



# Journal of Environmental Studies

Vol. 47, No. 4, Winter 2022

Journal Homepage: [www.Jes.ut.ac.ir](http://www.Jes.ut.ac.ir)

Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

## Investigating Peroxymonosulfate-UV Advanced Oxidation Process Efficiency for Treated Municipal Wastewater Disinfection and Effluent Quality Recovery

Gagik Badalians Gholikandi\*, Mahsa Amiri, Hamidreza Masihi

Department of Water, Wastewater and Environmental Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

DOI: [10.22059/JES.2021.328245.1008212](https://doi.org/10.22059/JES.2021.328245.1008212)

**Document Type**  
Research Paper

**Received**  
August 27, 2021

**Accepted**  
November 15, 2021

### Abstract

In this research, novel disinfection of municipal wastewater treatment plants (WWTPs) effluent in a laboratory with the main aim of efficiency investigation of the peroxymonosulfate-ultraviolet (UV/PMS) (able to produce both sulfate and hydroxyl radicals) advanced oxidation process was investigated. A comparison between this process and other advanced oxidation processes, persulfate-ultraviolet (UV/PS) and hydrogen peroxide-ultraviolet (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), was performed, and results were compared with each other. Due to the WWTPs effluents' quality requirements to achieve reliable operation for reuse and reclamation purposes, the results show that the UV/PMS is a more appropriate effective process than other mentioned methods. The efficiency of 99.99% was shown for the removal of fecal coliforms in the UV/PMS process. Moreover, compared to other investigated methods, higher efficiency in the important effluent's quality parameters reduction was evaluated, and the UV/PMS process achieved the most effective reduction compared to other investigated methods. Overall, the results showed that the UV/PMS method has a significant capability of effective disinfection.

**Keywords:** Wastewater effluent disinfection, Ultraviolet, Advanced oxidation process, peroxymonosulfate-ultraviolet

---

\* Corresponding Author:

Email: [G\\_Badalians@sbu.ac.ir](mailto:G_Badalians@sbu.ac.ir)

## Introduction

Eliminating or deactivating the microbial pathogens in wastewater treatment plants effluent has been of particular interest to experts in order to reach the standard quality required. In the meantime, it seems obvious – due to a lack of water resources – that reusing the treated wastewater is a necessity, along with employing and developing modern, efficient solutions. In this regard, the disinfected effluent of wastewater treatment plants has raised interest in various applications containing agriculture, green space irrigation, aquifer feeding, industry, and other municipal activities. In the recent couple of decades, it can be seen that an ever-increasing attention has been paid to the use of ultraviolet (UV) radiation as an efficient method in wastewater treatment plants. However, the results of investigations and existing experiences indicate the negative impact of parameters such as turbidity, hardness, and suspended solids in wastewater on account of the diffusion of radiant energy, as well as obstructing the influence of direct radiation on microorganisms and, in turn, the performance of the UV radiation method in a disinfection process; thus, the application of modern, efficient technologies is requisite for the performance improvement of this process under different operating conditions. Due to their capability of removing toxic, resistant and non-biodegradable compounds, Advanced Oxidation Processes (AOPs) may be adopted as a suitable approach to reach the abovementioned goal. The ultraviolet radiation in conjunction with the effective radicals is considered efficient UV-based AOPs in urban wastewater treatment plants. Not only do these methods lead to reducing the probability of forming toxic and hazardous by-products, they also produce radicals that are highly reactive and react with organic compounds in a non-selective manner. AOPs can eliminate a vast variety of biological and chemical substances, as well as significantly decrease organic and inorganic pollutants by producing highly reactive free radicals, e.g., hydroxyls ( $\text{OH}^\bullet$ ) and sulfate radicals ( $\text{SO}_4^{\bullet-}$ ). Suitable for deactivating microorganisms, these radicals decompose an extensive spectrum of resistant compounds as well. Hydroxyl-based advanced oxidation processes (HR-AOPs) have been comprehensively studied. It should be noted that the sulfate radical has higher reactivity and oxidation potential compared to the oxidizing agent of the hydroxyl radical. As a substitute for HR-AOPs, Sulfate-based Advanced Oxidation Processes (SR-AOPs) have been the focus of many researchers in recent years. This process encompasses the use of chemical oxidants such as Peroxymonosulfate (PMS), which is environmentally friendly and easily activated. The research results in recent years unanimously reveal the high efficiency of AOPs in substantial eliminations of the microbial community within the specimens tested. In the current research, the efficacy of a UV/PMS AOP, which is able to produce both sulfate and hydroxyl radicals, was investigated so as to remove the total amount of coliforms from the effluent of municipal wastewater treatment plants. In order to identify the relative advantages of this method, the obtained results were compared to those of persulfate-UV, hydrogen peroxide-UV, and UV alone methods. In addition, the effect of removing the parameters related to the quality characteristics of wastewater treatment plant's effluent, comprising turbidity, chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand ( $\text{BOD}_5$ ), total nitrogen (TN), electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS) and total suspended solids (TSS), was investigated under optimal operating conditions of laboratory reactors.

## Materials and Methods

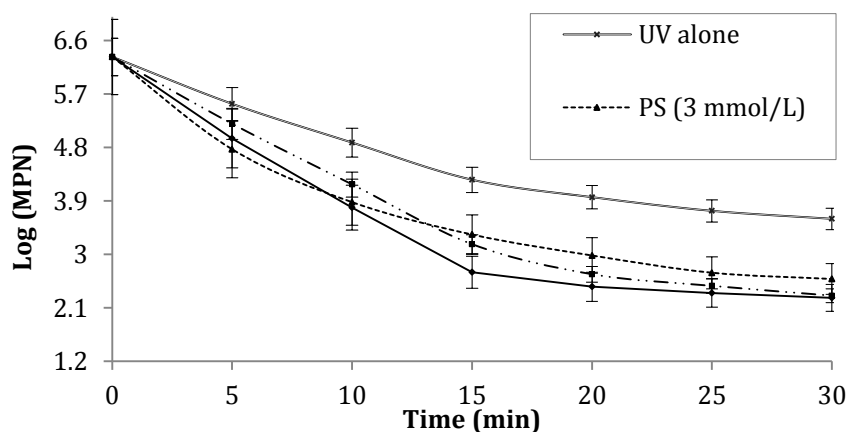
In this work, the treated wastewater effluent samples were collected daily near the endpoint before chlorination from an activated sludge municipal WWTP located in northeast Tehran. All the experiments were performed by a 250-cc cylindrical reactor and a UV-C lamp model UV-6W. To measure the effluent's quality parameter, we used methods from the standard methods for the examination of wastewater.

