

Comparison of Horizontal and Vertical Constructed Wetlands with Coagulation-Flocculation-Filtration Unit Efficiencies in the Polishing of Industrial Wastewater Effluent: A Case Study of Mourchekhort Industrial Estate Wastewater Treatment Plant, Iran

Mohammad Mehdi Amin¹, Fatemeh Karimi², Ali Fatehizadeh¹, Hossein Movahedian-Attar¹

Original Article

Abstract

Background: Industrial wastewater treatment has always been difficult and costly due to the presence of different pollutants with high concentration. The use of constructed wetlands is economical due to not needing any external energy sources and materials and equipment to reduce pollutants. The aim of this study was to determine the efficiency of horizontal and vertical subsurface wetlands in the removal of pollutants from the wastewater of the Mourchekhort Industrial Estate, Iran, and compare it with performance of the conventional coagulation-flocculation-filtration unit of reuse process.

Methods: Two horizontal and vertical wetlands in pilot scale and two control (no plant) reactors were operated for eight months. Removal efficiency of total suspended solids (TSS), chemical oxygen demand (COD), turbidity, phosphorous and nitrogen compounds, and index bacteria were evaluated. Horizontal wetland was considered with dimensions of $0.8 \times 0.65 \times 2$ m and floor slope of 1%. Hydraulic retention time (HRT) and incoming sewage flow rate were set to 6 days and $0.2 \text{ m}^3/\text{d}$, respectively. Vertical subsurface reed had dimensions of $4 \times 0.60 \times 2$ m and floor slope was equal to 1%. The control pilot (no plant) was designed exactly the same as the horizontal and vertical samples. The results were compared with coagulation-flocculation-filtration process efficiency.

Findings: The efficiency of vertical wetland in removal of TSS, COD, turbidity, phosphorus and nitrogen compounds, and index bacteria was 58.1%, 62.4%, 73.4%, 20.4%, 21.3%, and 40.5%, respectively. For horizontal wetlands, the efficiency was obtained as 57.0%, 52.6%, 70.3%, 22.4%, 18.2%, 39.1%, respectively, and for conventional coagulation-flocculation-filtration treatment process, it was 85.3%, 69.7%, 81.5%, 69.2%, 73.9%, and 78.2%, respectively.

Conclusion: Although vertical wetland was more efficient than horizontal one for most of the operation parameters, both of these wetlands were less efficient than conventional coagulation-flocculation-filtration unit of reuse process. Although operating costs of wetlands are low, these systems alone cannot be considered as a substitute for the conventional pre-treatment process of coagulation-flocculation-filtration because of their low performance for the purpose of polishing.

Keywords: Wetlands; Water purification; Industrial waste; Reuse

Citation: Amin MM, Karimi F, Fatehizadeh A, Movahedian-Attar H. Comparison of Horizontal and Vertical Constructed Wetlands with Coagulation-Flocculation-Filtration Unit Efficiencies in the Polishing of Industrial Wastewater Effluent: A Case Study of Mourchekhort Industrial Estate Wastewater Treatment Plant, Iran. J Health Syst Res 2022; 17(4): 250-60.

1- Associate Professor, Department of Environmental Health Engineering, School of Health AND Environment Research Center, Research Institute for Primordial Prevention of Non-Communicable Diseases, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran

2- MSc Student, Student Research Committee AND Department of Environmental Health Engineering, School of Health AND Environment Research Center, Research Institute for Primordial Prevention of Non-Communicable Diseases, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran

Corresponding Author: Fatemeh Karimi; MSc Student, Student Research Committee AND Department of Environmental Health Engineering, School of Health AND Environment Research Center, Research Institute for Primordial Prevention of Non-Communicable Diseases, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran; Email: abjala.co@gmail.com

مقایسه کارایی نيزارهای مصنوعی افقی و عمودی و فرایند انعقاد، لخته‌سازی و فیلتراسیون واحد استحصال آب در جلادهی پساب تصفیه‌خانه فاضلاب صنعتی (مطالعه موردی: تصفیه‌خانه شهرک صنعتی مورچه‌خورت)

محمد مهدی امین^۱، فاطمه کریمی^۲، علی فاتحی‌زاده^۱، حسین موحدیان عطار^۱

مقاله پژوهشی

چکیده

مقدمه: تصفیه فاضلاب‌های صنعتی به دلیل وجود آلاینده‌های متفاوت با غلظت‌های بالا، همواره مشکل و پرهزینه بوده است. کاربرد نيزارهای مصنوعی به دلیل عدم نیاز به منابع انرژی خارجی و مواد و تجهیزات لازم جهت کاهش آلاینده‌ها، مقرون به صرفه می‌باشد. هدف از انجام پژوهش حاضر، تعیین کارایی نيزارهای زیرسطحی افقی و عمودی در حذف آلاینده‌ها از فاضلاب شهرک صنعتی مورچه‌خورت و مقایسه آن با کارایی سیستم انعقاد، لخته‌سازی و فیلتراسیون واحد استحصال پساب در تصفیه‌خانه این شهرک صنعتی بود.

روش‌ها: دو نيزار افقی و عمودی در ابعاد پایلوت و دو رآکتور شاهد (بدون گیاه) به مدت هشت ماه بهره‌برداری شد و کارایی آن‌ها در حذف شاخص‌های جامدات معلق (Total suspended solids یا TSS)، اکسیژن‌خواهی شیمیایی (Chemical oxygen demand یا COD)، کدورت، ترکیبات فسفره و نیترژنه و باکتری‌های شاخص بررسی گردید. نيزار افقی دارای ابعاد $0.8 \times 0.65 \times 2$ متر و شیب کف ۱ درصد در نظر گرفته شد. زمان ماند هیدرولیکی، ۶ روز و دبی فاضلاب ورودی، 0.2 مترمکعب در روز تنظیم گردید. نيزار زیرسطحی عمودی دارای ابعاد $2 \times 0.6 \times 4$ متر و شیب کف ۱ درصد بود. پایلوت شاهد (بدون نی) نیز مشابه نمونه‌های افقی و عمودی طراحی گردید. یافته‌ها با کارایی سیستم راهبری انعقاد، لخته‌سازی و فیلتراسیون واحد استحصال پساب مورد مقایسه قرار گرفت.

یافته‌ها: کارایی نيزار عمودی در حذف COD، TSS، کدورت، ترکیبات فسفره و نیترژنه و باکتری‌های شاخص به ترتیب 58.1% ، 62.4% ، 73.4% ، 20.4% ، 21.3% و 40.5% درصد؛ کارایی نيزار افقی به ترتیب 57.0% ، 52.6% ، 70.3% ، 22.4% ، 18.2% و 39.1% درصد و کارایی سیستم انعقاد، لخته‌سازی و فیلتراسیون متداول به ترتیب 85.3% ، 69.7% ، 81.5% ، 69.2% و 73.9% و 78.2% درصد به دست آمد.

نتیجه‌گیری: نيزار عمودی در خصوص بیشتر شاخص‌ها کارایی بالاتری نسبت به افقی داشت، اما هر دو نوع این نيزارها نسبت به فرایند متداول استحصال پساب تصفیه‌خانه، راندمان کمتری را نشان داد. اگرچه هزینه‌های بهره‌برداری نيزار کم است، اما این سیستم‌ها به دلیل کارایی پایین با هدف استحصال به تنهایی، نمی‌توانند به عنوان جایگزین فرایند پیش تصفیه متداول انعقاد، لخته‌سازی و فیلتراسیون واحد استحصال پساب تصفیه‌خانه شهرک صنعتی در نظر گرفته شوند.

