Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Water and Soil Conservation

Print ISSN: 2322-2069
Online ISSN: 2322-2794

Evaluation of the effect of using artificial wetlands in domestic wastewater treatment

Ali Shahnazari[*1], Raheb Mahfoouzi[2], Jalal-Adin Moradi[3], Rassol Nouri-Khajebelagh[4], Zahra Bagheri Khalili[5], Mojtaba Khoshravesh[6], Mohammad Ali Gholami Sefidkouhi[7], Abdullah Darzi-Naftchali[8]

1. Corresponding Author, Professor, Dept. of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. Email: aliponh@yahoo.com
2. Ph.D. Student in Irrigation and Drainage, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: raheb.mah@gmail.com
3. Ph.D. Student in Irrigation and Drainage, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: jal_moradi@yahoo.com
4. Ph.D. Student in Irrigation and Drainage, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: rassolrahaii@yahoo.com
5. Ph.D. Student in Irrigation and Drainage, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: zahrabagheri587@gmail.com
6. Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: m.khoshravesh@sanru.ac.ir
7. Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: ma.gholami@sanru.ac.ir
8. Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: adarzi@sanru.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 05.21.2023
Revised: 11.14.2023
Accepted: 12.08.2023

Keywords:
Artificial filter,
Plant filter,
Septic,
Turbidity

ABSTRACT

Background and Objectives: The increase in the human population and the growth in water consumption on one hand, and the rise in sewage production on the other hand, have led to the expansion of environmental pollution threats. The objectives of the present study include launching a pilot project for the localization of knowledge in the design of artificial wetlands in accordance with the quantitative and qualitative conditions of domestic sewage in Iran (specifically, the dormitory of the University of Agricultural Sciences and Natural Resources in Sari) and investigating the possibility of replacing wetland systems with conventional domestic sewage treatment systems in the country.

Materials and Methods: This study was conducted at the University of Agricultural Sciences and Natural Resources in Sari, involving the construction of six artificial wetlands, each with a length of 3 meters, width of 2 meters, and a height of 1.5 meters, using reinforced concrete. One of the ponds was excluded from the system due to leakage. Inside the ponds, artificial filters at different depths (1 meter: d1 and 1 meter and 30 centimeters: d2) and plant filters (Phragmites australis: p1 and Arundo donax: p2) were filled and planted. D10 and the coefficient of unifo rmity (CU) of the substrate materials were obtained as 2 millimeters and 3.625, respectively, from the grain size analysis. The hydraulic conductivity and porosity of the substrate were 2.523 cm/s and 39.2%, respectively. The specific surface area (SSA) of the substrate materials was calculated as 1.336 m^2/kg (2245 m^2/m^3 of substrate materials). The effluent from the septic tank of the dormitory's baffled septic tank was injected onto the beds after a settling and dilution stage using a pump. In the initial loading, the beds were submerged below the surface, and a three-day retention time was

allowed for the first sampling. Quality parameters of the wastewater, including biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), total suspended solids (TSS), fecal coliform (FC), and total coliform (TC), were monitored to assess the performance of the treatment system.

Results: Although the injected wastewater was diluted up to 25%, a significant removal efficiency of 51 to 55, 41 to 79, 74 to 89, 70 to 95.3, and 78 to 95 percent was achieved for BOD, COD, TSS, FC, and TC, respectively, in different treatments. Among the treatments, the weakest performance was associated with treatment P1D2, while the best purification performance was observed in treatment P2D1. This indicates the dominance of the physical characteristics of the systems at the beginning of the startup period on the purification performance. However, the initial performance of the treatment system was very promising and the removal of some parameters such as TSS and FC was at the average level of a full-fledged wetland treatment system.

Conclusion: This wastewater treatment technology is recommended for all managers and experts in the country's wastewater industry, especially in rural areas with inexpensive land and a population of fewer than 5000 people. These conditions encompass all towns, universities, military barracks, and military facilities as well.

Cite this article: Shahnazari, Ali, Mahfoouzi, Raheb, Moradi, Jalal-Adin, Nouri-Khajebelagh, Rassol, Bagheri Khalili, Zahra, Khoshravesh, Mojtaba, Gholami Sefidkouhi, Mohammad Ali, Darzi-Naftchali, Abdullah. 2024. Evaluation of the effect of using artificial wetlands in domestic wastewater treatment. *Journal of Water and Soil Conservation*, 30 (4), 57-79.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/jwsc.2024.21377.3650
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۶۹
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۹٤

ارزیابی تأثیر استفاده از تالاب‌های مصنوعی در تصفیه فاضلاب خانگی

علی شاهنظری*[۱]، راهب ماهفروزی[۲]، جلال‌الدین مرادی[۳]، رسول نوری خواجه‌بلاغ[٤]، زهرا باقری خلیلی[٥]، مجتبی خوش‌روش[٦]، محمدعلی غلامی سفیدکوهی[۷]، عبدالله درزی نفت‌چالی[۸]

۱. نویسنده مسئول، استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: aliponh@yahoo.com
۲. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: raheb.mah@gmail.com
۳. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: jal_moradi@yahoo.com
٤. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: rassolrahaii@yahoo.com
٥. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: zahrabagheri587@gmail.com
٦. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: m.khoshravesh@sanru.ac.ir
۷. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: ma.gholami@sanru.ac.ir
۸. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: adarzi@sanru.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۰۲/۰۲/۳۱
تاریخ ویرایش: ۰۲/۰۸/۲۳
تاریخ پذیرش: ۰۲/۰۹/۱۷

واژه‌های کلیدی:
سپتیک،
فیلتر گیاهی،
فیلتر مصنوعی،
کدورت

چکیده

سابقه و هدف: افزایش جمعیت بشری و رشد مصرف آب از یک‌سو و افزایش تولید فاضلاب از سوی دیگر موجب گسترش تهدید آلودگی محیط‌زیست گردیده است. اهداف مطالعه حاضر راه‌اندازی پایلوت برای بومی‌سازی دانش طراحی تالاب مصنوعی مطابق با وضعیت کمی و کیفی فاضلاب خانگی در ایران (خوابگاه دانشجویی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری) و بررسی امکان جایگزینی سامانه‌های تالابی به‌جای سامانه‌های مرسوم تصفیه فاضلاب خانگی در کشور بود.

مواد و روش‌ها: این مطالعه در محل دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری با احداث شش تالاب مصنوعی به طول ۳ متر، عرض ۲ متر و ارتفاع ۱/۵ متر با استفاده از بتن مسلح انجام شد که یکی از استخرها به دلیل نشت از مدار خارج گردید. داخل استخرها با استفاده از فیلترهای مصنوعی در عمق‌های مختلف (یک متر: d1 و یک متر و سی سانتی‌متر: d2) و فیلتر گیاهی (نی معمولی: p1 و نی قمیش: p2) پر و کشت شدند. D10 و ضریب یکنواختی (CU) مصالح بستر به ترتیب ۲ میلی‌متر و ۳/٦۲۵ از آزمایش دانه‌بندی، و هدایت هیدرولیکی بستر و تخلخل آن نیز به ترتیب ۲/۵۲۳ سانتی‌متر بر ثانیه و ۳۹/۲ درصد به دست آمد. SSA مصالح بستر ۱/۳۳٦ مترمربع در هر کیلوگرم (۲۲٤۵ مترمربع در هر مترمکعب مصالح بستر) محاسبه شد. فاضلاب خروجی مخزن سپتیکِ بافلد خوابگاه پس از یک مرحله ته‌نشینی و رقیق‌سازی

به‌وسیله پمپ روی بسترها تزریق شد. در اولین بارگذاری، بسترها تا زیر سطح غرقاب شده و زمان ماند سه روز را برای اولین نمونه‌برداری طی نمودند. پارامترهای کیفیت فاضلاب شامل اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی (BOD)، اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD)، ذرات جامد معلق (TSS)، کلیفرم مدفوعی FC و مجموع کلیفرم مدفوعی TC برای بررسی عملکرد تصفیه سامانه مورد پایش قرار گرفتند.

یافته‌ها: گرچه فاضلاب تزریقی تا ۲۵٪ رقیق‌شده بود، اما عملکرد حذف قابل‌توجه ۵۱ تا ۵۵، ٤١ تا ۷۹، ۷٤ تا ۸۹، ۷۰ تا ۹۵/۳ و ۷۸ تا ۹۵ درصد به ترتیب برای BOD، COD، TSS، FC و TC در تیمارهای مختلف به دست آمد. در بین تیمارها، ضعیف‌ترین عملکرد مربوط به تیمار P1D2 و بهترین عملکرد تصفیه هم در تیمار P2D1 مشاهده شد که نشان‌دهنده غلبه خصوصیات فیزیکی سامانه‌ها در ابتدای دوره راه‌اندازی بر عملکرد تصفیه است. بااین‌حال، عملکرد اولیه تصفیه سامانه، بسیار امیدوارکننده بوده و حذف برخی پارامترها مانند TSS و FC در حد متوسط یک سامانه تصفیه تالابی تمام‌عیار بود.

نتیجه‌گیری: این فناوری تصفیه فاضلاب، به همه مدیران و متخصصان صنعت فاضلاب کشور توصیه می‌شود، به‌خصوص در بخش روستایی که دارای زمین ارزان و جمعیت کم‌تر از ۵۰۰۰ نفر هستند. این شرایط شامل همه شهرک‌ها، دانشگاه‌ها، پادگان‌ها و مراکز نظامی نیز می‌گردد.