## Discussion of Results

In this section, the processes of UV/PMS, UV/PS, UV/ $\text{H}_2\text{O}_2$ , and UV alone have been investigated on the removal of the total coliform. It was determined that increasing the production of hydroxyl and sulfate radicals during the experiments leads to an increase in the removal of total coliform. We have evaluated the optimum operational conditions for each process. In this way, 400 MPN in 100 ml was considered the allowable limit for the total coliforms to successfully disinfection according to the

wastewater reuse standards for agriculture purposes. Regarding the importance of reducing the qualitative parameters of effluent, in this study, the most important parameters such as COD, BOD<sub>5</sub>, TSS, TDS, TN, TP, EC, and turbidity have been studied under optimum operational conditions of each disinfection method.

In comparison, the UV-radiation alone showed the limited capability to achieve coliforms reduction requirements. As shown in Figure 1, the hydroxyl and sulfate radicals are both produced. The highest removal efficiency is by a PMS dosage of 0.09 mmol/L in a reaction time of 30 min. It should be noted, that the optimum operational conditions for the reactor to achieve the allowable limit of maximum 400 coliforms in 100 ml in a PMS dosage of 0.06 mmol/L, can be obtained by achieving log (MPN) = 2.45 (e.g., 285 MPN/100ml) in a reaction time of 20 minutes, whereas in UV/PS and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> the optimum operating conditions were in the dosage of 3 and 0.35 mmol/L at the time of 30 and 25 minutes, respectively. Therefore, The UV/PMS process showed the best capability to achieve coliforms reduction requirements and efficient disinfection of wastewater treatment plants effluent.



**Figure. 1.** The removal of total coliform by the UV/PMS, UV/PS, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, and UV alone processes in the optimum operational conditions (pH = 6.9 ± 0.1 and UV dosage=1.7×10<sup>4</sup>μW/cm<sup>2</sup>)

As the results are shown in Table 1, the UV/PMS is the most efficient method to earn the best reduction of effluents' quality parameters. In comparison between these four processes under the optimum operational conditions, these results are achievable that the UV/PMS process had a considerable amount in the removal of turbidity and TSS. Also, it showed an appropriate efficiency in other parameters like COD and BOD<sub>5</sub>. But this method is still incapable of removing existing TN and TP concentrations.

**Table 1.** Influence of processes on characteristics of the treated wastewater effluent

Parameter	Unit	Effluent t	Methods				
			UV/PM S	UV/P S	UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	UV	
optimal Condition	Time	min	-	20	30	25	30
	Dosage of the PMS, PS, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> and UV	mmol/L	-	0.06	3	0.35	1.7×10 <sup>4</sup>
<b>Turbidity</b>	NTU	7.39	4.14	7.75	6.27	7.01	
<b>Chemical oxygen demand (COD)</b>	mg/L	36	23	34.5	11	36	
<b>Biological oxygen demand (BOD<sub>5</sub>)</b>	mg/L	21	15	20	10	21	
<b>Total nitrogen (TN)</b>	mg/L	38.67	38.67	38.67	38.67	38.67	
<b>Total phosphorus (TP)</b>	mg/L	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	
<b>Temperature</b>	°C	17.8	17.3	17.3	17.3	17.8	

<b>Electrical conductivity (EC)</b>	$\mu\text{S/cm}$	709	775	1400	690	710
<b>Total dissolved solids (TDS)</b>	mg/L	471	520	952	634	471
<b>Total suspended solids (TSS)</b>	mg/L	15.6	6.5	14.8	10.8	14.9

### Conclusion

Wastewater treatment processes with the aim of reuse and reclamation have been investigated and improved during the last decades. Also, efficient disinfection of wastewater effluent before discharge is counted as the essential requirement of reuse. In this regard, employing novel disinfection processes is vital and followed by researchers. In this study, a new approach for improving the UV-based disinfection process for wastewater effluent was investigated. The peroxymonosulfate-ultraviolet was considered as the primary method, and because the obtained results indicate the capability of this method, it was compared with persulfate-ultraviolet, hydrogen peroxide-ultraviolet and conventional UV-radiation methods. In terms of disinfection process improvement, the results demonstrate that employing the peroxymonosulfate-ultraviolet process is suitable for achieving a more reliable solution accordingly. It was also found that this method has the ability to effectively reduce the effluent's quality parameters, in addition to disinfection. It should be noted that using the peroxymonosulfate-ultraviolet method in wastewater treatment plants requires complementary studies regarding possible by-products of the process in a semi-industrial scale which are recommended to be considered in future research.

## گندزایی پساب تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری توسط پرتودهی فرابنفش در حضور پروکسی مونوسولفات و هیدروژن پروکسید

گاگیک بدلیانس قلی کندی\*، مهسا امیری، حمیدرضا مسیحی

گروه مهندسی آب، فاضلاب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۸/۲۴

تاریخ وصول مقاله: ۱۴۰۰/۶/۵

### چکیده

در این پژوهش، کارآمدی فرآیند اکسیداسیون پیشرفته پروکسی مونوسولفات - پرتو فرابنفش (قادر به تولید هردو رادیکال سولفات و هیدروکسیل) در مقیاس آزمایشگاهی با هدف بهینه سازی فرآیند گندزدایی پساب خروجی تصفیه خانه فاضلاب شهری به روش لجن فعال مورد بررسی قرار گرفت و با روش‌های پرسولفات - پرتو فرابنفش، هیدروژن پراکسید - پرتو فرابنفش و پرتودهی فرابنفش مقایسه شد. فرآیند پروکسی مونوسولفات - پرتو فرابنفش، تحت شرایط بهینه راهبری (مدت زمان ماند ۲۰ دقیقه، میزان دوز پرتو فرابنفش  $1.7 \times 10^4 \mu W/cm^2$  و غلظت پروکسی مونوسولفات  $0.06 mmol/L$ ) تعداد کلی فرم کل به کمتر از حد مجاز استاندارد کاهش داد. از سوی دیگر دستیابی به حد مجاز کلیفرم کل با روش هیدروژن پراکسید - پرتو فرابنفش تحت شرایط بهینه (زمان ماند ۲۵ دقیقه، میزان دوز پرتو فرابنفش  $1.7 \times 10^4 \mu W/cm^2$  و غلظت هیدروژن پراکسید  $0.35 mmol/L$ ) به حد مجاز کلیفرم کل میسر گردید. در سایر روش‌ها، دستیابی به حد مجاز تعداد کلیفرم کل حاصل نگردید. همچنین امکان سنجی همزمان بهبود دیگر پارامترهای کیفی پساب خروجی نیز انجام پذیرفت. به کارگیری فرآیند پروکسی مونوسولفات - پرتو فرابنفش منجر به کاهش مقادیر BOD، COD و کدورت پساب خروجی به ترتیب برابر ۲۸/۵، ۳۶/۱ و ۴۴ درصد شد، اما تاثیر چندانی بر میزان غلظت فسفر و نیترژن کل نداشت. در نهایت می‌توان گفت که فرآیند پروکسی مونوسولفات - پرتو فرابنفش از کارآمدی بالایی در زمینه گندزدایی و بهبود دیگر پارامترهای مهم کیفی پساب خروجی تصفیه خانه برخوردار است.

