

Journal of Water and Wastewater, Vol. 34, No. 5, pp: 13-26

# Reducing Water and Energy Consumption in Urban Communities by Treating Gray Wastewater with Photoelectrocatalytic Method

M. Negahban<sup>1\*</sup>, A. R. Karbassi<sup>2</sup>

1. PhD. Student in Energy Systems Engineering, Energy and Environment, University of Tehran, Kish International Campus, Kish, Iran  
(Corresponding Author) [mohammad.negahban@ut.ac.ir](mailto:mohammad.negahban@ut.ac.ir)
2. Prof., Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received July 11, 2023 Accepted Oct. 4, 2023)

**To cite this article:**

Negahban, M., Karbassi, A. R. 2024. "Reducing water and energy consumption in urban communities by treating gray wastewater with photoelectrocatalytic method" *Journal of Water and Wastewater*, 34(5), 13-26.  
<https://doi.org/10.22093/wwj.2023.406132.3357>.

**Abstract**

Urban wastewater combines black and gray wastewater, which can be thought of as a way to separate and optimize its treatment. In this research, the separation and recycling of gray water treated by photoelectrocatalytic method, to be used in irrigation of plants, etc., has been investigated. First, the gray wastewater of a 10-unit residential building was sampled. BOD and COD concentrations were measured by respirometry and closed reflux calorimetry, respectively. Then, the removal efficiency of photoelectrocatalytic treatment by direct current with titanium and graphite electrodes, at two current densities of 10 and 20 mA/cm<sup>2</sup> and at three electrode distances of 6, 12 and 15 cm, and the feasibility of using this method from the point of view of energy consumption, was studied. Based on the results, the optimal conditions for pollutant removal have been obtained at a current density of 20 mA/cm<sup>2</sup> and a distance of 12 cm between the electrodes in a period of 60 minutes. With an increase in current density, the removal efficiency increases and as the distance between the electrodes increases, the removal efficiency experiences an increase with partial changes, but, it causes an elevation in voltage, resulting in an augmented consumption of electrical energy. The initial pH decreased with increasing voltage and further decreased with decreasing electrode distance. The amount of electrical energy consumed in the photoelectrocatalytic reactor is estimated to be about 2 kWh/m<sup>3</sup> and 11.43 kilowatts per kilogram of COD removal. The results indicate a 64% reduction in water consumption at the site of operation, a reduction in energy consumption in the water and wastewater distribution and treatment system, and as a result, a reduction in CO<sub>2</sub> production. Although the possibility of using the photoelectrocatalytic system on a large scale requires more studies, other suitable methods can be used.

**Keywords:** Wastewater Treatment, Gray Wastewater, Photoelectrocatalytic Treatment, Reducing Water Consumption, Reducing Energy Consumption.



## Extended Abstract

### 1. Introduction

The treatment and recycling of gray wastewater in residential complexes reduce water consumption and, of course, energy consumption in urban water and wastewater treatment plants. Approximately 2 to 4% of the total electricity consumed in society is related to wastewater treatment plants (Kusiak et al., 2013). The amount of consumed energy in each treatment plant depends on the size, technology, and quality of the influent and effluent (Hernández-Sancho et al., 2011). This article investigates the effect of gray wastewater recycling on reducing water consumption and explores its purification efficiency using the photoelectrocatalytic method. Additionally, a comparison is made between photoelectrocatalytic and aeration methods in terms of energy consumption.

### 2. Methodology

First, the gray wastewater of a 10-unit residential building was sampled and the concentration of BOD and COD of gray wastewater was measured by respirometry and closed reflux calorimetry (Carranzo, 2012), respectively. Then, the removal efficiency by photoelectrocatalytic treatment by titanium and graphite electrodes, in two current densities of 10 and 20 mA/cm<sup>2</sup> and three electrode distances of 6, 12, and 15 cm from each other were investigated. The photoelectrocatalytic cell used in this research is according to Fig 1.

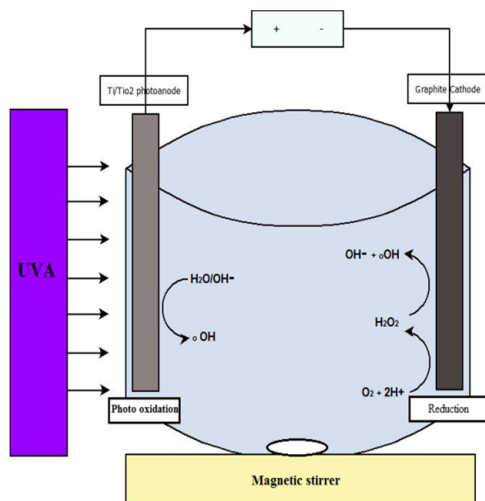


Fig. 1. Schematic of photoelectrocatalytic process reactor

The contaminant removal efficiency is determined using equation 1

$$Re(\%) = (C_0 - C_t) / C_0 * 100 \quad (1)$$

In another part of the research, in order to compare the energy consumption of two photoelectrocatalytic and aeration methods, the equipment components of both have been investigated. Table 1 shows characteristics of energy consuming equipment in the aeration process and photoelectrocatalytic reactor.

### 3. Discussion and Result

According to the results, contaminant removal efficiency increases with increasing voltage. Additionally, the pollutants degradation rate gradually decreases with increasing distance between electrodes, which can be attributed to the decrease in electric current intensity density as the distance between electrodes increases (Biswal et al., 2019). The optimal conditions for contaminant removal have been achieved at a current intensity density of 20 mA/cm<sup>2</sup> and a distance of 12 cm between the electrodes in 60 minutes. Fig. 2 shows changes in concentration and removal efficiency of BOD (a) and COD (b) with changes in the anode-cathode distance at a current intensity density of 20 mA/cm<sup>2</sup>.

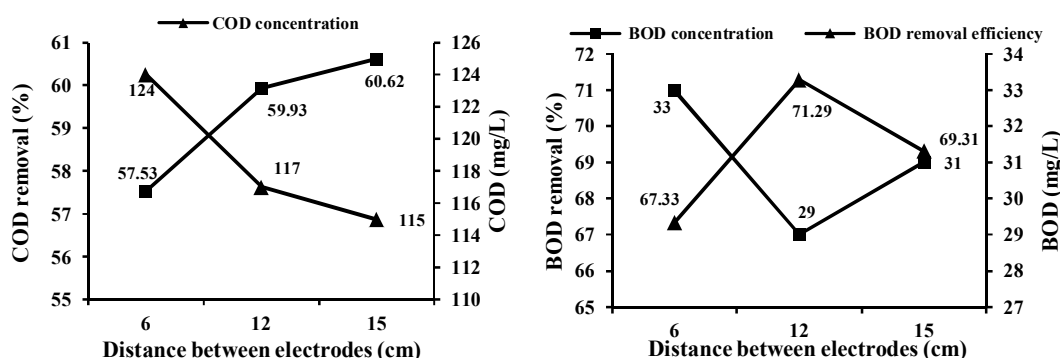
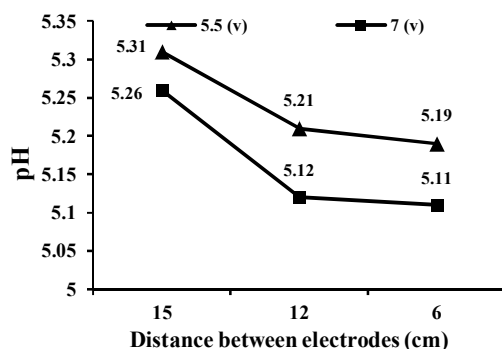
pH decreased with increasing voltage and decreased further with decreasing electrode distance (Ebraheim et al., 2021b). The decrease in pH values from the initial value can be attributed to the increase in acidic products produced by the oxidation of organic compounds (Li and Liu, 2005; Yurdakal et al., 2020). Investigating the effect of voltage and distance between electrodes on pH is shown in Fig. 3.

