

بهبود کیفیت پساب خروجی از برکه‌ی تثبیت تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به کمک عدسک آبی

سولماز سعادت* (استادیار)

حمیده کللی خورموجی (کارشناس ارشد)

ایوب کریمی جشنی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی، بخش مهندسی راه و ساختمان و محیط زیست، دانشگاه شیراز

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۳۹۸)
دوری ۲ - ۳۵، شماره ۲/۱، ص. ۱۳۳-۱۴۰، (پادداست نشی)

به دلیل رشد جلبک در برکه‌ی تکمیلی، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با روش برکه، تثبیت راندمان پایینی در حذف TSS دارند. یکی از روش‌های حذف جلبک، استفاده از عدسک آبی است. مکانیسم عدسک، ایجاد پوشش روی سطح آب و ممانعت از نفوذ نور برای رشد جلبک‌هاست. جهت بررسی کارایی عدسک در بهبود کیفیت پساب خروجی از برکه‌ی تثبیت فاضلاب، پایلوتی شامل دو حوضچه، یکی حاوی عدسک و دیگری به‌عنوان شاهد در تصفیه‌خانه‌ی پوشه‌ساخته شد. ورودی به دو حوضچه‌ی مذکور از خروجی برکه‌ی تکمیلی تصفیه‌خانه تهیه شد. سیستم به‌صورت پیوسته بهره‌برداری و پارامترهای مختلفی اندازه‌گیری شد. بازدهی حوضچه‌ی عدسک در حذف TSS: ۶۴ تا ۹۰ درصد، COD: ۴۶ تا ۵۶ درصد، نیترات: ۴۱ تا ۵۱ درصد، فسفات: ۵۸ تا ۷۱ درصد، کلیرم‌های کل: ۹۷/۲ تا ۹۸/۷ درصد و کلیرم‌های مدفوعی: ۹۵/۹ تا ۹۹/۲ درصد بود. نتایج حاکی از تأثیر بالای گیاه عدسک آبی در حذف TSS و بهبود کیفی پساب بود.

واژگان کلیدی: برکه‌ی تثبیت، تصفیه‌ی فاضلاب، عدسک آبی، جلبک.

۱. مقدمه

در حالی که بررسی تصفیه‌خانه‌های متداول فاضلاب شهری در جوامع پیشرفته، حکایت از بازدهی بالای عملکرد آن‌ها دارد، اما به دلیل هزینه‌ی زیاد ساخت و نیز نیاز به نیروی متخصص جهت راهبری و نگهداری، در جوامع در حال توسعه کمتر می‌توان نمونه‌های موفق از آن‌ها را یافت.^[۱] استفاده از سیستم‌های تصفیه‌ی فاضلاب ساده و با مصرف انرژی کم، علاوه بر تناسب با نیازهای یک اقتصاد درحال توسعه، در اصلاح و بهبود محیط‌زیست نیز نقش مؤثری دارد. برکه‌های تثبیت به لحاظ سادگی عملیات ساخت و بهره‌برداری، عدم نیاز به تجهیزات پیشرفته، عدم نیاز به نیروی متخصص و برخورداری از اقلیم گرم و معتدل در بسیاری از مناطق کشور، مناسب‌ترین سیستم برای تصفیه‌ی فاضلاب در بیشتر نقاط ایران هستند. اصلی‌ترین مشکل سیستم‌های مذکور، غلظت بالای توده‌ی جلبکی رشدیافته در برکه‌ی تکمیلی است که سبب بالا رفتن غلظت پارامترهای کیفی کدورت، TSS و حتی ایجاد طعم و بوی نامطبوع در آب می‌شود. رشد شدید جلبک‌های سبز-آبی منجر به ایجاد توده‌ها یا لخته‌هایی می‌شود که می‌توانند به‌عنوان سدی در برابر نفوذ اکسیژن به آب عمل کنند. همچنین تجزیه‌ی بقایای جلبکی می‌تواند منجر به کاهش غلظت اکسیژن محلول در آب شود. علاوه بر آن، وجود جلبک در پساب‌های تصفیه شده در استفاده‌ی مجدد از آن در بخش‌های مختلف، نظیر کشاورزی و تخلیه به

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۱۲/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۶/۴/۳، پذیرش ۱۳۹۶/۴/۱۲.

DOI:10.24200/J30.2018.2033.2077

ssaadat@shirazu.ac.ir
h_kolali@yahoo.com
akarimi@shirazu.ac.ir

آب‌های سطحی و تغذیه‌ی مصنوعی آب‌های زیرزمینی ایجاد مشکل می‌کند.^[۲] یک راه‌حل مناسب برای رفع مشکل ذکر شده، استفاده از گیاهان آبرزی است. یکی از گونه‌های گیاهی که راندمان خوبی برای حذف مواد معلق و سایر آلاینده‌ها از پساب دارد، گیاه عدسک آبی است. عدسک آبی، گیاه آبرزی کوچک شناوری از خانواده‌ی لماناسه است که در شرایط مطلوب، رشد بسیار سریعی دارد. به‌دلیل تکثیر سریع، تحمل غلظت‌های بالای مواد مغذی و توانایی عالی در ذخیره‌ی آن، پتانسیل کاربرد به‌عنوان کود، خوراک ماهی، دام و طیور، توانایی حذف آلاینده‌هایی نظیر فلزات سنگین، جلوگیری از نفوذ نور و ممانعت از رشد جلبک‌ها، گونه‌های مختلف عدسک آبی در تصفیه‌ی فاضلاب‌ها به‌صورت گسترده‌ی استفاده شده‌اند.^[۳-۵] از جمله مطالعات صورت گرفته در این خصوص می‌توان به بررسی پتانسیل حذف مواد مغذی در حوضچه‌های تثبیت پوشیده شده از گیاه عدسک آبی در سال ۲۰۱۳ اشاره کرد. در پژوهش مذکور چنین نتیجه گرفته شد که حوضچه‌های حاوی عدسک آبی، قابلیت بالایی برای حذف مواد آلی (۸۴٪) و مغذی (۷۹٪) حذف نیتروژن آمونیاکی، ۸۶٪ حذف نیتروژن نیتراتی و حذف ۵۶٪ اورتوفسفات) از رواناب‌های سطحی مصنوعی دارند.^[۴]

همچنین پژوهش دیگری در همان سال، با هدف حذف یون‌های کروم با غلظت‌های مختلف از فاضلاب، توسط گیاه عدسک آبی صورت گرفت. بیشترین و کمترین مقدار کروم جذب‌شده به ترتیب ۴/۴۲۳ و ۰/۱۲۲ میلی‌گرم کروم به ازاء هر گرم عدسک آبی بود، که در غلظت‌های ۵ و ۰/۲۵ میلی‌گرم در لیتر و در pH برابر با

۴ به دست آمده بود. همچنین با وجود مشاهده اثر سمیت فلز کروم بر روی گیاه عدسک در غلظت‌های کروم بالای ۲ میلی‌گرم در لیتر، همچنان سیستم به حذف فلز با راندمان پایین ادامه داده بود. بنابراین نتیجه گرفته شده است که روش مذکور می‌تواند برای تصفیه فاضلاب‌های حاوی غلظت‌های پایین کروم به کار رود.^[۶] در سال ۲۰۰۰ نیز پژوهشی با هدف بررسی نقش سنبل‌های آبی و ریشه‌ی آن‌ها در کاهش غلظت جلبکی از خروجی برکه‌های تثبیت فاضلاب انجام و نتیجه گرفته شد که علی‌رغم ظرفیت بالای ریشه‌ها برای گیر انداختن ذرات معلق، ته‌نشینی و تجزیه‌ی جلبک‌ها و همچنین تولید پیوسته‌ی مکان‌های جذبی جدید منجر به ثابت ماندن غلظت ذرات معلق پساب خروجی شده است.^[۷]

تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب بوشهر با روش برکه‌ی تثبیت، فاضلاب را تصفیه می‌کند. اما متأسفانه راندمان تصفیه‌خانه در حذف مواد معلق بسیار پایین است و یکی از دلایل آن، وجود غلظت بالای جلبک در برکه‌ی تکمیلی است؛ به همین دلیل پساب حاصل برای استفاده در سیستم آبیاری قطره‌ی مناسب نیست. همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد، در گذشته مطالعاتی بر روی حوضچه‌های پوشیده شده از گیاهانی مثل عدسک آبی با هدف تصفیه فاضلاب،^[۷] حذف مواد آلی،^[۸] حذف مواد مغذی،^[۹،۱۰] و تبخیر سولفات،^[۱۱] انجام شده است و به‌طور کلی در مقاله‌ی مروری نوشته شده در سال ۲۰۱۴، مطالعات صورت گرفته بر روی گیاهان آبی به چند دسته با اهداف کلی حذف مواد مغذی، فلزات و آلاینده‌های آلی تقسیم شده‌اند.^[۱۲] اما تاکنون پژوهشی با هدف حذف جلبک از پساب خروجی از حوضچه‌های تکمیلی توسط گیاه عدسک آبی صورت نگرفته است؛ لذا پژوهش حاضر، با هدف بررسی کارایی گیاه عدسک آبی در بهبود کیفیت پساب تصفیه شده توسط برکه‌ی تثبیت، به‌خصوص افزایش بازدهی حذف مواد معلق ناشی از حضور جلبک‌ها انجام شده است. در همین راستا و براساس مطالعات پیشین،^[۱] از TSS به عنوان شاخصی جهت نشان دادن جمعیت جلبکی استفاده شده است. در ادامه، علاوه بر تأثیر گیاه عدسک آبی در کاهش میزان کل مواد معلق پساب (شاخص جلبک)، تغییرات هدایت الکتریکی، اکسیژن محلول، دما، pH، COD، نیترات، فسفات و کلیفرم‌های کل و مدفوعی پساب در اثر تماس با عدسک آبی پایش و بررسی شده است.

۲. مواد و روش‌ها

جهت انجام پژوهش حاضر که در سال ۱۳۹۰ صورت گرفته است، یک سیستم پایلوت میدانی در محل تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب بوشهر ساخته شد که در فاصله‌ی ۱۵ کیلومتری شرق بوشهر و در نزدیکی شهر جدید عالی‌شهر واقع شده است. براساس متوسط لحظه‌ی کل فاضلاب، پساب و نشتاب ۰/۶۶ و ۰/۸۴ مترمکعب در ثانیه (به ترتیب مربوط به ابتدا و انتهای دوره‌ی طرح) طراحی و واحدهای آن متشکل از ۴ لاگون بی‌هوازی هر کدام به ابعاد ۳/۵ × ۱۰۰ × ۲۰۰ متر، ۶ لاگون اختیاری هر کدام به ابعاد ۲ × ۱۵ × ۴۰۰ متر و ۱۲ لاگون تکمیلی هر کدام به ابعاد ۱/۵ × ۱۵ × ۲۰۰ متر بوده و پساب تصفیه شده‌ی آن به دریا منتقل شده است. همان‌طور که در بخش مقدمه نیز ذکر شد، یکی از مشکلات راهبردی آن همانند بیشتر تصفیه‌خانه‌های با سیستم تصفیه‌ی لاگونی، وجود جلبک در برکه‌ی تکمیلی و در نتیجه، عدم کارایی مناسب سیستم تصفیه در حذف مواد معلق ناشی از آن بود. ارتقاء راندمان تصفیه‌خانه و استفاده از پساب آن جهت آبیاری فضای سبز و درختان خرما، جزء اهداف و سیاست‌های شرکت آب و فاضلاب بوشهر قرار داشت. در راستای نیل به هدف ذکر شده در پژوهش حاضر، کارایی یک پایلوت صنعتی با

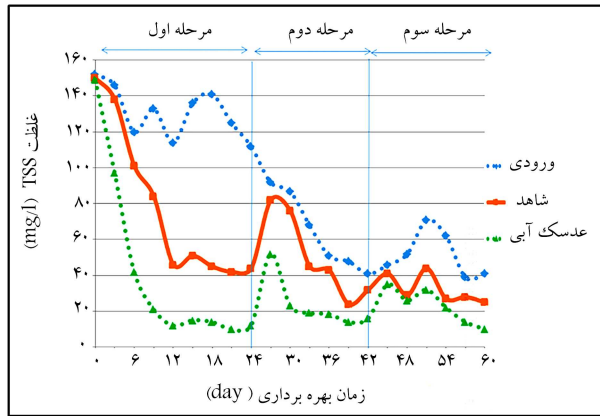
جریان پیوسته و در سه زمان ماند مختلف ارزیابی شد. پایلوت مذکور متشکل از دو مخزن ذخیره، شناور، دبی‌سنج، لوله و اتصالات و دو حوضچه یکی حاوی گیاه عدسک آبی و دیگری فاقد گیاه و به‌عنوان شاهد بود. کل دوره‌ی زمانی کارکرد پیوسته پایلوت ذکر شده از اواخر مهرماه تا پایان دی‌ماه بود. زمان راهبری هر یک از مراحل پژوهش با زمان‌های ماند مختلف ۱۵، ۱۰ و ۵ روز نیز به ترتیب ۱۸، ۲۴ و ۱۸ روز بود.

