورالعمل های پیشنهادی آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده^۱ را برای بسیاری از کاربری ها تأمین می کند (TSS ≤ ۵ mg/L و NTU ≤ ۲ کدورت).

مشابه نتایج پژوهش های انجام شده بر روی لامپ های LP، لامپ های MP نیز قادر به کاهش معنی دار پارامترهای کدورت نیستند و درصد ناچیز حذف آن در لامپ های MP را می توان ناشی از کاهش میزان TSS و کاهش کدورت ناشی از حذف مواد معلق تفسیر کرد، اما نتایج آنالیز واریانس دو طرفه نشان داد که اختلاف بین درصد حذف کدورت در سطوح دوز تزریق ازن و زمان تماس با ازن، معنی دار است و اثر متقابل بین این دو عامل وجود ندارد. تماس با ازن پایداری ذرات را از طریق کاهش نیروهای دافعه بین آنها کاهش می دهد و سرعت ته نشینی و حذف کدورت را بهبود می بخشد (Sadrnourmohamadi and Gorczyca, 2015).

¹ Environmental Protection Agency (EPA)



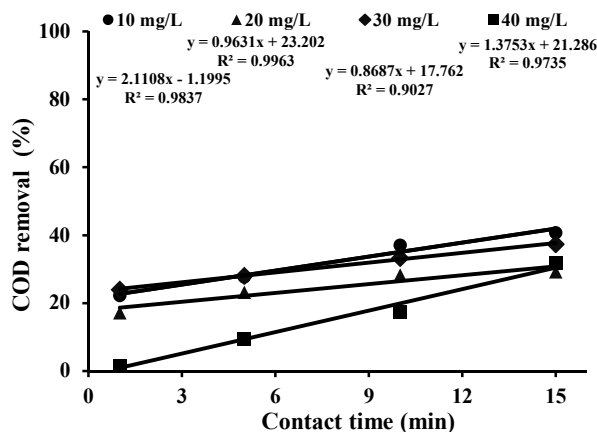


Fig. 8. COD removal efficiency versus ozone contact time for each ozone dose level

شکل ۸- درصد حذف COD بر حسب زمان تماس با ازن برای هر سطح تزریق ازن

خطی افزایش داشت. بر اساس نتایج آماری، بین سطح اول زمان تماس با ازن با سطح چهارم تفاوت معنی دار بود.

عدم افزایش درصد حذف COD متناسب با افزایش دوز تزریق ازن نشان داد که میزان اکسیدکنندگی ازن و کاهش COD، ارتباط مستقیم با غلظت COD پساب ورودی دارد، به گونه‌ای که برای غلظت زیاد COD در سطح چهارم تزریق ازن (۹۴ mg/L)، تمایل ازن برای کاهش مواد آلی نسبت به سایر سطوح کمتر و برای غلظت کم COD در سطوح اول و سوم تزریق ازن (۲۷ و ۳۷/۵ mg/L) بیشتر بود. بر این اساس، علی‌رغم غلظت زیاد ازن در سطح چهارم تزریق، بین سطح چهارم دوز تزریق ازن با سطوح اول و سوم تفاوت معنی دار بود.

لازارووا و همکاران نیز نشان دادند که کیفیت پساب، به ویژه مواد معلق و ترکیبات آلی، بر میزان غلظت ازن مورد نیاز، برای حد معینی از گندزدایی، تأثیرگذار هستند و با کاهش کیفیت پساب (افزایش TSS و COD)، در میزان غلظت ازن انتقال یافته به شدت نوسان و پراکنندگی ایجاد می‌شود (Lazarova et al., 2013).

همچنین در پژوهش ابسی و همکاران با استفاده از یک پایلوت ازن‌زنی به روش تزریق با دیفیوزر، نتایج نشان داد که مقدار COD کمتر در پساب، منجر به افزایش غلظت ازن باقیمانده و کاهش ازن مصرفی خواهد شد. در این پژوهش، غلظت ازن ۱۴ mg/L موجب کاهش تقریباً ۵ درصدی پارامتر COD (با غلظت میانگین ۹۹ mg/L) شد و در دوز ازن ۸ تا ۱۰ mg/L، کاهش لگاریتم

همچنین در پژوهش پتالا و همکاران تزریق ازن از طریق دیفیوزر با غلظت ۲۶/۷ mg/L، منجر به حذف کدورت تا حدود ۸۰ درصد و غلظت ۱/۲ NTU شده است (Petala et al., 2006).