On average, 64% of the volume of household wastewater is gray (Zamani and Taebi, 2009), and by treating this wastewater on-site, it is possible to save a significant amount of water consumption. The treatment of gray wastewater using both aeration and photoelectrocatalytic methods requires the consumption of electrical energy, resulting in the production of CO<sub>2</sub>. According to information published by the EPA, the amount of CO<sub>2</sub> produced to supply one-kilowatt hour of electrical energy is equal to 0.709 kg (Avert, 2018). Table 2 shows the amount of energy consumption and consequently, the amount of CO<sub>2</sub> production.



**Table 1.** Characteristics of energy consuming equipment in the aeration process and photoelectrocatalytic reactor

Process	Equipment type	Power (kW)	Operating time (hour)	Energy consumption (kWh/m <sup>3</sup> )
Aeration	Blower 1	0.7	12	4.2
	Blower 2	0.7	12	
Photoelectrocatalytic	UV-A lamp	0.004	24	2

**Fig. 2.** Changes in concentration and removal efficiency of a) BOD and b) COD with changes in the anode-cathode distance at a current intensity density of 20 mA/cm<sup>2</sup>**Fig 3.** Effect of voltage and change of electrode distance on initial pH

From comparing the results of energy consumption in biological treatment plants in the world (Mamais et al., 2015; Siatou et al., 2020; Yerushalmi et al., 2013; Kneppers et al., 2009; Liu et al., 2012; Makinia and Zaborowska, 2020; Mizuta and Shimada, 2010), it is clear that the energy consumption of the mentioned gray wastewater treatment package is higher than the average energy consumption in other countries of the world, which can be due to improper design and problems of operation and maintenance in this treatment. In other words, with correct and optimal design as well as proper operation, low amounts of electrical energy consumption can be achieved in the biological method.

**Table 2.** Energy consumption in aeration and photoelectrocatalytic process and CO<sub>2</sub> production rate from it

Process	Energy consumption per kilogram COD removal (kW)	CO <sub>2</sub> produced (kg)
Aeration	16.47	11.68
Photoelectrocatalytic	11.43	8.10

#### 4. Conclusions

The contaminant removal efficiency increases with increasing voltage and decreases with increasing distance between electrodes. This can be attributed to the decrease in electric current intensity density as the distance between electrodes increases. The decrease in pH after photoelectrocatalytic treatment can also be attributed to the increase in acidic products generated by the oxidation of organic compounds. The results indicate a 64% reduction in water consumption at the site of operation, a reduction in energy consumption in the water and wastewater distribution and treatment system, and as a result, a reduction in CO<sub>2</sub> production. Although the possibility of using the photoelectrocatalytic system on a large scale requires more studies, other suitable methods can be used.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۴، شماره ۵، صفحه: ۲۶-۱۳

## کاهش مصرف آب و انرژی در جوامع شهری توسط تصفیه فاضلاب خاکستری به روش فتوالکتروکاتالیستی

محمد نگهبان<sup>۱\*</sup>، عبدالرضا کرباسی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی، گرایش انرژی و محیط‌زیست،

دانشگاه تهران، پردیس بین‌المللی کیش، کیش، ایران

(نویسنده مسئول) mohammad.negahban@ut.ac.ir

۲- استاده، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت ۱۴۰۲/۴/۲۰ پذیرش ۱۴۰۲/۷/۱۲)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

نگهبان، م.، کرباسی، ع.، ر.، ۱۴۰۲، "کاهش مصرف آب و انرژی در جوامع شهری توسط تصفیه فاضلاب خاکستری به روش فتوالکتروکاتالیستی"

مجله آب و فاضلاب، ۳۴(۵)، ۲۶-۱۳. <https://doi.org/10.22093/wwj.2023.406132.3357>

### چکیده

فاضلاب شهری، ترکیبی از فاضلاب سیاه و خاکستری است که می‌توان راهکاری برای جداسازی و بهینه‌سازی تصفیه آن اندیشید. در این پژوهش، جداسازی و بازچرخانی آب خاکستری تصفیه شده به روش فتوالکتروکاتالیستی، به منظور مصرف در آبیاری فضای سبز بررسی شد. ابتدا فاضلاب خاکستری یک ساختمان مسکونی ۱۰ واحدی از محل خروجی مخزن متعادل‌ساز، نمونه برداری شد. غلظت BOD و COD به ترتیب با روش رسپرومتریک و کالریمتری رفلاکس بسته، اندازه‌گیری شد. سپس بازدهی حذف تصفیه فتوالکتروکاتالیستی توسط جریان مستقیم با الکترودهای تیتانیوم و گرافیت، در دو چگالی شدت جریان ۱۰ و ۲۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌مترمربع و در سه فاصله الکتروده ۶، ۱۲ و ۱۵ سانتی‌متر، بررسی و امکان‌سنجی استفاده از این روش با دیدگاه مصرف انرژی بررسی شد. بر اساس نتایج، شرایط بهینه حذف آلاینده‌ها، در چگالی شدت جریان ۲۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌مترمربع و فاصله ۱۲ سانتی‌متری الکترودها در مدت‌زمان ۶۰ دقیقه به دست آمد. با افزایش چگالی شدت جریان، بازدهی حذف زیاد شده و با افزایش فاصله الکترودها، بازدهی حذف، افزایش با تغییرات نسبتاً کم را تجربه می‌کند، ولی سبب بالاتر رفتن ولتاژ می‌شود که افزایش مصرف انرژی الکتریکی را در پی دارد. pH اولیه با افزایش ولتاژ کاهش و با کاهش فاصله الکترودها بیشتر کاهش یافت. میزان انرژی الکتریکی مصرفی در راکتور فتوالکتروکاتالیستی حدود ۲ کیلووات ساعت بر مترمکعب و ۱۱/۴۳ کیلووات به ازای حذف ۱ کیلوگرم COD برآورد شد. نتایج نشانگر کاهش ۶۴ درصدی مصرف آب در محل بهره‌برداری، کاهش مصرف انرژی در سیستم توزیع و تصفیه آب و فاضلاب و در نتیجه کاهش تولید CO<sub>2</sub> بود. اگرچه امکان استفاده از سیستم فتوالکتروکاتالیستی در مقیاس بزرگ نیازمند بررسی‌های بیشتری است، ولی می‌توان از سایر روش‌های مناسب استفاده کرد.

**واژه‌های کلیدی:** تصفیه فاضلاب، فاضلاب خاکستری، تصفیه فتوالکتروکاتالیستی، کاهش مصرف آب، کاهش مصرف انرژی



## ۱- مقدمه

با توجه به کمبود آب شرب در برخی مناطق و در کنار آن مسائل محیط زیستی مرتبط با آلودگی منابع آب، تصفیه آب و فاضلاب یکی از حیاتی‌ترین نیازهای جوامع انسانی است. همگام با افزایش جمعیت و رشد صنعت، نیازهای ضروری برای آب و انرژی الکتریکی در حال افزایش است و لازم است برنامه‌ای برای صرفه‌جویی در مصرف آنها اندیشیده شود. تقریباً ۲ تا ۴ درصد از کل برق مصرفی جامعه در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مصرف می‌شود (Kusiak et al., 2013) که میزان آن در هر تصفیه‌خانه به اندازه، تکنولوژی و کیفیت پساب ورودی و خروجی بستگی دارد (Hernández-Sancho et al., 2011).

