

Research Paper

مقاله پژوهشی

## Investigation of Optimal Growth Conditions of *Scenedesmus Obliquus* Microalgae and its Potential to Remove Polypropylene Microplastics from an Aqueous Environment

## بررسی شرایط بهینه رشد و امکان‌سنجی حذف میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن با استفاده از ریزجلبک سندسموس آبلیکوس در محیط آبی

Reyhane Fallah<sup>1</sup>, Roya Mafigholami<sup>2\*</sup>, Omid Tavakoli<sup>3</sup> and Hamid Moghimi<sup>4</sup>

ریحانه فلاح<sup>۱</sup>، رویا مافی غلامی<sup>۲\*</sup>، امید توکلی<sup>۳</sup> و حمید مقیمی<sup>۴</sup>  
۱- دانشجوی دکترا، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران.  
۲- دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران.  
۳- استادیار دانشکده مهندسی شیمی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.  
۴- دانشیار گروه میکروبیولوژی، دانشکده زیست‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران.  
\*نویسنده مسئول: ایمیل: [r.mafigholami@wtiau.ac.ir](mailto:r.mafigholami@wtiau.ac.ir)

1- Ph.D. Candidate, Faculty of Engineering, Islamic Azad University West Tehran Branch, Tehran, Iran.  
2- Associate Professor, Faculty of Engineering, Islamic Azad University West Tehran Branch, Tehran, Iran.  
3- Assistant Professor, School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.  
4- Associate Professor, Department of Microbiology, School of Biology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran.

\*Corresponding Author: Email: [r.mafigholami@wtiau.ac.ir](mailto:r.mafigholami@wtiau.ac.ir)

Received: 14/12/2024  
Revised: 20/02/2025  
Accepted: 03/03/2025  
© IWWA

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۴  
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۱۲/۰۲  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳  
© انجمن آب و فاضلاب ایران

### Abstract

### چکیده

In the present study, the biological removal of polypropylene by the *scenedesmus obliquus* was investigated. The growth conditions of *scenedesmus* microalga were optimized in the first stage, and polypropylene microplastics in three different sizes were exposed to this species. The maximum percentage of polypropylene removal occurred at a size of 45 micrometers, with 29.27% of the polypropylene removed from the aqueous environment. The increase in the size of microplastics, due to optical obstruction and toxic effects, negatively impacts algae growth and reduces the efficiency of microplastic removal. The results indicate that the maximum growth rate of *scenedesmus* was achieved at a temperature of 29 degrees Celsius, a light intensity of 3500 lux, and a shaking speed of 160 rpm. After optimization, a temperature of 28 degrees Celsius, a light intensity of approximately 3500 lux, and a stirring speed of 167 rpm were selected as the optimal cultivation conditions for *scenedesmus*. Subsequently, the growth of the microalga under optimal conditions in the presence of polypropylene in three different sizes was conducted.

در مطالعه حاضر حذف زیستی میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن توسط ریزجلبک سندسموس آبلیکوس مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور در مرحله اول، شرایط رشد این ریزجلبک بهینه‌سازی شده و میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن در سه اندازه مختلف در معرض این گونه قرار گرفت. رشد ریزجلبک در شرایط بهینه و در حضور میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن در سه اندازه متفاوت انجام شد. حداکثر درصد حذف میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن در اندازه ۴۵ میکرومتر رخ داده و ۲۹/۲۷ درصد از پلی‌پروپیلن محیط آبی حذف شد. افزایش اندازه میکروپلاستیک به دلیل انسداد نوری و اثر سمیت باعث تأثیر منفی بر رشد جلبک شده و راندمان حذف میکروپلاستیک کاهش می‌یابد. نتایج بیانگر این است که حداکثر میزان رشد جلبک سندسموس در دمای ۲۹ درجه سانتی‌گراد، شدت نور ۳۵۰۰ لوکس و سرعت شیکر ۱۶۰ دور بر دقیقه حاصل شد و پس از بهینه‌سازی، دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد، شدت نور حدود ۳۵۰۰ لوکس و سرعت هم‌زدن ۱۶۷ دور بر دقیقه به‌عنوان نقطه بهینه کشت ریزجلبک سندسموس آبلیکوس انتخاب شد.

**Keywords:** Bioremoval, Microalgae, Microplastic, Polypropylene, *Scenedesmus Obliquus*.

**کلمات کلیدی:** پلی‌پروپیلن، حذف زیستی، ریزجلبک، سندسموس آبلیکوس، میکروپلاستیک.

اولین بار از واژه میکروپلاستیک برای اشاره به ذرات ریزپلاستیکی با قطر کم‌تر از ۵ میلی‌متر استفاده کردند که به‌عنوان یک آلاینده جدید زیست‌محیطی پایدار، توجه زیادی را در سال‌های بعد به خود جلب کرد.

آلودگی توسط میکروپلاستیک‌ها در هر دو محیط آبی و خشکی در حال رشد است به‌دلایلی اعم از تجزیه‌پذیری ضعیف، امکان تجمع بالا، امکان جذب آلاینده‌های آلی پایدار (POPs)<sup>۱</sup> و امکان بلعیده شدن توسط ماهی و سایر موجودات زنده، نگرانی جهانی را برانگیخته است (Hu et al., 2019). طبق پژوهشی بر روی میکروپلاستیک‌های شناور در شمال غربی دریای آدریاتیک، فراوان‌ترین پلیمرهای شناسایی‌شده شامل پلی‌اتیلن (۶۰ درصد)، پلی‌پروپیلن (۲۲ درصد)، اتیلن‌وینیل‌استات<sup>۲</sup> (۵ درصد) و پلی‌استایرن (۴ درصد) بودند (Vianello et al., 2018). براساس مطالعه‌ای دیگر، میکروپلاستیک‌های با چگالی کم‌تر مانند پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن، در نمونه‌های آب سطحی غالب بوده (به‌ترتیب ۲۵ و ۴۲ درصد) درحالی‌که پلیمرهای با چگالی بیش‌تر (یعنی پلی‌استرها و اکریلیک‌ها) معمولاً در آب‌های عمیق یافت می‌شدند (Erni-Cassola et al., 2019). سایر مطالعات نیز رایج‌ترین انواع میکروپلاستیک‌های شناسایی‌شده در جریان‌های آب سطحی را پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن و پلی‌استر گزارش کرده‌اند (Park et al., 2020).

روش‌های مختلفی برای حذف میکروپلاستیک‌ها از محیط آبی در سال‌های اخیر پیشنهاد شده که عمده آن‌ها مبتنی بر روش‌های جداسازی و تخریب ساختار میکروپلاستیک‌ها است. بررسی پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که بخش قابل‌توجهی از مطالعات در سال‌های اخیر بر فرآیندهای تغییر فاز، از جمله لخته‌سازی انعقادی، شناورسازی و فرآیندهای غشایی تمرکز کرده‌اند. برخی مطالعات نیز استفاده از مواد شیمیایی یا بیولوژیکی را گزارش کرده‌اند؛ مطالعات اندکی نیز حذف میکروپلاستیک‌ها با استفاده از تجزیه زیستی، اکسیداسیون مرطوب، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته و هضم را مورد بررسی قرار داده‌اند (Rodríguez-Narvaez et al., 2021; Sutkar et al., 2023). اکثر روش‌های بررسی‌شده اساساً روش‌های بازیافت میکروپلاستیک بوده و عمدتاً ناکارآمد هستند. بنابراین، تجزیه زیستی پلاستیک می‌تواند به‌عنوان یک روش جایگزین مؤثر، سازگار با محیط‌زیست و نوآورانه استفاده شود (Chia et al., 2020).