استناد: شاهنظری، علی، ماهفروزی، راهب، مرادی، جلال‌الدین، نوری خواجه‌بلاغ، رسول، باقری خلیلی، زهرا، خوش‌روش، مجتبی، غلامی سفیدکوهی، محمدعلی، درزی نفت‌چالی، عبدالله (۱۴۰۲). ارزیابی تأثیر استفاده از تالاب‌های مصنوعی در تصفیه فاضلاب خانگی. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳۰ (۴)، ۷۹-۵۷.
DOI: 10.22069/jwsc.2024.21377.3650

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

افزایش جمعیت بشری و رشد مصرف آب از یک‌سو و افزایش تولید فاضلاب از سوی دیگر موجب گسترش تهدید آلودگی محیط‌زیست گردیده است. امروزه استفاده از فاضلاب شهری برای کشاورزی در جهان رو به افزایش است. استفاده از فاضلاب‌های تصفیه‌شده در کشاورزی مزایای فراوانی دارد که می‌توان به کاهش فشار بر منابع آب، کاهش هزینه آب کشاورزی، کاهش هزینه کود، افزایش محصولات و کاهش بار آلودگی وارده به محیط‌زیست اشاره نمود (۱). گزارش‌ها در سال ۲۰۱۰ نشان داد که حدود ۲۰ میلیون هکتار زمین کشاورزی در سراسر جهان توسط فاضلاب تصفیه‌شده و تصفیه‌نشده آبیاری گردیده و در آینده‌ای نزدیک استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده در کشاورزی به‌دلیل کمبود منابع آب شیرین، یک اولویت خواهد بود (۲). بااین‌حال اگر برنامه‌ریزی، مدیریت و اجرای صحیح در این مورد وجود نداشته باشد، استفاده از فاضلاب با خطراتی مانند مخاطرات بهداشت عمومی (آلودگی میکروبی و شیمیایی)، آلودگی محصولات کشاورزی و آلودگی زیست‌محیطی مواجه می‌شود (۳، ٤). فناوری تصفیه تالابی به‌عنوان یکی از راهکارهای نوین و کارآمد می‌تواند در زمینه تصفیه فاضلاب مورداستفاده قرار گیرد، این تالاب‌ها، تالاب‌های مصنوعی مهندسی‌شده‌ای هستند که برای بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه‌کننده موجود در محیط‌های طبیعی با هدف تصفیه فاضلاب طراحی شده‌اند. بنابراین این فناوری‌ها سازگار با محیط‌زیست، دوستدار طبیعت و پایدار برای تصفیه فاضلاب در نظر گرفته می‌شوند (۵).

امیدیان و شایان‌نژاد (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای به بررسی تصفیه تکمیلی پساب تصفیه‌خانه فاضلاب فولادشهر در استان اصفهان با استفاده از تالاب‌های مصنوعی مقیاس پایلوت با جریان افقی (HFCW) و جریان افقی- عمودی (H-VFCW) پرداختند. عملکرد دو بستر پوکه و سنگریزه و تأثیر استفاده از گیاه نی (*Phragmites australis*) بر حذف مواد جامد معلق کل (TSS)، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی (BOD_5)، اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD) و پارامترهای میکروبی مقایسه شد. نتایج نشان داد که راندمان بهینه حذف در HFCW کاشته‌شده با بستر شن رخ داد است درحالی‌که هزینه کم‌تری نسبت به HVFCW نیاز دارد (٦).

درویش متولی و همکاران (۲۰۱۹) از گیاهان خس‌خس (*Chrysopogon zizanioides*) و کاه بومی قزوین (*Carex vulpinoidea*) به‌منظور بررسی حذف پارامترهای میکروبی شامل کلیفرم کل[1] (TC)، کلیفرم گوارشی[2] (FC)، تخم انگل و حذف کیست تک‌یاخته توسط سامانه ترکیبی مخزن ایمهوف و سیستم تالاب مصنوعی (CW) استفاده نمودند. این مطالعه تجربی در مدت ٦ ماه انجام شد. تعداد ١٤٤ نمونه از پساب خام، پساب مخزن ترکیبی ایمهوف و سیستم‌های CW جمع‌آوری شد. p-value برای همه میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا حذف‌شده توسط سیستم ترکیبی تالاب و مخزن ایمهوف از نظر آماری معنی‌دار بود. این‌طور نتیجه‌گیری شد که سیستم ترکیبی در حذف کیست‌ها و تخم‌های انگل مؤثر است. بااین‌حال، استفاده از واحد ضدعفونی برای دستیابی به استانداردهای خروجی کلیفرم کل و کلیفرم گوارشی ضروری خواهد بود (۷).

نظرپور و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی تأثیر گیاه نخل مرداب را بر حذف نیترات از آب‌های آلوده شهری بررسی کردند. در این پژوهش سه سامانه به‌صورت کشت در خاک، سه سامانه به‌صورت کشت گیاه روی صفحات شناور و سه سامانه دیگر بدون

1- Total Coliforms (TC)
2- Fecal Coliforms (FC)

گیاه به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شد. زمان‌های ماند انتخاب‌شده ۱، ۳ و ۵ روز بود. نتایج نشان داد سامانه کشت در خاک دارای قابلیت بیش‌تری در حذف نیترات است. حذف نیترات در ۵ روز زمان ماند به‌ترتیب در سامانه‌های حاوی گیاه (کشت در خاک و شناور) و بستر شاهد (بدون گیاه) به ترتیب ۱۷/۷۵، ۱۷/٦٦ و ۱٦/۰۸ درصد گزارش شد (۸).

قلی‌پور و استفاناکیس (۲۰۲۱) تأثیر مجموعه‌ای از گیاهان محلی (*Arundo donax*، *Cortaderia selloana*، *Phragmites australis*) را در کاهش بار آلودگی فاضلاب در یک تالاب مصنوعی در مقیاس واقعی بررسی کردند. این سیستم شامل یک راکتور بافل بی‌هوازی، یک تالاب با جریان عمودی و یک تالاب جریان زیرسطحی افقی، هر دو دارای مساحت ۲/۵ مترمربع بود. هم‌چنین در این پژوهش، فاضلاب دریافتی در روز توسط تالاب مصنوعی حجم ۲۰ مترمکعب و نرخ بارگیری ۵ سانتی‌متر در روز داشت. نتایج نشان داد سیستم برای بهبود کیفیت فاضلاب مؤثر است و به ترتیب ۸۸/۹٪، ۸٦/۰٪، ۹۲/۲٪، ۶۳/۵٪، ٦٦/۵٪ و ٦۵/۷٪ از BOD_5، COD، TSS، PO_4-P، NH_4^+N و NO_3-N را حذف کرده است. پساب خروجی از سامانه تصفیه نیز با استاندارد استفاده مجدد مطابقت داشت. این مطالعه نشان داد که سامانه تصفیه تالابی ترکیبی را می‌توان به‌طور مؤثر در آب‌وهوای گرم و خشک و با استفاده از گونه‌های گیاهی بومی اجرا نمود. این کار ازنظر فنی امکان‌پذیر، مقرون به‌صرفه‌تر و دارای پایداری بیش‌تر در تصفیه فاضلاب است (۹).

قلی‌پور و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی از گیاه پامپاس نقره‌ای در یک سیستم تالاب مصنوعی جریان زیرسطحی افقی (HFCW) برای تصفیه فاضلاب یک واحد صنعتی شیشه‌سازی در ایران استفاده کردند. به‌منظور از بین بردن ریسک روش تصفیه، یک سیستم آزمایشی متشکل از یک مخزن ته‌نشینی و یک HFCW ابتدا به مدت ٤ ماه مورد آزمون قرار گرفت. سپس از نتایج مطالعه آزمایشی برای ساخت سامانه تصفیه تالابی در مقیاس کامل با ظرفیت تصفیه ۱۰ مترمکعب در روز استفاده شد. به‌طورکلی، سامانه طراحی‌شده برای رسیدن به نرخ بالای حذف BOD_5، COD و TSS (به ترتیب ۹۰، ۹۰، و ۹۹ درصد) و هم‌چنین برای نیتروژن کل (TN) و فسفر کل[1] (TP) (بیش از ۹۰ درصد) بسیار مؤثر بود. راندمان بالای سیستم آزمایش‌شده امکان بازیافت و استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده در فرآیندهای تولید شیشه را فراهم نمود و به‌این‌ترتیب مصرف آب شیرین در واحد صنعتی و هزینه‌های عملیاتی مربوطه را کاهش داد (۱۰).

لطفی و مامقانی‌نژاد (۲۰۱۹) به بررسی کارایی تالاب مصنوعی در پالایش فاضلاب تصفیه‌خانه شهری در اقلیم خشک و سرد اراک پرداختند. در این پژوهش، سه سیستم تالاب مصنوعی از نوع جریان زیرسطحی، هرکدام به عرض سه متر و طول ۱۲ متر و عمق یک متر احداث و با استفاده از شن بادامی پر شد. در تالاب اول گیاه نی، در تالاب دوم گیاه لوئی کاشته شد و تالاب سوم بدون گیاه به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شد. نمونه‌های پساب ورودی و خروجی به هر تالاب به‌صورت دو هفته یک‌بار نمونه‌برداری و برای سنجش پارامترهای پساب به آزمایشگاه مرجع منتقل شد و میزان مواد جامد معلق کل (TSS)، COD، BOD، کلیفرم گوارشی (FC) و کلیفرم کل (TC) بر اساس روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهد که تالاب‌های مصنوعی از توان بالایی در پالایش پساب‌های شهری برخوردار بوده و قادر به کاهش میزان آلاینده‌های فاضلاب برای استفاده از آن در مصارف مختلفی مانند کشاورزی و یا تزریق

1- Total Phosphorous (TP)

به منابع آب سطحی و زیرزمینی است. افزایش طول بستر، ایجاد تأسیسات تصفیه مقدماتی فاضلاب، بهبود هوادهی تالاب‌ها، افزایش زمان ماند، افزودن مواد کربنی قابل‌تجزیه به بستر و حذف لایه ماسه حفاظتی روی بسترها، راهکارهای افزایش راندمان تالاب‌های مصنوعی تصفیه‌خانه فاضلاب شهر اراک هستند (۱۱).

