



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۱۲ ■ شماره ۱ ■ بهار ۱۴۰۱

صفحه‌های ۶۹-۵۹

DOI: 10.22059/jwim.2022.333365.939

مقاله پژوهشی:

تأثیر گیاه نی بر حذف عناصر مس، سرب، روی و کادمیم در تالاب مصنوعی

هدی کهریزی^۱، سید ابراهیم هاشمی گرمدره^{۲*}، روزبه عباسی^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکده‌گان ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. استادیار، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکده‌گان ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۳. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه مک کوئری، سیدنی، استرالیا.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۰۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۱۲

چکیده

این مطالعه به بررسی تأثیر گیاه نی در تالاب‌های مصنوعی برای حذف عناصر مس، سرب، روی و کادمیم و مقادیر مختلف COD پرداخته است. به منظور بررسی پارامترهای مختلف مانند pH، غلظت اولیه COD (۱۲۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) و غلظت اولیه عناصر مس، سرب، روی و کادمیم (دو، ۱۰ و ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر) ستون‌هایی برای شبیه‌سازی تالاب‌های مصنوعی از لوله‌های P.V.C با قطر داخلی ۱۶ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر ساخته شد و نمونه پساب تزریق شده به ستون مطابق زمان ماند هیدرولیکی محاسبه شده (سه روز) از قسمت خروجی ستون جمع‌آوری و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد بیوماس ریشه گیاهان تالابی اثر مثبتی بر راندمان حذف آلاینده‌ها داشته است. نتایج ارزیابی pH نشان داد با افزایش غلظت عناصر روی، کادمیم، مس و سرب مقدار pH خروجی کاهش یافت. همچنین مطابق نتایج بیش‌ترین راندمان حذف COD (۱۷/۲۵ درصد) در غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر اتفاق افتاد. نتایج بررسی راندمان حذف آلاینده‌ها نشان داد با افزایش غلظت آلاینده از دو میلی‌گرم بر لیتر به ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر راندمان حذف افزایش یافت و پس از آن در غلظت ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافت. بیش‌ترین راندمان حذف در زمان ۹۰ دقیقه در غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر برای یون‌های مس، سرب، روی و کادمیم به ترتیب ۶۳/۸۴ درصد، ۶۰/۷۷ درصد، ۵۹/۱۴ درصد و ۵۷/۷۱ درصد بود. مطابق نتایج وجود گیاه نی و استفاده از سیستم تالاب‌های مصنوعی با بستر شنی تأثیر مثبتی بر راندمان حذف عناصر مس، سرب، روی و کادمیم نشان داد اما تأثیر زیادی در راندمان حذف COD نداشته است.

کلیدواژه‌ها: تالاب مصنوعی، تصفیه پساب، راندمان حذف، عناصر سنگین.

The Effect of Phragmites Australis on Removal of Copper, Lead, Zinc and Cadmium in Constructed Wetland

Hoda Kahrizi¹, Seyyed Ebrahim Hashemi Garmdareh^{2*}, Rouzbeh Abbasi³

1. Ph.D. Candidate, Department of irrigation and drainage engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

2. Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

3. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Macquarie University, Sydney, Australia.

Received: November 03, 2021

Accepted: March 27, 2022

Abstract

This study investigated the effect of Phragmites australis in constructed wetlands for removing copper, lead, zinc and cadmium and different concentrations of COD. In order to study various parameters such as pH, initial concentrations of COD (120, 500 and 1000 mg / l) and initial concentrations of copper, lead, zinc and cadmium (2, 10 and 30 mg / l). PVC pipes with an inner diameter of 16 cm and a height of 70 cm were made as columns to simulate the performance of constructed wetlands. For evaluating these parameters, Effluent wastewater samples were calculated according to the hydraulic retention time (Three days) from the outlet of the column. The results showed that the biomass of the roots of wetland plants had a positive effect on the removal efficiency. In addition, the results of pH evaluation showed that the amount of pH was decreased with increasing of zinc, cadmium, copper and lead's concentrations. Moreover, according to the results, the maximum COD removal efficiency (17.25 percent) was occurred in 500 mg/l. The results of pollutant removal efficiency showed that with increasing the concentration of pollutants from 2 mg/l to 10 mg/l, the removal efficiency was increased, then with increase of initial concentrations of heavy metals to 30 mg/l it was decreased. The highest removal efficiencies of copper, lead, zinc and cadmium ions in 90 minutes were 63.84, 60.77, 59.14 and 57.71 percent, respectively. According to the results, the presence of Phragmites australis and use of constructed wetland systems with sandy bed showed a positive effect on the removal efficiency of copper, lead, zinc and cadmium, but was not effective on COD removal efficiency.

Keywords: Constructed wetland, Trace element, Removal efficiency, Wastewater treatment.

مقدمه

آب‌های آشامیدنی آلوده، خدمات بهداشتی نامناسب، کمبود امکانات شست‌وشوی دست موجب مرگ ۸۰۰۰۰۰ نفر در سراسر جهان در سال ۲۰۱۲ شد (WWAP, 2017). ورود فاضلاب‌های تصفیه‌نشده به منابع آب موجب آسیب به حدود ۲۴۵۰۰۰ کیلومتر مربع از اکوسیستم‌های دریایی شده که شیلات و زنجیره غذایی را تحت تأثیر قرار داده است (UNESCO, 2017).^۱ اگرچه تولید حجم زیادی از فاضلاب به صورت روزانه موجب آسیب به محیط زیست می‌شود، با این حال این آلاینده حاوی مواد مغذی برای بخش کشاورزی است. کمبود مواد مغذی به صورت طبیعی و همچنین کمبود آب اهمیت شناسایی پساب‌ها را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داده است (Angelakis & Snyder, 2015). مواد مغذی‌ای مانند فسفر و نیتروژن به مقدار فراوان در فاضلاب یافت می‌شود (Abbassi et al., 2014; Egle et al., 2016) و می‌تواند بازیابی و به کود تبدیل شوند (Sengupta et al., 2018; Gunther et al., 2015).