از آنجا که تأثیرگذارترین پارامتر در کارایی سیستم‌های تصفیه با گیاهان آبی، زمان ماند هیدرولیکی است و بهترین زمان ماند برای تصفیه با استفاده از گیاه عدسک آبی بین ۵ تا ۲۰ روز تعیین شده است،^[۱۳] لذا در پژوهش حاضر نیز زمان‌های ماند ۵، ۱۰ و ۱۵ روز برای کارکرد پایلوت انتخاب شد. همچنین با توجه به اینکه بهترین جریان برای سیستم‌های تصفیه به کمک عدسک آبی، جریان قالبی نهرگونه و بهترین نسبت طول به عرض برای سیستم‌های مذکور، ۶ به ۱ الی ۱۰ به ۱ است،^[۱۳] در پژوهش حاضر، نیز نسبت طول به عرض ۶ به ۱ برای پایلوت مورد استفاده و عمق ۰/۴ متر برای آن و در محدوده‌ی بهترین عمق فاضلاب جهت رشد عدسک‌های آبی (بین ۰/۴ تا ۱/۵ متر) در نظر گرفته شد.^[۱۳] لذا با توجه به ملاحظات ذکر شده، پایلوتی از جنس فایبرگلاس با طول ۳ متر، عرض ۰/۵ متر و عمق فاضلاب ۰/۴ متر ساخته شد. فاضلاب ورودی به پایلوت مذکور از خروجی برکه‌ی تکمیلی تصفیه‌خانه‌ی بوشهر تهیه شد. مخزن اول به منظور تأمین دائمی فاضلاب و مخزن دوم جهت کنترل دبی خروجی از مخزن اول استفاده شد که به همین منظور شناوری نیز در آن تعبیه شد. گیاه عدسک آبی مورد استفاده، از تصفیه‌خانه‌ی غرب شهر اهواز تهیه شد و سپس در حوضچه‌ی کوچکی بارگذاری و تکثیر شد. در مدت زمان ۱۲ روز حجم گیاه به ۳ برابر حجم اولیه رسید. در مرحله‌ی ذکر شده، گیاه عدسک به حوضچه‌ی پایلوت انتقال یافت و به‌منظور تطابق آن با فاضلاب جدید و همچنین جهت جلوگیری از بروز شوک به آن، به‌طور موقت حوضچه با مخلوط پساب برکه‌ی تکمیلی و آب به نسبت ۵۰٪ پر شد. پس از دریافت نتیجه‌ی مطلوب رشد گیاه عدسک آبی، هر دو حوضچه‌ی حاوی عدسک آبی و شاهد از پساب برکه‌ی تکمیلی تا ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر پر شد و بهره‌برداری از سیستم با جریان پیوسته و با زمان‌های ماند ۵، ۱۰ و ۱۵ روز آغاز شد. با توجه به رشد سریع گیاه عدسک آبی، به منظور حفظ جمعیت گیاهی نسبتاً ثابت در طول دوره‌ی کارکرد سیستم و جلوگیری از رشد بیش از حد آن، به توصیه‌ی سایر پژوهشگران لازم بود هر هفته بخشی از آن برداشت شود.^[۱۳] نمونه‌برداری از نقاط ورودی، خروجی حوضچه‌ی حاوی عدسک، و خروجی حوضچه‌ی شاهد انجام شد و در هر نمونه، پارامترهای هدایت الکتریکی، دما، pH، کل ذرات معلق، نیترات، اکسیژن محلول، COD، کلیفرم کل و کلیفرم مدفوعی ارزیابی شدند. این تذکر لازم است که هر بار ۳ نمونه برداشت شد و اعداد ذکر شده میانگین ۳ اندازه‌گیری هستند.

در پژوهش حاضر، جهت اندازه‌گیری COD نمونه‌ها از دستگاه هاضم مدل DRB۲۰۰ و همچنین دستگاه اسپکتروفوتومتر مدل DR۲۰۰ (هر دو ساخت شرکت هک) استفاده شد. مقادیر نیترات و فسفات نمونه‌ها نیز با همان دستگاه اسپکتروفوتومتر اندازه‌گیری شد. همچنین ترازوی دیجیتال سارتاریوس مدل GE۴۱۲، pH متر مدل سنترآیون یک ساخت شرکت هک و EC متر جنوای مدل ۴۳۲۰ در اندازه‌گیری‌ها استفاده شدند. آزمایش‌های کلیفرم نیز به کمک دستگاه انکوباتور مرتت انجام شدند. همچنین کلیه‌ی آزمایش‌ها طبق روش‌های استاندارد مندرج در کتاب روش‌های استاندارد برای آزمایش‌های آب و فاضلاب انجام شدند.

جدول ۱. مشخصات رشد گیاه عدسک آبی در طول دوره بهره‌برداری.

ماه (۱۳۹۰)				پارامتر
دی	آذر	آبان	مهر	
۹۴٫۸	۱۰۳٫۲	۱۱۰٫۵	۱۰۷٫۴۸	جرم توده گیاهی بر حسب گرم (برای سطح مقطع 900 cm^2)
۱۰۵۳	۱۱۴۶	۱۲۲۸	۱۱۹۴	چگالی سطحی (gr/m^2)
۳٫۷	۴٫۸	۴٫۵	۵٫۱	متوسط طول ریشه‌ی گیاه (cm)



شکل ۱. تغییرات غلظت TSS در پساب ورودی، پساب خروجی از حوضچه‌ی عدسک آبی و شاهد در حین به تعادل رسیدن سیستم‌ها.

شکل ۱، تغییرات زمانی مقدار TSS پساب‌های ورودی، خروجی از حوضچه‌ی عدسک آبی و خروجی از حوضچه‌ی شاهد را طی ۳ مرحله به ترتیب با زمان‌های ماند ۱۵، ۱۰ و ۵ روز نشان می‌دهد. روند کاهش تغییرات TSS پساب خروجی از حوضچه‌ی حاوی عدسک آبی در انتهای هر دوره که نشانه‌ی بی‌از به تعادل رسیدن سیستم است، در شکل مذکور به وضوح پیداست. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، غلظت TSS پساب ورودی از ابتدای راه‌اندازی سیستم تا پایان در حال کاهش است. دلیل این امر احتمالاً کاهش تدریجی دمای هوا و در نتیجه کاهش فعالیت جلبک‌ها در برکه‌ی تکمیلی (منبع تأمین فاضلاب پالوت) بود. طبیعی است که متناظر با کاهش غلظت TSS پساب ورودی، تغییرات غلظت TSS در پساب خروجی از حوضچه‌ی شاهد نیز به دلیل کاهش رشد جلبک‌ها در هوای سرد، روند نزولی داشت. این تغییرات طبیعی بوده و در برخی مطالعات نیز به آن اشاره شده است.^[۱۶]

افزایش زمان ماند پساب درون حوضچه‌ی حاوی عدسک آبی در میزان TSS پساب خروجی از حوضچه‌ی مذکور، تأثیر مثبت داشت؛ به طوری که با کاهش زمان ماند از ۱۵ روز به ۱۰ و ۵ روز، میزان TSS پساب خروجی افزایش می‌یافت. در زمان ماند ۱۵ روز، بازدهی حذف TSS در حوضچه‌ی حاوی عدسک آبی به بیشترین مقدار (۹۰٫۵٪) رسید. در پژوهشی در سال ۲۰۰۴ که بر روی حذف TSS با استفاده از گیاه عدسک آبی صورت گرفته است، بازدهی ۸۰٪ حاصل شده است.^[۸] همچنین در برخی پژوهش‌ها به درصد حذف ۹۱٪ و نیز به درصد حذف ۹۶٪ ناقل شده‌اند.^[۱۰،۹]

۳.۳. تأثیر گیاه عدسک آبی در میزان هدایت الکتریکی (EC) پساب شاخص هدایت الکتریکی که یکی از پارامترهای مهم در تعیین کیفیت فاضلاب به‌شمار می‌رود، نشان‌دهنده‌ی توانایی محلول در انتقال جریان الکتریسیته است.

۳. نتایج و بحث

در پژوهش حاضر، از TSS به‌عنوان معیاری برای تعیین زمان به تعادل رسیدن سیستم استفاده شد. به این صورت که در هر مرحله پس از ثابت شدن تقریبی مقدار خروجی از حوضچه‌ی عدسک آبی، طی سه روز متوالی نمونه‌هایی جهت اندازه‌گیری سایر پارامترهای لازم برداشت و میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده محاسبه شدند و راندمان سیستم در حذف پارامترهای مختلف به‌دست آمد که در بخش‌های بعد به تفکیک بررسی شده‌اند.

