

ارزیابی و مقایسه عملکرد برکه‌های اختیاری سری و موازی در تصفیه فاضلاب شهری (مطالعه موردی: تصفیه‌خانه فاضلاب دلیجان)

شروین جمشیدی^{۱*}، مجید مرادخانی^۲، محمدعلی زارعی^۳، مهران مامقانی‌نژاد^۴

^۱ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه اصفهان

^۲ رئیس اداره بهره‌برداری و توسعه فاضلاب دلیجان، شرکت آب و فاضلاب استان مرکزی

^۳ رئیس گروه بهره‌برداری و توسعه شبکه‌های جمع‌آوری و خطوط انتقال فاضلاب، شرکت آب و فاضلاب استان مرکزی

^۴ معاون منابع انسانی و تحقیقات شرکت آب و فاضلاب استان مرکزی

دریافت: ۱۴۰۱/۴/۳۱، بازنگری: ۱۴۰۱/۶/۱۲، پذیرش: ۱۴۰۱/۷/۹، نشر آنلاین: ۱۴۰۱/۷/۹

چکیده

با توجه به ظرفیت موجود در تصفیه‌خانه فاضلاب دلیجان، عملکرد بلندمدت برکه‌های تثبیت (بی‌هوازی و اختیاری) در مقیاس و شرایط واقعی ارزیابی شده و تأثیر چیدمان برکه‌های اختیاری به‌صورت سری با موازی مورد مقایسه قرار گرفت. در این تصفیه‌خانه همچنین اثر پیش‌هوادی در ارتقای عملکرد برکه‌های اختیاری به‌صورت پایلوت کنترل شد. بدین منظور، داده‌های آزمایشگاهی (۱۳۸۷ تا ۱۴۰۰)، به‌همراه نتایج آزمایش‌های تکمیلی برای پارامترهای BOD، COD، TSS، TKN و کلیفرم مدفوعی در شرایط بهره‌برداری از برکه‌های اختیاری به‌صورت سری و موازی و در دوره‌های سرد و گرم سال با نرم‌افزار Minitab مورد مقایسه قرار گرفت. عملکرد متوسط برکه تثبیت دلیجان در حذف BOD و COD فاضلاب به ترتیب ۷۹٪ و ۷۸٪ می‌باشد. تفاوت عملکرد برکه‌های اختیاری نیز در حذف این ترکیبات در دو حالت سری و موازی تا سطح ۹۵٪ معنی‌داری قابل ملاحظه نیست (بین ۶۵ تا ۷۰٪). اما نتایج بررسی‌های دقیق‌تر نشان داد که عملکرد برکه‌های سری در حذف ترکیبات زودتجزیه‌پذیر، به‌ویژه در دوره سرد سال، بالاتر است. در این دوره نسبت BOD به COD پساب خروجی در برکه‌های اختیاری سری ۱۰٪ و غلظت TSS پساب خروجی از این واحدها ۱۹٪ کمتر از برکه‌های موازی است. همچنین میزان حذف TKN در شرایط سری نسبت به موازی ۱۳٪ بیشتر است. به‌عبارت دیگر، چیدمان سری می‌تواند تصفیه کامل‌تری از فاضلاب به نسبت شرایط موازی ارائه دهد. همچنین مشخص شد پیش‌هوادی برکه‌های اختیاری موازی می‌تواند توانمندی این سیستم را در دوره سرد سال برای کاهش نسبت BOD به COD و غلظت TKN به ترتیب ۲۶٪ و ۱۰٪ ارتقاء دهد.

کلیدواژه‌ها: باکتری اختیاری، برکه تثبیت، تجزیه‌پذیری، ترکیبات آلی، پیش‌هوادی.

۱- مقدمه

برکه تثبیت به‌عنوان یک سیستم طبیعی تصفیه فاضلاب شهری، به‌طور گسترده در کشورهای در حال توسعه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سیستم هزینه ساخت و بهره‌برداری بسیار کمی به نسبت سایر فرآیندها نیاز دارد و به‌نظر می‌رسد فاقد پیچیدگی بهره‌برداری است. این سیستم در مقایسه با سایر فناوری‌های تصفیه فاضلاب، کاملاً متکی به محیط زیست است اما همین سیستم بیولوژیکی، پیچیده و از نظر گونه میکروبی بسیار متنوع

است که می‌تواند در تثبیت مواد آلی تجزیه‌پذیر و کاهش پاتوژن^۱

نقش ایفا نمایند (Olukanni و Ducoste، ۲۰۱۱).

برکه تثبیت معمولاً شامل واحدهای:

(۱) برکه بی‌هوازی (پیش‌تصفیه)

(۲) اختیاری

(۳) جلادهی (پس‌تصفیه)

است که به‌صورت سری قرار می‌گیرند. کاهش مواد آلی کربنی

(BOD)^۲ و نیتروژنی (TKN)^۳ فاضلاب اساساً در برکه اختیاری انجام

3. Total Kjeldahl Nitrogen

1. Pathogen

2. Biochemical oxidation demand

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۳۱-۳۷۹۳۲۴۲۶

آدرس ایمیل: sh.jamshidi@eng.ui.ac.ir (ش. جمشیدی)، research@abfamarkazi.ir (م. مرادخانی)، research@abfamarkazi.ir (م. ع. زارعی)،

research@abfamarkazi.ir (م. مامقانی‌نژاد).

کشور مستعد اجرای این سامانه‌ها است اما در هر صورت نیازمند بررسی و ارزیابی جامع اثرات زیست‌محیطی هستند.

مطالعه مروری Ho و همکاران (۲۰۱۷) بین ۱۵۰ دستاورد اخیر علمی چنین نتیجه گرفته که لازم است برکه‌ها براساس مدل‌های فرآیند محور و تجربی برای هر منطقه بهینه‌سازی شده، طراحی و ارتقا یابند. در این راستا، در مطالعات اخیر پیرامون برکه‌های تثبیت، از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، سیستم دینامیک و دیگر مدل‌های ریاضی یا احتمالاتی برای پیش‌بینی تغییرات پارامترهای تصفیه فاضلاب در روش برکه تثبیت تحت شرایط مختلف بهره‌برداری استفاده شده است که اساساً مبتنی بر روابط و فرآیندهای حاکم در برکه تثبیت و نتایج مطالعات آزمایشگاهی در بازه‌های زمانی مختلف است تا بتواند درک بهتری از عوامل و پیامدهای سیستم تصفیه فاضلاب در این واحدها را ارائه نماید (Shahsavani و همکاران، ۲۰۱۹؛ Decostere و همکاران، ۲۰۱۷).

یکی از پرسش‌هایی که اخیراً در پژوهش‌های علمی تلاش شده به آن پاسخ داده شود، نحوه چیدمان بهینه واحدها (بی‌هوای، اختیاری و جلادهی به‌صورت سری و موازی) است. به‌عنوان مثال، در یک بررسی مروری توسط Espinosa و همکاران (۲۰۱۷) ۳۸۸ تصفیه‌خانه با ۷ چیدمان مختلف برای ارتقای برکه تثبیت مورد بررسی قرار گرفته است که متوسط عملکرد حذف BOD و جامدات معلق کل (TSS) برای این تعداد برکه در شرایط مختلف بهره‌برداری به ترتیب ۸۵٪ و ۷۵٪ گزارش شده و پساب خروجی به‌طور متوسط ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر از این ترکیبات را داراست. بررسی این ۷ نمونه مختلف چیدمان برکه تثبیت نشان داد حالت‌های: (۱) برکه اختیاری + برکه جلادهی، (۲) برکه با هوادهی + برکه اختیاری + برکه جلادهی و (۳) برکه بی‌هوای + روش‌های دیگر تصفیه + برکه جلادهی + تصفیه تکمیلی بیشترین عملکرد مطلوب برای حذف BOD، TSS و نیتروژن آمونیاکی را در شرایط استاندارد کیفیت پساب در حد متوسط دارا بوده‌اند. در این پژوهش، استفاده از برکه اختیاری به‌صورت مستقل، یا فقط همراه با برکه بی‌هوای به‌عنوان پیش‌تصفیه، یا استفاده از راکتورهای بی‌هوای به‌عنوان جایگزین برکه بی‌هوای، روش‌هایی با ظرفیت پایین معرفی شده‌اند و براین اساس پیشنهاد می‌شود استفاده از برکه جلادهی و پس‌تصفیه در ارتقای برکه‌های تثبیت مدنظر قرار گیرد (Espinosa و همکاران، ۲۰۱۷).

Davies (۲۰۱۰) در طراحی برکه‌های اختیاری تأکید کرده است تا از چیدمان سری برای برکه‌ها استفاده شود تا فرار جلبک اتفاق نیفتد. حتی تعداد بهینه برکه‌های اختیاری سری را ۳ عدد عنوان کرده است. پژوهش Bansah و Suglo (۲۰۱۶) نشان داد

می‌شود که محلی برای هم‌زیستی پیچیده‌ای از باکتری‌ها و جلبک‌ها است. در برکه اختیاری، نقش اصلی باکتری‌ها و جلبک‌ها به ترتیب پالایش آب و هوادهی است. به‌عبارت دیگر اکسیداسیون مواد آلی توسط باکتری‌ها با اکسیژنی انجام می‌شود که غالباً توسط فتوسنتز جلبک‌ها تأمین شده است. با این وجود عواملی همچون وزش باد، دما، شدت تابش خورشید، نوع فاضلاب (شهری یا صنعتی)، بار آلی ورودی (OLR)^۴، دوره لایروبی، هیدرولیک جریان در برکه‌ها و زمان ماند هیدرولیکی می‌تواند بر عملکرد برکه‌های اختیاری مؤثر باشد (Passos و همکاران، ۲۰۱۹؛ Coggins و همکاران، ۲۰۱۹).

مطالعات Jamshidi و Gholikandi (۲۰۱۴) نشان داد شرایط بی‌هوای در برکه‌های تثبیت حاصل از بارگذاری آلی بیش از توان برکه‌ها می‌تواند منتج به افزایش سولفید هیدروژن، رشد جلبک‌های ارغوانی و در نتیجه تغییر رنگ آب شود. الماسی و همکاران (۱۳۹۶) نیز با ارزیابی عملکرد برکه‌ها و سنجش کلیفرم مدفوعی (FC)^۵ نتیجه گرفتند که برکه تثبیت می‌تواند در شرایط آب و هوایی گرم به‌صورت مطلوب و در شرایط آب و هوایی سرد با حداقل ظرفیت آلاینده‌های فاضلاب خانگی را کاهش دهد. با این وجود، معمولاً طراحی برکه‌های اختیاری براساس روابط ساده بارگذاری هیدرولیکی (بار سطحی) انجام می‌شود که نمی‌تواند پیچیدگی‌های مربوط به این سیستم را به‌خوبی در نظر گیرد (Khosravi و همکاران، ۲۰۱۳).