ژوو و همکاران (۲۰۲۱) راندمان حذف آلاینده‌ها را در تالاب مصنوعی با جریان عمودی یکپارچه (IVFCW) و تالاب با جریان عمودی (VFCW) برای پساب خروجی از تصفیه‌خانه به مدت ۱٤ ماه مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که متوسط حذف پارامترهای COD، نیتروژن آمونیاکی، فسفر کل، نیتروژن کل و مواد جامد معلق کل به‌ترتیب ٤۰/۰۵، ٤۵/٤۷، ٦۲/۵۵، ۵۵/۵۳، ۵۷/۲۰ درصد در IVFCW است. تجزیه‌وتحلیل توالی‌یابی با توان بالا و فراوانی نسبی باکتری‌های نیترات‌ساز، باکتری‌های نیتروژن‌زدا و باکتری‌های آنامِکس تأیید کرد که نیترات‌زایی، نیترات‌زدایی و آنامِکس محتملاً فرآیندهای اصلی حذف نیتروژن در IVFCW هستند (۱۲).

کولشرشته و همکاران (۲۰۲۲) با تجزیه‌وتحلیل داده‌های ۸۲ تالاب مصنوعی در سطح دنیا با هفت گونه گیاهی نشان دادند که نقش غیرمستقیم گیاهان آبزی ممکن است بسیار مهم‌تر از نقش مستقیم آن‌ها در حذف مواد مغذی باشد. این اثر غیرمستقیم از طریق تأثیر گونه‌های گیاهی بر جوامع میکروبی ریزوسفر اعمال می‌شود (۱۳).

فناوری تصفیه تالابی که با احداث تالاب مصنوعی در مسیر تخلیه فاضلاب به‌صورت منفرد، ترکیبی یا مکمل سامانه‌های تصفیه موجود توسعه می‌یابد، از ظرفیت و مزایای بالایی برای تصفیه فاضلاب به‌صورت مقرون‌به‌صرفه، کارآمد و قابل‌اتکا برخوردار است. در سال‌های اخیر، سامانه‌های تالابی زیرسطحی با جریان عمودی (VFCWs) به دلیل نیاز به زمین کم‌تر، به‌سرعت در حال گسترش هستند. اهداف مطالعه حاضر راه‌اندازی پایلوت برای بومی‌سازی دانش طراحی تالاب مصنوعی مطابق با وضعیت کمی و کیفی فاضلاب خانگی در ایران (خوابگاه دانشجویی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری) و بررسی امکان جایگزینی سامانه‌های تالابی به‌جای سامانه‌های مرسوم تصفیه فاضلاب خانگی در کشور می‌باشد.

مواد و روش‌ها

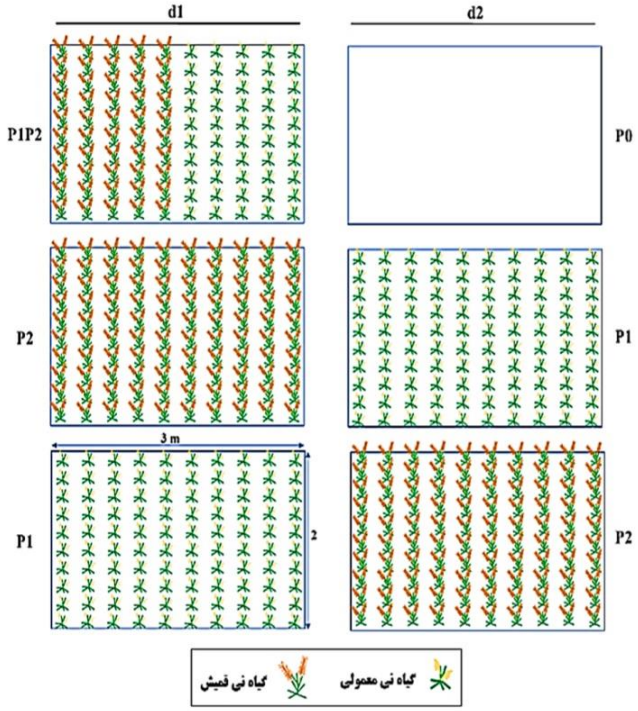
این پژوهش در کنار خوابگاه دانشجویی واقع در ضلع شمالی محوطه دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در کیلومتر ۹ جاده دریا، با طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ٤ دقیقه و ۱٦ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳٦ درجه و ٤۰ دقیقه شمالی اجرا شد. انتخاب مکان پروژه در کنار خوابگاه دانشجویی به‌منظور دسترسی راحت‌تر به منبع فاضلاب بود. هم‌چنین امکان استفاده از پساب حاصل از فرایند تصفیه در تالاب‌های مصنوعی برای آبیاری زمین‌های کشاورزی اطراف وجود داشت. لازم به ذکر است تعداد ساکنان خوابگاه دانشجویی شهید چمران در ماه‌های تحصیلی سال حدود ۲٤۰ نفر است.

انتخاب پوشش گیاهی: روش ماتریس تصمیم‌گیری و روش تعیین وزن شاخص‌های پاسخ خبرگان برای انتخاب گیاه مناسب در این پژوهش استفاده شد (۱٤). گونه‌های مختلف گیاهی بر اساس پارامترهای تاب‌آوری آن‌ها در سطح شوری، و تأثیر آن‌ها در حذف مواد مغذی، بار آلی و عوامل میکروبی، با توجه به مطالعات صورت گرفته پیشین و هم‌چنین دسترسی آسان به گیاهان برای کاشت در بستر، اولویت‌بندی شدند.

مصالح فیلتر: مهم‌ترین جزء تالاب مصنوعی، نوع بستر است که عمل اصلی تصفیه را به‌صورت مستقیم

و غیرمستقیم بر عهده دارد. انتخاب بستر در این پژوهش براساس رهنمودهای سایر مطالعات انجام شد (۵، ۱۵). این مصالح از دپوهای محلی تهیه شد. برای انتخاب منبع قرضه مناسب، آزمایش دانه‌بندی خشک در آزمایشگاه انجام شد. نزدیک‌ترین منبع به مشخصات طراحی پروژه، انتخاب شد.

تیمارهای این پژوهش شامل تعداد ٦ سلول تالابی با عمق ۱/۵ متر و مساحت مفید ٦ مترمربع برای اجرای پژوهش ساخته شد. تیمارهای پژوهش از فاکتورهای عمق مصالح بستر (d) در دو سطح یک متر (d1) و ۱/۳ متر (d2) و نحوه کاشت گیاه در چهار سطح نکاشت (P0)، کاشت گیاه نی معمولی (P1)، کاشت نی قمیش (P2) و ترکیب کاشت نی معمولی و قمیش (P1P2) تشکیل شد. شماتیک کلی ٦ تیمار این پژوهش در قالب ٦ سلول تالابی در شکل ۱ ارائه شده است. به‌علت نشت از کرسی، تیمار P0d2 از بررسی نتایج این پژوهش حذف شد. از طرح بلوک کامل تصادفی و آزمون پارامتری توکی برای تحلیل آماری استفاده شد.



شکل ۱- شمای کلی طرح و جانمایی تیمارها.

Figure 1. Overall schematic diagram of the project and the configuration of treatments.

عملکرد تصفیه سامانه تالابی با بررسی کارایی ۵ تالاب مصنوعی در دوره راه‌اندازی، از طریق پایش پارامترهای کیفی به‌صورت جفتی ورودی- خروجی صورت گرفت. جدول ۱ به‌طور خلاصه پارامترها و فاصله نمونه‌برداری را ارائه می‌دهد. نمونه‌برداری به‌صورت مرکب و از ورودی فاضلاب به سلول‌ها و از پساب تصفیه‌شده خروجی هر سلول به‌صورت مجزا انجام شد.

مواد جامد معلق کل (TSS): اندازه‌گیری کل مواد معلق (TSS) فاضلاب از روش وزنی انجام شد. ابتدا

وزن خشک کاغذ صافی (m_f) اندازه‌گیری شد. ۳۰۰ میلی‌لیتر فاضلاب طی چند مرحله به‌وسیله کاغذ صافی ۰/٤۱ میکرومتر فیلتر شد. بعد از عبور تمام حجم نمونه فاضلاب ($\forall$) از کاغذ، کاغذ صافی داخل آون در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت خشک و مجدداً وزن (m_{f+s}) شد. در نهایت میزان مواد معلق نمونه آب با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد.

$$C_{TSS} = \frac{m_{f+s} - m_f}{\forall} \quad (1)$$

که در آن، C_{TSS} غلظت کل مواد جامد معلق (mg/L)، m_{f+s} مجموع جرم صافی و جرم باقی‌مانده خشک‌شده (mg)، m_f جرم کاغذ صافی (mg) و حجم نمونه (L) است.

برای اندازه‌گیری پارامترهای دما، pH، EC و DO از دستگاه پرتابل SensoDirect 150 ساخت شرکت LoviBond و در محل نمونه‌برداری استفاده شد. پراب (سنسور فیزیکی) دستگاه درون نمونه ترکیبی گرفته شده از چاهک زهکشی قرار گرفته و مقادیر پارامترها قرائت شد.

جدول ۱- پارامترهای مورد بررسی، نحوه نمونه‌برداری و اندازه‌گیری.

Table 1. Examined parameters, sampling procedure, and measurement methodology.