فلزات سنگین اجزای اصلی تعداد زیادی از محصولات، صنایع دستی، فرایندهای صنعتی، فناوری‌های مدرن و بسیاری از مواد بیولوژیکی هستند (Dominguez-Benetton et al., 2016; Nancharaiah et al., 2018). با وجود ضرورت وجود فلزات سنگین در فعالیتهای مختلف، استخراج و استفاده بیش از حد از آنها موجب ایجاد آلودگی و آسیب به محیط زیست می‌شود (Watts, 2003). در میان انواع آلاینده‌ها فلزات سنگین خطرناک‌ترین آلاینده‌ها محسوب می‌شوند. فلزات سنگین گروهی از عناصر با چگالی بیش‌تر از ۴۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب هستند. فلزات سنگینی مانند سرب، کادمیم، کروم، کبالت، آرسنیک، روی، جیوه و نیکل عمده‌ترین آلاینده‌ها در فهرست آژانس حفاظت محیط زیست می‌باشند (Dominguez-Benetton et al., 2018).

آلودگی خاک‌ها به فلزات سنگین یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی است، زیرا فلزات ممکن است از طریق لایه‌های مختلف زیر سطحی به آب‌های زیرزمینی برسند (Galanis et al., 2009; Perfus-Barbeoch et al., 2002). آنها همچنین ممکن است وارد زنجیره غذایی شده و موجب ایجاد مشکلات زیستی در مصرف‌کنندگان شوند و می‌توانند به ترکیبات پایدار با خواص زنبیوتیک^۲ تبدیل شوند. برخی از فلزات سنگین مانند سرب، آرسنیک، جیوه، کروم، کادمیم و روی اثرات بدی را بر سلامت انسان حتی در غلظت‌های میکرو تا میلی‌گرم بر لیتر نشان می‌دهند (Wang & Ren, 2014; Wang et al., 2011). غلظت بالای فلزات سنگین به سیستم عصبی، هضم و سیستم ایمنی آسیب می‌رساند. همچنین موجب ایجاد بیماری‌های مزمن التهابی که زمینه ساز سرطان نیز هستند می‌شوند (Chowdhury et al., 2007; Richards et al., 1987).

به منظور رفع مشکلات سلامتی و زیست‌محیطی ناشی از فلزات سنگین، روش‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی، الکتروشیمیایی و بیولوژیکی جهت حذف این آلاینده‌ها وجود دارد. برای حذف این نوع آلاینده‌ها می‌توان به فناوری‌های تبادل یونی، نفوذ شیمیایی، الکترولیز، الکترودیالیز، فیلترهای غشایی، گیاه پالایی اشاره نمود (Pedersen et al., 2003; Fu & Wang, 2011). یکی از راه‌های ارزان و مقرون به صرفه به منظور حذف آلودگی ناشی از فلزات سنگین، استفاده از ریز موجودات و گیاهان می‌باشد. در این ارتباط تالاب‌های مصنوعی تکنولوژی کم‌هزینه‌ای برای تصفیه پساب‌ها می‌باشند (Yadav et al., 2012a). تالاب‌های مصنوعی به دلیل هزینه اجرای کم، عملکرد ساده و حذف کارآمد آلاینده‌های پساب، به عنوان فناوری تصفیه پساب مورد استفاده قرار می‌گیرند (Greenway, 2004; Jasper et al., 2014). تالاب‌های مصنوعی با استفاده از گیاهان تصفیه‌کننده آلاینده‌ها به عنوان منطقه حفاظت محیط

استفاده از گیاه *Cyperus Papyrus* به ترتیب ۸۵/۵، ۸۶/۲، ۸۳/۹ و ۹۲/۳ درصد بود.

Jia *et al.* (2020) به بررسی کاهش نیترات و حذف فلزات سنگین از آب‌های زیرزمینی در تالاب‌های مصنوعی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد راندمان کاهش نیترات ۸۷ درصد بود. هم‌چنین راندمان حذف عناصر کروم و سرب در محدوده ۹۷-۷۵ درصد بود. مطابق نتایج این پژوهش‌گران وجود فلزات سنگین اثر معکوسی در کاهش نیترات داشت و در حضور عناصر فلزی راندمان کاهش نیترات ۴۳-۱۹ درصد بود.

Yu *et al.* (2020) به بررسی حذف عناصر کادمیم و روی از تالاب‌های مصنوعی همراه با بقایای میکروارگانسیم‌ها و نمونه شاهد پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد راندمان حذف عناصر کادمیم و روی به ترتیب در محدوده ۹۹/۵۶-۸۱/۹۲ درصد و ۹۸/۷۹-۷۴/۰۵ درصد بود. مطابق نتایج بیش‌ترین راندمان حذف عناصر کادمیم (۹۹/۶۰ درصد) و روی (۹۴/۴۱ درصد) در نمونه تالاب‌های مصنوعی همراه با بقایای میکروارگانسیم‌ها مشاهده شد.

Chen *et al.* (2016) به بررسی حذف و انتقال سولفات در تالاب‌های مصنوعی پرداختند. نتایج نشان داد حضور گیاه *cattail* (*Typha latifolia*) تأثیر کمی در راندمان حذف سولفات داشت، درحالی‌که وجود منبع کربن موجب افزایش حذف آلاینده شد. هم‌چنین مطابق نتایج وجود باکتری کاهنده سولفات (*Desulfobacter*) و باکتری اکسیدکننده سولفات (*Thiobacillus*) در تالاب‌های مصنوعی موجب اکسیداسیون و کاهش سولفات شد.

