



FANPAYA  
Knowledge Based Company  
(PUBLISHERS)

Journal of Environmental Sciences Studies (JESS)  
Volume10, Number1, Spring, (2024)

Journal Homepage: [www.jess.ir](http://www.jess.ir)  
Print ISSN: 2588-6851 Online ISSN: 2645-520X

## The Application of Shannon Entropy Theory in Optimizing Column Adsorbent Systems for Reducing COD in Greywater

Mostafa Jahangirfar<sup>1</sup>; Parvaneh Tishehzan<sup>2\*</sup>; Laleh Divband Hafshejani<sup>3</sup>

1. MSc Graduate, Department of Environmental Engineering, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
- \*2. Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
3. Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

\* Email Address : [partishezan@scu.ac.ir](mailto:partishezan@scu.ac.ir)

### Article Info

**Article Type:**  
Research Paper

### Article History:

Received Date:  
**2024/07/22**  
Revised Date:  
**2024/08/08**  
Accepted Date:  
**2024/11/07**  
Published Date:  
**2024/11/17**

### Keywords:

Water shortage,  
Mineral adsorbents,  
Organic adsorbents,  
column.

### ABSTRACT

Water scarcity is increasingly recognized as a global crisis with significant impacts on water resources, food security, and environmental sustainability. In response to this issue, the reuse of greywater has emerged as one of the key strategies. This study investigates the effectiveness of various media, including sugarcane bagasse biochar and steel slag, in adsorption columns for reducing the Chemical Oxygen Demand (COD) of greywater. The chemical and physical properties of sugarcane bagasse biochar and steel slag were analyzed using X-Ray Fluorescence (XRF), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), and Brunauer-Emmett-Teller (BET) tests. Adsorption columns made of polyethylene pipes were filled with biochar and slag, respectively, and the effects of influent flow rate and contact time on the performance of the columns in COD reduction were evaluated. The results indicated that the specific surface area of biochar decreased from 88.664 m<sup>2</sup>/g to 22.698 m<sup>2</sup>/g, while that of slag changed from 0.640 m<sup>2</sup>/g to 0.355 m<sup>2</sup>/g. This reduction was attributed to the adsorption of pollutants and the decrease in the surface capacity of the media. The results also showed that the COD removal efficiency decreased with increasing flow rate, with the highest efficiency achieved at a flow rate of 15 mL/min. Additionally, longer contact times improved the performance of the adsorption columns in reducing COD. The study utilized Shannon Entropy method to optimize the design and performance of the adsorption columns, and the findings indicate that contact time is the most influential parameter in the design of adsorption columns.

**Cite this article:** Mostafa Jahangirfar , Parvaneh Tishehzan , Laleh Divband Hafshejani (2024). The Application of Shannon Entropy Theory in Optimizing Column Adsorbent Systems for Reducing COD in Greywater, Journal of Environmental Sciences Studies, 10 (1), Pages 9865-9875.

## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Water scarcity is a major challenge with serious social, economic, and environmental impacts. Population growth, climate change, and mismanagement worsen the crisis. Reusing greywater for non-potable purposes like irrigation and car washing offers a promising solution. Proper treatment of greywater is crucial, and various methods exist, including physical, chemical, and biological. Utilizing industrial waste as adsorbents in greywater treatment reduces industrial waste volume, conserves resources, and represents an economical and sustainable approach. Mineral and organic adsorbents such as steel slag and sugarcane bagasse effectively remove pollutants. This study investigated using industrial wastes as adsorbents in specialized columns and aimed to optimize the system's performance using the Shannon entropy method.

### Materials and methods

Gray water was artificially prepared using lactic acid, bentonite, sodium decyl sulfate, glycerol, sodium bicarbonate, and sodium sulfate to maintain its quality during the experiment. A double-walled PVC adsorption column (15 cm diameter, 80 cm height) was used. The system included a metal frame, polyethene column, storage tanks, and valves. Greywater was stored in a 250-liter tank, and a 20-liter tank with a submersible pump maintained a constant inflow rate. Artificial greywater was made using lactic acid, bentonite, sodium dodecyl sulfate, glycerol, sodium bicarbonate, and sodium sulfate. Two types of beds were used: steel slag (as a mineral bed) and sugarcane bagasse biochar (as an organic bed). Steel slag was sieved, cleaned, and graded, while biochar was produced from sugarcane bagasse at 300°C. Three-bed combinations were tested: Sand and gravel (10 cm) + three 20 cm layers of steel slag, Sand and gravel (10 cm) + 60 cm layer of biochar, Sand and gravel (10 cm) + three 10 cm layers of steel slag + 30 cm layer of biochar. The Shannon entropy method was used to determine the weight of each feature affecting the adsorption process, including inflow rate, organic and mineral bed composition, and residence time.

### Results and discussion

The surface area, pore size, and chemical composition of adsorbent materials affect their adsorption capacity and selectivity. XRF analysis showed that both biochar and slag contain compounds such as Fe, CaO, SiO<sub>2</sub>, and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The presence of these minerals indicates chemical adsorption of organic materials. BET analysis revealed that biochar's surface area increased from 88.664 m<sup>2</sup>/g to 22.698 m<sup>2</sup>/g after use, while slag's decreased from 0.640 m<sup>2</sup>/g to 0.355 m<sup>2</sup>/g. This reduction in surface area is attributed to pollutant adsorption. The highest COD removal efficiencies were achieved with columns containing more biochar. Biochar's high surface area and porosity enhance its adsorption capacity for organic pollutants like COD. Conversely, columns with more slag showed lower efficiency due to the presence of magnesium and calcium oxides, which can form hydroxide ions, reducing the contact area and effectiveness of the slag. Higher inflow rates decreased COD removal efficiency, with the best results at 15 ml/min and the lowest at 30 ml/min. Longer contact times improved COD removal, with optimal performance observed at 312 minutes. Increased contact time allows more interaction between greywater and adsorbent, enhancing pollutant removal. Shannon entropy analysis revealed that contact time was the most important factor affecting COD removal efficiency, while inflow rate had the least impact. The importance of organic and mineral beds was found to be equal. Contact time is crucial for effective adsorption as it determines the interaction period between adsorbent and pollutants, allowing sufficient adsorption to occur.

### Conclusion

The results of this study indicate that using biochar and slag as low-cost adsorbents significantly reduces COD in greywater. Among the studied parameters, contact time had the greatest effect, while inflow rate had the least impact on the column's efficiency. Increasing contact time improved COD removal efficiency, while higher inflow rates decreased it. Additionally, using organic beds like biochar enhances COD reduction more effectively than mineral beds such as slag.