۱.۳. پایش رشد گیاه عدسک آبی

به منظور کنترل رشد کامل و پوشش بهینه‌ی عدسک‌ها، هر ماه یک بار از سطح مقطع 30×30 سانتی‌متر مربع حوضچه، عدسک‌ها برداشت شدند و پس از آبیگری، وزن آن‌ها محاسبه شد و چگالی سطحی گیاه به‌دست آمد. این پایش به منظور کنترل کمینه‌ی سطح پوشش بهینه‌ی 600 گرم بر مترمربع انجام شد.^[۱۵] ریشه‌های عدسک آبی نیز مرتب اندازه‌گیری شد. اطلاعات مربوط به پایش رشد گیاه که در جدول ۱ مشخص شده است، نشان می‌دهد که گیاه عدسک آبی رشد مناسبی در طول دوره بهره‌برداری از پالوت داشته و شرایط آب و هوایی تأثیر منفی در رشد گیاه عدسک آبی نداشته است. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، بیشترین چگالی سطحی $1228 \text{ gr}/\text{m}^2$ در آبان‌ماه به‌دست آمده است. یکی از عوامل مهم در رشد گیاه عدسک آبی، وجود مواد مغذی و دمای مناسب است. کمترین چگالی سطحی گیاه ($1053 \text{ gr}/\text{m}^2$) به دلیل کاهش دما در دی‌ماه حاصل شد.

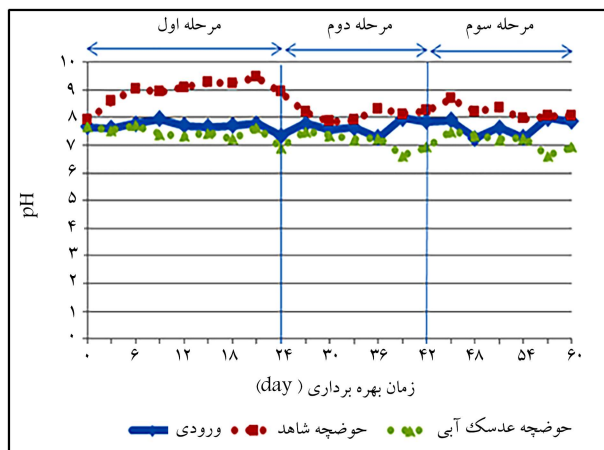
۲.۳. تأثیر گیاه عدسک آبی در میزان TSS پساب

همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد، در پژوهش حاضر از TSS به‌عنوان شاخصی برای اندازه‌گیری جلبک‌ها استفاده شده است. جهت حصول اطمینان از صحت به‌کارگیری پارامتر TSS به‌عنوان شاخص اندازه‌گیری جلبک‌ها، علی‌رغم تأیید این مطلب در برخی مطالعات،^[۱] قبل از انجام هر کاری نسبت به شناسایی جلبک‌های موجود و تعیین خصوصیات آن‌ها اقدام شد. طبق نتایج به‌دست آمده و براساس رده‌بندی فریش، جلبک‌گونه‌ی *S.ps.PCC6803* جنس *Synechocystis*، رسته‌ی *Chroococ-* *cales* رده‌ی *Cyanophyceae*، شاخه‌ی *Cyanophyta*، طبقه‌ی *Cyanobac-* *teria* و از سلسله‌ی *Bacteria* که نوعی جلبک سبز-آبی (و کوچک‌ترین در میان همه‌ی جلبک‌ها) بود، بیشترین درصد جمعیتی را در پساب خروجی از برکه‌های تثبیت تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب مورد مطالعه داشت. متوسط کوچک‌ترین درازای جلبک از جنس *Synechocystis*، یک میکرون اندازه‌گیری شد. این بدان معنا بود که جمعیت غالب جلبکی در پساب خروجی از تصفیه‌خانه، خصوصیات جامدات معلق را داشت و بر روی فیلتر با منافذ 0.45 میکرون باقی می‌ماند. لذا استفاده از TSS به‌عنوان شاخص اندازه‌گیری جلبک‌ها بلا مانع تشخیص داده شد.

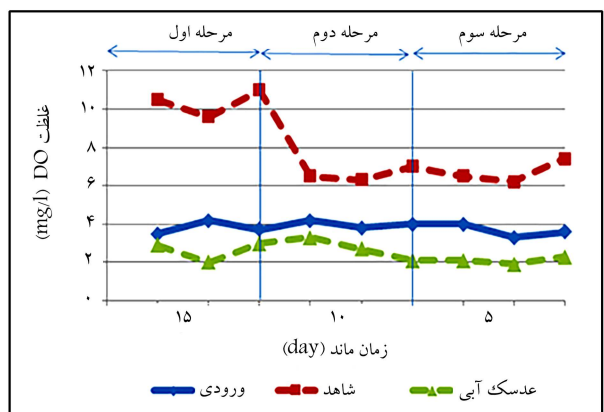
اندکی قلبایی تر نیز بود. افزایش pH در حوضچه‌ی شاهد را می‌توان به فعالیت‌های بیولوژیکی صورت‌گرفته نسبت داد، چرا که در نتیجه‌ی استفاده‌ی فیتوبلانکتون‌ها از دی‌اکسیدکربن، تعادل سیستم کربنات - بی‌کربنات به هم می‌خورد.^[۱۶]

نتایج پایش اکسیژن محلول (شکل ۴) نیز نشان داد که غلظت اکسیژن فاضلاب ورودی همواره در حدود ۴ میلی‌گرم در لیتر است. خروجی حوضچه‌ی شاهد با بیشترین غلظت DO (به‌طور متوسط در حدود ۷ میلی‌گرم در لیتر) بود و غلظت اکسیژن در حوضچه‌ی حاوی عدسک در تمام موارد اندازه‌گیری شده بالای ۲ میلی‌گرم در لیتر بود و گاهی اوقات حتی به میزان ۳ میلی‌گرم در لیتر نیز می‌رسید. بنابراین با توجه به ارضاء استاندارد ۲ میلی‌گرم در لیتر برای اکسیژن پساب‌های خروجی از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، نگرانی از بابت میزان اکسیژن محلول وجود نداشت.

در طول دوره‌ی راهبری پژوهش حاضر، دمای محیط و پساب‌های ورودی و خروجی هر دو حوضچه‌ی حاوی عدسک و شاهد اندازه‌گیری و ثبت شد (شکل ۵). همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، دمای محیط همیشه بالاتر از دمای پساب است و به‌طور متوسط طی مراحل اول تا سوم پژوهش حاضر در محدوده‌ی ۲۵، ۱۸ و ۱۵ درجه‌ی سانتی‌گراد ثبت شده بود. همچنین واضح است که اختلاف دمای پساب و هوا با کاهش دما کمتر می‌شد.



شکل ۳. تغییرات pH پساب ورودی، خروجی از حوضچه‌ی عدسک آبی و شاهد در حین به تعادل رسیدن.



شکل ۴. تغییرات اکسیژن محلول پساب ورودی، خروجی از حوضچه‌ی عدسک آبی و شاهد در حین به تعادل رسیدن.

از آنجا که جریان الکتریسیته توسط یون‌ها منتقل می‌شود، این شاخص به‌طور غیرمستقیم با غلظت یون‌های محلول در آب (TDS) مرتبط است.