با توجه به مطالب ذکرشده، تاکنون در زمینه حذف عناصر مس، سرب، کادمیم و روی در غلظت‌های مختلف آلاینده و COD در تالاب‌های مصنوعی پژوهشی صورت نگرفته است. بنابراین در پژوهش حاضر تأثیر گیاه نی بر راندمان حذف غلظت‌های مختلف عناصر مس، سرب،

زیست عمل کرده و می‌توانند به‌عنوان اکوسیستم‌های مصنوعی برای کنترل پساب‌های واردشده به رودخانه‌ها باشند (Baldwin & Mitchell, 2012; Wu *et al.*, 2013). در تالاب‌های مصنوعی جریان‌های زیرسطحی شرایط را برای اکسیداسیون و کاهش آلاینده‌ها فراهم می‌کنند. اگرچه مقدار کربن خارج‌شده از ریشه‌ها و کربن منتقل‌شده از طریق پساب برای کاهش و اکسیداسیون مقدار قابل‌توجهی از آلاینده‌ها کافی نیست (Stein *et al.*, 2007). بقایای گیاهی یکی از بزرگ‌ترین منابع تأمین کربن در تالاب‌ها هستند (۲۰۰۰-۵۰۰ گرم بر سانتی‌متر مربع در سال) (Hume *et al.*, 2002). بنابراین، بازیافت کربن موجود در بستر گیاه می‌تواند راهی کم‌هزینه و پایدار برای افزایش اکسیداسیون و کاهش آلاینده‌ها در تالاب‌های مصنوعی باشد. پژوهش‌های مختلفی در زمینه حذف آلاینده‌ها با استفاده از تالاب‌های مصنوعی انجام شده است. به‌عنوان مثال، Saeed *et al.* (2021) به بررسی حذف فلزات سنگین روی، کروم، نیکل و سرب از تالاب‌های مصنوعی با جریان زیرسطحی پرداختند. نتایج نشان داد راندمان حذف عناصر روی، کروم، نیکل و سرب در جریان عمودی به ترتیب در محدوده ۹۸-۷۵ درصد، ۴۱-۲۹ درصد، ۴۸-۱۴ درصد و ۲۶-۲۳ درصد بود. هم‌چنین راندمان حذف عناصر روی، کروم، نیکل و سرب در جریان افقی به ترتیب در محدوده ۹۷-۲۰ درصد، ۹۹-۹۵ درصد، ۷۳-۵۵ درصد و ۸۳-۶۹ درصد بود.

Hamad (2020) به بررسی گیاهان *Typha latifolia* and *Cyperus Papyrus* در حذف فلزات سنگین در تالاب‌های مصنوعی پرداخت. نتایج نشان داد راندمان حذف عناصر مس و روی با استفاده از تالاب‌های مصنوعی به ترتیب ۷۲ و ۸۴ درصد بود. هم‌چنین راندمان حذف COD، BOD، TSS و آمونیوم با استفاده از گیاه *Typha latifolia* به ترتیب ۶۸/۵، ۷۱، ۷۰ و ۸۲/۳ درصد بود و راندمان حذف COD، BOD، TSS و آمونیوم با

براساس مطالعات Wang *et al.* (2004) به منظور تحلیل عوامل مختلف به نمونه پساب گلوکز (۱۰۰۰-۱۲۰ میلی گرم بر لیتر) و عناصر روی، کادمیم، مس و سرب (۲-۳۰ میلی گرم بر لیتر)، $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 25 mg, NH_4Cl , 200 mg, $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, 45 mg, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 20 mg, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 30 mg, KNO_3 , 30 mg و ۱ میلی لیتر مخلوط عناصر ضروری (H_3BO_3 0.15 g L⁻¹, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.03 g L⁻¹, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 1.5 g L⁻¹, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.12 g L⁻¹, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.03 g L⁻¹ KI) اضافه شد (Wang *et al.*, 2004).

طراحی و ساخت تالاب‌های مصنوعی

راکتورهای ساخته شده برای شبیه سازی تالاب‌های مصنوعی از لوله‌های P.V.C با قطر داخلی ۱۶ سانتی متر و ارتفاع ۷۰ سانتی متر ساخته شدند (شکل ۱). انتهای ستون‌ها با استفاده از پوشش‌های مسدودکننده انتهایی مطابق قطر ستون پوشیده و با چسب‌های ضد آب بندی شده و شیر خروجی در محل انتهای ستون تعبیه شد. این سیستم شامل سه ستون حاوی گیاه نی و ذرات شن برای سه غلظت مختلف آلاینده و سه مقدار COD مورد استفاده قرار گرفت. داخل هر ستون دو عدد گیاه نی به ارتفاع ۱۰ سانتی متر همراه ریزوم کاشته شد (Di *et al.*, 2020). محفظه ستون از کف با یک لایه سنگ ریز به ارتفاع پنج سانتی متر (اندازه ذرات ۲۰-۱۰ میلی متر) و ۶۰ سانتی متر شن (اندازه ذرات ۵-۲ میلی متر)، پر شد.

تیمارها

تیمارهای اعمال شده شامل تیمار M1 (غلظت دو میلی گرم بر لیتر عناصر مس، سرب، کادمیم و روی و غلظت ۱۲۰ میلی گرم بر لیتر COD)، تیمار M2 (غلظت ۱۰ میلی گرم بر لیتر عناصر مس، سرب، کادمیم و روی و غلظت ۵۰۰ میلی-

کادمیم و روی و هم‌چنین غلظت‌های مختلف COD و تأثیر تیمارهای مختلف بر مقدار pH در تالاب‌های مصنوعی بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

موقعیت محل اجرای پژوهش

این پژوهش در محل گلخانه دانشکدگان ابوریحان دانشگاه تهران، واقع در شهرستان پاکدشت در جنوب شرقی تهران انجام شد. شهرستان پاکدشت یکی از مهم‌ترین مراکز کشت گلخانه‌ای استان تهران، واقع در دشت ورامین می‌باشد. پاکدشت مطابق طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن جزو مناطق خشک محسوب می‌شود که در آن میانگین بارندگی سالانه ۱۴۱ میلی‌متر، دمای متوسط سالانه ۱۵/۶ سانتی‌گراد و تبخیر-تعرق سالانه ۱۳۹۰ میلی‌متر است.