## استفاده از تئوری آنتروپی شانون در بهینه‌سازی سیستم‌های جاذب ستونی برای کاهش COD آب خاکستری

مصطفی جهانگیرفر<sup>۱</sup>، پروانه تیشه زن<sup>۲\*</sup>، لاله دیوبند هفشجانی<sup>۳</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز

\*۲- دانشیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- استادیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز

\*ایمیل نویسنده مسئول: partishehzan@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
<b>نوع مقاله:</b> مقاله علمی پژوهشی	کمبود آب به عنوان یک بحران جهانی در حال افزایش است و تأثیرات زیادی بر منابع آبی، امنیت غذایی و پایداری محیط زیست دارد. در پاسخ به این مشکل، استفاده مجدد از آب‌های خاکستری به عنوان یکی از راهکارهای کلیدی مطرح شده است. در این تحقیق به بررسی کارایی بسترهای مختلف شامل بیوجار باگاس نیشکر و سرباره صنایع فولاد در ستون‌های جاذب برای کاهش COD آب خاکستری پرداخته است. ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی باگاس نیشکر و سرباره صنایع فولاد با استفاده از آزمون‌های XRF، FTIR و BET تحلیل شد. ستون‌های جاذب از جنس لوله پلی‌اتیلن طراحی و به ترتیب با بیوجار و سرباره پر شدند و سپس تأثیر دبی ورودی و زمان ماند بر عملکرد ستون‌های جاذب در کاهش COD آب خاکستری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سطح ویژه بیوجار از ۸۸/۶۶۴ مترمربع بر گرم به ۲۲/۶۹۸ مترمربع بر گرم کاهش یافت، در حالی که در سرباره از ۰/۶۴۰ به ۰/۳۵۵ مترمربع بر گرم تغییر کرد. این کاهش به جذب آلاینده‌ها و کاهش ظرفیت سطحی بسترها نسبت داده شد. نتایج همچنین نشان داد که راندمان حذف COD با افزایش دبی ورودی کاهش یافت و بالاترین راندمان در دبی ۱۵ میلی‌لیتر بر دقیقه به دست آمد. علاوه بر این زمان تماس طولانی‌تر بهبود عملکرد ستون جاذب را در کاهش COD نشان داد. این تحقیق با استفاده از روش آنتروپی شانون به بهینه‌سازی طراحی و عملکرد ستون‌های جاذب پرداخته و نتایج حاکی از این است که زمان تماس تأثیرگذارترین پارامتر در طراحی ستون‌های جاذب است.
<b>تاریخ دریافت:</b> ۱۴۰۳/۰۵/۰۱	
<b>تاریخ بازنگری:</b> ۱۴۰۳/۰۵/۱۸	
<b>تاریخ پذیرش:</b> ۱۴۰۳/۰۸/۱۷	
<b>تاریخ انتشار:</b> ۱۴۰۳/۰۸/۲۷	
<b>کلید واژه‌ها:</b> کمبود آب، جاذب‌های معدنی، جاذب‌های آلی، ستون.	