پارامتر هدف Target parameter	علامت لاتین Latin sign	فرکانس نمونه‌برداری Sampling frequency	روش اندازه‌گیری Measurement method
دما Temperature	Te	هر 72 ساعت	SensoDirect 150
کدورت Turbidity	Turb	هر 72 ساعت	روش استاندارد
اکسیژن محلول Dissolved oxygen	DO	هر 72 ساعت	SensoDirect 150
اکسیژن خواهی زیستی Biochemical Oxygen Demand	BOD	هر 72ساعت	روش استاندارد
اکسیژن خواهی شیمیایی Chemical Oxygen Demand	COD	هر 72 ساعت	روش استاندارد
مواد جامد معلق کل Total Suspended Solids	TSS	هر 72 ساعت	روش استاندارد
کربن آلی کل Total Organic Carbon	TOC	هر 72 ساعت	روش استاندارد
اسیدیته pH	pH	هر 72 ساعت	SensoDirect 150
کلیفرم مدفوعی و کل Fecal Coliform, Total Coliform	FC و TC	هر 72 ساعت	روش استاندارد
شوری	EC	هر 72 ساعت	SensoDirect 150

اندازه‌گیری پارامترهای اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD)، اکسیژن خواهی زیستی (BOD)، کربن آلی کل (TOC)، کدورت و پارامترهای میکروبی (FC و TC) نمونه‌ها در محل آزمایشگاه مرکزی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری و با نظارت پرسنل این آزمایشگاه انجام شد. در مطالعه حاضر برای اندازه‌گیری کدورت از روش کدورت‌سنج استفاده گردید، به‌نحوی‌که به روش اپتیکی(انعکاس نور توسط ذرات معلق) مقدار کدورت اندازه‌گیری و ثبت شد. در ادامه برای اندازه‌گیری FC و TC از روش ۱۵ لوله استفاده گردید که در این روش از تخمیر چند لوله‌ای بهره گرفته می‌شود، به‌نحوی‌که از چندین لوله با غلظت‌های مختلف از نمونه، در آزمایش تخکیر مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای اندازه‌گیری COD از روش اسپکتروفتومتر استفاده گردید به نحوی که بعد از افزودن نمونه به لوله تست (یکی از سه رنج COD یعنی LR، MR و HR)، نمونه داخل راکتور مطابق استاندارد به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا واکنش انجام شود. سپس لوله‌ها را خارج کرده و پس از سرد شدن همراه با نمونه شاهد آب مقطر در دستگاه گذاشته و روی طول موج ٦٠٠ نانومتر قرائت شد. در انتها برای اندازه‌گیری BOD از روش BODمتری، برای اندازه‌گیری TSS از روش وزن‌سنجی و برای اندازه‌گیری TOC از روش حرارت‌دهی در درجه بالا استفاده شد.

تحلیل آماری نتایج در محیط نرم‌افزار IBM SPSS 26 انجام شد. نتایج به صورت مقایسه جفتی ورودی- خروجی برای هر سلول و مقایسه خروجی سلول‌ها با یکدیگر برای پارامترهای کیفی پساب و فاضلاب در سطح آلفا مساوی ۵ درصد (α=۰/۰۵) مقایسه شدند. نتایج مقایسه به صورت نمودار ارائه شد.

راندمان حذف آلاینده‌ها (RE، درصد) در هر سلول به‌صورت درصد تفاضل نرمال شده مقدار خروجی پارامتر نسبت به ورودی از رابطه ۲ محاسبه شد.

$$RE = \frac{C_{out} - C_{in}}{C_{in}} \times 100 \qquad (۲)$$

نتایج و بحث

نتایج سنجش پارامترهای کیفی در زمان ماند ۳ روز در دوره راه‌اندازی و در اولین بارگذاری سامانه در جدول‌های ۲ و ۳ و شکل‌های ۳ تا ۸ ارائه شده است.

نتایج به‌دست‌آمده از جدول ۲ نشان داد میزان pH فاضلاب ورودی به سیستم ۷/۵۵ است که با pH از سلول‌های P1d1 (نی معمولی، عمق ۱ متر)، P2d1 (نی قمیش، عمق ۱ متر)، P1P2d1 (کشت ترکیبی نی معمولی و قمیش، عمق ۱ متر) و P1d2 (نی معمولی و عمق ۱/۳۰ متر) و P2d2 (نی قمیش و عمق ۱/۳۰) تفاوت معنی‌داری ندارد. مقدار دمای ورودی و خروجی نیز همانند پارامتر pH بوده و درمجموع فاقد تفاوت معنی‌دار بودند. این وضعیت نشان‌دهنده عملکرد مناسب مصالح بستر و نداشتن اثر جانبی قابل‌توجه آن روی شرایط دما و pH فاضلاب ورودی و همین‌طور حفظ عملکرد مناسب تصفیه است. اهمیت داشتن این خصوصیات برای مصالح بستر در سایر منابع نیز بیان شده است (۵، ۱۵، ١٦).

جدول ۲- نتایج اندازه‌گیری دما و pH.

Table 2. Results of Temperature and pH Measurements.

تیمارها Treatments	دما (درجه سانتی‌گراد) Temperature	اسیدیته pH
فاضلاب ورودی (6) Influent (6)	25.4	7.55
P2d2 (5)	27.15	7.52
P2d1(4)	26.2	7.57
P1P2d1(3)	26.55	7.65
P1d2 (2)	26.85	7.74
P1d1(1)	26.78	7.65

جدول ۳- نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) پارامترهای کیفی پساب خروجی از تالاب‌ها.

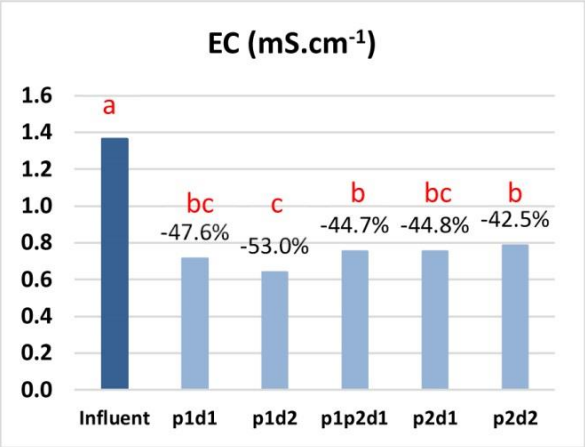
Table 3. Analysis of Variance (ANOVA) Results for Quality Parameters of Effluent from the Wetlands.

پارامتر Parameter	منبع تغییرات Source of variation	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean square
اسیدیته	تیمار	5	0.084^{ns}
pH	خطا	54	0.729
دما	تیمار	5	0.566^{ns}
Temperature	خطا	54	8.948
اکسیژن محلول	تیمار	5	15.423**
DO	خطا	34	0.005
اکسیژن‌خواهی زیستی	تیمار	5	909.078**
BOD	خطا	54	4.129
اکسیژن‌خواهی شیمیایی	تیمار	5	14673.206**
COD	خطا	54	43.447
شوری	تیمار	5	0.996**
EC	خطا	54	0.009
کربن آلی کل	تیمار	5	1595.563**
TOC	خطا	54	0.787
مواد جامد معلق کل	تیمار	5	11585.008**
TSS	خطا	44	4.002
کدورت	تیمار	5	250.568**
TurB	خطا	54	0.546
کلیفرم کل	تیمار	5	3684512.529**
TC	خطا	34	1430.968
کلیفرم مدفوعی	تیمار	5	441802.862**
FC	خطا	34	122.725

** بیانگر اثر معنی‌داری در سطح ۱ درصد است. ^{ns} بیانگر عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد است

نتایج به‌دست‌آمده از جدول ۳ نشان داد که تمامی پارامترهای موردبررسی در خصوص کیفیت پساب خروجی از تالاب‌ها در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار بوده و تالاب‌ها نقش مثبتی را در تصفیه فاضلاب انجام دادند. به‌طورکلی تمامی پارامترها اعم از DO، BOD، TOC، Turb، EC، COD، TSS، FC و TC در پساب خروجی از وضعیت بهتری نسبت به فاضلاب ورودی برخوردار بودند که این امر نشان از عملکرد مناسب تالاب‌ها و گیاهان مورداستفاده در بستر کشت تالابی (نی (Phragmites australis) و قمیش (Giant reed)) می‌باشد. در مطالعه‌ای که بهمنی و همکاران (۲۰۲۲) با هدف بررسی امکان استفاده از پساب در گیاه‌پالایی خاک‌آلوده به گازوئیل انجام دادند دریافتند که گیاه فستوکای بلند گازوئیل موجود در خاک را به میزان حداکثر ٦۲/٤و حداقل ٤۷/۹ درصد کاهش داده و مقدار کاهش گازوئیل در گیاه‌پالایی توسط گیاه خلر حداکثر ٦۳ و حداقل ٤٤/۲ کاهش است که نتایج مطالعه آن‌ها با نتایج مطالعه حاضر در خصوص تأثیر مثبت گیاه‌پالایی در تصفیه فاضلاب را تأیید می‌نماید (۱۷).

میزان EC در فاضلاب ورودی ۱/۳۱۱ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر بود. مقدار شوری خروجی تیمارهای مختلف تالاب مصنوعی بین ۰/٦۱۷ تا ۰/۷۸٦ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر به دست آمد. نتایج نشان داد که تیمارهای مختلف سامانه تالابی در کاهش معنی‌دار پارامتر EC فاضلاب مؤثر بودند (شکل ۲). RE_{EC}، راندمان حذف EC بین ٤۲ تا ۵۳ درصد به دست آمد. کاهش شوری در این پژوهش می‌تواند به سبب ظرفیت تبادل کاتیونی مصالح بستر باشد. اشغال شدن فضای تبادلی منفی روی سطوح مصالح بستر توسط سدیم و هیدروژن می‌تواند سبب کاهش شوری پساب خروجی در بسترهای جوان گردد (۱۸، ۱۹). بااین‌حال این ویژگی به سبب محدود بودن ظرفیت تبادل کاتیونی مصالح بستر، طی بلوغ سامانه تصفیه تالابی، به احتمال زیاد کاهش می‌یابد (۲۰، ۲۱) و بررسی پایداری آن نیازمند داده‌برداری طولانی‌مدت است. در هر صورت احیاء مصالح بستر، استفاده از مواد با ظرفیت جذب بالا و جایگزینی مصالح بستر می‌تواند سبب امتداد فرایند حذف EC در تالاب مصنوعی باشد (۵، ۱۵). نقش گیاهان در حذف شوری در این مرحله از داده‌برداری پژوهش بررسی نشد. زیرا نمونه‌برداری تنها زمان کمی پس از انتقال نشاء گیاهان به بستر صورت گرفت. گیاهان فاقد دستگاه ریشه قوی و گسترده بودند و ظرفیت جذب آن‌ها مورد چشم‌پوشی قرار گرفت.