از سوی دیگر، با کاهش حجم آب مصرفی در جوامع انسانی، نیاز به تصفیه آب و فاضلاب نیز کمتر خواهد شد. فاضلاب شهری متشکل از فاضلاب قهوه‌ای و فاضلاب خاکستری است. فاضلاب قهوه‌ای ترکیبی از فضولات انسانی مملو از ترکیبات آلی است، اما فاضلاب خاکستری ترکیبی از پساب، چربی و مواد شوینده است که در صورتی که از فاضلاب قهوه‌ای جدا باشد، می‌توان آن را به راحتی تصفیه کرد و برای آبیاری فضای سبز یا تامین آب صنعتی استفاده شود. از منظر انرژی، به‌کارگیری پربازده‌ترین روش تصفیه که تضمین‌کننده کاهش مصرف انرژی و تأثیرات سوء ناشی از آن است، مدنظر می‌باشد. تصفیه فاضلاب با استفاده از تمامی روش‌ها مستلزم صرف انرژی است (Liu et al., 2011, Adlan et al., 2012) به همین دلیل باید کارآمدی روش‌های مختلف از نظر مصرف انرژی و بازدهی حذف آلاینده‌ها، بررسی شود.

در این پژوهش، به بررسی تصفیه فاضلاب خاکستری با استفاده از روش فتوالکتروکاتالیستی، پرداخته شد. کاربرد این روش در زمینه‌های مختلف تصفیه آب (Bockelmann et al., 2004, Al-Rasheed, 2005, Jing et al., 2010) و پساب بررسی شده است. تصفیه پساب‌های صنعتی به‌واسطه روش‌های اکسیداسیون پیشرفته الکتروشیمیایی (Rodrigo et al., 2014) و حذف عناصر سنگین از فاضلاب توسط روش فتوالکتروشیمیایی بررسی شده است (Shariffard et al., 2018). همچنین مدل‌هایی برای کاهش و حذف عناصر فلزی و آلی در آب باران شهری توسط این روش بررسی شده است (Che-Ani et al., 2009, Ebraheim et al., 2021a).

بازدهی حذف آلاینده‌ها در تصفیه فتوالکتروکاتالیستی، به پارامترهای مختلفی مانند جنس الکترود، نوع راکتور، چگالی شدت جریان، اکسیژن محلول و pH بستگی دارد (Rajput et al., 2021). تصفیه مواد آلی توسط جریان الکتریسته امری قابل وقوع بوده و می‌توان آن را به‌واسطه تغییر پارامترهای مذکور کنترل کرد (Li and Liu, 2005, Ahmed et al., 2011, Ananpattarachai and Kajitvichyanukul, 2015, Ebraheim et al., 2021b).

تخریب ترکیبات آلی با اکسیداسیون یا کاهش از طریق تولید گونه‌های اکسیژن واکنش‌پذیر انجام می‌شود که شدت این واکنش‌ها به پتانسیل اکسایش-کاهش بستگی دارد (Li and Bishop, 2002).

از طریق فرایندهای فتوکاتالیستی، یک فوتون با انرژی برابر یا بزرگتر از باند شکاف فتوکاتالیست می‌تواند ذرات نیمه‌هادی را به تولید جفت الکترون-حفره تحریک کند که در تخریب آلاینده‌ها شرکت می‌کنند. مشکل عمده فرایند فتوکاتالیستی، ترکیب مجدد الکترون‌ها و حفره‌ها و همچنین انتشار انرژی جذب شده به صورت گرما است که می‌تواند واکنش ردوکس را ممنوع کند (Chowdhury et al., 2014, Ab Aziz et al., 2018). اما از طریق فرایند فتوالکتروکاتالیستی، ذرات نیمه‌هادی بر روی بسترهای رسانا تثبیت می‌شوند که سودمندی و حل مشکل مذکور با ادغام فرایندهای فتوکاتالیستی و الکتروشیمیایی، ثابت شده است (Seibert et al., 2020). علاوه بر تخریب آلاینده‌ها، امکان بازیابی هم‌زمان انرژی نیز در این سیستم‌ها وجود دارد (Rajput et al., 2021).

$H_2O_2$  نقش مهمی به‌عنوان گیرنده الکترون دارد و می‌تواند به جداسازی جفت الکترون-حفره و افزایش نرخ تولید رادیکال هیدروکسیل کمک کند. این رادیکال می‌تواند توسط اکسیداسیون مولکول‌های آب یا یون‌های هیدروکسید، در جای خالی الکترون تشکیل شود (Zhao et al., 2014, Yao et al., 2015). اکسیژن محلول نیز به‌عنوان یک گیرنده الکترون، نقش مهمی در جداسازی جفت الکترون-حفره دارد و می‌تواند با دو اتم هیدروژن و دو الکترون واکنش دهد و به  $H_2O_2$  کاهش یابد (Barrera-Díaz et al., 2014, Enseldo-Rentería et al., 2018).



جدول ۱- مشخصات فاضلاب خاکستری آزمایشی

Table 1. Characteristics of experimental gray wastewater

Sample	pH	TDS (mg/L)	TSS (mg/L)	DO (mg/L)	EC ( $\mu\text{s/cm}$ )	$E_h$ (mv)	COD (mg/L)	BOD <sub>5</sub> (mg/L)
1	5.36	364	116	3	743	40	292	101

میلی آمپر بر سانتی مترمربع و در سه فاصله ۶، ۱۲ و ۱۵ سانتی متری الکترودها از یکدیگر در شرایط عملیاتی یکسان بررسی شد. آزمایش‌ها به منظور به دست آوردن فاصله مناسب بین الکترودها و چگالی شدت جریان بهینه و بررسی تأثیر تصفیه بر pH و درصد حذف BOD<sup>۲</sup> و COD با استفاده از روش فتوالکتروکاتالیستی انجام شد. سپس به بررسی و امکان‌سنجی استفاده از راکتور فتوالکتروکاتالیستی به جای فرایند هوادهی در تصفیه فاضلاب خاکستری پرداخته شد.

## ۲-۱- راکتور تصفیه فتوالکتروکاتالیستی (در مقیاس آزمایشگاهی)

سلول فتوالکتروکاتالیستی استفاده شده در این پژوهش، مطابق شکل ۱ بود. به عنوان فتوآند با سطح  $5 \times 10$  سانتی مترمربع و گرافیت با همان ناحیه فعال به عنوان کاتد، در یک ظرف شیشه‌ای پیرکس و به صورت موازی در آب قرار داده شدند.