واژه‌های کلیدی: نيزار مصنوعی؛ تصفیه آب؛ فاضلاب صنعتی؛ استفاده مجدد

ارجاع: امین محمد مهدی، کریمی فاطمه، فاتحی‌زاده علی، موحدیان عطار حسین. مقایسه کارایی نيزارهای مصنوعی افقی و عمودی و فرایند انعقاد، لخته‌سازی و فیلتراسیون واحد استحصال آب در جلادهی پساب تصفیه‌خانه فاضلاب صنعتی (مطالعه موردی: تصفیه‌خانه شهرک صنعتی مورچه‌خورت). مجله تحقیقات نظام سلامت ۱۴۰۰؛ ۱۷ (۴): ۲۶۰-۲۵۰

تاریخ چاپ: ۱۴۰۰/۱۰/۱۵

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۸/۹

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۵/۲۱

به طور کلی، نيزارهای مصنوعی به سه دسته دارای سطح آزاد آب، با جریان زیرسطحی و نيزارهای مهندسی شده نوظهور و نيزارهای زیرسطحی نیز خود به دو دسته جریان افقی و عمودی تقسیم می‌شوند (۱). نيزارهای با جریان افقی شامل بستر سنگی هستند که توسط یک لایه نفوذناپذیر آب‌بندی شده است و گیاه مورد نظر در آن کاشته می‌شود. در این نيزارها، جریان فاضلاب ورودی از بستر متخلخل عبور می‌کند و پساب‌های تصفیه شده در ناحیه خروجی تخلیه می‌شوند (۸). در نيزارهای با جریان عمودی، فاضلاب پس از گذراندن مراحل پیش تصفیه، از طریق

مقدمه

اغلب سیستم‌های تصفیه فاضلاب مشکلاتی مانند بالا بودن هزینه ساخت، مصرف زیاد انرژی، بهره‌برداری پیچیده و نیازمندی به تصفیه و دفع لجن دارند (۱، ۲). در طول دهه‌های گذشته، به کارگیری نيزارهای مصنوعی جهت تصفیه انواع مختلفی از پساب بررسی شده است (۳-۵). نيزارهای مصنوعی به دلیل عدم نیاز به استفاده از منابع انرژی خارجی و مواد و تجهیزات لازم جهت کاهش آلاینده‌ها، بسیار مقرون به صرفه هستند (۶، ۷).

۱- دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت و مرکز تحقیقات محیط زیست، پژوهشکده پیشگیری اولیه از بیماری‌های غیر واگیر، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، کمیته تحقیقات دانشجویی و گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت و مرکز تحقیقات محیط زیست، پژوهشکده پیشگیری اولیه از بیماری‌های غیر واگیر، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران

نویسنده مسؤول: فاطمه کریمی؛ دانشجوی کارشناسی ارشد، کمیته تحقیقات دانشجویی و گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت و مرکز تحقیقات محیط زیست، پژوهشکده پیشگیری اولیه از بیماری‌های غیر واگیر دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران

Email: abjala.co@gmail.com

حاضر سعی شد تا کارایی سیستم نيزار مصنوعي زیرسطحي با جریان های افقی و عمودی در تصفيه پساب مورد بررسی قرار گیرد. همچنین، نتایج حاصل از بررسی کارایی نيزارها با کارایی راهبري متداول تصفيه خانه یعنی پکیج انعقاد، لخته سازی و فیلتراسیون به عنوان پیش تصفيه بخش استحصال جهت تأمین پساب با کیفیت مناسب برای ورود به واحد اولترافیلتراسیون در تصفيه خانه فاضلاب صنعتی شهرک صنعتی مورچه خورت مقایسه شد.

روشها

در مطالعه حاضر، دو دستگاه پایلوت نيزار زیرسطحي افقی و زیرسطحي عمودی بررسی گردید. نمونه های مورد نظر، به مدت هشت ماه با استفاده از پساب خروجی از واحد تصفيه بیولوژیک تصفيه خانه شهرک صنعتی مورچه خورت پس از متعادل سازی به صورت تقلی تغذیه شد. مشخصات فاضلاب ورودی به پایلوت های مورد بررسی در جدول ۱ ارایه شده است.

نيزار افقی دارای ابعاد $2 \times 0.165 \times 0.8$ متر و شیب کف ۱ درصد در نظر گرفته شد. در این نيزار، جریان فاضلاب ورودی در ارتفاع ۵ سانتی متر پایین تر از سطح وارد و سپس در قسمت انتهایی توسط لوله های زهکش تخلیه شد. زمان ماند هیدرولیکی، ۶ روز و دبی فاضلاب ورودی، 0.2 مترمکعب در روز تنظیم گردید.

جدول ۱. مشخصات فاضلاب ورودی به نمونه های مورد بررسی

شاخص	میانگین \pm انحراف معیار
TSS (میلی گرم در لیتر)	3671 ± 1001
COD (میلی گرم در لیتر)	5279 ± 1846
کدورت (NTU)	2107 ± 170
ترکیبات فسفره (میلی گرم در لیتر)	0.11 ± 0.02
ترکیبات نیتروژنه (میلی گرم در لیتر)	10200 ± 7636
TC (محتمل ترین عدد در ۱۰۰ میلی لیتر)	16366 ± 2901
FC (محتمل ترین عدد در ۱۰۰ میلی لیتر)	12220 ± 2100

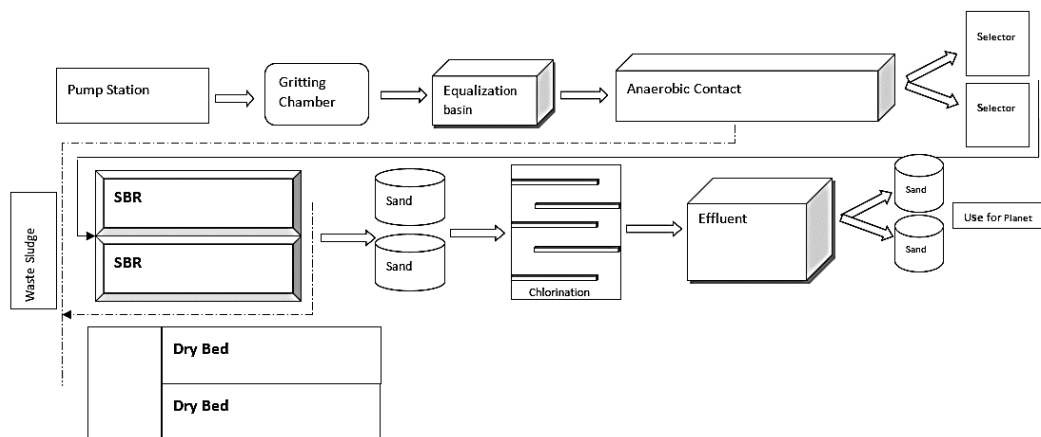
TSS: Total suspended solids; COD: Chemical oxygen demand; TC: Total coliform; FC: Fecal coliform

پمپ به صورت جریان عمودی وارد نيزار و پس از عبور از بستر، توسط لوله های زهکش تعبیه شده در کف، به خارج تخلیه می شود (۹).

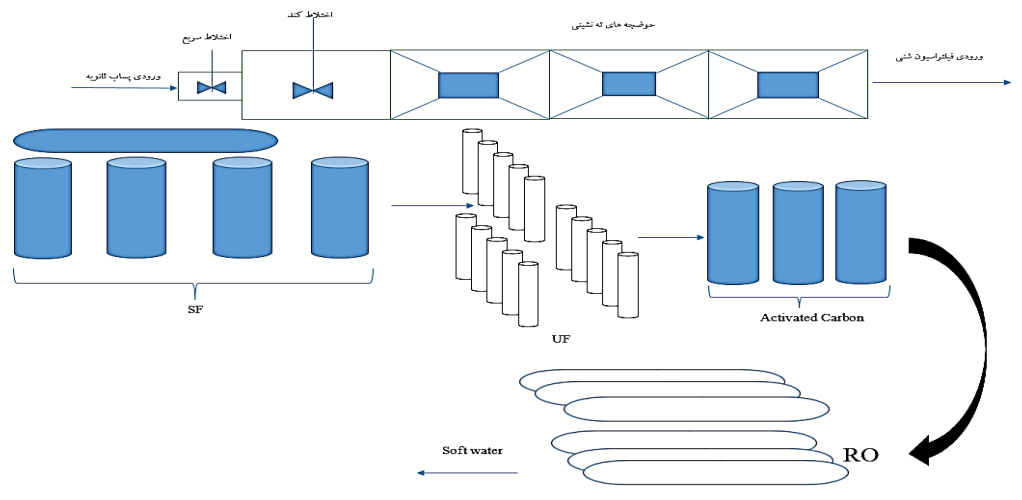
نتایج مطالعات پیشین نشان داد که کارایی نيزارهای مصنوعي در حذف شاخص هایی همچون اکسیژن خواهی شیمیایی (COD) یا (Chemical oxygen demand) در حدود ۶۰ تا ۸۰ درصد، جامدات معلق (Total suspended solids یا TSS) در دامنه ۸۰ تا ۹۹ درصد، فسفر کل (Total phosphorus یا TP) در دامنه ۳۰ تا ۶۰ درصد و نیتروژن کل (Total nitrogen یا TN) در حدود ۲۰ تا ۶۰ درصد است (۶، ۱). تحقیق Zhang و همکاران در چین با هدف به کارگیری نيزار عمودی در تصفيه پیشرفته پساب ثانویه تصفيه خانه فاضلاب شهری انجام شد. در پژوهش آن ها، نیتروژن تقریباً به طور کامل حذف گردید و میزان حذف COD حدود ۸۳-۶۶ درصد و میزان حذف فسفر ۹۰-۸۱ درصد گزارش شد. غلظت COD، نیتروژن و فسفر در پساب خروجی به ترتیب کمتر از 30 ، $1/5$ و $0/5$ میلی گرم در لیتر بود. همچنین، تأمین شرایط هوازی، بی هوازی، آنوکسیک و مواد به کار رفته در بستر، از عوامل مؤثر در ایجاد کارایی بالای نيزارها عنوان گردید (۱۰).