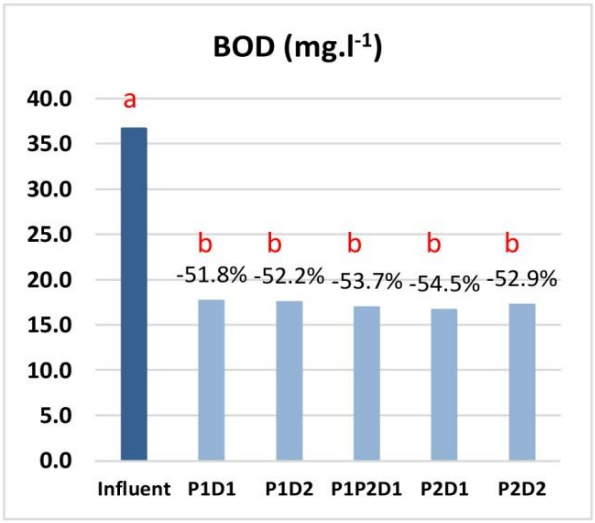


شکل ۲- تغییرات شوری (EC) ورودی و خروجی تیمارها در سامانه تصفیه تالابی پایلوت

(حروف a، b، C و d نشان‌دهنده گروه آماری و اعداد با حروف مشابه در یک گروه آماری قرار دارند).

Figure 2. Changes in Salinity (EC) of Influent and Effluent in the Pilot Wetland Treatment System (Letters a, b, C, and d represent statistical groups, and numbers with similar letters are in the same statistical group).

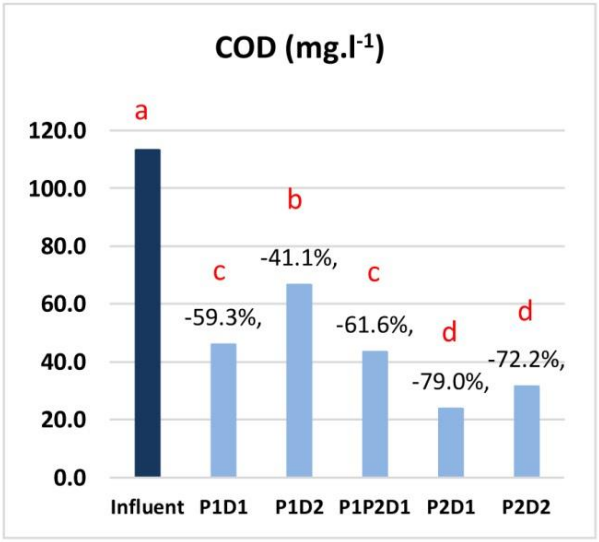
مقدار اکسیژن‌خواهی زیستی (BOD) در خروجی تیمارها، به‌صورت معنی‌داری کم‌تر از مقدار این پارامتر در فاضلاب ورودی بود (شکل ۳). راندمان حذف RE_{BOD} ۵۱ تا ۵۵ درصد به دست آمد. علی‌رغم کاهش معنی‌دار این پارامتر نسبت به مقدار ورودی، راندمان حذف آن متوسط بود. مقادیر ۸۳ تا ۹۸ درصد برای انواع سامانه‌های تالابی VF در حذف BOD توسط مراجع نیز گزارش شده است (۲۷، ۲۸، ۳٤). بااین‌حال، کوپر (۲۰۰۵) راندمان حذف BOD در سامانه تالابی ترکیبی VF-VF را به ترتیب مقادیر ٦۸ و ۹۵ درصد برای VF سری اول و دوم اعلام نمود (۳۸). گارسیا آویلا و همکاران (۲۰۱۹) نیز راندمان حذف کل ۸۰ درصد را برای BOD به دست آورد. سامانه تالابی در حال راه‌اندازی این پژوهش در حداکثر ظرفیت پالایش خود قرار ندارد. درنتیجه به‌صورت طبیعی دارای راندمان حذف کم‌تری نسبت به موارد گزارش شده برای سامانه‌های بالغ VF و سامانه‌های VF تقویت شده (CVF) در منابع بالا است. بااین‌حال، مقادیر راندمان حذف آن امیدوارکننده بوده و انتظار افزایش آن در سری زمانی نتایج در خلال سه ماه بعدی از داده‌برداری وجود دارد (۲۳).



شکل ۳- تغییرات اکسیژن خواهی زیستی (BOD) ورودی و خروجی تیمارها در سامانه تصفیه تالابی پایلوت.

Figure 3. Changes in Biochemical Oxygen Demand (BOD) of Influent and Effluent in the Pilot Wetland Treatment System.

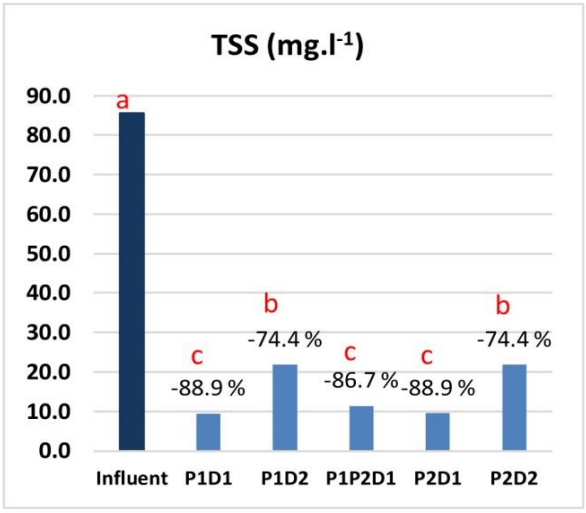
اکسیژن خواهی شیمیایی (COD) در خروجی تیمارهای مورد بررسی نسبت به مقدار ورودی در فاضلاب، دارای شرایط متنوعی بود (شکل ٤). راندمان حذف RE_{COD}، ٤۱ تا ۷۹ درصد به دست آمد که دارای کاهش معنی‌دار (آلفا ۵ درصد) نسبت به مقدار ورودی COD بود. روسو و همکاران (۲۰۰٤)، ویمازال و کروپفلوا (۲۰۱۱) و گارسیا آویلا و همکاران (۲۰۱۹) نیز به ترتیب راندمان حذف ٦۰، ٦۱ و ٦۹ درصدی را برای COD در شرایط مشابه گزارش نمودند (۲۲، ۲۳، ۲٤، ۲۵، ۲٦). نتایج آن‌ها در شرایطی مساوی راندمان حذف COD در خروجی این دو تیمار است که در هر سه مرجع، سامانه‌ها VF تمام‌عیار و بالغ بودند. برخلاف دو تیمار قبلی، تیمارهای P1P2D1 و P1D1 فاقد تفاوت معنی‌دار بود.



شکل ٤- تغییرات اکسیژن خواهی شیمیایی (COD) ورودی و خروجی تیمارها در سامانه تصفیه تالابی پایلوت.

Figure 4. Changes in Chemical Oxygen Demand (COD) of Influent and Effluent in the Pilot Wetland Treatment System.

همه تیمارهای پژوهش مقدار مواد جامد معلق (TSS) را به‌صورت معنی‌داری نسبت به ورودی کاهش دادند (شکل ٥). مقدار راندمان حذف TSS در بازه ٧٤ تا ٨٩ درصد و کم‌ترین و بیش‌ترین راندمان حذف به ترتیب برای تیمارهای P1D2 و P1D1 به‌دست آمد. RE_{TSS} به‌دست‌آمده مقدار بالایی از تصفیه این پارامتر را اثبات می‌نماید. این نتایج همانند نتایج گزارش شده در اکثر مراجع با شرایط مشابه است و ازاین‌جهت آن را تائید می‌نماید (٥، ٢٧، ٢٨، ٢١، ١٦، ١٥، ٢٣، ٢٩، ٣٠، ٣١). بنابراین می‌توان گفت که عملکرد سامانه تصفیه تالابی پایلوت دانشگاه کشاورزی ساری، حتی در مراحل اولیه راه‌اندازی نیز در حذف TSS کاملاً مطلوب و در محدود بالای عملکردی است.



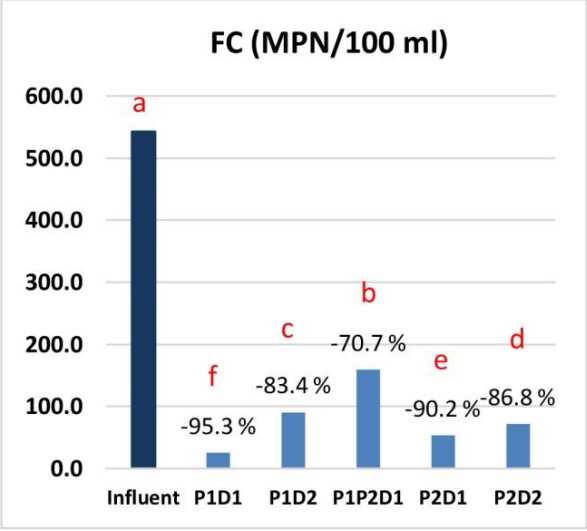
شکل ٥- تغییرات مواد جامد معلق کل (TSS) ورودی و خروجی تیمارها در سامانه تصفیه تالابی پایلوت.