تخریب زیستی به هرگونه تغییر شیمیایی یا فیزیکی در خواص مواد که حاصل از فعالیت بیولوژیکی است، اشاره دارد. به‌طورکلی، یک عامل بیولوژیکی از پلیمرهای آلی به‌عنوان

پلاستیک‌ها، پلیمرهای مصنوعی هستند که معمولاً از منابع پتروشیمی مشتق شده و امروزه طیف گسترده‌ای از محصولات را شامل می‌شود. به‌دلایل مختلفی اعم از سهولت ساخت، بی‌اثر بودن (شیمیایی، دمایی و مقاومت در برابر نور)، هزینه کم، استحکام بالا و مقاومت در برابر آب، استفاده از پلاستیک‌ها رو به گسترش است و به‌همین دلیل طی چند دهه گذشته افزایش شدید تولید پلاستیک، مشاهده شده است. بررسی‌ها بیانگر این است که با توجه به نرخ رشد جمعیت در جهان و میزان مصرف فعلی تا سال ۲۰۲۵، مقدار تولید پلاستیک در جهان به حدود ۵۰۰ میلیون تن در سال خواهد رسید (Alqattaf, 2020).

با وجود مزایای بسیار پلاستیک‌ها، افزایش تولید آن طی سال‌های اخیر موجب تولید انبوهی از زباله‌های پلاستیکی در محیط شده است که دوام، ماندگاری و سرعت پایین بازیافت آن‌ها موجب بروز معضلات محیط‌زیستی شده است. امروزه حضور این مواد در محیط‌زیست، به‌عنوان آلاینده‌های نوظهور شناخته شده و در محیط‌های دریایی در سراسر جهان یافت می‌شوند. تاکنون وجود بیش از ۲۵۰۰۰۰ تن زباله پلاستیکی در دریاها تخمین زده شده است. این مقدار حدود ۶۰-۸۰ درصد از کل آلاینده‌هایی است که بشر به محیط‌های آبی وارد می‌کند. دوام پلاستیک‌ها سبب مقاومت بالای آن‌ها در برابر تخریب شده، بنابراین دفع زباله‌های پلاستیکی چالش بزرگی در سرتاسر جهان است (Kurtela and Antolović, 2019).

زباله‌های پلاستیکی در محیط‌های آبی براساس اندازه به دو گروه ماکروپلاستیک و میکروپلاستیک تقسیم می‌شوند. پس از ورود به محیط، این مواد پلاستیکی با روش‌های مختلف تخریب شده و استحکام ساختاری خود را از دست می‌دهند. تخریب گسترده پلاستیک‌ها در نهایت منجر به ایجاد قطعات و تکه‌های پلاستیک با اندازه میکروسکوپی می‌شود که میکروپلاستیک نامیده می‌شوند. میکروپلاستیک‌ها ریزذراتی هستند که دارای ابعادی در محدوده چند میکرومتر تا ۵۰۰ میکرومتر (۵/۰ میلی‌متر) هستند (Dris et al., 2015). در طی پژوهشی مشخص شد که پلاستیک‌های دفع‌شده به‌عنوان زباله احتمالاً منجر به غلظت‌های زیادی در سطح دریاها می‌شوند. طبق این تحقیق، اولین میکروپلاستیک در آمریکای شمالی در سواحل نیوینگلند شناسایی شد (Carpenter and Smith, 1972). از آن زمان به بعد، میکروپلاستیک‌ها در اکثر آب‌های بزرگ مانند اقیانوس‌ها، دریاها، دریاچه‌ها و رودخانه‌ها یافت می‌شوند. (Thompson et al. (2004)

خارج سلولی باعث ایجاد تجمع سلول‌های ریزجلبک در اطراف میکروپلاستیک شده و راندمان حذف را افزایش می‌دهد. از طرفی بررسی سایر مطالعات بیانگر نقش مؤثر مورفولوژی سلولی ریزجلبک سندسموس آلبیکوس در فرایند حذف میکروپلاستیک‌ها است (Cunha et al., 2019). مطالعه Carson et al. (2013) بر روی حذف میکروپلاستیک‌ها توسط ریزجلبک عنوان می‌کند که ریزجلبک‌ها پتانسیل بالایی برای حذف میکروپلاستیک‌ها داشته، با این حال ماهیت آبدوستی یا آب‌گریزی پلمیر سازنده پلاستیک بر راندمان حذف تأثیر دارد. مطالعات دیگری نیز حذف میکروپلاستیک‌های با چگالی کم توسط این ریزجلبک را بررسی کرده‌اند که بیانگر اثر مثبت ریزجلبک سندسموس بر حذف میکروپلاستیک‌ها است (Khatiwada et al., 2023; Jiang et al., 2024).

مطالعات در مورد تجزیه زیستی میکروپلاستیک‌ها می‌تواند به درک بهتر راهکارهای کاهش میکروپلاستیک‌ها و حل معضل آلودگی محیط‌زیست کمک کرده و منجر به توسعه فناوری‌های جدید مرتبط با رفع آلودگی شود. در مطالعه حاضر حذف زیستی میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن توسط ریزجلبک سندسموس آلبیکوس مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور در مرحله اول شرایط رشد این ریزجلبک بهینه‌سازی شده و میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن در سه اندازه مختلف در معرض این گونه قرار گرفت. میزان حذف میکروپلاستیک‌ها و همچنین اثر اندازه آن بر راندمان حذف زیستی توسط ریزجلبک بررسی شده و شرایط بهینه حذف مشخص شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد و تجهیزات

استوک جلبک سندسموس آلبیکوس از بانک ملی جلبک ایران تهیه شده و به‌منظور استفاده در طول آزمایش در محیط کشت BG-11 کشت داده شد. ترکیبات محیط کشت در جدول ۱ آورده شده و کلیه مواد شیمیایی مورد استفاده از شرکت Merck آلمان تهیه شد. پلی‌پروپیلن با استفاده از آسیاب سیاره‌ای به ابعاد میکرومتری متناسب با شرایط آزمایش آسیاب شده و برای استفاده در تست‌های حذف میکروپلاستیک مورد استفاده قرار گرفت. کلیه کشت‌ها در شرایط استریل و در انکوبار شیکردار انجام شد.

سوبسترا<sup>۳</sup> برای رشد و منبع انرژی خود استفاده می‌کند و در نتیجه زیست‌توده بیولوژیکی به‌عنوان محصول نهایی فرآیند تجزیه زیستی تولید می‌شود (Chia et al., 2020). جلبک‌ها می‌توانند روی سطح پلاستیکی رشد و پلاستیک‌ها را تجزیه نمایند. پلیمرها به‌عنوان منبع کربنی برای انرژی و رشد آن‌ها استفاده شده و جلبک‌ها به‌خصوص ریزجلبک‌ها می‌توانند مواد پلاستیکی را از طریق سیستم‌های آنزیمی سنتز شده تجزیه کنند؛ درحالی‌که خود ریزجلبک‌ها از پلیمرهای پلاستیکی به‌عنوان منابع کربن استفاده می‌کنند (Priya et al., 2022). آنزیم‌های ریزجلبک‌ها که پیوندهای شیمیایی پلیمرهای پلاستیکی را ضعیف می‌کنند سبب تخریب ساختار پلاستیک‌ها می‌شود. عمدتاً تولید آنزیم‌های لیگنینولیتیک<sup>۴</sup> و آگروپلی‌ساکارید<sup>۵</sup> مهم‌ترین عامل تجزیه زیستی میکروپلاستیک توسط ریزجلبک‌ها است. از این‌رو استفاده از ریزجلبک‌ها برای تجزیه زیستی میکروپلاستیک به‌عنوان یک راه حل بالقوه در سال‌های اخیر ارائه شده است (Lagarde et al., 2016).

