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

راحیل غلامی[۱]
امیرحسام حسنی[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 دانشجو می باشد.

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، ۱۰۰و ۱۶۸ ساعته در بیوفیلترها انجام شد. تجزیه و تحلیل نتایج با استفاده از نرم افزار spss و آزمون آنوای یک طرفه و آزمون تعقیبیLSD 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 کوواریانس 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، BOD_5، TSS، کدورت، آهن، سرب، جیوه، نیتریت، نیترات، توتال و فکال کلیفرم‌ها برای میکروجلبک‌های *کلرلا* و *کیتوسروس* به ترتیب به میزان (۸۳٪، ۸۱٪)، (۸۱٪، ۷۹٪)، (۶۵٪، ۷۷٪)، (۸۲٪، ۷۳٪)، (۹۸٪، ۸۳٪)، (۹۲٪، ۹۱٪)، (۹۶٪، ۸۶٪)، (۷۰٪، ۵۳٪)، (۶۸٪، ۶۲٪)، (۹۱٪،۹۵٪) و (۹۶٪، ۸۹٪) 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 بطوری‌که بیوفیلتر *کلرلا* در حذف بار آلودگی فیزیکوشیمیایی و فلزات سنگین و بیوفیلتر *کیتوسروس* در حذف بارمیکروبی 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

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-06-16]

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 آبزی 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 فوق العاده 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.

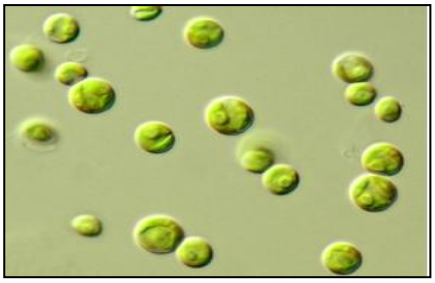
در سال‌های اخیر استفاده از سیستم‌های بیولوژیکی پیشرفته مبتنی بر جلبک‌ها و گیاهان دریایی به منظور حذف مواد آلاینده از اکوسیستم (پالایش زیستی) به دلیل هزینه و خسارت کمتر به اکوسیستم رو به افزایش است (Shams *et al*., 2014). این روش یک روش نوید بخش در حذف آلاینده‌ها از محیطزیست است که نسبت به سایر روش‌های متداول فیزیکوشیمیایی تصفیه، ارجحیت دارد (Ali *et al*., 2013).

میکروجلبک‌های مورد استفاده در سیستم گیاه‌پالایی، ارگانیسم‌های 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 اکوتوکسیکولوژیک و آبزی‌پروری استفاده می‌شوند (Li *et al*., 2022; Sisman-Aydin & Oral, 2014; Vieira *et al*., 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 راه حل‌های 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.

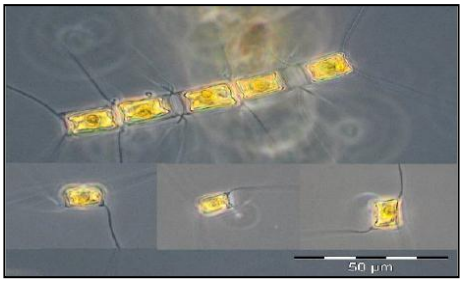
گونه‌های زیادی مطرح شده ولی تجارب نشان می‌دهد که سه گونه کلرولا (*Chlorella(sp.)*)، اسکلتونما (*Skeletonema(sp.)*) و کیتوسروس (*Chaetoceros(sp.)*) به طرز بارزی قدرت پالایش مواد آلاینده آلی را دارند (Figueroa-Torres *et al*., 2021 and Gonzalo *et al*., 2021). میکروجلبک *کلرلا* نوعی جلبک سبز تک سلولی و 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 کلروفیلb و a شامل پیگمان‌های فتوسنتزی می‌باشد.

میکروجلبک *کیتوسروس* از جنس دیاتوم‌ها و از رده باسیلارفیسا *(Bacillariophycae)* است. این میکروجلبک با ۳۸ درصد پروتئین، عمدتاً دریایی ولی در آب شیرین هم یافت می‌شود. کیتوسروس دارای کلروفیل‌های a و c، بتاکاروتن، رنگدانه های 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 ۱و۲ نمایی میکروسکوپی از میکروجلبک‌های کلرلا و کیتوسروس ارایه شده است.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-06-16]



