

مقایسه عملکرد گیاه‌پالایی بیوفیلترهای میکروجلبکی کلرلا و کیتوسروس در تصفیه تکمیلی فاضلاب شهری اهواز

چکیده:

با افزایش جمعیت، آلودگی و بحران آب، لزوم مدیریت منابع آب از اولویت بالایی برخوردار می‌گردد. این مطالعه به منظور مدیریت منابع آب و با هدف بررسی عملکرد دو بیوفیلتر میکروجلبکی کیتوسروس و کلرلا در تصفیه تکمیلی فاضلاب شهری تصفیه‌خانه فاضلاب غرب اهواز انجام گردیده است. مقایسه گیاه‌پالایی گونه‌های میکروجلبک در زمان‌های ماند صفر، ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۱۰۰ و ۱۶۸ ساعت در بیوفیلترها انجام شد. تجزیه و تحلیل نتایج با استفاده از نرم افزار SPSS و آزمون آنوای یک طرفه و آزمون تعقیبی LSD انجام گردید. به‌منظور بررسی روابط از تحلیل کواریانس چند متغیری (مانکوا) بر روی میانگین نتایج اثرات میکروجلبک‌های کلرلا و کیتوسروس استفاده شد و برای مقایسه میانگین شاخص‌های اندازه‌گیری شده با مقدار استاندارد از آزمون تی تک نمونه‌ای استفاده گردید. نتایج حاصل از آنالیز واریانس میکروجلبک‌های مورد بررسی در بیوفیلترها بیانگر معنی‌دار بودن اثر میکروجلبک و زمان ماند بر تصفیه پساب ورودی به بیوفیلترها بوده است. همچنین تحلیل کواریانس چند متغیری برای بررسی اختلاف میانگین اثرات میکروجلبک‌های کلرلا و کیتوسروس در بازه‌های زمانی و گروه‌های میکروجلبک نشان می‌دهد که اختلاف بین میانگین تمام شاخص‌های اندازه‌گیری شده در بازه‌های زمانی معنادار شده ($p < 0.05$) و عملکرد بیوفیلترهای میکروجلبکی در حذف و کاهش پارامترهای COD، BOD₅، TSS، کدورت، آهن، سرب، جیوه، نیتريت، نیترات، توتال و فکال کلیفرم‌ها برای میکروجلبک‌های کلرلا و کیتوسروس به ترتیب به میزان (۸۱٪، ۸۱٪)، (۷۹٪، ۸۱٪)، (۶۵٪، ۶۵٪)، (۷۷٪، ۸۲٪)، (۷۳٪، ۹۸٪)، (۸۳٪، ۹۸٪)، (۹۱٪، ۹۲٪)، (۹۶٪، ۹۶٪)، (۸۶٪، ۸۶٪)، (۵۳٪، ۷۰٪)، (۶۸٪، ۶۸٪)، (۶۲٪، ۹۵٪) و (۸۹٪، ۹۶٪) بوده است. همچنین نتایج نشان داد غلظت نهایی پارامترهای مورد بررسی در خروجی بیوفیلترها با استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست ایران مطابقت داشته است. از آنجاکه عملکرد بیوفیلترها، مطلوب و نزدیک به هم بوده، هر دو گونه بیوفیلتر میکروجلبکی به عنوان بیوفیلترها و میکروجلبک‌های کارآمد در تصفیه تکمیلی فاضلاب شهری معرفی می‌گردند بطوری که بیوفیلتر کلرلا در حذف بار آلودگی فیزیکوشیمیایی و فلزات سنگین و بیوفیلتر کیتوسروس در حذف بار میکروبی کارآمدتر بوده‌اند.

واژگان کلیدی: گیاه‌پالایی، بیوفیلتر، میکروجلبک کلرلا، میکروجلبک کیتوسروس، تصفیه فاضلاب.

مقدمه

بدون شک جهان، در حال حاضر با آلودگی آب و تقاضای آب پاک به عنوان دو مشکل جدی مواجه است. پیش بینی تقاضای جهانی آب برای سال ۲۰۵۰ افزایشی بین ۲۰ تا ۳۰ درصد بالاتر از سطح فعلی مصرف آب را نشان می‌دهد که عمدتاً به دلیل افزایش تقاضا در بخش‌های صنعتی و خانگی می‌باشد (UNESCOWWAP, 2019). هدف اصلی تصفیه فاضلاب تولید پسابی مناسب جهت تخلیه به محیط‌های پذیرنده است به نحوی که استانداردهای تخلیه پساب رعایت شده و ضرر و زیان به محیط پذیرنده وارد نگردد. بنابراین تصفیه فاضلاب علاوه بر حفظ محیط‌زیست و ارتقاء سلامت عمومی، موجب بازگشت آب به‌طور مستقیم و غیرمستقیم به چرخه مصرف می‌گردد و با توجه به مسئله بحران آب در قرن اخیر اهمیت موضوع هر چه بیشتر نمایان می‌شود. امروزه رویکرد مناسب در طرح‌های تصفیه فاضلاب آن است که با حداقل هزینه و امکانات فنی و سادگی بهره‌برداری نیازهای تصفیه برآورده گردد (Neralla et al., 2000) همچنین نادیده

راحیل غلامی^۱

امیرحسام حسینی^{۲*}

احمد سواری^۳

سید مسعود منوری^۴

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.
۲. استاد گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.
۳. استاد دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، ایران.
۴. دانشیار گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول مکاتبات

ahhassani@srbiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۳

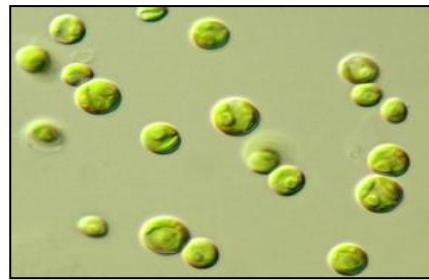
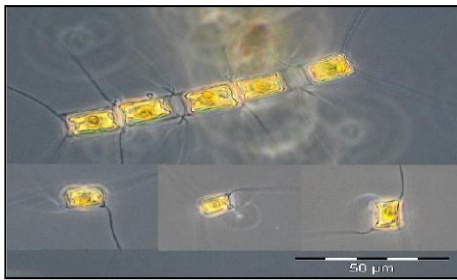
این مقاله برگرفته از پایان نامه دکتری دانشجوی می باشد.

گرفتن نارسایی در تصفیه فاضلاب و ارزیابی نکردن پتانسیل استفاده مجدد از آب تصفیه شده به معنای هدر رفتن منابع محدود آب است. حفاظت و پایداری منابع آب تنها با کاهش بار تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، بهبود کارایی تصفیه و بازیافت پساب حاصل می‌شود. با توجه به تنوع بار پسماند پساب‌های شهری و صنعتی، می‌توان مشاهده کرد که اثرات منفی پساب‌ها بر روی گونه‌های آبی با وجود ارایه استانداردهای تخلیه ادامه داشته است (Li et al., 2022; Sisman-Aydin, 2014). بنابراین، این امر اجتناب ناپذیر است که مطالعات باید روش‌ها و تکنیک‌های جدیدی را توسعه دهند که عملکرد تصفیه آب را افزایش دهد. گیاه‌پالایی به دلیل مزایای محیط‌زیستی گسترده‌ای که دارد در طول دهه گذشته به عنوان یک فناوری سبز مطرح بوده است.

گیاه‌پالایی واژه جامعی است که از سال ۱۹۹۱ برای استفاده از گیاه جهت کاهش مقدار، تحرک و سمیت آلاینده‌ها از خاک، آب و یا دیگر محیط‌های آلوده استفاده می‌گردد (Etim, 2012). این روش فن‌آوری جدیدی است که در آن از گیاهان مقاوم برای حذف یا کاهش غلظت آلاینده‌های آلی، معدنی و ترکیبات خطرناک محیط‌زیست از جمله فلزات سنگین، مواد نفتی و علف‌کش‌ها استفاده می‌شود. امروزه استفاده از گیاهان سبز براساس توانایی فوق‌العاده آنها در حذف ترکیبات مضر از محیط و متابولیزه کردن آنها به ملکول‌های متنوع، کاربرد فراوان دارد. فلزات سنگین و آلودگی‌های آلی، اهداف اصلی گیاه‌پالایی می‌باشند.

در سال‌های اخیر استفاده از سیستم‌های بیولوژیکی پیشرفته مبتنی بر جلبک‌ها و گیاهان دریایی به منظور حذف مواد آلاینده از اکوسیستم (پالایش زیستی) به دلیل هزینه و خسارت کمتر به اکوسیستم رو به افزایش است (Shams et al., 2014). این روش یک روش نوید بخش در حذف آلاینده‌ها از محیط‌زیست است که نسبت به سایر روش‌های متداول فیزیکوشیمیایی تصفیه، ارجحیت دارد (Ali et al., 2013). میکروجلبک‌های مورد استفاده در سیستم گیاه‌پالایی، ارگانیسیم‌های فیتوپلانکتونیک فتوسنتزی هستند که اولین حلقه زنجیره غذایی آبزیان هستند و جزء اصلی اکوسیستم آبی می‌باشند (Falkowski et al., 1998)، علاوه بر نقش‌های محیط‌زیستی ضروری، آنها به‌طور گسترده در بسیاری حوزه‌های مختلف مانند بهداشت، آرایشی و بهداشتی، دارویی، مواد زیستی (عامل فیلتر و بیوپلاستیک)، تصفیه فاضلاب، حذف فلزات سنگین، مواد پایش زیستی، آزمایش‌های اکتوکسیکولوژیک و آبی‌پروری استفاده می‌شوند (Li et al., 2022; Sisman-Aydin, 2020). از سوی دیگر به دلیل توانایی رشد سریع در آب‌های غنی از نیتروژن و فسفر نقش اصلی را در اتروفیکاسیون و شکوفایی جلبک ایفا می‌کنند و به دلیل این ویژگی‌ها در حذف نیتروژن و فسفر کاملاً موفق بوده‌اند (Aydın et al., 2014). سیستم‌های زیست‌پالایی میکروجلبکی نقش مهمی در تصفیه فاضلاب دارند و به دلیل ارایه راه‌حل‌های سازگار با محیط‌زیست، اقتصادی و پایدار از این سیستم در تصفیه فاضلاب شهری به عنوان جایگزین سیستم‌های تصفیه پیچیده می‌توان استفاده نمود (Wang et al., 2017). مزیت دیگر استفاده از میکروجلبک‌ها برای تصفیه فاضلاب این است که زیست‌توده جلبکی تولید می‌شود که حاوی مولکول‌های با ارزشی است که می‌توان از آن در زمینه‌های مختلف صنعتی مانند سوخت زیستی، خوراک، کود و غیره استفاده نمود (Yadav et al., 2021). پیش‌بینی می‌شود که بهره‌مندی از میکروجلبک‌ها در پیشرفت هر دو مدل تصفیه فاضلاب و استفاده مجدد از فاضلاب بازیافتی ضروری خواهد بود. میکروجلبک‌ها ثابت نموده‌اند که قدرت پالایش فوق‌العاده‌ای را در کمترین زمان دارند.