COD -۳-۳

به ترتیب میانگین پارامتر COD را ۳۹ درصد (از ۴۳/۶ به ۲۶/۵ mg/L) کاهش داد که نشان‌دهنده بخشی از مواد آلی مرتبط با مواد معلق و ذرات کلئیدی تجمع یافته روی سطح غشا با قطر ۲۰-۱۰۰ μm است. بنابراین در این پژوهش، UF به منظور کاهش COD به منظور تخلیه در اقامتگاه‌های بیش از ۲۰۰ نفر (COD ≤ ۷۰ mg/L) یا استفاده مجدد صنعتی در نیروگاه‌ها (COD ≤ ۶۰ mg/L) مطابق با ضوابط EPA، مناسب بود.

در پژوهش ایلی‌اکا و همکاران با استفاده از UF، پارامتر COD با کارایی ۵۰ درصد (از ۵۸ به ۲۹ mg/L) کاهش یافت (Illueca-Muñoz et al., 2008).

ارولو و همکاران در تصفیه ثالثه پساب با سیستم UF، نشان دادند که بین غلظت COD در خروجی و ورودی ارتباط وجود دارد در پژوهش‌های مشابه، گادانی و همکاران، کارایی حذف COD را ۴۰ تا ۵۰ درصد، نادر و بستاک‌کی ۵۰ درصد و بری و همکاران ۳۷/۸ درصد به دست آوردند (Al-Bastaki, 2004, Bray et al., 2021, Arévalo et al., 2009, Gadani et al., 1996). نتایج آنالیز آماری ANOVA نشان داد که سطوح بارگذاری سطوح فلاکس در UF، تأثیری در کارایی حذف COD ندارند.

مشابه نتایج پژوهش‌های انجام شده بر روی لامپ‌های LP، لامپ‌های MP نیز قادر به کاهش معنی‌دار پارامترهای COD نیستند و درصد ناچیز حذف آن در لامپ‌های MP را می‌توان ناشی از کاهش میزان TSS و کاهش COD ناشی از حذف مواد معلق تفسیر کرد، اما نتایج آنالیز واریانس دو طرفه نشان داد که اختلاف بین میانگین درصد حذف COD در سطوح دوز تزریق ازن و زمان تماس با ازن، معنی دار است و اثر متقابل بین این دو عامل وجود ندارد. در این پژوهش، میزان درصد حذف COD، با توجه به کیفیت پساب ورودی، ۱/۶ تا ۴۰/۷۴ درصد بود. مقدار درصد حذف COD در مقابل زمان تماس با ازن، برای هر دوز تزریق ازن در شکل ۸ ارائه شده است. بر اساس این شکل، با افزایش زمان تماس در سایر سطوح دوز تزریق ازن، درصد حذف COD به صورت



دایالینس و دایامادپلس نیز با استفاده مستقیم از UF به منظور تصفیه پیشرفته پساب، درصد حذف کلیفرم کل را ۹۹/۹۶ به دست آوردند (Dialynas and Diamadopoulos, 2008). در این پژوهش، غلظت پارامترهای TSS، کدورت، COD و غلظت کلیفرم مدفوعی و کل ورودی در پساب ثانویه فیلتر شده، تأثیری در کارایی حذف کلیفرم‌ها توسط سیستم UF ندارند، اما بر اساس شکل ۹، با افزایش بار میکربی پساب ورودی به UF، درصد حذف کلیفرم مدفوعی تا حدی افزایش خواهد یافت. نتایج آنالیز آماری ANOVA نشان داد که سطوح فلاکس در UF، تأثیری در کارایی حذف کلیفرم مدفوعی و کل ندارند و با هر میزان بارگذاری و غلظت کلیفرم ورودی، UF این پارامتر کلیفرم مدفوعی و کل را به ترتیب به کمتر از ۱۴ و ۵۰ MPN/100mL رساند. با توجه به قطر منافذ UF، وجود کلیفرم ناچیز در پساب خروجی (کلیفرم مدفوعی < ۱۴ MPN/100mL و کلیفرم کل < ۵۰ MPN/100mL)، نشان‌دهنده آلودگی ناحیه نفوذ (محفظه غشا و غشا) در UF است و به دلیل کیفیت پساب ورودی و آسیب غشا نیست (Gómez et al., 2007, Arévalo et al., 2009).