به‌طور کلی برکه‌های تثبیت فاضلاب در اروپا، برای تصفیه فاضلاب جوامع کوچک و روستایی یا برای تصفیه تکمیلی تصفیه‌خانه‌های بزرگتر مورد استفاده قرار می‌گیرند (Rockne و Brezonik، ۲۰۰۶). البته در آب و هوای گرم‌تر در مناطقی مانند خاورمیانه، آفریقا، آسیا و آمریکای لاتین از برکه‌های تثبیت برای تصفیه فاضلاب جمعیت‌های بیشتر نیز استفاده می‌شود. به‌طور مثال، شناسایی انواع تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری موجود در آمریکای لاتین نشان داده است که برکه تثبیت با ۳۸٪ جمعیت تحت پوشش، پرکاربردترین روش تصفیه در این منطقه است (Sperling، ۲۰۱۶). در ایران نیز تا سال ۱۳۹۵، ۳۷ تصفیه‌خانه فاضلاب شهری با ۱۷٪ جمعیت تحت پوشش از برکه تثبیت استفاده کرده‌اند که این فرآیند را در جایگاه دوم پرکاربردترین سیستم‌های تصفیه فاضلاب کشور قرار می‌دهد (مؤسسه تحقیقات آب، ۱۳۹۶). با این وجود، سوالات متعددی در طراحی و بهره‌برداری بهینه این واحدها و عوامل مؤثر بر بهره‌برداری از این واحدها وجود دارد (Mahapatra و همکاران، ۲۰۲۲).

Ghalhari و همکاران (۲۰۲۱) در جانمایی کلی برکه‌های تثبیت جدید در ایران نتیجه گرفتند که مناطق مرکزی و جنوب

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محدوده مورد مطالعه

تصفیه‌خانه فاضلاب دلیجان با وسعت ۱۱۰ هکتار در ارتفاع ۱۴۹۶ متر از سطح دریا و به ترتیب در طول و عرض جغرافیایی ۳۳،۹۵۳۲۲۲ و ۵۰،۶۵۹۰۲۳۶ در اقلیم گرم و خشک قرار گرفته است. این تصفیه‌خانه با ظرفیت ۸۶۰۰ مترمکعب در روز در سال ۱۳۸۰ طراحی و در پایان ۱۳۸۳ به بهره‌برداری رسیده است که ظرفیت مدول اول آن ۵۰۰۰ مترمکعب در روز است اما اکنون دبی ورودی آن بالغ بر ۹۷۰۰ مترمکعب در روز می‌باشد. فرآیند این تصفیه‌خانه برکه تثبیت است که شامل دو برکه بی‌هوازی به صورت موازی و دو برکه اختیاری است. تا سال ۱۳۹۶، دو برکه اختیاری این تصفیه‌خانه با ابعاد و مشخصات هندسی مشابه و یکسان (عمق ۱/۸ متر و سطح ۳/۵ هکتار) به صورت سری بهره‌برداری شده است (شکل (۱)). به عبارتی، پساب خروجی از دو برکه بی‌هوازی، ابتدا وارد برکه اختیاری اول شده و پس از عبور از این واحد، وارد برکه اختیاری دوم می‌شده است. از سال ۱۳۹۶ تاکنون، برکه‌های اختیاری با عملیات جزئی از حالت سری، به موازی تغییر کردند به گونه‌ای که پساب برکه بی‌هوازی اول وارد برکه اختیاری شده و خروجی برکه بی‌هوازی دوم مستقیماً وارد برکه اختیاری دوم می‌شود (شکل (۲)). در این حالت، عملاً دو برکه بی‌هوازی و اختیاری موجود به صورت موازی در مسیر تصفیه فاضلاب قرار دارند. همچنین در زمان این تغییرات، لجن موجود در برکه‌های اختیاری تخلیه و لایروبی انجام شده است.

در این پژوهش و به منظور ارزیابی نقش هوادهی در بهبود عملکرد برکه‌های اختیاری، در حوضچه A مطابق شکل (۲)، یک هوادهی زیرسطحی برای هوادهی فاضلاب خروجی از برکه بی‌هوازی دوم پیش از ورود به برکه اختیاری دوم برای دوره مرداد تا اسفند ۱۴۰۰ تعبیه شده است.

۲-۲- وضعیت موجود تصفیه‌خانه

با توجه به دبی کنونی تصفیه‌خانه (۹۷۰۰ مترمکعب در روز)، بار سطحی (SLR) یک برکه اختیاری تصفیه‌خانه فاضلاب دلیجان مطابق رابطه (۱) برابر ۲۱۳ کیلوگرم BOD در واحد هکتار در روز برآورد می‌گردد که در مقایسه با مراجع نسبتاً بالا است و نشان از بارگذاری بیش از ظرفیت این واحدهای بیولوژیک دارد.

$$SLR = \frac{BOD \times Q}{A \times 1000} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، BOD برابر متوسط غلظت فاضلاب خروجی از برکه‌های بی‌هوازی (mg/L)، Q برابر دبی متوسط ورودی به برکه اختیاری (m³/d) و A معادل سطح برکه (ha) است. منزوی

برای بهره‌برداری مناسب از حداکثر ظرفیت برکه تثبیت در کاهش بار آلودگی کربنی، نیتروژنی و پاتوژن‌ها، لازم است چیدمان آن بگونه‌ای باشد که برکه‌های بی‌هوازی به صورت موازی اجرا شوند. سپس برکه‌های اختیاری برای کاهش بار سطحی ابتدا موازی و سپس برای کاهش هرچه بیشتر بار آلی کربنی و نیتروژنی به صورت سری اجرا شوند.

تاکنون مطابق با مراجع و نمونه‌های موردی در کشور، اکثر برکه‌های اختیاری یک مدول از برکه تثبیت به صورت سری اجرا و بهره‌برداری شده‌اند. این موضوع باعث شده است تا عملکرد برکه‌ها به صورت سری در تصفیه فاضلاب با چیدمان موازی آن‌ها قابل مقایسه نباشد، یا حداقل شرایط فاضلاب ورودی، آب و هوایی و محیطی یکسانی برای مقایسه نداشته باشد. از طرفی برکه‌های تثبیت معمولاً امکان اجرا به صورت پایلوت یا در مقیاس کوچک و آزمایشگاهی را ندارند. بنابراین پاسخ به این سوال مشخص نیست که آیا اجرای برکه‌های اختیاری به صورت سری، نسبت به چیدمان موازی، به جز در مبانی و تئوری طراحی، دارای مزیتی در عملکرد و تصفیه فاضلاب است یا خیر. اما این ویژگی به طور خاص در تصفیه‌خانه فاضلاب شهر دلیجان استان مرکزی، فراهم شده است که در آن برکه‌های اختیاری در ابتدا به صورت سری طراحی و اجرا شده‌اند و طی سالیان اخیر چیدمان برکه‌های اختیاری (و نه کل تصفیه‌خانه) به موازی تغییر داده شده و این امکان برای مقایسه نتایج در مقیاس واقعی، و برای دوره بلندمدت فراهم شده است. همچنین کمیت فاضلاب تولیدی شهر دلیجان در بلندمدت در مقایسه با سایر شهرهای کشور از نوسانات کمی طی سالیان مختلف برخوردار بوده و شرایط را برای مقایسه نتایج در بلندمدت فراهم آورده است. بنابراین بررسی تحلیلی و مقایسه‌ای نتایج به همراه انجام آزمایش‌های تکمیلی می‌تواند برخی از جنبه‌های کلیدی فرآیندی و نامعلوم در عملکرد برکه‌های اختیاری و تثبیت را در اختیار پژوهشگران و مهندسين قرار دهد. در این راستا، این پژوهش ضمن مقایسه آماری نتایج و داده‌های آزمایشگاهی برکه‌های اختیاری در دو چیدمان سری و موازی، نشان می‌دهد پایش مناسب برکه‌های اختیاری براساس چه پارامترهایی باید انجام شود. همچنین در یک رویکرد ابتکاری، برای یک دوره هشت ماهه، ارتقای عملکرد برکه‌های اختیاری در مقیاس واقعی به روش هوادهی مصنوعی مورد ارزیابی قرار گرفته است. جزئیات این پژوهش که برای نخستین بار در مقیاس واقعی و براساس داده‌های بلندمدت آماری در کشور انجام می‌شود در ادامه آمده است.

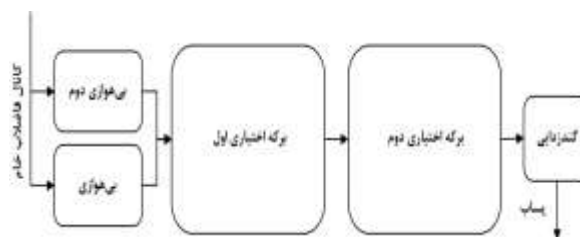
۳-۲- نمونه برداری و انجام آزمایش

در تصفیه‌خانه فاضلاب دلیجان، از سال ۱۳۸۷ تاکنون، پارامترهای BOD و COD با تواتر ماهانه از ورودی، خروجی برکه‌های بی‌هوازی، و خروجی برکه‌های نمونه‌برداری انجام شده و به‌همراه نمونه‌های اخذ شده از ورودی و خروجی تصفیه‌خانه برای سنجش پارامترهای TSS و FC به آزمایشگاه مرجع واقع در شهر محلات ارسال می‌گردد که در آنجا سنجش COD به‌روش تیتراسیون با ریفلاکس بسته (5220C)، BOD به-روش انکوباتور (5210B)، TSS به‌روش وزن‌سنجی (2540D) و کلیفرم مدفوعی به روش تخمیری با چندین تیوب (9221C) مطابق روش استاندارد انجام می‌شود. همچنین پارامترهای نیتروژنی (TKN و نیترات) با تواتر سالانه دومرتبه نمونه‌برداری شده و به‌ترتیب براساس روش کج‌لدال (4500NB) و اسپکتروفوتومتر (4500-NO₃B) تست شده است (APHA, 2017). در طی دوره این پژوهش، از سال ۱۳۹۹ و به‌منظور مقایسه بهتر عملکرد برکه‌ها و انجام مطالعات پایلوت، نمونه‌های تکمیلی برای کنترل و سنجش پارامتر TKN و نیترات برداشت شده است که به‌طور مشابه مطابق روش استاندارد مورد سنجش قرار گرفته است. بنابراین مجموع تعداد داده‌های مربوط به پارامترهای COD، BOD، TSS، FC و TKN به‌ترتیب در حدود ۲۴۵، ۳۱۰، ۲۴۰، ۱۵۰ و ۵۰ مورد بوده است.

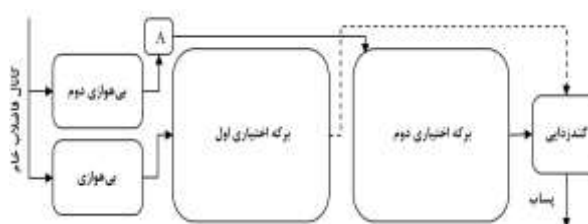
۴-۲- بررسی و مقایسه آماری

اطلاعات مورد استفاده در این پژوهش پس از بررسی و حذف داده‌های پرت، در دو دسته:
 ۱) شرایط بهره‌برداری از برکه‌های اختیاری به‌صورت سری (S)
 ۲) شرایط بهره‌برداری از برکه‌های اختیاری به‌صورت موازی (P)
 طبقه‌بندی شده و البته همین دسته‌ها نیز در دو بخش داده‌های عوامل محیطی مربوط به فصول پاییز و زمستان، یعنی دوره سرد سال (Cold) و فصول بهار و تابستان یعنی دوره گرم سال (Warm) طبقه‌بندی شده است. برای مقایسه معنی‌داری تفاوت نتایج در دسته‌بندی‌های مختلف، با توجه به توزیع غیرنرمال داده‌ها و نتایج از آزمون‌های مقایسه غیرپارامتریک من-ویتنی^۸ استفاده شده و نتایج تا سطح ۹۵٪ معنی‌داری و با نرم‌افزار Minitab نسخه ۱۹ مطابق روش‌های استاندارد تحلیل و گزارش شده است (Yazdian و Jamshidi, 2020).