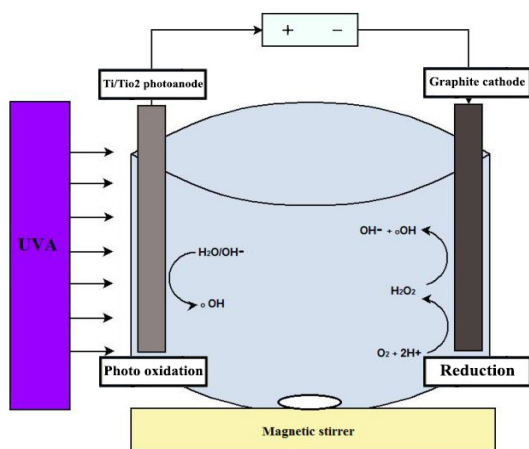


Fig. 1. Schematic of photoelectrocatalytic process reactor

شکل ۱- شماتیک راکتور فرایند فتوالکتروکاتالیستی

تصفیه پساب در محل و بازچرخانی و استفاده مجدد از آن، سبب صرفه‌جویی در مصرف آب در محل مورد استفاده، صرفه‌جویی انرژی در سیستم توزیع و تصفیه آب و فاضلاب و همچنین کاهش هزینه‌های اجتماعی آن، که بیانگر این نکته مهم است که قیمت واقعی انرژی شامل قیمت تمام شده به علاوه هزینه‌های اجتماعی و محیط‌زیستی ناشی از تولید آن است، می‌شود (Rahimi et al., 2014). این پژوهش به منظور ارائه راهکاری برای تأمین آب قابل استفاده برای آبیاری فضای سبز و شستشوی پارکینگ در مجتمع‌های مسکونی، کاهش مصرف آب و همچنین کاهش مصرف انرژی در تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب شهری، به بررسی پیشینه پژوهشی و ارزیابی موارد تأثیرگذار بر تصفیه فاضلاب خاکستری و بررسی امکان استفاده از روش فتوالکتروکاتالیستی و روش بیولوژیک (Rojas et al., 2010, Åmand and Carlsson, 2012, Descoins et al., 2012) پرداخته است.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، ابتدا از فاضلاب خاکستری یک ساختمان مسکونی با تعداد ۱۰ واحد از محل خروجی مخزن متعادل‌ساز نمونه‌برداری شد و به صورت کیفی بررسی شد و امکان‌سنجی انجام آزمایش‌ها بررسی شد. فاضلاب خاکستری یک واحد مسکونی مطابق استاندارد ملی ۲۳۴۷ نمونه‌برداری شد (Ghiri and Azimi, 2015) که مشخصات آن در جدول ۱ آمده است. آنالیز COD<sup>۱</sup> به روش کالریمتری رفلکس بسته بر اساس روش D ۵۲۲۰ استاندارد APHA و BOD<sub>5</sub> با روش رسپیرومتری بر اساس استاندارد APHA 5210 انجام شد (Carranzo, 2012).

آزمایش‌ها در یک راکتور فتوکاتالیستی در مقیاس آزمایشگاهی بر روی حجم ۲ لیتر از فاضلاب خاکستری نمونه‌برداری شد. این آزمایش در دو چگالی شدت جریان ۱۰ و ۲۰

<sup>2</sup> Biological Oxygen Demand (BOD)

<sup>1</sup> Chemical Oxygen Demand (COD)





جدول ۲- مشخصات تجهیزات مصرف‌کننده انرژی در فرایند هوادهی و راکتور فتوالکتوکاتالیستی

Table 2. Characteristics of energy consuming equipment in the aeration process and photoelectrocatalytic reactor

Process	Equipment type	Power (kW)	Operating time (hour)	Energy consumption (kWh/m <sup>3</sup> )
Aeration	Blower 1	0.7	12	4.2
	Blower 2	0.7	12	
Photoelectrocatalytic	UV-A lamp	0.004	24	2

روز است که در چند مرحله تصفیه فیزیکی، بیولوژیکی، فیلتر شنی و کربنی طراحی شده است. به منظور بررسی امکان جایگزینی روش فتوالکتوکاتالیستی با هوادهی، در جدول ۲ مشخصات تجهیزات مصرف‌کننده انرژی در فرایند هوادهی پکیج تصفیه مذکور و راکتور فتوالکتوکاتالیستی و میزان مصرف انرژی هر یک ارائه شده است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بازدهی حذف BOD و COD در راکتور

##### فتوالکتوکاتالیستی

#### ۳-۱-۱- بررسی اثر تغییرات چگالی شدت جریان و فاصله الکترودها

به منظور بررسی اثر چگالی شدت جریان و فاصله الکترودها از یکدیگر بر حذف آلاینده‌ها، آزمایش‌ها در دو چگالی شدت جریان ۱۰ و ۲۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع و در سه فاصله ۶، ۱۲ و ۱۵ سانتی‌متری الکترودها از یکدیگر انجام شد. نتایج حذف BOD و COD، مطابق جدول ۳ به دست آمده است.

در شکل ۲ رابطه بین تغییرات غلظت BOD و COD با تغییرات فاصله آند-کاتد در چگالی شدت جریان ۱۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع و در شکل ۳ رابطه بین تغییرات غلظت BOD و COD با تغییرات فاصله آند-کاتد در چگالی شدت جریان ۲۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع نشان داده شده است.

مطابق نتایج به دست آمده، با افزایش چگالی جریان میزان واکنش بیشتر شده و در نتیجه میزان حذف نیز افزایش یافته است. همچنین سرعت تخریب آلاینده‌ها به تدریج با افزایش فاصله بین الکترودها، در ولتاژ ثابت کاهش یافت که می‌تواند ناشی از کاهش چگالی جریان الکتریکی با افزایش فاصله الکترودها باشد (Biswal et al., 2019).

پتانسیل آند/کاتد (ولتاژ) بین الکترودها از طریق منبع تغذیه جریان مستقیم<sup>۱</sup> عرضه و یک لامپ Philips Actinic BL UVA (4 W، TL، به عنوان منبع نور در فاصله ۳ سانتی‌متری از فتوآند، خارج از سلول قرار گرفته است. طول موج اصلی آن ۳۸۰ نانومتر است که می‌تواند تضمین‌کننده تأمین انرژی مورد نیاز برای غلبه بر شکاف باند TiO<sub>2</sub> (E = 3.2 eV) و تحریک الکترون‌ها و تولید جفت الکترون-حفره برای واکنش‌های اکسیداسیون و کاهش باشد (Montenegro-Ayo et al., 2019).

فتوآند در فاصله ۳ سانتی‌متری از مرکز لامپ UVA قرار داده شد تا از تضعیف نور جلوگیری شود. قبل از هر آزمایش برای تمیز کردن الکترودها از آب دوبار تقطیر و الکل ۹۰ درصد و نیز برای رسیدن به شرایط تعادل ترمودینامیکی، یک همزن مغناطیسی به مدت ۵ دقیقه برای هم زدن محلول، بدون استفاده از ولتاژ استفاده شد. آزمایش‌ها در شرایط تاریک، برای جلوگیری از ورود نور غیر UV انجام شد (Pareui, et al., 2008, Cheng et al., 2020). نمونه‌های فاضلاب باید عاری از هر گونه مواد نامحلول و جامد باشند. آزمایش‌ها با ۲ لیتر فاضلاب خاکستری شروع و پس از ۶۰ دقیقه، نمونه‌ها برای انجام آنالیز COD و BOD<sub>5</sub> برداشت شد (Carranzo, 2012). کارایی حذف آلاینده‌ها با استفاده از معادله ۱ تعیین شد

$$Re (\%) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} * 100 \quad (1)$$

که در آن

C<sub>0</sub> غلظت اولیه و C<sub>t</sub> غلظت نهایی است.