گونه‌های زیادی مطرح شده ولی تجارب نشان می‌دهد که سه گونه کلرولا (*Chlorella*(sp.))، اسکلتونما (*Skeletonema*(sp.)) و کیتوسروس (*Chaetoceros*(sp.)) به طرز بارزی قدرت پالایش مواد آلاینده آلی را دارند (Figuroa-Torres et al., 2021 and Gonzalo et al., 2021). میکروجلبک کلرلا نوعی جلبک سبز تک سلولی و ساکن آب‌های شیرین بوده که ۲ میکرومتر طول دارد و از نظر ظاهری کروی شکل و دیواره سلولی بسیار پایدار دارد. است. جزو شاخه *Chlorophyta* بوده و برای رشد به نور، هوا، آب و مقداری مواد معدنی نیاز دارد. شایان ذکر است این میکروجلبک تاژک ندارد و دارای کلروفیل b و a شامل پیگمان‌های فتوسنتزی می‌باشد. میکروجلبک کیتوسروس از جنس دیاتوم‌ها و از رده باسیلاریفیس (*Bacillariophyceae*) است. این میکروجلبک با ۳۸ درصد پروتئین، عمدتاً دریایی ولی در آب شیرین هم یافت می‌شود. کیتوسروس دارای کلروفیل‌های a و c، بتاکاروتن، رنگدانه‌های گزانتوفیلی مانند دیاتوزانتین و فوکوزانتین است. از دیگر ویژگی‌های کیتوسروس می‌توان به تک سلولی بودن، عدم داشتن تاژک و قهوه‌ای رنگ بودن آن اشاره کرد. در شکل‌های شماره ۲ و ۱ نمای میکروسکوپی از میکروجلبک‌های کلرلا و کیتوسروس ارایه شده است.

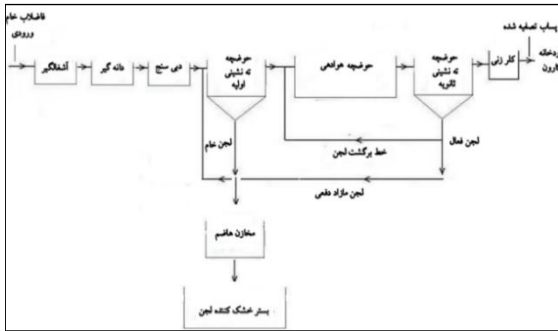


شکل ۱: نمایی میکروسکوپی از میکرو جلبک کلرلا / شکل ۲: نمایی میکروسکوپی از میکرو جلبک کیتوسروس

امین زاده گوهری و همکاران در سال ۱۴۰۱ به بررسی عملکرد میکرو جلبک در بخش‌های مختلف تصفیه‌خانه فاضلاب با به کارگیری آنالیز آماری پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که استفاده از میکرو جلبک‌ها برای تصفیه انواع فاضلاب شهری، کشاورزی و صنعتی روشی بسیار مناسب می‌باشد. همچنین بیان نمودند که میزان حذف پارامترهایی چون نیترژن کل، نیترژن آمونیاکی، فسفر کل و اورتوفسفات از پساب شهری به ترتیب ۸۷/۵٪، ۹۹/۴٪، ۸۱/۲۵ و ۸۶/۹۵٪ بوده است (امین زاده گوهری و همکاران، ۱۴۰۱). ایمران و همکاران در سال ۲۰۲۱ به بررسی پتانسیل میکرو جلبک‌ها در تصفیه زیستی پساب پرداختند. ایشان کاربردهای نهایی زیست توده میکرو جلبکی را خلاصه نموده که جنبه زیست‌پالایی را از نظر محیط‌زیستی پایدارتر می‌کند. (Ahmad et al., 2021). ادھیکاری و همکاران در سال 2019 به بررسی امکان‌سنجی تصفیه فاضلاب در کشت‌های دسته‌ای با استفاده از سویه‌های انتخاب شده از میکرو جلبک سبز *Chlorella sp.* پرداختند (Das et al., 2019). برای ارزیابی عملکرد جلبک، دو نمونه یکی دارای جلبک و دیگری بدون جلبک به‌طور دوره‌ای برای بررسی پارامترهای کیفی فاضلاب در بازه زمانی ۳ روزه، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد با تصفیه جلبکی پارامترهای BOD_5 ، COD، TKN و TP به ترتیب ۹۸/۵٪، ۹۷/۸٪، ۹۲/۶٪ و ۹۹/۲٪ در پایان فرآیند کاهش یافته است. راورت و همکاران در سال ۲۰۱۶ در کتابی تحت عنوان بیوتکنولوژی جلبک‌ها، به بررسی نقش مؤثر آنها در تصفیه فاضلاب پرداخته و نقش جلبک‌ها و تصفیه زیستی را در تصفیه فاضلاب به عنوان یک روش مؤثر جهت حذف مواد مغذی (C, N, P)، باکتری کلیفرم، فلزات سنگین و کاهش BOD_5 و COD و... تشریح نموده است (Rawat et al., 2016). سالگوریو و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی کاهش زیستی میزان فسفر و مواد آلی با استفاده از میکرو جلبک کلرلا پرداختند (Salgueiro et al., 2016). نتایج نشان داد پس از ۹ روز، میزان فسفر بیش از ۹۹٪ و میزان COD به اندازه ۷۷٪ کاهش یافته و میزان بیومس از ۰/۵ به ۰/۵۷ رسیده است. ابوالحسینی و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی حذف فسفات و نیترات از پساب شهری بوسیله کشت جلبکی پرداختند (Abolhasani et al., 2016). در این تحقیق به بررسی جلبک سندسموس پرداخته شد. نتایج نشان داد که می‌توان از این میکرو جلبک در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب استفاده نمود. احمدپور و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی اثر جلبک‌ها در حذف نیترات و فسفات کار کرده‌اند (Ahmedpour et al., 2013). در این تحقیق اسپرولینا به عنوان کارآمدترین و بهترین گونه میکرو جلبک برای کاهش نیترات در فاضلاب شهری از میان سه گونه کلرلا، اسپرولینا و سندسموس انتخاب شد در حالی که کلرلا در حذف فسفر کارآمدتر عمل نمود. با توجه به حجم زیاد فاضلاب تولید شده در جوامع شهری و خطر آن برای سلامتی انسان و محیط زیست، تصفیه فاضلاب قبل از تخلیه به رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و زمین امری ضروری است. لذا این تحقیق با هدف مدیریت منابع آب و انتقال پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهری غرب اهواز به رودخانه کارون، به بررسی کارایی بیوفیلترهای حاوی میکرو جلبک کلرلا و کیتوسروس برای حذف آمونیاک، نیتريت، نیترات، فلزات سنگین، TSS، COD، BOD، کدورت، توتال و فکال کلیفرم‌ها در زمان‌های ماند صفر، ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۱۰۰ و 168 ساعته پرداخته است.

مواد و روش‌ها

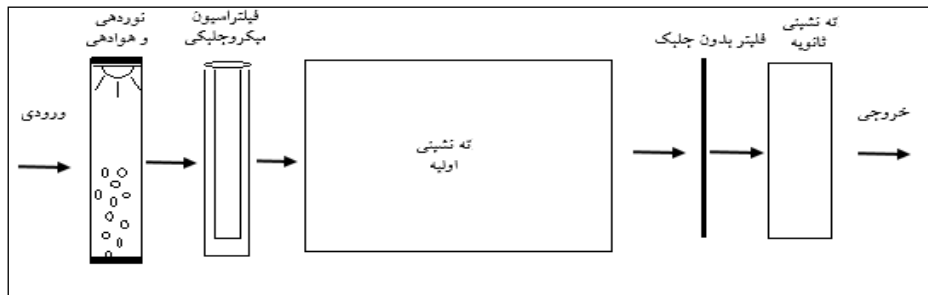
تحقیق حاضر در تصفیه خانه فاضلاب شهری غرب اهواز و در بخش تصفیه تکمیلی انجام گردید. تصفیه خانه فاضلاب شهری غرب اهواز با دبی متوسط ۱۷۰۰ متر مکعب در ساعت، در غرب شهر اهواز واقع شده است. این تصفیه خانه جمعیت حدود ۱۹۴۰۰۰ نفر را تحت پوشش قرار داده است. بمنظور مدیریت منابع آب، پساب این تصفیه خانه به رودخانه کارون منتقل می‌گردد. سیستم تصفیه فاضلاب در این تصفیه خانه از نوع سیستم لجن فعال متعارف، با هوادهی گسترده می‌باشد. همان‌طور که در شکل شماره ۳ نشان داده شده است، این پژوهش به منظور ارتقاء کیفیت پساب خروجی از طریق استفاده از بیوفیلترهای میکروجلبکی در بخش نهایی تصفیه تکمیلی انجام گردیده است. بخش‌های مختلف تصفیه‌خانه در فلودیگرام شکل شماره ۴ ارایه شده است.



شکل ۴: فلودیگرام تصفیه خانه فاضلاب غرب اهواز

شکل ۳: محل برداشت پساب جهت بیوفیلترها

پس از بررسی‌های انجام شده در ابتدا، بیوفیلترها طراحی گردیده و بخش‌های نوردهی و هوادهی، فیلتراسیون میکروجلبکی و سپس بخش ته‌نشینی اولیه، فیلتراسیون بدون جلبک و نهایتاً ته‌نشینی ثانویه و خروجی در آن جانمایی شد. در شکل شماره ۵ فلودیگرام بیوفیلتر و در شکل شماره ۶ نمایی از بیوفیلتر طراحی شده نشان داده شده است.