### کلید واژه

گندزدایی پساب تصفیه خانه‌های فاضلاب، پرتودهی فرابنفش، فناوری اکسیداسیون پیشرفته، روش پروکسی مونوسولفات - پرتو فرابنفش

### سرآغاز

حال، لزوم استفاده مجدد از فاضلاب تصفیه شده به دلیل کمبود منابع آب و به کارگیری و توسعه راه حل‌های کارآمد و نوین مشهود است (Petrie et al., 2014; EPA, 2016; Mateo-sagasta et al., 2015; Rizzo et al., 2018). در این راستا، استفاده از پساب گندزدایی شده تصفیه‌خانه‌های

حذف یا غیرفعال سازی عوامل میکروبی بیماریزا در پساب تصفیه خانه‌های فاضلاب با هدف دست یابی به کیفیت استاندارد مورد توجه متخصصین قرار دارد (Osińska et al., 2017; IWA, 2002; Ramezani et al., 2019). در همین

Email: [G.Badalians@sbu.ac.ir](mailto:G.Badalians@sbu.ac.ir)

\*نویسنده مسئول:

DOI: [10.22059/JES.2021.328245.1008212](https://doi.org/10.22059/JES.2021.328245.1008212)

DOR: [20.1001.1.10258620.1400.47.4.7.9](https://doi.org/20.1001.1.10258620.1400.47.4.7.9)

بیولوژیکی و شیمیایی هستند (Yang et al., 2017) و از طریق تشکیل رادیکال‌های آزاد با واکنش پذیری بالا مانند رادیکال هیدروکسیل ( $\text{OH}^\circ$ ) و رادیکال سولفات ( $\text{SO}_4^\circ$ ) منجر به کاهش قابل توجه آلاینده‌های آلی و معدنی می‌شوند (Malvestiti and Dantas, 2017). این رادیکال‌ها همچنین طیف گسترده‌ای از ترکیبات مقاوم را تجزیه می‌کنند و برای غیرفعال سازی میکروارگانیسم‌ها مناسب هستند (Moussavi et al., 2019). فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته بر پایه رادیکال هیدروکسیل (HR-AOPs)<sup>۱</sup> به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (Miklos et al., 2018b). باید توجه داشت که رادیکال سولفات از قابلیت واکنش پذیری و اکسیداسیون بالاتری ( $E^\circ=2.5-3.1\text{V}$ ) در مقایسه با عامل اکسیدکننده رادیکال هیدروکسیل برخوردار است ( $E^\circ=1.9-2.7\text{V}$ ) (Nihemaiti et al., 2018). در سال‌های اخیر، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته بر پایه رادیکال سولفات (SR-AOPs)<sup>۵</sup> به عنوان جایگزینی برای فرآیندهای HR-AOPs توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند (Rodríguez-chueca et al., 2016). این فرآیند شامل به کارگیری اکسیدکننده‌های شیمیایی مانند پروکسی مونوسولفات (PMS)<sup>۶</sup> می‌شود (Rodríguez-chueca et al., 2017). پروکسی مونوسولفات سازگار با محیط زیست است و به راحتی فعال می‌شود (Hou et al., 2019). نتایج پژوهش‌های موجود در سال‌های اخیر همواره نشان دهنده کارآمدی بالای روش‌های اکسیداسیون پیشرفته در حذف قابل توجه اجتماع میکروبی در نمونه‌های آزمایش شده هستند می‌باشند (Gholikandi et al., 2018; Gholikandi et al., 2017; Gholikandi et al., 2017b; Gholikandi et al., 2014; Gholikandi and Kazemirad, 2018; Masihi and Gholikandi, 2018; Sadabad and Gholikandi, 2018). در پژوهش حاضر، کارآمدی فرآیند ترکیبی اکسیداسیون پیشرفته پروکسی مونوسولفات و پرتودهی فرابنفش (PMS+UV) که قادر به تولید هردو رادیکال سولفات و هیدروکسیل است، به منظور حذف کلیفرم کل از پساب تصفیه خانه فاضلاب شهری مورد بررسی قرار گرفت. برای

فاضلاب برای اهداف گوناگونی از جمله کشاورزی، آبیاری فضای سبز، تغذیه آبخوان‌ها، کاربردهای صنعتی و سایر فعالیت‌های شهری مورد توجه قرار گرفته است (Liu et al., 2018). در چند دهه اخیر، توجه روزافزونی به استفاده از پرتودهی فرابنفش در تصفیه خانه‌های فاضلاب به عنوان روشی کارآمد قابل تشخیص است (Whitby and Scheible, 2004; Paredes et al., 2018; Zhang et al., 2019). در عین حال، نتایج بررسی‌ها و تجربیات حاصل نشان‌دهنده تاثیر منفی پارامترهایی مانند کدورت، سختی و ذرات معلق موجود در فاضلاب، به دلیل پراکنده شدن انرژی تابشی و ایجاد مانع در تاثیرگذاری مستقیم پرتو بر میکروارگانیسم‌ها بر عملکرد روش پرتودهی فرابنفش در فرآیند گندزدایی هستند (Brahmi et al., 2010; Christensen and Linden, 2003). در نتیجه، به کارگیری فناوری‌های نوین کارآمد با هدف ارتقای عملکردی این فرآیند تحت شرایط مختلف بهره برداری الزامی است (Rodríguez-chueca et al., 2018; Luo et al., 2014; Malvestiti and Dantas, 2019). به کارگیری فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs)<sup>۱</sup> ممکن است به دلیل قابلیت حذف ترکیبات خطرناک مقاوم و غیرقابل تجزیه بیولوژیکی راهکاری مناسب برای دست یابی به هدف فوق باشد (Lima et al., 2018). پرتو فرابنفش (UV)<sup>۲</sup> به همراه رادیکال‌های تاثیرگذار به عنوان فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته کارآمد برپایه پرتودهی فرابنفش (UV-AOPs) در تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری به شمار می‌روند (Giannakis et al., 2018; Miklos et al., 2018; Ulliman et al., 2018). این روش‌ها نه تنها منجر به کاهش احتمال تشکیل محصولات جانبی سمی و خطرناک (DBPs)<sup>۳</sup> می‌شوند بلکه باعث تولید رادیکال‌هایی که از قابلیت واکنش بالایی برخوردار هستند و به صورت غیرانتخابی با ترکیبات آلی واکنش انجام می‌دهند، نیز می‌شوند (Zhang et al., 2019b). روش‌های اکسیداسیون پیشرفته قادر به حذف گروه‌های گسترده‌ای از مواد

راکتورهای آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفتند.