کمبود آب یک بحران جهانی فزاینده است که میلیاردها نفر را در سراسر جهان تحت تأثیر قرار می‌دهد و زمانی اتفاق می‌افتد که به دلیل ناکافی بودن منابع و یا ناکافی بودن زیرساخت‌ها جوامع نتوانند نیاز آبی خود را برآورده کنند (Anuja et al, 2021). این موضوع نه تنها دسترسی به آب آشامیدنی، بلکه امنیت غذایی، تولید انرژی و پایداری محیط زیست را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. انتظار می‌رود که کمبود شدید آب که در حال حاضر بیش از ۲۵ کشور را تحت تأثیر قرار داده است، تا سال ۲۰۵۰ بر ۴۵ کشور تأثیر بگذارد. پیش بینی می‌شود که این کشورها شاهد کاهش سرانه منابع آب تجدیدپذیر سالانه به زیر ۵۰۰ متر مکعب باشند (Ahmad & Li, 2021). در سال‌های اخیر روش‌های جدیدی مبتنی بر پایداری و حفظ اصول زیست‌محیطی به منظور رفع مشکل کمبود منابع آبی اعمال شده است که استفاده مجدد از آب‌های نامتعارف یکی از آن‌ها می‌باشد. از آنجایی که آب خاکستری بیشترین سهم را در بین منابع فاضلاب تولید شده در خانوارها دارد، استفاده مجدد از آن را می‌توان به عنوان اقدامی کلیدی برای کاهش اثرات کمبود آب در نظر گرفت به طوری که این عمل به تدریج به یکی از مهم‌ترین استراتژی‌ها در کشورهای دارای تنش آبی یا در مناطق آب و هوایی خشک تبدیل شده است (Oteng-Pepurah et al, 2018). آب خاکستری که از سینک‌های آشپزخانه، حمام‌ها، ماشین‌های لباسشویی و حوضچه‌های دستشویی سرچشمه می‌گیرد، ۸۰ تا ۸۵ درصد از فاضلاب خانگی را تشکیل می‌دهد (Baggio et al, 2021). عوامل مختلفی مانند تعداد ساکنان یک خانوار، توزیع سنی، استاندارد زندگی، عادات فرهنگی ساکنان و کیفیت آب تامین شده به خانوار، ممکن است بر ویژگی‌های آب خاکستری تأثیر داشته باشد و منجر به تغییرات گسترده در کیفیت آب شود (Bani-Melhem & Al-Kilani, 2023; Karahan et al, 2023). از نظر پارامترهای اساسی کیفیت آب، آب خاکستری قابل مقایسه با فاضلاب با درجه پایین یا متوسط است و انتظار می‌رود که تصفیه آن در مقایسه با فاضلاب خانگی معمولی به دلیل پتانسیل آلودگی کمتر امکان پذیرتر باشد (Baggio et al, 2021). با این حال، چندین تفاوت کلیدی در کیفیت آب خاکستری وجود دارد که باید به منظور محدود کردن چالش‌های خاص درگیر در تصفیه و استفاده مجدد از آن در نظر گرفته شود. آنچه در تصفیه آب خاکستری اهمیت دارد وجود فناوری‌هایی مبتنی بر هزینه‌های سرمایه‌گذاری، انرژی، نگهداری و بهره‌برداری کمتر و در دسترس بودن مواد مقرون به صرفه است که باید مورد توجه قرار گیرند (Frazer-Williams et al, 2008). فرایندهای جذب سطحی همواره به دلیل سهولت، سادگی عملیاتی و طراحی به طور گسترده در تصفیه آب مورد بحث قرار گرفته‌اند. به علاوه این فرایند می‌تواند آلاینده‌های مختلف آلی و معدنی را از آب و فاضلاب حذف یا به حداقل برساند. بنابراین کاربرد وسیعی در کنترل آلودگی در محیط‌های آبی دارد. یکی از روش‌های پرکاربرد جذب سطحی استفاده از ستون‌های جذب است که این فرایند شامل عبور فاضلاب از طریق ستونی پر از مواد جاذب است که آلاینده‌ها را جذب می‌کند. در این روش انتخاب مواد جاذب و شرایط عملیاتی می‌تواند بر اثربخشی فرایند تأثیر بگذارد (Juela et al, 2022). آب‌های خاکستری بین ۵۰ تا ۸۰ درصد حجم فاضلاب خانگی را در بر می‌گیرد. بنابراین در کشورهای فقیر که از کم‌آبی رنج می‌برند حجم آب‌های خاکستری حدود ۲۰ الی ۳۰ لیتر در روز است. همچنین مقدار آب‌های خاکستری بین نواحی روستایی و شهری متفاوت است (Ghaididak & Yadav, 2013). با توجه به پتانسیل بالای فاضلاب‌ها برای کاهش تنش‌های آبی، محققان از روش‌های مختلف نظیر استفاده از جاذب‌های ارزان قیمت معدنی و آلی و فیلتراسیون برای تصفیه آن‌ها استفاده کرده‌اند. در تصفیه آب از طریق جذب سطحی، هزینه‌ی جاذب مصرفی یکی از مهم‌ترین عوامل امکان‌سنجی اقتصادی فرایند است. بنابراین، اکثر محققان در تلاش برای توسعه و انتخاب جاذب‌های کم هزینه برای این فرایند هستند (Almadani, 2023). اخیراً استفاده مجدد و بازیافت مواد زائد به عنوان جاذب برای تصفیه در جهت یافتن راهبردهای هم‌افزایی برای تقویت اقتصاد دایره‌ای در هر دو بخش آب و پسماند مورد توجه قرار گرفته است (Li et al, 2009). در این راستا در سال‌های اخیر مطالعات زیادی انجام گرفته است. در تحقیقی نیاز به گزینه‌های تصفیه در محل را برای حجم‌های کوچک فاضلاب بسیار آلوده تولید شده توسط صنایعی مانند چوب و مبل‌مان مورد بحث قرار دادند و اثربخشی فرایندهای مختلف تصفیه برای حذف COD از فاضلاب را بررسی کردند. نتایج بیانگر این بود که جذب/فیلتراسیون با کربن فعال و تصفیه بیولوژیکی بی‌هوازی از نظر فنی برای حذف COD امکان‌پذیر است و استفاده از اکسیداسیون پیشرفته در ترکیب با این فرایندها نویدبخش استفاده مجدد/بازیافت آب می‌باشد (Laohaprapanon et al, 2013). استفاده از جاذب‌های آلی باقیمانده گیاهی از نظر اقتصادی، همواره روش مناسبی برای حذف آلاینده‌ها بوده است. کربن فعال ناشی از بیومس کاه، باگاس نیشکر و سوزن کاج برای تصفیه آب خاکستری در ستون‌های جذب توسط (Patel et al, 2020) مورد بررسی قرار گرفت. باگاس نیشکر توانست COD و BOD را به ترتیب ۹۱/۸۵ و ۹۰ درصد کاهش دهد. در تحقیق دیگری بیوجار باگاس نیشکر به صورت فیلتر جذبی برای تصفیه فاضلاب استفاده شده و توانست COD، BOD، نترات کل، فسفات کل و کل مواد جامد را به ترتیب ۸۵/۱، ۸۴/۸، ۷۴/۸، ۷۶/۵ و ۸۴/۷ درصد کاهش دهد (Manyuchi et al, 2020). محققان در مطالعه‌ای به استفاده از کربن فعال پوسته برنج با هدف کاهش اثرات نامطلوب سطوح بالای COD بر اکوسیستم‌های آبی و سلامت انسان پرداختند. آن‌ها از روش سطح پاستور برای تعیین پارامترهای جذب بهینه مانند سرعت جریان، زمان تماس و غلظت اولیه COD استفاده کردند. نتایج نشان داد که ترکیبی از ۴/۵ ساعت زمان تماس، ۱ میلی لیتر در دقیقه سرعت جریان و ۵٪ غلظت COD اولیه منجر به حذف ۶۸/۰۹ درصدی شد (Vin et al, 2022). یک مطالعه جذب مداوم COD از آب خاکستری خانگی را با استفاده از کربن فعال از پوسته هسته خرما در ستون‌های بستر

ثابت تحت شرایط غلظت ورودی ثابت، دبی ورودی مختلف و اعماق بستر متفاوت مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج به دست آمده، جذب مورد مطالعه در حذف COD بسیار کارآمد عمل کرد و میزان حذف به شدت به سرعت جریان و عمق بستر وابسته بود. افزایش عمق بستر منجر به افزایش ظرفیت جذب و افزایش دبی منجر به کاهش آن شد. همچنین ظرفیت جذب برای حداکثر ظرفیت جذب ۵۴ میلی گرم در گرم بر اساس مدل توماس به دست آمد (Oteeng-Pepurah et al, 2023). ستونهای جذب با بستر معدنی نیز توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است. در مالزی از سرباره صنایع فولاد به عنوان جاذبی برای کاهش COD و فسفات کل آب خاکستری یک خشکسویی استفاده شد. نتایج بیانگر توانایی سرباره فولاد به عنوان جاذبی برای کاهش COD و فسفات کل بود (Ramdzan et al, 2022). توانایی زئولیت A، نانوذرات مگنتیت و کامپوزیت مگنتیت-زئولیت در حذف COD در یک ستون با بستر ثابت بررسی و اثر پارامترهایی همچون سرعت جریان، ارتفاع بستر جاذب و غلظت ورودی جذب مشخص گردید. نتایج نشان داد که کامپوزیت مگنتیت-زئولیت کارایی بیشتری نسبت به سایر جاذبها دارد و بالاترین درصد حذف در سرعت جریان ۴ میلی لیتر در دقیقه، ارتفاع بستر ۵ سانتی متر و غلظت آلاینده ۱۰ میلی گرم در لیتر به دست آمد. کامپوزیت مگنتیت-زئولیت پس از پنج چرخه قابلیت استفاده مجدد، همچنان در صد حذف قابل توجهی از COD (۵۵/۵٪) فاضلاب نساجی را نشان داد (Kovo et al, 2023). نقش فرایندهای فیلتراسیون و جذب با استفاده از فیلترشن در ترکیب با ستون سرباره کوره بلند یا کربن فعال در کاهش آلودگی میکروبی آب خاکستری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سرباره فولاد توانایی بیشتری نسبت به کربن فعال برای کاهش کلیفرمها دارد. در صد حذف کلیفرم کل در روزهای اول، چهارم و هفتم به ترتیب ۹۷/۸، ۹۹/۱ و ۷۱/۳ درصد برای سرباره و ۴۰، ۴۰ و ۶۶/۷ درصد برای کربن فعال به دست آمد. ترکیب فیلتراسیون با ستونهای جذب، کارایی بیشتری را نشان داد (Mortula et al, 2023). در استان خوزستان صنایع بزرگی همانند صنایع مختلف فولاد و نیز چندین کشت و صنعت بزرگ نیشکر وجود دارد که همواره دارای حجم عظیمی پسماند هستند که با توجه به طرحهای توسعه آنها، پسماندهای جانبی (سرباره فولادی و باگاس نیشکر) نیز رشد صعودی دارد. در صورت عدم مدیریت آنها، مشکلات زیادی را برای صنایع استان نظیر هزینههای جانبی نگهداری پسماند، جابجایی و انتقال، فضای انباشت مواد، خطر اشتعال و آلودگی محیط زیست در پی خواهند داشت. یکی از روشهای موثر جهت استفاده از این ضایعات صنعتی، بازاستفاده یا بازیافت مواد برای پالایش آبهای آلوده می باشد. لذا تحقیق حاضر با هدف استفاده مجدد از پسماندهای جانبی صنایع (باگاس نیشکر به صورت بیوجار (ماهیت آلی) و سرباره صنایع فولاد (ماهیت معدنی)) به عنوان بستر ستون جذب برای کاهش بار آلی آب خاکستری (کاهش نیاز اکسیژن خواهی شیمیایی) انجام شد. بدین منظور اثر پارامترهایی همچون دبی ورودی، آرایش بستر و زمان ماند بر عملکرد ستونهای جذب مورد بررسی قرار گرفت و برای بهینه نمودن طراحی و عملکرد ستونهای جذب، روش آنتروپی شانون به کار گرفته شد.