(۱۳۹۲) برای شرایط اقلیمی استان مرکزی و تصفیه‌خانه دلیجان با دمای متوسط کمتر از ۱۵ درجه در فصل زمستان، SLR برکه‌های اختیاری را بین ۳۰ تا ۱۵۰ کیلوگرم BOD در واحد هکتار در روز و شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور (۱۳۹۱) این پارامتر را بین ۵۵ تا ۲۰۰ پیشنهاد کرده‌اند. همچنین Davies (۲۰۱۰) مقدار SLR را برای برکه اختیاری کمتر از ۵۰ (۱۷-۴۰) پیشنهاد کرده است.



شکل ۱- چیدمان برکه‌های اختیاری به‌صورت سری در تصفیه‌خانه فاضلاب دلیجان تا سال ۱۳۹۶



شکل ۲- چیدمان برکه‌های اختیاری به‌صورت موازی در تصفیه‌خانه فاضلاب دلیجان از سال ۱۳۹۶ تاکنون

بارگذاری بیش از ظرفیت برکه‌های اختیاری در تصفیه‌خانه فاضلاب دلیجان باعث شده است تا غلظت اکسیژن محلول (DO) در برکه‌ها در هنگام صبح و عصر به‌طور متوسط ۰/۸۷ میلی‌گرم بر لیتر باشد. این در حالی است که پایش برکه‌های اختیاری توسط Liu و همکاران (۲۰۱۶) با سامانه‌های آنلاین حکایت از نوسانات بین صفر (بی‌هوازی) تا بیش از ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر اکسیژن محلول (فوق اشباع) دارد. همچنین شاخص پتانسیل اکسیداسیون احیا (ORP)^۹ نیز در برکه‌های اختیاری دلیجان به‌طور متوسط برابر ۱۴۷- میلی‌ولت است که نشان از غالب بودن شرایط آنوکسیک و بی‌هوازی در برکه‌های اختیاری دارد (Gholikandi و همکاران، ۲۰۱۴). این شرایط باعث شده است تا عملکرد واحدهای برکه اختیاری از شرایط طراحی فاصله داشته و در دوره‌های سرد سال، به‌دلیل افت فعالیت‌های فتوسنتزی جلبک‌ها با مشکل انتشار بوی نامطبوع همراه باشد (Naddafi و همکاران، ۲۰۰۹).

8. Mann-Whitney

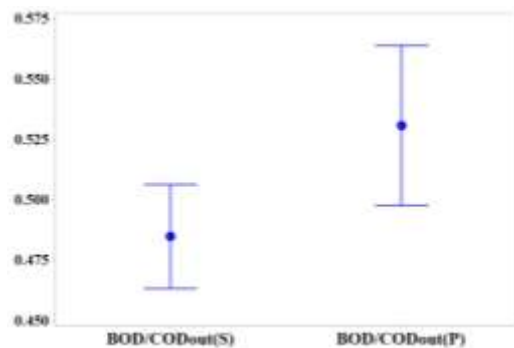
9. Oxidation-Reduction Potential

۳- نتایج

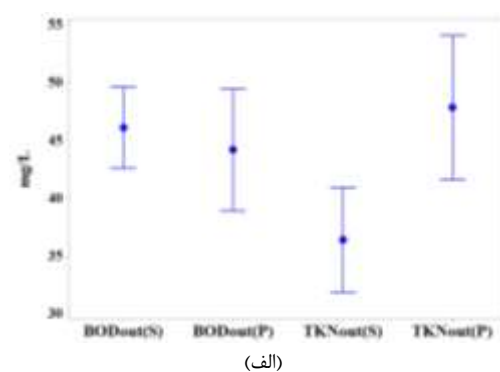
۳-۱- مقایسه عملکرد

بررسی آماری داده‌ها و نتایج آزمایشگاهی تصفیه‌خانه فاضلاب دلیجان از سال ۱۳۸۷ تا ۱۴۰۰ (۱۴ سال) نشان می‌دهد که تغییر شرایط برکه‌های اختیاری از سری به موازی بر غلظت پارامترهای COD، TSS، TKN (شکل (۳)) و نسبت BOD به COD پساب خروجی از این برکه‌ها (شکل (۴-الف)) اثر قابل ملاحظه‌ای داشته است ($P < 0.05$) و بر غلظت پارامتر BOD بدون اثر قابل ملاحظه بوده است (شکل (۳-الف)). نمودارهای شکل (۳) نشان می‌دهد غلظت متوسط TSS در پساب خروجی برکه‌های اختیاری موازی در حدود ۱۹٪ بیشتر از شرایط بهره‌برداری به صورت سری است، اما برعکس، غلظت COD محلول ۱۳٪ کاهش را نشان می‌دهد. همچنین غلظت TKN در پساب خروجی برکه‌های اختیاری موازی در حدود ۳۱٪ بیشتر از شرایط بهره‌برداری به صورت سری است. بنابراین مقایسه عملکرد برکه‌های سری و موازی بر اساس پارامترهای متعارف پساب خروجی نمی‌تواند نتیجه مشخصی در پی داشته باشد زیرا از طرفی COD بهبود داشته اما TSS و TKN افت داشته‌اند. پاسخ به این پرسش نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر است که در ادامه با استناد به پارامترهای ترکیبی (نسبت BOD به COD)، فرآیندهای برکه تثبیت و فصول بهره‌برداری به آن پرداخته می‌شود.

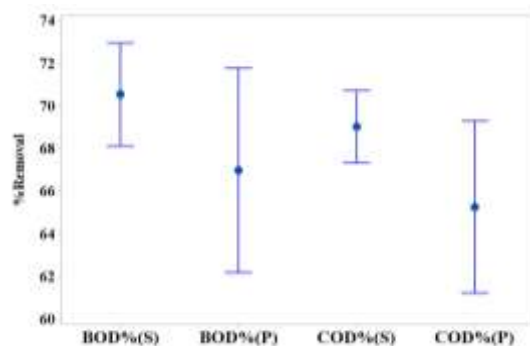
نسبت BOD به COD پساب خروجی، که نشان از تجزیه‌شوندگی بیولوژیکی ترکیبات فاضلاب است، نشان می‌دهد این نسبت در شرایط بهره‌برداری از برکه‌های اختیاری به صورت سری ۱۰٪ کمتر از شرایط بهره‌برداری به صورت موازی بوده است (شکل (۴-الف)). این موضوع مؤید آن است که پساب خروجی از برکه‌های اختیاری در شرایط بهره‌برداری موازی، همچنان محتوای تجزیه‌پذیر بیولوژیکی بیشتری نسبت به شرایط بهره‌برداری سری دارند. به عبارت دیگر، تصفیه بیولوژیکی فاضلاب در شرایط بهره‌برداری برکه‌های اختیاری به صورت سری کامل‌تر از چیدمان موازی بوده است. این نتیجه به‌طور مشابه در غلظت TKN (شکل (۳-الف)) نیز مشهود بود که مؤید تجزیه‌پذیری بهتر ترکیبات آلی در شرایط سری است. به‌طور کلی نیتریفیکاسیون (یعنی کاهش TKN و تبدیل به نیترات) در واحدهای بیولوژیکی تصفیه فاضلاب در صورت وجود اکسیژن محلول و زمان ماند هیدرولیکی کافی قابل انجام است (Chapra، ۲۰۰۸؛ Zhao و همکاران، ۲۰۲۲). به-عنوان مثال، نسبت TKN به مجموع غلظت TKN و NO_3 در شرایط بهره‌برداری برکه‌های اختیاری به صورت سری برابر ۰/۷۷ و این نسبت برای چیدمان موازی برابر ۰/۹۵ مشاهده شده است. به-عبارت دیگر، هرچند در هر دو چیدمان نیتروژن غالب از نوع کج‌دال است اما این نسبت در شرایط سری کمتر می‌باشد.



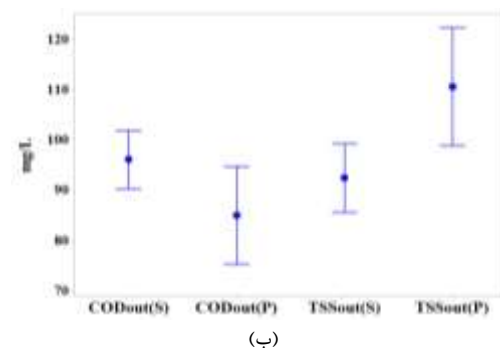
(الف)



(الف)



(ب)



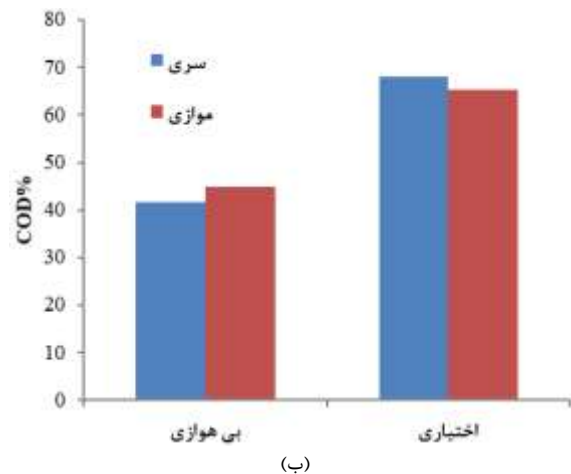
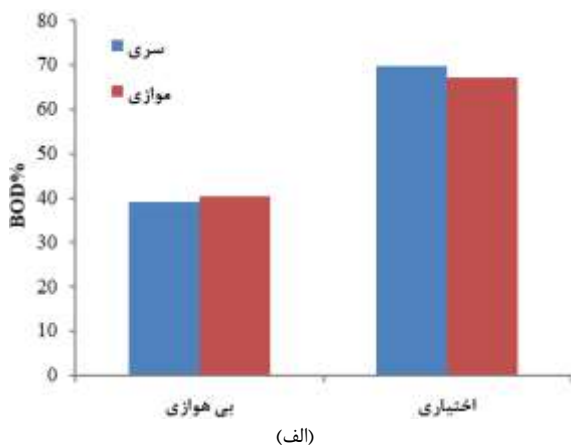
(ب)

شکل ۳- مقایسه آماری پارامترهای کیفی پساب خروجی: (الف) BOD و TKN، (ب) COD و TSS در شرایط بهره‌برداری از برکه‌های اختیاری سری (S) و موازی (P) تا سطح ۰/۹۵ معنی‌داری

شکل ۴- مقایسه آماری عملکرد برکه‌های اختیاری سری (S) و موازی (P) در تصفیه فاضلاب تا سطح ۰/۹۵ معنی‌داری

(شکل ۵-ب))، همچنین عملکرد سیستم در کاهش کلیفرم مدفوعی (FC) در سیستم موازی مطابق جدول (۱) اندکی بهبود داشته است اما این تغییرات از نظر آماری معنی دار نبوده و قابل ملاحظه نیست. بنابراین همچنان نمی توان به طور دقیق مزیت یا ضعف چیدمان برکه های اختیاری در حالت سری با موازی را مقایسه کرد مگر این که عملکرد برکه های اختیاری در دو حالت سری و موازی در دوره های سرد و گرم سال به صورت جزئی تر مورد بررسی قرار گیرد.