## مواد و روش‌ها

### مواد

### نمونه برداری

نمونه‌های روزانه پساب خروجی (قبل از کلرزنی) مورد استفاده در این پژوهش از تصفیه خانه فاضلاب شهید محلاتی با فرآیند لجن فعال- هوادهی گسترده عمقی، واقع در شمال شرق تهران برداشت شدند. مشخصات کیفی پساب مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است.

شناسایی مزیت‌های نسبی این روش، نتایج به دست آمده با نتایج راهبری فرآیندهای ترکیبی پرسولفات (PS+UV) و هیدروژن پراکسید و پرتودهی فرابنفش (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+UV)، همچنین روش متعارف پرتودهی فرابنفش مقایسه شدند. علاوه بر این، کارآمدی حذف پارامترهای کیفی پساب خروجی از تصفیه خانه فاضلاب شامل کدورت، اکسیژن خواهی شیمیایی (COD)، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD<sub>5</sub>)، غلظت کل نیتروژن (TN)، هدایت الکتریکی (EC)، غلظت کل جامدات محلول (TDS) و غلظت کل جامدات معلق (TSS) تحت شرایط بهینه عملکردی

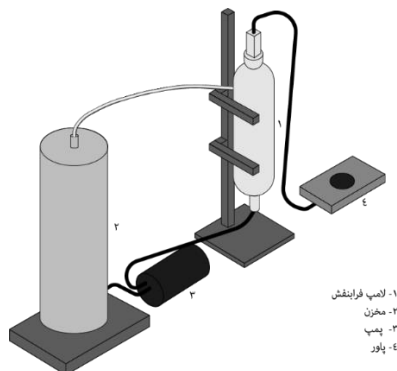
جدول ۱. مشخصات کیفی نمونه‌های پساب مورد بررسی

پارامتر	مقدار	واحد
pH	7/1±0/2	-
Total coliform	(2/1±0/3)×10 <sup>6</sup>	MPN in 100 milliliters
Turbidity	10±3	NTU
COD	34±5	mg/L
BOD <sub>5</sub>	20±5	mg/L
TN	40±5	mg/L
TP	10±2	mg/L
Temperature	18±1	°C
EC	715±20	μS/cm
TDS	453±50	mg/L
TSS	18±5	mg/L

وات و طول ۲۰ سانتی متر ساخت شرکت هیتاچی ژاپن استفاده شد (شکل ۱).

## پایلوت آزمایشگاهی

جهت انجام آزمایشات از یک راکتور استوانه‌ای شکل به حجم ۲۵۰ سی سی و لامپ UV مدل UV-C با توان ۶



۱- لایب فرابنفش  
۲- مخزن  
۳- پمپ  
۴- پاور



شکل ۱. تصویر و طرح واره سامانه آزمایشگاهی

شرایط بهینه برای حذف کلیفرم کل تعیین شده است. در این فرآیندها، رادیکال‌های هیدروکسیل و سولفات (یا هر دو)، به عنوان عوامل اکسیداسیون عمل می‌کنند. حد مجاز تعداد کلیفرم کل کمتر از ۴۰۰ عدد در ۱۰۰ میلی لیتر با هدف استفاده مطمئن مجدد پساب، به عنوان معیاری برای گندزدایی موفق پساب در نظر گرفته شد. بدین ترتیب، معیار حدمجاز وجود کلیفرم مدفوعی مطابق با استانداردهای استفاده مجدد از پساب برای اهداف کشاورزی نیز رعایت می‌گردد.

### پروکسی مونوسولفات (PMS) و پرتو فرابنفش (PMS+UV)

همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، در غیاب پروکسی مونوسولفات و یا به عبارت دیگر هنگامی که تنها پرتوهای فرابنفش انجام پذیرفت، مقدار MPN بعد از مدت زمان واکنش برابر با ۳۰ دقیقه از ۲۱۰۰۰۰۰ به ۳۹۶۵ کاهش یافت. در این روش، تولید رادیکال‌های هیدروکسیل و سولفات مطابق با رابطه (۱) صورت می‌گیرد (Rodríguez-*chueca et al.*, 2017b). هنگامی که تزریق پروکسی مونوسولفات آغاز شده و میزان دوز آن به ۰/۰۳ میلی مول بر لیتر (mmol/L) می‌رسد، مقدار MPN بعد از مدت زمان واکنش برابر ۳۰ دقیقه از ۲۱۰۰۰۰۰ به ۹۹۱ کاهش می‌یابد. در همین مدت زمان واکنش، با افزایش میزان دوز PMS به ۰/۰۶ mmol/L و سپس ۰/۰۹ mmol/L مقدار MPN به ترتیب از ۲۱۰۰۰۰۰ به ۱۸۵ و ۵۷ کاهش می‌یابد. بر مبنای نتایج حاصل می‌توان گفت که با افزایش دوز PMS میزان حذف کلیفرم کل نیز افزایش می‌یابد. بیشترین میزان حذف مربوط به دوز PMS برابر ۰/۰۹ mmol/L در مدت زمان واکنش برابر ۳۰ دقیقه می‌باشد. البته باید توجه داشت که شرایط بهینه بهره برداری راکتور برای دستیابی به حدمجاز حداکثر ۴۰۰ عدد در ۱۰۰ میلی لیتر در دوز PMS برابر ۰/۰۶ mmol/L با دستیابی به میزان ۲۸۵ عدد در ۱۰۰ میلی لیتر در مدت زمان واکنش برابر ۲۰ دقیقه است. همچنین

مواد استفاده شده از پتاسیم پروکسی مونوسولفات، پتاسیم پرسولفات و هیدروژن پراکسید (۳۵٪) شرکت مرک (Merck) استفاده گردید.

### روش‌ها

اندازه گیری غلظت کل جامدات معلق (TSS)، غلظت کل جامدات محلول (TDS)، اکسیژن خواهی شیمیایی (COD)، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD<sub>5</sub>)، غلظت کل نیتروژن (TN)، غلظت کل فسفر (TP<sup>۱۵</sup>) و شمارش کلیفرم کل به ترتیب مطابق با روشهای 5220D، 2540C، 2540D، 9221B و 2350E، 4500B-C، 4500N-C، 5210B استاندارد متد انجام پذیرفت (APHA, 1992). همچنین برای اندازه گیری pH از دستگاه HANNA pH meter-211 استفاده شد. برای اندازه گیری هدایت الکتریکی و کدورت نیز به ترتیب از دستگاه‌های OSK 14821 و Lovibond استفاده گردید.