## ۲- روش انجام تحقیق

### • تهیه ستون جذب

این تحقیق با استفاده از یک ستون جذب از جنس لوله پولیکا دوجداره به قطر داخلی ۱۵ سانتی متر و ارتفاع ۸۰ سانتی متر و جریان عمودی رو به پایین در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. اجزای اصلی این سیستم شامل یک بدنه فلزی برای نگهداری مخازن، یک ستون از جنس پلی اتیلن، مخزنهای ذخیره محلول و شیرهای ورودی و خروجی بودند. محلول آب خاکستری در یک مخزن ۲۵۰ لیتری نگهداری شد که در انتهای آن یک شیر نیم اینچ برای عبور محلول از ستون جذب قرار داده شد. برای ثابت ماندن دبی ورودی به ستون، یک مخزن ۲۰ لیتری دارای یک پمپ شناور برای ثابت نگه داشتن سطح آب، زیر مخزن نگهداری قرار داده شد و توسط یک شیلنگ به شیر خروجی مخزن ذخیره محلول متصل گردید. در نهایت سه عدد شیر نیم اینچ برای ورود محلول به ستونهای فیلتراسیون جذبی، به انتهای مخزن ۲۰ لیتری متصل شدند.

### • تهیه آب خاکستری

به منظور جلوگیری از تغییرات کیفی آب خاکستری در طول آزمایش، آب خاکستری به صورت مصنوعی بر اساس مطالعه (Hourlier et al, 2010) با استفاده از اسید لاکتیک، بنتونیت، سدیم دوسیل سولفات، گلیسرول، بی کربنات سدیم و سدیم سولفات تهیه شد.

### • جنس بستر ستون جذب

در این تحقیق دو نوع بستر سرباره صنایع فولاد (تهیه شده از شرکت صنایع فولاد خوزستان به عنوان بستر معدنی) و بیوجار باگاس نیشکر به عنوان بستر آلی بررسی شد. سرباره فولادی قبل از استفاده توسط دستگاه مخصوص در صنایع فولاد سرنده شده و آهن زائد موجود در آنها توسط آهنربا جدا گردیده بود. برای زدودن گرد و غبار و سایر آلودگیها بارها سربارهها با آب شهری و پس از آن با آب مقطر شست و شو داده شد و سپس توسط الکهای شماره ۱/۲ و ۳/۸ و ۳/۴ و ۴ میلی متر دانه بندی شد.

بیوچار باگاس نیشکر پس از تهیه از شرکت کشت و صنعت نیشکر و صنایع جانبی، در کوره‌های مخصوص در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به بیوچار تبدیل شد. به منظور تعیین اکسیدهای فلزی از آزمون XRF و برای تعیین گروه‌های عاملی از آزمون FTIR استفاده شد. همچنین با استفاده از آزمون BET مساحت سطح و میزان تخلخل بسترها بررسی گردید.

### • تعیین تاثیر جنس و آرایش بستر، دبی ورودی و زمان بر کاهش COD آب خاکستری

برای بررسی پارامترهای موثر بر جذب از سه ترکیب بستر به صورت زیراستفاده شد.  
 نوع اول: ۱۰ سانتی‌متر شن و ماسه - ۳ لایه ۲۰ سانتی‌متری از سرباره‌های عبوری از الک‌های شماره ۴، ۳/۸ و ۱/۲.  
 نوع دوم: ۱۰ سانتی‌متر شن و ماسه - ۱ لایه ۶۰ سانتی‌متری از بیوچار باگاس نیشکر.  
 نوع سوم: ۱۰ سانتی‌متر شن و ماسه - ۳ لایه ۱۰ سانتی‌متری از سرباره‌های عبوری از الک‌های شماره ۴، ۳/۸ و ۱/۲ - ۱ لایه ۳۰ سانتی‌متری از بیوچار باگاس نیشکر. به منظور تعیین تاثیر دبی ورودی بر عملکرد ستون جذب در کاهش COD آب خاکستری، دبی‌های ورودی ۱۵، ۲۰ و ۳۰ میلی‌لیتر بر دقیقه مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه‌برداری در زمان‌های صفر (لحظه ای)، ۱ ساعت، ۲ ساعت، ۳ ساعت، ۸ ساعت، ۲۴ ساعت و پس از آن هر ۴۸ ساعت یکبار تا ۱۱ روز انجام شد. سپس با استفاده از رابطه ۱ راندمان حذف در هر مرحله محاسبه گردید (Divband Hafshejani et al, 2016).

$$*100R = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \quad (1)$$

در رابطه بالا

$C_0$  = غلظت اولیه COD در آب خاکستری (mg/L)

$C_f$  = غلظت نهایی COD در آب خاکستری (mg/L)

$R$  = درصد حذف COD است.

### • تعیین ستون جذب بهینه با استفاده از تئوری آنتروپی شانون

روش آنتروپی شانون یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره برای تعیین وزن یک ویژگی در مسائل تصمیم‌گیری است (He et al, 2016). این روش براساس معیار فراوانی از میزان اطلاعات یا میزان تصادفی بودن یک متغیر می‌باشد. در این تحقیق ابتدا ماتریس تصمیم متشکل از ویژگی دبی، بستر آلی، بستر معدنی و زمان ماند تشکیل شد (رابطه ۲). سپس با استفاده از روابط (۳ تا ۵) به تعیین وزن هر ویژگی پرداخته شد (Zhu et al, 2020).