شکل ۱: نمایی میکروسکوپی از میکروجلبک *کلرلا*



شکل ۲: نمایی میکروسکوپی از میکروجلبک *کیتوسروس*

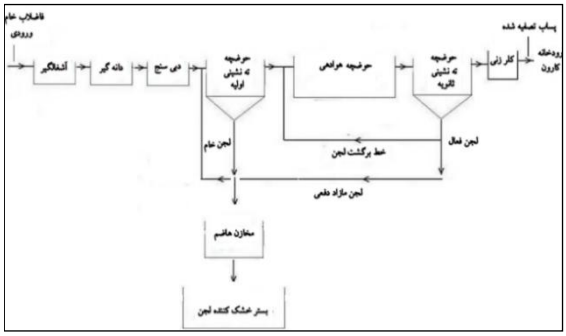
امین زاده گوهری و همکاران در سال ۱۴۰۱ به بررسی عملکرد میکروجلبک در بخش‌های مختلف تصفیه‌خانه فاضلاب با به کارگیری آنالیز آماری پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که استفاده از میکروجلبک‌ها برای تصفیه انواع فاضلاب شهری، کشاورزی و صنعتی روشی بسیار مناسب می‌باشد. همچنین بیان نمودند که میزان حذف پارامترهایی چون نیتروژن کل، نیتروژن آمونیاکی، فسفر کل و اورتوفسفات از پساب شهری به ترتیب ۸۷/۵٪، ۹۹/۴٪، ۸۱/۲۵ و ۸۶/۹۵٪ بوده است (امین‌زاده گوهری و همکاران،۱۴۰۱). ایمران و همکاران در سال ۲۰۲۱ به بررسی پتانسیل میکروجلبک‌ها در تصفیه زیستی پساب پرداختند. ایشان کاربردهای نهایی زیست توده میکروجلبکی را خلاصه نموده که جنبه زیست‌پالایی را از نظر محیط‌زیستی پایدارتر می‌کند. (Ahmad *et al*., 2021). ادهیکاری و همکاران در سال 2019 به بررسی امکان‌سنجی تصفیه فاضلاب در کشت‌های دسته‌ای با استفاده از سویه‌های انتخاب شده از میکروجلبک 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. راوارت 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 (P, N, C)، 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 میکروجلبک *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. ابوالحسنی 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 میکروجلبک در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب استفاده نمود. احمدپور و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی اثرجلبک‌ها در حذف نیترات و فسفات کار کرده‌اند (Ahmedpour *et al*., 2013). در این تحقیق اسپرولینا به عنوان کارآمدترین و بهترین گونه میکروجلبک برای کاهش نیترات در فاضلاب شهری از میان سه گونه *کلرلا*، *اسپیرولینا* و *سندسموس* انتخاب شد درحالی‌که *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 میکروجلبک *کلرلا* و *کیتوسروس* برای حذف آمونیاک، نیتریت، نیترات، فلزات سنگین، TSS، COD، BOD، کدورت، توتال و فکال کلیفرم‌ها در زمان‌های ماند صفر، ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۱۰۰ و 168 ساعته پرداخته است.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-06-16]

مواد و روش‌ها

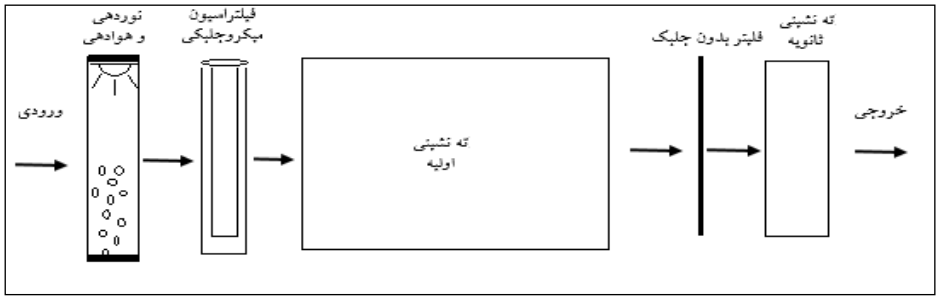
تحقیق حاضر در تصفیه خانه فاضلاب شهری غرب اهواز و در بخش تصفیه تکمیلی انجام گردید. تصفیه خانه فاضلاب شهری غرب اهواز با دبی متوسط ۱۷۰۰ متر مکعب در ساعت، در غرب شهر اهواز واقع شده است. این تصفیه خانه جمعیت حدود ۱۹۴۰۰۰ نفر را تحت پوشش قرار داده است. بمنظور مدیریت منابع آب، پساب این تصفیه خانه به رودخانه 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 فلودیاگرام شکل شماره ۴ ارایه شده است.

شکل ۳: محل برداشت پساب جهت بیوفیلترها



شکل ۴: فلودیاگرام تصفیه خانه فاضلاب غرب اهواز

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 فلودیاگرام بیوفیلتر و در شکل شماره ۶ نمایی از بیوفیلتر طراحی شده نشان داده شده است.