شکل ۵: فلودیگرام بیوفیلتر



شکل ۶: نمایی از بیوفیلتر طراحی شده

گونه‌های میکروجلبک مورد استفاده در بیوفیلترها متعلق به دو کلاس طبقه‌بندی، میکروجلبک قهوه‌ای *cheatoceros sp.* و میکروجلبک سبز *Chlorella vulgaris* بوده است که همگام با طراحی و ساخت بیوفیلترها در این تحقیق با بررسی‌های بعمل آمده این دو گونه میکروجلبک انتخاب گردیدند. برای اطمینان از رشد و تکثیر سلول‌ها، استوک (پیش کشت) کیتوسروس که از مرکز تحقیقات خلیج فارس و میکروجلبک خالص کلرلا از شرکت توسعه ذخایر زیستی جلبک‌های خلیج فارس (آلجی بانک) تهیه گردید. به منظور تکثیر و کشت میکروجلبک‌ها، آزمایشگاه در شرایط کنترل شده (استریل بودن، دما، نور و هوادهی مناسب و ...) تجهیز شد. برای میکروجلبک کیتوسروس، محیط کشت کانوی (Conway culture medium) و برای میکروجلبک کلرلا، محیط کشت JM (Jaworskis Medium) به عنوان زیستگاه مصنوعی و استریل جهت رشد و تکثیر میکروجلبک در نظر گرفته شد. جهت کشت و پرورش میکروجلبک، ۱۰۰ سی‌سی استوک میکروجلبک و ۱ سی‌سی محیط کشت به آب استریل شده اضافه شد. هوادهی از طریق شیلنگ هوا، نوردی مناسب (۳۵۰۰ لوکس) از طریق لامپ برقرار گردید و دمای اتاق بین ۲۲ تا ۳۳ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. پس از بلوم دادن میکروجلبک‌ها طی ۴ الی ۷ روز، در ظرف دیگری کشت را به ۵ لیتر ارتقاء داده سپس در ۱۰ لیتر و ۱۵ لیتر کشت انجام شد. در نهایت کشت انبوه میکروجلبک‌ها به حدی که تعداد آنها از 10^6 سلول در سی‌سی بالاتر باشد، رسید. پس از بررسی‌های انجام شده و شمارش میکروجلبک‌ها با میکروسکوپ، تراکم سلولی مناسب میکروجلبک کلرلا و کیتوسروس در تحقیق حاضر $10^6 \times 32$ سلول در سی‌سی شمارش گردید. در شکل شماره ۷، نمایی از میکروجلبک در حال تکثیر نشان داده شده است. لازم به ذکر است هوادهی با استفاده از پمپ هوا با مشخصات فشار هوای 0/12 بار (RESUN AC-9603) به صورت مداوم در طول دوره‌های کشت و بهره‌برداری انجام شد. پس از کشت و بلوم میکروجلبک‌ها در حجم مورد نظر، میکروجلبک به همراه پساب خروجی تصفیه خانه (به عنوان نمونه صفر) با دبی تنظیم شده وارد بیوفیلترها شده و نمونه‌برداری‌ها در زمان‌های ماند صفر، ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۱۰۰، ۱۶۸ ساعته با ۳ بار تکرار در ۳ بیوفیلتر انجام گردید.



شکل ۷: نمایی از میکروجلبک در حال تکثیر

پساب ورودی به بیوفیلترها از بخش انتهایی و خروجی تصفیه خانه در محل تاسیسات کلرزی، برداشت و به بیوفیلترها منتقل شد (شکل شماره ۳). پساب با دبی بسیار کم وارد بیوفیلترهای طراحی شده، گردید و با وجود بیوفیلترهای میکروجلبکی کلرلا و کیتوسروس، تصفیه تکمیلی انجام شد. در شکل شماره ۸ نمونه‌ای از خروجی بیوفیلتر نشان داده شده است.



شکل ۸: نمایی از بیوفیلتر و نمونه‌ای از خروجی آن

نمونه‌برداری‌ها در زمان‌های ماند یاد شده پس از تلقیح در کلیه فیلترها برای انجام آزمایش‌های پارامترهایی از قبیل BOD_5 ، COD ، TSS ، کدورت، آهن، سرب، جیوه، کادمیوم، بار میکروبی و ... انجام شد. نمونه‌ها از ورودی و خروجی بیوفیلترها در بازه‌های زمانی مورد نظر برداشت گردیده و کلیه آزمایش‌ها با روش‌های استاندارد متد انجام شده که شرح آن همراه با لوازم و وسایل مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها در جدول شماره ۱ بیان گردیده است (APHA, 1995).

جدول ۱: لوازم و وسایل مورد استفاده برای آزمایشات (APHA, 1995)

نام آزمایش	روش کار (استاندارد متد)	تجهیزات به همراه برند و مدل آنها و مواد مورد نیاز
COD	۱۷-۵-۵۲۲۰	اسپکتوفوتومتر (HACH- DR5000) - راکتور (HACH-DRB200) - ویال با رنج ۰ تا ۱۵۰
BOD_5	۵-۵-۵۲۱۰	انکوباتور یخچال دار (MEMERT) - ست BOD
TSS	۶۹-۲-۲۵۴۰	کاغذ صافی فایبر گلاس و اشلس - پمپ خلاء
کدورت	۱۲-۲-۲۱۳۰	کدورت سنج (HACH-2100N Turbidimeter)
نیترات	۱۲۶-۴-۴۵۰۰	است کج‌دال
نیتریت	۴۵۰۰-۴-۱۲۴	معرف نیتریت-اسپکتوفوتومتر (HACH- DR5000)
میکروبی	۹۲۲۱-۹	محیط کشت- اتوکلاو (CARBOLITE) - انکوباتور ۲ عدد (WTW-TS606-G2/Var) - یخچال آزمایشگاهی (ARCTIKO)
آهن	۷۹-۳-۳۵۰۰	اسپکتوفوتومتر (HACH- DR5000)
سرب-جیوه و کادمیوم	۱۵-۳-۳۱۱۰	دستگاه جذب اتمیک با شعله
محیط کشت Jaworskis Medium	-	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ - $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ - $NaNO_3$ - $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ - $NaHCO_3$ $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ - $(NH_4)MO_7O_{24} \cdot 4H_2O$ - KH_2PO_4 - H_3BO_3 - $FeNa$ -EDTA Cobalamin(Vitamin B ₁₂)-Tiamina HCL(Vitamin B ₁)-Biotin(Vitamin H)
محیط کشت کانوی	-	$NaNO_3$ - EDTA- $NaH_2PO_4 \cdot H_2O$ - VITMIN(B ₁₂ & B ₁)- $Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$ - H_3BO_3 - $MnCl_4 \cdot H_2O$ - H_3BO - $ZNCL_2$ - $COCL_2 \cdot 6H_2O$

پس از انجام آزمایشات و ثبت نتایج، نتایج بدست آمده با استفاده از نرم افزارهای SPSS و Excel تجزیه و تحلیل شد. ابتدا با آزمون کولموگروف اسمیرنوف نرمال بودن داده‌های خام بررسی گردید. داده‌های نرمال با آزمون آنوای یک طرفه آنالیز شده سپس براساس آزمون تعقیبی LSD، معنی‌داری رابطه یک زمان ماند با سایر زمان‌های ماند بررسی شد. نتایج بدست آمده در زمان‌های ماند مختلف و فیلترهای متفاوت با نمونه شاهد (نمونه صفر) و با هم مقایسه گردید. در نهایت راندمان عملکرد بیوفیلترهای میکروجلبکی کلرلا و کیتوسروس در تصفیه فاضلاب تصفیه‌خانه بررسی شد و بهترین عملکرد و سازگاری این بیوفیلترها در کاهش پارامترهای مد نظر مشخص گردید. جهت بررسی عملکرد دو میکروجلبک با هم، از تحلیل کواریانس چند متغیری (مانکوا) بر روی میانگین نتایج اثرات و برای مقایسه میانگین شاخص‌های اندازه‌گیری شده با مقدار استاندارد، از آزمون تی تک نمونه‌ای استفاده شده است.

نتایج

پس از انجام آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل آماری، نتایج حاصل از آنالیز واریانس گونه‌های میکروجلبک مورد بررسی در بیوفیلترها بیانگر معنی‌دار بودن اثر آن گونه و زمان ماند بر تصفیه سباب ورودی به بیوفیلترها در حذف پارامترهای مورد بررسی می‌باشد ($P < 0.05$). براساس آزمون تعقیبی LSD نیز مشخص گردید که اختلاف معنی‌داری بین رابطه یک زمان ماند با زمان‌های ماند دیگر وجود ندارد. به منظور بررسی عملکرد بیوفیلترهای میکروجلبکی از تحلیل کواریانس چند متغیری (مانکوا) بر روی میانگین نتایج اثرات میکروجلبک‌های کلرلا و کیتوسروس استفاده شده است. بررسی اثر زمان و زمان/گروه با آزمون‌های پیلایی، لامبدای ویلکز، اثر هتلینگ و آزمون بزرگترین ریشه روی انجام شد. همان‌طور که در جدول شماره ۲ نشان داده شده است، در هر چهار آزمون انجام شده سطح معنی‌داری از ۰/۰۵ کمتر گزارش شده است که مبین معنی‌داری اثر زمان و گروه است. در واقع می‌توان گفت اثرات میکروجلبک‌های کلرلا و کیتوسروس

در طول زمان در حال تغییر بوده است. همچنین اثرات دو گروه (میکروجلبک‌های کلرلا و کیتوسروس) در طول زمان در دو گروه مورد مطالعه نیز متفاوت بوده است.