#### ۲-۲- بررسی مصرف انرژی در راکتور فتوالکتوکاتالیستی و

هوادهی (بررسی موردی)

ظرفیت پکیج تصفیه فاضلاب مذکور به طور متوسط ۴ مترمکعب در

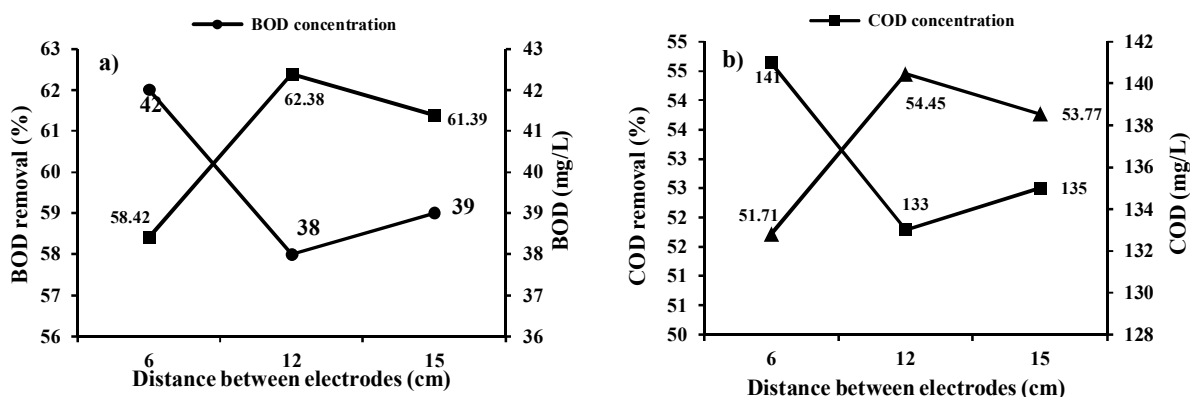
<sup>1</sup> Current Continue (DC)



جدول ۳- شرایط عملیاتی و نتایج حذف BOD و COD

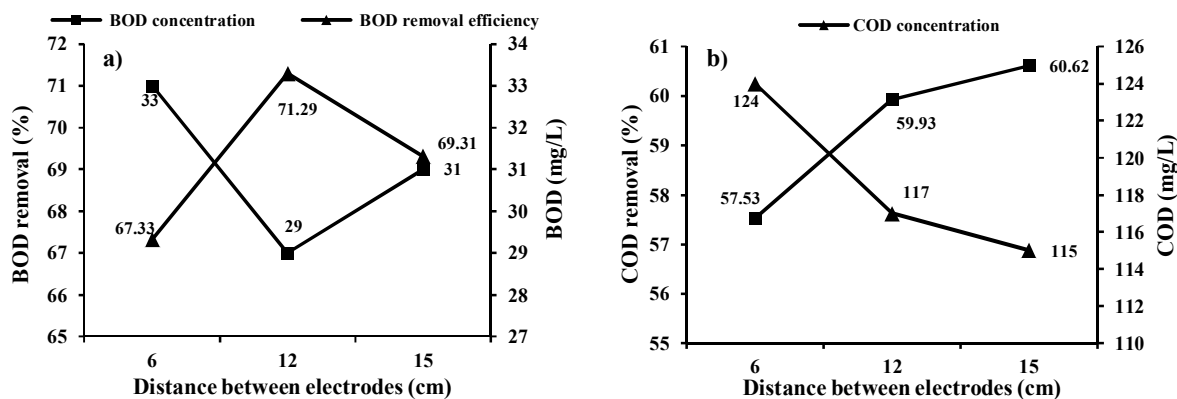
Table 3. Operating conditions and results of BOD and COD removal

Experiment No.	Current intensity density (mA/cm <sup>2</sup> )	Electrodes distance (cm)	Output BOD <sub>5</sub> concentration (mg/L)	BOD removal efficiency (%)	Output COD concentration (mg/L)	COD removal efficiency (%)
1	10	6	42	58.42	141	51.71
2	10	12	38	62.38	133	54.45
3	10	15	39	61.39	135	53.77
4	20	6	33	67.33	124	57.53
5	20	12	29	71.29	117	59.93
6	20	15	31	69.31	115	60.62

Fig. 2. Changes in concentration and removal efficiency of a) BOD and b) COD with changes in the anode-cathode distance at a current intensity density of 10 mA/cm<sup>2</sup>

شکل ۲- تغییرات غلظت و کارایی حذف BOD (a) و COD (b) با تغییرات فاصله آند-کاتد در چگالی

شدت جریان ۱۰ میلی آمپر بر سانتی متر مربع

Fig. 3. Changes in concentration and removal efficiency of a) BOD and b) COD with changes in the anode-cathode distance at a current intensity density of 20 mA/cm<sup>2</sup>

شکل ۳- تغییرات غلظت و کارایی حذف BOD (a) و COD (b) با تغییرات فاصله آند-کاتد در چگالی شدت

جریان ۲۰ میلی آمپر بر سانتی متر مربع





### ۲-۳- میزان کاهش مصرف آب در صورت بازیابی فاضلاب خاکستری در محل

میزان سرانه مصرف آب در ایران حدود ۱۵۰ لیتر در روز است و با توجه به این موضوع که بیش از نیمی از این مقدار و به طور متوسط ۶۴ درصد حجم فاضلاب خانگی از نوع خاکستری است (Zamani and Taebi, 2008)، با تصفیه این فاضلاب در محل، می توان به همین میزان که مقدار قابل توجهی است، در مصرف آب صرفه جویی کرد.

### ۳-۳- مقایسه میزان مصرف انرژی

برای بررسی الگوی مصرف انرژی، وضعیت مصرف انرژی در فرایند هوادهی پکیج تصفیه فاضلاب خاکستری، بررسی و همچنین راکتور فتوالکتروکاتالیستی ارزیابی شد. در این راستا، BOD ورودی به پکیج تصفیه فاضلاب در نمونه برداشت شده در ورودی هوادهی ۱۱۰ میلی گرم در لیتر و BOD خروجی از هوادهی ۱۶ میلی گرم در لیتر بود. همچنین میزان COD ورودی به پکیج تصفیه فاضلاب در نمونه برداشت شده در ورودی هوادهی ۲۹۲ میلی گرم در لیتر و COD خروجی از هوادهی ۳۷ میلی گرم در لیتر بود.

انرژی الکتریکی مصرفی در بخش هوادهی این پکیج تصفیه برابر ۱۶/۸ کیلووات ساعت و دبی متوسط ورودی ۴ مترمکعب در روز بود. میزان انرژی الکتریکی مصرفی در بخش هوادهی حدود ۴/۲ کیلووات ساعت بر مترمکعب و ۱۶/۴۷ کیلووات به ازای حذف ۱ کیلوگرم COD برآورد شد. جدول ۴ مقایسه مصرف انرژی در روش بیولوژیک در چند بررسی انجام شده را نشان می دهد.

همان طور که از مقایسه نتایج مصرف انرژی مشخص است، مصرف انرژی در پکیج تصفیه فاضلاب خاکستری مذکور و همچنین تصفیه خانه شهرک صنعتی نصیرآباد، بیش از میانگین مصرف انرژی در سایر کشورهای جهان است که این موضوع می تواند به دلیل طراحی نامناسب و مشکلات بهره برداری و نگهداری در این تصفیه خانه ها باشد. به عبارت دیگر، با طراحی صحیح و بهینه و همچنین بهره برداری مناسب، می توان به مقدار کم مصرف انرژی الکتریکی در روش بیولوژیک نیز دست یافت.

در راکتور فتوالکتروکاتالیستی، به دلیل جریان الکتریکی و ولتاژ کم، تأثیر بایاس بر مصرف کل انرژی را می توان ناچیز در نظر

در هر دو چگالی شدت جریان ۱۰ و ۲۰ میلی آمپر بر سانتی مترمربع، با افزایش فاصله بین الکترودها، غلظت BOD و COD با تغییرات نسبتاً کم، افزایش را تجربه می کند. در چگالی شدت جریان ثابت، با افزایش فاصله بین الکترودها، ولتاژ نیز افزایش می یابد که سبب مصرف بیشتر انرژی الکتریکی می شود (Razavi et al., 2012).