Figure 5. Changes in Total Suspended Solids (TSS) of Influent and Effluent in the Pilot Wetland Treatment System.

اساساً حذف TSS در سامانه‌های تالابی به‌صورت عمده حاصل عمل فیلتر فیزیکی مصالح بستر است. عملکرد فیلتری مصالح بستر بستگی بالایی به مشخصات هندسی مصالح آن دارد (۵، ۳۲). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات دانه‌بندی مصالح بستر طی مهندسی ارزش، سبب اثر نامطلوبی بر عملکرد حذف TSS در این پژوهش نشده است.

تفاوت معنی‌داری بین راندمان حذف TSS در بین تیمارها مشاهده شد که می‌تواند به سبب ناپایداری ذرات ریزدانه مصالح بستر و مشارکت آن‌ها در خروجی در اثر پمپاژ باشد (۱۶، ۲۰). پدیده ماسه‌دهی حین نمونه‌برداری برای انجام آزمایش‌های کیفیت آب و هم‌چنین طی آزمایش‌های هدایت هیدرولیکی مشاهده شد. این شواهد نشان‌دهنده وجود ناپایداری ذرات ریزدانه مصالح بستر با لحاظ تفاوت در بین تیمارها است. به‌طورمعمول انتظار می‌رود این وضعیت با افزایش سن سامانه تالابی، در اثر نشست مصالح بستر، رشد ریشه‌ها و زیست‌توده باکتریایی روی محیط متخلخل مصالح بستر، پایدار شود. همروند بودن نسبی بی‌نظمی بین تیمارها در پارامتر کدورت آب (شکل ۸) با TSS خروجی از تیمارها، نیز تأییدی دیگر بر این وضعیت است. زیرا دلایل مشابهی با TSS بر تغییرات پارامتر کدورت آب در خروجی سامانه‌های تالابی تصفیه، مؤثر است.

شکل ٦ تغییرات پارامتر بسیار با اهمیت کلیفرم گوارشی (FC) را در ورودی و خروجی سامانه تصفیه تالابی فاضلاب خوابگاه دانشگاه کشاورزی ساری نشان می‌دهد. همه تیمارها به‌صورت معنی‌داری نسبت به ورودی مقدار پارامتر FC را کاهش دادند. مقدار راندمان حذف FC از کم‌ترین مقدار ۷۰/۷ درصد در تیمار P1P2D1 تا بیش‌ترین مقدار راندمان حذف به اندازه ۹۵/۳ درصد در تیمار P1D1 متغیر بود. این مقادیر حذف به ترتیب معادل ۰/٦۹ و ۱/۷۰ لاگ[1] کاهش در مقدار ورودی است.

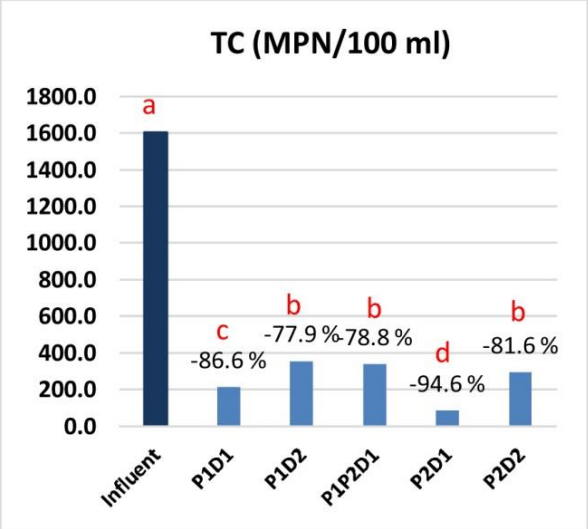


شکل ٦- تغییرات کلیفرم گوارشی (FC) ورودی و خروجی تیمارها در سامانه تصفیه تالابی پایلوت.

Figure 6. Changes in Fecal Coliform (FC) of Influent and Effluent in the Pilot Wetland Treatment System.

1- Log

حذف کلیفرم کل (TC) نیز به‌صورت معنی‌داری (آلفای مساوی ۵ درصد) در همه تیمارهای مورد بررسی نسبت به مقدار ورودی آن صورت پذیرفته است. حذف TC همروند با حذف FC بوده و تقریباً دارای درصدهای مشابه است. کم‌ترین میزان راندمان حذف در تیمار P1P2D1 به مقدار ۷۸/۸ درصد و بیش‌ترین مقدار با میزان ۹٤/٦ درصد در تیمار P2D1، مقادیر به ترتیب ۰/٦٦ و ۱/٦۸ لاگ به دست آمد (شکل ۷).



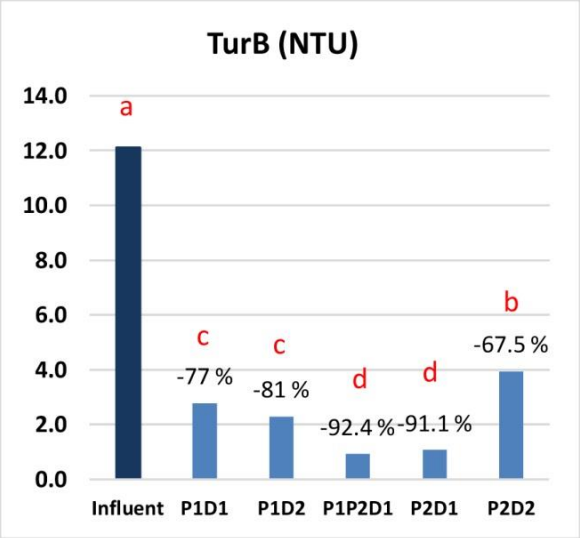
شکل ۷- تغییرات کلیفرم کل (TC) ورودی و خروجی تیمارها در سامانه تصفیه تالابی پایلوت.

Figure 7. Changes in Total Coliform (TC) of Influent and Effluent in the Pilot Wetland Treatment System.

کلیفرم کل (TC) شامل باکتری‌هایی هستند که در خاک و منابع آب که تحت‌تأثیر آب‌های سطحی بوده و در فضولات انسانی و حیوانی یافت می‌شوند. کلیفرم‌های گوارشی (FC) به گروهی از کل کلیفرم‌ها که به‌طور خاص در روده و مدفوع انسان و حیوانات خونگرم وجود دارند، اطلاق می‌شود (۵، ۱۵، ۱٦). گرچه مقدار حذف FC و TC به‌دست‌آمده در این پژوهش با مقادیر بالای ۳ و ٤ لاگ کاهش گزارش شده در مراجعی مانند ویدن و همکاران (۲۰۰۳) تفاوت دارد و از مقادیر کم‌تری برخوردار است اما با مقادیر گزارش شده توسط سایر مراجع جدیدتر تطابق نیز دارد (۲٤، ۲۵، ۳۳، ۳٤). روزما و همکاران (۲۰۱٦) مقادیر راندمان حذف ۱/٦۳ و ۱/۹۳ لاگ را برای FC در مرور عملکرد سامانه‌های تالابی در شمال شرق آمریکای شمالی گزارش نمودند (۳۳). گارسیا آویلا و همکاران (۲۰۱۹) نیز راندمان حذف حداکثر ۹۸ درصد برای TC و ۹۵ درصد برای FC را گزارش نمودند. به این صورت مقادیر راندمان حذف به‌دست‌آمده در این پژوهش امیدوارکننده بوده و افزایش قابل پیش‌بینی آن در طی بلوغ سامانه تالابی، نویدبخش شرایط مطلوب‌تری در آینده خواهد بود (۲٤).

عملکرد تصفیه‌ای سامانه تالابی پژوهش حاضر در کدورت فاضلاب در شکل ۸ ارائه شده است. کدورت در همه تیمارهای مورد بررسی به‌صورت معنی‌داری نسبت به ورودی در سطح آلفای ۵ درصد کاهش یافت. راندمان حذف به‌دست‌آمده از حداقل ٦۷/۵ درصد در تیمار P2D2 تا مقدار بسیار امیدوارکننده

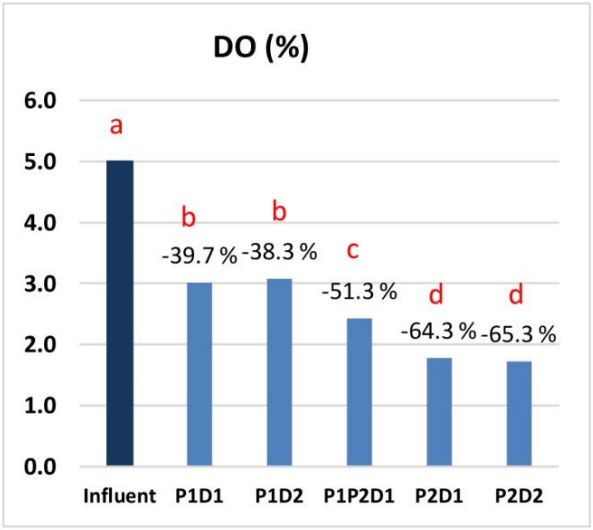
۹۲/٤ درصد در تیمار P1P2D1 متغیر بود. روند تغییرات متأثر از اثر پمپاژ حین نمونه‌برداری و میزان ریزدانه و ذرات رسی باقی‌مانده در مصالح بستر بود. این اثر توسط نمونه‌بردار گزارش شد. این‌طور به نظر می‌رسد که به‌مرور زمان و با تخلیه ریزدانه‌ها طی زهکشی بسترهای تالابی، راندمان حذف کدورت در سایر تیمارها نیز بهبود یابد. نتایج مشابهی در تأیید یافته‌های این پژوهش توسط سانچز و همکاران (۲۰۱۸) برای سامانه تالابی به‌کار رفته جهت تصفیه ثانویه فاضلاب شهری در تصفیه‌خانه‌ای در برزیل گزارش شد. مقادیر راندمان حذف کدورت ٤۳ تا ۷۷ درصد برای چهار سلول تالابی مورد مطالعه گزارش شد. آن‌ها گزارش نمودند که تفاوتی بین سلول‌های تالابی از جهت پوشش گیاهی وجود نداشت (۳۵).