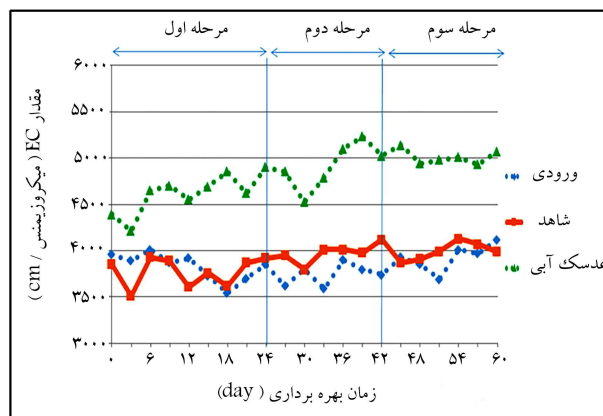
همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، میزان هدایت الکتریکی پساب ورودی و خروجی از حوضچه‌ی شاهد تقریباً نزدیک به هم است و تفاوت زیادی در مقادیر مشاهده نمی‌شود؛ در حالی که مقدار هدایت الکتریکی فاضلاب حوضچه‌ی حاوی عدسک آبی به‌میزان قابل‌توجهی بیشتر از دو مقدار ذکر شده بود که نشان از افزایش یون‌های محلول در آب داشت. با توجه به تجزیه‌ی مواد آلی موجود و آزاد شدن یون‌های موجود در آن‌ها، افزایش هدایت الکتریکی پساب مورد تحقیق قابل توجیه بود.^[۱۷] هر چند در برخی از مطالعات پیشین، هدایت الکتریکی فاضلاب تصفیه‌شده با گیاه عدسک آبی نسبت به نمونه‌ی شاهد کاهش یافته و دلیل آن تجمع یا جذب احتمالی ترکیبات مغذی مختلف، نظیر نیترات‌ها، فسفات‌ها، سولفات‌ها، کلسیم، سدیم، پتاسیم و ... عنوان شده است.^[۱۷] همچنین در شکل ۲ واضح است که افزایش زمان ماند، تأثیر قابل ملاحظه‌ی در تغییرات هدایت الکتریکی نمونه‌ی خروجی از حوضچه‌ی عدسک آبی نسبت به نمونه‌ی شاهد نداشته است.

۴.۳. تأثیر گیاه عدسک آبی در میزان pH و DO و دمای پساب

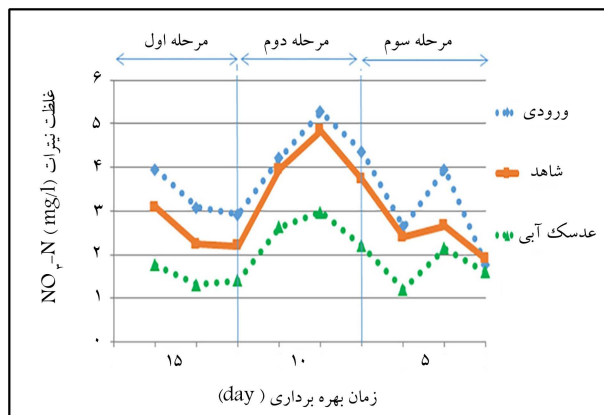
از آنجا که رشد فزاینده‌ی جلبک‌ها در حوضچه‌هایی که کاملاً با گیاه عدسک آبی پوشیده نشده‌اند، می‌تواند منجر به کاهش دی‌اکسیدکربن و در نتیجه افزایش pH محیط شود و این امر در رشد گیاه عدسک آبی تأثیر بازدارنده دارد،^[۹] بنابراین در پژوهش حاضر، میزان pH پساب ورودی و خروجی مرتباً پایش شد.

همان‌گونه که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، پساب ورودی که از حوضچه‌های تثبیت فاضلاب تصفیه‌خانه تأمین می‌شد، pH طبیعی تا اندکی بازی داشت. همچنین در حالی که pH پساب تصفیه‌شده با عدسک آبی اندکی کمتر از pH پساب ورودی بود، اما تفاوت مذکور چندان قابل ملاحظه نبود و این خود می‌توانست نشانه‌ی از عدم رشد جلبک‌ها در حوضچه‌های حاوی عدسک آبی باشد. این کاهش اندک pH پساب خروجی از حوضچه‌ی حاوی عدسک آبی را نیز می‌توان به تجزیه‌ی میکروبی مواد آلی محلول در آن و تولید محصولاتی چون دی‌اکسیدکربن، آمونیاک، نیترات و اسیدهای آلی نسبت داد، همچنان که در سایر مطالعات نیز این روند مشاهده شده است.^[۱۷]

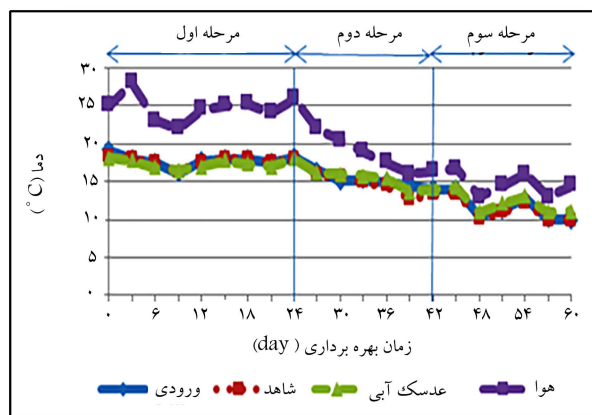
این در حالی است که میزان pH پساب خروجی از حوضچه‌ی شاهد اندکی بیشتر از pH ورودی بود و در مرحله‌ی اول راه‌اندازی سیستم، که دمای هوا بالاتر بود،



شکل ۵. تغییرات EC پساب ورودی، خروجی حوضچه‌ی عدسک آبی و شاهد در حین به تعادل رسیدن.



شکل ۷. تغییرات غلظت نیترات در پساب ورودی، خروجی از حوضچه‌ی عدسک آبی و شاهد پس از به تعادل رسیدن.



شکل ۵. تغییرات دمای محیط، پساب ورودی، خروجی از حوضچه‌ی عدسک آبی و شاهد در حین به تعادل رسیدن.

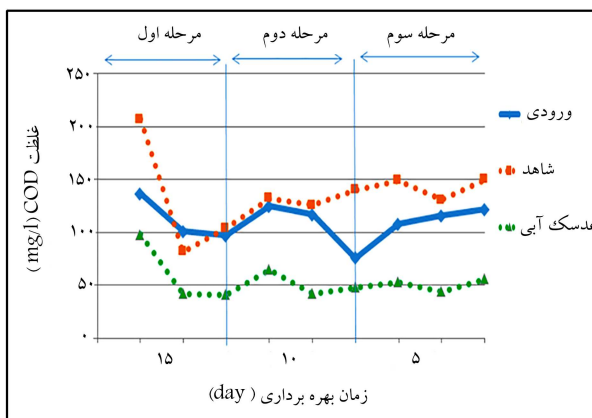
COD از پساب ناچیز بوده است.^[۱۹] همچنین مطابق شکل مذکور، افزایش زمان ماند پساب از ۱۰ به ۱۵ روز نیز تأثیر قابل ملاحظه‌ی در میزان COD پساب خروجی از حوضچه‌ی حاوی عدسک آبی نداشت. نتیجه‌ی به دست آمده در مطالعه‌ی انجام شده‌ی در سال ۲۰۰۸، نیز برای حذف مواد آلی و مغذی از فاضلاب توسط یک سیستم تصفیه‌ی عدسک آبی مشاهده شد.^[۲۰]