شهرک صنعتی مورچه خورت در ۵۰ کیلومتری شمال غرب شهر اصفهان واقع شده است. ۷۰ درصد از صنایع مستقر در این شهرک علاوه بر نیاز به آب شرب، در خط تولید به آب با کیفیت مطلوب نیازمند هستند که اغلب از محل فروش آب شرب در شاهین شهر و گاهی از نیروگاه برق اصفهان تأمین می گردد. فاضلاب این شهرک مخلوطی از فاضلاب صنایع مختلف مانند صنایع شیمیایی، نساجی، فلزی، غذایی و فاضلاب بهداشتی است. در حال حاضر تصفيه خانه فاضلاب این شهرک صنعتی از دو بخش تصفيه فاضلاب صنعتی و استحصال پساب تشکیل شده است. شکل ۱ بخش تصفيه فاضلاب و شکل ۲ شماتیک واحد استحصال پساب تصفيه خانه شهرک صنعتی مورچه خورت را نشان می دهد. تأمین مواد اولیه و نگهداری فرایندهای پیش تصفيه به کار گرفته شده در بخش استحصال پساب این شهرک بسیار پرهزینه است و بهره برداری آن ها مشکلاتی به همراه دارد.

مطالعات محدودی در زمینه سیستم های طبیعی تصفيه فاضلاب صنعتی با استفاده از نيزارهای مصنوعي زیرسطحي در ایران انجام شده است و در پژوهش



شکل ۱. شماتیک واحدهای تصفيه فاضلاب صنعتی در تصفيه خانه شهرک صنعتی مورچه خورت



شکل ۲. شماتیک واحدهای استحصال پساب در تصفیه‌خانه شهرک صنعتی مورچه‌خورت

روش‌های مندرج در کتاب روش‌های استاندارد آزمایش‌های آب و فاضلاب مورد آزمایش قرار گرفت (۱۱). شاخص‌های فیزیکوشیمیایی شامل COD بر اساس روش رنگ‌سنجی و TSS بر اساس روش وزن‌سنجی ارزیابی شد. اجزای نیتروژنه شامل نیتروژن کل Kjeldahl (Total Kjeldahl nitrogen) یا TKN) آمونیاک (NH_3)، آمونیوم (NH_4^+) و نیتروژن کل (N_2) و اجزای فسفره شامل فسفات (PO_4^{2-})، P_2O_5 و ارتوفسفات (P) با استفاده از دستگاه Multi Direct spectrophotometer اندازه‌گیری و شاخص‌های بیولوژیکی شامل کلیفرم کل (Total coliform یا TC) و کلیفرم مدفوعی (FC) یا (Fecal coliform) با استفاده از روش تخمین چند لوله‌ای مورد سنجش قرار گرفت.

یافته‌ها

در جدول ۲ خلاصه‌ای از مشخصات فاضلاب ورودی و خروجی هر یک از نزارهای مورد بررسی و کارایی آن‌ها در کاهش بار آلودگی فاضلاب ورودی آمده است. طبق نتایج ارایه شده، بیشترین راندمان حذف در مورد شاخص TSS مربوط به نزار عمودی ($10/7 \pm 5/1$ درصد) و نزار افقی با $7/9 \pm 5/0$ درصد) بود. راکتورهای شاهد عمودی ($10/3 \pm 5/5$ درصد) و شاهد افقی ($9/8 \pm 4/5$ درصد) راندمان کمتری نسبت به راکتورهای اصلی داشتند. راکتور شاهد عمودی نسبت به شاهد افقی، راندمان بالاتری را در حذف جامدات نشان داد. در خصوص COD، بیشترین کارایی مربوط به راکتور عمودی ($8/8 \pm 6/4$ درصد) و کمترین میزان مربوط به راکتور شاهد افقی ($4/1 \pm 4/8$ درصد) بود. بیشترین میزان حذف ترکیبات فسفره در نزار افقی ($5/7 \pm 2/4$ درصد) گزارش شد و نزار عمودی راندمان کمتری ($8/3 \pm 2/4$ درصد) داشت. ترکیبات نیتروژنه در نزار عمودی ($10/8 \pm 2/3$ درصد) بیشترین میزان حذف را به خود اختصاص داد. شاخص‌های باکتریایی نیز در نزار عمودی به نسبت نزار افقی و راکتورهای شاهد، درصد حذف بیشتری داشتند. میانگین مقادیر شاخص‌های مورد بررسی تحقیق حاضر طی راهبری معمول فرایند انعقاد، لخته‌سازی و فیلتراسیون واحد استحصال تصفیه‌خانه شهرک صنعتی مورچه‌خورت در جدول ۳ ارایه شده است.

جهت جلوگیری از گرفتگی پایلوت، قسمت ورودی، خروجی و سطح پایلوت، از دانه‌های شن با اندازه ۲۰-۵۰ میلی‌متر و جهت پر کردن بسترها از ماسه نخودی با اندازه ۳-۲ میلی‌متر استفاده شد.

نیزار زیرسطحی عمودی دارای ابعاد $4 \times 0/60 \times 2$ متر و شیب کف ۱ درصد و جریان به صورت عمودی و رو به پایین بود. کف بستر پایلوت با استفاده از یک لایه ژئوممبران عایق شده بود. جهت هوادهی بهتر ریشه‌های نی، دو لوله به صورت افقی در کف پایلوت نصب گردید تا جریان هوای محیط به بستر پایلوت هدایت شود. از گراول‌های درشت به اندازه ۳-۲ سانتی‌متر در کف جهت جلوگیری از گرفتگی استفاده و سایر قسمت‌های نیزار عمودی از شن‌های با اندازه ۳-۲ میلی‌متر پر شد. جهت توزیع بهتر جریان، یک لایه ژئوتکتایل بین دو لایه گراول در نظر گرفته شد. وتلند عمودی به صورت منقطع و با بارگذاری ۶ بار در روز بهره‌برداری گردید. جریان به صورت عمودی در سطح پایلوت وارد و از طریق لوله‌های زهکش کف، تخلیه شد. جهت توزیع مناسب و یکنواخت فاضلاب ورودی در سطح پایلوت، شبکه‌ای از لوله‌های مشبک بر سطح بستر پایلوت نصب گردید. حجم پساب ورودی به وتلند در هر بارگذاری، ۱۵۰ لیتر و میزان بارگذاری آلی آن، $1/8$ گرم در 150 لیتر بود.

در اواسط اردیبهشت ماه (فصل نسبتاً گرم)، کاشت نی‌ها با تراکم ۶ ریزوم در مترمربع از سطح نیزارهای مورد بررسی انجام شد. نی مورد استفاده از نوع فراگماتیس بانام علمی *Phragmites australis* بود که در اطراف تصفیه‌خانه شهرک صنعتی مورچه‌خورت به وفور یافت می‌شود. همچنین، جهت تعیین کارایی ذاتی نیزارها در کاهش بار آلودگی فاضلاب، دو پایلوت نیزار مشابه با نمونه‌های مذکور ساخته شده که فاقد نی بودند.