جدول ۲: نتایج تحلیل کواریانس چند متغیری (مانکوا) بر روی میانگین نتایج شاخص‌های اندازه گیری شده

اثر	نام آزمون	مقدار	DF فرضیه	DF خطا	F	P_Value	مجذور اتا	توان آماری
زمان	آزمون اثریلابی	۵/۹۸۶	۱۰۲	۷۸	۳۲۹/۰۲	۰/۰۰۰	۰/۹۹۸	۱
	آزمون لامبدای ویلکز	۰/۰۰۰	۱۰۲	۵۳	۵۰۶۹/۴۳	۰/۰۰۰	۱	۱
	آزمون اثرهتلینگ	۹۷۴۹۴/۸۵۴	۱۰۲	۳۸	۶۰۵۳۵/۰۸	۰/۰۰۰	۱	۱
	آزمون بزرگ‌ترین ریشه روی	۹۷۱۶۵۸۱/۰۸۹	۱۷	۱۳	۵	۰/۰۰۰	۱	۱
					۷۴۳۰۳/۷۰			
					۲۶			
زمان*گروه	آزمون اثریلابی	۴/۹۷۲	۸۵	۶۰	۱۲۶/۱۵	۰/۰۰۰	۰/۹۹۴	۱
	آزمون لامبدای ویلکز	۰/۰۰۰	۸۵	۳۳	۹۹۳/۶۶	۰/۰۰۰	۰/۹۹۹	۱
	آزمون اثرهتلینگ	۳۲۸۴۴/۸۸۹	۸۵	۳۲	۲۴۷۳/۰۳	۰/۰۰۰	۱	۱
	آزمون بزرگ‌ترین ریشه روی	۳۳۲۱۸/۲۰۸	۱۷	۱۲	۱۶۳۸۹/۳۲	۰/۰۰۰	۱	۱

مطابق جدول شماره ۳، نتایج تحلیل کواریانس چند متغیری برای بررسی اختلاف میانگین اثرات میکروجلبک‌های کلرلا و کیتوسروس در بازه‌های زمانی و گروه‌های میکروجلبک نشان می‌دهد که بین میانگین تمام شاخص‌های اندازه‌گیری شده در بازه‌های زمانی، اختلاف معنی‌دار شده است ($p < 0.05$). همچنین در سایر شاخص‌ها بین اثرات دو میکروجلبک نیز تفاوت معنی‌داری مشاهده شده است.

جدول ۳: نتایج تحلیل کواریانس یک طرفه در متن مانکوا بر روی میانگین نتایج اثرات میکروجلبک‌های کلرلا و کیتوسروس

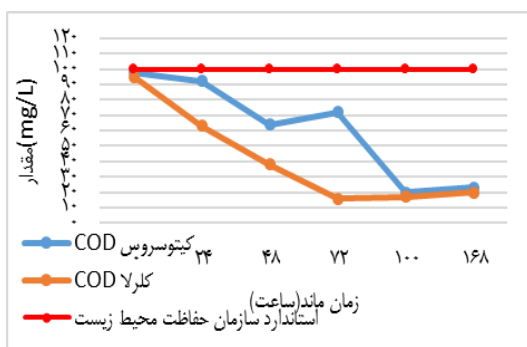
متغیر	منبع تغییرات	مجموع مجذورات	درجه آزادی	میانگین مجذورات	F	سطح معنی داری	مجذور اتا	توان آماری
COD	زمان	۲۸۹۵۲/۲	۵	۵۷۹۰/۴	۵۰/۸۸۷	۰/۰۰۰	۰/۸۹۸	۱
	گروه	۳۵۲۰/۴	۱	۳۵۲۰/۴	۳۰/۹۳۸	۰/۰۰۰	۰/۵۱۶	۱
BOD5	زمان	۲۳۵۰/۷	۵	۴۷۰/۱	۸۵/۸۰۸	۰/۰۰۰	۰/۹۳۷	۱
	گروه	۴۴/۴	۱	۴۴/۴	۸/۱۱۲	۰/۰۰۰	۰/۲۱۹	۰/۷۸۶
TSS	زمان	۱۴۸۲۵/۶	۵	۲۹۶۵/۱	۵۷/۱۳۰	۰/۰۰۰	۰/۹۰۸	۱
	گروه	۷۵۴۰/۰	۱	۷۵۴۰/۰	۱۴۵/۲۷۶	۰/۰۰۰	۰/۸۳۴	۱
کدورت	زمان	۲۳۲/۲	۵	۶۶/۴	۳/۷۴۷	۰/۰۱۰	۰/۳۹۲	۰/۸۷۹
	گروه	۲/۹۰۱	۱	۲/۹۰۱	۰/۱۶۴	۰/۰۳۱	۰/۰۰۶	۰/۰۶۸
نیتریت	زمان	۳۸۶/۷	۵	۷/۳۴۵	۱۹۱/۱۰۱	۰/۰۰۰	۰/۹۷۱	۱
	گروه	۲۸/۲	۱	۲۸/۱۶۸	۷۳۲/۸۱۶	۰/۰۰۰	۰/۹۶۲	۱
نیترات	زمان	۱۰۴/۵	۵	۲۰/۹۱۰	۱۵/۳۰۳	۰/۰۰۰	۰/۷۲۵	۱
	گروه	۱۹/۶	۱	۱۹/۵۸۱	۱۴/۳۳۰	۰/۰۰۰	۰/۳۳۱	۰/۹۵۵
فسفات	زمان	۷۶/۷	۵	۱۵/۳۳۶	۱۴۰/۸۱۴	۰/۰۰۰	۰/۹۶۰	۱
	گروه	۰/۰۵۳	۱	۰/۰۵۳	۰/۴۸۶	۰/۰۰۰	۰/۰۱۶	۰/۱۰۳
سرب	زمان	۰/۰۲۸	۵	۰/۰۰۶	۴۲/۶۱۰	۰/۰۰۰	۰/۸۸۰	۱
	گروه	۰/۰۱۵	۱	۰/۰۱۵	۱۱۷/۵۴۱	۰/۰۰۰	۰/۸۰۲	۱
جیوه	زمان	۰/۰۰۱	۵	۰/۰۰۰	۱۲/۳۵۹	۰/۰۰۰	۰/۶۸۱	۱
	گروه	۰/۰۰۰	۱	۰/۰۰۰	۵/۹۵۵	۰/۰۲۱	۰/۱۷۰	۰/۶۵۵
آهن	زمان	۱/۴۲۵	۵	۰/۲۸۵	۵۳/۹۳۹	۰/۰۰۰	۰/۹۰۳	۱
	گروه	۰/۰۴۳	۱	۰/۰۴۳	۸/۲۱۲	۰/۰۰۸	۰/۲۲۱	۰/۷۹۱
کادمیوم	زمان	۰/۰۰۱	۵	۰/۰۰۰	۴۳/۳۶۸	۰/۰۰۰	۰/۸۸۲	۱
	گروه	۰/۰۰۰۰۱۳	۱	۰/۰۰۰	۳/۰۱۷	۰/۰۴۳	۰/۰۹۴	۰/۳۹۰
توتال	زمان	۱۴۱۲۹۰۲۵۰۰۰۰۰۰	۵	۲۸۲۵۸۰۵۰۰۰۰۰۰	۷/۷۹۰	۰/۰۰۰	۰/۵۷۳	۰/۹۹۷
	گروه	۲۱۲۹۸۲۳۵۰۰۰۰۰۰	۱	۲۱۲۹۸۲۳۵۰۰۰۰۰۰	۵۸/۷۱۷	۰/۰۰۰	۰/۶۶۹	۱
فکال	زمان	۱۲۵۵۴۶۰۰۰۰۰۰۰۰	۵	۲۵۱۰۹۲۰۰۰۰۰۰۰	۸/۰۱۴	۰/۰۰۰	۰/۵۸۰	۰/۹۹۸
	گروه	۱۵۸۴۰۴۰۰۰۰۰۰۰۰	۱	۱۵۸۴۰۴۰۰۰۰۰۰۰۰	۵۰/۵۵۷	۰/۰۰۰	۰/۶۳۵	۱

در این پژوهش به منظور مقایسه میانگین شاخص‌های اندازه‌گیری شده با مقدار استاندارد از آزمون تی تک نمونه‌ای استفاده شده است. همان‌طور که در جداول شماره ۴ نشان داده شده، با توجه به نتایج بدست آمده بین میانگین شاخص‌های اندازه‌گیری شده با مقادیر استاندارد، اختلاف معنی‌داری مشاهده شده است ($P < 0.05$) و در کلیه پارامترهای مورد بررسی، خروجی بیوفیلتر از استاندارد سازمان حفاظت محیط‌زیست برای تخلیه پساب به آبهای سطحی کمتر بوده است.

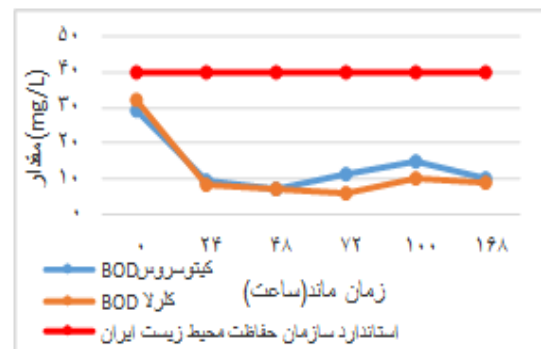
جدول ۴: مقایسه میانگین شاخص‌های اندازه‌گیری شده تحت میکروجلبک‌های کیتوسروس و کلرلا با مقدار استاندارد

متغیر	میکرو جلک	میانگین	انحراف معیار	راندمان	مقدار استاندارد	T	P_Value	نتیجه
COD	کیتوسروس	۶۱/۵۰	۳۱/۵۴	۸۱	۱۰۰	۵/۱۸	۰/۰۰۰	معنادار
	کلرلا	۴۱/۷۲	۳۰/۰۴	۸۳	۱۰۰	۸/۲۳	۰/۰۰۰	معنادار
BOD ₅	کیتوسروس	۱۴/۴۴	۷/۹۴	۷۹	۴۰	۱۳/۶۵	۰/۰۰۰	معنادار
	کلرلا	۱۲/۲۲	۹/۱۹	۸۱	۴۰	۱۲/۸۲	۰/۰۰۰	معنادار
TSS	کیتوسروس	۴۰/۶۷	۲۰/۰۹	۶۵	۶۰	۱/۱۳	۰/۰۰۰	معنادار
	کلرلا	۳۷/۴۴	۱۹/۵۱	۷۷	۶۰	۴/۹۱	۰/۰۰۰	معنادار
کدورت	کیتوسروس	۴/۹۴	۲/۸۶	۷۳	۵۰	۶۶/۸۷	۰/۰۰۰	معنادار
	کلرلا	۵/۵۱	۶/۴۵	۸۲	۵۰	۲۹/۲۶	۰/۰۰۰	معنادار
نیتريت	کیتوسروس	۳/۷۴	۱/۱۴	۵۳	۱۰	۲۳/۳۲	۰/۰۰۰	معنادار
	کلرلا	۱/۹۷	۰/۹۶	۷۰	۱۰	۳۵/۴۰	۰/۰۰۰	معنادار
نیترات	کیتوسروس	۴/۶۹	۱/۷۶	۶۲	۵۰	۱۰۹/۴۰	۰/۰۰۰	معنادار
	کلرلا	۶/۱۷	۲/۳۲	۶۸	۵۰	۸۰/۰۸	۰/۰۰۰	معنادار
فسفات	کیتوسروس	۲/۷۸	۱/۷۸	۷۸	۶	۷/۶۵	۰/۰۰۰	معنادار
	کلرلا	۲/۷۱	۱/۲۳	۶۸	۶	۱۱/۳۷	۰/۰۰۰	معنادار
سرب	کیتوسروس	۰/۰۲	۰/۰۲	۹۱	۱	۱۸۲/۳۴	۰/۰۰۰	معنادار
	کلرلا	۰/۰۶	۰/۰۴	۹۲	۱	۱۰۸/۶۱	۰/۰۰۰	معنادار
آهن	کیتوسروس	۰/۲۹	۰/۲۵	۸۳	۳	۴۵/۵۲	۰/۰۰۰	معنادار
	کلرلا	۰/۲۲	۰/۱۷	۹۵	۳	۴۵/۵۲	۰/۰۰۰	معنادار
کادمیوم	کیتوسروس	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۹۲	۰/۱	۱۰۷/۱۵	۰/۰۰۰	معنادار
	کلرلا	۰/۰۰۵	۰/۰۰۷	۹۸	۰/۱	۵۷	۰/۰۰۰	معنادار