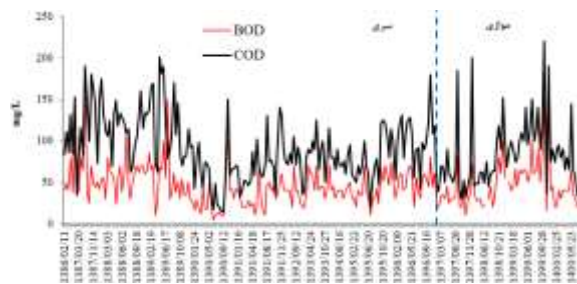
برکه های بی هوازی در تصفیه خانه فاضلاب دلیجان در دوره بلندمدت بهره برداری از تصفیه خانه، عملکرد مطلوبی با کاهش ۴۰٪ غلظت BOD و COD داشته اند و به نوعی موجب عملکرد ۶۵٪-۷۰٪ برکه های اختیاری در کاهش غلظت این ترکیبات نیز شده اند (شکل ۶-ا). این میزان کاهش آلودگی به صورت نسبتاً ثابت برای یک واحد پیش تصفیه بیولوژیکی طبیعی در بلندمدت نشان می دهد برکه های بی هوازی می توانند به عنوان یک سیستم پیش تصفیه قابل اطمینان در بهره برداری از برکه های تثبیت مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۶- مقایسه بلندمدت عملکرد واحدهای برکه تثبیت دلیجان در کاهش آلاینده ها

غلظت متوسط نترات در پساب خروجی برکه های اختیاری در چیدمان سری و موازی به ترتیب برابر ۱۰/۶ و ۳/۸ میلی گرم بر لیتر است که می تواند مؤید تکامل بهتر نیتروبیفیکاسیون در چیدمان سری باشد. در شرایط سری در پساب، در صورت تجزیه مناسب ترکیبات آلی کربنی زودتجزیه پذیر (BOD) می توان انتظار داشت زمینه برای کاهش TKN در فرآیند بیولوژیکی نیز فراهم شود. در غیر این صورت کاهش TKN به کندی صورت می پذیرد (Gerardi, 2003).

شکل (۵) روند و تغییرات غلظت BOD و COD پساب خروجی از برکه های اختیاری تصفیه خانه دلیجان را در گذر زمان و به تفکیک چیدمان سری و موازی نشان می دهد. این تغییرات می تواند نشان دهنده نمایش نوسانات غلظت یا متوسط غلظت پساب از نظر این دو پارامتر نمی تواند مؤید مزیت یا ضعف هر کدام از چیدمان ها نسبت به دیگری باشد.



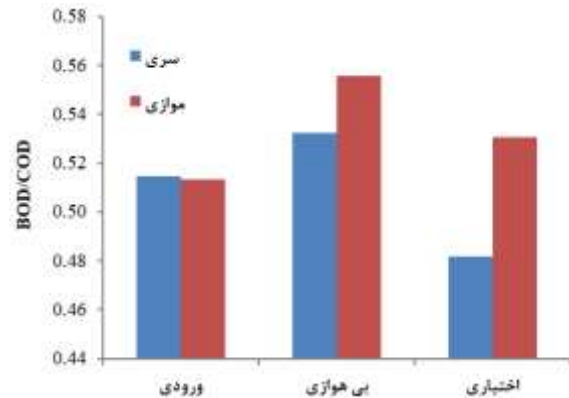
شکل ۵- سری زمانی غلظت BOD و COD در پساب خروجی از برکه اختیاری

علی رغم مقایسه آماری پساب خروجی برکه های اختیاری، باید توجه داشت که غلظت پارامترهای کیفی در پساب خروجی حاصل عملکرد تمامی اجزای برکه تثبیت است. به عبارت دیگر افزایش یا کاهش این پارامترها ممکن است الزاماً نتیجه عملکرد برکه های اختیاری نبوده و برکه های بی هوازی که پیش تصفیه برکه های اختیاری محسوب می شوند، نیز در این فرآیند مؤثر باشند. بنابراین لازم است عملکرد برکه های اختیاری برحسب میزان کاهش بار آلی و درصد کاهش پارامترها نسبت به پساب ورودی از برکه های بی هوازی نیز مورد ارزیابی قرار گیرد تا اثر عملکردی برکه های اختیاری به صورت مستقل قابل بررسی باشد. این ویژگی می تواند براساس درصد حذف آلاینده ها در هر برکه مورد مقایسه قرار گیرد.

بررسی آماری میزان کاهش پارامترهای کیفی نسبت به فاضلاب ورودی به برکه های اختیاری (خروجی از برکه های بی هوازی) نشان می دهد تبدیل شرایط برکه ها از حالت سری به موازی، هرچند به طور متوسط، باعث کاهش عملکرد تصفیه (برحسب %) برای پارامترهای BOD، COD و TKN شده است

برابر چیدمان برکه‌های اختیاری به صورت موازی (با ۵٪ کاهش) است (شکل ۷).

جدول (۲) مقایسه‌ای از عملکرد برکه‌های اختیاری و کل تصفیه‌خانه دلیجان را با سایر پژوهش‌ها در کشور در کاهش ترکیبات فاضلاب نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که علی‌رغم بارگذاری بیش از اندازه برکه‌ها، توانمندی سیستم برکه تثبیت دلیجان در کاهش BOD و COD تقریباً مشابه برکه‌های تثبیت دیگر مناطق کشور مانند اهواز و مشهد است و عملکرد آن حتی از برکه‌های تثبیت برخی شهرها یا کشورها نیز بالاتر می‌باشد. به عنوان مثال، در پژوهش Achag و همکاران (۲۰۲۱) در کشور مراکش، مشخص شده است برکه‌های تثبیت در شرایط آب و هوای گرم و خشک آن منطقه توانسته‌اند تا ۷۸٪ BOD و ۵۱٪ COD فاضلاب را کاهش دهند که اساساً این کاهش در برکه‌های بی‌هوازی انجام شده است. همچنین نسبت BOD به COD پس از خروجی به ۰/۴ می‌رسد که در مقایسه با تصفیه‌خانه دلیجان پایین‌تر است. بعبارت دیگر در شرایط گرم و خشک مراکش، به طور مقایسه‌ای حذف BOD (ترکیبات زودتجزیه‌پذیر) بهتر از COD انجام شده است. به طور مشابه، در شمال و جنوب مصر مجموعاً ۱۱ برکه تثبیت مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است که طیف گسترده‌ای از حذف BOD، COD و TKN دارند. به طور کلی، برکه‌های تثبیت مستقر در جنوب مصر (با آب و هوای گرم‌تر) عملکرد بهتری در حذف آلاینده‌ها در مقایسه با شمال کشور داشته‌اند (Abdo و همکاران، ۲۰۲۲). بنابراین پیشنهاد می‌شود ارزیابی عملکرد برکه‌های تثبیت در کشور با نگاه تخصصی و با جزئیات انجام شود تا بتوان راهکارهای مناسبی جهت ارتقاء و بهسازی این واحدهای تصفیه ارائه نمود و صرفاً محدود به پارامترهای متعارف نشود.



شکل ۷- مقایسه بلندمدت تجزیه‌پذیری فاضلاب در بخش‌های مختلف تصفیه‌خانه

به‌علاوه برکه‌های بی‌هوازی باعث شده‌اند تا نسبت BOD به COD فاضلاب ورودی به برکه‌های اختیاری، افزایش یابد (شکل ۷). به عبارت دیگر، هیدرولیز فاضلاب در برکه‌های بی‌هوازی توانسته است ترکیبات نسبتاً دیرتجزیه‌پذیر را شکسته و به ترکیبات زودتجزیه‌پذیر تبدیل کند (Gholikandi, ۲۰۱۴). نتیجه این فرآیند افزایش نسبت BOD به COD فاضلاب بوده است که این افزایش برای برکه‌های اختیاری می‌تواند بسیار مفید باشد. زیرا هوادهی در برکه‌های اختیاری به صورت طبیعی انجام شده و بسیار حساس به شرایط آب و هوایی است (Ali و همکاران، ۲۰۲۰). وجود ترکیبات زودتجزیه‌پذیر در مقایسه با ترکیبات دیرتجزیه‌پذیر می‌تواند باعث شود تا اکسیژن موجود برای تجزیه ترکیبات بیشتری مورد استفاده قرار گیرد. با این وجود، و عملکرد نسبتاً ثابت برکه‌های بی‌هوازی در طول دوره بهره‌برداری از تصفیه‌خانه فاضلاب دلیجان، نسبت BOD به COD فاضلاب خروجی از برکه‌های اختیاری به صورت سری ۱۰٪ کاهش داشته است که دو

جدول ۱- مقادیر پارامترهای کیفی و عملکرد برکه‌های اختیاری سری و موازی در دوره بلندمدت

P-value (آزمون من-وتینی)	میانگین		واحد	پارامتر
	موازی	سری		
۰/۹۵	۴۳/۷	۴۳/۹	mg/L	BOD پساب خروجی
* ۰/۰۳۶	۸۲/۵	۹۴/۹	mg/L	COD پساب خروجی
* ۰/۰۰۸	۱۱۰	۹۲/۴	mg/L	TSS پساب خروجی
* ۰/۰۰۳	۴۷/۸	۳۶/۴	mg/L	TKN پساب خروجی
* ۰/۰۲	۰/۵۳	۰/۴۸	-	BOD/COD پساب خروجی
۰/۳۸	۶۷	۷۰/۶	درصد	کاهش غلظت BOD در برکه اختیاری
۰/۰۷	۶۵/۳	۶۹	درصد	کاهش غلظت COD در برکه اختیاری
۰/۴۲	۳۱/۸	۳۸/۹	درصد	کاهش غلظت TKN در برکه اختیاری
۰/۱۳	۲/۳	۲/۸	لگاریتم MPN/100mL	کلیفرم مدفوعی پساب خروجی

* اختلاف میانگین داده‌ها در شرایط بهره‌برداری سری و موازی تا سطح ۹۵٪ معنی‌دار است.