جهت نمونه‌برداری از پساب ورودی به نیزارهای مورد بررسی و همچنین، جریان خروجی، از ظروف پلاستیکی به حجم ۱ لیتر به منظور آنالیزهای فیزیکوشیمیایی و از ظروف شیشه‌ای استریل به حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر برای انجام آزمایش‌های میکروبی استفاده شد. لازم به ذکر است که نمونه‌ها به صورت لحظه‌ای از پساب ورودی و پساب خروجی از پایلوت‌ها برداشت و به آزمایشگاه تصفیه‌خانه شهرک صنعتی مورچه‌خورت انتقال یافت و بلافاصله بر اساس

جدول ۲. میانگین مقادير شاخص‌های خروجی در نيزارهای مورد بررسی

شاخص	نيزار عمودی		نيزار افقی	
	رأكتور اصلی	رأكتور شاهد	رأكتور اصلی	رأكتور شاهد
TSS (میلی‌گرم در لیتر)	کارایی (درصد) خروجی	کارایی (درصد) خروجی	کارایی (درصد) خروجی	کارایی (درصد) خروجی
	۱۴/۵۴	۵۸/۱ ± ۱۰/۷	۱۶	۵۶/۵ ± ۱۰/۳
COD (میلی‌گرم در لیتر)	کارایی (درصد) خروجی	کارایی (درصد) خروجی	کارایی (درصد) خروجی	کارایی (درصد) خروجی
	۱۹/۶۳	۶۲/۴ ± ۸/۸	۲۰	۵۳/۱ ± ۷/۴
کدورت (NTU)	کارایی (درصد) خروجی	کارایی (درصد) خروجی	کارایی (درصد) خروجی	کارایی (درصد) خروجی
	۵/۶۴	۷۳/۴ ± ۹/۴	۷/۰۲	۶۶/۷ ± ۹/۸
ترکیبات فسفره (میلی‌گرم در لیتر)	کارایی (درصد) خروجی	کارایی (درصد) خروجی	کارایی (درصد) خروجی	کارایی (درصد) خروجی
	۱۳/۰۷	۲۰/۴ ± ۸/۳	۴۳	۱۶/۲ ± ۱۰/۸
ترکیبات نیتروژنه (میلی‌گرم در لیتر)	کارایی (درصد) خروجی	کارایی (درصد) خروجی	کارایی (درصد) خروجی	کارایی (درصد) خروجی
	۱۲۹/۴۲	۲۱/۳ ± ۱۰/۸	۱۱۰/۸	۱۵/۸ ± ۷/۸
TC (محتمل‌ترین عدد در ۱۰۰ میلی‌لیتر)	کارایی (درصد) خروجی	کارایی (درصد) خروجی	کارایی (درصد) خروجی	کارایی (درصد) خروجی
	۹۸۴۱/۷۰	۴۰/۵ ± ۵/۱	۱۲۰۰۰	۲۶/۵ ± ۶/۶
FC (محتمل‌ترین عدد در ۱۰۰ میلی‌لیتر)	کارایی (درصد) خروجی	کارایی (درصد) خروجی	کارایی (درصد) خروجی	کارایی (درصد) خروجی
	۷۴۰۸/۳۳	۴۰/۲ ± ۸/۶	۹۰۰۰	۲۷/۲ ± ۵/۴

TSS: Total suspended solids; COD: Chemical oxygen demand; TC: Total coliform; FC: Fecal coliform

داده‌های مربوط به کارایی بر اساس میانگین \pm انحراف معیار گزارش شده است.

که پرهزینه هستند و گاهی مشکل کارکرد نامناسب دارند، در نظر گرفت (۵). بر اساس داده‌های جدول ۲، بیشترین و کمترین راندمان حذف به ترتیب مربوط به TSS و ترکیبات فسفره بود. مقایسه نتایج نيزارهای افقی و عمودی نشان می‌دهد که نيزار عمودی در حذف شاخص‌های مورد نظر (به جزء فسفر)، اندکی بهتر از نيزار افقی عمل کرده است. همچنین، کارایی حذف کلیه شاخص‌ها در طی راهبري متداول تصفيه‌خانه بیشتر از نيزارها بوده است. راندمان نيزار عمودی، افقی و راهبري متداول تصفيه‌خانه در حذف COD به ترتیب $۸۸/۸ \pm ۶۲/۴$ ، $۹/۷ \pm ۵۲/۶$ و $۹/۳ \pm ۶۹/۷$ درصد به دست آمد. مکانیسم‌های دخیل در حذف مواد آلی به ویژه COD و Biochemical oxygen demand (BOD) با استفاده از نيزارها شامل واکنش‌های فیزیکی (ته‌نشینی و غربال‌گیری)، شیمیایی (جذب آلاینده‌ها بر دانه‌های بستر) و فعالیت‌های میکروبی است. با توجه به فیلتراسیون فیزیکی که طی حرکت فاضلاب از بستر متخلخل رخ می‌دهد، بخشی از COD فاضلاب حذف خواهد شد (۱۲). تجمع باکتری‌ها در بستر نيزار، سبب تشدید ترشح مواد کاتالیزور و در نتیجه، افزایش سرعت واکنش‌های تجزیه و هیدرولیز مواد آلی می‌گردد (۶). افزایش زمان راهبري نيزارها، منجر به بهبود کارایی حذف COD می‌شود که می‌تواند ناشی از افزایش تعداد نی‌ها در بستر باشد (شکل ۳، قسمت الف).

بر اساس داده‌های جدول ۳، راهبري متداول واحد استحصال تصفيه‌خانه شهرک صنعتی مورچه‌خورت در حذف شاخص‌ها، راندمان‌های بسیار بالاتری نسبت به نيزارها داشت. بیشترین کارایی حذف در خصوص شاخص TSS با $۱۱/۹ \pm ۸۵/۳$ درصد و کمترین حذف در مورد ترکیبات فسفره با $۶۹/۲ \pm ۵/۷$ درصد به دست آمد.

شکل ۳ تغییرات راندمان حذف طی دوره راهبري نيزارها را به ترتیب در خصوص شاخص‌های کدورت، TSS، COD، ترکیبات فسفره، ترکیبات نیتروژنه و باکتری‌های شاخص نشان می‌دهد. در قسمت الف شکل ۳، علاوه بر راندمان حذف COD، تأثیر زمان و میزان همبستگی نتایج نشان داده شده است.

ترکیبات نیتروژنه به صورت آمونیاک، آمونیوم، نیتروژن مولکولی و نیتروژن کل به تفکیک و برای هر نيزار در شکل ۳ (قسمت‌های و، ز) و ترکیبات فسفره در شکل ۳ (قسمت‌های د، ه) نشان داده شده است.