شکل ۵: فلودیاگرام بیوفیلتر

شکل ۶: نمایی از بیوفیلتر طراحی شده

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-06-16]

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، نوردهی 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 $۱۰^{۶}$ 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 $۱۰^{۶} \times ۳۲$ سلول در سی سی 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 و ۱۶۸ساعته 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 کلرزنی، برداشت و به بیوفیلترها منتقل شد (شکل شماره۳). 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 نمونه ای از خروجی بیوفیلتر نشان داده شده است.

شکل ۸: نمایی از بیوفیلتر و نمونه‌ای از خروجی آن

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-06-16]

نمونه‌برداری‌ها در زمان‌های ماند یاد شده پس از تلقیح در کلیه فیلترها برای انجام آزمایش‌های پارامترهایی از قبیل COD، BOD_5، TSS، کدورت، آهن، سرب، جیوه، کادمیموم، 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 انجام 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	۱ست کجلدال
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	-	$MgSo_4.7H_2O$-$Ca(NO_3)_2.4H_2O$-$NaNo_3$-$Na_2Hpo_4.12H_2O$-$NaHCO_3$ $MnCl_2.4H_2O$- $(NH_4)MO_7O_{24}.4H_2O$-KH_2PO_4-H_3BO_3-FeNa-EDTA Cobalamin(Vitamin B_{12})-Tiamina HCL(VitaminB_1)-Biotin(Vitamin H)
محیط کشت کانوی	-	$NaNo_3$- EDTA-$NaH_2Po_4.H_2O$- VITMIN(B_{12}& B_1)- $Na_2sio_{3.5}H_2O$- H_3BO_3- $Mncl_4.H_2O$-H_3BO - $ZNCL_2$-$COCL_{2.}6H_2o$

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 پساب 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 می توان گفت اثرات میکروجلبک‌های *کلرلا* و *کیتوسروس*

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-06-16]

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 اثرپیلایی	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	۹۷۴۹۴۰/۸۵۴	۱۰۲	۳۸	۶۰۵۳۵/۰۸	۰/۰۰۰	۱	۱
	آزمون بزرگ‌ترین ریشه روی	۹۷۱۶۵۸۱/۰۸۹	۱۷	۱۳	۷۴۳۰۳/۷۰۲۶	۰/۰۰۰	۱	۱
زمان×گروه	آزمون اثرپیلایی	۴/۹۷۲	۸۵	۶۰	۱۲۶/۱۵	۰/۰۰۰	۰/۹۹۴	۱
	آزمون لامبدای ویلکز	۰/۰۰۰	۸۵	۴۳	۹۹۳/۶۶	۰/۰۰۰	۰/۹۹۹	۱
	آزمون اثرهتلینگ	۳۲۸۴۴/۸۸۹	۸۵	۳۲	۲۴۷۳/۰۳	۰/۰۰۰	۱	۱
	آزمون بزرگ‌ترین ریشه روی	۲۳۲۱۸/۲۰۸	۱۷	۱۲	۱۶۳۸۹/۳۲	۰/۰۰۰	۱	۱

مطابق جدول شماره ۳، نتایج تحلیل کوواریانس 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 داریP	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
کلیفرم	گروه	۲۱۲۹۸۲۲۵۰۰۰۰۰۰	۱	۲۱۲۹۸۲۲۵۰۰۰۰۰۰	۵۸/۷۱۷	۰/۰۰۰	۰/۶۶۹	۱
فکال	زمان	۱۲۵۵۴۶۰۰۰۰۰۰۰	۵	۲۵۱۰۹۲۰۰۰۰۰۰۰	۸/۰۱۴	۰/۰۰۰	۰/۵۸۰	۰/۹۹۸
کیفرم	گروه	۱۵۸۴۰۴۰۰۰۰۰۰۰۰	۱	۱۵۸۴۰۴۰۰۰۰۰۰۰۰	۵۰/۵۵۷	۰/۰۰۰	۰/۶۳۵	۱

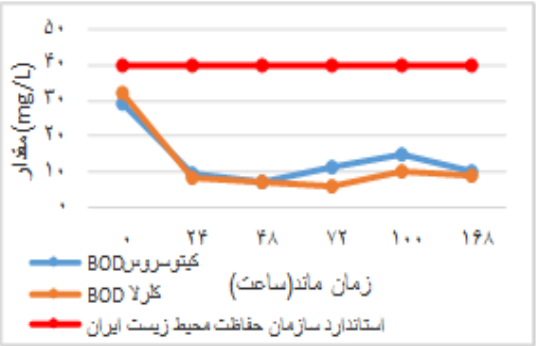
[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-06-16]

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 درکلیه پارامترهای مورد بررسی، خروجی بیوفیلتر از استاندارد سازمان حفاظت محیطزیست برای تخلیه پساب به آبهای سطحی کمتر بوده است.