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{r\dots} & x_{ij} & x_{r\dots} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}} \quad (3)$$

$$E_i = - \frac{\sum_{j=1}^n n_{ij} \cdot \ln n_{ij}}{\ln k} \quad (4)$$

$$w_i = \frac{1 - E_i}{\sum_{j=1}^m (1 - E_i)} \quad (5)$$

در روابط بالا:

$X$  = ماتریس نرمال

$n_i$  = مقدار نرمال

$E_i$  = مقدار آنتروپی هر شاخص

$w_i$  = وزن هر معیار می‌باشد.

### ۳- نتایج

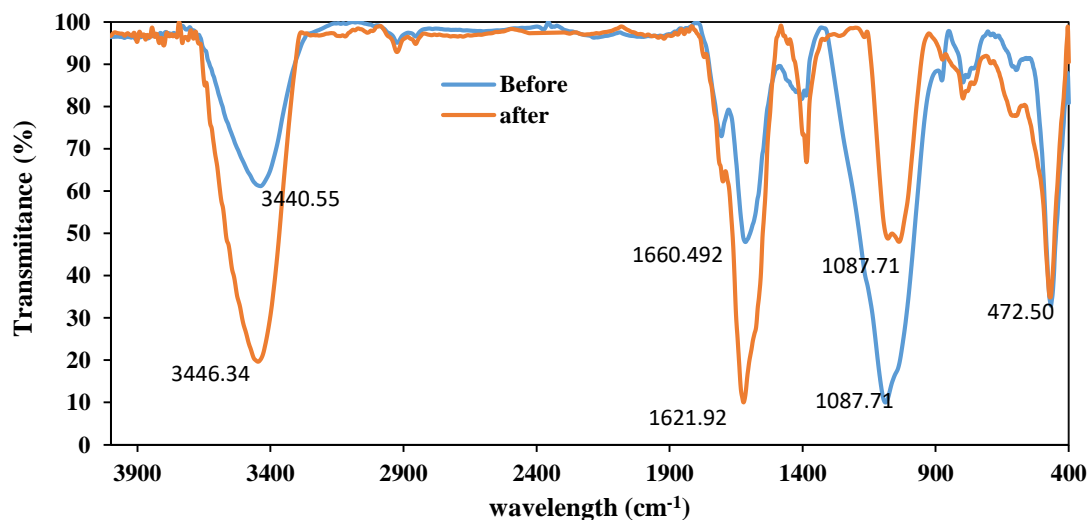
#### • تعیین خصوصیات جنس بستر ستون‌های جذب

سطح ویژه، اندازه منافذ و ترکیب شیمیایی ماده جاذب می‌تواند بر ظرفیت جذب و گزینش‌پذیری آن برای آلاینده‌های مختلف تأثیر بگذارد (Almadani, 2023). طبق نتایج آزمون XRF در هر دو نوع بستر علاوه بر ترکیبات آهن، ترکیباتی همچون CaO، SiO<sub>2</sub> و Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> نیز وجود دارد (جدول ۱). تغییرات ترکیبات فلزی مانند اکسید کلسیم، اکسید سدیم، دی‌اکسید آهن و اکسید منیزیم در بیوچار و سرباره نشانگر جذب شیمیایی مواد آلی است. اکسیدهای معدنی مانند اکسید کلسیم و منیزیم نقش مهمی در حذف COD دارند. ماده آلی موجود در

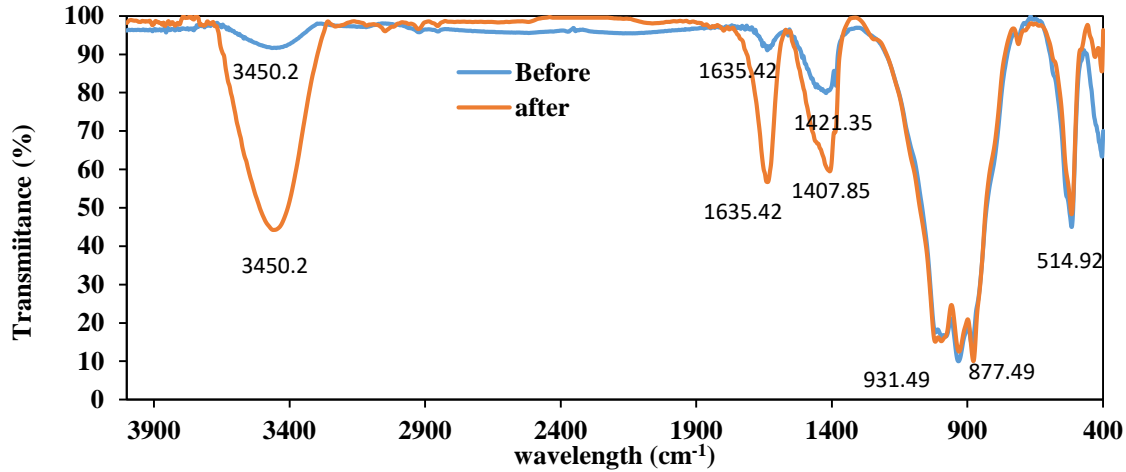
محلول توسط واکنش یونی با این اکسیدهای معدنی و تشکیل ترکیب انحلال ناپذیر از محلول خارج می‌گردد (Ramdzan et al., 2022). براساس نتایج آزمایش‌های BET، سطح ویژه بیوچار قبل از استفاده به عنوان بستر فیلتر برابر ۸۸/۶۶۴ مترمربع بر گرم و بعد از اتمام آزمایش‌ها برابر ۲۲/۶۹۸ به دست آمد. همچنین سطح ویژه در سرباره صنایع فولاد قبل و بعد از استفاده به عنوان بستر فیلتر به ترتیب برابر ۰/۶۴۰ و ۰/۳۵۵ متر مربع بر گرم به دست آمد. براساس نتایج ذکر شده با جذب آلاینده توسط بسترهای فوق سطح ویژه آن‌ها کاهش یافت بالا بودن میزان کربن، وجود گروه‌های عاملی مختلف و سطح ویژه بالا در بیوچار باعث افزایش توانایی آن در جذب آلاینده‌های گوناگون می‌شود (Chintala et al, 2013). همان‌گونه که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، قله موجود در طول موج  $3440-3446 \text{ cm}^{-1}$  نشان‌دهنده گروه عاملی O-H و قله طول موج  $1621-1660 \text{ cm}^{-1}$  بیانگر گروه عاملی C=C، قله موجود در طول موج  $1087 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به گروه عاملی C=O و قله موجود در طول موج  $468-472 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به گروه عاملی Si=O است (Machado & Mulky, 2023; Abd Almagwood et al., 2021; Ashenurst, 2016). بنابراین گروه‌های عاملی ذکر شده در بیوچار به خوبی با مواد آلی موجود در آب خاکستری واکنش داده و موجب کاهش غلظت آن گردیده‌اند. علاوه بر این گروه‌های عاملی نظیر C=O، C=C و C-O دارای بار منفی بوده و باعث نگهداشت یون‌های مثبت بر روی خود می‌شوند (Divband Hafshejani et al, 2017). در شکل (۲) نتایج FTIR برای سرباره فولادی قبل و بعد از استفاده نشان داده شده است. باند  $3450 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به گروه‌های عاملی O-H است که از مولکول‌های آب در سطح سرباره منشأ می‌گیرد و قله  $1635 \text{ cm}^{-1}$  مشخصه پورتلندیت است. باند  $1421$  و  $877$  نیز مرتبط با پیوند C-O گروه کربناته می‌باشد (Ma et al, 2019; Yang et al, 2018). قله  $931$  نیز مربوط به گروه عاملی Si-O است (LiO et al., 2024). انتقال بالاتر در یک عدد موج نشان‌دهنده افزایش تعداد گروه‌های عاملی است (Machado & Mulky, 2023).