تفاوت در غلظت کلیفرم مدفوعی و کل، قبل و بعد از پرتودهی پساب فیلتر شده با لامپ‌های MP معنی‌دار بود. به این معنی که غلظت کلیفرم مدفوعی پساب به طور مؤثری کاهش یافته است. در لامپ ۱۵۰ وات، با دوز پرتودهی ۴۱۵ تا ۱۶۶۰ mW.s/cm²، پارامتر کلیفرم مدفوعی با کارایی ۹۲/۷۹۲ تا ۹۹/۹۲۹ درصد (معادل با ۱/۱۴ تا ۳/۱۵ لگاریتم) و پارامتر کلیفرم کل با کارایی ۹۶/۹۰۴ تا ۹۹/۹۷۶ درصد (معادل با ۱/۵۱ تا ۳/۶۲ لگاریتم) و در لامپ ۳۰۰ وات با دوز پرتودهی ۹۲۰ تا ۳۶۸۰ mW.s/cm²، پارامتر کلیفرم مدفوعی با کارایی ۹۵/۱۰ تا ۹۹/۹۸ درصد (معادل با ۱/۳۱ تا ۳/۸۲ لگاریتم) و پارامتر کلیفرم کل با کارایی ۹۲/۸۸ تا ۹۹/۹۸ درصد (معادل با ۱/۱۵ تا ۳/۷۹ لگاریتم) کاهش یافت. کلیفرم مدفوعی در لامپ ۱۵۰ وات و در زمان تماس ۴۰ ثانیه، به ۵۵۰ MPN/100mL و لامپ ۳۰۰ وات در زمان‌های تماس ۳۰ و ۴۰ ثانیه، به ترتیب به ۶۱۵ و ۱۱۰ MPN/100mL کاهش یافت. نتایج نشان داد که در اولین مواجهه با شدت اشعه ۳۷ و ۸۰ mW/cm² (در ۱۰ ثانیه اول)، عمده کاهش کلیفرم مدفوعی و کل رخ می‌دهد.

غیرفعال‌سازی در مقابل افزایش میزان COD، به صورت خطی بود (Absi et al., 1993).

باستس و همکاران نیز بیشترین درصد حذف پارامتر COD (با غلظت اولیه ۱۵۵ mg/L)، با دوز ازن ۲۰ mg/m³ را ۳۶ درصد به دست آوردند (Bustos et al., 2014). در نتایج پژوهش مشابه توسط مارتینز و همکاران درصد حذف COD با غلظت ورودی کمتر از حدود ۲۰ mg/L و غلظت ازن ۱۱ تا ۱۳ mg/L، به طور میانگین ۳۰ درصد حاصل شد (Martínez et al., 2011).

۳-۴- کلیفرم مدفوعی و کلیفرم کل

UF به طور میانگین پارامتر کلیفرم مدفوعی را ۹۹/۹۹۹۴۸ درصد (۵/۲۸ لگاریتم، از $10^5 \times 6/92$ به ۳/۶۲ MPN/100mL) و پارامتر کلیفرم کل را ۹۹/۹۹۹۱۶ درصد (۵/۰۸ لگاریتم، از $10^6 \times 1/10$ به ۹/۲۳ MPN/100mL) کاهش داد. در شکل ۹ نمودار کاهش لگاریتم کلیفرم مدفوعی در UF بر حسب مقدار میانگین کلیفرم مدفوعی ورودی ترسیم شده است.

در پژوهش مشابه توسط گومز و همکاران، کارایی حذف کلیفرم مدفوعی توسط UF، ۹۹/۹۹۸ درصد و توسط ایلی‌اکا و همکاران، ۱۰۰ درصد حاصل شد (Illueca-Muñoz et al., 2008, Gómez et al., 2006) همچنین اریوالو و همکاران میزان کلیفرم مدفوعی در خروجی UF را ۱/۴ cfu/100 mL به دست آوردند (Arévalo et al., 2009).