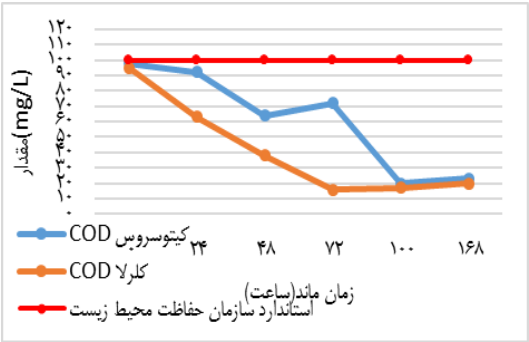
جدول ۴: مقایسه میانگین شاخص‌های اندازه‌گیری شده تحت میکروجلبک‌های *کیتوسروس* و *کلرلا* با مقدار استاندارد

متغیر	میکرو جلبک	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
BOD5	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
نیتریت	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، BOD_5 در هر دو فیلتر طی ۱۶۸ ساعته روند کاهشی داشته و روند کاهش پارامترهای مور 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 BOD_5 توسط بیوفیلتر حاوی میکروجلبک *کلرلا* در زمان ماند ۷۲ ساعت بوده است که غلظت BOD_5 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 مور نظر مطلوب بوده است. در طول زمان‌های ماند، بیوفیلتر حاوی میکروجلبک *کلرلا* و *کیتوسروس* به ترتیب ۸۳٪ و ۸۱٪ راندمان حذف داشته است.



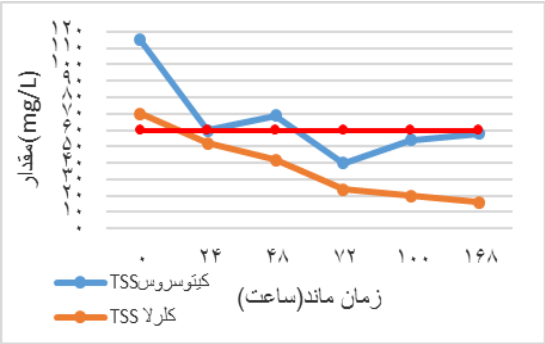
شکل ۹: مقایسه میانگین BOD_5 با استاندارد



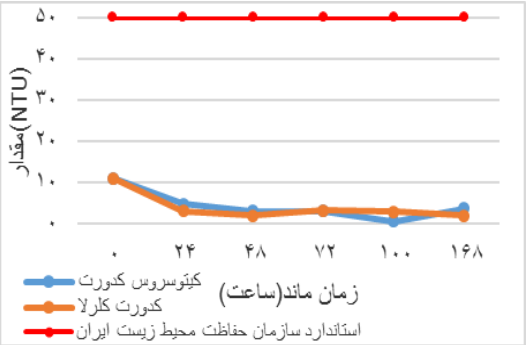
شکل ۱۰: مقایسه میانگین COD با استاندارد

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-06-16]

همچنین این نمودارها (۹و۱۰) نشان می‌دهند که میزان خروجی بیوفیلترها از استاندارد سازمان حفاظت محیطزیست ایران که برای COD، ۱۰۰ میلی گرم در لیتر و برای BOD_5 ۴۰ میلی گرم در لیتر بوده است، کمتر شده است.

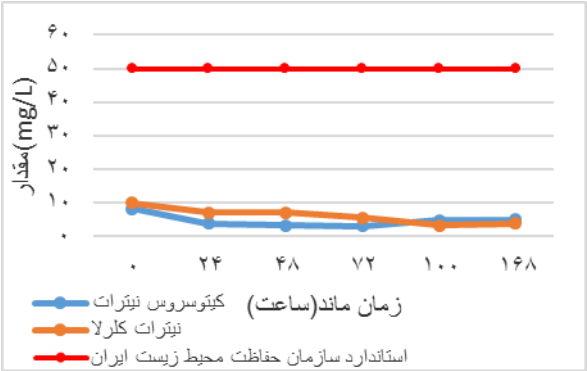


شکل ۱۱: مقایسه میانگین TSS با مقدار استاندارد

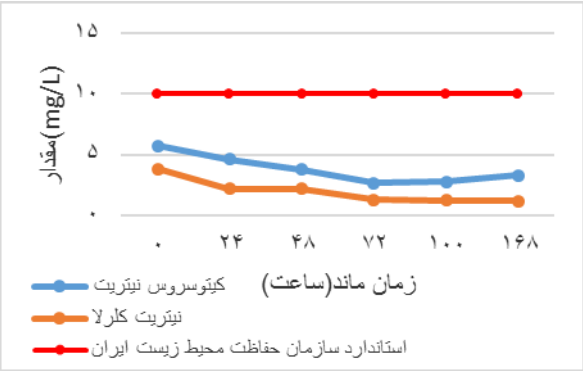


شکل ۱۲: مقایسه میانگین کدورت با مقدار استاندارد

همان‌طور که در جدول شماره۴ 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 ntu ۱۱به ntu ۱/۹۸رسیده 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 ntu ۳ بوده و در زمان ماند ۱۶۸ ساعت بهntu ۳/۷ رسیده است.