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی بیوچار و سرباره براساس آزمون XRF

نمونه	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI
بیوچار قبل جذب	12.52	1.07	N	4.19	0.77	0.53	0.38	0.10	0.01	0.21	76
بیوچار بعد جذب	13.36	1.485	0.253	6.731	0.92	0.581	0.46	0.15	0.01	0.20	74
سرباره قبل جذب	18.18	2.928	23.30	30.75	6.86	0.283	0.05	0.63	0.39	0.56	15.6
سرباره بعد جذب	18.12	2.928	22.62	30.60	6.49	0.188	0.06	0.62	0.38	0.56	16.5



شکل ۱. نتایج FTIR بیوچار قبل و بعد از استفاده در ستون جاذب



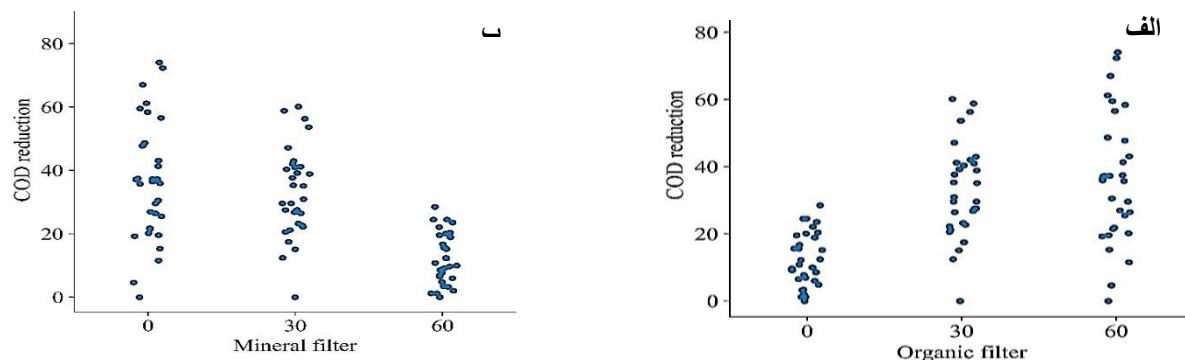
شکل ۲. نتایج FTIR سرباره قبل و بعد از استفاده در ستون جاذب

### • تاثیر نوع و آرایش ستون‌های جاذب بر کاهش COD آب خاکستری

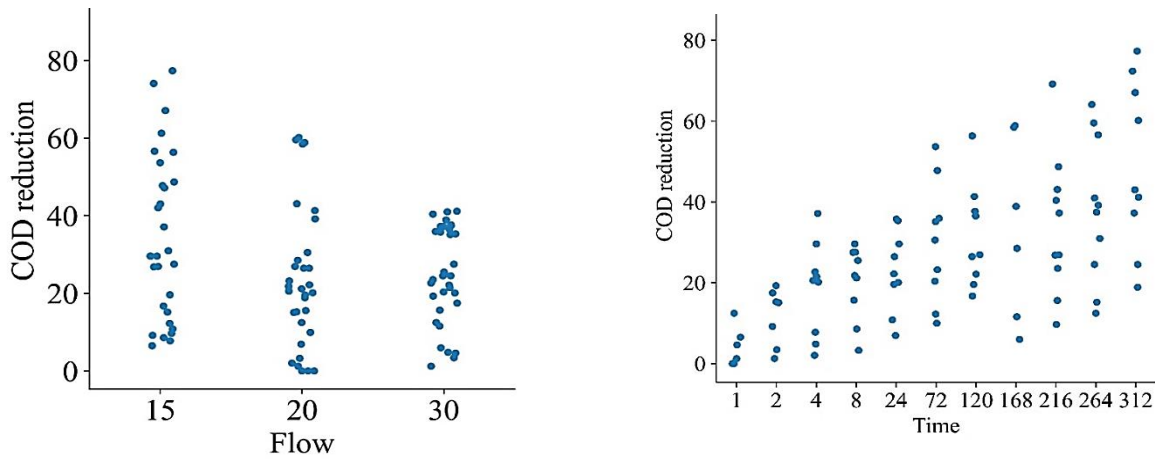
نتایج تاثیر نوع و آرایش ستون‌های جذب بر کاهش COD آب خاکستری در شکل ۳ (الف و ب) نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های زیر بالاترین راندمان‌های کاهش مربوط به ستون‌هایی است که بخش فیلتر آلی آن‌ها بیشتر است، در واقع در شرایط یکسان ستون‌های حاوی بیوچار راندمان بالاتری از خود نشان دادند. بیوچار دارای سطح ویژه و تخلخل بالایی است که می‌تواند ظرفیت جذب بالایی را برای آلاینده‌های آلی مانند COD فراهم کند (Chavda et al, 2014; Khurshid et al, 2021). از طرفی ستون جاذب حاوی سرباره‌ی بیشتر در مقایسه با ستون‌های دیگر توانایی پایین‌تری در حذف COD نشان دادند که به علت وجود اکسیدهای منیزیم و کلسیم در صنایع فولاد است. تماس این اکسیدها با آب و ایجاد یون‌های هیدروکسید باعث افزایش حجم سرباره‌ها شده و در نتیجه باعث کاهش سطح تماس و خلل و فرج آن‌ها می‌گردد. بنابراین آب خاکستری تماس کمتری با بستر ستون جاذب دارد و همین امر باعث کم بودن راندمان حذف COD توسط جاذب سرباره می‌باشد.