گونه گیاهی

گیاه انتخاب شده برای انجام آزمایش‌ها گیاه تالابی نی از راسته گندمسانان، تیره گندمیان، رده Phragmites و گونه *P. australis* با نام علمی *Phragmites australis* بود. این گیاه از محل سایت هواشناسی دانشکدگان ابوریحان دانشگاه تهران واقع در شهرستان پاکدشت جمع‌آوری و به محل گلخانه منتقل شد. در زمان جمع‌آوری تا انتهای آزمایش‌ها گیاه در مرحله سبز شدن قرار داشت. پس از جمع‌آوری ریشه‌های گیاه به منظور سازگاری با محیط آبی و کاهش استرس در محلول هورمون ریشه (Dynaroot) به مدت شش روز قرار داده شد و سپس به راکتورهای طراحی شده منتقل شد.

ترکیبات پساب

پساب استفاده شده در آزمایش‌ها از محل کانال موجود در دانشکدگان ابوریحان دانشگاه تهران جمع‌آوری شد.

بعد از گذشت ۱۵ روز جهت افزایش فعالیت میکروبها برای حذف آلاینده نمونه برداریها مطابق با زمان ماند هیدرولیکی^۴ محاسبه شده (سه روز) از قسمت خروجی رآکتور انجام شد. به منظور انتخاب زمان ماند مناسب، زمانهای ماند مختلف از یک روز تا یک هفته مورد بررسی قرار گرفت و راندمان حذف در زمانهای مختلف محاسبه شد. طبق بررسیهای صورت گرفته نتایج نشان داد که اختلاف راندمان در زمان سه روز اختلاف قابل قبولی با سایر راندمانها می باشد، لذا این زمان به عنوان زمان ماند در نظر گرفته شد. نمونههای جمع آوری در دمای کمتر از چهار درجه سانتی گراد نگهداری شد. آزمایشها در محیط گلخانه و در دمای ۱۸-۲۲ درجه سانتی گراد انجام شد. اندازه گیری عناصر روی، کادمیم، مس و سرب نیز با استفاده از دستگاه جذب اتمی (VARIAN, 220) در محل آزمایشگاه مرکزی دانشکدگان ابوریحان و مقدار غلظت ثانویه COD با استفاده از روشهای استاندارد اسپکتوفوتومتری انجام شد. مقدار pH نیز با استفاده از دستگاه pH متر (Az 86505) اندازه گیری شد.

تجزیه و تحلیل دادهها

راندمان حذف

متوسط غلظت های COD، روی، کادمیم، مس و سرب در مقابل زمان رسم شد و راندمان حذف با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد.

$$Removal\ efficiency = \frac{(C_{initial} - C_{final})}{C_{initial}} \times 100 \quad (1)$$

که در آن، $C_{initial}$ غلظت اولیه و C_{final} غلظت نهایی COD و عناصر روی، کادمیم، مس و سرب است.

نتایج و بحث

ویژگیهای فیزیکولوژیکی گیاه

ارتفاع گیاه و بیوماس ریشه

گیاهان تالابی موجب افزایش جمعیت باکتریها به میزان ۱۰ برابر و افزایش رشد اکزواکستروژن ها می شوند

گرم بر لیتر COD) و تیمار M3 (غلظت ۳۰ میلی گرم بر لیتر عناصر مس، سرب، کادمیم و روی و غلظت ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر COD) بودند.



Figure 1. Schematic column of artificial wetland

نحوه انجام آزمایش و نمونه گیریها

نمونه گیاه نی از محل سایت هواشناسی دانشکدگان ابوریحان دانشگاه تهران جمع آوری و به گلخانه انتقال داده شد. درون هر ستون دو نمونه از گیاه نی همراه با ریزوم قرار داده شد و پس از گذشت یک ماه جهت سازگاری گیاه با محیط، نمونه پساب از محل کانال دانشکدگان ابوریحان دانشگاه تهران جمع آوری و در ستونهای تالابهای مصنوعی تزریق شد. آزمایشها به صورت ناپیوسته و طی زمان ۱۸۰ روز از مردادماه تا دی ماه ۱۳۹۹ انجام شد. در طی این مدت غلظت های دو، ۱۰ و ۳۰ میلی گرم بر لیتر از عناصر روی، کادمیم، مس و سرب و همچنین غلظت های ۱۲۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر COD مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت تهیه غلظت های مختلف COD از نمک گلوکز استفاده شد. طی این مدت مقدار یک لیتر از پساب به همراه چهار و نیم لیتر آب آشامیدنی به همراه غلظت های مختلف آلاینده و COD و همچنین عناصر ضروری مورد نیاز گیاه پس از محلول سازی در pH برابر هفت ابتدا به صورت روزانه به ستونها اضافه می شد.

عملکرد تالاب‌های مصنوعی در تصفیه پساب

pH

pH پارامتر مهمی در بررسی فرایندهای میکروبی (Yadav et al., 2012; Oon et al., 2015; Gupta et al., 2019) و تعیین غالب بودن گروه‌های باکتریایی می‌باشد (O'Flaherty et al., 1998). مقدار pH ورودی و خروجی از ستون‌ها در غلظت‌های مختلف عناصر روی، کادمیم، مس و سرب در زمان‌های مختلف در شکل (۳) آمده است. مقدار pH جریان ورودی به ستون تالاب‌های مصنوعی ۷ بود و مقدار pH خروجی از آن در غلظت‌های دو، ۱۰ و ۳۰ میلی‌گرم برلیتر عناصر روی، کادمیم، مس و سرب به ترتیب بین ۶/۱۷-۷، ۶/۹۵-۵/۹۰ و ۵/۵۲-۶/۹۳ اندازه‌گیری شد. مطابق شکل (۲) با افزایش غلظت عناصر روی، کادمیم، مس و سرب مقدار pH کاهش یافت که احتمالاً به دلیل اسید چرب و پیرویک اسید ناشی از تجزیه بیولوژیکی آلاینده‌های آلی بود که منجر به کاهش pH می‌شود (Wang et al., 2017; Di et al., 2020; Gupta et al., 2021). هم‌چنین تجمع پروتون‌های تولیدشده طی فرایند تجزیه مواد آلی نیز منجر به کاهش مقدار pH می‌شود (Gupta et al., 2021).