سندسموس آلبیکوس<sup>۶</sup> گونه‌ای از جلبک‌های سبز، در کلاس Chlorophyceae بوده که دارای ساختاری دوکی‌شکل با ابعاد حداکثر ۲۵ میکرومتر است. این گونه، اغلب به‌صورت کلنی‌های دو و چهارتایی در محیط کشت خود وجود دارد. سندسموس حاوی یک کلروپلاست منفرد در داخل سلول خود بوده و یک پیرنوئید در مرکز آن وجود دارد. این گونه به‌طور گسترده‌ای برای اهداف آبی‌پرووری تولید شده و به‌دلیل محتوای بالای لیپید در ساختار سلولی خود در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است (Rai et al., 2013). این ریزجلبک عمدتاً در آب‌های شیرین یافت شده و قابلیت کشت در محیط کشت‌های Bold، BG-11 و BBM را دارد (Varshini et al., 2024; Xiong et al., 2016; Guedes et al., 2011). هم‌چنین به‌دلیل قابلیت فتوسنتزی این ریزجلبک، تأمین نور جهت رشد آن ضروری بوده و در مدت‌زمان ۱۶۰ تا ۱۷۰ ساعت تعداد سلول‌های آن دو برابر می‌شود (De Moraes and Costa, 2007). بررسی‌ها بیانگر این است که میکروپلاستیک‌های پلی‌استایرن بر روند رشد و فتوسنتز این گونه تأثیرگذار بوده و از طرفی سندسموس آلبیکوس توانایی حذف این نوع از میکروپلاستیک را دارد (Natarajan et al., 2022).

مطالعات (Cheng et al., 2022) بر روی حذف میکروپلاستیک‌های پلی‌استایرن و پلی‌لاکتید توسط ریزجلبک سندسموس آلبیکوس بیانگر راندمان بالای حذف این دو پلیمر توسط ریزجلبک بوده که به نقش محتوای پلیمری خارج سلولی<sup>۷</sup> در فرایند حذف میکروپلاستیک اشاره می‌کند. محتوای پلیمری

## ۲-۳- بررسی اثر ریزجلبک سندسموس آبلیکوس بر

### حذف میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن

پس از مشخص شدن شرایط بهینه رشد ریزجلبک سندسموس آبلیکوس، حذف میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن توسط این جلبک مورد بررسی قرار گرفت. میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن در سه اندازه ۴۵، ۷۵ و ۱۰۵ میکرومتر با غلظت یکسان (۵۰ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر) به ارلن‌های کشت سندسموس اضافه شده و کشت ریزجلبک تحت شرایط بهینه به‌دست‌آمده از بخش قبل و در حضور میکروپلاستیک انجام شد. پس از فرایند حذف بیولوژیکی، نمونه‌های میکروپلاستیک و زیست‌توده جلبک با استفاده از فیلتر واتمن از محیط کشت جدا شده و زیست‌توده جلبک توسط نیتریک اسید هیدرولیز و از سیستم حذف شد. میکروپلاستیک‌های باقی‌مانده وزن شده و درصد حذف براساس غلظت اولیه محاسبه شد.

پیوندهای پلی‌پروپیلن، گروه عاملی و تغییرات ترکیب شیمیایی قبل و بعد از حذف با استفاده از آنالیز طیف‌سنج مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) تعیین و مورد بررسی قرار گرفت (FT-IR/NIR FRONTIER-USA). آنالیز کروماتوگرافی نفوذ ژل (GPC) با استفاده از Agilent 1260 Infinity Binary LC مجهز به آرایه دیود (DAD VL+ 1260/G1315C) به‌همراه دو آشکارساز فلورسانس (FLD 1260/G1321B) برای بررسی وزن مولکولی پلی‌پروپیلن قبل و بعد از حذف میکروپلاستیک انجام شد.

## ۲-۴- طراحی آزمایش

به‌منظور بهینه‌سازی رشد ریزجلبک سندسموس آبلیکوس، سه پارامتر نور، دور شیکر و دما در سه سطح در نظر گرفته شده و طراحی آزمایش با استفاده از روش Central Composite Design با سه نقطه مرکزی و آلفای ۱ انجام شد. سطوح پارامترهای آزمایش در جدول ۲ آورده شده است. پس از انجام طراحی آزمایش و مشخص شدن تست‌ها (جدول ۳)، کشت ریزجلبک انجام و نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از نرم‌افزار Design Expert Ver 10 تجزیه، تحلیل و بهینه‌سازی شد.

## جدول ۱- اجزای شیمیایی محیط کشت BG-11

(Pandey et al., 2023)

غلظت (گرم بر لیتر)	ترکیب شیمیایی
۱/۵	NaNO <sub>3</sub>
۰/۰۷۵	MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O
۰/۰۳۶	CaCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O
۰/۰۲	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
۱/۰	Trace Metal Mixture
۰/۰۴	K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>
۰/۱۶	Citric acid
۰/۱۶	Ferric ammonium citrate

## ۲-۲- بهینه‌سازی شرایط رشد سندسموس

به‌منظور بررسی شرایط بهینه رشد جلبک سندسموس آبلیکوس، اثر سه پارامتر نور، دور شیکر و دما مورد بررسی قرار گرفت. کشت ریزجلبک در شرایط استریل و در ارلن‌های ۵۰۰ میلی‌لیتری انجام شده و درصد تلقیح به محیط کشت ۱۰٪ بود. pH محیط کشت بر روی ۷/۵ تنظیم و میزان رشد جلبک تحت اثر پارامترهای آزمایش بررسی شد. در مطالعه حاضر، اثر نور در محدوده ۱۵۰۰ تا ۳۵۰۰ لوکس، دور شیکر در محدوده ۱۲۰ تا ۲۰۰ دور بر دقیقه و دما در محدوده ۲۶ تا ۳۲ درجه سانتی‌گراد متغیر بوده و بهینه شرایط رشد پس از انجام کشت جلبک مشخص شد (شکل ۱). بررسی رشد ریزجلبک براساس چگالی نوری در طول موج ۶۸۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر انجام شد و حداکثر رشد (OD max) به‌عنوان پارامتر بهینه‌سازی در نظر گرفته شد.