شکل ۱۳: مقایسه میانگین نیترات با مقدار استاندارد

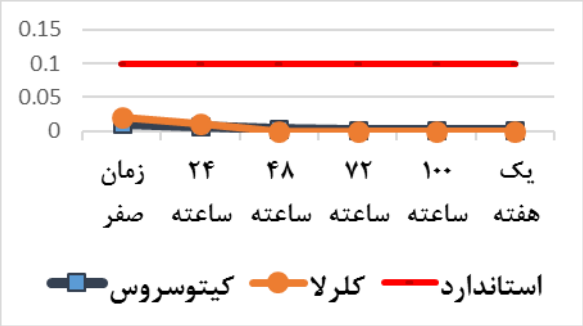


شکل ۱۴: مقایسه میانگین نیتریت با مقدار استاندارد

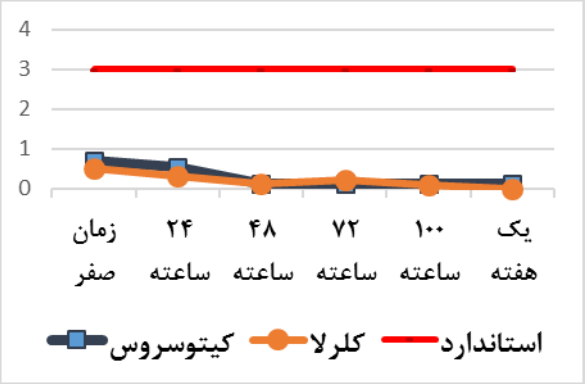
براساس نمودار های شماره ۱۳ و ۱۴ در بیوفیلترهای مورد بررسی، میکروجلبک کیتوسروس موجب کاهش نیترات، نیتریت به ترتیب ٪۶۲، ٪۵۳ و برای کلرلا به میزان ٪۶۸ ، ٪۷۰ شده است. همچنین بهترین راندمان حذف برای نیتریت و نیترات در ۱۰۰ ساعت و ۱۶۸ ساعت برای بیوفیلتر میکروجلبک‌های کلرلا و کیتوسروس، به ترتیب به میزان mg/l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

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-06-16]

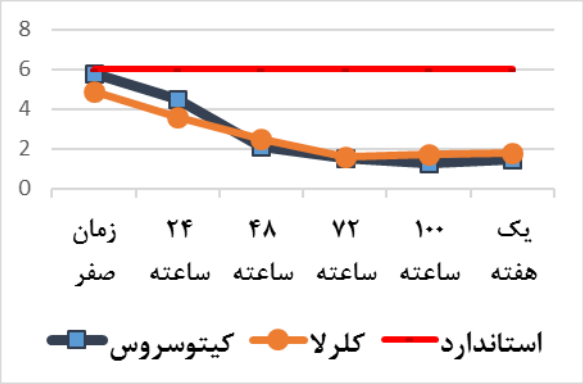
شکل ۱۵: مقایسه میانگین سرب با مقدار استاندارد