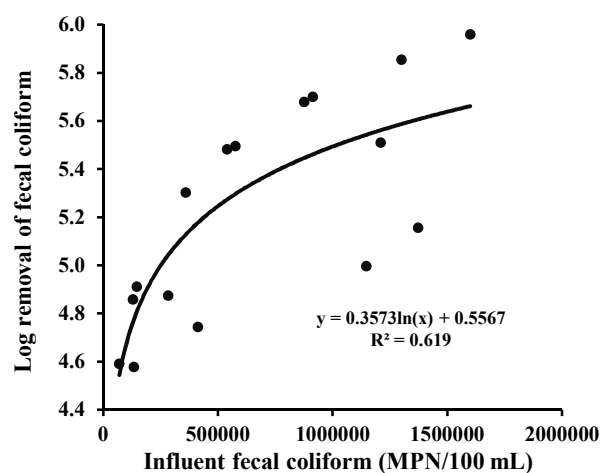


Fig. 9. Log removal of fecal coliform in UF

شکل ۹- کاهش لگاریتم کلیفرم مدفوعی در UF



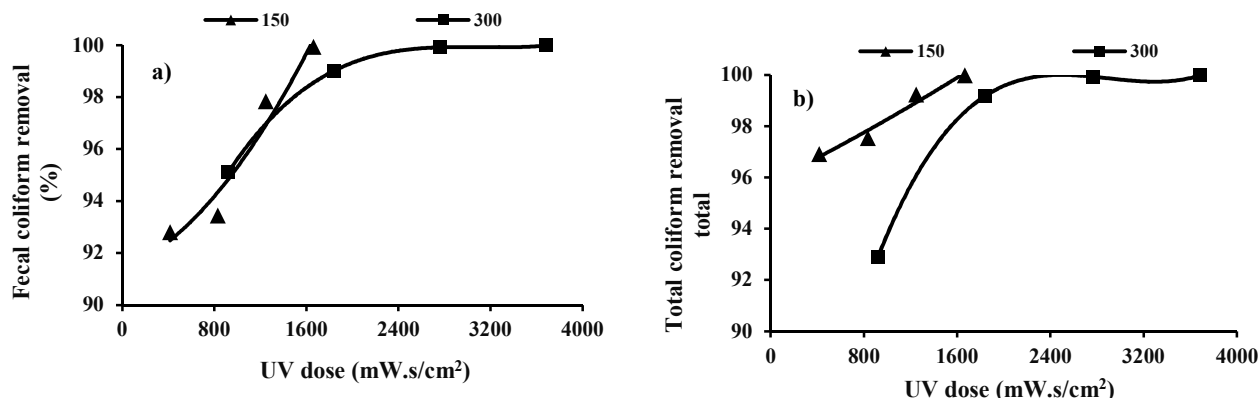


Fig. 10. Fecal and total coliform removal efficiency versus UV dose for MP lamps
a) fecal coliform removal efficiency versus UV dose and b) total coliform removal efficiency versus UV dose

شکل ۱۰- کارایی حذف کلیفرم مدفوعی و کل بر حسب دوز پرتو دهی برای لامپ‌های UV

(a) در حذف کلیفرم مدفوعی بر حسب دوز پرتو دهی و (b) در حذف کلیفرم کل بر حسب دوز پرتو دهی

درصد حذف کلیفرم مدفوعی و کل در سطوح مختلف دوز پرتو دهی برای هر لامپ مشاهده شد، به گونه‌ای پارامتر کلیفرم مدفوعی در لامپ ۱۵۰ وات بین سطوح اول و چهارم و پارامتر کلیفرم مدفوعی و کل برای لامپ ۳۰۰ وات، بین سطح اول و سایر سطوح تفاوت معنی‌دار بود که نشان‌دهنده کارایی زیاد حذف کلیفرم در سطوح بالای تابش و زمان‌های تماس با اشعه نسبت به سطح اول است. بنابراین با توجه به کاهش عمده کلیفرم در زمان‌های ابتدایی، اما به منظور رساندن میزان کلیفرم به کمتر از میزان تعیین شده در استانداردهای مختلف، بررسی سطوح بالاتر دوز اشعه و زمان تماس با اشعه الزامی است.

نتایج آنالیز واریانس دو طرفه نشان داد که اختلاف بین درصد حذف کلیفرم مدفوعی و کل در سطوح دوز تزریق ازن، زمان تماس با ازن و اثر متقابل بین این دو عامل معنی‌دار است. بر این اساس پارامتر کلیفرم مدفوعی برای دوز تزریق ازن و زمان تماس با ازن، در هر عامل بین سطح اول با سایر سطوح، تفاوت معنی‌دار است. همچنین پارامتر کلیفرم کل برای دوز تزریق ازن، بین سطوح اول و دوم با سطوح سوم و چهارم و برای زمان تماس با ازن، بین سطح اول با سایر سطوح تفاوت معنی‌دار است که نشان‌دهنده کارایی زیاد حذف کلیفرم در سطوح بالای تزریق ازن و زمان‌های تماس با ازن، نسبت به سطح اول هر عامل است. حداقل درصد حذف کلیفرم مدفوعی و کل برای غلظت ۱۰ mg/L و زمان تماس ۱ دقیقه به ترتیب برابر با ۴۶/۵۷۵ و ۶۶/۲۵۰ درصد (معادل ۰/۲۷ و ۰/۴۷ لگاریتم) و حداکثر درصد حذف کلیفرم مدفوعی و کل برای

کمائی و همکاران نیز در گندزدایی پساب فاضلاب کارخانه تولید شیر نشان دادند که لامپ MP ۳۰۰ وات در زمان‌های تماس ۱۰ و ۳۰ ثانیه، میزان کلیفرم کل به ترتیب به کمتر از ۱۰۰۰ و ۲۷۰ MPN/100mL می‌رساند (Kamani et al., 2006).