### روش انجام آزمایش‌ها

راکتور مورد بررسی (شکل یک) راکتور ناپیوسته است. ابتدا به مخزن ۲۵۰ سی سی پساب اضافه می‌گردید. سپس مواد شیمیایی مورد نظر به آن تزریق می‌شد. در ادامه پمپ روشن می‌گردید و پساب را از کف مخزن به داخل راکتور فرابنفش (جنس بدنه راکتور استیل) پمپاژ می‌کرد. پساب از نقطه تحتانی وارد راکتور فرابنفش می‌شد و از خروجی فوقانی راکتور مجدد به مخزن پساب تخلیه می‌گردید. این عمل تا زمان ماند مورد نظر ادامه پیدا می‌کرد. در انتها از پساب گندزدایی شده نمونه برداری می‌شد و آزمایش‌ها بر روی آن انجام می‌گرفت.

### نتایج

#### کاهش کلیفرم کل

در این بخش، تأثیر استفاده از فرآیندهای PMS+UV، PS+UV، H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+UV و UV بر حذف کلیفرم کل بررسی و



در پساب تغییرات خاصی نداشت و تقریباً برابر ۲۱۰۰۰۰۰ MPN/100mL بود.



آزمایش تاییدی بدون حضور پرتو فرابنفش و فقط با حضور پروکسی مونوسولفات در شرایط بهینه انجام پذیرفت. نتایج نشان داد که در حضور پروکسی مونوسولفات و بدون پرتو فرابنفش تعداد کلی فرم مدفوعی

جدول ۲. مقدار کلیفرم کل (MPN) با روش (PMS + UV) ، pH = ۶/۹ ± ۰/۱ ، UV dosage = ۱/۷ × ۱۰<sup>۴</sup> μW/cm<sup>2</sup> ، زمان (min)

زمان (min)							دوز PMS (mmol/L)
۳۰	۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	۵	۰	
۳۹۶۵	۵۳۹۴	۹۱۷۰	۱۸۰۰۰	۷۵۹۰۰	۳۴۰۰۰۰	۲۱۰۰۰۰۰	۰
۹۹۱	۱۱۰۰	۱۶۵۰	۴۵۸۰	۲۲۸۵۰	۱۶۹۰۰۰	۲۱۰۰۰۰۰	۰/۰۳
۱۸۵	۲۲۴	۲۸۵	۵۰۳	۶۱۳۰	۸۹۸۲۱	۲۱۰۰۰۰۰	۰/۰۶
۵۱	۶۲	۹۰	۲۰۰	۲۱۸۹	۵۸۴۳۵	۲۱۰۰۰۰۰	۰/۰۹

گفت که با افزایش دوز PS میزان حذف کلیفرم کل نیز افزایش می‌یابد، به طوری که بیشترین میزان حذف مربوط به دوز ۳ mmol/L در مدت زمان واکنش برابر ۳۰ دقیقه می‌باشد که این مقدار برابر با بهترین شرایط بهینه راهبری راکتور و دستیابی به حدمجاز تعداد کلیفرم کل (حداکثر ۴۰۰ عدد در ۱۰۰ میلی لیتر) نیز می‌باشد.



### پرسولفات (PS) و پرتو فرابنفش (PS+UV)

در جدول ۳ می‌توان مشاهده نمود که مطابق رابطه (۲) (Gao et al., 2012) با تزریق پرسولفات به میزان ۱ mmol/L مقدار MPN بعد از مدت زمان واکنش برابر ۳۰ دقیقه از ۲۱۰۰۰۰۰ به ۲۰۸۷ کاهش می‌یابد. در همین مدت زمان واکنش، با افزایش دوز PS به ۲ mmol/L و سپس ۳ mmol/L مقدار MPN به ترتیب از ۲۱۰۰۰۰۰ به ۹۵۳ و ۳۸۵ کاهش می‌یابد. مطابق با نتایج به دست آمده می‌توان

جدول ۳. مقدار کلیفرم کل (MPN) با روش (PS + UV) ، pH = ۶/۹ ± ۰/۱ ، UV dosage = ۱/۷ × ۱۰<sup>۴</sup> μW/cm<sup>2</sup> ، زمان (min)

زمان (min)							دوز PS (mmol/L)
۳۰	۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	۵	۰	
۳۹۶۵	۵۳۹۴	۹۱۷۰	۱۸۰۰۰	۷۵۹۰۰	۳۴۰۰۰۰	۲۱۰۰۰۰۰	۰
۲۰۸۷	۳۴۹۵	۶۴۲۱	۱۴۰۰۳	۵۲۸۵۰	۲۶۹۰۰۰	۲۱۰۰۰۰۰	۱
۹۵۳	۱۳۲۸	۲۱۳۱	۴۸۰۲	۱۶۶۹۱	۱۰۹۸۲۱	۲۱۰۰۰۰۰	۲
۳۸۵	۴۹۱	۹۵۷	۲۱۵۲	۷۵۴۲	۵۸۴۳۵	۲۱۰۰۰۰۰	۳

تولید رادیکال هیدروکسیل طبق واکنش‌های (۳) تا (۵) صورت می‌گیرد (Munter, 2001). هنگامی که دوز هیدروژن پراکسید به ۰/۳۵ mmol/L می‌رسد، مقدار MPN بعد از مدت زمان واکنش برابر ۳۰ دقیقه از ۲۱۰۰۰۰۰ به ۲۰۲ کاهش می‌یابد. در همین مدت زمان واکنش، با افزایش

### هیدروژن پراکسید (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) و پرتو فرابنفش (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+UV)

همان‌گونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، مقدار MPN هنگامی که فقط تابش پرتو فرابنفش انجام می‌پذیرد برابر با مقدار آن در دو آزمایش قبل می‌باشد. در این روش،

همچنین آزمایش تاییدی بدون حضور پرتو فرابنفش و فقط با حضور هیدروژن پراکسید در شرایط بهینه انجام پذیرفت. نتایج نشان داد در حضور هیدروژن پراکسید و بدون پرتو فرابنفش تعداد کلیفرم کل از ۲۱۰۰۰۰۰۰ به ۱۷۰۰۰۰۰۰ MPN کاهش می‌یابد که بسیار فراتر از حد مجاز استاندارد است.



میزان دوز هیدروژن پراکسید به ۰/۷ mmol/L و سپس ۱/۰۵ mmol/L، مقدار MPN به ترتیب از ۲۱۰۰۰۰۰۰ به ۴۱ و ۲۶ کاهش می‌یابد. همان طور که از نتایج می‌توان نتیجه گرفت با افزایش دوز H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> میزان حذف کلیفرم کل نیز افزایش می‌یابد. بیشترین میزان حذف مربوط به دوز H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> برابر با ۱/۰۵ mmol/L در مدت زمان واکنش برابر ۳۰ دقیقه می‌باشد. در این فرآیند نیز شرایط بهینه راهبری راکتور جهت دستیابی به حد مجاز حداکثر ۴۰۰ عدد در ۱۰۰ میلی لیتر در دوز ۰/۳۵ mmol/L با دستیابی به میزان ۲۹۵ در مدت زمان واکنش برابر ۲۵ دقیقه می‌باشد.