شکل ۱- کشت ریزجلبک سندسموس در شیکر انکوباتور

## جدول ۲- پارامترهای طراحی آزمایش به‌منظور بهینه‌سازی رشد ریزجلبک سندسموس آبلیکوس

سطح			پارامتر
$\alpha = +1$	0	$\alpha = -1$	
۳۲	۲۹	۲۶	دما (درجه سانتیگراد)
۳۵۰۰	۲۵۰۰	۱۵۰۰	شدت نور (لوکس)
۲۰۰	۱۶۰	۱۲۰	سرعت شیکر (دور بر دقیقه)

جدول ۳- جدول طراحی آزمایش به روش CCD

ردیف	دما (درجه سانتی‌گراد)	شدت نور (لوکس)	سرعت شیکر (دور بر دقیقه)
۱	۲۶	۱۵۰۰	۱۲۰
۲	۲۶	۱۵۰۰	۲۰۰
۳	۳۲	۲۵۰۰	۱۶۰
۴	۲۶	۲۵۰۰	۱۶۰
۵	۲۹	۲۵۰۰	۲۰۰
۶	۲۹	۳۵۰۰	۱۶۰
۷	۲۶	۳۵۰۰	۱۲۰
۸	۳۲	۳۵۰۰	۱۲۰
۹	۲۶	۳۵۰۰	۲۰۰
۱۰	۳۲	۱۵۰۰	۱۲۰
۱۱	۳۲	۳۵۰۰	۲۰۰
۱۲	۲۹	۲۵۰۰	۱۶۰
۱۳	۲۹	۲۵۰۰	۱۲۰
۱۴	۲۹	۲۵۰۰	۱۶۰
۱۵	۲۹	۱۵۰۰	۱۶۰
۱۶	۳۲	۱۵۰۰	۲۰۰
۱۷	۲۹	۲۵۰۰	۱۶۰

۳- نتایج و بحث

تعیین شده توسط طراحی آزمایش انجام شد.

حداکثر چگالی نوری هر کدام از کشت‌ها اندازه‌گیری شده و

نتایج در جدول ۴ آورده شده است.

۳-۱- بهینه‌سازی رشد ریز جلبک سندسموس آبلیکوس

رشد ریز جلبک سندسموس با انجام ۱۷ کشت تحت شرایط

جدول ۴- نتایج چگالی نوری با هدف بررسی رشد ریز جلبک سندسموس آبلیکوس

ردیف	دما (درجه سانتی‌گراد)	شدت نور (لوکس)	سرعت شیکر (دور بر دقیقه)	حداکثر چگالی نوری
۱	۲۶	۱۵۰۰	۱۲۰	۰/۵۳
۲	۲۶	۱۵۰۰	۲۰۰	۰/۴۹
۳	۳۲	۲۵۰۰	۱۶۰	۰/۵۷
۴	۲۶	۲۵۰۰	۱۶۰	۰/۶۲
۵	۲۹	۲۵۰۰	۲۰۰	۰/۶۹
۶	۲۹	۳۵۰۰	۱۶۰	۰/۹۶
۷	۲۶	۳۵۰۰	۱۲۰	۰/۸۱
۸	۳۲	۳۵۰۰	۱۲۰	۰/۵۹
۹	۲۶	۳۵۰۰	۲۰۰	۰/۸۷
۱۰	۳۲	۱۵۰۰	۱۲۰	۰/۴۷
۱۱	۳۲	۳۵۰۰	۲۰۰	۰/۶۳
۱۲	۲۹	۲۵۰۰	۱۶۰	۰/۸۴
۱۳	۲۹	۲۵۰۰	۱۲۰	۰/۶۷
۱۴	۲۹	۲۵۰۰	۱۶۰	۰/۷۹
۱۵	۲۹	۱۵۰۰	۱۶۰	۰/۵۹
۱۶	۳۲	۱۵۰۰	۲۰۰	۰/۴۲
۱۷	۲۹	۲۵۰۰	۱۶۰	۰/۸۰

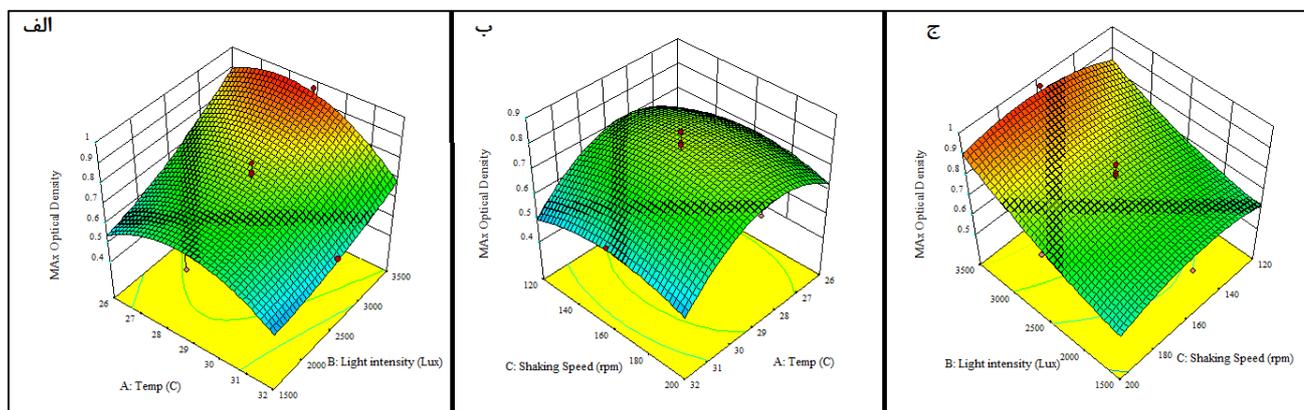
راندمان رشد شده و از طرفی شدت بالای هم‌زدن نیز موجب ایجاد تنش در محیط کشت ریزجلبک سندسموس آبلیکوس شده است (Miranda et al., 2012; Cordoba-Castro et al., 2012).

برای بررسی اثر برهم‌کنش پارامترهای آزمایش بر میزان رشد جلبک سندسموس، مدل‌سازی نتایج با استفاده از مدل Quadratic انجام شده و معادله رگرسیون مدل (Pvalue=۰/۰۰۱۳) با ضریب R<sup>2</sup> برابر با ۰/۹۴ به‌دست آمد.

$$OD = -14.44 + (0.97 \times A) + (0.00028 \times B) + (0.012 \times C) - (0.000014 \times AB) - (0.000003 \times AC) + (0.0000006 \times BC) - (0.016 \times A^2) + (0.00000003 \times B^2) - (0.00004 \times C^2) \quad (1)$$

که A: دما، B: شدت نور و C: سرعت شیکر است. با توجه به مدل‌سازی نتایج، نمودارهای سه‌بعدی برهم‌کنش پارامترهای آزمایش بر میزان رشد ریزجلبک سندسموس آبلیکوس در شکل ۲ ارائه شده است.

با توجه به جدول ۴، نتایج بیانگر این است که حداکثر میزان رشد جلبک سندسموس در دمای ۲۹ درجه سانتی‌گراد، شدت نور ۳۵۰۰ لوکس و سرعت شیکر ۱۶۰ دور بر دقیقه حاصل شده و جلبک به حداکثر چگالی نوری ۰/۹۶ رسیده است. بررسی سایر مطالعات نیز بیانگر این است که دمای بهینه رشد سندسموس آبلیکوس در محدوده ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد قرار داشته و افزایش دما به بالاتر از ۳۰ درجه موجب افت میزان رشد می‌شود (Guedes et al., 2011; Zhang et al., 2019). از طرفی بررسی اثر نور بر میزان رشد ریزجلبک سندسموس آبلیکوس در سایر مطالعات بیانگر این است که افزایش شدت نور تأثیر مستقیمی بر نرخ رشد ریزجلبک داشته و افزایش شدت نور تا ۴۰۰۰ لوکس موجب افزایش نرخ رشد جلبک در مطالعات مشابه شده است. با این‌وجود شدت نورهای بالاتر به‌دلیل ایجاد شوک نوری به ریزجلبک باعث کاهش راندمان رشد سندسموس آبلیکوس می‌شود (Zhang et al., 2019; Gris et al., 2014). همچنین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده به‌نظر می‌رسد شدت پایین هم‌زدن به‌دلیل عدم ایجاد اختلاط مناسب در محیط کشت موجب کاهش



شکل ۲- بررسی تأثیر هم‌زمان پارامترهای الف) دما و شدت نور؛ ب) سرعت شیکر و دما؛ و ج) سرعت شیکر و شدت نور بر میزان رشد ریزجلبک سندسموس آبلیکوس

به شکل‌های ۲-الف و ۲-ج، شدت نور بیش‌ترین تأثیر را نسبت به سایر پارامترها، بر افزایش راندمان رشد جلبک سندسموس آبلیکوس دارد.