در شکل ۱۰، نمودار درصد حذف کلیفرم مدفوعی و کل بر حسب دوز پرتو دهی برای هر لامپ ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد با افزایش دوز پرتو دهی، برای لامپ ۱۵۰ وات، درصد حذف کلیفرم مدفوعی به صورت معادله درجه دوم و درصد حذف کلیفرم کل به صورت معادله خطی و برای لامپ ۳۰۰ وات، درصد حذف کلیفرم مدفوعی و کل به صورت معادله درجه سوم افزایش یافت. همچنین در لامپ ۳۰۰ وات، درصد حذف کلیفرم مدفوعی و کل تا میزان حدود 2700 mW.s/cm^2 (زمان تماس حدود ۳۰ ثانیه) روند افزایشی با شیب منفی داشته و سپس تغییرات محسوسی نداشت، به عبارتی در لامپ ۳۰۰ وات، زمان ماند حداقل ۳۰ ثانیه به منظور حذف کلیفرم کفایت می‌کند. مشابه شرایط پارامتر TSS، در دوز پرتو دهی مشابه در هر لامپ (۹۲۰/۷۲ تا $1663/88 \text{ mW.s/cm}^2$)، درصد حذف کلیفرم مدفوعی و کل در لامپ ۱۵۰ وات تا حدودی برابر و یا بیشتر از لامپ ۳۰۰ وات بود که نشان‌دهنده تأثیر زمان تماس بیشتر اشعه با پساب در لامپ ۱۵۰ وات است و مشخص کرد که زمان تماس با اشعه نسبت به پارامتر شدت متوسط پرتو دهی، دارای تأثیر بیشتری در حذف کلیفرم‌ها است.

بر اساس آنالیز واریانس یک طرفه، تفاوت معنی‌داری برای



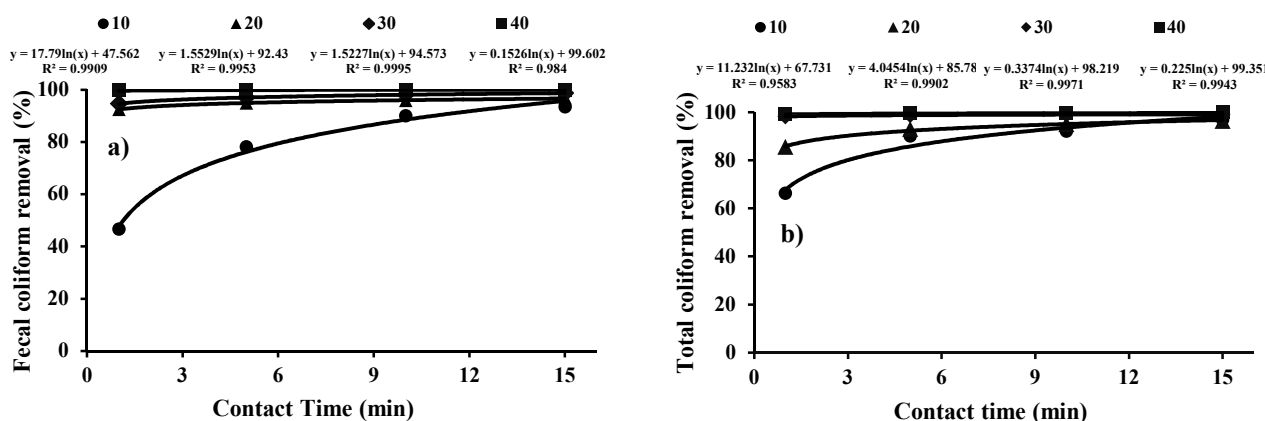


Fig. 11. Fecal and total coliform removal efficiency versus ozone contact time for each ozone dose level
a) focal coliform removal efficiency versus ozone contact time and b) total coliform removal efficiency versus ozone contact time

شکل ۱۱- درصد حذف کلیفرم مدفوعی و کل برحسب زمان تماس با ازن برای هر سطح تزریق ازن

(a) درصد حذف کلیفرم مدفوعی برحسب زمان تماس با ازن و (b) درصد حذف کلیفرم کل برحسب زمان تماس با ازن

لازارووا و همکاران نیز نشان دادند که میزان غیرفعال‌سازی کلیفرم مدفوعی، در زمان ماند هیدرولیکی ۲ تا ۱۰ دقیقه، تغییر محسوسی نمی‌کند و به دلیل تخریب سریع ازن، پس از تزریق آن، غیرفعال‌سازی بیشتری مشاهده نشد (Lazarova et al., 2013).