### • تاثیر دبی ورودی و زمان ماند به ستون جاذب بر کاهش COD آب خاکستری

نتایج این تحقیق نشان داد که راندمان حذف COD با افزایش دبی جریان در ستون‌های جذب کاهش می‌یابد، به طوری که بالاترین راندمان در ۱۵ میلی‌لیتر بر دقیقه و کمترین در دبی ۳۰ میلی‌لیتر در دقیقه به دست آمد (شکل ۴-الف). همچنین نتایج تاثیر زمان تماس بر راندمان حذف COD نشان داد که با افزایش زمان تماس، کارایی ستون جاذب در کاهش COD افزایش می‌یابد به طوری که ۳۱۲ دقیقه بعد از تماس بالاترین راندمان حذف مشاهده شد و تماس بیشتر از این تاثیر قابل توجهی بر کاهش COD آب خاکستری نداشت. در ارتباط با تاثیر دبی جریان بر کارایی ستون‌های جاذب در کاهش COD، کاهش دبی جریان منجر به کاهش سرعت خروج و به دنبال آن افزایش زمان ماندن آب خاکستری در ستون می‌شود، در نتیجه فرصت تماس بین فاضلاب و مواد جاذب را افزایش می‌یابد (Gunawan et al, 2018). در این تحقیق، شدت جریان مناسب نقش بسیار مهمی در عملکرد ستون جاذب ایفا می‌کند، به گونه‌ای که شدت جریان نامناسب حتی در برخی موارد فیلتر را در تصفیه بی‌اثر می‌کند. اگر شدت جریان زیاد باشد، بسترها و سیستم فیلتراسیون زمان کافی برای تبادل یون و حذف آلاینده‌ها را ندارند و سیستم تقریباً بی‌اثر است. یافته‌ها نیز نشان می‌دهد که زمان تماس طولانی‌تر امکان حذف موثرتر آلاینده‌های آب را فراهم می‌کند. این به این دلیل است که هر چه زمان تماس طولانی‌تر باشد، آلاینده‌ها زمان بیشتری برای تعامل با ماده بستر ستون جاذب دارند و شانس جذب و حذف را افزایش می‌یابد (Baig et al, 2021; Elbedwehy et al, 2019).



شکل ۳. تاثیر جنس و آرایش بستر ستون جاذب بر راندمان حذف COD



شکل ۴. الف. تاثیر دبی ورودی به بستر ستون جذب بر راندمان حذف COD. ب. تاثیر زمان تماس بر راندمان حذف COD.

#### • کاربرد آنتروپی شانون در بهینه سازی ستون جاذب مورد مطالعه

نتایج به گارگیری آنتروپی شانون در تعیین درجه اهمیت پارامترهای دبی، بستر آلی، بستر معدنی و زمان ماند بر کارایی ستون‌های جاذب در کاهش COD آب خاکستری در جدول ۲ نشان داده شده است. براساس نتایج به دست آمده، زمان تماس آب خاکستری با بستر ستون جاذب به عنوان موثرترین پارامتر و دبی آب خاکستری ورودی به ستون جاذب عنوان پارامتر کم اثر شناخته شد. قابل ذکر است که درجه اهمیت بستر آلی و معدنی یکسان می‌باشد. براساس نتایج جدول ۲، زمان تماس در میان پارامترهای تأثیرگذار در ستون جاذب مهم‌تر از سرعت جریان و نوع بستر است، زیرا مدت زمان تعامل بین جاذب و آلاینده را تعیین می‌کند و اجازه می‌دهد تا جذب کافی رخ دهد (George et al, 2022; Prasad et al, 2022). بنابراین، درک و بهینه سازی زمان تماس برای جذب کارآمد در ستون‌های بستر ثابت بسیار مهم است.

جدول ۲. درجه اهمیت پارامترهای مورد مطالعه بر کارایی ستون‌های جاذب کاهنده COD

بستر معدنی	بستر آلی	دبی ورودی	زمان تماس
۰/۲۹۹	۰/۲۹۹	۰/۰۲۶	۰/۳۷۴

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از بیوجار و سرباره در ستون‌های جاذب به عنوان یک جاذب ارزان قیمت تاثیر بسزایی در کاهش COD آب خاکستری دارد. از بین پارامترهای مورد مطالعه در این تحقیق، زمان تماس و دبی ورودی به ترتیب بیشترین و کمترین تاثیر را بر کارایی ستون جاذب دارد. افزایش زمان تماس باعث افزایش راندمان حذف COD، افزایش دبی باعث کاهش راندمان حذف COD شد. قابل ذکر است که کاربرد بستر آلی همچون بیوجار نسبت به سرباره (بستر معدنی)، راندمان کاهش COD توسط ستون‌های جاذب را افزایش می‌دهد.

#### تشکر و قدردانی

بدین وسیله از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (GN:SCU.WI99.25891) در انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد.

#### منابع

- Abd Almagood, O. M., El Tohamy, S. A., Ismail, E. H., & Samhan, F. A. 2021. Sugarcane bagasse biochar with nanomagnetite: a novel composite heavy metals pollutants removal. Egyptian Journal of Chemistry, Vol. 64(3), P. 1293-1313.
- Ahmad, H., & Li, J. 2021. Impact of water deficit on the development and senescence of tomato roots grown under various soil textures of Shaanxi, China. BMC Plant Biology, Vol. 21(1), P. 1-16.
- Almadani, M. 2023. Adsorption process modeling to reduce COD by activated carbon for wastewater treatment. Chemosphere, Vol. 339, P. 139691.