شکل ۱۶: مقایسه میانگین کادمیوم با مقدار استاندارد



شکل ۱۷: مقایسه میانگین جیوه با مقدار استاندارد

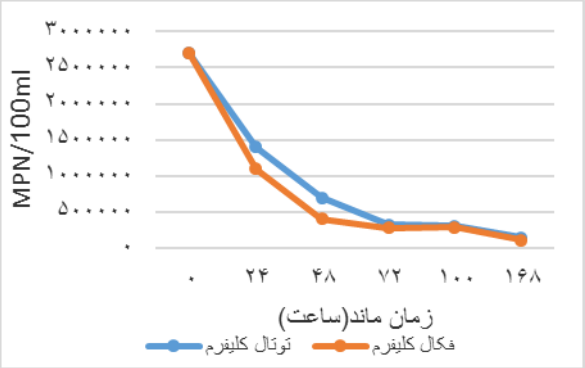


شکل ۱۸: مقایسه میانگین آهن با مقدار استاندارد

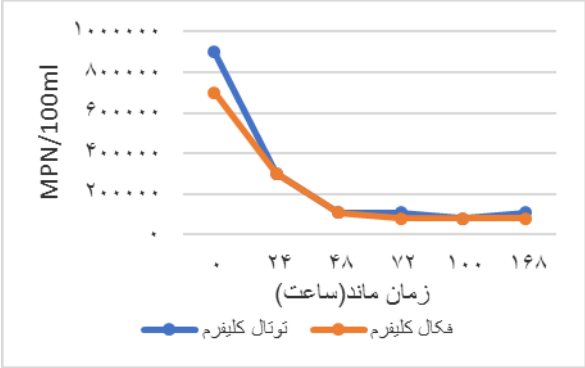
همان‌گونه که جدول شماره ۳ نشان می‌دهد، اختلاف معنی‌داری بین گونه‌های میکروجلبک *کلرلا* و *کیتوسروس* با زمان ماند بر تصفیه پساب ورودی به بیوفیلترها در حذف فلزات سنگین وجود دارد ($P<0.05$). همان‌طور که در نمودارهای شکل های ۱۵ الی ۱۸ نشان داده شده است، در طول مدت زمان ماند ۱۶۸ ساعته، فعالیت میکروجلبک‌های *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 میکرو جلبک *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.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-06-16]



شکل ۱۹: روند کاهش توتال و فکال کلیفرم توسط میکروجلبک *کیتوسروس*



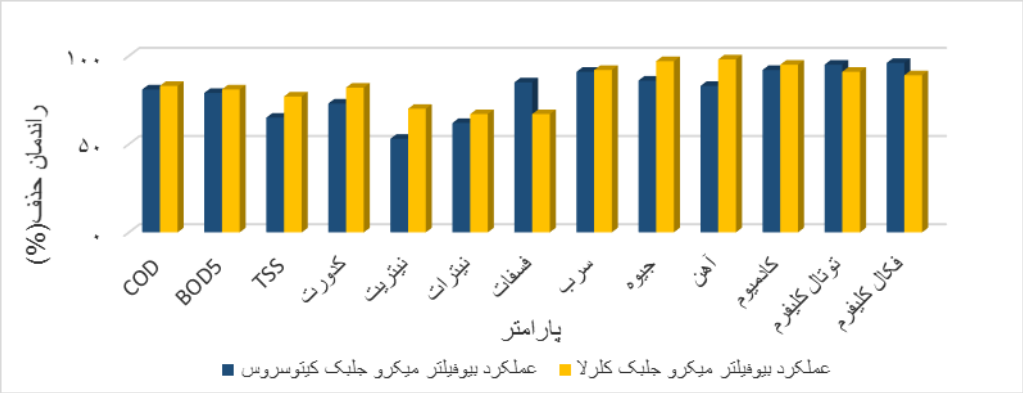
شکل ۲۰: روند کاهش توتال و فکال کلیفرم توسط میکروجلبک *کلرلا*

جدول شماره ۵: مقایسه عملکرد بیوفیلتر با میکروجلبک های *کلرلا* و *کیتوسروس* درحذف کیفرم ها

میکروجلبک	متغیر	بازه زمانی	میانگین	کمینه	بیشینه	راندمان	F	P_Value
بیوفیلتر میکروجلبک *کیتوسروس*	توتال کلیفرم	زمان صفر	۲۷۰۰۰۰۰	۲۷۰۰۰۰۰	۲۷۰۰۰۰۰	۹۵	----	---
		۲۴ ساعته	۱۴۰۰۰۰۰	۱۴۰۰۰۰۰	۱۴۰۰۰۰۰			
		۴۸ ساعته	۷۰۰۰۰۰	۷۰۰۰۰۰	۷۰۰۰۰۰			
		۷۲ ساعته	۳۲۰۰۰۰۰	۳۲۰۰۰۰۰	۳۲۰۰۰۰۰			
		۱۰۰ ساعته	۲۷۰۰۰۰۰	۲۷۰۰۰۰۰	۲۷۰۰۰۰۰			
		۱۶۸ ساعته	۱۴۰۰۰۰	۱۴۰۰۰۰	۱۴۰۰۰۰			
	فکال کلیفرم	زمان صفر	۲۷۰۰۰۰۰	۲۷۰۰۰۰۰	۲۷۰۰۰۰۰	۹۶	---	---
		۲۴ ساعته	۱۱۰۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰۰			
		۴۸ ساعته	۴۰۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰			
		۷۲ ساعته	۲۸۰۰۰۰۰	۲۸۰۰۰۰۰	۲۸۰۰۰۰۰			
		۱۰۰ ساعته	۲۲۰۰۰۰۰	۲۲۰۰۰۰۰	۲۲۰۰۰۰۰			
		۱۶۸ ساعته	۱۱۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰			
بیوفیلتر میکروجلبک *کلرلا*	توتال کلیفرم	زمان صفر	۹۰۰۰۰۰	۹۰۰۰۰۰	۹۰۰۰۰۰	۹۱	--	--
		۲۴ ساعته	۳۰۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰			
		۴۸ ساعته	۱۱۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰			
		۷۲ ساعته	۱۱۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰			
		۱۰۰ ساعته	۸۰۰۰۰	۸۰۰۰۰	۸۰۰۰۰			
		۱۶۸ ساعته	۱۱۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰			
	فکال کلیفرم	زمان صفر	۳۰۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰	۸۹	--	--
		۲۴ ساعته	۱۱۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰			
		۴۸ ساعته	۸۰۰۰۰	۸۰۰۰۰	۸۰۰۰۰			
		۷۲ ساعته	۸۰۰۰۰	۸۰۰۰۰	۸۰۰۰۰			
		۱۰۰ ساعته	۸۰۰۰۰	۸۰۰۰۰	۸۰۰۰۰			
		۱۶۸ ساعته	۹۰۰۰۰۰	۹۰۰۰۰۰	۹۰۰۰۰۰			