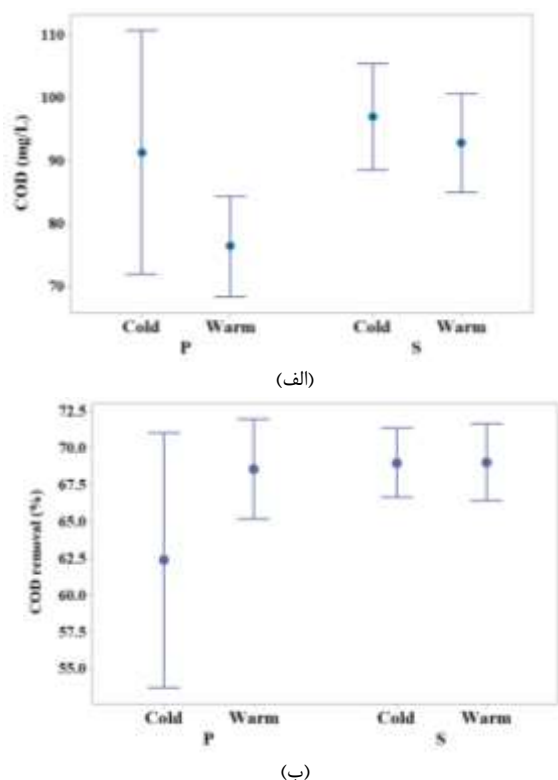
جدول ۲- مقادیر پارامترهای کیفی و عملکرد برکه‌های اختیاری سری و موازی در دوره بلندمدت

ردیف	منطقه	مرجع	عملکرد تصفیه
۱	یزد	اسلامی و همکاران (۱۳۹۴)	TSS: ۸۰٪؛ آمونیم: ۸۰٪؛ نیترات: ۸۰٪؛ BOD: ۵۷٪؛ TP: ۶۰٪
۲	همدان	کریمی و همکاران (۱۳۹۷)	COD: ۷۸٪؛ PO ₄ : ۶۱٪
۳	اهواز	عبادی و همکاران (۱۳۹۶)	BOD: ۸۰٪؛ COD: ۷۶٪؛ TP: ۶۷٪؛ TKN: ۷۸٪
۴	مشهد	علیپور و همکاران (۱۳۹۴)	COD: ۸۳٪؛ BOD: ۸۳٪؛ TSS: ۷۸٪
۵	خرم‌آباد	فریدونی و رادمنش (۱۳۹۳)	TSS: ۷۵٪؛ BOD: ۵۵٪؛ COD: ۶۰٪
۶	بیرجند	Khodadadi و همکاران، ۲۰۱۶	BOD: ۷۵٪؛ COD: ۶۸٪
۷	هویزه	Jamshidi و همکاران، ۲۰۱۱	COD: ۴۵٪
۸	چین	Zhao و همکاران، ۲۰۲۲	TKN: ۸۲٪
۹	آفریقای جنوبی	Edokpayi و همکاران، ۲۰۲۱	COD: ۴۹-۸٪
۱۰	مراکش	Achag و همکاران، ۲۰۲۱	اختیاری (COD: ۱۰٪؛ BOD: ۲۴٪)؛ کل تصفیه‌خانه (BOD: ۷۸٪؛ COD: ۵۱٪)
۱۱	مصر	Abdo و همکاران، ۲۰۲۲	COD: ۳۳-۹۲٪؛ BOD: ۱۵-۹۲٪؛ TKN: ۸۷-۰٪
۱۲	نامیبیا	Sinn و همکاران، ۲۰۲۲	COD: ۴۰-۸۰٪؛ NH ₄ : ۵۰-۹۹٪
۱۳	دلیجان	برکه‌های اختیاری (پژوهش حاضر)	BOD: ۷۱-۶۷٪؛ COD: ۶۹-۶۵٪؛ TKN: ۳۹-۳۲٪
		کل تصفیه‌خانه (پژوهش حاضر)	BOD: ۷۹٪؛ COD: ۷۸٪

۳-۲- عوامل محیطی

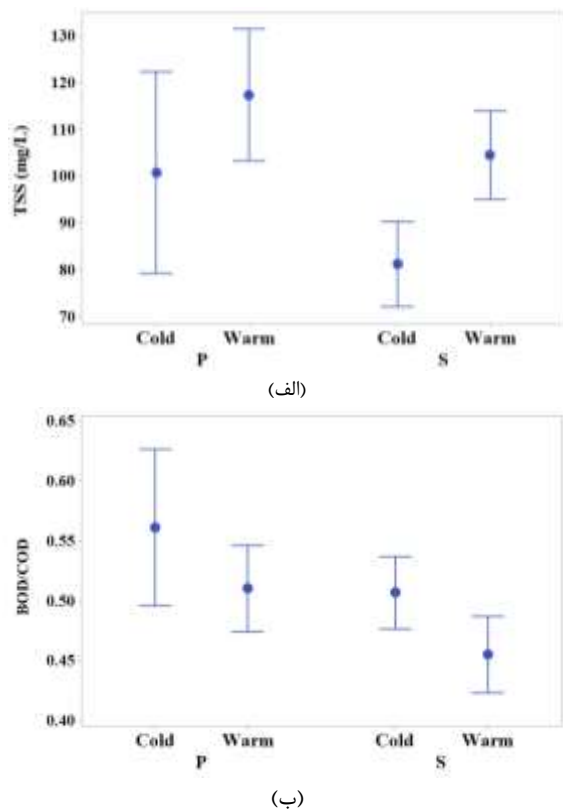
مقایسه آماری نتایج کیفیت پساب و عملکرد تصفیه در شرایط بهره‌برداری برکه‌های اختیاری به صورت سری یا موازی در دو فصل سرد (پاییز و زمستان) و گرم (بهار و تابستان) سال نشان می‌دهد برکه‌های سری در سه مؤلفه نسبت غلظت TKN (شکل ۹- الف)، TSS (شکل ۱۰- الف) و نسبت BOD به COD (شکل ۱۰- ب) پساب خروجی رفتار متفاوتی نسبت به دوره سرد سال از خود نشان می‌دهند به طوری که در دوره گرم سال، میزان تجزیه‌پذیری بیولوژیکی و TKN پساب افت کرده و TSS افزایش می‌یابد. به طور دقیق‌تر، در شرایط بهره‌برداری از برکه‌های اختیاری در دوره سرد سال، نسبت BOD به COD پساب خروجی برکه‌های اختیاری سری ۱۰٪ و غلظت TSS پساب خروجی از این واحدها ۱۹٪ کمتر از برکه‌های موازی است. همچنین میزان حذف TKN در شرایط سری نسبت به موازی ۱۳٪ بیشتر است. سایر پارامترها نسبت به شرایط دمایی تفاوت قابل ملاحظه‌ای ندارند (شکل‌های ۸) و (۹).

این موضوع نشان می‌دهد شرایط رشد جلبکی در برکه‌های اختیاری سری در دو دوره سرد و گرم سال متفاوت است اما این شرایط برای برکه‌های موازی چندان صدق نمی‌کند. به عبارتی در تابستان شرایط برای رشد جلبک‌ها، به عنوان ذرات معلق و لذا هوادهی بهتر محیط بیولوژیکی، جذب نیترژن آمونیاکی و در نتیجه کاهش نسبت BOD و COD و غلظت TKN فراهم شده و در زمستان این قابلیت به صورت قابل ملاحظه‌ای از دست می‌رود (Chapra, ۲۰۰۸).



شکل ۸- مقایسه عملکرد برکه‌های اختیاری سری (S) و موازی (P) در: الف) کاهش غلظت COD در پساب، ب) حذف COD (%). به تفکیک دوره سرد و گرم سال

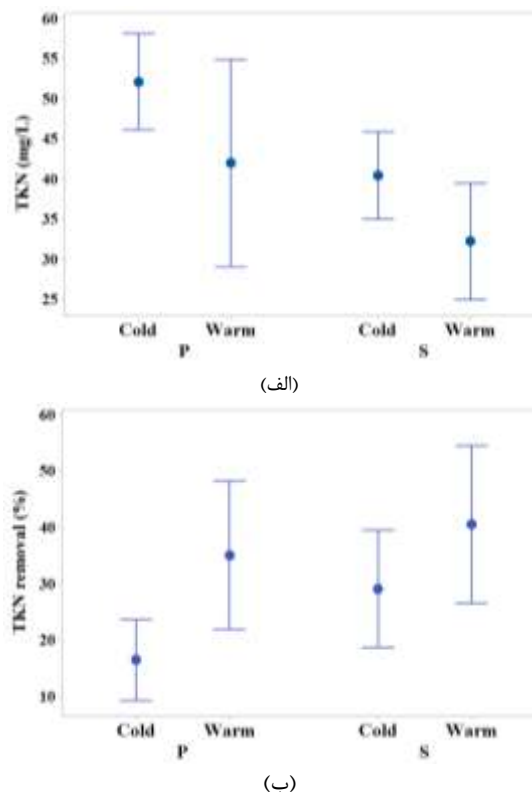
برای دو دوره سرد و گرم سال انجام شد و عملکرد این دو برکه در شرایط پیش‌هوادهی شده و بدون پیش‌هوادهی مورد مقایسه قرار گرفت.



شکل ۱۰- مقایسه عملکرد برکه‌های اختیاری سری (S) و موازی (P) در کاهش: (الف) غلظت TSS، (ب) نسبت BOD به COD به تفکیک دوره سرد و گرم سال

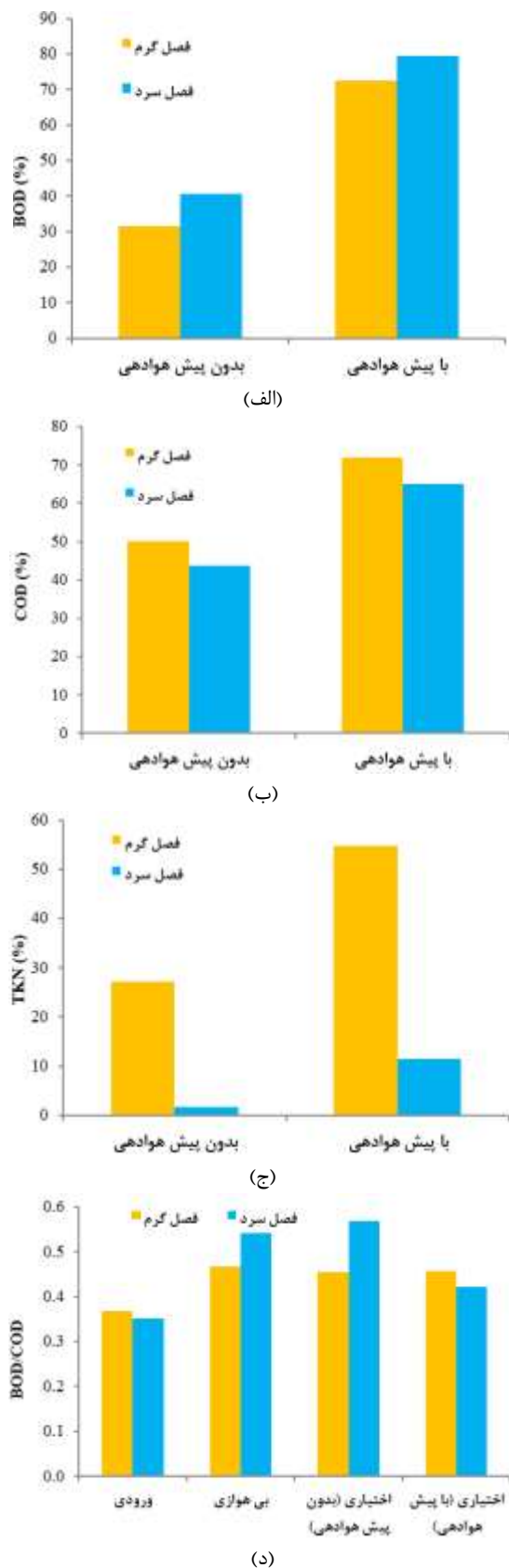
۳-۳- مطالعه پایلوت

از آنجایی که تصفیه‌خانه فاضلاب شهر دلیجان به حداکثر ظرفیت بارگذاری طراحی خود رسیده است و افت عملکرد برکه‌های اختیاری نتیجه بارگذاری مازاد آلی به برکه‌ها هستند، لذا پیشنهاد شد به صورت پایلوت و برای کنترل نقش شرایط هوازی برکه‌های اختیاری، فاضلاب خروجی از برکه‌های بی‌هوازی، یک پیش‌هوادهی قبل از ورود به برکه اختیاری داشته باشد. این پیش‌هوادهی صرفاً برای افزایش هوای محلول فاضلاب خروجی از برکه‌ها با شرایط کاملاً بی‌هوازی است تا با توجه به بارگذاری بالای کربنی برکه‌های اختیاری، به‌ویژه در شرایط زمستان، شرایط بی‌هوازی در برکه‌های اختیاری غالب نگردد. بنابراین این پیش‌هوادهی هیچ‌گونه هدف بیولوژیکی برای تجزیه زیستی نداشته و مشابه یک دانه‌گیری با هوادهی، برای تزریق هوای اولیه پیشنهاد شد. این موضوع به صورت پایلوت برای یک برکه (برکه اختیاری ۲) اجرا شد و نتایج عملکرد آن با برکه اختیاری موازی