۶.۳. تأثیر گیاه عدسک آبی در غلظت نیترات پساب

همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، غلظت نیترات پساب خروجی از هر دو حوضچه‌ی حاوی عدسک آبی و شاهد در هر ۳ مرحله از زمان ماند، از غلظت نیترات پساب ورودی کمتر بود. دلیل این کاهش غلظت در حوضچه‌ی شاهد، حضور جلبک‌ها و مصرف نیتروژن برای رشد و تکثیر آن‌ها بود. از جمله عواملی که باعث حذف نیتروژن در حوضچه‌های حاوی عدسک آبی می‌شوند، می‌توان به مصرف نیترات توسط گیاه عدسک آبی و تبدیل آن به پروتئین گیاهی، تجمع نیترات در لجن جلبکی، ته‌نشینی، تبخیر آمونیاک و دنیتریفیکاسیون اشاره کرد.^{[۱۹] [۲۱]} بیشترین بازدهی حوضچه‌ی حاوی عدسک آبی در حذف نیترات ۵۵٪ و در زمان ماند ۱۵ روز بود، در حالی که حوضچه‌ی شاهد در مدت زمان بیشینه‌ی مذکور، حدود ۱۸٪ نیترات را حذف کرد. کاهش درصد حذف نیترات در دوره‌ی مربوط به زمان ماند ۱۰ روز به دلیل افزایش بار نیترات ورودی در این مدت قابل توجیه بود چرا که افزایش میزان آمونیاک عامل بازدارنده‌ی برای برداشت نیترات توسط گیاه محسوب می‌شود.^[۸] بیشترین مقدار گزارش شده برای حذف نیتروژن نیتراتی از حوضچه‌های حاوی گیاه عدسک آبی در برخی مطالعات صورت گرفته ۶۸٪^[۲۰]، ۶۴٪^[۱۷]، و ۳۰٪^[۸] بوده است.

۷.۳. تأثیر گیاه عدسک آبی در میزان فسفات پساب

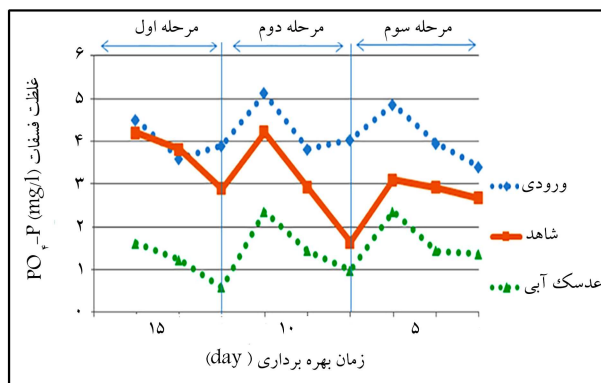
تغییرات غلظت فسفات در ۳ زمان ماند مختلف در پساب ورودی، خروجی از حوضچه‌ی حاوی عدسک آبی و حوضچه‌ی شاهد در شکل ۸ مشاهده می‌شود. به‌طور کلی فرایندهایی چون جذب سطحی (توسط رس و مواد آلی)، جذب گیاهی، جذب میکروبی، تشکیل کمپلکس، و ترسیب شیمیایی در کاهش میزان فسفر تالاب‌ها مؤثرند.^{[۲۱] [۲۰]} همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، بازدهی حوضچه‌ی حاوی عدسک آبی در حذف فسفات به مقدار قابل توجهی بیشتر از بازدهی حوضچه‌ی شاهد بوده است. حذف فسفر از فاضلاب توسط گیاه عدسک آبی در نتیجه‌ی جذب توسط آن



شکل ۶. تغییرات COD در پساب ورودی، خروجی از حوضچه‌ی عدسک آبی و شاهد در حین به تعادل رسیدن.

۵.۳. تأثیر گیاه عدسک آبی در میزان COD پساب

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، حوضچه‌ی شاهد نه فقط در حذف COD تأثیر مثبتی نداشت، بلکه باعث افزایش میزان COD پساب خروجی نیز می‌شد، که این مسئله با توجه به حضور چشمگیر جلبک‌ها در حوضچه‌ی شاهد و نقش آن‌ها در بالا بردن میزان COD پساب، قابل توجیه بود. اما در حوضچه‌ی حاوی عدسک آبی به دلیل از بین رفتن جلبک‌ها، میزان COD خروجی کاهش می‌یافت، به طوری که بیشترین بازدهی حذف COD در حوضچه‌ی شاهد ۵۵٪ به دست آمد. همچنین با کاهش زمان ماند، برخلاف انتظار، افزایش اندکی در درصد حذف COD مشاهده می‌شد، که این روند با توجه به افزایش اجتناب‌ناپذیر بار آلی ورودی به راکتور در دوره‌های مربوط به زمان ماند ۱۰ و ۵ روز قابل توجیه بود.^[۸] همچنان که در پژوهش انجام شده‌ی در سال ۲۰۱۵،^[۱۸] افزایش درصد حذف COD با افزایش بار آلی ورودی گزارش شده است. در پژوهش مذکور درصد حذف COD فاضلاب لبنی توسط لاگون‌های پوشیده شده با گیاه عدسک آبی بین ۳ تا ۸۱ درصد و به طور متوسط ۴۳٪ گزارش شده است که با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد.^[۱۸] در پژوهش دیگری (۲۰۰۷)،^[۹] نیز در تصفیه‌ی فاضلاب خانگی به کمک حوضچه‌های حاوی عدسک آبی، ۷۲٪ (بیشترین مقدار حذف COD) به دست آمد. در برخی از پژوهش‌ها نیز به دلیل فعالیت اندک میکروارگانیسم‌ها، میزان حذف



شکل ۸. تغییرات غلظت فسفات در پساب ورودی، خروجی از حوضچه‌ی عدسک آبی و شاهد پس از به تعادل رسیدن.

و سپس ترسیب به همراه بقایای گیاهی ته‌نشین شده و یا برداشت عدسک آبی از سطح حوضچه صورت می‌پذیرد. بیشترین راندمان حوضچه‌ی حاوی عدسک آبی در حذف فسفات ۷۱٪ و در زمان ماند ۱۵ بود. به‌طور میانگین بازدهی حذف فسفر در حوضچه‌های حاوی عدسک آبی حدود ۴۰٪ بیشتر از حوضچه‌ی شاهد بود. با کاهش زمان ماند و همچنین دما، میزان حذف فسفات اندکی کاهش یافت. برخی پژوهشگران نیز حذف فسفر در سیستم حاوی عدسک آبی را وابسته به دما می‌دانند.^[۱۸] در مطالعات صورت گرفته در گذشته نیز به رابطه‌ی زمان ماند و کاهش غلظت فسفر نیز اشاره شده است. نتیجه‌ی مطالعه‌ی انجام شده‌ی در سال ۲۰۱۲ نشان می‌دهد که گیاه عدسک آبی در کاهش فسفر با غلظت‌های اولیه‌ی مختلف مؤثر بوده است.^[۱۱] همچنین در برخی مطالعات مشاهده شده است که در بین گونه‌های گیاهی آبی مورد مطالعه، استفاده از گونه‌ی عدسک آبی بیشترین مقدار حذف فسفر را به دنبال داشته است.^[۱۱] در برخی پژوهش‌ها نیز برای حذف فسفات با استفاده از عدسک آبی به حذف ۷۸٪،^[۹] همچنین حذف ۶۴٫۶٪،^[۱۰] و نیز به حذف حدود ۳۹٪ رسیده‌اند.^[۱۱]