بحث

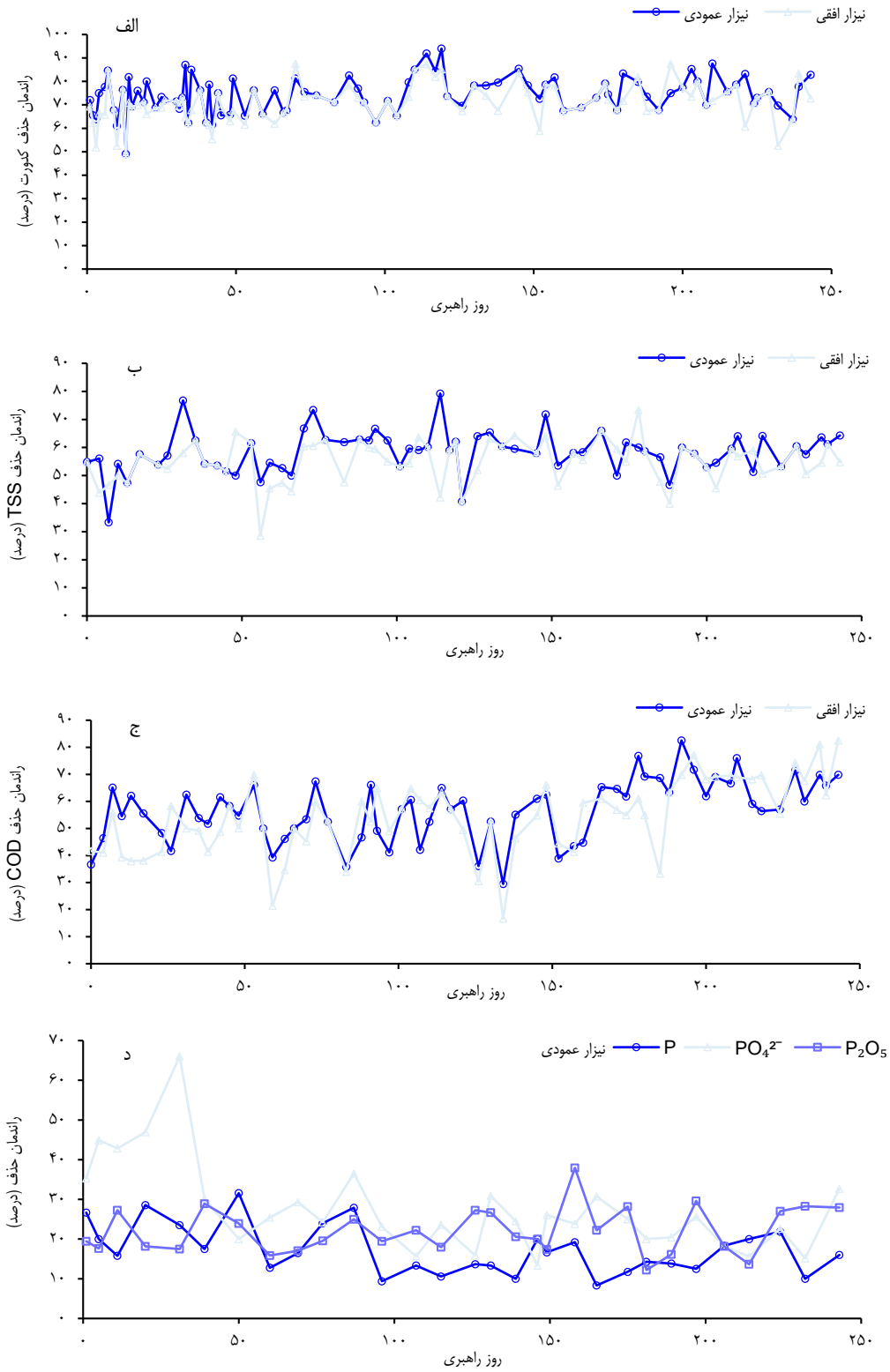
تصفیه فاضلاب در نيزارها که با استفاده از فرایندهای فیزیکی، میکروبی و جذب توسط گیاه صورت می‌گیرد را می‌توان به عنوان جایگزین فرایندهای شیمیایی تصفیه

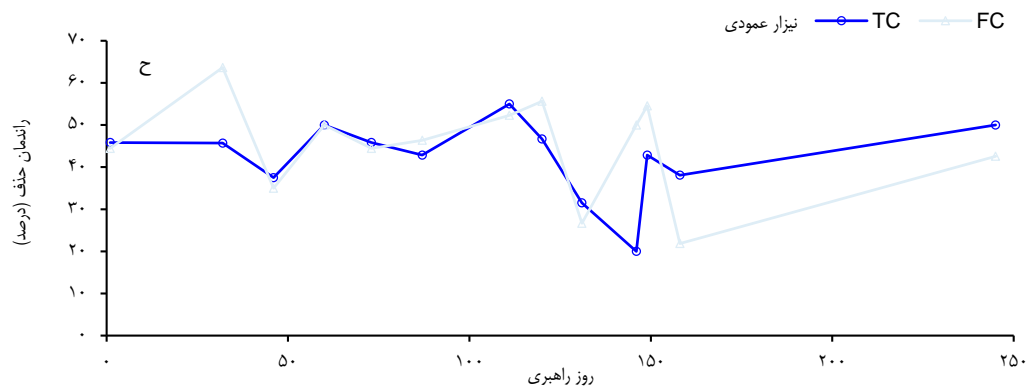
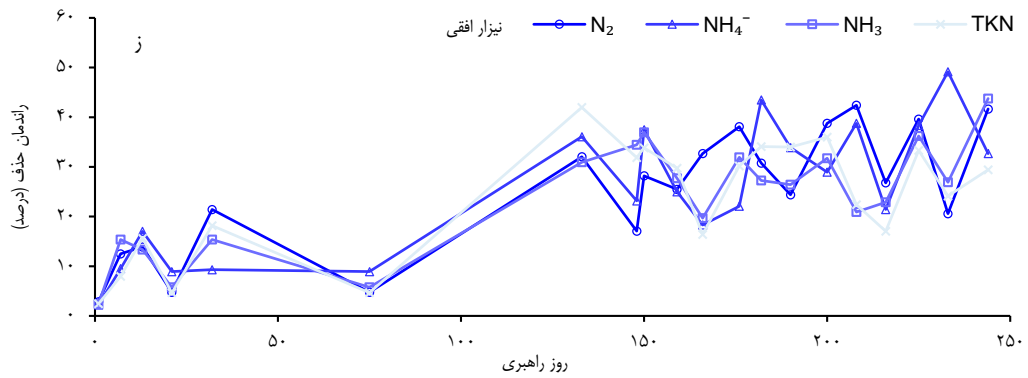
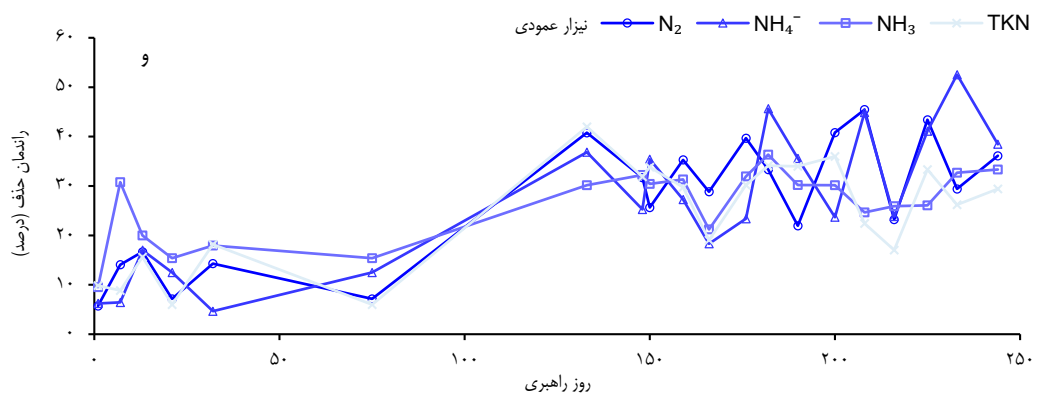
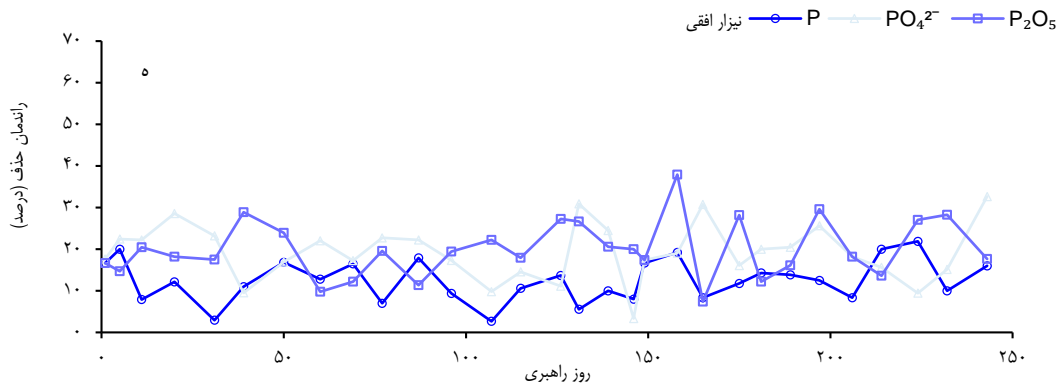
جدول ۳. میانگین مقادير شاخص‌های خروجی طی راهبري فرايند انعقاد، لخته‌سازی و فیلتراسیون واحد

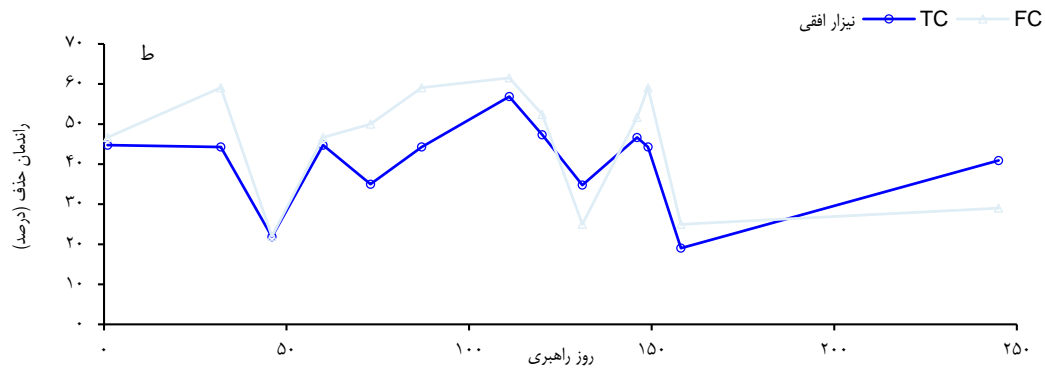
استحصال تصفيه‌خانه شهرک صنعتی مورچه‌خورت