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

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-06-16]



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 کلیفرم) مربوط به بیوفیلتر میکروجلبکی *کیتوسروس* با ۹۵ و ۹۶ درصد حذف بوده است. همچنین پارمترهای فیزیکوشمیایی 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 می باشد. 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 ۱۶/۳۳ mg/l بوده و سپس در زمان‌های ماند بعدی(۱۰۰ و ۱۶۸ ساعته) تا حدودی افزایش داشته و در نهایت به ۲۰ mg/l رسیده است. این امر در بیوفیلتر *کیتوسروس* در زمان ماند ۱۰۰ ساعت رخ داده و غلظت متوسط COD را از ۹۸ به ۲۰ 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 می یابد. 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.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-06-16]

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 درنتیجه 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 نیتریت 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 ترتیب۸۰/۶۴٪ ، ۷۸/۰۸ ٪ و ۶۲/۷۳٪ کاهش دهند (Kshirsagar, 2013). بهترین راندمان حذف برای نیتریت در زمان ماند ۱۶۸ ساعته برای بیوفیلتر میکروجلبک های *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 کنندهٔ شرایط مناسب برای رشد و تکثیر میکروجلبک‌ها می‌باشد که نتیجتاً منجر به تولید زیست تودهٔ مفید جلبکی و کاهش نیتروژن و فسفر پساب می‌شود. شایان ذکر است در بررسی تفاوت میانگین‌های نیترات و نیتریت 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 می باشد. 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 وTSS 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 جایگزینی یون‌های فلزات قلیایی خاکی موجود در آنها با یون‌های فلزات سنگین می‌باشد. همان‌گونه که جدول شماره۳ 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 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) 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.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-06-16]

در سال ۲۰۱۵، مولازاده و همکاران توانستند با میکروجلبک‌های *کلرلا* ۷۸٪ و *کیتوسروس*۶۰٪ راندمان حذف سرب از آبهای آلوده داشته باشند. حال آنکه در تحقیق حاضر بیوفیلترهای میکروجلبک کلرلا و کیتوسروس توانسته اند سرب را با ۹۲٪ و ۹۱٪ راندمان حذف نماید (Molazadeh *et al*., 2015). علاوه بر شرایط حاکم بر مطالعات مختلف، وجود بیوفیلتر است که موجب افزایش زمان تماس میکروجلبک با فاضلاب می‌گردد. 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. در بازه زمانی ۷۲ و ۱۰۰ ساعته راندمان عملکرد کاهش یافته که با بررسی میزان کلروفیل A مشخص شد که میزان آن کلروفیل در این بازه زمانی به ۰/۳۸ رسیده است و علت آن شوکی بوده که به علت مرگ و میر برخی میکروجلبک‌ها وارد شده است. در زمان ماند ۱۶۸ ساعته باتوجه به سازگاری سیستم میکروجلبک، راندمان عملکرد بهبود یافته و بهترین عملکرد در زمان ماند ۱۶۸ ساعته مشاهده گردید. این امر بیانگر فعالیت مناسب بیوفیلتر و میکروجلبک کیتوسروس 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 کلیفرم وجود داشته است. 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 بدست آمد و بهترین عملکرد در زمان ماند ۱۶۸ ساعته بود. این امر بیانگرفعالیت 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. در تحقیقی که مولازاده و همکاران در سال ۲۰۱۵ در خصوص جذب و حذف فلزات سنگین (سرب) از محیط های آبی (Aqueous Solution) کار کرده‌اند از میکروجلبک *کلرلا* به عنوان جاذب زیستی فلز سنگین سرب استفاده نموده و توانسته‌اند با افزایش دما از ۲۰ به ۳۰ درجه سانتیگراد به ماکزیمم حذف سرب که در آن تحقیق ۷۸٪ بوده است، برسند. حال آنکه براساس این تحقیق در همین بازه دمایی میزان حذف فلز سنیگن سرب توسط بیوفیلتر میکروجلبکی کلرلا ۹۲٪ و کیتوسروس ۹۱٪ بوده است. علت این اختلاف علاوه بر شرایط آزمایش، استفاده از بیوفیلتر می‌باشد که در تحقیق حاضر به دلیل وجود فیلتر و رشد میکروجلبک‌ها بر روی سطوح داخلی فلیترها همچنین در بخش نوردهی و هوادهی، تماس مستقیم میکرو جلبک با پساب و ایجاد بستری مناسب برای تکثیر و فعالیت‌های میکروجلبک‌ها، فراهم نمودن زمان ماند کافی و شرایط مناسب جهت تماس میکروجلبک با آلاینده‌های موجود در پساب موجب افزایش راندمان عملکرد میکروجلبک شده است.