برطبق نمودارهای شکل شماره ۹، BOD₅ در هر دو فیلتر طی ۱۶۸ ساعته روند کاهشی داشته و روند کاهش پارامترهای مورد نظر مطلوب بوده است. در طول زمان‌های ماند، بیوفیلترهای حاوی میکروجلبک کلرلا و کیتوسروس به ترتیب، ۸۱٪ و ۷۹٪ راندمان حذف داشته‌اند. بهترین راندمان حذف BOD₅ توسط بیوفیلتر حاوی میکروجلبک کلرلا در زمان ماند ۷۲ ساعت بوده است که غلظت BOD₅ را از ۳۳ mg/l به ۶/۶۷mg/l رسانده است. همان‌طور که در نمودار شکل ۱۰ نشان داده شده است، COD طی ۱۶۸ ساعته روند کاهشی داشته و روند کاهش پارامترهای مورد نظر مطلوب بوده است. در طول زمان‌های ماند، بیوفیلتر حاوی میکروجلبک کلرلا و کیتوسروس به ترتیب ۸۳٪ و ۸۱٪ راندمان حذف داشته است.

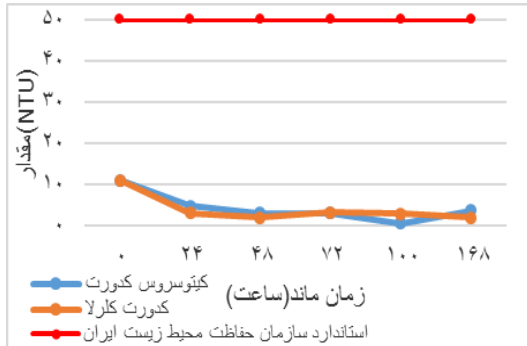


شکل ۱۰: مقایسه میانگین COD با استاندارد

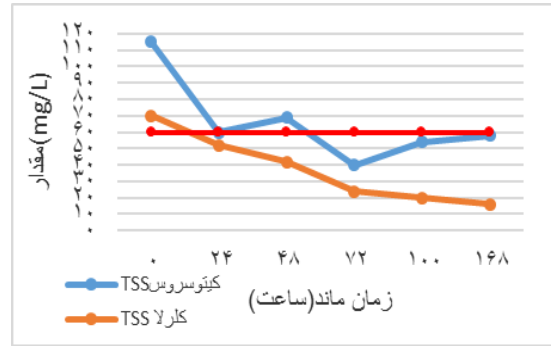


شکل ۹: مقایسه میانگین BOD₅ با استاندارد

همچنین این نمودارها (۹ و ۱۰) نشان می‌دهند که میزان خروجی بیوفیلترها از استاندارد سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران که برای COD، ۱۰۰ میلی گرم در لیتر و برای BOD₅ ۴۰ میلی گرم در لیتر بوده است، کمتر شده است.

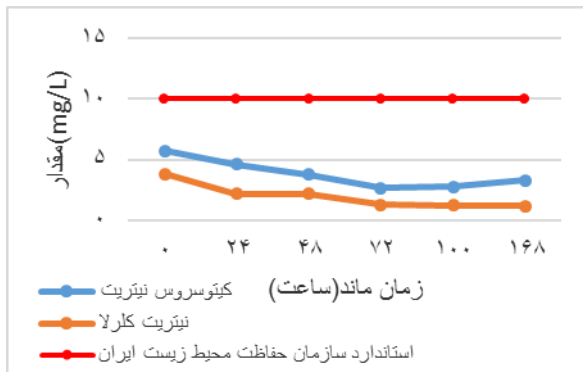


شکل ۱۲: مقایسه میانگین کدورت با مقدار استاندارد

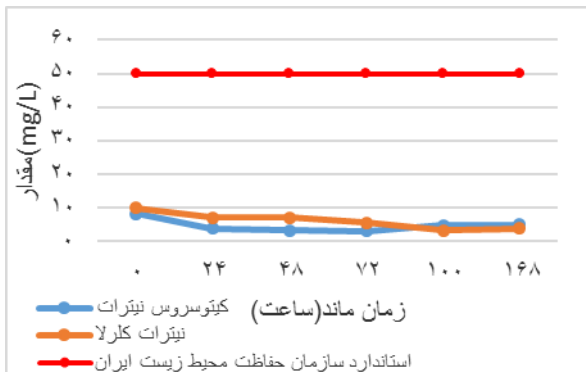


شکل ۱۱: مقایسه میانگین TSS با مقدار استاندارد

همان‌طور که در جدول شماره ۴ و نمودار شکل شماره ۱۱ نشان داده شده، در طول زمان‌های ماند، TSS روند کاهشی داشته و بهترین عملکرد میکروجلبک‌های کلرلا و کیتوسروس با راندمان حذف به ترتیب ۷۷٪ و ۶۵٪ در زمان ماند ۱۶۸ ساعته بوده است. همان‌گونه که در نمودار شکل شماره ۱۲ نشان داده شده، در طول زمان‌های ماند، کدورت برای میکروجلبک‌های کلرلا و کیتوسروس روند کاهشی داشته و بهترین عملکرد آن با راندمان حذف ۸۲٪ در زمان ماند ۱۶۸ ساعته، مربوط به کلرلا بوده که در این مدت کدورت از ۱۱ ntu به ۱/۹۸ رسیده است. روند تغییرات کدورت توسط میکروجلبک کیتوسروس در طول زمان‌های ماند ۱۶۸ ساعت، نیز کاهشی بوده و بهترین عملکرد حذف کدورت با راندمان حذف ۷۳٪ در زمان ماند ۴۸ ساعت با ۳ ntu بوده و در زمان ماند ۱۶۸ ساعت به ۳/۷ ntu رسیده است.

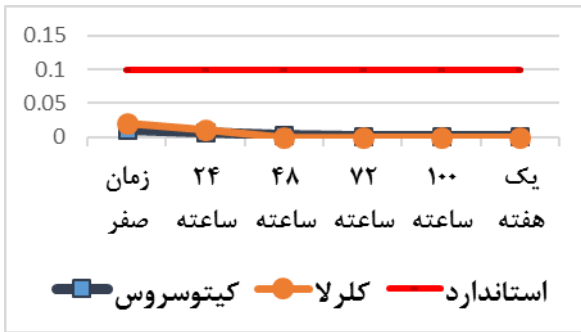


شکل ۱۴: مقایسه میانگین نیتريت با مقدار استاندارد

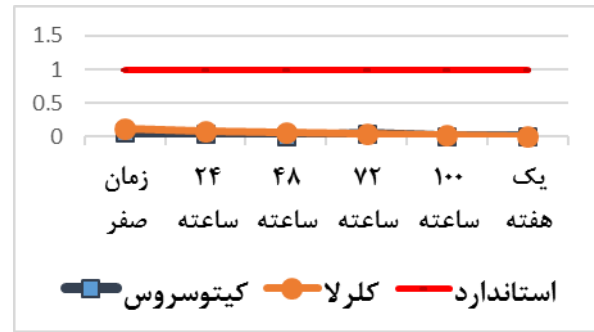


شکل ۱۳: مقایسه میانگین نیترات با مقدار استاندارد

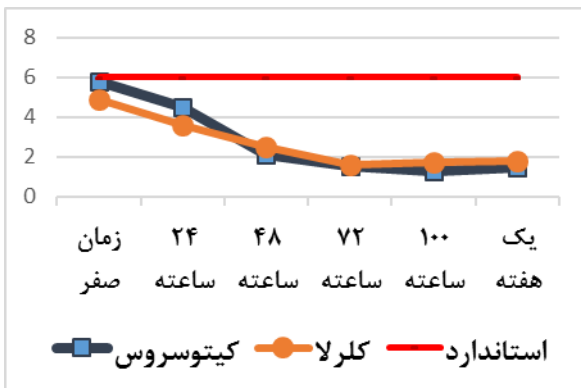
براساس نمودارهای شماره ۱۳ و ۱۴ در بیوفیلترهای مورد بررسی، میکروجلبک کیتوسروس موجب کاهش نیترات، نیتريت به ترتیب ۶۲٪، ۵۳٪ و برای کلرلا به میزان ۶۸٪، ۷۰٪ شده است. همچنین بهترین راندمان حذف برای نیتريت و نیترات در ۱۰۰ ساعت و ۱۶۸ ساعت برای بیوفیلتر میکروجلبک‌های کلرلا و کیتوسروس، به ترتیب به میزان ۱/۱۶ mg/l و ۳/۲۵ mg/l مشاهده شده است. شایان ذکر است در بررسی تفاوت میانگین‌های نیترات، نیتريت با زمان‌های ماند مورد بررسی که در جدول شماره ۴ بیان شده، آنالیز واریانس معنی‌دار بوده است ($P < 0/05$).