تقریباً کلیه مطالعات بر شدت نور بین ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ لوکس برای رشد جلبک سندسموس آبلیکوس اتفاق نظر داشته و به نقش شدت نور در افزایش فتوسنتز اشاره کرده‌اند (Ahmad et al., 2001; Latiffi et al., 2017). با وجود این‌که نظریات متفاوتی در رابطه با مکانیسم‌های اثر نور بر فتوسنتز در مطالعات مختلف بیان شده اما به نظر می‌رسد تأثیر نور بر چرخه مصرف کربن، مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر افزایش فتوسنتز و رشد جلبک

با توجه به شکل ۲-الف که بیانگر اثر هم‌زمان دما و شدت نور بر رشد ریزجلبک سندسموس آبلیکوس است مشخص شد که افزایش شدت نور با افزایش رشد جلبک رابطه مستقیم داشته ولی افزایش دما، شیب اثر شدت نور را کاهش می‌دهد. از طرفی اثر دما بر میزان رشد، شکل زنگوله‌ای داشته و این افزایش تا حدود ۲۹ درجه، باعث افزایش راندمان رشد و دماهای بالاتر باعث کاهش راندمان رشد شده است. بررسی اثر هم‌زمان سرعت شیکر و دما (شکل ۲-ب) نیز بیانگر این است که افزایش سرعت شیکر تا ۱۶۰ دور بر دقیقه موجب افزایش راندمان رشد شده و سرعت‌های بالاتر رشد ریزجلبک سندسموس را کاهش می‌دهد. از طرفی با توجه

با توجه به نتایج به دست آمده، بهینه‌سازی تأثیر پارامترهای آزمایش بر رشد ریزجلبک سندسموس آبلیکوس با استفاده از نرم‌افزار Design Expert انجام شد. برای بهینه‌سازی، کلیه پارامترهای آزمایش در محدوده مطالعه حاضر در نظر گرفته شده و بهینه‌سازی با هدف حداکثر چگالی نوری انجام شد. با توجه به جدول ۵، دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد، شدت نور حدود ۳۵۰۰ لوکس و سرعت هم‌زدن ۱۶۷ دور بر دقیقه به عنوان نقطه بهینه کشت ریزجلبک سندسموس آبلیکوس انتخاب شده و در این شرایط حداکثر چگالی نوری پیش‌بینی شده توسط مدل ۰/۹۶۲ گزارش شد.

است (Breuer et al., 2015). بررسی اثر دور شیکر در مطالعات مشابه بیانگر این است که سرعت هم‌زدن بر استرس هیدرودینامیکی و دسترسی‌پذیری مواد مغذی محیط کشت تأثیرگذار بوده و هم‌زدن بستر کشت با سرعت بهینه موجب افزایش راندمان رشد ریزجلبک می‌شود (Castrillo et al., 2013). براساس مطالعات (Bosco et al., 2012)، دور هم‌زدن بهینه موجب بهبود محیط مغذی ریزجلبک‌ها شده و با افزایش شار نفوذ از ته‌نشینی مواد مغذی و هم‌چنین سلول‌های جلبک جلوگیری می‌کند. از طرف دیگر سایر مطالعات نشان می‌دهد که سرعت شیکر بیش از حد منجر به تنش برشی شده و بر یکپارچگی سلول جلبک تأثیر منفی می‌گذارد (Wang and Lan, 2018).

جدول ۵- بهینه‌سازی شرایط رشد ریزجلبک سندسموس آبلیکوس در محدوده پارامترهای آزمایش با استفاده از نرم‌افزار Design Expert

پارامتر	دما (درجه سانتی‌گراد)	شدت نور (لوکس)	سرعت شیکر (دور بر دقیقه)	چگالی نوری
مقدار بهینه	۲۷/۹۹۳	۳۴۹۹/۳۷۱	۱۶۷/۰۴۹	۰/۹۶۲

آزمایش‌ها در هر اندازه سه بار تکرار شده و درصد حذف میانگین به عنوان نتیجه آزمایش گزارش شد. نتایج درصد حذف میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن با استفاده از جلبک سندسموس آبلیکوس در جدول ۶ ارائه شده است.

### ۳-۲- امکان‌سنجی حذف میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن

پس از مشخص شدن شرایط بهینه کشت ریزجلبک سندسموس آبلیکوس، رشد ریزجلبک در شرایط بهینه و در حضور میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن در سه اندازه متفاوت انجام شد.

جدول ۶- درصد حذف زیستی میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن در حضور ریزجلبک سندسموس آبلیکوس

ردیف	دمای کشت (درجه سانتی‌گراد)	سرعت شیکر (دور بر دقیقه)	شدت نور (لوکس)	اندازه میکروپلاستیک (میکرومتر)	درصد حذف
۱	۲۸	۱۶۷	۳۵۰۰	۴۵	۲۹/۳±۲۷/۰۶
۲				۷۵	۱۹/۲±۹۴/۵۱
۳				۱۰۵	۱۵/۱±۳۳/۹۶