در نهایت این مطالعه به منظور مدیریت منابع آب و با هدف بررسی عملکرد دو بیوفیلتر میکروجلبک در تصفیه تکمیلی فاضلاب شهری با تاکید به حذف مواد مغذی، فلزات سنگین، بارمیکروبی و در نهایت بهبود کیفیت پساب منتقل شده به رودخانه کارون انجام گردیده است. مقایسه عملکرد بیوفیلترهای میکروجلبکی *cheatceros sp.* و *Chlorella vulgaris* زمان‌های ماند صفر ،۲۴، ۷۲،۴۸ ،۱۰۰و ۱۶۸ ساعته در بیوفیلترها مورد بررسی قرار گرفت. از آنجا که خروجی بیوفیلترها نتایجی بسیار نزدیک داشت به همین دلیل میانگین نتایج بیوفیلترها بررسی و تجزیه و تحلیل شد. نتایج تحلیل کوواریانس چند متغیری برای بررسی تفاوت میانگین اثرات میکروجلبک‌های *کلرلا* و *کیتوسروس* در بازه‌های زمانی و گروه‌های میکروجلبک‌های مورد بررسی نشان می‌دهد که اختلاف میانگین تمام شاخص‌های اندازه گیری شده در بازه‌های زمانی معنادار شده است ($p<0.05$). همچنین نتایج نشان داد که مقدار حذف COD، BOD_5، TSS،کدورت، آهن، سرب، جیوه، کادمیوم، نیتریت، نیترات، توتال و فکال کلیفرم‌ها برای میکروجلبک *کلرلا* و *کیتوسروس* به ترتیب در محدوده (۸۳٪، ۸۱٪)، (۸۱٪، ۷۹٪)، (۷۷٪، ۶۵٪)، (۸۲٪، ۷۳٪)، (۹۵٪، ۸۳٪)، (۹۲٪، ۹۱٪)، (۹۶٪، ۸۶٪)، (۹۸٪، ۹۲٪)، (۷۰٪، ۵۳٪)، (۶۸٪، ۶۲٪)، (۸۹٪، ۹۶٪) و (۹۱٪، ۹۵٪) بوده است. غلظت نهایی پارامترهای فوق الذکر در پساب بیوفیلترهای مورد بررسی با استاندارد سازمان حفاظت محیطزیست مطابقت داشته‌اند. راندمان کاهش پارامترهای مورد بررسی توسط بیوفیلترهای میکروجلبکی کیتوسروس و کلرلا نشان دهنده عملکرد مناسب این بیوفیلترها می‌باشد. همچنین از آنجا که عملکرد بیوفیلترها، مطلوب و نزدیک به هم بوده و در میکروجلبک *کلرلا* ۹۲ درصد و در *کیتوسروس* ۷۵ درصد نتایج راندمان حذف بالای۷۰٪ داشته اند، بدین ترتیب هر دو گونه بیوفیلتر میکروجلبکی به عنوان بیوفیلترها و میکروجلبک‌های کارآمد در تصفیه تکمیلی فاضلاب شهری معرفی می‌گردند به‌طوری که بیوفیلتر *کلرلا* در حذف بار آلودگی فیزیکوشیمیایی و فلزات سنگین و بیوفیلتر *کیتوسروس* در حذف بار میکروبی کارآمدتر عمل نموده‌اند.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-06-16]

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،صفحات۲۰۱-۱۹۵.

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., Büyükışık, 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

Figueroa-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

Rawat, I., Gupta, S. K., Shriwastav, 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

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-06-16]

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

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-06-16]

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

Gholami Rahil[1].,
Hassani Amir Hessam[2*]
Savari Ahmad[3],
Monavari Seyed Masoud[4]

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 ١٦٨-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.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-06-16]