شاخص	خروجی	کارایی (درصد) (میانگین \pm انحراف معیار)
TSS (میلی‌گرم در لیتر)	۷/۳۰	۸۵/۳ ± ۱۱/۹
COD (میلی‌گرم در لیتر)	۱۹/۲۳	۶۹/۷ ± ۹/۳
کدورت (NTU)	۲/۸۶	۸۱/۵ ± ۴/۱
ترکیبات فسفره (میلی‌گرم در لیتر)	۲۱/۲۳	۶۹/۲ ± ۵/۷
ترکیبات نیتروژنه (میلی‌گرم در لیتر)	۲۴/۱۲	۷۳/۹ ± ۸/۱
TC (محتمل‌ترین عدد در ۱۰۰ میلی‌لیتر)	۳۴۰۰/۰۰	۷۸/۲ ± ۴/۳
FC (محتمل‌ترین عدد در ۱۰۰ میلی‌لیتر)	۲۳۰۰/۰۰	۷۹/۸ ± ۲/۹

TSS: Total suspended solids; COD: Chemical oxygen demand; TC: Total coliform; FC: Fecal coliform







شکل ۳. تغییرات راندمان حذف (الف: کدورت در نيزار افقی و عمودی، ب: TSS در نيزار افقی و عمودی، ج: COD در نيزار افقی و عمودی، د: فسفر در نيزار عمودی، ه: فسفر در نيزار افقی، و: ترکیبات نیتروژنه در نيزار عمودی، ز: ترکیبات نیتروژنه در نيزار افقی، ح: باکتری‌های شاخص در نيزار عمودی و ط: باکتری‌های شاخص در نيزار افقی)

TKN: Total Kjeldahl nitrogen; TC: Total coliform; FC: Fecal coliform

مکانیسم‌های اصلی مؤثر حذف TSS و کدورت از فاضلاب در نيزارها شامل ته‌نشینی و غربالگری توسط بستر نيزار و جذب توسط میکروارگانیسم‌ها می‌باشد (۱۸، ۵). میانگین کلی نيزارهای افقی و عمودی در حذف TSS به ترتیب $57/0 \pm 10/7$ و $58/1 \pm 10/7$ درصد و در مورد کدورت به ترتیب $9/42 \pm 73/4$ و $6/72 \pm 70/3$ درصد بود که نشان دهنده راندمان بهتر نيزارهای عمودی نسبت به افقی در حذف TSS و کدورت است (جدول ۲). نتایج برخی مطالعات نشان داده است که افزایش زمان راهبری نيزارها، موجب بهبود راندمان حذف TSS و کدورت از فاضلاب می‌شود (۱۹، ۶). با این حال، با افزایش راهبری نيزارها در تحقیق حاضر، تغییرات چشمگیری در کارایی نيزارها در حذف TSS و کدورت مشاهده نشد (شکل ۳، قسمت ب). حذف TSS و کدورت در نيزارها را می‌توان ناشی از وجود ریشه گیاهان در بستر و اشغال حفرات بین دانه‌های بستر و کاهش فاصله مورد نیاز برای ته‌نشینی ذرات دانست که نتیجه آن، بهبود راندمان حذف TSS و کدورت است. همچنین، طی فصول سرد (انتهای دوره راهبری نيزارها)، راندمان نيزارها در حذف TSS اندکی کاهش یافت که شاید ناشی از کاهش فعالیت‌های بیولوژیکی به علت کاهش دمای هوا باشد (۲۰). طی راهبری معمول تصفیه‌خانه شهرک صنعتی مورچه‌خورت، میانگین حذف TSS، $11/9 \pm 85/3$ درصد و برای کدورت $4/1 \pm 81/5$ درصد بود که بیش از کارایی نيزارها در حذف TSS و کدورت است (جدول ۳) و این امر ناشی از به کارگیری مواد منعقدکننده، زمان ماند مناسب در حوضچه‌های ته‌نشینی و کاربرد صافی‌های شنی است. نتایج پژوهش یوسفی و همکاران در ساری که با هدف ارزیابی کارایی نيزار مصنوعی زیرسطحی با جریان افقی در تصفیه فاضلاب انجام شد، نشان داد که کارایی حذف در حوضچه دارای گیاه نی فراگماتیس استرالیس برای TSS حدود $76/18$ درصد می‌باشد (۲۱) که بیشتر از راندمان مطالعه حاضر بود. همچنین، در تحقیق اسلامی و همکاران، عملکرد برکه‌های تثبیت و نيزار مصنوعی زیرسطحی در تصفیه فاضلاب شهری یزد بررسی شد و در آن، ۷۲ نمونه از ورودی و خروجی نيزار مصنوعی و برکه تثبیت طی یک سال برداشته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. داده‌های به دست آمده نشان داد که راندمان حذف TSS در برکه‌های تثبیت و نيزار مصنوعی به

نتایج مطالعات گذشته نشان داده است که راندمان حذف COD و TSS در نيزارها می‌تواند تا حدود ۹۰ درصد نیز افزایش یابد (۱۴، ۱۳). نيزار عمودی دارای راندمان بهتری نسبت به نيزار افقی بود و میانگین راندمان حذف COD در این نيزار، $8/8 \pm 62/4$ درصد به دست آمد (شکل ۳، قسمت الف). از دیگر مکانیسم‌های دخیل در حذف COD، تجزیه بی‌هوازی توسط میکروارگانیسم‌ها است. بستر نيزار عمودی به دلیل وجود شرایط بی‌هوازی (ناشی از عمق زیاد)، می‌تواند باعث رشد باکتری‌های بی‌هوازی و در نتیجه، بهبود حذف COD شود (۱۵). طی راهبری معمول، میانگین کارایی فرایند در حذف COD حدود ۶۴ درصد می‌باشد که اختلاف چندانی با نيزار عمودی ندارد (جدول ۳). فرزادکیا و همکاران در تحقیق خود که با هدف بررسی کارایی نيزارها در تصفیه فاضلاب شهری یزد انجام دادند، راندمان حذف ۷۰ درصدی را برای شاخص COD گزارش کردند (۱۶) که راندمان بالاتری نسبت به نتیجه پژوهش حاضر است. همچنین، در مطالعه Mustapha و همکاران که با هدف جلادهی پساب ثانویه تصفیه‌خانه فاضلاب با استفاده از نيزارهای مصنوعی با جریان عمودی انجام گردید، میانگین حذف به دست آمده برای شاخص COD، حدود ۶۳ تا ۶۵ درصد گزارش شد (۱۷) که با یافته‌های تحقیق حاضر مطابقت داشت.

در پژوهش حاضر، به علت عدم اندازه‌گیری میزان BOD پساب، امکان محاسبه نسبت BOD/COD وجود نداشت و نمی‌توان به طور قطع قضاوت نمود که کدام یک از نيزارها در تجزیه بیولوژیکی مواد آلی و حذف مواد غیر قابل تجزیه فاضلاب بهتر عمل کرده‌اند. لازم به ذکر است که مواد قابل تجزیه بیولوژیکی موجود در فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه شهرک صنعتی مورچه‌خورت، در واحدهای بیولوژیکی به طور کامل حذف نمی‌گردد و میزان کمی از مواد آلی وارد بخش استحصال پساب می‌شود. وجود جمعیت میکروبی، تعداد نی‌ها، شرایط راهبری نيزارها (بار ورودی، دبی فاضلاب ورودی و وجود یا عدم وجود هوا) و سازگاری میکروارگانیسم‌ها با محیط، موجب می‌شود تا راندمان حذف مواد قابل تجزیه بیولوژیکی متفاوت باشد و مواد غیر قابل تجزیه بیولوژیکی نیز به طور عمده به کمک فرایند ته‌نشینی و غربالگری حذف می‌شوند (۱، ۴).