همچنین غیرفعال‌سازی در پژوهش لیبرتی و همکاران با تزریق به روش انژکتور با شیب بسیار تند در ۱/۰ دقیقه ابتدایی و به‌طور عمده در فاصله زمانی ۱/۰ تا ۵ دقیقه اتفاق افتاد (Liberti et al., 2000).

۴- نتیجه‌گیری

یافته‌های حاصل از این پژوهش نشان داد که:

۱- مقدار TSS در پساب خروجی از UF کمتر از حد تشخیص بود و UF به‌طور میانگین پارامترهای کدورت و COD را به ترتیب ۷۶ و ۳۹ درصد کاهش داد. همچنین میزان TSS و کدورت پساب خروجی از UF، مستقل از میزان این مقدار در پساب ورودی به آن است.

۲- متغیر فلاکس در عملکرد سیستم گندزدایی به‌روش UF، تأثیر چندانی ندارند و استفاده از UF به ترتیب پارامترهای کلیفرم مدفوعی و کل را به‌طور میانگین ۵/۲۸ و ۵/۰۸ لگاریتم کاهش داد. کارایی حذف کلیفرم مدفوعی و کل توسط سیستم UF، مستقل از کیفیت پساب ثانویه فیلتر شده است.

۳- در تصفیه ثالثه به‌روش ترکیبی فیلتراسیون و UF، پارامترهای

غلظت ۴۰ mg/L و زمان تماس ۱۵ دقیقه به‌ترتیب برابر با ۹۹/۹۹۲ و ۹۹/۹۷۲ درصد (معادل ۴/۱۱ و ۳/۵۵ لگاریتم) حاصل شد. مقدار میانگین درصد حذف کلیفرم مدفوعی و کل در مقابل زمان تماس با ازن، برای هر دوز تزریق ازن در شکل ۱۱ ارائه شده است. بر اساس این شکل، با افزایش زمان تماس در سایر سطوح دوز تزریق ازن، درصد حذف کلیفرم مدفوعی و کل به‌صورت لگاریتمی افزایش داشت و عمده کاهش کلیفرم‌ها، به‌ویژه در سطوح تزریق دوم تا چهارم (۲۰ تا ۴۰ mg/L) در یک دقیقه اول رخ داد.

همچنین افزایش درصد حذف کلیفرم‌ها همراه با افزایش سطوح دوز تزریق ازن در شکل ۱۱ نشان داد که در این پژوهش، کیفیت پساب ورودی نمی‌تواند روند گندزدایی را مختل کند، به‌گونه‌ای که اختلاف کیفیت پساب ورودی در سطح دوم و چهارم تزریق ازن (کدورت و COD در سطح دوم به ترتیب ۵/۶۹ NTU و ۵/۶۹ mg/L و در سطح چهارم ۱۲/۱۴ NTU و ۹۴ mg/L) نیز نتوانست مانع از ترتیب کارایی گندزدایی بر اساس میزان تزریق ازن شود. به عبارتی سینتیک حذف کلیفرم‌ها توسط ازن به‌گونه‌ای است که کمتر تحت تأثیر حذف مواد آلی و کدورت پساب قرار می‌گیرند.

در پژوهش مشابه گهر و همکاران در مقیاس آزمایشگاهی، غلظت ازن انتقال یافته به پساب، به‌منظور تقریباً دو لگاریتم کاهش کلیفرم مدفوعی پساب با کیفیت کم، ۳۰ تا ۵۰ mg/L به‌دست آمد (Gehr et al., 2003).



۷- میزان کیفیت پساب ورودی (کدورت و COD)، نسبت به دوز تزریق ازن، تأثیر بیشتری در درصد حذف کدورت و COD دارد، اما کیفیت پساب ورودی، در محدوده پارامترهای کیفی این پژوهش، نتوانست روند گندزدایی با ازن را مختل کند.