توسط ترکیبات جذب می‌شوند و به باکتری‌های مدفوعی آسیب می‌رسانند، سپس در اثر تلاطم این فاز بحرانی، کل سلول نابود می‌شود. مرگ ناشی از نور به حضور اکسیژن بستگی کامل دارد و در pH‌های بالا به‌طور قابل ملاحظه‌ی افزایش می‌یابد. بدین ترتیب می‌توان گفت که خورشید نقش سه‌گانه‌ی را در از بین بردن باکتری‌های مدفوعی در برکه‌های تثبیت فاضلاب ایفا می‌کند. خورشید مستقیماً با افزایش درجه حرارت برکه و به‌طور غیرمستقیم از طریق تولید انرژی مورد نیاز برای فتوسنتز سریع جلبک‌ها، نه فقط باعث افزایش pH برکه می‌شود، بلکه غلظت بالای اکسیژن موردنیاز برای ایفای نقش سوم یا تخریب به طریق اکسیداسیون تابشی را نیز تأمین می‌کند.^[۱۲۵]

به نظر می‌رسد که مهم‌ترین عوامل مؤثر در کاهش پاتوژن‌ها در حوضچه‌ی حاوی عدسک آبی ته‌نشین شدن مواد معلق و به دام افتادن باکتری‌های کلیفرم در رسوب‌هاست. علاوه بر این، نفوذ بخشی از اشعه‌ی ماوراء بنفش خورشید نیز می‌تواند عامل دیگری باشد. سومین عامل نیز تشکیل بیوفیلمی در اطراف ریشه‌های گیاه عدسک آبی و جذب شدن بخشی از پاتوژن‌ها درون آن و جسم گیاه عدسک آبی و هرس و برداشت مداوم آن از سطح فاضلاب می‌تواند باشد. همچنین برخی از مطالعات پیشین به اثر گیاهان آبی در جذب مواد مغذی درون حوضچه‌ها و در نتیجه کمبود نوترینت‌ها برای رشد پاتوژن‌ها اشاره کرده‌اند.^[۱۹]

در مطالعه‌ی صورت گرفته‌ی در سال ۲۰۱۱، برای حذف کلیفرم‌های مدفوعی در یک برکه‌ی واقعی پوشیده شده از گیاه عدسک آبی نیز به اثر مثبت دما در کنترل این باکتری‌های اشاره شده و نهایتاً بازدهی حذف متوسط $۱٫۴۶ \pm ۹۹٫۶۵\%$ و $۳٫۰۳ \pm ۹۹٫۳۳\%$ به ترتیب در فصل‌های گرم و سرد به‌دست آمده است.^[۲۵] همچنین در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۹، بازدهی ۹۷٪ را برای حذف کلیفرم‌های مدفوعی توسط سیستم ترکیبی شامل برکه‌ی تثبیت و حوضچه‌های حاوی گیاه سنبل آبی گزارش شده است.^[۲۶]

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، در کنار بررسی کارایی گیاه عدسک آبی در حذف TSS از پساب واقعی خروجی از حوضچه‌های تثبیت تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب بوشهر به‌عنوان هدف اصلی، تغییرات pH، هدایت الکتریکی، دما، اکسیژن محلول، COD، نیترات، فسفات، کلیفرم کل و مدفوعی پساب تصفیه شده با گیاه عدسک آبی نیز پایش شد. با نگاهی به بیشتر مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان نتیجه گرفت که در بیشتر موارد راهبری به‌صورت ناپیوسته بوده است؛ در حالی که در پژوهش حاضر جهت شبیه‌سازی هر چه بیشتر پابلوت آزمایشگاهی با نمونه‌های واقعی از سیستم پیوسته بهره گرفته شد. با توجه به مطالعات حاضر، گیاه عدسک آبی که بومی استان بوشهر نبود، تحت شرایط آب و هوایی بوشهر رشد خوب و همچنین بازدهی بالایی در حذف آلاینده‌های پساب داشت. همان‌طور که در شکل‌ها نیز مشاهده شد، غلظت TSS در روزهای اولیه‌ی راه‌اندازی پابلوت به‌دلیل دمای بالاتر هوا بیشتر بود (به دلیل رشد سریع جلبک‌ها در دمای بالا). بیشترین درصد حذف مواد جامد معلق ۹۰٪ و کمترین درصد حذف آن، ۶۴٪ به‌دست آمد. بازدهی گیاه عدسک آبی در حذف COD ۴۶ تا ۵۶ درصد، نیترات ۴۱-۵۵ درصد، فسفات ۵۸-۷۱ درصد به‌دست آمد. راندمان حذف کلیفرم‌های کل و کلیفرم‌های مدفوعی به ترتیب ۹۸٫۷-۹۷٫۲ و ۹۹٫۲-۹۵٫۹ درصد بود. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش زمان ماند، درصد حذف TSS، فسفات، و کلیفرم کل افزایش می‌یافت. این تذکر لازم است که

۸.۳. راندمان حذف کلیفرم‌های کل و مدفوعی

به منظور بررسی راندمان حذف کلیفرم‌های کل و کلیفرم‌های مدفوعی توسط حوضچه‌ی عدسک آبی و شاهد، آزمایش چندلوله‌ی انجام شد. در حالی که pH، زمان ماند، و دما به‌عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر در کنترل باکتری‌های بیماری‌زا در برکه‌های طبیعی یا مصنوعی معرفی شده‌اند، عوامل دیگری مثل حضور جانداران شکارچی، تابش خورشیدی، وجود گیاهان، رژیم هیدرولیکی، تغییرات فصلی، وجود رسوبات، ترکیب‌های آب و اکسیژن نیز می‌توانند در میزان پاتوژن‌ها مؤثر باشند.^[۲۲-۲۴] بیشترین راندمان حذف کلیفرم‌های کل (۹۹٫۶٪) و مدفوعی (۹۹٫۷٪) مربوط به حوضچه‌ی شاهد و در زمان ماند ۱۵ روز بود. همچنین حوضچه‌ی حاوی عدسک آبی نیز در زمان ماند ۱۵ روز قادر به حذف ۹۸٫۷٪ و ۹۹٫۲٪ باکتری‌های کل و مدفوعی بود. در زمان‌های ۱۰ و ۵ روز، نیز بازدهی حذف کلیفرم‌ها در هر دو حوضچه اندکی کاهش یافت، که با توجه به تأثیر مثبت هر دو عامل زمان ماند و دما در کنترل پاتوژن‌ها در این دوره قابل توجیه بود.