جدول ۴. مقدار کلیفرم کل (MPN) با روش (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + UV) ، pH = ۶/۹ ± ۰/۱ ، UV dosage = ۱/۷ × ۱۰۴ μW/cm<sup>2</sup>

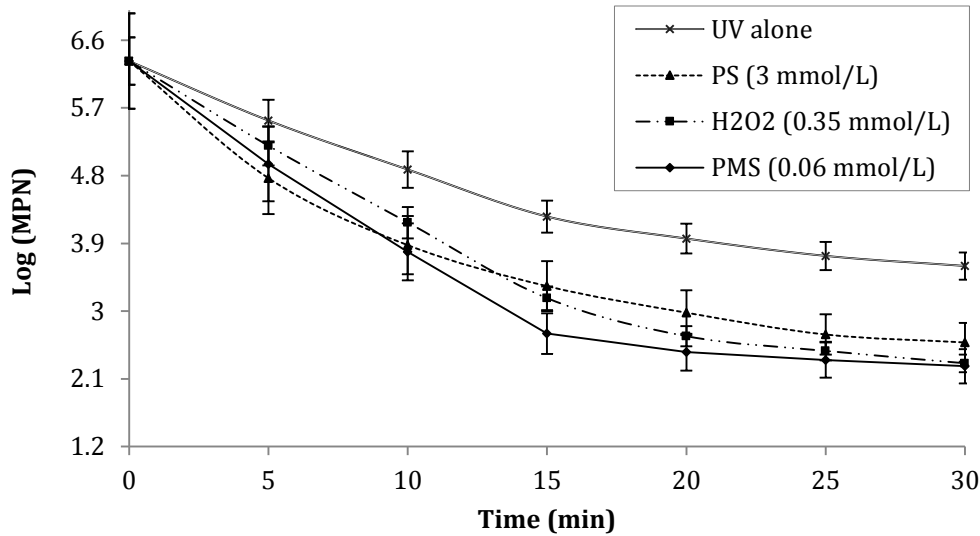
زمان (min)	دوز H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mmol/L)						
	۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰
۰	۲۱۰۰۰۰۰	۳۴۰۰۰۰	۷۵۹۰۰	۱۸۰۰۰	۹۱۷۰	۵۳۹۴	۳۹۶۵
۰/۳۵	۲۱۰۰۰۰۰	۱۵۷۰۰۰	۱۴۹۹۱	۱۴۸۲	۴۶۳	۲۹۵	۲۰۲
۰/۷	۲۱۰۰۰۰۰	۷۹۴۲۱	۵۲۶۵	۴۲۳	۱۳۹	۸۵	۴۱
۱/۰۵	۲۱۰۰۰۰۰	۴۱۸۴۱	۱۴۹۲	۱۶۳	۷۸	۵۰	۲۶

۳۸۵ و ۲۹۵ MPN در ۱۰۰ ml (log(MPN) = ۲/۵۹) و ۲/۴۷ رسید. بدین ترتیب، این نتایج نشان دهنده قدرت بالای فرآیند اصلی به کار برده شده در این مطالعه یعنی PMS+UV در گندزدایی می‌باشد.

### بررسی پارامترهای کیفی پساب

تأثیر استفاده از فرآیندهای PMS+UV، PS+UV، UV و H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+UV بر پارامترهای کیفی پساب خروجی از تصفیه خانه شامل کدورت، COD، BOD<sub>5</sub>، TP، TN، EC، TSS و TDS تحت شرایط بهینه گندزدایی نیز بررسی گردید که نتایج آن در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است.

با مقایسه اجمالی سه روش فوق می‌توان و همانطور که در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که تحت شرایط آزمایشگاهی یکسان، فرآیند فعال سازی PMS به وسیله UV با تولید همزمان رادیکال‌های هیدروکسیل و سولفات به عنوان عوامل اکسیداسیون با واکنش پذیری بالا، بیشترین توانایی را در حذف کلیفرم از خود نشان می‌دهد. به طوری که در کمترین زمان و با مقدار دوز بسیار پایین ۰/۰۶ mmol/L به بیشترین میزان حذف یعنی ۲۸۵ MPN در ۱۰۰ ml (log(MPN) = ۲/۴۵) رسیده است که برابر با شرایط بهینه راهبری در این فرآیند می‌باشد. در صورتی که شرایط بهینه برای دو روش دیگر در مدت زمان بیشتر و مقدار دوز بالاتر ۳ و ۰/۳۵ mmol/L رخ داد و به اعداد



شکل ۲. حذف کلیفرم کل با روش‌های UV، H2O2+UV، PS+UV، PMS+UV در شرایط بهینه راهبری

جدول ۵. تاثیر هر یک از روش‌ها بر خصوصیات نمونه فاضلاب تصفیه شده

روش‌ها				پساب	واحد	پارامتر
UV	H2O2+UV	PS+UV	PMS+UV			
۳۰	۲۵	۳۰	۲۰	-	min	زمان
$1/7 \times 10^4$	$0/35$	۳	$0/06$	-	mmol/L	دوز UV، H2O2، PS، PMS
۷/۰۱	۶/۲۷	۷/۷۵	۴/۱۴	۷/۳۹	NTU	کدورت
۳۶	۱۱	۳۴/۵	۲۳	۳۶	mg/L	اکسیژن خواهی شیمیایی (COD)
۲۱	۱۰	۲۰	۱۵	۲۱	mg/L	اکسیژن خواهی بیولوژیکی (BOD <sub>5</sub> )
۳۸/۶۷	۳۸/۶۷	۳۸/۶۷	۳۸/۶۷	۳۸/۶۷	mg/L	نیتروژن کل (TN)
۱۰/۵	۱۰/۵	۱۰/۵	۱۰/۵	۱۰/۵	mg/L	فسفر کل (TP)
۱۷/۸	۱۷/۳	۱۷/۳	۱۷/۳	۱۷/۸	°C	دما
۷۱۰	۶۹۰	۱۴۰۰	۷۷۵	۷۰۹	μS/cm	رسانایی الکتریکی (EC)
۴۷۱	۶۳۴	۹۵۲	۵۲۰	۴۷۱	mg/L	کل جامدات محلول (TDS)
۱۴/۹	۱۰/۸	۱۴/۸	۶/۵	۱۵/۶	mg/L	کل جامدات معلق (TSS)

جدول ۶. راندمان حذف هر یک از روش‌ها بر کدورت، COD، BOD<sub>5</sub> و TSS نمونه فاضلاب تصفیه شده