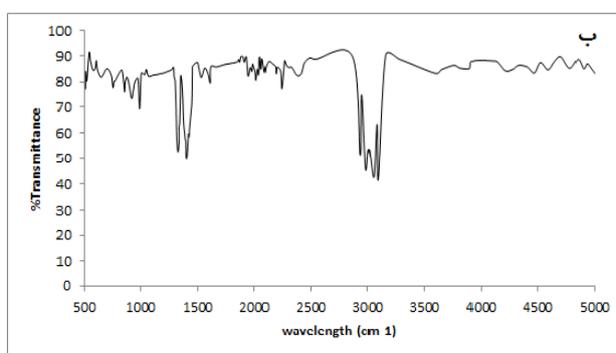
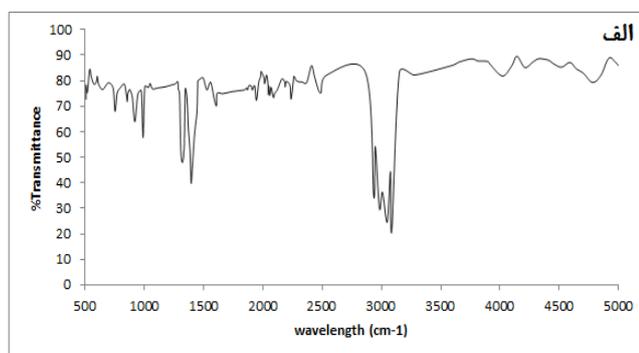
با توجه به نتایج به دست آمده از جدول ۶، حداکثر درصد حذف میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن در اندازه ۴۵ میکرومتر رخ داده که در این شرایط ریزجلبک سندسموس آبلیکوس توانست ۲۹/۲۷ درصد از پلی‌پروپیلن را از محیط آبی حذف کند. نتایج بیانگر این است که افزایش اندازه میکروپلاستیک تأثیر منفی بر میزان حذف زیستی آن داشته است. مطالعات نشان می‌دهد که میکروپلاستیک‌های با ابعاد بزرگ می‌توانند با مسدود کردن انتقال نور و تأثیرگذاری بر فتوسنتز، اثرات نامطلوبی ایجاد کنند؛ درحالی‌که نمونه‌های کوچک‌تر ممکن است با جذب روی سطوح جلبک، دیواره‌های سلولی را تخریب نمایند (Zhang et al., 2017; Jiang et al., 2024). علاوه بر این، سمیت میکروپلاستیک‌ها می‌تواند وابسته به اندازه باشد و میکروپلاستیک‌های با اندازه بزرگ‌تر اثرات نامطلوب قابل‌توجهی ایجاد می‌کردند (Wang et al., 2023). از طرفی میکروپلاستیک‌های کوچک‌تر استرس اکسیداتیو بیش‌تری ایجاد می‌کنند و بر عملکردهای سلولی تأثیر می‌گذارند (Li et al., 2023). برخلاف مطالعه حاضر، برخی از پژوهش‌ها نشان داده‌اند که اثرات اندازه ذرات پلی‌پروپیلن بر راندمان حذف میکروپلاستیک معنی‌دار نبوده است (Lin et al., 2022)؛ بنابراین، درحالی‌که تأثیر خاص اندازه ذرات پلی‌پروپیلن بر حذف توسط ریزجلبک‌ها ممکن است متفاوت باشد، روند کلی نشان می‌دهد که ذرات بزرگ‌تر می‌توانند اثرات مضر بیش‌تری بر رشد و عملکرد ریزجلبک‌ها داشته باشند، که تأثیر منفی بر حذف میکروپلاستیک توسط ریزجلبک‌ها دارد (Cheng and wang, 2022). با این حال نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که تأثیر منفی مسدودسازی نوری و اثر سمیت میکروپلاستیک با ابعاد بزرگ بر استرس اکسیداتیو میکروپلاستیک با ابعاد کوچک غلبه

با توجه به نتایج به دست آمده از جدول ۶، حداکثر درصد حذف میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن در اندازه ۴۵ میکرومتر رخ داده که در این شرایط ریزجلبک سندسموس آبلیکوس توانست ۲۹/۲۷ درصد از پلی‌پروپیلن را از محیط آبی حذف کند. نتایج بیانگر این است که افزایش اندازه میکروپلاستیک تأثیر منفی بر میزان حذف زیستی آن داشته است. مطالعات نشان می‌دهد که میکروپلاستیک‌های با ابعاد بزرگ می‌توانند با مسدود کردن انتقال نور و تأثیرگذاری بر فتوسنتز، اثرات نامطلوبی ایجاد کنند؛ درحالی‌که نمونه‌های کوچک‌تر ممکن است با جذب روی سطوح جلبک، دیواره‌های سلولی را تخریب نمایند (Zhang et al., 2017; Jiang et al., 2024). علاوه بر این، سمیت میکروپلاستیک‌ها می‌تواند وابسته به اندازه باشد و میکروپلاستیک‌های با اندازه بزرگ‌تر اثرات نامطلوب قابل‌توجهی ایجاد می‌کردند (Wang et al., 2023). از طرفی میکروپلاستیک‌های کوچک‌تر استرس اکسیداتیو بیش‌تری ایجاد می‌کنند و بر عملکردهای سلولی تأثیر می‌گذارند (Li et al., 2023). برخلاف مطالعه حاضر، برخی از پژوهش‌ها نشان داده‌اند که اثرات اندازه ذرات پلی‌پروپیلن بر راندمان حذف میکروپلاستیک معنی‌دار نبوده است (Lin et al., 2022)؛ بنابراین، درحالی‌که تأثیر خاص اندازه ذرات پلی‌پروپیلن بر حذف توسط ریزجلبک‌ها ممکن است متفاوت باشد، روند کلی نشان می‌دهد که ذرات بزرگ‌تر می‌توانند اثرات مضر بیش‌تری بر رشد و عملکرد ریزجلبک‌ها داشته باشند، که تأثیر منفی بر حذف میکروپلاستیک توسط ریزجلبک‌ها دارد (Cheng and wang, 2022). با این حال نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که تأثیر منفی مسدودسازی نوری و اثر سمیت میکروپلاستیک با ابعاد بزرگ بر استرس اکسیداتیو میکروپلاستیک با ابعاد کوچک غلبه

گروهی از پیک‌ها را نشان داد که احتمالاً به دلیل کشش گروه‌های C-C پس از برهم‌کنش جلبک و میکروپلاستیک است (Hadiyanto et al., 2021). سایر مطالعات بیانگر این است که گروه‌های متیل پتانسیل ایجاد بریدگی‌های زنجیره‌ای و اتصال عرضی در حلقه‌های پلیمری پلی‌پروپیلن را داشته و ویژگی‌های آب‌گریز پلی‌پروپیلن را کاهش می‌دهند. مطالعه دیگری نشان داده است که ظهور پیک‌هایی در محدوده ۱۶۵۰ تا ۱۸۵۰ سانتی‌متر، مرتبط با گروه‌های کربونیل، می‌تواند به‌طور بالقوه باعث بریدگی‌های زنجیره‌ای و اتصال عرضی شود، درحالی‌که پیک‌های محدوده ۳۲۰۰ تا ۳۶۰۰ (CH) و ۹۰۰ تا ۱۲۰۰ به‌وضوح بیانگر تخریب ساختار پلی‌پروپیلن هستند (Dmytryk et al., 2014; Dianratri et al., 2020).

کرده و راندمان حذف میکروپلاستیک با افزایش اندازه آن کاهش می‌یابد. بنابراین بالاترین راندمان حذف میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن توسط ریزجلبک سندسموس آبلیکوس در اندازه ۴۵ میکرومتر حاصل شد.

طیف FTIR پلی‌پروپیلن در شرایط بهینه، قبل و بعد از حذف زیستی در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج حاکی از کاهش شدت ارتعاش باند CH در طول موج حدود ۳۰۰۰ پس از برهم‌کنش سندسموس و پلی‌پروپیلن است. علاوه بر این، در طول موج حدود ۱۳۵۰، اوج کاهش در پیک گروه متیل و متیلن پس از فرایند حذف مشاهده می‌شود. پیک شارپ متیلن نیز در طول موج حدود ۱۳۰۰ در پلی‌پروپیلن پیش از حذف مشاهده می‌شود که پس از حذف زیستی توسط ریزجلبک سندسموس آبلیکوس، شدت آن کاهش یافته است. علاوه بر این، طول موج حدود ۷۰۰-۹۰۰



شکل ۳- آنالیز FTIR میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن در شرایط: الف) قبل و ب) بعد از حذف زیستی

میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بیانگر این بود که شدت نور بیش‌ترین تأثیر را بر راندمان رشد این ریزجلبک داشته و در شرایط بهینه حداکثر چگالی رشد ریزجلبک سندسموس آبلیکوس ۰/۹۶۲ گزارش شد. در ادامه با بررسی حذف زیستی میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن در سه اندازه مختلف، نتایج حاکی از حذف ۲۹/۲۷ درصد پلی‌پروپیلن با اندازه ۴۵ میکرومتر توسط سندسموس آبلیکوس بود. با وجود این‌که مطالعات چندانی بر روی حذف میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن توسط ریزجلبک‌ها به‌خصوص سندسموس آبلیکوس انجام نشده است، این نتایج با مطالعات انجام‌شده توسط (Ansari et al., 2021) که حذف پلی‌پروپیلن توسط ریزجلبک *Acutodesmus Obliquus* را بررسی کردند، مطابقت دارد. این مطالعه به تأثیر منفی افزایش غلظت و اندازه میکروپلاستیک بر رشد جلبک و در نتیجه راندمان حذف میکروپلاستیک اشاره می‌کند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که برخی ریزگونه‌های ریزجلبک سندسموس توانایی بالایی در حذف میکروپلاستیک پلی‌استایرن داشته و

آنالیز ژل کروماتوگرافی بر روی نمونه بهینه (اندازه ۴۵ میکرومتر) نشان داد که میانگین وزن مولکولی پلی‌پروپیلن قبل از فرایند حذف با ریزجلبک ۴۲/۱۹ گرم بر مول بوده که نشان‌دهنده وزن مولکولی بالای پلی‌پروپیلن است و راندمان نسبتاً پایین حذف پلی‌پروپیلن توسط جلبک‌ها را در مقایسه با میکروپلاستیک‌های سبک‌تر توجیح می‌کند. وزن مولکولی ذرات میکروپلاستیک باقی‌مانده پس از فرایند حذف بیولوژیکی حدود ۲۰٪ کاهش یافت و به ۳۴/۸۷ گرم بر مول رسید. سایر مطالعات نیز کاهش وزن مولکولی را پس از برهم‌کنش میکروارگانیزم‌ها با سطح میکروپلاستیک گزارش کرده‌اند (Sivan, 2011; Mukherjee et al., 2015).

#### ۴- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با هدف امکان‌سنجی حذف میکروپلاستیک پلی‌پروپیلن با استفاده از ریزجلبک سندسموس آبلیکوس انجام شده و شرایط بهینه رشد این ریزجلبک و راندمان حذف

اندازه ذرات و غلظت میکروپلاستیک‌ها بر فرآیند حذف زیستی نیازمند مطالعات بیش‌تری است.

#### ۵- قدردانی

مطالعه حاضر بر اساس بخشی از نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده رساله دکترا با موضوع "امکان‌سنجی کاربرد بیوکاتالیست‌ها در هم‌افزایی فرآیند تجزیه بیولوژیکی زنجیره‌های پلی‌پروپیلن توسط میکروجلبک‌ها و سویه‌های میکروبی محیط همراه با بهینه‌سازی فرآیندها" نگارش شده و نویسندگان کمال تشکر را از همکاری دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب و هم‌چنین بانک ملی جلبک ایران دارند.

#### ۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Persistent Organic Pollutants
- 2- Ethylene-Vinyl Acetate
- 3- Substrate
- 4- Ligninolytic
- 5- Exopolysaccharide
- 6- Scenedesmus Obliquus
- 7- Extracellular Polymeric Substances

#### ۷- مراجع

- Ahmad Latiffi, N.A., Radin Mohamed, R.M.S., Apandi, N.M., and Tajuddin, R.M., (2017), "Experimental assessment on effects of growth rates microalgae Scenedesmus sp. in different conditions of pH, temperature, light intensity and photoperiod", *Key Engineering Materials*, 744, 546-551, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.744.546>.
- Alqattaf, A., (2020), "Plastic waste management: Global facts, challenges and solutions", In *2020 Second International Sustainability and Resilience Conference: Technology and Innovation in Building Designs*, 51154, 1-7, <https://doi.org/10.1109/IEEECONF51154.2020.9319989>.
- Ansari, F.A., Ratha, S.K., Renuka, N., Ramanna, L., Gupta, S.K., Rawat, I., and Bux, F., (2021), "Effect of microplastics on growth and biochemical composition of microalga *Acutodesmus obliquus*", *Algal Research*, 56, 102296, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102296>.
- Bosco, M.B., Aleanzi, M.C., and Iglesias, A.Á., (2012), "Plastidic phosphoglycerate kinase from *Phaeodactylum tricornutum*: on the critical role of cysteine residues for the enzyme function", *Protist*, 163(2), 188-203, <https://doi.org/10.1016/j.protis.2011.07.001>.
- Breuer, G., Martens, D.E., Draaisma, R.B., Wijffels, R.H., and Lamers, P.P., (2015), "Photosynthetic efficiency and carbon partitioning in nitrogen-starved

مکانیزم حذف این میکروپلاستیک نیز مشابه پلی‌پروپیلن است. با این حال به دلیل ساختار پلیمری قوی پلی‌پروپیلن، راندمان حذف آن نسبت به سایر میکروپلاستیک‌ها پایین‌تر است (Cheng et al., 2022; Padervand et al., 2020). هم‌چنین پلی‌پروپیلن تأثیر منفی بیش‌تری نسبت به سایر پلاستیک‌ها بر رشد جلبک داشته که یکی از دلایل راندمان حذف پایین‌تر این میکروپلاستیک نسبت به سایر میکروپلاستیک‌ها است (Schiavo et al, 2021).

نتایج مطالعات در سرتاسر جهان، اهمیت بسیار زیاد میکروپلاستیک‌ها را در اکوسیستم‌های مختلف به‌خصوص آب شیرین نشان می‌دهد، زیرا این آلاینده‌های نوظهور به وفور در محیط‌های مختلف وجود دارند. به‌همین علت توجه محققان باید در زمینه شناسایی، طبقه‌بندی و نمونه‌برداری میکروپلاستیک‌ها متمرکز شود تا به دستورالعمل‌های رسمی و هماهنگ و روش‌های استاندارد در این زمینه منجر شود. هم‌چنین در زمینه حذف این آلاینده‌ها تحقیقات اندکی انجام شده است. بخش قابل‌توجهی از روش‌های بررسی‌شده توسط محققان برای حذف میکروپلاستیک‌ها در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده و روش‌های بسیار کمی برای اجرا در مقیاس صنعتی گزارش شده است. با این‌حال، مطالعات در مورد روش‌های تجزیه و حذف زیستی میکروپلاستیک‌ها می‌تواند به درک بهتر راه‌های کاهش میکروپلاستیک‌ها و حل معضل آلودگی محیط‌زیست کمک کرده و منجر به توسعه فناوری‌های جدید مرتبط با رفع این آلاینده شود. با این‌حال استفاده از ریزجلبک‌ها در حذف میکروپلاستیک در محیط‌های واقعی با چالش‌های زیادی روبه‌رو است. حضور میکروارگانیسم‌های رقابت‌کننده در محیط واقعی، عدم تفکیک انواع میکروپلاستیک‌ها از یکدیگر، نبود شرایط کنترل‌شده دما، نور، pH و هم‌چنین عدم کنترل برهم‌کنش میکروجلبک و میکروپلاستیک در محیط‌های آبی واقعی، از جمله مهم‌ترین چالش‌های پیش‌رو است. هم‌چنین انتخاب نوع گونه جلبک مورد استفاده متناسب با شرایط اقلیمی و شوری آب نیز در اجرای پروژه‌های حذف میکروپلاستیک در محیط‌های واقعی تأثیرگذار است. تلاش برای استفاده از ریزجلبک‌ها برای تبدیل میکروپلاستیک‌ها به متابولیت‌هایی مانند دی‌اکسیدکربن، آب و زیست‌توده از موضوعات نسبتاً جدید و نیازمند مطالعات بیش‌تری است. با توجه به تنوع پلاستیک‌های مورد بررسی، مطالعات تجزیه زیستی بیش‌تری با استفاده از جلبک‌ها باید انجام شود و بازده این فرآیندها مورد ارزیابی قرار گیرد. علاوه بر این، هنوز مکانیسم‌های تجزیه میکروپلاستیک‌ها توسط ریزجلبک‌ها به‌طور کامل مشخص نشده و نیاز به مطالعات بیش‌تری است. هم‌چنین بررسی تأثیر