راندمان حذف COD در تالاب‌های مصنوعی

راندمان حذف COD در غلظت‌های مختلف عناصر روی، کادمیم، مس و سرب در زمان‌های مختلف در شکل (۴) نشان داده شده است. مطابق نتایج راندمان حذف COD در تالاب‌های مصنوعی به دلیل اثر مثبت گیاهان تالابی در حذف مواد آلی بود (Oodally et al., 2019; Di et al., 2020).

(Wang et al., 2017). بنابراین با افزایش رشد گیاه، ترشحات ریشه‌ای که محصول فتوسنتز می‌باشد نیز افزایش می‌یابد. بنابراین مقدار مواد آلی در ناحیه پایینی ستون افزایش می‌یابد (Saz et al., 2018). همان‌گونه که در جدول (۱) نشان داده شده است ارتفاع گیاه نی بعد از آزمایش‌ها افزایش یافت. از طرفی افزایش غلظت عناصر روی، کادمیم، مس و سرب موجب زردشدن و کاهش رشد گیاهان شد. وجود ریشه‌های بلندتر در سیستم تالابی موجب افزایش دسترسی میکروارگانیسم‌ها به مواد آلی و افزایش باکتری‌ها شد که نتیجه آن افزایش حذف آلاینده‌ها بود (Saz et al., 2018). در بین سه ستون نمونه M1 (غلظت دو میلی‌گرم بر لیتر عناصر روی، کادمیم، مس و سرب و غلظت ۱۲۰ میلی‌گرم بر لیتر COD) بیش‌ترین رشد گیاه و بیوماس ریشه را داشت که دلیل آن مناسب بودن بستر کشت و کم بودن غلظت آلاینده‌ها بود. افزایش غلظت آلاینده‌ها و عناصر موجب آسیب‌دیدن ریشه‌های گیاه شد (Di et al., 2020). از روز ۱۱۰ به بعد بخشی از ریشه‌های گیاهان از بین رفت و رشد گیاهان کاهش یافت که این کاهش رشد در غلظت‌های بیش‌تر آلاینده‌ها محسوس‌تر بود، در حالی‌که در نمونه‌های M1 کاهش رشد گیاه قابل توجه نبود. مطابق نتایج به‌دست‌آمده می‌توان این‌گونه ارزیابی کرد که در نمونه با غلظت‌های کم‌تر، رشد گیاه بیش‌تر بود که نشان‌دهنده عدم سازگاری گیاه با غلظت‌های بالاتر آلاینده و آسیب‌دیدن بافت‌های گیاهی در غلظت‌های بالاتر بود.

Table 1. Physiological characteristics of the plant

Reactors	Species	Time	Treatment	Number of emerged shoots	Plant height (cm)	Stem and leaf height (cm)	Root biomass (g)
M ₁₋₂₋₁₂₀	P.australis	Beginning	0	9	25	15	27.46
		End	180	27	117	82	
M ₂₋₁₀₋₅₀₀	P.australis	Beginning	0	9	25	15	22.01
		End	180	31	106	71	
M ₃₋₃₀₋₁₀₀₀	P.australis	Beginning	0	9	25	15	19.32
		End	180	23	93	58	

تأثیر گیاه نی بر حذف عناصر مس، سرب، روی و کادمیم در تالاب مصنوعی

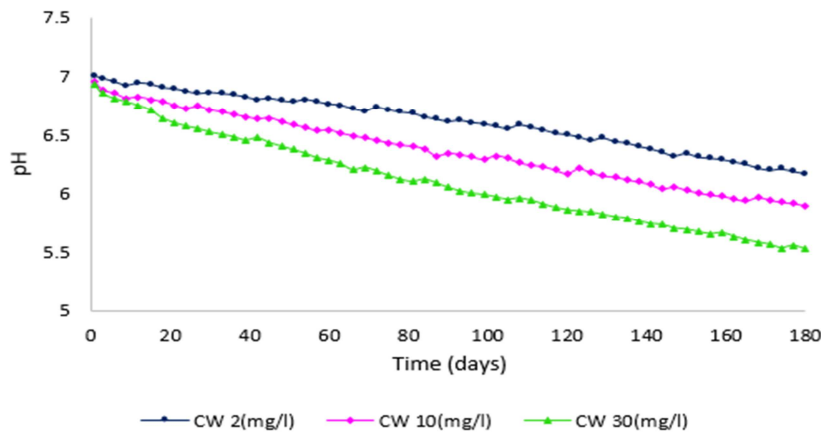


Figure 2. pH values at different concentrations of pollutants

راندمان حذف عناصر روی، کادمیم، مس و سرب در تالاب‌های مصنوعی

راندمان حذف عناصر روی، کادمیم، مس و سرب در شکل (۴) نشان داده شده است. مطابق شکل با افزایش غلظت آلاینده‌ها از دو به ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر راندمان حذف افزایش یافت (Oodally et al., 2019; Di et al., 2020) و پس از آن با افزایش بیش‌تر غلظت عناصر روی، کادمیم، مس و سرب تا ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر راندمان حذف کاهش یافت. در غلظت‌های بالای آلاینده به دلیل ایجاد سمیت، میکروارگانیسم‌ها قادر نخواهند بود به درستی فعالیت کنند و بنابراین سمیت زیاد مانع فعالیت میکروارگانیسم‌ها شده و موجب کاهش راندمان حذف آلاینده‌ها می‌شود. همچنین بیش‌ترین راندمان حذف آلاینده‌ها در بازه زمانی دوم (۶۰-۱۲۰ روز) اتفاق افتاد (Di et al., 2020; Gupta et al., 2021). حداکثر راندمان حذف در زمان ۹۰ دقیقه در غلظت‌های دو، ۱۰ و ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر برای یون مس به ترتیب ۶۰/۷۵ درصد، ۶۳/۸۴ درصد و ۵۸/۹۷ درصد، برای یون سرب به ترتیب ۵۷/۸۲ درصد، ۶۰/۷۷ درصد و ۵۵/۴۷ درصد، برای یون روی به ترتیب ۵۵/۴۸ درصد، ۵۹/۱۴ درصد، ۵۳/۴۶ درصد و برای یون کادمیم به ترتیب ۵۴/۸۲ درصد، ۵۷/۷۱ درصد و ۵۳/۴۷ درصد بود.