روش‌ها				واحد	پارامتر
UV	H2O2+UV	PS+UV	PMS+UV		
۳۰	۲۵	۳۰	۲۰	min	زمان
$1/7 \times 10^4$	$0/35$	۳	$0/06$	mmol/L	دوز UV، H2O2، PS، PMS
۵/۱	۱۵/۲	-۴/۸	۴۴	%	درصد حذف کدورت
۰	۶۹/۴	۴/۲	۳۶/۲	%	درصد حذف COD
۰	۵۲/۴	۴/۸	۲۸/۶	%	درصد حذف BOD <sub>5</sub>
۴/۴	۳۰/۸	۵/۱	۵۸/۴	%	درصد حذف TSS

فرآیندهای پروکسی مونوسولفات- پرتو فرابنفش، پرسولفات- پرتو فرابنفش، هیدروژن پراکسید- پرتو فرابنفش و پرتو فرابنفش به تنهایی، با هدف استفاده مجدد از پساب مورد بررسی قرار گرفت. فرآیند اصلی مورد بررسی یعنی فرآیند پروکسی مونوسولفات- پرتو فرابنفش در مقایسه با سه فرآیند دیگر، از کارآمدی بالاتری برخوردار است. همچنین اثربخشی بالایی بر بهبود پارامترهای کیفی پساب خروجی دارد. با توجه به نتایج مثبت حاصل در این پژوهش و با هدف به کارگیری صنعتی روش پروکسی مونوسولفات- پرتو فرابنفش در تصفیه خانه‌های فاضلاب، بررسی تکمیلی در مقیاس نیمه صنعتی و پایش محصولات جانبی ممکن توصیه می‌گردد.

#### یادداشت‌ها

1. Advanced Oxidation Processes
2. Ultraviolet
3. Disinfection By-products
4. Hydroxyl-based Advanced Oxidation Processes
5. Sulfate-based Advanced Oxidation Processes
6. Peroxymonosulfate
7. Persulfate
8. Hydrogen peroxide
9. Chemical Oxygen Demand
10. Biological Oxygen Demand
11. Total Nitrogen
12. Electrical Conductivity
13. Total Dissolved Solid
14. Total Suspended Solids
15. Total Phosphorus

مطابق با داده‌های جداول فوق، اعداد مثبت به معنای کاهش و اعداد منفی به معنی افزایش در مقدار پارامتر مورد مطالعه می‌باشند. از مقایسه نتایج ارائه شده در جداول فوق می‌توان نتیجه گرفت که بهترین کارآمدی مربوط به روش PMS+UV می‌باشد. با وجود اینکه کدورت و ذرات جامد معلق، هر دو عوامل اثرگذار بر فرآیند پرتو فرابنفش هستند (تضعیف مکانیزم انتشار و جذب پرتو)، در این روش از طریق فعال کردن پروکسی مونوسولفات با قدرت واکنش پذیری بالایی که دارد، بیشترین میزان حذف این دو پارامتر در مقایسه با سایر روش‌ها بدست آمده است. در مورد سایر پارامترها مانند COD و BOD<sub>5</sub> نیز میزان حذف قابل قبولی حاصل گردید که مستلزم بررسی‌های بیشتر می‌باشد. لازم به ذکر است که با توجه به نتایج بدست آمده، روش‌های مورد بررسی تأثیری بر حذف نیتروژن و فسفر نداشتند.

#### نتیجه‌گیری

استفاده مجدد از پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب هنگامی میسر می‌گردد که گندزدایی بهینه پساب مطابق با معیارهای بهداشتی و استانداردهای معتبر باشد. با توجه به نگرانی‌ها و اهداف کیفی موجود، تلاش در راستای دستیابی به روش‌های نوین کارآمد همچنان ادامه دارد. در این پژوهش، گندزدایی پساب از طریق به کارگیری

#### فهرست منابع

- APHA. (1992). *APHA Method 9221: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Standard methods for examination of water and wastewaters* (20th edition). U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C.
- Brahmi, M., Belhadi, N.H., Hamdi, H., Hassen, A. (2010). Modeling of secondary treated wastewater disinfection by UV irradiation: Effects of suspended solids content. *Journal of Environmental Sciences*, 22, 1218–1224.
- Christensen, J., Linden, K.G. (2003). How particles affect UV light in the UV disinfection of unfiltered drinking water. *American Water Works Association, Journal AWWA*. 95, 179–189.
- EPA. (2016). *Clean Watersheds Needs Survey 2012*. CWNS
- Mateo-sagasta, J., Raschid-sally, L., Thebo, A. (2015). *Global Wastewater and Sludge Production, Treatment and Use*. Springer, Dordrecht.

- Gao, Y. qiong, Gao, N. yun, Deng, Y., Yang, Y. qiong, Ma, Y. (2012). Ultraviolet (UV) light-activated persulfate oxidation of sulfamethazine in water. *Chemical Engineering Journal*, 195–196, 248–253.
- Gholikandi, G.B., Nili Ardakani, M., Moradi, F. (2018). Fered-Fenton technology for efficient waste-activated sludge stabilization: Determination of the main specifications and optimization of the energy consumption. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6, 1546–1557.
- Gholikandi, G.B., Rasouli Sadabad, H., Karami, S., Masihi, H. (2017). Heavy metal ions removal from waste-activated sludge by Fered-Fenton electrochemical advanced oxidation process (EAOP) with the aim of agricultural land application. *Desalination and Water Treatment*, 93, 250–256.
- Gholikandi, G.B., Zakizadeh, N., Karami, S., Masihi, H. (2017)b. Employing Fered-Fenton advanced oxidation process for waste-activated sludge stabilization and reuse. *Desalination and Water Treatment*. 93, 267–273.
- Gholikandi, G.B., Masihi, H., Azimipour, M., Abrishami, A., Mirabi, M. (2014). Optimizing stabilization of waste-activated sludge using Fered-Fenton process and artificial neural network modeling (KSOFM, MLP). *Environmental Science and Pollution Research*, 21, 7177–7186.
- Gholikandi, G.B., Kazemirad, K. (2018). Application of electrochemical peroxidation (ECP) process for waste-activated sludge stabilization and system optimization using response surface methodology (RSM). *Water Science & Technology*, 77, 1765–1776.
- Giannakis, S., Androulaki, B., Comninellis, C., Pulgarin, C. (2018). Wastewater and urine treatment by UVC-based Advanced Oxidation Processes : implications from the interactions of bacteria , viruses , and chemical contaminants. *Chemical Engineering Journal*, 343, 270–282.
- Hou, L., Li, X., Yang, Q., Chen, F., Wang, S., Ma, Y., Wu, Y., Zhu, X., Huang, X., Wang, D. (2019). Heterogeneous activation of peroxymonosulfate using Mn-Fe layered double hydroxide: Performance and mechanism for organic pollutant degradation. *Science of the Total Environment*, 663, 453–464.
- Lima, J.A., Tonetti, A.L., Vidal, C., Montagner, C.C., Pupo, R.F. (2018). Simultaneous degradation of ciprofloxacin, amoxicillin , sulfathiazole and sulfamethazine , and disinfection of hospital effluent after biological treatment via photo-Fenton process under ultraviolet germicidal irradiation. *Applied Catalysis B: Environmental*, 224, 761–771.
- Liu, L., Hall, G., Champagne, P. (2018). Disinfection Processes and Mechanisms in Wastewater Stabilization Ponds : A Review. *Environmental Reviews*, 26, 417–429.
- Luo, Y., Guo, W., Hao, H., Duc, L., Ibney, F., Zhang, J., Liang, S., Wang, X.C. (2014). A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 473–474, 619–641.
- Malvestiti, J.A., Dantas, R.F. (2017). Disinfection of secondary effluents by O<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Influence of carbonate, nitrate, industrial contaminants and regrowth. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 6, 560–567.
- Malvestiti, J.A., Dantas, R.F. (2019). Influence of industrial contamination in municipal secondary effluent disinfection by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 13286–13298.
- Masihi, H., Gholikandi, G.B. (2018). Employing Electrochemical-Fenton process for conditioning and dewatering of anaerobically digested sludge: A novel approach. *Water Research*, 144, 373–382.
- Miklos, D.B., Hartl, R., Michel, P., Linden, K.G., Drewes, J.E. (2018). UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process stability and pilot-scale validation for trace organic chemical removal from wastewater treatment plant effluents. *Water Research*, 136, 169-179.