ترتیب ۴۴/۲ و ۷۷/۷ درصد بوده است (۲۲) که با یافته‌های بررسی حاضر مغایرت داشت.

یکی از مهم‌ترین معایب نزارهای مصنوعی، راندمان کم این واحدها در کاهش نیتروژن و فسفر می‌باشد (۷). در پژوهش حاضر، میانگین راندمان حذف ترکیبات نیتروژنه در فرم‌های مختلف توسط نزارهای افقی و عمودی به ترتیب $9/3 \pm 18/2$ و $21/3 \pm 10/8$ درصد به دست آمد که راندمان به نسبت پایینی است. همچنین، در طی راهبری متداول تصفیه‌خانه، میانگین حذف ترکیبات نیتروژنه در طی دوره مطالعه $8/1 \pm 73/2$ درصد گزارش شد که بسیار بیشتر از کارایی نزارها می‌باشد. بر اساس نتایج، نزارهای عمودی نسبت به نزارهای افقی کارایی بالاتری در حذف نیتروژن دارند. این امر ناشی از وقوع بهتر فرایند نیتریفیکاسیون در نزار عمودی و کارایی بالاتر در حذف نیتروژن آمونیاکی می‌باشد؛ در حالی که در نزار افقی، فرایند دنیتریفیکاسیون بهتر صورت می‌گیرد (۲۳، ۲۴). در تصفیه فاضلاب به وسیله نزار، حذف نیتروژن از فاضلاب به فعالیت میکروبی در اطراف ریشه و حذف فسفر به درجه حرارت و شرایط بی‌هوازی بستگی دارد (۲۵، ۲۶). مکانیسم عمده حذف نیتروژن در نزارهای دارای سطح آزاد، جذب توسط ریشه و در نزارهای زیرسطحی، نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون است (۲۷). نوع و نحوه راهبری نزار و همچنین، میزان بارگذاری آلی و هیدرولیکی نیز بر میزان حذف نیتروژن مؤثر می‌باشد. وجود شرایط هوازی در اطراف ریشه در نزارها، منجر به انجام فرایند نیتریفیکاسیون می‌شود و در سایر نقاط بستر، شرایط آنوکسیک حاکم است و دنیتریفیکاسیون رخ می‌دهد (۲۸).

نتایج مطالعات پیشین پیشنهاد دادند که جهت بهبود کارایی نزارها در حذف نوترینت‌ها، می‌توان از نزارهای افقی و عمودی به صورت متوالی استفاده نمود (۲۴، ۲۷). Sezerino و همکاران به بررسی کارایی نزارهای افقی و عمودی و صافی شنی جهت تصفیه نهایی پساب بی‌هوازی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که کارایی حذف نیتروژن در صافی شنی ۷۳ درصد، در نزار عمودی ۷۱ درصد و در نزار افقی فقط ۱۶ درصد بود (۲۹). همچنین، در تحقیق بینا و همکاران که با هدف به کارگیری نزارهای مصنوعی جهت تصفیه پساب ثانویه صنایع دامی انجام شد، کارایی نزار زیرسطحی در حذف نترات، ۳۹/۵ درصد گزارش گردید (۶) که با نتایج بررسی حاضر مشابهت داشت.

مقایسه راندمان حذف نزارها در طی دوره راهبری نشان می‌دهد که افزایش دوره راهبری، منجر به بهبود شرایط حذف نیتروژنه شده است (شکل ۳، قسمت‌های و، ز). به طور کلی، فعالیت میکروارگانیسم‌ها در دامی بالاتر، بیشتر است (۳۰، ۲۷، ۷). همچنین، گذشت زمان و تشکیل بیوفیلم میکروبی درون بستر نزارها، باعث افزایش کارایی حذف آلاینده‌ها در اواخر دوره بهره‌برداری می‌گردد. Sokolov و همکاران در پژوهش خود، کاهش حذف TN در فصل بهار و تابستان در مقایسه با زمستان را تأیید نمودند (۱۸) که با یافته‌های مطالعه حاضر همسو بود.

کارایی اغلب نزارها در حذف فسفر پایین بود؛ مگر این که از لایه‌های خاص با توان جذب بالا در بستر نزارها استفاده شود. مکانیسم‌های اصلی در حذف فسفر از فاضلاب توسط نزارها شامل جذب، ترسیب و جذب توسط گیاه هستند (۳۱، ۲۷، ۲۶). میانگین کلی نزارهای افقی و عمودی در حذف فسفر در فرم‌های مختلف به ترتیب $5/7 \pm 22/4$ و $8/3 \pm 20/4$ درصد به دست آمد (جدول ۲) که نشان دهنده راندمان بهتر نزار افقی نسبت به نزار عمودی در

حذف فسفر از فاضلاب است. نزارهای افقی به دلیل فراهم نمودن شرایط مناسب برای جذب سطحی و ترسیب در بستر، کارایی بیشتری در حذف فسفر دارند (۲۶). علاوه بر این، به علت اکسیژن‌دهی بهتر در نزارهای عمودی، احتمال واجذب (Desorption) فسفر وجود دارد (۲۷). طی دوره راهبری نزارهای مورد بررسی، راندمان حذف فسفر تغییرات چشمگیری نداشت (شکل ۳، قسمت‌ها د، ه). در طی تحقیق حاضر، بررسی حذف ترکیبات فسفره در راهبری متداول تصفیه‌خانه، کارایی $5/7 \pm 69/23$ درصدی را نشان داد که بسیار بالاتر از نزارها است. حذف فسفر در نزارها و همچنین، در صافی شنی به طور عمده به واسطه جذب آن توسط ذرات بستر صورت می‌گیرد (۲۹، ۱). نتایج پژوهش Chen و همکاران نشان داد که کاربرد نزارها در تصفیه پساب‌های صنعتی، موجب دستیابی به حداکثر حذف فسفات برابر ۳۵ درصد شد (۱۹).

Hook و Stein با بررسی تغییرات فصلی در نزارها، دریافتند که تغییرات فصلی تنها محدود به تغییرات دما نیست و شرایط هوازی و بی‌هوازی ایجاد شده در اطراف ریشه‌ها و پتانسیل اکسیداسیون و احیا در فصول مختلف نیز مؤثر می‌باشد. بنابراین، در نزارها بسته به نوع گیاه، جنس بستر نزار، بارگذاری آلی و شرایط راهبری، کارایی‌های متفاوتی در فصول مختلف سال به دست می‌آید (۳۲).

از آن جایی که نیمی از فاضلاب این تصفیه‌خانه را فاضلاب بهداشتی تشکیل می‌دهد، بررسی وضعیت میکروبی پساب نیز مهم است. در مطالعه حاضر، کارایی نزارها در حذف شاخص‌های میکروبی (FC و TC) مورد بررسی قرار گرفت. بیشترین راندمان مربوط به نزار عمودی با کارایی $5/1 \pm 40/5$ درصد برای TC و $8/6 \pm 40/2$ برای FC بود (جدول ۲). در نزارهای افقی، کارایی حذف FC و TC به ترتیب $4/5 \pm 39/1$ و $8/4 \pm 35/2$ درصد به دست آمد. همچنین، کارایی راهبری متداول برای FC و TC به ترتیب $4/3 \pm 78/2$ و $2/9 \pm 79/8$ درصد بود که راندمان بسیار بالاتری نسبت به نزارها است.

Boogaard و همکاران در بررسی نزارهای مورد استفاده در تصفیه فاضلاب‌های صنعتی آلمان، مهم‌ترین نکته در به کارگیری نزارها را پایش مداوم آن‌ها بیان نمودند. تاکنون نزارها برای بهره‌برداری‌های نسبتاً کوتاه بررسی شده‌اند و بر اساس تحقیق آن‌ها، کارایی مناسب نزارها در طولانی مدت، نیاز به مطالعات دقیق و بررسی بیشتر دارد (۳۳).