همچنین مطابق نتایج با افزایش غلظت گلوکز از ۱۲۰ تا ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر راندمان حذف COD از ۱۵/۹۰ درصد به ۱۷/۲۵ درصد رسید و پس از آن با افزایش غلظت گلوکز تا ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر راندمان تا ۱۳/۱۵ درصد رسید که روند کاهشی را نشان داد. در غلظت‌های COD کم‌تر از ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، میکروارگانیسم‌ها مقدار زیادی از مواد آلی را اکسید کرده و در نتیجه راندمان حذف بالا می‌رود، اما با افزایش بیش‌تر غلظت COD تا ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر تجمع مواد آلی و اسیدهای آلی مانع فعالیت‌های میکروارگانیسم‌ها شده و در نتیجه راندمان حذف کاهش می‌یابد. مطابق نتایج وجود تالاب‌های مصنوعی با فیلتر شنی تأثیر زیادی در راندمان حذف COD نداشته است (Gupta et al., 2021). همان‌گونه که در شکل (۳) نشان داده شده است راندمان حذف COD در بازه زمانی دوم (روزهای ۶۱-۱۲۰) < بازه زمانی اول (روزهای ۱-۶۰) < بازه زمانی سوم (روزهای ۱۸۰-۱۲۱) بود. علت کم‌ترین بودن راندمان حذف در بازه زمانی سوم احتمالاً به دلیل افزایش بیوماس ریشه، کاهش رشد گیاه، کاهش مواد آلی و کاهش فعالیت میکروبی در این دوره زمانی می‌باشد.

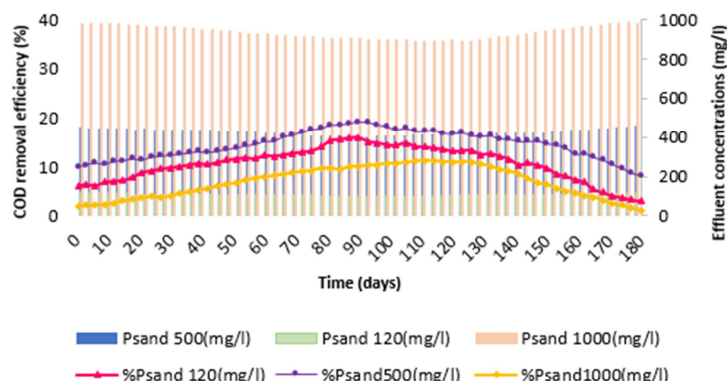


Figure 3. Performance of artificial wetlands in the removal of different concentrations of COD

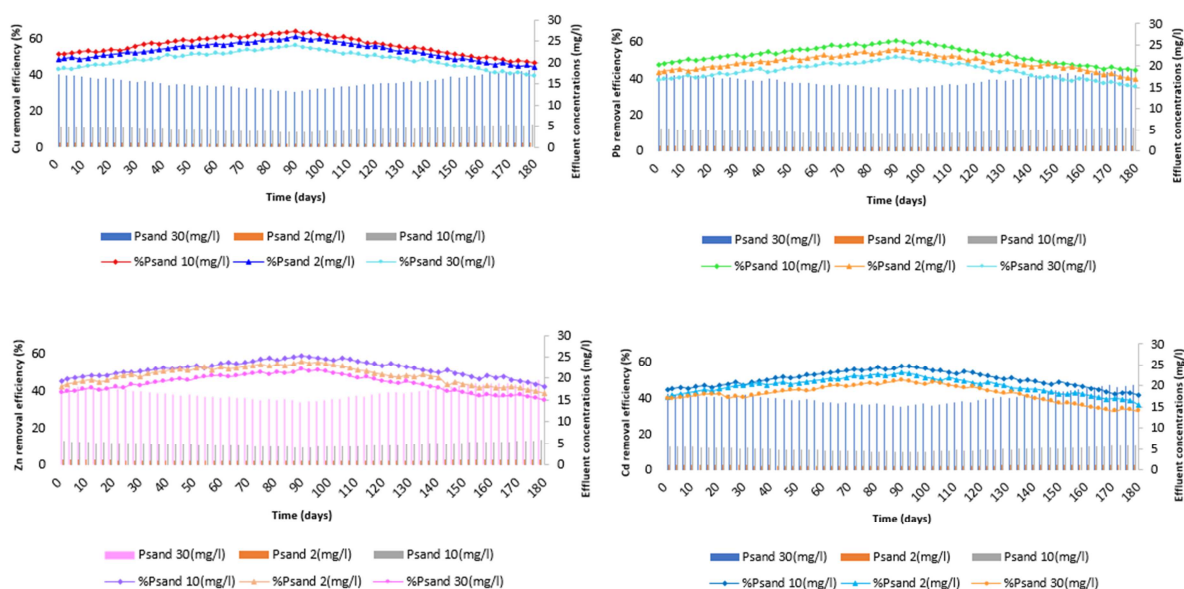


Figure 4. Performance of artificial wetlands in removing different concentrations of copper, lead, cadmium and zinc

گیاهان تالابی موجب افزایش جمعیت باکتری‌ها، افزایش رشد اکزواکستروژن‌ها، افزایش رشد گیاه، افزایش ترشحات ریشه‌ای و در نتیجه افزایش مواد آلی در ناحیه پایینی ستون شد. بنابراین دسترسی میکروارگانیسم‌ها به مواد آلی و افزایش باکتری‌ها موجب افزایش حذف آلاینده‌ها شد. بیش‌ترین راندمان حذف COD (۱۷/۲۵ درصد) در غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر اتفاق افتاد. هم‌چنین بیش‌ترین راندمان حذف عناصر مس (۶۳/۸۴)

مطابق نتایج راندمان حذف مس < راندمان حذف سرب < راندمان حذف روی < راندمان حذف کادمیم بود (Kabutay et al., 2019).

نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی تأثیر وجود گیاه نی در تالاب‌های مصنوعی در حذف عناصر مس، سرب، روی و کادمیم و حذف مقادیر مختلف COD پرداخته است. مطابق نتایج

2. Angelakis, A.N., & Snyder, S.A. (2015). Wastewater treatment and reuse: past, present and future. *Water*, 7, 4887-4895.
3. Baldwin, D.S., & Mitchell, A. (2012). Impact of sulfate pollution on anaerobic biogeochemical cycles in a wetland sediment. *Water Res*, 46, 965-974.
4. Chen, Y., Wen, Y., Zhou, Q., Huang, J., Vymazal, J., & Kuschik, P. (2016). Sulfate removal and sulfur transformation in constructed wetlands: The roles of filling material and plant biomass. *Journal of Water Research*, 102, 572-581.
5. Chowdhury, B.A., Friel, J.K., & Chandra, R.K. (1987). Cadmium-induced immunopathology is prevented by zinc administration in mice. *J. Nutr*, 117, 1788-1794.
6. Colmer, T.D. (2003). Long-distance transport of gases in plants: a perspective on internal aeration and radial oxygen loss from roots. *Plant Cell Environ*, 26, 17-36.
7. Di, L., Li, Y., Nie, L., Wang, S., & Kong, F. (2020). Influence of plant radial oxygen loss in constructed wetland combined with microbial fuel cell on nitrobenzene removal from aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*, 394, 122542.
8. Dominguez-Benetton, X. (2018). Metal recovery by microbial electro-metallurgy. *Prog. Mater. Sci.*, 94, 435-461.
9. Egle, L., Rechberger, Krampe, J., & Zessner, M. (2016). Phosphorus recovery from municipal wastewater: an integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies. *Sci. Total Environ*, 571, 522-542.
10. Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. *J. Environ. Manage*, 92, 407-418.
11. Gagnon, V., Chazarenc, F., Comeau, Y., & Brisson, J. (2007). Influence of macrophyte species on microbial density and activity in constructed wetlands, *Water Sci. Technol*, 56, 249-254.
12. Galanis, A., Karapetsas, A., & Sandaltzopoulos, R. (2009). Metal-induced carcinogenesis, oxidative stress and hypoxia signaling. *Mutat. Res./Genet. Toxicol., Environ. Mutagen*, 674, 31-35.
13. Greenway, M. (2004). The role of constructed wetlands in secondary effluent treatment and water reuse in subtropical and and Australia. In: *87th Canadian Chemistry Conference and Exhibition, London, Canada*, 501-509.

درصد)، سرب (۶۰/۷۷ درصد)، روی (۵۹/۱۴ درصد) و کادمیم (۵۷/۷۱ درصد) در غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر اتفاق افتاد. طبق نتایج این پژوهش، با توجه به مزایایی از قبیل حذف فلزات سنگین و هم‌چنین COD، حذف قابل‌توجهی از بار آلی و هزینه اجرایی کم، استفاده از تالاب‌های مصنوعی در مقیاس بزرگ پس از انجام مطالعات تکمیلی و برآورد اقتصادی جهت تصفیه فاضلاب توصیه می‌شود. استفاده از سیستم تالاب‌های مصنوعی با کمک میکروبیوم‌های موجود در فاضلاب موجب حذف، اکسیداسیون و انتقال مقدار قابل توجهی از فلزات سنگین از جمله مس، سرب، روی و کادمیم و هم‌چنین حذف COD می‌شود. از این‌رو، بهبود مداوم تالاب‌های مصنوعی و مطالعات گسترده در این زمینه، افزایش راندمان حذف آلاینده‌ها و کاهش هزینه‌های مرتبط با حذف آلاینده‌ها را در پی خواهد داشت.

با این حال مشکلات و محدودیت‌هایی نیز در این زمینه وجود دارد که نیازمند پژوهش‌های منحصربه‌فردتر و در مقیاس کاربردی وسیع‌تر است.

پی‌نوشت‌ها

1. United Nations World Water Assessment Programm
2. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
3. Xenobiotics
4. Hydraulic Retention Time (HRT)

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

1. Abbassi, R., Yadav, A.K., Huang, S., & Jaffe, P.R.. (2014). Laboratory study of nitrification, denitrification and anammox processes in membrane bioreactors considering periodic aeration. *J. Environ. Manage*, 142, 5-59.