شکل ۹- مقایسه عملکرد برکه‌های اختیاری سری (S) و موازی (P) در: (الف) کاهش غلظت TKN در پساب، (ب) حذف TKN (%) به تفکیک دوره سرد و گرم سال

اما این تفاوت عملکرد در برکه‌های اختیاری با چیدمان موازی به چشم نمی‌خورد. در صورتی که به بازه داده‌ها در برکه‌های اختیاری موازی در دوره سرد سال در شکل‌های (۸) تا (۱۰) توجه شود، می‌توان مشاهده کرد که عملکرد این سیستم در این دوره نسبت به سایر چیدمان‌ها و دوره‌های سال افت محسوسی دارد. این موضوع می‌تواند به این دلیل باشد که در شرایط بهره‌برداری برکه‌های اختیاری به صورت موازی، شرایط بی‌هوازی باقی‌مانده از برکه‌های بی‌هوازی در فاضلاب ورودی تا بخش زیادی از برکه‌ها پابرجاست. اما در شرایط بهره‌برداری از برکه‌های اختیاری سری، جریان نهرگونه فاضلاب به مرور شرایط هوازی به خود گرفته و شرایط بی‌هوازی مطلق حاصل از فعالیت برکه‌های بی‌هوازی در این چیدمان کم‌رنگ می‌شود (بدلیانس قلی‌کندی، ۱۳۹۷). بنابراین شرایط مناسب‌تری برای فعالیت باکتریایی در حالت موازی، تجزیه ترکیبات زودتجزیه‌پذیر توسط باکتری‌ها و رشد بهتر جلبک‌ها فراهم می‌شود. فعالیت جلبک‌ها در دوره گرم سال می‌تواند این مشکل را تا حدودی در برکه‌های اختیاری با چیدمان موازی بپوشاند و جبران کند اما در دوره سرد سال، چالش و ضعف پیش‌آمده نمایان می‌گردد. برای کنترل این نتیجه‌گیری، مطالعات پایلوت پیش‌هوادهی فاضلاب یکی از برکه‌های اختیاری موازی،



شکل ۱۱- مقایسه متوسط عملکرد برکه‌های اختیاری موازی با شرایط پیش‌هوادهی شده و پیش‌هوادهی نشده در کاهش آلاینده‌ها به تفکیک دوره‌های سرد و گرم سال

آن (برکه اختیاری ۱) که بدون پیش‌هوادهی و تحت شرایط آب و هوایی، بهره‌برداری و کیفیت فاضلاب ورودی یکسان است مورد مقایسه قرار گرفت.

نتایج آزمایشگاهی برای دو دوره گرم (مرداد و شهریور ۱۴۰۰) و سرد (بهمن و اسفند ۱۴۰۰) سال نشان می‌دهد برکه اختیاری موازی با شرایط پیش‌هوادهی توانسته است میزان حذف BOD، COD و TKN به مراتب بالاتری نسبت به شرایط برکه اختیاری بدون پیش‌هوادهی داشته باشد. این مزیت همچنین در دو دوره گرم و سرد سال به‌طور مشابه تکرار شده است. به‌طور متوسط در این دو دوره، عملکرد برکه اختیاری با شرایط پیش‌هوادهی در حذف BOD، COD و TKN به ترتیب در حدود ۲۳٪، ۴۰٪ و ۱۹٪ بیشتر از برکه اختیاری بدون شرایط پیش‌هوادهی بوده است (شکل ۱۱). در این بین، پیش‌هوادهی اثر بسیار قابل ملاحظه‌تری در افزایش حذف TKN و BOD به‌ویژه در دوره سرد سال داشته است. تجزیه و حذف این ترکیبات، که اساساً تابع ترکیبات آلی است، می‌تواند در شرایطی که جلبک‌ها در فصل سرد سال ناتوان از هوادهی در بارگذاری آلی بالا هستند، با پیش‌هوادهی وضعیت مطلوب‌تری برای فعالیت بیولوژیکی فراهم آورد. این نتیجه‌گیری به‌ویژه براساس شاخص نسبت BOD به COD فاضلاب در واحدهای مختلف تصفیه‌خانه به‌خوبی مشهود است (شکل ۱۱-د).

برکه‌های بی‌هوازی در فصل سرد سال، به دلیل فعالیت باکتریایی محدودتر، بیشتر به هیدرولیز فاضلاب پرداخته‌اند به طوری که این نسبت در فصل سرد از ۰/۳۵ به ۰/۵۴ افزایش می‌یابد. اما در فصل گرم، به دلیل امکان تصفیه و هضم بهتر، این نسبت به ۰/۴۸ در پساب خروجی از برکه‌های بی‌هوازی محدود می‌شود. سپس برکه‌های اختیاری در فصل گرم سال عملکرد مشابهی در شرایط پیش‌هوادهی شده و بدون پیش‌هوادهی داشته‌اند. این نسبت در پساب خروجی هر دو برکه در حدود ۰/۴۵ است که مشابهت بسیار زیادی با متوسط این نسبت برای پساب خروجی برکه‌های تثبیت در کل کشور (برابر ۰/۴۵) دارد (مؤسسه تحقیقات آب، ۱۳۹۶). اما در فصل سرد سال، اختلاف نسبت BOD به COD پساب خروجی این دو برکه بالغ بر ۰/۱۵ واحد است یعنی در شرایط بدون هوادهی این نسبت ۰/۵۷ و در شرایط با هوادهی ۰/۴۲ است. بنابراین برکه اختیاری بدون پیش‌هوادهی عملاً نتوانسته است نسبت تجزیه‌پذیری فاضلاب ورودی به خود را در فصل سرد سال کاهش دهد اما برکه با پیش‌هوادهی توانسته است شرایط تجزیه‌پذیری فاضلاب خروجی را مشابه فصل گرم سال بهبود دهد.

۲- بزرگترین چالش برکه‌های اختیاری با چیدمان موازی، به دلیل جریان نهرگونه آن‌ها و تأثیرپذیری فاضلاب از شرایط برکه‌های بی‌هوازی، میزان اکسیژن محلول پایین فاضلاب است که موجب کاهش عملکرد تصفیه و حذف ترکیبات زودتجزیه‌پذیر می‌شود. اثر این ویژگی در فصل زمستان، که توان هوادهی جلبک‌ها افت می‌کند، بیشتر نمایان می‌شود. به طوری که مشاهده شد تجزیه ترکیبات آلی نیتروژنی در برکه‌های موازی در فصل زمستان به میزان قابل ملاحظه‌ای افت می‌کند.

۳- با توجه به عملکرد مثبت پیش‌هوادهی فاضلاب خروجی از برکه‌های بی‌هوازی، پیشنهاد شد از این روش به صورت موقت برای فصول سرد سال و برای تقویت شرایط هوازی برکه‌های اختیاری به‌ویژه با چیدمان موازی استفاده شود. جانمایی آن بعد از برکه‌های بی‌هوازی و پیش از برکه‌های اختیاری است. ۴- به طور کلی برکه‌های اختیاری با چیدمان سری نسبت به برکه‌های موازی در عملکرد حذف ترکیبات اصلی فاضلاب تفاوت قابل ملاحظه‌ای ندارند. اما در شرایط مشابه زمان ماند و بارگذاری سطحی، عملکرد بهتری در تصفیه ترکیبات زودتجزیه‌پذیر و کاهش نسبت BOD به COD و درصد TKN پساب دارند. به علاوه افزایش غلظت TSS در پساب خروجی برکه‌های اختیاری با چیدمان موازی می‌تواند یک چالش بهداشتی و زیست‌محیطی برای منابع آب پذیرنده، فرآیند گندزدایی یا سیستم‌های آبیاری کشاورزی ایجاد نماید.

۵- تشکر و قدردانی

این پژوهش مستخرج از نتایج طرح پژوهشی به شماره ۱۱۷۱۳ است که با حمایت مالی شرکت آب و فاضلاب استان مرکزی انجام شده است. همچنین نویسندگان بدین‌وسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را از زحمات و همکاری‌های آقایان مهندس یوسف عرفانی‌نسب، شمس‌خانی و جهانگیری (شرکت آب و فاضلاب استان مرکزی) و آقای ضیائی (دانشگاه اصفهان) اعلام می‌دارند.

۶- مراجع

اسلامی، ه، غلمانی س، و، صالحی وزیری، ا، حسین‌شاهی، د، قلعه‌عسکری س، طالبی همت‌آبادی پ، معراجی‌مقدم ط، "مقایسه عملکرد برکه‌های تثبیت و تالاب مصنوعی با جریان زیرسطحی در تصفیه فاضلاب شهری در یزد"، مجله آب و فاضلاب، ۱۳۹۴، ۱۰۰ (۲۶)، ۱۰۶-۱۰۰.

الماسی ع، محمدی م، درگاهی ع، بهمنی ن، "ارزیابی ثابت مرگ-ومیر کلیفرم مدفوعی موجود در برکه تثبیت در حضور نور مرئی خورشید"، مجله سلامت محیط و کار، ۱۳۹۶، ۳ (۱)، ۲۷-۲۰.

براساس جمیع نتایج آزمایشگاهی مقایسه‌ای می‌توان نتیجه گرفت پیش‌هوادهی برکه‌های اختیاری با ظرفیت بارگذاری بیش از توان زیستی، در فصل سرد سال پیشنهاد می‌شود تا زمینه برای حذف ترکیبات زودتجزیه‌پذیر (مانند BOD کربنی و TKN) فراهم باشد. این پیش‌هوادهی در برکه‌های اختیاری می‌تواند:

(۱) فاضلاب را از شرایط بی‌هوازی فاضلاب ورودی از برکه‌های بی‌هوازی خارج کند،

(۲) توان تجزیه‌پذیری بیولوژیکی فاضلاب را در فصل سرد سال که جلبک‌ها توان هوادهی کمی دارند حفظ نماید،

(۳) به نسبت انعطاف‌پذیری بهره‌برداری از برکه‌های اختیاری را در طول سال افزایش دهد.