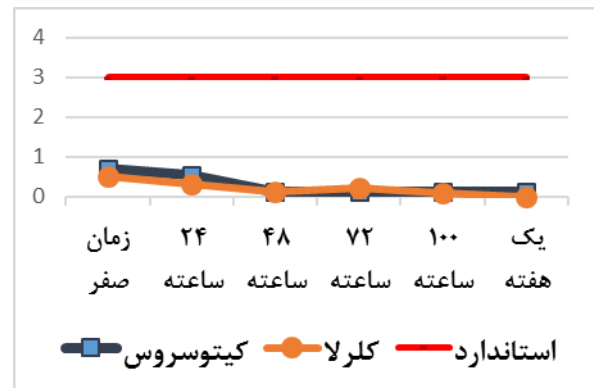
شکل ۱۶: مقایسه میانگین کادمیوم با مقدار استاندارد



شکل ۱۵: مقایسه میانگین سرب با مقدار استاندارد



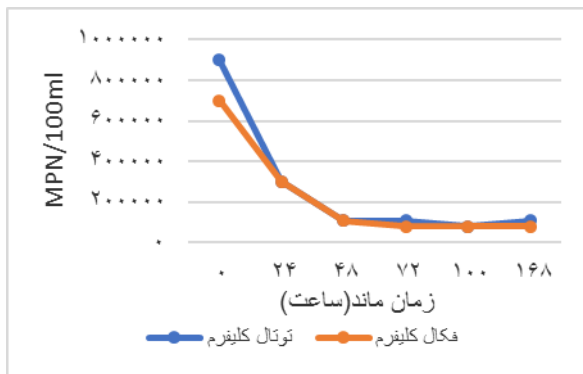
شکل ۱۸: مقایسه میانگین آهن با مقدار استاندارد



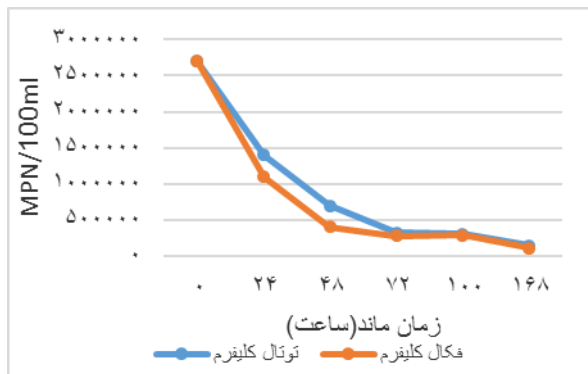
شکل ۱۷: مقایسه میانگین جیوه با مقدار استاندارد

همان گونه که جدول شماره ۳ نشان می‌دهد، اختلاف معنی‌داری بین گونه‌های میکروجلبک کلرلا و کیتوسروس با زمان ماند بر تصفیه پساب ورودی به بیوفیلترها در حذف فلزات سنگین وجود دارد ($P < 0.05$). همان‌طور که در نمودارهای شکل های ۱۵ الی ۱۸ نشان داده شده است، در طول مدت زمان ماند ۱۶۸ ساعته، فعالیت میکروجلبک‌های کیتوسروس و کلرلا در حذف فلزات سنگین مثبت بوده و میزان فلزات سنگین آهن، جیوه، سرب و کادمیوم روند کاهشی داشته است. همچنین بهترین راندمان حذف مربوط به میکروجلبک کلرلا در حذف کادمیوم و جیوه در زمان ماند ۴۸ ساعته بوده و تا زمان ماند ۱۶۸ ساعته، همین روند ادامه داشته است. در خصوص سرب و آهن بهترین عملکرد در زمان ماند ۱۶۸ ساعته بوده است. میکروجلبک‌های کلرلا و کیتوسروس قابلیت حذف آهن، جیوه، کادمیوم و سرب را به ترتیب با (۹۵، ۹۶، ۹۸، ۹۲ درصد) و (۸۳، ۸۶، ۹۲ و ۹۱ درصد) داشته است.

براساس نمودار شکل شماره ۱۹ و جدول شماره ۵ روند کاهش مطلوب توتال و فکال کلیفرم توسط میکروجلبک کیتوسروس به ترتیب با راندمان ۹۵ و ۹۶ درصد حاصل شد. براساس نمودار شکل شماره ۲۰ و جدول شماره ۵ روند کاهش مطلوب توتال و فکال کلیفرم توسط میکروجلبک کلرلا به ترتیب با راندمان ۹۱ و ۸۹ درصد به دست آمد. بهترین عملکرد در زمان ماند ۱۶۸ ساعته بود. این امر بیانگر فعالیت مناسب بیوفیلتر و میکروجلبک کلرلا در کلیه مراحل تصفیه در بیوفیلتر و فازهای دینامیکی زندگی میکروجلبک بوده که حتی در فاز مرگ و میر میکروجلبک، کارایی بیوفیلتر و میکروجلبک در حذف کلیفرم‌ها (توتال و فکال) وجود داشته است.



شکل ۲۰: روند کاهش توتال و فکال کلیرم توسط میکروجلبک کلرلا

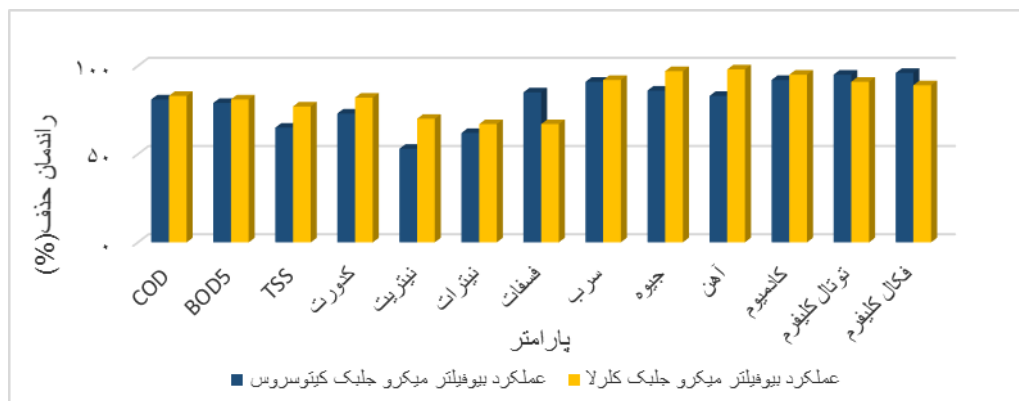


شکل ۱۹: روند کاهش توتال و فکال کلیرم توسط میکروجلبک کیتوسروس

جدول شماره ۵: مقایسه عملکرد بیوفیلتر با میکروجلبک های کلرلا و کیتوسروس در حذف کیفرم ها

P_Value	F	راندمان	بیشینه	کمینه	میانگین	بازه زمانی	متغیر	میکروجلبک
---	---	۹۵	۲۷۰۰۰۰	۲۷۰۰۰۰	۲۷۰۰۰۰	زمان صفر	توتال کلیرم	بیوفیلتر میکروجلبک کیتوسروس
			۱۴۰۰۰۰	۱۴۰۰۰۰	۱۴۰۰۰۰	۲۴ ساعته		
			۷۰۰۰۰	۷۰۰۰۰	۷۰۰۰۰	۴۸ ساعته		
			۳۲۰۰۰۰	۳۲۰۰۰۰	۳۲۰۰۰۰	۷۲ ساعته		
			۲۷۰۰۰۰	۲۷۰۰۰۰	۲۷۰۰۰۰	۱۰۰ ساعته		
			۱۴۰۰۰۰	۱۴۰۰۰۰	۱۴۰۰۰۰	۱۶۸ ساعته		
---	---	۹۶	۲۷۰۰۰۰	۲۷۰۰۰۰	۲۷۰۰۰۰	زمان صفر	فکال کلیرم	بیوفیلتر میکروجلبک کلرلا
			۱۱۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰	۲۴ ساعته		
			۴۰۰۰۰	۴۰۰۰۰	۴۰۰۰۰	۴۸ ساعته		
			۲۸۰۰۰۰	۲۸۰۰۰۰	۲۸۰۰۰۰	۷۲ ساعته		
			۲۲۰۰۰۰	۲۲۰۰۰۰	۲۲۰۰۰۰	۱۰۰ ساعته		
			۱۱۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰	۱۶۸ ساعته		
--	--	۹۱	۹۰۰۰۰	۹۰۰۰۰	۹۰۰۰۰	زمان صفر	توتال کلیرم	بیوفیلتر میکروجلبک کلرلا
			۳۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۲۴ ساعته		
			۱۱۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰	۴۸ ساعته		
			۱۱۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰	۷۲ ساعته		
			۸۰۰۰۰	۸۰۰۰۰	۸۰۰۰۰	۱۰۰ ساعته		
			۱۱۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰	۱۶۸ ساعته		
--	--	۸۹	۳۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	زمان صفر	فکال کلیرم	بیوفیلتر میکروجلبک کلرلا
			۱۱۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰	۲۴ ساعته		
			۸۰۰۰۰	۸۰۰۰۰	۸۰۰۰۰	۴۸ ساعته		
			۸۰۰۰۰	۸۰۰۰۰	۸۰۰۰۰	۷۲ ساعته		
			۸۰۰۰۰	۸۰۰۰۰	۸۰۰۰۰	۱۰۰ ساعته		
			۹۰۰۰۰	۹۰۰۰۰	۹۰۰۰۰	۱۶۸ ساعته		

پس از بررسی پارامترهای مورد نظر با روش های مندرج در استاندارد متد، عملکرد بیوفیلترهای میکروجلبکی مورد ارزیابی قرار گرفت. همان طور که در نمودار شکل شماره ۲۱ نشان داده شده است هر دو میکروجلبک عملکرد مطلوبی داشته و توانسته اند پارامترهای فیزیکوشیمیایی و میکروبی را با راندمان مطلوبی کاهش دهند.



شکل ۲۱: مقایسه راندمان حذف بیوفیلترهای میکروجلبکی کلرلا و کیتوسروس برای پارامترهای مورد بررسی

شکل شماره ۲۱ نشان داد بیشترین راندمان حذف فلزات سنگین مربوط به بیوفیلتر میکروجلبکی کلرلا با حذف ۹۸٪ کادمیوم، ۹۶٪ جیوه، ۹۵٪ آهن و ۹۲٪ سرب بوده است. بهترین عملکرد بیوفیلترهای میکروجلبکی در حذف بار میکروبی (توتال و فکال کلئفرم) مربوط به بیوفیلتر میکروجلبکی کیتوسروس با ۹۵ و ۹۶ درصد حذف بوده است. همچنین پارامترهای فیزیکوشیمیایی مورد بررسی توسط بیوفیلتر میکروجلبکی کلرلا کاهش بیشتری داشته اند.