شرایط بهینه برای حذف BOD و COD، با توجه به میزان مصرف انرژی و رعایت حدود استاندارد EPA، در چگالی شدت جریان ۲۰ میلی آمپر بر سانتی مترمربع و فاصله الکترودها برابر با ۱۲ سانتی متر در مدت ۶۰ دقیقه به دست آمد.

### ۳-۱-۲- بررسی اثر ولتاژ و تغییر فاصله الکترودها بر pH اولیه

آزمایش ها در دو اختلاف پتانسیل ۵/۵ و ۷ ولت و pH اولیه ۵/۳۶ انجام شد. در هر شش نمونه، مقدار pH در پایان واکنش ها اندازه گیری شد. بررسی تأثیر ولتاژ و فاصله بین الکترودها بر روی pH در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج حاکی از کاهش pH پس از تصفیه به روش فتوالکتروکاتالیستی است. pH با افزایش ولتاژ، کاهش و با کاهش فاصله الکترودها بیشتر کاهش یافته است (Ebraheim et al., 2021b). می تواند به دلیل افزایش محصولات اسیدی تولید شده توسط اکسیداسیون ترکیبات آلی باشد (Li and Liu, 2005, Yurdakal et al., 2020)

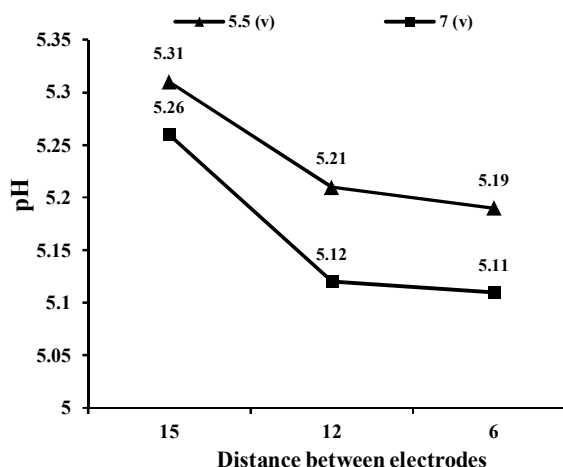


Fig. 4. Effect of voltage and change of electrode distance on initial pH

شکل ۴- اثر ولتاژ و تغییر فاصله الکترودها بر pH اولیه



## جدول ۴- مقایسه مصرف انرژی در روش بیولوژیک

Table 4. Comparison of energy consumption in biological method

Row	Method	Energy consumption (kWh)
1	Biological in Nasirabad industrial park (Saghafi et al., 2016)	5.6
2	Biological (activated sludge) in Greece (Mamais et al., 2015, Siatou et al., 2020)	1.2
3	Biological (activated sludge) in Canada (Yerushalmi et al., 2013)	0.1
4	Biological (activated sludge) in Australia (Kneppers et al., 2009)	0.37
5	Biological (activated sludge) in China (Liu et al., 2012)	0.269
6	Biological (activated sludge) in the United States (Makinia and Zaborowska, 2020)	0.6
7	Biological (activated sludge) in the Japan (Mizuta and Shimada, 2010)	1.89

جدول ۵- انرژی مصرفی در فرایند هوادهی و فتوالکتروکاتالیستی و نرخ تولید CO<sub>2</sub> از آنTable 5. Energy consumption in aeration and photoelectrocatalytic process and CO<sub>2</sub> production rate from it

Process	Energy consumption per kilogram COD removal (kW)	CO <sub>2</sub> produced (kg)
Aeration	16.47	11.68
Photoelectrocatalytic	11.43	8.10

اطلاعات منتشر شده EPA<sup>۱</sup>، میزان تولید گاز CO<sub>2</sub> برای تأمین یک کیلووات انرژی الکتریکی برابر با ۰/۷۰۹ کیلوگرم خواهد بود (Avert, 2018).

## ۴- نتیجه‌گیری

فاضلاب شهری متشکل از فاضلاب قهوه‌ای و خاکستری است که در صورتی که فاضلاب خاکستری از فاضلاب قهوه‌ای جدا باشد، می‌توان به راحتی آن را تصفیه و برای استفاده در فلاش تانک‌ها و آبیاری فضای سبز استفاده کرد. در این راستا در این پژوهش، امکان بهره‌گیری از سیستم‌های فتوالکتروکاتالیستی برای تصفیه فاضلاب خاکستری، بررسی شد. فاصله الکترودها و چگالی شدت جریان از جمله پارامترهای تأثیرگذار بر کارایی حذف BOD و COD هستند که بر اساس نتایج این پژوهش، شرایط بهینه برای حذف آلاینده‌ها، در چگالی شدت جریان ۲۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع و فاصله الکترودها برابر با ۱۲ سانتی‌متر در مدت ۶۰ دقیقه به دست آمد. همچنین نتایج حاکی از کاهش pH پس از تصفیه به روش فتوالکتروکاتالیستی بود که می‌تواند به دلیل افزایش محصولات اسیدی تولید شده توسط اکسیداسیون ترکیبات آلی باشد. علی‌رغم نتایج نسبتاً خوب موجود در پیشینه پژوهشی، تا به امروز، کاربرد

گرفت (حدود ۲ درصد از کل انرژی مورد نیاز) (Collivignarelli et al., 2021) به همین علت در این کار مصرف انرژی به دلیل استفاده از بایاس نادیده گرفته شد و توان اسمی در روش فتوالکتروکاتالیستی برابر با مصرف انرژی لامپ UV در نظر گرفته شد.

BOD ورودی به راکتور فتوالکتروکاتالیستی در نمونه برداشت شده در ورودی راکتور ۱۱۰ میلی‌گرم در لیتر و BOD خروجی از آن در حالت بهینه ۲۹ میلی‌گرم در لیتر بود. همچنین میزان COD ورودی به راکتور فتوالکتروکاتالیستی در نمونه برداشت شده در ورودی هوادهی ۲۹۲ میلی‌گرم در لیتر و COD خروجی از آن در حالت بهینه ۱۱۷ میلی‌گرم در لیتر بود.

انرژی الکتریکی مصرفی در بخش لامپ UV این راکتور برابر ۰/۰۹۶ کیلووات ساعت و دبی متوسط ورودی ۲ لیتر در ساعت (۴۸ لیتر در روز) بود. میزان انرژی الکتریکی مصرفی در راکتور فتوالکتروکاتالیستی حدود ۲ کیلووات ساعت بر مترمکعب و ۱۱/۴۳ کیلووات به ازای حذف ۱ کیلوگرم COD برآورد شد.

تصفیه فاضلاب خاکستری با استفاده از هر دو روش مستلزم مصرف انرژی الکتریکی است که جدول ۵ نشان‌دهنده انرژی مصرفی در فرایند هوادهی و فتوالکتروکاتالیستی و نرخ تولید CO<sub>2</sub> ناشی از آن در بررسی‌های موردی در این پژوهش بود. بر اساس

<sup>1</sup> Environmental Protection Agency (EPA)



مجتمع‌های مسکونی، از روش‌های مناسب تصفیه فاضلاب بیولوژیک استفاده کرد. در صورتی که فاضلاب خاکستری به صورت محلی تصفیه شود، قابلیت استفاده مجدد را خواهد داشت و میزان مصرف آب در مجتمع‌های مسکونی را کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، میزان مصرف انرژی و تولید آلودگی هوا در مصارف مربوط به توزیع و تصفیه آب و فاضلاب نیز کاهش خواهد یافت. اما در صورتی که کل فاضلاب به سمت تصفیه‌خانه فاضلاب شهری هدایت شود، جدا از هزینه‌های تأمین انرژی، آب تصفیه شده در نهایت وارد مسیل‌ها شده و از دسترس خارج خواهد شد که در چنین شرایطی هزینه برگشت مجدد آب برای استفاده در جوامع شهری، بسیار گزاف خواهد بود.