شکل ۸- تغییرات کدورت (TurB) ورودی و خروجی تیمارها در سامانه تصفیه تالابی پایلوت.

Figure 8. Changes in Turbidity (TurB) of Influent and Effluent in the Pilot Wetland Treatment System.

اکسیژن محلول در فاضلاب نشان‌دهنده میزان اکسیژن آزاد و سطح هوازی- بی‌هوازی بودن فاضلاب و در واقع شاخصی غیرمستقیم از میزان اکسیژن خواهی فاضلاب است (۵، ١٦). مقدار اکسیژن محلول ورودی (DO) به سامانه‌های تصفیه تالابی ۵ درصد (شکل ۹) و به‌صورت چشمگیری بالاتر از مقدار معمول آن در خروجی مخازن سپتیک، یعنی ۲ درصد و کمتر، است (٢٤). افزایش سطح اکسیژن ورودی از اهداف اولیه در طراحی سیستم تغذیه سطحی سامانه تالابی بود تا مانع تولید بوی نامطلوب شود. به این‌صورت که تغذیه در بالای سطح بستر و با فشار و به‌صورت جریان فوق بحرانی صورت گرفته و سبب اختلاط هوا و فاضلاب باهم گردد (۵). بااین‌حال مقادیر DO حین عبور از بسترها به‌صورت معنی‌داری از ۳۸ تا ٦٦ درصد کاهش یافت که نشان‌دهنده بی‌هوازی بودن نسبی عمق بستر و حاکمیت شرایط بی‌هوازی درون آن است. مقدار اکسیژن خروجی به صفر نرسید بنابراین عملکرد هوادهی در تغذیه سامانه در شرایط بارگذاری موجود، یعنی فاضلاب رقیق، مطلوب ارزیابی می‌شود.

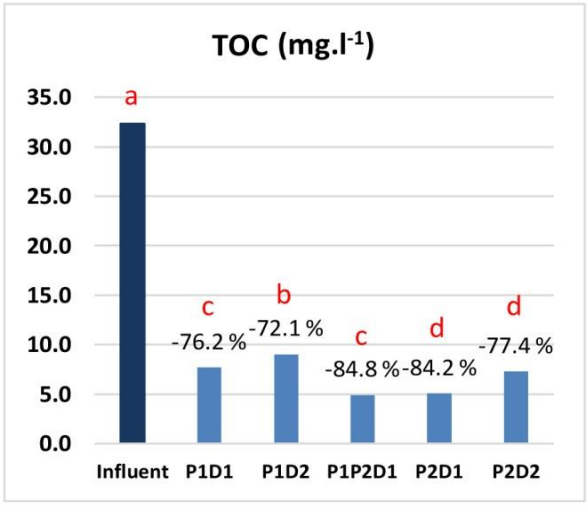


شکل ۹- تغییرات اکسیژن محلول (DO) ورودی و خروجی تیمارها در سامانه تصفیه تالابی پایلوت.

Figure 9. Changes in Dissolved Oxygen (DO) of Influent and Effluent in the Pilot Wetland Treatment System.

از منظر کیفیت فاضلاب ورودی به سامانه‌های تصفیه تالابی، اطلاعات بسیار کمی در مورد مقدار کربن آلی ورودی وجود دارد. این در حالی است که مقدار کربن موجود در فاضلاب ورودی و نسبت آن با نیتروژن و فسفر، نقشی اساسی در رشد، شکوفایی و توسعه جمعیت‌های باکتریایی مؤثر بر تصفیه درون بستر سامانه دارد (۳٦). اندازه‌گیری TOC با هدف پایش مقدار کربن برای تفسیر عملکرد تصفیه‌ای سامانه تالابی، به‌خصوص در مورد اشکال مختلف نیتروژن انجام شد.

مقدار TOC در همه تیمارهای مورد مطالعه به‌طور معنی‌داری نسبت به هم متفاوت بود و به‌صورت معنی‌داری کم‌تر از مقدار ورودی آن به‌دست آمد (شکل ۱۰). گرچه تفاوت معنی‌داری بین مقدار خروجی TOC در تیمارهای مورد مطالعه وجود داشت، اما همه تیمارها آن را مصرف نموده و راندمان حذف بین ۷۲ تا ۸۵ درصد را ثبت نمودند. این مقادیر بسیار بیش‌تر از راندمان حذف ۱٦ تا ۳۷ درصدی گزارش شده در سایر مطالعات است (۳۵). ژائو و همکاران (۲۰۱۰) تفاوتی بین سامانه تالابی دارای گیاه و بدون گیاه اعلام نکردند (۳٦). زگروی و همکاران (۲۰۱۸) با بررسی سامانه‌های VF اشباع و غیراشباع، گزارش دادند که حذف TOC به ترتیب ٤۸ و ۷۲ درصد بوده است. آن‌ها اثر اشباع بودن سامانه بر حذف کربن آلی را کم‌تر از شرایط هوازی سامانه‌های غیراشباع اعلام نمودند. مقایسه راندمان‌های حذف TOC در این پژوهش با سایر مراجع، نشان‌دهنده امیدوارکننده بودن ظرفیت حذف/مصرف آن درون سامانه است و نشان‌دهنده این واقعیت که جمعیت باکتریایی درون مصالح به‌سرعت در حال رشد و گسترش است (۳۷).



شکل ۱۰- تغییرات کربن آلی محلول کل (TOC) ورودی و خروجی تیمارها در سامانه تصفیه تالابی پایلوت.

Figure 10. Changes in Total Organic Carbon (TOC) of Influent and Effluent in the Pilot Wetland Treatment System.

نتیجه‌گیری کلی

سامانه پایلوت پژوهشی تصفیه فاضلاب به روش تالاب مصنوعی در دانشگاه کشاورزی ساری با موفقیت احداث و راه‌اندازی شد. علی‌رغم نشت یکی از حوضچه‌ها و انجام آزمایش‌های اولیه با ۵ سلول، نتایج بسیار مثبت و امیدوارکننده بودند. نتایج تحلیل آماری آن نشان داد که کارایی سامانه حتی در مرحله اولیه راه‌اندازی برای تصفیه پارامترهای TSS، TurB و EC بالا، برای پارامترهای BOD، FC، TC و TOC متوسط و برای پارامتر COD نیازمند پایش بیش‌تری است. این نتایج نشان‌دهنده کارایی مطلوب تصفیه در سامانه تالابی، علی‌رغم استفاده از فاضلاب رقیق‌شده و قرار داشتن سامانه در مرحله ابتدایی راه‌اندازی است. کارآمدی کوتاه‌مدت فناوری تصفیه تالابی برای تصفیه فاضلاب خانگی و شهری با توجه به عملکرد هیدرولیکی بستر و مقادیر DO، TOC، pH و دما به‌دست‌آمده، امیدوارکننده بود. تداوم افزایش راندمان حذف در درازمدت، همانند گزارش مراجع، اثباتی برای کارآمدی درازمدت آن خواهد بود. تولید بوی بد در سامانه‌های تالابی به دلیل شرایط بی‌هوازی بستر از نگرانی‌های مرسوم طراحان است. روش استفاده‌شده برای هوادهی غیرفعال در سازه تغذیه، سبب بهبود وضعیت هوادهی بسترها شد. گرچه فاضلاب ورودی رقیق بود و ازنظر اکسیژن‌خواهی جزو فاضلاب‌های قوی به‌حساب نمی‌آید، اما این مقدار از هوادهی، در مرحله راه‌اندازی به‌طور کامل از تولید بوی نامطبوع جلوگیری نمود. نتیجه‌گیری کلی نشان داد که در بین تیمارها، ضعیف‌ترین عملکرد مربوط به تیمار P1D2 و بهترین عملکرد تصفیه هم در تیمار P2D1 مشاهده شد که نشان‌دهنده غلبه خصوصیات فیزیکی سامانه‌ها در ابتدای دوره راه‌اندازی بر عملکرد تصفیه است.

پیشنهادها

پس از اجرای پژوهش حاضر، موارد زیر برای پژوهش‌گران بعدی که برای فعالیت در زمینه مطالعه تالاب‌های مصنوعی در حال برنامه‌ریزی هستند، پیشنهاد می‌شود:

- بررسی کارایی تصفیه و کارآمدی فناوری تصفیه تالابی به‌صورت درازمدت در قالب تحلیل سری‌های زمانی

- مقایسه سامانه‌های تصفیه تالابی با سایر روش‌های مرسوم برای ارزیابی هزینه تمام‌شده واحد فاضلاب تصفیه شده
- ارزیابی تطابق اجتماعی- فرهنگی فناوری تصفیه تالابی در مناطق جمعیتی غیرمتمرکز مانند روستا
- ارزیابی راندمان و پایداری حذف پارامترهای کیفی نیتروژنه در سامانه تالابی
- توسعه دانه‌بندی‌های جدید برای مصالح بستر برای پژوهش‌های آتی به‌صورت مقرون‌به‌صرفه
- بررسی روش‌های بهره‌برداری جدید مانند روش دانمارکی و فرانسوی در سامانه تصفیه تالابی

تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری تحت قرارداد با شماره ۱۰-۱۳۹۷-۰۲ انجام شد که به این وسیله سپاسگزاری می‌شود.