باید یادآوری نمود که این پیش‌هوادهی با هدف تولید لجن یا تجزیه بیولوژیکی نیست که نیازمند برگشت لجن، تأمین هواده قوی، یا مصرف انرژی بالا باشد، بلکه کافی است میزان اکسیژن محلول فاضلاب از صفر افزایش یابد و فاضلاب با شرایط بی‌هوازی مطلق وارد برکه‌های اختیاری نشود. همچنین باید توجه داشت عملکرد برکه‌های اختیاری و بهره‌برداری از آن‌ها وابسته به کل بار آلی کربنی موجود در آن‌ها است. بنابراین اینکه صرفاً طراحی و بهره‌برداری از این واحدها براساس غلظت BOD فاضلاب ورودی تعیین شود موجب می‌شود در زمان بهره‌برداری، بارگذاری آلی در شرایط ایده‌آل طراحی نیز بیشتر از حد برآوردی باشد. زیرا باید به این نکته توجه داشت جلبک‌ها و توده‌های زیستی فتوسنتزکننده خود بار آلی کربنی تجزیه‌پذیر هستند که از دید آن‌ها در هنگام تابستان و فصول گرم سال، بار آلی دوچندان برای فصول سرد سال در پی خواهد داشت. برآورد می‌شود حدود ۶۰ تا ۹۰٪ جامدات معلق در برکه‌های اختیاری از نوع جلبک بوده و در صورتی که هر میلی‌گرم از جامدات معلق از این نوع در ۰/۴۵ میلی‌گرم BOD تولید نماید، آن‌گاه هر گرم TSS در برکه اختیاری برابر ۰/۳ تا ۰/۴ گرم BOD خواهد بود (مشکینی و همکاران، ۱۳۹۵).

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش که در مقیاس واقعی و براساس داده‌های بلندمدت و نمونه‌برداری‌های تکمیلی در تصفیه‌خانه فاضلاب دلیجان انجام شد، نتیجه گرفته می‌شود که:

۱- برکه‌های بی‌هوازی برای پیش‌تصفیه فاضلاب، کاهش بار آلی کربنی و افزایش نسبت تجزیه‌پذیری فاضلاب (نسبت BOD به COD) در سیستم‌های برکه تثبیت، به‌ویژه در شرایط بارگذاری بالا، عملکرد مطلوبی دارند و پیشنهاد می‌شود در نمونه‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرند. ممکن است عملکرد کاهش BOD یا COD فاضلاب این برکه‌ها در رقم ناچیز باشد اما تأثیری که بر فرآیندهای آبی خود دارند اهمیت بیشتری دارد.

- Coggins LX, Crosbie ND, Ghadouani A, "The small, the big, and the beautiful: Emerging challenges and opportunities for waste stabilization ponds in Australia", WIREs Water, 2019, 1-18. doi:10.1002/wat2.1383.
- Chapra SC, "Surface Water Quality Modeling", Waveland Inc., 2008.
- Davies ML, "Water and Wastewater Engineering, Design Principles and Practice", 2010, WEF Press.
- Decostere B, Alvarado A, Sanchez EM, Pauta GC, Rousseau DPL, Nopens I, Hulle SWV, "Model based analysis of the growth kinetics of microalgal species residing in a waste stabilization pond", Chemical Technology and Biotechnology, 2017, 92 (6), 1362-1369. Doi: 10.1002/jctb.5131.
- Edokpayi JN, Odiyo JO, Popoola OE, Msagati TAM, "Evaluation of contaminants removal by waste stabilization ponds: A case study of Siloam WSPs in Vhembe District, South Africa", Heliyon, 2021, 7 (2), e06207. Doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e06207.
- Espinosa MF, Von Sperling M, Verbyla ME, "Performance evaluation of 388 full-scale waste stabilization pond systems with seven different configurations", Water Science and Technology, 2017, 75 (4), 916-927. Doi: 10.2166/wst.2016.532.
- Ghalhari MR, Schonberger H, Lasaki BA, Asghari K, Milan EG, Rahimi NR, Yousefi S, Vakili B, Mahvi AH, "Performance evaluation and siting index of the stabilization ponds based on environmental parameters: a case study in Iran", Journal of Environmental Health Science and Engineering, 2021, 19, 1681-1700. Doi: 10.1007/s40201-021-00723-9.
- Gholikandi GB, "Methanogenesis: Biochemistry, Ecological Functions, Natural and Engineered Environments", Nova Science Publishers, USA, 2014.
- Gholikandi GB, Jamshidi S, Hazrati H, "Optimization of anaerobic baffled reactor (ABR) using artificial neural network in municipal wastewater treatment", Environmental Engineering and Management Journal, 2014, 13 (1), 95-104.
- Gerardi MH, "Nitrification and denitrification in the activated sludge process", 2003, John Wiley & Sons.
- Ho LH, Echelpoel WV, Goethals PLM, "Design of Waste Stabilization Pond system: a review", Water Research, 2017, 123, 236-248. Doi: 10.1016/j.watres.2017.06.071
- Jamshidi S, Gholikandi GB, "An assessment of using anaerobic baffled reactor to upgrade wastewater stabilization ponds: a pilot study", International Journal of Sustainable Development and Planning, 2014, 9 (4), 597-607. Doi: 10.2495/SDP-V9-N4-597-607.
- Jamshidi S, Gholikandi GB, Orumieh HR, "High organic loading rate and waste stabilization pond's operation efficiency: a case study", WIT Transactions on Ecology and the Environment, 2011, 148, 415-424. Doi: 10.2495/RAV110381.
- Khodadadi M, Mesdaghinia A, Nasseri S, Ghaneian MT, Ehrampoush MH, Hadi M, "Prediction of the waste stabilization pond performance using linear multiple regression and multi-layer perceptron neural network: a case study of Birjand, Iran", بدلیانس قلی‌کندی گ، "طراحی تصفیه‌خانه فاضلاب"، نشر آبیژ، ۱۳۹۷.
- شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، "دستیار مهندس آب و فاضلاب"، وزارت نیرو، ۱۳۹۱.
- عبادی ح، ساکی‌پور ر، تکدستان ا، فتحی ا، "بررسی راندمان برکه‌های تثبیت بافل‌دار به‌همراه بستر سنگی در حذف مواد آلی و مغذی از فاضلاب شهری (مطالعه موردی: تصفیه‌خانه غرب اهواز)"، پنجمین کنگره بین‌المللی عمران، معماری و توسعه شهری، ۱۳۹۶.
- علیپور م، ر، علی‌دادی ح، نجف‌پور ع، ا، پیروی ر، "ارزیابی عملکرد سیستم برکه تثبیت تصفیه خانه فاضلاب اولنگ مشهد"، فصلنامه پژوهش در بهداشت محیط، ۱۳۹۴، ۱ (۱)، ۶۸-۶۰ فریدونی ت، راندمنش ف، "بررسی راندمان و مقدار حذف آلاینده‌ها در برکه‌های تثبیت فاضلاب (مطالعه موردی: تصفیه‌خانه فاضلاب شهر خرم‌آباد)"، کنفرانس ملی علوم و مهندسی محیط زیست، ۱۳۹۳.
- کریمی، ا، چراغی م، نیک‌داد ح، ر، "ارزیابی عملکرد برکه تثبیت، لجن فعال و لاگون هوادهی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب کبودرآهنگ، نهاوند و اسدآباد"، دومین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران، ۱۳۹۷.
- مشکینی م، بیروق ع س، رضائی م، "برکه‌های تثبیت فاضلاب"، جهاد دانشگاهی امیرکبیر، ۱۳۹۵.
- منزوی م ت، "فاضلاب شهری (جلد دوم)، تصفیه فاضلاب" چاپ چهارده، دانشگاه تهران، ۱۳۹۲.
- مؤسسه تحقیقات آب، "گزارش طرح تدوین سند راهبردی و نقشه راه فناوری تصفیه فاضلاب (جلد دوم)"، ۱۳۹۶.
- Abdo SM, El-Liethy MA, Doma HS, El Taweel GE, Ali GH, "Chlorine as an integrated approach for environmental health and hygiene: A case study on evaluation of the performance of waste stabilization ponds located at 11 governorates in Egypt", Emerging Contaminants, 2022, 8, 243-253. Doi: 10.1016/j.emcon.2022.04.002.
- Achag B, Mouhanni H, Bendou A, "Improving the performance of waste stabilization ponds in an arid climate", Journal of Water and Climate Change, 2021, 12 (8), 3634-3647. Doi: 10.2166/wcc.2021.218.
- Ali AE, Salem WM, Younes SM, Kaid M, "Modeling climatic effect on physiochemical parameters and microorganisms of Stabilization Pond Performance", Heliyon, 2020, 6, e04005. Doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04005
- APHA, "Standard methods for the examination of water and wastewater", 23rd edition, Water Environment Federation, American Public Health Association, 2017.
- Bansah KJ, Suglo RS, "Sewage Treatment by Waste Stabilization Pond Systems", Journal of Energy and Natural Resource Management, 2016, 3 (1), 7-14.

pond", *Journal of Cleaner Production*, 2022, 371, 13353. Doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133531

- Environmental Health Engineering and Management Journal*, 2016, 3 (2), 81-89. Doi: 10.15171/EHEM.2016.05
- Khosravi R, Shahryari T, Halvani A., Khodadadi M, Ahrari F, Mehrizi EA, "Kinetic analysis of organic matter removal in stabilization pond in the wastewater treatment plant of Birjand", *Advances in Environmental Biology*, 2013, 7 (6), 1182-1187.
- Liu L, Hall G, Champagne P, "Effects of environmental factors on the disinfection performance of a wastewater stabilization pond operated in a temperate climate", *Water*, 2016, 8 (5), 1-11. Doi: 10.3390/w8010005
- Mahapatra S, Samal K, Dash RR, "Waste stabilization pond (wsp) for wastewater treatment: a review on factors, modelling and cost analysis", *Journal of Environmental Management*, 2022, 308, 114668. Doi: 10.1016/j.jenvman.2022.114668
- Naddafi K, Hassanvand MS, Dehghanifard E, Faezi Razi D, Mostofi S, Kasaei N, Nabizadeh R, Heidari M, "Performance evaluation of wastewater stabilization ponds in arak-iran", *Iranian Journal of Environmental Health, Science and Engineering*, 2009, 6 (1), 41-46.
- Olukanni DO, Ducoste JJ, "Optimization of waste stabilization pond design for developing nations using computational fluid dynamics", *Ecological Engineering*, 2011, 37, 1878-1888. Doi: 10.1016/j.ecoleng.2011.06.003
- Passos RG, Ferreira VVM, Sperling MV, "A dynamic and unified model of hydrodynamics in waste stabilization ponds", *Chemical Engineering Research and Design*, 2019, 144, 434-443. Doi: 10.1016/j.cherd.2019.02.025
- Rockne KJ, Brezonik PL, "Nutrient Removal in a Cold-Region Wastewater Stabilization Pond: Importance of Ammonia Volatilization", *Journal of Environmental Engineering*, 2006, 132 (4), 451-459. Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2006)132-4(451)
- Shahsavani E, Ebrahimi AA, Ehrampoush MH, Maleknia H, Eslami H, Samaei MR, "Developing a system dynamics model for prediction of phosphorus in facultative stabilization ponds", *AMB Express* 2019, 9 (1), 157. Doi: 10.1186/s13568-019-0882-6
- Sinn J, Agrawal S, Orschler L, Lackner S, "Characterization and evaluation of waste stabilization pond systems in Namibia", *H2Open Journal*, 2022, 5 (2), 365-378. Doi: 10.2166/h2oj.2022.004
- Sperling M, "Urban wastewater treatment in Brazil", 2016, technical note.
- Yazdian H, Jamshidi S, "Performance evaluation of wastewater treatment plants under the sewage variations imposed by COVID-19 spread prevention actions", *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 2021, 19 (2), 1613-1621. Doi: 10.1007/s40201-021-00717-7
- Zhao Y, Tu Q, Yang Y, Shu X, Ma W, Fang Y, Li B, Huang J, Zhao H, Duan C, "Long-term effects of duckweed cover on the performance and microbial community of a pilot-scale waste stabilization