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که اگرچه نزارها در مقایسه با بسترهای شاهد، کارایی بالاتری در کاهش آلاینده‌های فاضلاب داشتند، اما راندمان آن‌ها نسبت به فرایند پیش تصفیه انعقاد، لخته‌سازی و فیلتراسیون واحد استحصال پساب تصفیه‌خانه شهرک صنعتی مورچه‌خورت، کمتر بود. هزینه‌های بهره‌برداری نزار در مقایسه با فرایند پیش تصفیه متداول واحد استحصال پساب تصفیه‌خانه شهرک صنعتی مورچه‌خورت بسیار کمتر برآورد گردید، اما نمی‌توان از این سیستم‌ها به علت عدم دستیابی به کیفیت بسیار خوب پساب با هدف استحصال به تنهایی به عنوان جایگزین فرایند متداول استحصال پساب تصفیه‌خانه شهرک صنعتی مورچه‌خورت استفاده نمود. اگرچه به کارگیری نزار زیرسطحی دارای خصوصیات همچون بهره‌برداری آسان و هزینه‌های کم راهبری است، اما استفاده از آن‌ها برای جایگزینی سیستم‌های پیشرفته، نیازمند بررسی‌های بیشتری می‌باشد.

تصویب رسید. بدین وسیله نویسندگان از کارکنان تصفیه‌خانه شهرک صنعتی مورچه‌خورت و همچنین، شرکت شهرک‌های صنعتی اصفهان تشکر و قدردانی به عمل می‌آورند.

تشکر و قدردانی

مطالعه حاضر برگرفته از پایان‌نامه مقطع کارشناسی ارشد رشته مهندسی بهداشت محیط به شماره ۳۹۷۰۲۷ می‌باشد که با کد IR.MUI.REC.397027 در کمیته اخلاق دانشگاه علوم پزشکی اصفهان به

References

- Kadlec RH, Knight R, Vymazal J, Brix H, Cooper P, Haberl R. Constructed wetlands for pollution control. London, UK: IWA Publishing; 2000.
- Zurita F, De Anda J, Belmont MA. Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. *Ecol Eng* 2009; 35(5): 861-9.
- Luederitz V, Eckert E, Lange-Weber M, Lange A, Gersberg RM. Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands. *Ecol Eng* 2001; 18(2): 157-71.
- Vrhovšek D, Kukanja V, Bulc T. Constructed wetland (CW) for industrial waste water treatment. *Water Res* 1996; 30(10): 2287-92.
- Wu H, Fan J, Zhang J, Ngo HH, Guo W. Large-scale multi-stage constructed wetlands for secondary effluents treatment in northern China: Carbon dynamics. *Environ Pollut* 2018; 233: 933-42.
- Bina B, Amin MM, Mansourian M, Hatamzadeh M, Marasi G, Vahid-Dastjerdi M. The effect of hydraulic retention time (HRT) and hydraulic loading rate (HLR) on the removal efficiency for livestock treated wastewater tertiary treatment in constructed wetland planted with *Phragmites australis*. *J Health Syst Res* 2018; 14(1): 98-106. [In Persian].
- Chen ZM, Chen B, Zhou JB, Li Z, Zhou Y, Xi XR, et al. A vertical subsurface-flow constructed wetland in Beijing. *Commun Nonlinear Sci Numer Simul* 2008; 13(9): 1986-97.
- Molle P, Prost-Boucle Sp, Lienard A. Potential for total nitrogen removal by combining vertical flow and horizontal flow constructed wetlands: A full-scale experiment study. *Ecol Eng* 2008; 34(1): 23-9.
- Yalcuk A, Ugurlu A. Comparison of horizontal and vertical constructed wetland systems for landfill leachate treatment. *Bioresour Technol* 2009; 100(9): 2521-6.
- Zhang C, Tan S, Li J, Peng C. Polishing of secondary effluent by a two-stage vertical-flow constructed wetland. *Pol J Environ Stud* 2015; 24(2): 923-8.
- American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington, DC: American Public Health Association; 1915.
- Abou-Elela SI, Golinielli G, Abou-Taleb EM, Hellal MS. Municipal wastewater treatment in horizontal and vertical flows constructed wetlands. *Ecol Eng* 2013; 61: 460-8.
- Grismer M, Shepher H. Plants in constructed wetlands help to treat agricultural processing wastewater. *Calif Agric* 2011; 65(2): 74-3.
- Kapellakis IE, Paranychianakis NV, Tsagarakis KP, Angelakis AN. Treatment of olive mill wastewater with constructed wetlands. *Water* 2012; 4(1): 260-71.
- Lee CY, Lee CC, Lee FY, Tseng SK, Liao CJ. Performance of subsurface flow constructed wetland taking pretreated swine effluent under heavy loads. *Bioresour Technol* 2004; 92(2): 173-9.
- Farzadkia M, Ehrampush MH, Nadafi K, Kermani M, Abouee Mehrizi E. Investigating efficiency and kinetic coefficients of the nutrients removal in the subsurface artificial wetland of Yazd's wastewater treatment plant. *Journal of Health and Hygiene* 2013; 4(1): 7-20. [In Persian].
- Mustapha HI, van Bruggen JJA, Lens PNL. Vertical subsurface flow constructed wetlands for polishing secondary Kaduna refinery wastewater in Nigeria. *Ecol Eng* 2015; 84: 588-95.
- Sokolov V, Vanderzaag A, Crolla A, Kinsley C, Gordon R. Performance of a constructed wetland and pretreatment system receiving potato farm wash water. *Water* 2016; 8(5): 183.
- Chen TY, Kao CM, Yeh TY, Chien HY, Chao AC. Application of a constructed wetland for industrial wastewater treatment: a pilot-scale study. *Chemosphere* 2006; 64(3): 497-502.
- Mirzaei S, Jafarzadeh N. Efficiency of the subsurface flow constructed wetland in ammonia nitrogen and phosphorus removal from synthetic based on domestic wastewater in lab scale. *Proceedings of the 13th National Conference on Environmental Health*; 2010 Dec 1-3; Kerman, Iran. [In Persian].
- Yousefi Z, Hoseini SM, Mohamadpur Tahamtan RA, Zazouli MA. performance evaluation of artificial wetland subsurface with horizontal flow in wastewater treatment. *J Mazandaran Univ Med Sci* 2013; 23(99): 12-25. [In Persian].

22. Eslami H, Ghelmani SV, Salehi Vaziri A, Hosseinshahi D, Ghaleaskari S, Talebi Hemmatabadi P, et al. Comparing the efficiency of stabilization ponds and subsurface constructed wetland in domestic sewage treatment in city of Yazd. *Water and Wastewater* 2015; 26(6): 100-6. [In Persian].
23. Kyambadde J, Kansime F, Dalhammar G. Nitrogen and phosphorus removal in substrate-free pilot constructed wetlands with horizontal surface flow in Uganda. *Water Air Soil Pollut* 2005; 165(1): 37-59.
24. Wu S, Kuschik P, Brix H, Vymazal J, Dong R. Development of constructed wetlands in-performance intensifications for wastewater treatment: A nitrogen and organic matter targeted review. *Water Res* 2014; 57: 40-55.
25. Chung AKC, Wu Y, Tam NFY, Wong MH. Nitrogen and phosphate mass balance in a sub-surface flow constructed wetland for treating municipal wastewater. *Ecol Eng* 2008; 32(1): 81-9.
26. Lin JK, Yen JY. Changes in the nitrate and nitrite contents of fresh vegetables during cultivation and post-harvest storage. *Food Cosmet Toxicol* 1980; 18(6): 597-603.
27. Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Sci Total Environ* 2007; 380(1-3): 48-65.
28. Ding Y, Wang W, Song Xs, Wang Yh. Spatial distribution characteristics of environmental parameters and nitrogenous compounds in horizontal subsurface flow constructed wetland treating high nitrogen-content wastewater. *Ecol Eng* 2014; 70: 446-9.
29. Sezerino PH, Bentob AP, Decezarob S, Carissimicand E, Philippia LS. Constructed wetlands and sand filter applied as onsite post-treatment of anaerobic effluent. *Water Pract Technol* 2012; 7(3): 1-8.
30. Song Z, Zheng Z, Li J, Sun X, Han X, Wang W, et al. Seasonal and annual performance of a full-scale constructed wetland system for sewage treatment in China. *Ecol Eng* 2006; 26(3): 272-82.
31. Birch G, Matthai C, Fazeli M, Suh J. Efficiency of a constructed wetland in removing contaminants from stormwater. *Wetlands* 2004; 24(2): 459-66.
32. Stein OR, Hook PB. Temperature, Plants, and Oxygen: How Does Season Affect Constructed Wetland Performance? *J Environ Sci Health A* 2005; 40(6-7): 1331-42.
33. Boogaard F, Blom J, Bulk J. Constructed wetlands for stormwater treatment from specific (Dutch) industrial surfaces. 2018. p. 511-28.