۸- لامپ MP، ۳۰۰ وات با زمان تماس ۴۰ ثانیه ($mW.s/cm^2$) ۳۷۰۰ و ازن با دوز تزریق 40 mg/L در زمان تماس ۱۵ دقیقه می‌تواند کلیفرم مدفوعی را به دستورالعمل پیشنهادی EPA برای استفاده در برخی کاربری‌ها شامل کاربری شهری با دسترسی محدود، آبیاری کشاورزی محصولات فرآوری شده یا غیرغذایی، مخازن با دسترسی محدود، محیط‌زیستی و برج‌های خنک‌کننده ($200\text{ MPN}/100\text{ mL} \leq$ کلیفرم مدفوعی) برساند.

۵- قدردانی

این پژوهش با استفاده از اعتبارات اعطایی شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان و با همکاری معاونت منابع انسانی و تحقیقات این شرکت انجام شد که از مسئولان سازمان‌های بیان شده صمیمانه قدردانی می‌شود.

میکربی و فیزیکی پساب خروجی، مطابق با استاندارد آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده، در بسیاری از کاربری‌ها از جمله مصارف شهری برای آبیاری مکان‌هایی با دسترسی کنترل شده ($14\text{ MPN}/100\text{ mL} < \text{TSS}$)، قابل استفاده است و نسبت به اشعه UV و ازن‌زنی، کیفیت بهتر و پایدارتری داشت و در کاهش سایر پارامترهای کیفی بررسی شده در این پژوهش تأثیرگذار بود.

۴- برخلاف عملکرد لامپ‌های LP، لامپ‌های MP با دوز اشعه ۴۰۰ تا 3700 mW.s/cm^2 ، قادر به حذف TSS هستند، به گونه‌ای که با افزایش دوز پرتودهی، درصد حذف TSS به صورت خطی برای هر لامپ افزایش یافت.

۵- در لامپ‌های MP، پارامتر زمان تماس با اشعه نسبت به پارامتر شدت متوسط پرتودهی، تأثیر بیشتری در حذف TSS، کلیفرم مدفوعی و کل دارد.

۶- با افزایش زمان تماس برای هر سطح دوز تزریق ازن، درصد حذف TSS به صورت خطی افزایش یافت، اما عملکرد ازن با غلظت‌های ۱۰ و 20 mg/L در حذف TSS، با عملکرد لامپ‌های MP قابل‌رقابت بود.

References

- Absi, F., Gamache, F., Gehr, R., Liechti, P. & Nicell, J. 1993. Pilot plant investigation of ozone disinfection of physico-chemically treated municipal wastewater. *Ozone in Water and Wastewater Treatment. Proceedings of the 11th Ozone Congress*, San Francisco, California, Citeseer, S733-S741.
- Al-Bastaki, N. M. 2004. Performance of advanced methods for treatment of wastewater: UV/TiO₂, RO and UF. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 43, 935-940.
- Alfonso-Muniozguren, P., Bohari, M. H., Sicilia, A., Avignone-Rossa, C., Bussemaker, M., Saroj, D., et al. 2020. Tertiary treatment of real abattoir wastewater using combined acoustic cavitation and ozonation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 64, 104986.
- Amin, M., Hashemi, H., Bina, B., Movahhedian Attar, H., Farrokhzadeh, H. & Ghasemian, M. 2010. Pilot-scale studies of combined clarification, filtration, and ultraviolet radiation systems for disinfection of secondary municipal wastewater effluent. *Desalination*, 260, 70-78.
- Arévalo, J., Garralón, G., Plaza, F., Moreno, B., Pérez, J. & Gómez, M. Á. 2009. Wastewater reuse after treatment by tertiary ultrafiltration and a membrane bioreactor (MBR): a comparative study. *Desalination*, 243, 32-41.
- Asano, T., Burton, F. & Leverenz, H. 2007. *Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications*, McGraw-Hill Education. New York, USA.