### ۵- قدردانی

این پژوهش، از رساله دوره دکترا در دانشگاه تهران - پردیس بین‌المللی کیش استخراج شد. نویسندگان، مراتب تشکر صمیمانه خود را از مسئولان پژوهشی دانشکده محیط‌زیست دانشگاه تهران به عمل می‌آورند.

سیستم فتوکاتالیز در مقیاس کامل وجود ندارد و این فرایند هنوز در مقیاس آزمایشگاهی بررسی می‌شود. کارایی فرایند از نقطه نظر انرژی جنبه‌ای است که با توجه به یک کاربرد فرضی در مقیاس بزرگ، نیاز به پژوهش‌های بیشتری دارد (Collivignarelli et al., 2021).

استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان جایگزینی برای لامپ‌های UV در این فناوری پیشنهاد شده (Zhou et al., 2020)، ولی این راه‌حل به زمان تابش طولانی تری نیاز دارد و در نتیجه حجم بیشتری از راکتورها مورد نیاز می‌باشد که ممکن است در عمل امکان پذیر نباشد. کارایی انرژی و صرفه‌جویی در فرایند نقش کلیدی ایفا می‌کند، زیرا اجرای این فرایند در مقیاس بزرگ تنها در صورتی می‌تواند اتفاق بیفتد که از نظر اقتصادی امکان پذیر باشند.

نتایج نشان‌دهنده کاهش ۶۴ درصدی مصرف آب در مجتمع‌های مسکونی در صورت بهره‌گیری از تصفیه فاضلاب خاکستری در محل و در سطح کلان سبب کاهش مصرف انرژی (Jeong et al., 2018) و تولید CO<sub>2</sub> ناشی از آن در سیستم توزیع و تصفیه آب و فاضلاب در سطح کشور خواهد شد. برای این منظور می‌توان با توجه به کیفیت و کمیت فاضلاب خاکستری در

## References

- Ab Aziz, N., Palaniandy, P., Abdul Aziz, H. & Aljuboury, D. 2018. Use of photocatalysis for conversion of harvested rainwater as an alternative source into drinking water. *Global Nest Journal*, 20(2), 243-256. <https://doi.org/10.30955/gnj.002495>.
- Adlan, M. N., Palaniandy P. & Aziz, H. A. 2011. Optimization of coagulation and dissolved air flotation (DAF) treatment of semi-aerobic landfill leachate using response surface methodology (RSM). *Desalination*, 277(1-3), 74-82. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.04.00>.
- Ahmed, S., Rasul, M., Brown, R. & Hashib, M. 2011. Influence of parameters on the heterogeneous photocatalytic degradation of pesticides and phenolic contaminants in wastewater: a short review. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 311-330. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.08.028>.
- Al-Rasheed, R. A. 2005. Water treatment by heterogeneous photocatalysis an overview. *4<sup>th</sup> SWCC Acquired Experience Symposium*, Citeseer.
- Åmand, L. & Carlsson, B. 2012. Optimal aeration control in a nitrifying activated sludge process. *Water Research*, 46(7), 2101-2110. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.01.023>.
- Ananpattarachai, J. & Kajitvichyanukul, P. 2015. Photocatalytic degradation of p, p'-DDT under UV and visible light using interstitial N-doped TiO<sub>2</sub>. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 50(4), 247-260. <https://doi.org/10.1080/03601234.2015.999592>.
- Avert, E. 2018. *US National Weighted Average CO<sub>2</sub> Marginal Emission Rate, Year 2017 Data*. US Environmental Protection Agency. Pub., Washington DC. USA.



- Barrera-Díaz, C., Canizares, P., Fernández, F., Natividad, R. & Rodrigo, M. A. 2014. Electrochemical advanced oxidation processes: an overview of the current applications to actual industrial effluents. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 58(3), 256-275. <https://doi.org/10.29356/jmcs.v58i3.133>.
- Biswal, H. J., Vundavilli, P. R. & Gupta, A. 2019. Investigations on the effect of electrode gap variation over pulse-electrodeposition profile. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, Bhubaneswar, India. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/653/1/012046>.
- Bockelmann, D., Dillert, R., Dzengel, J., Goslich, R., Grob, E., Hgendorff, M., et al. 2004. Photocatalysis. *Solar Energy*, 77, 445. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.09.001>.
- Carranzo, I. V. 2012. Standard methods for examination of water and wastewater. *Anales de Hidrología Médica*, 5(2), 183-190.
- Che-Ani, A., Shaari, N., Sairi, A., Zain, M. & Tahir, M. 2009. Rainwater harvesting as an alternative water supply in the future. *European Journal of Scientific Research*, 34(1), 132-140.
- Cheng, L., Liu, S., He, G. & Hu, Y. 2020. The simultaneous removal of heavy metals and organic contaminants over a Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub>/mesoporous TiO<sub>2</sub> nanotube composite photocatalyst. *RSC Advances*, 10(36), 21228-21237. <https://doi.org/10.1039/d0ra03430d>.
- Chowdhury, P., Elkamel, A. & Ray, A. K. 2014. Photocatalytic processes for the removal of toxic metal ions. *Heavy Metals in Water: Presence, Removal and Safety*, 25-43. <https://doi.org/10.1039/9781782620174-00025>.
- Collivignarelli, M. C., Abbà, A., Carnevale Miino, M., Bertanza, G., Sorlini, S., Damiani, S., et al. 2021. Photoelectrocatalysis on TiO<sub>2</sub> meshes: different applications in the integrated urban water management. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(42), 59452-59461. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12606-5>.
- Descoins, N., Deleris, S., Lestienne, R., Trouvé, E. & Maréchal, F. 2012. Energy efficiency in waste-water treatments plants: optimization of activated sludge process coupled with anaerobic digestion. *Energy*, 41(1), 153-164. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.078>.
- Ebraheim, G., Karbassi, A. & Mehrdadi, N. 2021. Chemical reducing conditions through the photo-assisted electrochemical process in the treatment of the urban rainwater. *International Journal of Human Capital in Urban Management*, 6(3), 209-224.
- Ebraheim, G., Karbassi, A. & Mehrdadi, N. 2021. Employing speciation of metals to assess photo-assisted electrochemical efficiency for improving rainwater quality in Tehran, Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-20. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03127-2>.
- Ensaldó-Rentería, M., Ramírez-Robledo, G., Sandoval-González, A., Pineda-Arellano, C., Álvarez-Gallegos, A., Zamudio-Lara, Á., et al. 2018. Photoelectrocatalytic oxidation of acid green 50 dye in aqueous solution using Ti/TiO<sub>2</sub>-NT electrode. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), 1182-1188. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.01.034>.
- Ghiri, N. E. & Azimi, A. A. 2015. Investigating factors affecting the growth of heterotrophic bacteria and faecal coliform contamination of drinking water (study area of Qirokarzin city). *The 3<sup>rd</sup> International Conference on Applied Research in Agricultural Sciences*. Tehran, Iran. (In Persian)
- Hernández-Sancho, F., Molinos-Senante, M. & Sala-Garrido, R. 2011. Energy efficiency in Spanish wastewater treatment plants: a non-radial DEA approach. *Science of The Total Environment*, 409(14), 2693-2699. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.018>.