بحث و نتیجه گیری

در سال‌های اخیر پتانسیل استفاده از میکروجلبک‌ها در تصفیه فاضلاب در سراسر جهان افزایش یافته است. در این تحقیق به منظور ارتقاء کیفیت پساب خروجی تصفیه خانه فاضلاب شهری غرب اهواز از بیوفیلترهای میکروجلبکی کلرلا و کیتوسروس استفاده شده است. همان‌طور که نتایج نشان داد عملکرد این بیوفیلترهای میکروجلبکی در روند تصفیه پساب مطلوب بوده است. علل حذف پارامترهای مختلف با راندمان بالا را می‌توان به شرح ذیل بیان نمود:

از آنجا که نیتروژن و فسفر موجود در فاضلاب شهری از عناصر ضروری و لازم جهت رشد میکروجلبک‌ها محسوب می‌شود، لذا میکروجلبک‌ها علاوه بر مصرف کربن برای رشد خود نیتروژن و فسفات موجود در پساب را نیز مصرف می‌نمایند به همین دلیل با مصرف مواد آلی در حضور اکسیژن محلول و نور، موجب کاهش BOD_5 شده و روند کاهش میزان BOD_5 در این تحقیق در طول زمان‌های ماند بیانگر این مسئله می‌باشد. همان‌طور که در نمودار شکل ۱۰ نشان داده شده است، COD طی زمان ماند ۱۶۸ ساعته، روند کاهشی داشته و روند کاهش پارامترهای مورد نظر مطلوب بوده است. در طول زمان‌های ماند، بیوفیلتر حاوی میکروجلبک کلرلا و کیتوسروس ۸۳٪ و ۸۱٪ راندمان حذف داشته است. شایان ذکر است در سال ۲۰۱۳ نیز آیهودا با استفاده از جلبک کلرلا توانست COD را تا ۸۰/۶۴٪ حذف نماید (Kshirsagar, 2013). در تحقیقی که تارلان و همکارانش در سال ۲۰۰۲، بر روی تصفیه پساب صنعتی صنایع چوب و نیشکر و کاغذ را با استفاده از جلبک کلرلا و گونه‌های دیاتومه‌ای انجام دادند، توانستند COD را تا ۵۸٪ کاهش دهند (Tarlan et al., 2002). همچنین سالگوریو و همکاران در سال ۲۰۱۶ توانستند میزان COD را به اندازه ۷۱٪ کاهش دهند. بهترین عملکرد میکروجلبک کلرلا در حذف COD در زمان ماند ۷۲ ساعت با میزان $16/33 \text{ mg/l}$ بوده و سپس در زمان‌های ماند بعدی (۱۰۰ و ۱۶۸ ساعته) تا حدودی افزایش داشته و در نهایت به 20 mg/l رسیده است. این امر در بیوفیلتر کیتوسروس در زمان ماند ۱۰۰ ساعت رخ داده و غلظت متوسط COD را از ۹۸ به 20 mg/l رسانده است (Salgueiro et al., 2016). علت این امر این است که میکروجلبک‌ها به عنوان میکروارگانیسم‌های هوازی موجود در پساب، توانایی استفاده از کربن آلی و همچنین نیتروژن (N) و فسفر (P) در فاضلاب را داشته و با تجزیه مواد آلی و تصفیه بیولوژیکی، میزان COD کاهش می‌یابد. همچنین بیوفیلتر به‌عنوان بستری برای میکروجلبک‌ها می‌باشد که با ایجاد شرایط مناسب از نظر زمان ماند و تماس میکروجلبک با پساب، شرایط را برای بهبود عملکرد میکروجلبک‌ها فراهم نماید.

عملکرد مطلوب میکروجلبک در کاهش BOD_5 و COD به دلیل حذف ترکیبات آلی و مشتقات آن‌ها در پساب است. با توجه به رشد میکروجلبک، آلاینده‌های موجود در پساب توسط میکروجلبک‌ها هضم یا ترکیب و جذب می‌شود و در نتیجه میزان حذف آلاینده‌های موجود در پساب مورد نظر به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد (Sadeghin et al., 2013). براساس نمودارهای شماره ۱۳ و ۱۴ در فیلترهای مورد بررسی، میکروجلبک کیتوسروس موجب کاهش نیترات و نیتريت به ترتیب ۶۲٪، ۵۳٪، و میکروجلبک کلرلا ۶۸٪، ۷۰٪ شده است. آیهودا و همکاران در سال ۲۰۱۳، توانستند با استفاده از جلبک کلرلا میزان COD و نیترات را به ترتیب ۸۰/۶۴٪، ۷۸/۰۸٪ و ۶۲/۷۳٪ کاهش دهند (Kshirsagar, 2013). بهترین راندمان حذف برای نیتريت در زمان ماند ۱۶۸ ساعته برای بیوفیلتر میکروجلبک‌های کلرلا و کیتوسروس به ترتیب به میزان ۱/۱۶ mg/l و ۳/۲۵ mg/l بوده است. علت این کاهش‌ها قدرت بالای میکروجلبک‌ها در حذف مواد آلی و معدنی با مصرف نیترات و فسفات و تزریق اکسیژن به آب می‌باشد. حذف مواد مغذی توسط سلول‌های میکروجلبکی مطابق با تراکم سلولی و فعالیت متابولیکی آنها بوده و جذب نیتروژن توسط میکروجلبک‌ها طی فعالیت‌های متابولیکی (که از فرآیندهای اصلی است) صورت گرفته است. فرآیند سیستم تصفیه پساب با میکروجلبک بدین صورت است که پساب غنی از نیتروژن و فسفر به همراه نور، تامین کننده شرایط مناسب برای رشد و تکثیر میکروجلبک‌ها می‌باشد که نتیجتاً منجر به تولید زیست توده مفید جلبکی و کاهش نیتروژن و فسفر پساب می‌شود. شایان ذکر است در بررسی تفاوت میانگین‌های نیترات و نیتريت با زمان‌های ماند مورد بررسی که در جدول شماره ۵ آمده آنالیز واریانس معنی‌دار است ($P < 0/05$). میکروجلبک‌ها با تولید اکسیژن، به باکتری‌های هوازی اجازه می‌دهند آلاینده‌های آلی موجود در فاضلاب را تجزیه نموده و نیتروژن و فسفر اضافی را در این فرآیند جذب نمایند.

عملکرد مناسب میکروجلبک‌ها در حذف TSS و کدورت به دلیل مصرف مواد محلول و معلق موجود در پساب و تشکیل کلوئیدهای قابل ته نشینی می‌باشد. علیرغم روند کاهشی تا زمان ماند ۴۸ و ۷۲ ساعته در زمان ماند ۱۶۸ ساعته افزایش جزئی در کدورت و TSS مشاهده گردید که علت آن مرگ و میر میکروجلبک‌ها بوده که لاشه‌های جلبک‌ها موجب افزایش TSS و کدورت شده است. انجام آزمایش کلروفیل A نیز مبین همین مسئله می‌باشد. از آنجا که میکروجلبک‌ها دارای فازهای مختلف رشد می‌باشند، می‌توان این‌گونه بیان نمود که در زمان‌هایی که رشد بیشتری داشته باشند کدورت روند کاهشی بیشتری داشته و پس از قرار گرفتن در فاز سکون و فاز کاهش شیب رشد، با توجه به میزان رشد، شروع به کاهش و از بین رفتن نموده که به همان نسبت کدورت و TSS نیز افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر می‌توان بیان نمود که میکروجلبک‌ها ترکیبات را ممکن است جذب، ترکیب و یا رسوب نمایند و پس از پایان دوره رشد خود، متلاشی شده و ترکیبات موجود در خود را آزاد کنند (پاتریک، ۱۹۹۶).

براساس بررسی‌های سازمان بهداشت جهانی (WHO) مشخص شده است که تعداد زیادی از مردم به طرق مختلف در معرض مخاطرات بهداشتی ناشی از فلزات سنگین قرار دارند. از آنجا که یکی از مهمترین مشکلات دنیای امروز مربوط به فاضلاب و آلودگی ناشی از فلزات سنگین در آن می‌باشد عملکرد میکروجلبک‌ها در جذب این فلزات عمدتاً، به علت وجود گروه‌های عامل مختلف روی سطح میکروجلبک‌ها و تمایل جابجایی یون‌های فلزات قلبایی خاکی موجود در آنها با یون‌های فلزات سنگین می‌باشد. همان‌گونه که جدول شماره ۳ نشان می‌دهد، اختلاف معنی‌داری بین گونه‌های میکروجلبک کلرلا و کیتوسروس با زمان ماند بر تصفیه پساب ورودی به بیوفیلترها در حذف فلزات سنگین وجود دارد ($P < 0/05$). همان‌طور که در نمودارهای شکل‌های ۱۵ الی ۱۸ نشان داده شده است، در طول مدت زمان ماند ۱۶۸ ساعته فعالیت میکروجلبک‌های کیتوسروس و کلرلا در حذف فلزات سنگین مثبت بوده و میزان فلزات سنگین آهن، جیوه، سرب و کادمیوم روند کاهشی داشته است. همچنین بهترین راندمان حذف مربوط میکروجلبک کلرلا در حذف کادمیوم و جیوه در زمان ماند ۴۸ ساعته بوده و تا زمان ماند ۱۶۸ ساعته همین روند ادامه داشته است. در خصوص سرب و آهن بهترین عملکرد در زمان ماند ۱۶۸ ساعته بوده است. میکروجلبک‌های کلرلا و کیتوسروس قابلیت حذف آهن، جیوه، کادمیوم و سرب را به ترتیب با (۹۵، ۹۶، ۹۸، ۹۲ درصد) و (۸۳، ۸۶، ۹۲، ۹۱ درصد) داشته‌اند. علت این کاهش برداشت یون‌هایی نظیر سرب، آهن، جیوه و کادمیوم با اثر متقابل این یون‌های فلزی و گروه کربوکسیلی حاضر روی دیواره سلول که اتصال فلز به توده زیستی را تثبیت می‌کند، می‌باشد. در بیوفیلترهای مورد بررسی با میکروجلبک‌های کلرلا و کیتوسروس روند کاهش فلزات سنگین مورد بررسی، روندی مثبت و رضایت بخش بوده است ولی بیوفیلتر با میکروجلبک کلرلا نتایج بهتری را داده است.