EXTENDED ABSTRACT

Performance Evaluation and Comparison of Facultative Ponds in Series and Parallel for Wastewater Treatment (Case study: Delijan WWTP)

Shervin Jamshidi^{a*}, Majid Moradkhani^b, MohammadAli Zarei^b, Mehran Mamaghani Nejad^b

^a Department of Civil Engineering, University of Isfahan, Iran

^b Markazi Province Water and Wastewater Company, Arak, Iran

Received: 22 July 2022; Review: 03 September 2022; Accepted: 01 October 2022

Keywords:

Biodegradability, Facultative bacteria, Organic compound, Pre-aeration, Waste stabilization pond (WSP).

1. Introduction

Waste stabilization pond (WSP) is a conventional and widely applicable wastewater treatment unit globally. This system does not require complicated mechanical operating systems but it should not be classified as a simple process at all. Facultative ponds (FP) are the heart of this system as they use the natural symbiosis of facultative bacteria and algae for organic removal. The performance of FP is very reliant on different parameters such as wastewater influent characteristics or environmental operating conditions. Nonetheless, they are simply designed and operated based on parameters like surface organic loads and hydraulic retention time (Khosravi et al. 2013). Some literatures have recently focused on the optimization of WSP layout for higher performance (Shahsavani et al. 2019; Decostere et al. 2017; Espinosa et al. 2017). For example, a question is that which form of FPs, in series or parallel, have the highest performance or operational reliability? Answering to this question is practically a challenge. There is little chance in full scale to compare the performance of FPs with the layouts in series and parallel for long term, with same source of real wastewater, similar climate and operating conditions. This research primarily evaluates and compares the performance of FPs (2008-2020) in series and parallel layout in Delijan WSP.

2. Methodology

2.1. Study area

This study was carried out in Delijan wastewater treatment plant (WWTP) including two parallel anaerobic ponds (AP1 and AP2), two FPs (FP1 and FP2) and finally a disinfection unit. FPs were initially implemented in series (2008-2017), while they were changed into parallel later (2018-2020). High pollution load is the main problem of this facility as their dissolved oxygen (DO) and oxidation-reduction potential (ORP) reduces below 1mg/L and -150mV, respectively.

2.2. Analysis and tests

The experimental results of Delijan WWTP coupling with water quality data of the inflow and outflow of FPs were compared by statistical methods (Mann-Whitney) with 95% confidence interval and Minitab 19 software. Accordingly, the data of water quality parameters such as biochemical oxidation demand (BOD), chemical oxidation demand (COD), total suspended solids (TSS), and fecal coliform (FC) in addition to the

* Corresponding Author

E-mail addresses: sh.jamshidi@eng.ui.ac.ir (Shervin Jamshidi), research@abfamarkazi.ir (Majid Moradkhani), research1@abfamarkazi.ir (MohammadAli Zarei), research1@abfamarkazi.ir (Mehran Mamaghani Nejad).

supplementary sampling data of total kjeldahl nitrogen (TKN) and nitrate were evaluated and compared in different scenarios. Two layouts of FPs (S: series and P: parallel) and two weather conditions (Warm: for spring and summer and Cold: for fall and winter) were considered for detailed comparison.

2.3. Pilot study

Since low DO is an operational problem of FPs, a pilot study is also carried out in this research to control the impacts of limited pre-aeration of the inflow of FP on its performance and operation. For this purpose, FP1 fed by AP1 is pre-aerated temporarily for pilot study in both summer and winter periods, while FP1 remained without pre-aeration.

3. Results and discussion

Overall COD and BOD removal efficiency of Delijan WWTP show that this system has acceptable average performance of 79% in long term. Facultative ponds, in S and P layout, have 65-70% organic removal and 30-40% TKN removal efficiencies.

The statistical comparative results indicated that some parameters like BOD in the effluent of FPs and BOD and COD removal efficiencies (%) have not been changed significantly (P value > 0.05) in P formation in comparison with S layout. However, the concentrations of specific parameters have been increased significantly (P value < 0.05) such as TSS (19%) and TKN (31%) while the ratio of BOD to COD content of effluent was also increased significantly (10%). These considerable variations of aforementioned parameters show that FP with parallel layout has inferior performance and operation in comparison with S layout. In a nutshell, WSP capacity on removing readily biodegradable compounds of wastewater is reduced in P layout. In addition, the possibility of flushing algae out is also increased. It can be concluded that wastewater degradation is more completed in S formation of FPs.

Detailed comparative analysis also shows that the main weakness of FPs in P formation is embedded during cold weather conditions. In S layout, due to elongated hydraulic plug-flow condition, the anaerobic inflow to FPs is gradually improved to aerobic from APs to the FP2. It provides at least a more reliable operation for FP2 in comparison with P layout. This specification strengthens the operation of FPs during cold periods. Therefore, lower DO level of FP1 and FP2 in P layout can reduce the nitrification and readily biodegradable oxidation potential of organic compounds. Consequently, TKN concentration and the ratio of BOD to COD increase in P formation, particularly during cold weather.

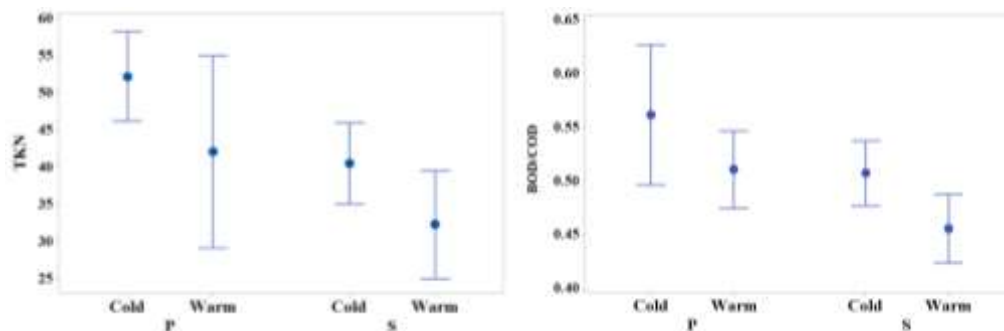


Fig. 1. TKN concentration (left) and BOD/COD ratio (right) in effluent of facultative ponds in series (S) and parallel (P) formation in cold and warm seasons

The results of pilot study show that FPs with P layout can be strengthened in performance and operation, particularly in cold weather which relatively supports the weakness. In other words, temporary pre-aeration of FPs can relatively improve the performance of these treatment units in winter when the aeration potential of algae naturally reduces. This technique may enhance TKN removal efficiency (%) and reduces the ratio of BOD to COD in the treated wastewater (Fig. 2).

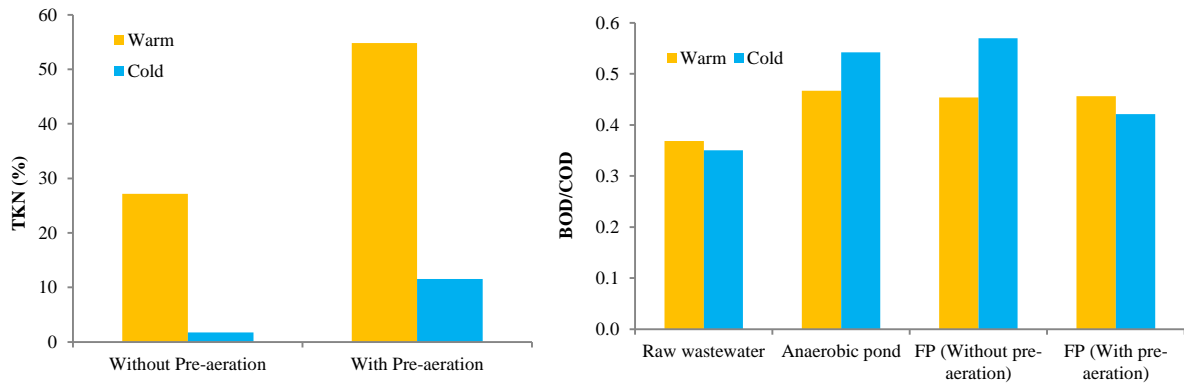


Fig. 2. TKN removal (left) and BOD/COD ratio (right) of Delijan WWTP with parallel facultative ponds (FP) with and without pre-aeration in cold and warm seasons

4. Conclusions

Regarding the statistical and experimental results, it was concluded that FPs with parallel formation is inferior in performance and operation in comparison with S layout. In an overloaded WWTP like Delijan WSP, TKN and readily biodegradable removal of wastewater are adversely influenced significantly. In this condition, S layout has more completed biodegradation potential. In addition, this formation has more reliable performance during colder seasons. However, pre-aeration of parallel FPs can relatively compensate this weakness. It can also be recommended that elaborate evaluation and comparison of FPs should not be limited to ordinary BOD and COD removal efficiencies. TKN, TSS, FC, DO, ORP and BOD/COD ratio are some parameters that may provide an extended perspective for decision-makers and researchers.

5. References

- Decostere B, Alvarado A, Sanchez EM, Pauta GC, Rousseau DPL, Nopens I, Hulle SWV, "Model based analysis of the growth kinetics of microalgal species residing in a waste stabilization pond", 2017, *Chemical Technology and Biotechnology*, 92 (6), 1362-1369.
- Espinosa MF, von Sperling M, Verbyla ME, "Performance evaluation of 388 full-scale waste stabilization pond systems with seven different configurations", *Water Science and Technology* 2017, 75 (4), 916-927.
- Khosravi R, Khodadadi M, Gholizadeh A, Abouee E, Shahryari T, Ahrari F, Shahnian A, "Kinetic analysis of organic matter removal in stabilization pond in the wastewater treatment plant of Birjand", *Advances in Environmental Biology*, 2013, 7 (6), 1182-1187.
- Shahsavani E, Ebrahimi AA, Ehrampoush MH, Maleknia H, Eslami H, Samaei MR, "Developing a system dynamics model for prediction of phosphorus in facultative stabilization ponds", *AMB Express*, 2019, 9, 157.