داده‌ها و اطلاعات

داده‌های این مطالعه مرتبط با پروژه تحقیقاتی با عنوان ارزیابی تأثیر استفاده از تالاب‌های مصنوعی در تصفیه فاضلاب خانگی در مؤسسه/دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری می باشد. دسترسی به داده‌ها و اطلاعات صرفاً برای داوران/دبیر تخصصی/ سردبیر نشریه و بنا بر درخواست ایشان میسر خواهد بود.

لازم به ذکر است تمامی داده‌های موجود در این مطالعه از طریق برداشت و آزمایش خود پژوهش‌گران صورت گرفته است و از سایر مطالعات در داده‌های خام استفاده‌نشده است.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این متن به شکل ذیل است: نویسنده اول: مجری طرح و راهنمای دانشجویان، همکاری در نگارش پروپوزال طرح، نظارت تحقیق، اصلاح و نهایی سازی مقاله .نویسنده دوم، سوم، چهارم و پنجم: همکاری در نگارش پروپوزال، انجام محاسبات، تهیه پیش‌نویس مقاله، مشارکت در آنالیزها، نویسنده ششم، هفتم و هشتم: همکاری در نگارش پروپوزال و اصلاح آن، بازبینی مقاله و همکار طرح.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافعی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

حمایت مالی

حمایت مالی از این پژوهش از محل طرح تحت قرارداد با شماره ۱۰-۱۳۹۷-۰۲ و گرنت اعضای هیأت علمی بوده است.

منابع

1. Kazemzadeh Khoei, J., & Noori, A. S. (2011). Phytoremediation. No (1), Academic Jihad Publications. 556p. [In Persian]
2. Sheykhan, A. (2012). Improvement of Urban Wastewater Moved Through Two Porous Medias with Horizontal and Vertical Flows Cultivated with Cyperus. Master's thesis in water science and engineering. Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology. 82p. [In Persian]
3. Fattahi, K., Babazadeh, H., & Shirshahi, F. (2016). Yield Barley and its Components Irrigated with Brackish and Grey Water. *Water Resources Engineering*, 8 (27), 23-30. [In Persian]
4. Abedi-Koupai, J., & Afyuni, M. (2003). Phytoremediation of lead contaminated soils in central Iran. In Proceedings of International Conference on Soil and Ground Water Contamination and Clean up in Arid Countries. 20-23 p.
5. Shahnazari, A., & Mahforouzi, R. (2017). constructed wetlands treatment of municipal wastewaters. No (1), Academic Jihad Publications. 385p. [In Persian]
6. Omidinia-Anarkoli, T., & Shayannejad, M. (2021). Improving the quality of stabilization pond effluents using hybrid constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 801, 149615.
7. Darvish-Motevalli, M., Moradnia, M., Asgaric, A., Noorisepehrd, M., & Mohammadi, H. (2019). Reduction of pathogenic microorganisms in an Imhoff tank constructed wetland system. *Desalination and Water Treatment*, 154, 283-288.
8. Nazarpoor, R., Farasati, M., Fathaabadi, A., & Gholizadeh, M. (2020). Investigating the efficiency of surface flow constructed wetlands by using Cyperus alternifolius plants for nitrate removal from water. *Iranian Journal of Health and Environment*, 13 (1), 135-148. [In Persian]
9. Gholipour, A., & Stefanakis, A. I. (2021). A full-scale anaerobic baffled reactor and hybrid constructed wetland for university dormitory wastewater treatment and reuse in an arid and warm climate. *Ecological Engineering*, 170, 106360.
10. Gholipour, A., Zahabi, H., & Stefanakis, A. I. (2020). A novel pilot and full-scale constructed wetland study for glass industry wastewater treatment. Chemosphere, 247, 125966.
11. Lotfi, A., & Mamaghninejad, M. (2020). The Use of Sub-Surface Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Cold Arid Climate. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 23 (4), 253-265. [In Persian]
12. Zhu, T., Gao, J., Huang, Z., Shang, N., Gao, J., Zhang, J., & Cai, M. (2021). Comparison of performance of two large-scale vertical-flow constructed wetlands treating wastewater treatment plant tail-water: Contaminants removal and associated microbial community. *Journal of environmental management*, 271, 111564.
13. Kulshreshtha, N. M., Verma, V., Soti, A., Brighu, U., & Gupta, A. B. (2022). Exploring the contribution of plant species in the performance of constructed wetlands for domestic wastewater treatment. *Bioresource Technology Reports*, 101038 p.
14. Jack, H. (2021). Engineering Design, Planning, and Management, 2nd ed. Academic Press. **https: //doi.org/ 10.1016/C2019-0-01770-0**.
15. UN-HABITAT. (2008). Constructed Wetlands Manual. UN-HABITAT Water for Asian Cities Program Nepal, Kathmandu. 274p
16. Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2008). Treatment wetlands. CRC press. 89p.
17. Bahmani, O., Mottaghi, S., & Atlasi Pak, V. (2022). Investigating the possibility the Use of Treated Wastewater in phytoremediation of diesel contaminated soil. *Journal of Water and Soil Conservation*, 29 (3), 1-21.
18. Knight, R. L., Kadlec, R. H., & Ohlendorf, H. M. (1999). The use of treatment wetlands for petroleum industry effluents. *Environmental Science Technology*, 33, 973-980.
19. Austin, D. (2006). Influence of cation exchange capacity (CEC) in a tidal flow, flood and drain wastewater

treatment wetland. *Ecological Engineering*, 28 (1), 35-43.
20. Kadlec, R., Knight, R., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P., & Haberl, R. (2000). Constructed wetlands for pollution control: Processes, performance, design and operation. IWA publishing.
21. Lee, B. H., Scholz, M., & Horn, A. (2006). Constructed wetlands: Treatment of Concentrated Storm Water Runoff (Part A). *Environmental Engineering Science*, 23, 320-332.
22. Rousseau, D. P. L., Vanrolleghem, P. A., & Pauw, N. D. (2004). Constructed wetlands in Flanders: a performance analysis. *Ecological Engineering*, 23 (3), 151-163.
23. Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (2011). A three-stage experimental constructed wetland for treatment of domestic sewage: First 2 years of operation. *Ecological Engineering*, 37 (1), 90-98.
24. García-Ávila, F., Patiño-Chávez, J., Zhinín-Chimbo, F., Donoso-Moscoso, S., Flores del Pino, L., & Avilés-Añazco, A. (2019). Performance of Phragmites Australis and Cyperus Papyrus in the treatment of municipal wastewater by vertical flow subsurface constructed wetlands. International Soil and Water Conservation Research.
25. Wallace, S. D. (2006). Feasibility, Design Criteria, and O & M Requirements for Small Scale Constructed Wetland Wastewater Treatment Systems. IWA Publishing, Volume 5.
26. USGS. (2009). Processing of Water Samples Instructions for Filed Use of Spike, Solutions for Organic-Analyte Samples. Sandstrom, M.W. and Lewis, J.A. Chapter A5 In: Processing of Water Samples. 8 p.
27. Mitterer-Reichmann, G. M. (2002). Data evaluation of constructed wetlands for treatment of domestic wastewater. Paper presented at the 8th international conference on wetland treatment for water pollution control, Arusha, Tanzania, September 2002.
28. Brix, H. (2003). Danish experiences with wastewater treatment in constructed wetlands. Paper presented at the International Seminar on "The use of aquatic macrophytes for wastewater treatment in constructed wetlands', Lisbon, Portugal, May 2003.
29. Machado, A. I., Beretta, M., Fragoso, R., & Duarte, E. (2017). Overview of the state of the art of constructed wetlands for decentralized wastewater management in Brazil. *Journal of Environmental Management*, 187, 560-570.
30. Moreira, F. D., & Oliveira Dias, E. H. (2020). Constructed wetlands applied in rural sanitation: a review. *Environmental Research*, 110016 p.
31. Parde, D., Patwa, A., Shukla, A., Vijay, R., Killedar, D. J., & Kumar, R. (2021). A review of constructed wetland on type, treatment and technology of wastewater. *Environmental Technology and Innovation*, 21, 101261.
32. Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2014). Vertical Flow Constructed Wetlands, Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment. Elsevier Inc. publication. 329 p.
33. Rozema, E., Vander Zaag, A., Wood, J., Drizo, A., Zheng, Y., Madani, A., & Gordon, R. (2016). Constructed Wetlands for Agricultural Wastewater Treatment in Northeastern North America: A Review. *Water*, 8 (5), 173.
34. Weedon, C. M. (2003). Compact vertical flow constructed wetland systems - first two years' performance. *Water Science and Technology*, 48 (5), 15-23.
35. Sanchez, A. A., Ferreira, A. C., Stopa, J. M., Cardoso Bellato, F., Araújo de Jesus, T., Gomes Coelho, L. H., Domingues, M. R., Subtil, E. L., Matheus, D. R., & Frederigi Benassi, R. (2018). Organic Matter, Turbidity, and Apparent Color Removal in Planted (*Typha* sp. and Eleocharis sp.) and Unplanted Constructed Wetlands. *Journal of Environmental Engineering*, 144 (10), 1-12.
36. Zhao, Y. J., Liu, B., Zhang, W. G., Ouyang, Y., & An, S. Q. (2010). Performance of pilot-scale vertical-flow constructed wetlands in responding to variation in influent C/N ratios of

simulated urban sewage. *Bioresource Technology*, 101 (6), 1693-1700.

37. Sgroi, M., Pelissari, C., Roccaro, P., Sezerino, P. H., García, J., Vagliasindi, F. G. A., & Ávila, C. (2018). Removal of organic carbon, nitrogen, emerging contaminants and fluorescing organic matter in different constructed wetland configurations. *Chemical Engineering Journal*, 332, 619-627.

38. Cooper, P. F. (2005). The performance of vertical flow constructed wetland systems with special reference to the significance of oxygen transfer and hydraulic loading rates. *Water Science and Technology*, 51 (9), 81-90.