منابع:

- امین زاده گوهرریزی، ب. کرباسی، ع.ر، قائمی، ا.، ۱۴۰۱. بررسی عملکرد میکروجلبک در بخش‌های مختلف تصفیه خانه فاضلاب با به‌کارگیری آنالیز آماری. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، سال پنجاه و دوم شماره ۳. پیاپی ۱۰۸، صفحات ۲۰۱-۱۹۵.
- Abolhasani, M. H., Hosseini, S. A., Ghorbani, R., & Venise, A., 2016.** Removal of phosphate and nitrate from municipal wastewater by cultivation of *Scenedesmus obliquus* algae and production of algal biomass. *Journal of Aquatic Ecology*, 5(4), 33-39. <https://www.virascience.com/article/127995>
- Ahmad, I., Abdullah, N., Koji, I., Yuzir, A., & Mohamad, S. E., 2021.** Potential of Microalgae in Bioremediation of Wastewater. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 413-429. <https://doi.org/10.9767/bcrec.16.2.10616.413-429>
- Ahmedpour, N., Sayadi, M. H., & Rezaei, M. R., 2013.** Investigating the Effect of Algae in the Removal of Heavy Metals from Polluted Waters 7th National Conference and Specialized Exhibition of Environmental Engineering, <https://civilica.com/doc/318634>. In Persian
- Ali, T., Mahmood, S., Khan, M. Y., Aslam, A., Hussain, M. B., Asghar, H. N., & Akhtar, M. J., 2013.** Phytoremediation of cadmium contaminated soil by auxin assisted bacterial inoculation. *Asian J Agric Biol*, 1(2), 79-84. <https://www.asianjab.com/wp-content/uploads/2013/06/MS-No.-16-PHYTOREMEDIATION-OF-CADMIUM-CONTAMINATED-SOIL-BY-AUXIN-ASSISTED-BACTERIAL-INOCULATION.pdf>
- APHA., 1995.** Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA, AWWA, WEF. <https://secure.apha.org/imis/ItemDetail?iProductCode=978-087553-2998&CATEGORY=BK>
- Aydın, G., Büyükkışık, B., & Kocataş, A., 2014.** Effect of phosphate and silicate on the growth of harmful marine diatom: *Thalassiosira allenii* Takano (Bacillariophyceae). *Journal of Tekirdag Agricultural Faculty*, 11(1), 44-52.
- Colmenarejo, M. F., Rubio, A., Sánchez, E., Vicente, J., García, M. G., & Borja, R., 2006.** Evaluation of municipal wastewater treatment plants with different technologies at Las Rozas, Madrid (Spain). *Journal of Environmental Management*, 81(4), 399-404. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.11.007>
- Das, A., Adhikari, S., & Kundu, P., 2019.** Bioremediation of Wastewater Using Microalgae. In R. Kundu, R. Narula, R. Paul, & S. Mukherjee (Eds.), *Environmental Biotechnology For Soil and Wastewater Implications on Ecosystems* (pp. 55-60). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6846-2_8
- Etim, E., 2012.** Phytoremediation and its mechanisms: a review. *Int J Environ Bioenergy*, 2(3), 120-136. <https://modernscientificpress.com/Journals/IJEE.aspx>
- Falkowski, P. G., Barber, R. T., & Smetacek, V., 1998.** Biogeochemical Controls and Feedbacks on Ocean Primary Production. *Science*, 281(5374), 200-206. <https://doi.org/10.1126/science.281.5374.200>
- Figuroa-Torres, G. M., Pittman, J. K., & Theodoropoulos, C., 2021.** Optimisation of microalgal cultivation via nutrient-enhanced strategies: the biorefinery paradigm. *Biotechnology for Biofuels*, 14(1), 64. <https://doi.org/10.1186/s13068-021-01912-2>
- Kshirsagar, A. D., 2013.** Bioremediation of wastewater by using microalgae: an experimental study. *International Journal of Life Science Biotechnology and Pharma Research*, 2(3), 339-346. <http://psasir.upm.edu.my/id/eprint/68633/1/FS%202018%202%20-%20IR.pdf>
- Li, J., Liu, K., Li, W., Zhang, M., Li, P., & Han, J., 2022.** Removal mechanisms of erythromycin by microalgae *Chlorella pyrenoidosa* and toxicity assessment during the treatment process. *Science of The Total Environment*, 848, 157777. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157777>
- Molazadeh, P., Khanjani, N., Rahimi, M., & Nasiri, A., 2015.** Adsorption of Lead by Microalgae *Chaetoceros* Sp. and *Chlorella* Sp. from Aqueous Solution. *Journal of Community Health Research*, 4, 114-127. https://www.researchgate.net/publication/309154946_Adsorption_of_Lead_by_Microalgae_Chaetoceros_Sp_and_Chlorella_Sp_from_Aqueous_Solution
- Neralla, S., Weaver, R. W., Lesikar, B. J., & Persyn, R. A., 2000.** Improvement of domestic wastewater quality by subsurface flow constructed wetlands. *Bioresource Technology*, 75(1), 19-25. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00039-0](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00039-0)
- Rawat, I., Gupta, S. K., Shrivastav, A., Singh, P., Kumari, S., & Bux, F., 2016.** Microalgae Applications in Wastewater Treatment. In F. Bux & Y. Chisti (Eds.), *Algae Biotechnology: Products and Processes* (pp. 249-268). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12334-9_13
- Sadeghin, B., Sarafzadeh, M., & Himok, O., 2013.** Comparison between autotrophic and heterotrophic cultivation of microalgae in biofuel production 4th Iran International Conference on Bioenergy, Tehran.
- Salgueiro, J., Perez, L., Maceiras, R., Sanchez, A., & Cancela, A., 2016.** Bioremediation of wastewater using *Chlorella vulgaris* microalgae: Phosphorus and organic matter. *International journal of environmental research*, 10(3), 465-470. https://ijer.ut.ac.ir/article_58766_b4511a39c5f2a80390476e3cd88e8c09.pdf

- Shams, A., Nematzadeh, G., & Kliyai, A. M., 2014.** Using microalgae to treat industrial and agricultural wastewater and using them as a renewable energy source The first national conference on sustainable management of soil resources and environment, <https://civilica.com/doc/325005/>.
- Sisman-Aydin, G., & Oral, R., 2014.** Investigation of the hormesis/toxicity potential of Manisa (Turkey) urban wastewater treatment plant by using *Selenastrum capricornutum* Printz. *Fresenius Environmental Bulletin*, 23, 1183-1189. https://www.researchgate.net/publication/262416415_Investigation_of_the_hormesistoxicity_potential_of_Manisa_Turkey_urban_wastewater_treatment_plant_by_using_Selenastrum_capricornutum_Printz
- Tarlan, E., Yetis, U., & Dilek, F.B., 2002.** Algal treatment of pulp and paper industry wastewaters in SBR systems. *Water Sci Technol*, 45(12), 151-158. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12201097/>
- Unesco, W., 2019.** World Water Development Report 2019: Leaving No One behind. T. U. Nations. <https://www.unesco.org/en/wwap/wwdr/2019>
- Vieira, M. V., Pastrana, L. M., & Fuciños, P., 2020.** Microalgae Encapsulation Systems for Food, Pharmaceutical and Cosmetics Applications. *Marine Drugs*, 18(12), 644. <https://doi.org/10.3390/md18120644>
- Wang, J.-H., Zhang, T.-Y., Dao, G.-H., Xu, X.-Q., Wang, X.-X., & Hu, H. Y., 2017.** Microalgae-based advanced municipal wastewater treatment for reuse in water bodies. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 101(7), 2659-2675. <https://doi.org/10.1007/s00253-017-8184-x>
- Yadav, D. K., Singh, A., Agrawal, V., & Yadav, N., 2021.** Algal Biomass. In *Bioprospecting of Plant Biodiversity for Industrial Molecules* (pp. 303-334). <https://doi.org/10.1002/9781119718017.ch15>

Comparing the phytoremediation performances of *Chlorella* and *Chaetoceros sp.* microalgae biofilters in the complementary treatment of Ahvaz urban wastewater

Gholami Rahil¹,
Hassani Amir Hessam^{2*}
Savari Ahmad³,
Monavari Seyed Masoud⁴

1. PHD Student of Environmental science, Faculty of Natural Resource and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2. Full professor, Faculty of Natural Resource and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
(corresponding author)

4. Full professor, Department of Marine Biology, Faculty of Marine Sciences, Khoramshahr Marine Science and Technology University, Khoramshahr, Iran

5. Associate professor Faculty of Natural Resource and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

*Corresponding author:
ahhassani@srbiau.ac.ir

Received date: October/28/2023
Reception date: September/13/2024

Abstract

With the increase in population, pollution, and water crisis, managing water resources becomes a high priority. This study was conducted to manage water resources and to investigate the performance of two microalgae biofilters, i.e. *Chaetoceros sp.* and *Chlorella*, in the complementary treatment of municipal wastewater in the West Ahvaz Wastewater Treatment Plant. The phytoremediation of microalgae species was compared in biofilters at 0, 24, 72, 48, 100, and 168-hour retention time. Analysis of the results was done using SPSS software using one-way ANOVA and LSD post hoc tests. The results of variance analysis of microalgae species in biofilters have shown significant results of the effects of microalgae species and retention time on the treatment of wastewater entering biofilters. Multivariate covariance analysis (MANCOVA) was used on the mean results of the effects of *Chlorella* and *Chaetoceros sp.* microalgae, and one-sample t-test was used to compare the means of indicators with the standard values. The results of multivariate covariance analysis to investigate the difference between the mean effects of *Chlorella* and *Chaetoceros sp.* microalgae in time periods and groups of microalgae showed that the differences between the means of all indicators measured in time periods were significant ($p < 0.05$) and the performance of microalgae biofilters in removing and reducing the parameters of COD, BOD, TSS, turbidity, iron, lead, mercury, nitrite, nitrate, total and faecal coliforms for *Chlorella* and *Chaetoceros sp.* microalgae were (83%, 81%), (81%, 79%), (77%, 65%), (73%, 82%), (83%, 98%), (91%, 92%), (86%, 96%), (53%, 70%), (62%, 68%), (91%, 95%) and (89%, 96%), respectively. Moreover, the results showed that the final concentration of the studied parameters in the output of the biofilters was in accordance with the standard of the Environmental Protection Organization. Since the performance of the biofilters was favorable and close to each other, both types of microalgae biofilters were introduced as efficient biofilters and microalgae in the complementary treatment of urban wastewater, while the *Chlorella* biofilter removed physicochemical pollution and heavy metals and the *Chaetoceros sp.* biofilter removed microbial load more efficiently.

Keywords: phytoremediation, biofilter, *chlorella* microalgae, *Chaetoceros sp.* microalgae, wastewater treatment.