- Bataller Venta, M. O., Véliz Lorenzo, E., Fernández García, L. A., Fernández Torres, I., Hernández Castro, C. D. & Espinosa Lloréns, M. D. C. 2014. Effect of ozone on secondary effluent treatment for reuse in agriculture. *International Journal of Environmental Engineering*, 6, 100-118.
- Bray, R. T., Jankowska, K., Kulbat, E., Łuczkiwicz, A. & Sokołowska, A. 2021. Ultrafiltration process in disinfection and advanced treatment of tertiary treated wastewater. *Membranes*, 11, 221.
- Bustos, Y., Vaca, M., López, R., Bandala, E., Torres, L. & Rojas-Valencia, N. 2014. Disinfection of primary municipal wastewater effluents using continuous UV and ozone treatment. *Journal of Water Resource and Protection*, 6(1), 41982.
- Collivignarelli, M. C., Abbà, A., Benigna, I., Sorlini, S. & Torretta, V. 2017. Overview of the main disinfection processes for wastewater and drinking water treatment plants. *Sustainability*, 10, 86.
- Dialynas, E. & Diamadopoulos, E. 2008. Integration of immersed membrane ultrafiltration with coagulation and activated carbon adsorption for advanced treatment of municipal wastewater. *Desalination*, 230, 113-127.
- Falsanisi, D., Liberti, L. & Notarnicola, M. 2010. Ultrafiltration (UF) pilot plant for municipal wastewater reuse in agriculture: impact of the operation mode on process performance. *Water*, 2, 872-885.
- Gadani, V., Irwin, R. & Mandra, V. 1996. Ultrafiltration as a tertiary treatment: joint research program on membranes. *Desalination*, 106, 47-53.
- Gehr, R., Wagner, M., Veerasubramanian, P. & Payment, P. 2003. Disinfection efficiency of peracetic acid, UV and ozone after enhanced primary treatment of municipal wastewater. *Water Research*, 37, 4573-4586.
- Gibson, J., Drake, J. & Karney, B. 2017. UV disinfection of wastewater and combined sewer overflows. In: Shamim, I. A. *Ultraviolet Light in Human Health, Diseases and Environment*, Springer Cham Pub., 267-275.
- Gómez, M., De La Rua, A., Garralón, G., Plaza, F., Hontoria, E. & Gómez, M. 2006. Urban wastewater disinfection by filtration technologies. *Desalination*, 190, 16-28.
- Gómez, M., Plaza, F., Garralón, G., Pérez, J. & Gómez, M. A. 2007. A comparative study of tertiary wastewater treatment by physico-chemical-UV process and macrofiltration-ultrafiltration technologies. *Desalination*, 202, 369-376.
- Hosseini, M. 2002. *Reusing Treated Wastewater*, Olume Rouz Publications, Iran. (In Persian)
- Illueca-Muñoz, J., Mendoza-Roca, J., Iborra-Clar, A., Bes-Piá, A., Fajardo-Montañana, V., Martínez-Francisco, F., et al. 2008. Study of different alternatives of tertiary treatments for wastewater reclamation to optimize the water quality for irrigation reuse. *Desalination*, 222, 222-229.
- Kamani, H., Vaezi, F., Nabizadeh, R., Mesdaghinia, A. & Alimohammadi, M. 2006. Application of medium pressure UV lamp for wastewater disinfection of milk production industry. *Journal of Applied Sciences*, 6, 731-73.
- Koivunen, J., Siitonen, A. & Heinonen-Tanski, H. 2003. Elimination of enteric bacteria in biological-chemical wastewater treatment and tertiary filtration units. *Water Research*, 37, 690-698.
- Lazarova, V., Liechti, P. A., Savoye, P. & Hausler, R. 2013. Ozone disinfection: main parameters for process design in wastewater treatment and reuse. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 3, 337-345.
- Liberti, L., Notarnicola, M. & Lopez, A. 2000. Advanced treatment for municipal wastewater reuse in agriculture. III-Ozone Disinfection. *Ozone: Science and Engineering*, 22, 151-166.
- Ljunggren, M. 2006. Micro screening in wastewater treatment-an overview. *Vatten*, 62, 171-177.



- Martínez, S. B., Pérez-Parra, J. & Suay, R. 2011. Use of ozone in wastewater treatment to produce water suitable for irrigation. *Water Resources Management*, 25, 2109-2124.
- Metcalf, L., Eddy, H. P. & Tchobanoglous, G. 2014. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse*, McGraw-Hill, New York, USA.
- Petala, M., Tsiridis, V., Samaras, P., Zouboulis, A. & Sakellariopoulos, G. 2006. Wastewater reclamation by advanced treatment of secondary effluents. *Desalination*, 195, 109-118.
- Rice, E. W., Baird, R. B., Eaton, A. D. & Clesceri, L. S. 2012. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, American Public Health Association Washington, DC, USA.
- Sadrnourmohamadi, M. & Gorczyca, B. 2015. Effects of ozone as a stand-alone and coagulation-aid treatment on the reduction of trihalomethanes precursors from high DOC and hardness water. *Water Research*, 73, 171-180.
- Xu, P., Janex, M. L., Savoye, P., Cockx, A. & Lazarova, V. 2002. Wastewater disinfection by ozone: main parameters for process design. *Water Research*, 36, 1043-1055.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