14. Gunther, S., Grunert, M., & Muller, S. (2018). Overview of the recent advances in phosphorus recovery for fertilizer production. *Eng. Life Sci.*, 18, 434-439.
15. Gupta, S., Nayak, A., Roy, Ch., & Yadav, A.K. (2021). An algal assisted constructed wetland-microbial fuel cell integrated with sand filter for efficient wastewater treatment and electricity production. *Journal of Chemosphere*, 263, 128-132.
16. Gupta, S., Srivastava, P., & Yadav, A.K. (2019). Simultaneous removal of organic matters and nutrients from high-strength wastewater in constructed wetlands followed by entrapped algal systems. *Environ. Sci. Pollut. Res*, 27, 1112-1117.
17. Hamad, M. (2020). Comparative study on the performance of *Typha latifolia* and *Cyperus Papyrus* on the removal of heavy metals and enteric bacteria from wastewater by surface constructed wetlands. *Journal of Chemosphere*, 260, 127551.
18. Hume, N.P., Fleming, M.S., & Horne, A.J. (2002). Denitrification potential and carbon quality of four aquatic plants in wetland microcosms. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66, 1706-1712.
19. Jasper, J.T., Jones, Z.L., Sharp, J.O., & Sedlak, D.L. (2014). Biotransformation of trace organic contaminants in open-water unit process treatment wetlands. *Environ. Sci. Technol.*, 48, 5136-5144.
20. Jia, L., Liu, H., Kong, Q., Li, M., Wu, Sh., & Wu, H. (2020). Interactions of high-rate nitrate reduction and heavy metal mitigation in iron-carbon-based constructed wetlands for purifying contaminated groundwater. *Journal of Water Research*, 115285.
21. Kabutey, F.T., Antwi, Ph., Ding, J., Zhao, Q., & Quashie, F.K. (2019). Enhanced bioremediation of heavy metals and bioelectricity generation in a macrophyte-integrated cathode sediment microbial fuel cell (mSMFC). *Journal of Environmental Science and Pollution Research*, 26, 26829-26843.
22. McDonald, M.P., Galwey, N.W., & Colmer, T.D. (2002). Similarity and diversity in adventitious root anatomy as related to root aeration among a range of wetland and dryland grass species. *Plant Cell Environ*, 25, 441-451.
23. Nancharaiah, Y.V., Mohan, S.V., & Lens, P.N.L. (2016). Biological and bioelectrochemical recovery of critical and scarce metals. *Trends Biotechnol*, 34, 137-155.
24. O'Flaherty, V., Mahony, T., O'Kennedy, R., & Colleran, E. (1998). Effect of pH on growth kinetics and sulphide toxicity thresholds of a range of methanogenic, syntrophic and sulphate-reducing bacteria. *Process Biochem*, 33, 555-569.
25. Oodally, A., Gulamhussein, M., & Randall, D.G. (2019). Investigating the performance of constructed wetland microbial fuel cells using three indigenous South African wetland plants. *J. Water Process Eng*, 32, 100930.
26. Oon, Y.L., Ong, S.A., Ho, L.N., Wong, Y.S., Oon, Y.-S., Lehl, H.K., & Thung, W.E. (2015). Hybrid system up-flow constructed wetland integrated with microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and electricity generation. *Bioresour. Technol.*, 186, 270-275.
27. Pedersen, A.J., Ottosen, L.M., & Villumsen, A. (2003). Electrodialytic removal of heavy metals from different fly ashes influence of heavy metal speciation in the ashes. *J. Hazard. Mater.*, 100, 65.
28. Perfus-Barbeoch, L., Leonhardt, N., Vavasseur, A., & Forestier, C. (2002). Heavy metal toxicity: cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status. *Plant J.*, 32, 539-548.
29. Richards, A., et al. (2007). C-terminal truncations in human 3'-5' DNA exonuclease TREX1 cause autosomal dominant retinal vasculopathy with cerebral leukodystrophy. *Nat. Genet.*, 39, 1068-1070.
30. Saeed, T., Alam, K., Miah, J., & Majed, N. (2021). Removal of heavy metals in subsurface flow constructed wetlands: Application of effluent recirculation. *Journal of Environmental and Sustainability Indicators*, 12, 100146.
31. Saz, C., Ture, C., Turker, O.C., & Yakar, A. (2018). Effect of vegetation type on treatment performance and bioelectric production of constructed wetland modules combined with microbial fuel cell (CW-MFC) treating synthetic wastewater. *Environ. Sci. Pollut. Res. - Int.*, 25, 8777-8792.
32. Sengupta, S., Nawaz, T., & Beaudry, J. (2015). Nitrogen and phosphorus recovery from wastewater. *Curr. Pollut. Rep.*, 1 (3), 155-166.
33. Smith, K., Liu, S., Hu, H.Y., Dong, X., Wen, X. (2018). Water and energy recovery: the future of wastewater in China. *Sci. Total Environ.* 637_638, 1466_1470.
34. Stein, O.R., Borden-Stewart, D.J., Hook, P.B., & Jones, W.L. (2007). Seasonal influence on sulfate reduction and zinc sequestration in subsurface treatment wetlands. *Water Res.*, 41, 3440-3448.

35. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (2017). Wastewater: The Untapped Resource. Paris, France.
36. Wang, H., & Ren, Z.J. (2014). Bioelectrochemical metal recovery from wastewater: a review. *Water Res.*, 66, 219-232.
37. Wang, J.F., Song, X.S., Wang, Y.H., Bai, H., Bai, J.H., Yan, D.M., Cao, Y., Li, Y.H., Yu, Z.L., & Dong, G.Q. (2017). Bioelectricity generation, contaminant removal and bacterial community distribution as affected by substrate material size and aquatic macrophyte in constructed wetland-microbial fuel cell. *Bioresour. Technol.*, 245, 372-378.
38. Wang, Q., Du, G., & Chen, J. (2004). Aerobic granular sludge cultivated under the selective pressure as a driving force. *Process Biochem.*, 39, 557-563.
39. Wang, Z., Lim, B., & Choi, C. (2011). Bioresource technology removal of Hg²⁺ as an electron acceptor coupled with power generation using a microbial fuel cell. *Bioresour. Technol.*, 102, 6304-6307.
40. Watts, J. (2003). Concern over mercury pollution in India. *Sci. Direct*, 362.
41. Wu, S.B., Kuschik, P., Wiessner, A., Muller, J., Saad, R.A.B., & Dong, R.J. (2013). Sulphur transformations in constructed wetlands for wastewater treatment: a review. *Ecol. Eng.*, 52, 278-289.
42. Yadav, A.K., Dash, P., Mohanty, A., Abbassi, R., & Mishra, B.K. (2012). Performance assessment of innovative constructed wetland-microbial fuel cell for electricity production and dye removal. *Ecol. Eng.*, 47, 126-131.
43. Yu, G., Wang, G., Li, J., Chi, T., Wang, Sh., Peng, H., Chen, H., Du, Ch., Jiang, Ch., Liu, Y., Zhou, L., & Wu, H. (2020). Enhanced Cd²⁺ and Zn²⁺ removal from heavy metal wastewater in constructed wetlands with resistant microorganisms. *Journal of Bioresource Technology*, 316, 123898.