- Miklos, D.B., Remy, C., Jekel, M., Linden, K.G., Drewes, J.E. (2018)b. Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment – A critical review. *Water Research*, 139, 118–131.
- Moussavi, G., Fathi, E., Moradi, M. (2019). Advanced disinfecting and post-treating the biologically treated hospital wastewater in the UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and VUV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes: performance comparison and detoxification efficiency. *Process Safety and Environmental Protection*, 126, 259–268.
- Munter, R. (2001). *Advanced Oxidation Processes-Current Status and Prospects*. 50, 59–80. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Chemistry
- Nihemaiti, M., Miklos, D.B., Hübner, U., Linden, K.G., Drewes, J.E., Croué, J.-P. (2018). Removal of trace organic chemicals in wastewater effluent by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/PDS. *Water Research*, 145, 487–497.
- Osińska, A., Korzeniewska, E., Harnisz, M., & Niestępski, S. (2017, May 25). *Impact of type of wastewater treatment process on the antibiotic resistance of bacterial populations*. 9<sup>th</sup> Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering EKO-DOK, Poland. doi.org/10.1051/e3sconf/20171700070.
- Paredes, L., Omil, F., Lema, J.M., Carballa, M. (2018). What happens with organic micropollutants during UV disinfection in WWTPs? A global perspective from laboratory to full-scale. *Journal of Hazardous Materials*, 342, 670–678.
- Petrie, B., Barden, R., Kasprzyk-hordern, B. (2014). A review on emerging contaminants in wastewaters and the environment: Current knowledge, understudied areas and recommendations for future monitoring. *Water Research*. 72, 3–27.
- Ramezani, M., Noori, R., Hooshyaripor, F., Deng, Z. (2019): Numerical modelling-based comparison of longitudinal dispersion coefficient formulas for solute transport in rivers. *Hydrological Sciences Journal*, 64(7), 808–819.
- Rizzo, L., Agovino, T., Nahim-granados, S., Castro-alférez, M., Fernández-ibáñez, P., Polo-lópez, M.I. (2018). Tertiary treatment of urban wastewater by solar and UV-C driven advanced oxidation with peracetic acid: Effect on contaminants of emerging concern and antibiotic resistance. *Water Research*, 149, 272–281.
- Rodríguez-chueca, J., Amor, C., Silva, T., Dionysiou, D.D., Li, G., Lucas, M.S., Peres, J.A. (2016). Treatment of winery wastewater by sulphate radicals: HSO<sub>5</sub><sup>-</sup>/ transition metal / UV-A LEDs. *Chemical Engineering Journal*, 310, 473–483.
- Rodríguez-chueca, Fernandes, R., Lucas, M.S., Silva, T., Peres, A., Sampaio, A. (2017). Inactivation of pathogenic microorganisms in freshwater using HSO<sub>5</sub><sup>-</sup>/UV-A LED and HSO<sub>5</sub><sup>-</sup>/M<sup>n+</sup>/UV-A LED oxidation processes. *Water Research*, 123, 113–123.
- Rodríguez-chueca, Fernandes, R., Lucas, M.S., Silva, T., Peres, A., Sampaio, A. (2017)b. Inactivation of pathogenic microorganisms in freshwater using HSO<sub>5</sub><sup>-</sup>/UV-A LED and HSO<sub>5</sub><sup>-</sup>/M<sup>n+</sup>/ UV-A LED oxidation processes. *Water Research*, 123, 113–123.
- Rodríguez-chueca, J., Laski, E., García-cañibano, C., Vidales, M.J.M. De, Encinas, Á. (2018). Science of the Total Environment Micropollutants removal by full-scale UV-C/sulfate radical based Advanced Oxidation Processes. *Science of the Total Environment*, 630, 1216–1225.
- Sadabad, H.R., Gholikandi, G.B. (2018). Simultaneous effective sludge stabilization and direct electricity generation by merging microbial fuel cell (MFC) and Fered-Fenton reactor: An experimental study. *Biomass and Bioenergy*, 119, 75–89.

- Ulliman, Miklosb, D.B., Hübnerb, U., Drewesb, J.E., Linden, K.G. (2018). Improving UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> performance following tertiary treatment of municipal wastewater. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 9.
- Water Supply. (2002). *International report : water and wastewater disinfection – trends, issues and practices*. IWA.
- Whitby, G.E., Scheible, O.K. (2004). *The History of UV and Wastewater*. IUVA NEWS. [https://uvsolutionsmag.com/stories/pdf/archives/060302WhitbyAndScheible\\_2004.pdf](https://uvsolutionsmag.com/stories/pdf/archives/060302WhitbyAndScheible_2004.pdf). September 2004.
- Yang, Z., Su, R., Luo, S., Spinney, R., Cai, M., Xiao, R., Wei, Z. (2017). Comparison of the reactivity of ibuprofen with sulfate and hydroxyl radicals : An experimental and theoretical study. *Science of the Total Environment*, 590–591, 751–760.
- Zhang, Z., Li, B., Li, N., Sardar, M.F., Song, T., Lv, X., Li, H. (2019). Effects of UV disinfection on phenotypes and genotypes of antibiotic-resistant bacteria in secondary effluent from a municipal wastewater treatment plant. *Water Research*, 157, 546–554.
- Zhang, Xiao, Y., Zhong, Y., Lim, T. (2019)b. Comparison of amoxicillin photodegradation in the UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/persulfate systems: Reaction kinetics, degradation pathways, and antibacterial activity. *Chemical Engineering Journal*, 372, 420–428.