- Anuja, J., Darshan, B., Saraswathi, G., & Meyyappan, N. 2021. Study on reuse of grey water—A Review. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series.
- Ashenhurst, J. 2016. Infrared spectroscopy: a quick primer on interpreting spectra. *Master Organic Chemistry*, 23.
- Baggio, G., Qadir, M., & Smakhtin, V. 2021. Freshwater availability status across countries for human and ecosystem needs. *Science of the Total Environment*, Vol. 792, P. 148230.
- Baig, U., Faizan, M., & Sajid, M. 2021. Effective removal of hazardous pollutants from water and deactivation of water-borne pathogens using multifunctional synthetic adsorbent materials: a review. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 302, P. 126735.
- Bani-Melhem, K., & Al-Kilani, M. R. A.-K. 2023. A comparison between iron and mild steel electrodes for the treatment of highly loaded grey water using an electrocoagulation technique. *Arabian Journal of Chemistry*, 105199.
- Chavda, S. B., Pandya, M., & Student, M. 2014. Evaluation of Removal of TDS, COD and Heavy metals from Wastewater using Biochar. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, Vol. 1, P. 1-5.
- Chintala, R., Mollinedo, J., Schumacher, T. E., Papiernik, S. K., Malo, D. D., Clay, D. E., ... & Gulbrandson, D. W. 2013. Nitrate sorption and desorption in biochars from fast pyrolysis. *Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 179, P. 250-257.
- Divband Hafshejani, L., Boroomand Nasab, S., Moradzadeh, M., Divband, S., & Abedi Koupai, J. 2016. Cadmium removal from aqueous solution using nano/milli-sized particles of cedar leaf ash. *Desalination and Water Treatment*, Vol. 57(7), P. 3283-3291.
- Divband Hefeshjani, L., Naseri, A.A., Houshmand, A.R., Abbasi, F. & A. Soltani Mohammadi. 2017. Investigating the effect of using sugarcane bagasse biochar on the chemical properties of a sandy loam soil. *Irrigation Science and Engineering*, Vol. 40(1), P. 63-72 (In Persian).
- Elbedwehy, A. M., Abou-Elanwar, A. M., Ezzat, A. O., & Atta, A. M. 2019. Super effective removal of toxic metals water pollutants using multi functionalized polyacrylonitrile and arabic gum grafts. *Polymers*, Vol. 11(12), P. 1938.
- Frazer-Williams, R., Avery, L., Winward, G., Jeffrey, P., Shirley-Smith, C., Liu, S., . . . Jefferson, B. 2008. Constructed wetlands for urban grey water recycling. *International Journal of Environment and Pollution*, Vol. 33(1), P. 93-109.
- George, A. M., Krishna bhavan, B. R. N., & Ananthkrishnan, J. N. 2022. Adsorption of perchlorate by cationic modified adsorbent in a fixed bed continuous flow column. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, Vol. 97(7), P. 1655-1664.
- Ghaitidak, D. M., & Yadav, K. D. 2013. Characteristics and treatment of greywater—A review. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 20(5): P. 2795-2809.
- Gunawan, D., Sapei, L., & Riadi, L. 2018. Yarn dyed wastewater treatment using hybrid electrocoagulation-Fenton method in a continuous system: Technical and economical viewpoint. *Environmental Engineering Research*, Vol. 1(23), P. 114-119.
- He, D., Xu, J., & Chen, X. 2016. Information-theoretic-entropy based weight aggregation method in multiple-attribute group decision-making. *Entropy*, Vol. 18(6), P. 171.
- Hourlier, F., Masse, A., Jaouen, P., Lakel, A., Gerente, C., Faur, C., & Le Cloirec, P. 2010. Formulation of synthetic greywater as an evaluation tool for wastewater recycling technologies. *Environmental technology*, Vol. 31(2), P. 215-223.
- Juela, D., Vera, M., Cruzat, C., Astudillo, A., & Vanegas, E. 2022. A new approach for scaling up fixed-bed adsorption columns for aqueous systems: A case of antibiotic removal on natural adsorbent. *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 159, P. 953-963.
- Karahan, B. N., Akdag, Y., Fakioglu, M., Korkut, S., Guven, H., Ersahin, M. E., & Ozgun, H. 2023. Coupling ozonation with hydrogen peroxide and chemically enhanced primary treatment for advanced treatment of grey water. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 11(3), P. 110116.
- Khurshid, H., Mustafa, M. R. U., Rashid, U., Isa, M. H., Ho, Y. C., & Shah, M. M. 2021. Adsorptive removal of COD from produced water using tea waste biochar. *Environmental Technology & Innovation*, Vol. 23, P. 101563.

- Kovo, A. S., Alaya-Ibrahim, S., Abdulkareem, A. S., Adeniyi, O. D., Egbosiuba, T. C., Tijani, J. O., . . . Yusuff, A. S. 2023. Column adsorption of biological oxygen demand, chemical oxygen demand and total organic carbon from wastewater by magnetite nanoparticles-zeolite a composite. *Heliyon*, 9(2).
- Laohaprapanon, S., Marques, M., Kaczala, F., & Hogland, W. 2013. Packed-Column of Granular Activated Carbons for Removal of Chemical Oxygen Demand from Industrial Wastewater. *CLEAN: Soil, Air, Water*, Vol. 41(3), P. 244-250.
- Li, F., Wichmann, K., & Otterpohl, R. 2009. Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. *Science of the Total Environment*, Vol. 407(11), P. 3439-3449.
- Ma, H., Zhu, H., Yi, C., Fan, J., Chen, H., Xu, X., & Wang, T. 2019. Preparation and reaction mechanism characterization of alkali-activated coal gangue-slag materials. *Materials*, Vol. 12(14), P. 2250.
- Machado, A. A., & Mulky, L. 2023. A comparative study of treatment methods of raw sugarcane bagasse for adsorption of oil and diesel. *Water, Air, & Soil Pollution*, Vol. 234(4), P. 213.
- Manyuchi, M. M., Mbohwa, C., & Muzenda, E. 2020. Bio char production from sugar cane bagasse and its application sugarcane processing wastewater treatment. In *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management* (pp. 2900-2906).
- Mortula, M. M., Fattah, K. P., Iqbal, F., & Khan, Z. 2023. Effects of adsorption and filtration processes on greywater microbiological contamination and the potential human health risk reduction. *Water Reuse*, Vol. 13(3), P. 329-344.
- Oteng-Peprah, M., Acheampong, M. A., & DeVries, N. K. 2018. Greywater characteristics, treatment systems, reuse strategies and user perception—a review. *Water, Air, & Soil Pollution*, Vol. 229 (8), P. 255.
- Oteng-Peprah, M., Obeng, P. A., Acheampong, M. A., & Anang, M. A. 2023. Fixed-bed column sorption kinetic rates on the removal of both biochemical oxygen demand (BOD<sub>5</sub>) and chemical oxygen demand (COD) in domestic greywater by using palm kernel activated carbon. *Water Practice and Technology*, Vol. 18(7), P. 1628-1638.
- Patel, P., Muteen, A., & Mondal, P. 2020. Treatment of greywater using waste biomass derived activated carbons and integrated sand column. *Science of the Total Environment*, Vol. 711, P. 134586.
- Prasad, K., Veluru, S. D., Rao, P. V., & Pamu, S. H. 2022. Biosorption of dyes onto low cost adsorbent in a fixed bed column. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 66, P. 1932-1937.
- Ramdzan, S. N., Mohamed, R. M. S. R., Kamaruzaman, N. H., Gheeti, A. A. S. A., Hamdan, R., & Musa, S. 2022. Pre-Treatment of Laundry Greywater by Steel Slag for Safe Disposal. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1022, No. 1, p. 012060). IOP Publishing.
- Vin, L. K., Mohd Ghazi, R., Nik Yusoff, N. R., & Jani, M. 2022. Response Surface Methodology Optimization of Chemical Oxygen Demand Removal by Rice Husk Activated Carbon. *Key Engineering Materials*, Vol. 908, P. 385-391.
- Yang L, Qian X, Wang Z, Li Y, Bai H, Li H. 2018. Steel slag as low-cost adsorbent for the removal of phenanthrene and naphthalene. *Adsorption Science & Technology*. Vol. 36 (3-4): P. 1160-1177.
- Zhu, Y., Tian, D., & Yan, F. 2020. Effectiveness of entropy weight method in decision-making. *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2020, P. 1-5.