- Jeong, H., Broesicke, O. A., Drew, B. & Crittenden, J. C. 2018. Life cycle assessment of small-scale greywater reclamation systems combined with conventional centralized water systems for the City of Atlanta, Georgia. *Journal of Cleaner Production*, 174, 333-342. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.193>.
- Jing, B., Chow, C. & Saint, C. 2010. Recent developments in photocatalytic water treatment technology. *Water Research*, 44(10), 2997-3027. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.02.039>.
- Kneppers, B., Birchfield, D. & Lawton, M. 2009. Energy-water relationships in reticulated water infrastructure systems. *Water Supply (kWh/Capita)*, WA7090/2, 1-27.
- Kusiak, A., Zeng, Y. & Zhang, Z. 2013. Modeling and analysis of pumps in a wastewater treatment plant: a data-mining approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(7), 1643-1651. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2013.04.001>.
- Li, B. & Bishop, P. 2002. Oxidation-reduction potential (ORP) regulation of nutrient removal in activated sludge wastewater treatment plants. *Water Science and Technology*, 46(1-2), 35-39. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0452>.
- Li, X. & Liu, H. 2005. Development of an E-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> photoelectrocatalytic oxidation system for water and wastewater treatment. *Environmental Science and Technology*, 39(12), 4614-4620. <https://doi.org/10.1021/es048276k>.
- Liu, F., Ouedraogo, A., Manghee, S. & Danilenko, A. 2012. *A Primer on Energy Efficiency for Municipal Water and Wastewater Utilities*. Technical Report 001/12. World Bank, Washington DC. USA.
- Makinia, J. & Zaborowska, E. 2020. *Mathematical Modelling and Computer Simulation of Activated Sludge Systems*, IWA publishing. London, UK. <https://doi.org/10.2166/9781780409528>.
- Mamais, D., Noutsopoulos, C., Dimopoulou, A., Stasinakis, A. & Lekkas, T. 2015. Wastewater treatment process impact on energy savings and greenhouse gas emissions. *Water Science and Technology*, 71(2), 303-308. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.521>.
- Mizuta, K. & Shimada, M. 2010. Benchmarking energy consumption in municipal wastewater treatment plants in Japan. *Water Science and Technology*, 62(10), 2256-2262. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.510>.
- Montenegro-Ayo, R., Morales-Gomero, J. C., Alarcon, H., Cotillas, S., Westerhoff, P. & Garcia-Segura, S. 2019. Scaling up photoelectrocatalytic reactors: a TiO<sub>2</sub> nanotube-coated disc compound reactor effectively degrades acetaminophen. *Water*, 11(12), 2522. <https://doi.org/10.3390/w11122522>.
- Pareuil, P., Pénilla, S., Ozkan, N., Bordas, F. & Bollinger, J. C. 2008. Influence of reducing conditions on metallic elements released from various contaminated soil samples. *Environmental Science and Technology*, 42(20), 7615-7621. <https://doi.org/10.1021/es800953d>.
- Rahimi, N., Kargari, N., Samadyar, H. & Monfared, M. N. 2014. Determining the social (external) costs of SO<sub>2</sub>, NOX and CO<sub>2</sub> emissions in the country's energy sector (power plants). *Environmental Science and Technology*, 16(3), 107-117.
- Rajput, H., Kwon, E. E., Younis, S. A., Weon, S., Jeon, T. H., Choi, W., et al. 2021. Photoelectrocatalysis as a high-efficiency platform for pulping wastewater treatment and energy production. *Chemical Engineering Journal*, 412, 128612. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128612>.
- Razavi, M., Saeedi, M. & Jabbari, E. 2012. Effect of operating conditions on the simultaneous removal efficiency of phosphate, nitrate and COD from laundry wastewater using electrocoagulation method with aluminum electrode. *Journal of Environmental Studies*, 38(3), 75-84. (In Persian)



- Rojas, J., Zhelev, T. & Graells, M. 2010. Energy efficiency optimization of wastewater treatment-study of ATAD. *Computer Aided Chemical Engineering*, 28, 967-972. [https://doi.org/10.1016/s1570-7946\(10\)28162-2](https://doi.org/10.1016/s1570-7946(10)28162-2).
- Saghafi, S., Mehrdadi, N., Bidhendi, G. N. & Aminirad, H. 2016. Determining the electrical energy consumed in different processes of Nasirabad Industrial Town's treatment plant with COD removal approach. *Journal of Environmental Studies*, 42(1), 19-31. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jes.2016.58093>.
- Seibert, D., Zorzo, C. F., Borba, F. H., De Souza, R. M., Quesada, H. B., Bergamasco, R., et al. 2020. Occurrence, statutory guideline values and removal of contaminants of emerging concern by electrochemical advanced oxidation processes: a review. *Science of The Total Environment*, 748, 141527. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141527>.
- Sharififard, H., Ghorbanpour, M. & Hosseinirad, S. 2018. Cadmium removal from wastewater using nano-clay/TiO<sub>2</sub> composite: kinetics, equilibrium and thermodynamic study. *Advances in Environmental Technology*, 4(4), 203-209. <https://doi.org/10.22104/aet.2019.3029.1149>.
- Siatou, A., Manali, A. & Gikas, P. 2020. Energy consumption and internal distribution in activated sludge wastewater treatment plants of Greece. *Water*, 12(4), 1204. <https://doi.org/10.3390/w12041204>.
- Sirés, I., Billas, E., Oturan, M., Rodrigo, M. A. & Pinazza, M. 2014. Electrochemical advanced oxidation processes: today and tomorrow: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 21, 8330-8367.
- Yao, Y., Cui, L., Jiao, L., Chen, X., Yu, N. & Dong, H. 2016. Effects of duty cycle on the preparation and property of PbO 2-CeO 2 nanocomposite electrodes. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 20, 725-731. <https://doi.org/10.1007/s10008-015-3099-x>.
- Yerushalmi, L., Ashrafi, O. & Haghighat, F. 2013. Reductions in greenhouse gas (GHG) generation and energy consumption in wastewater treatment plants. *Water Science and Technology*, 67(5), 1159-1164. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.681>.
- Yurdakal, S., Çetinkaya, S., Şarлак, M. B., Özcan, L., Loddo, V. & Palmisano, L. 2020. Photoelectrocatalytic oxidation of 3-pyridinemethanol to 3-pyridinemethanal and vitamin B3 by TiO<sub>2</sub> nanotubes. *Catalysis Science and Technology*, 10(1), 124-137. <https://doi.org/10.1039/c9cy01583c>.
- Zamani, S. & Taebi, A. 2008. Recycling gray wastewater and checking the quality of treated wastewater for reuse at the domestic level in line with the sustainable development of the country's water resources. 8<sup>th</sup> *International Congress on Civil Engineering*. Shiraz, Iran. (In Persian)
- Zhao, X., Guo, L., Hu, C., Liu, H. & Qu, J. 2014. Simultaneous destruction of Nickel (II)-EDTA with TiO<sub>2</sub>/Ti film anode and electrodeposition of nickel ions on the cathode. *Applied Catalysis B: Environmental*, 144, 478-485. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.07.038>.
- Zhou, G., Zhao, T., Wang, O., Xia, X. & Pan, J. H. 2020. Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> quantum dots-sensitized rutile TiO<sub>2</sub> nanorod arrays for enhanced solar photoelectrocatalysis in azo dye degradation. *Journal of Physics: Energy*, 3(1), 014003. <https://doi.org/10.1088/2515-7655/abc52c>.



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