در مطالعه‌ی حاضر، مقادیر pH بالای حوضچه‌ی شاهد که به‌دلیل فتوسنتز سریع جلبک‌ها و مصرف بیش از حد دی‌اکسیدکربن بود، باعث کشته شدن باکتری‌های مدفوعی در حوضچه‌ی شاهد شد. همچنین تابش خورشید نیز در از بین بردن باکتری‌های هر دو حوضچه بی‌تأثیر نبود. نورهای با طول موج ۴۲۵-۷۰۰ نانومتر

از تغییر شرایط آب و هوایی، تابش آفتاب، دما و کارکرد تصفیه‌خانه‌ی موجود وجود نداشت؛ اما به هر حال نتایج پژوهش حاضر نشان داد که استفاده از گیاه عدسک آبی روشی بسیار موفق در کنترل رشد جلبک‌ها از سیستم برکه‌های تثبیت است، لذا سیستم مذکور به‌عنوان یک سیستم مکمل تصفیه برای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب دارای برکه‌ی تثبیت پیشنهاد می‌شود.

با توجه به رشد سریع گیاه عدسک آبی، به‌منظور حفظ جمعیت گیاهی نسبتاً ثابت در طول دوره‌ی کارکرد سیستم و جلوگیری از رشد بیش از حد آن، هر هفته بخشی از عدسک آبی از سطح حوضچه برداشت می‌شد. هر چند که به دلیل استقرار پایوت مورد مطالعه در محل تصفیه‌خانه‌ی واقعی و استفاده از فاضلاب خروجی برکه‌ی تکمیلی تصفیه‌خانه به‌عنوان ورودی، امکان کنترل نوسان‌های جریان ورودی ناشی

منابع (References)

- Mburu, N., M.Tebitendwa, S., Bruggen, J. and et al. "Performance comparison and economics analysis of waste stabilization ponds and horizontal subsurface flow constructed wetlands treating domestic wastewater: A case study of the Juja sewage treatment works", *J. Environ. Manage.*, **128**, pp. 220-225 (2013).
- Kim, Y. and Kim, W-J. "Roles of water hyacinths and their roots for reducing algal concentration in the effluent from waste stabilization ponds", *Water Res.*, **34**(13), pp. 3285-3294 (2000).
- Al-Nozaily, F., Alaerts, G. and Veenstra, S. "Performance of duckweed-covered sewage lagoons-II. Nitrogen and phosphorus balance and plant productivity", *Water Res.*, **34**(10), pp. 2734-2741 (2000).
- Sims, A., Gajaraj, S. and Hu, Z. "Nutrient removal and greenhouse gas emissions in duckweed treatment ponds", *Water Res.*, **47**(3), pp. 1390-1398 (2013).
- Bçük, H., Yakar, A. and Türker, O.C. "Assessment of Lemna gibba L. (duckweed) as a potential ecological indicator for contaminated aquatic ecosystem by boron mine effluent", *Ecol. Indic.*, **29**, pp. 538-548 (2013).
- Uysal, Y. "Removal of chromium ions from wastewater by duckweed, Lemna minor L. by using a pilot system with continuous flow", *J. Hazard. Mater.*, **263**, pp. 486-492 (2013).
- Ragush, C.M., Schmidt, J.J., Krkosek, W.H. and et al. "Performance of municipal waste stabilization ponds in the Canadian Arctic", *Ecol. Eng.*, **83**, pp. 413-421 (2015).
- Ran, N., Agami, M. and Oron, G. "A pilot study of constructed wetlands using duckweed (Lemna gibba L) for treatment of domestic primary effluent in Israel", *Water Res.*, **38**(9), pp. 2241-2248 (2004).
- El-shafai, S.A., El-Gohary, F.A., Nasr, F.A. and et al. "Nutrient recovery from domestic wastewater using a UASB-duckweed ponds system", *Bioresour. Technol.*, **98**(4), pp. 798-807 (2007).
- Abou el-Kheir, W., Ismail, G., Aboul el-Nour, F. and et al. "Assessment of the efficiency of duckweed (Lemna gibba) in wastewater treatment", *Int. J. Agric. Biol.*, **9**(5), pp. 681-682 (2007).
- Samimi Loghmani, S. and Abbaspour, A. "Effect of aquatic plants on phosphorus removal and electrical conductivity decrease in municipal effluent", *J. Water Wastewater*, **2**, pp. 93-98 (2012).
- Chao, W., ZHENG, S.S., WANG, P.F. and et al. "Effects of vegetations on the removal of contaminants in aquatic environments: A review", *J. Hydrodyn. Ser. B*, **26**(4), pp. 497-511 (2014).
- Bonomo, L. "Advantages and limitation of duckweed based wastewater treatment systems", *Sci. Technol.*, **33**, pp. 247-257 (1997).
- Mohedano, R.A., Costa, R.H., Tavares, F.A. and et al. "High nutrient removal rate from swine wastes and protein biomass production by full-scale duckweed ponds", *Bioresour. Technol.*, **112**, pp. 98-104 (2012).
- Zimmo, O.R., Van der Steen, N.P. and Gijzen, H.J. "Comparison of ammonia volatilisation rates in algae and duckweed-based waste stabilisation ponds treating domestic wastewater", *Water Res.*, **37**(19), pp. 4587-4594 (2003).
- Xu, J. and Shen, G. "Growing duckweed in swine wastewater for nutrient recovery and biomass production", *Bioresour. Technol.*, **102**(2), pp. 848-853 (2011).
- Verma, R. and Suthar, S. "Synchronized urban wastewater treatment and biomass production using duckweed Lemna gibba L.", *Ecological Engineering*, **64**, pp. 337-343 (2014).
- Adhikari, U., Harrigan, T. and Reinhold, D.M. "Use of duckweed-based constructed wetlands for nutrient recovery and pollutant reduction from dairy wastewater", *Ecol. Eng.*, **78**, pp. 6-14 (2015).
- Yaseen, D.A. and Scholz, M. "Shallow pond systems planted with Lemna minor treating azo dyes", *Ecol. Eng.*, **94**, pp. 295-305 (2016).
- Bal Krishna, K.C. and Polprasert, C. "An integrated kinetic model for organic and nutrient removal by duckweed-based wastewater treatment (DUBWAT) system", *Ecol. Eng.*, **34**(3), pp. 243-250 (2008).
- Valipour, A., Raman, V.K. and Ahn, Y.H. "Effectiveness of domestic wastewater treatment using a bio-hedge water hyacinth wetland system", *Water*, **7**, pp. 329-347 (2015).
- Wu, S., Carvallho, P.N., Müller, J.A. and et al. "Sanitation in constructed wetlands: A review on the removal of human pathogens and fecal indicators", *Sci. Total Environ.*, **541**, pp. 8-12 (2016).

23. Hong, H., Qiu, J. and Liang, Y. "Environmental factors influencing the distribution of total and fecal coliform bacteria in six water storage reservoirs in the Pearl River Delta Region, China", *J. Environ. Sci.*, **22**(5), pp. 663-668 (2010).
24. Mara, D. and Johuson, M. "Aerated rock filters for enhanced ammonia and fecal coliform removal from facultative Pond effluents", *J. Environ. Eng.*, **132**(4), pp. 574-577 (2006).
25. Papadopoulos, F.H., Tsihrintzis, V.A. and Zdragas, A.G. "Removal of faecal bacteria from septage by treating it in a full-scale duckweed-covered pond system", *J. Environ. Manage.*, **92**(12), pp. 3130-3135 (2011).
26. Yi, Q., Kim, Y. and Teteda, M. "Evaluation of nitrogen reduction in water hyacinth ponds integrated with waste stabilization ponds", *Desalination*, **249**(2), pp. 528-534 (2009).