- bioaccumulation and toxicity in *Scenedesmus acutus* (Chlorophyceae)", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 48(1), 36-42, <https://doi.org/10.1006/eesa.2000.2000>.
- Guedes, A.C., Amaro, H.M., Pereira, R.D., and Malcata, F.X., (2011), "Effects of temperature and pH on growth and antioxidant content of the microalga *Scenedesmus obliquus*", *Biotechnology Progress*, 27(5), 1218-1224, <https://doi.org/10.1002/btpr.649>.
- Gris, B., Morosinotto, T., Giacometti, G.M., Bertucco, A., and Sforza, E., (2014), "Cultivation of *Scenedesmus obliquus* in photobioreactors: Effects of light intensities and light-dark cycles on growth, productivity, and biochemical composition", *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 172, 2377-2389, <https://doi.org/10.1007/s12010-013-0679-z>.
- Hadiyanto, H., Khoironi, A., Dianratri, I., Suherman, S., Muhammad, F., and Vaidyanathan, S., (2021), "Interactions between polyethylene and polypropylene microplastics and *Spirulina* sp. microalgae in aquatic systems", *Heliyon*, 7(8), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07676>.
- Hu, Y., Gong, M., Wang, J., and Bassi, A., (2019), "Current research trends on microplastic pollution from wastewater systems: A critical review", *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 18, 207-230, <https://doi.org/10.1007/s11157-019-09498-w>.
- Jiang, J., Cai, X., Ren, H., Cao, G., Meng, J., Xing, D., Vollertsen, J., and Liu, B., (2024), "Effects of polyethylene terephthalate microplastics on cell growth, intracellular products and oxidative stress of *Scenedesmus* sp", *Chemosphere*, 348, 140760, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140760>.
- Khatiwada, J.R., Madsen, C., Warwick, C., Shrestha, S., Chio, C., and Qin, W., (2023), "Interaction between polyethylene terephthalate (PET) microplastic and microalgae (*Scenedesmus* spp.): Effect on the growth, chlorophyll content, and hetero-aggregation", *Environmental Advances*, 13, 100399, <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100399>.
- Kurtela, A., and Antolović, N., (2019), "The problem of plastic waste and microplastics in the seas and oceans: impact on marine organisms", *Croatian Journal of Fisheries*, 77(1), 51-56, <https://doi.org/10.2478/cjf-2019-0005>.
- Lagarde, F., Olivier, O., Zanella, M., Daniel, P., Hiard, S., and Caruso, A., (2016), "Microplastic interactions with freshwater microalgae: Hetero-aggregation and changes in plastic density appear strongly dependent on polymer type", *Environmental Pollution*, 215, 331-339, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.006>.
- Li, J., Zheng, X., Liu, X., Zhang, L., Zhang, S., Li, Y., Zhang, W., Li, Q., Zhao, Y., Chen, X., and Wang, X., (2023), "Effect and mechanism of microplastics exposure against microalgae: Photosynthesis and oxidative stress", *Science of the Total Environment*, 905, 167017, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167017>.
- Lin, X., Luo, L., Mao, Z., Wang, H., Chu, S., Wang, H., *Scenedesmus obliquus*", *Algal Research*, 9, 254-262, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.03.012>.
- Carpenter, E.J., and Smith Jr, K.L., (1972), "Plastics on the Sargasso Sea surface", *Science*, 175 (4027), 1240-1241, <https://doi.org/10.1126/science.175.4027.1240>.
- Carson, H.S., Nerheim, M.S., Carroll, K.A., and Eriksen, M., (2013), "The plastic-associated microorganisms of the North Pacific Gyre", *Marine Pollution Bulletin*, 75(1-2), 126-132, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.07.054>.
- Castriello, M., Lucas-Salas, L.M., Rodríguez-Gil, C., and Martínez, D., (2013), "High pH-induced flocculation-sedimentation and effect of supernatant reuse on growth rate and lipid productivity of *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella vulgaris*", *Bioresource Technology*, 128, 324-329, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.114>.
- Cheng, Y.R., and Wang, H.Y., (2022), "Highly effective removal of microplastics by microalgae *Scenedesmus* abundans", *Chemical Engineering Journal*, 435, 135079, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135079>.
- Chia, W.Y., Tang, D.Y.Y., Khoo, K.S., Lup, A.N.K., and Chew, K.W., (2020), "Nature's fight against plastic pollution: Algae for plastic biodegradation and bioplastics production", *Environmental Science and Ecotechnology*, 4, 100065, <https://doi.org/10.1016/j.ese.2020.100065>.
- Cunha, C., Faria, M., Nogueira, N., Ferreira, A., and Cordeiro, N., (2019), "Marine vs freshwater microalgae exopolymers as biosolutions to microplastics pollution", *Environmental Pollution*, 249, 372-380, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.046>.
- De Moraes, M.G., and Costa, J.A.V., (2007), "Biofixation of carbon dioxide by *Spirulina* sp. and *Scenedesmus obliquus* cultivated in a three-stage serial tubular photobioreactor", *Journal of Biotechnology*, 129(3), 439-445, <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2007.01.009>.
- Dianratri, I., Hadiyanto, H., Khoironi, A., and Pratiwi, W.Z., (2020), "The influence of polypropylene and polyethylene microplastics on the quality of spirulina sp. Harvests", *Food Research*, 4(5), 1739-1743, [https://doi.org/10.26656/fr.2017.4\(5\).157](https://doi.org/10.26656/fr.2017.4(5).157).
- Dmytryk, A., Saeid, A., and Chojnacka, K., (2014), "Biosorption of microelements by *Spirulina*: towards technology of mineral feed supplements", *The Scientific World Journal*, 2014(1), 356328, <https://doi.org/10.1155/2014/356328>.
- Dris, R., Gasperi, J., Rocher, V., Saad, M., Renault, N., and Tassin, B., (2015), "Microplastic contamination in an urban area: a case study in Greater Paris", *Environmental Chemistry*, 12(5), 592-599, <https://doi.org/10.1071/EN14167>.
- Erni-Cassola, G., Zadjelovic, V., Gibson, M.I., and Christie-Oleza, J.A., (2019), "Distribution of plastic polymer types in the marine environment; A meta-analysis", *Journal of Hazardous Materials*, 369, 691-698, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.02.067>.
- Gorbi, G., Corradi, M.G., Invidia, M., and Bassi, M., (2001), "Light intensity influences chromium

- Biotechnology*, 22(3), 422-426, <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2011.01.013>.
- Sutkar, P.R., Gadewar, R.D., and Dhulap, V.P., (2023), "Recent trends in degradation of microplastics in the environment: A state-of-the-art review", *Journal of Hazardous Materials Advances*, 100343, <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100343>.
- Thompson, R.C., Olsen, Y., Mitchell, R.P., Davis, A., Rowland, S.J., John, A.W., McGonigle, D., and Russell, A.E., (2004), "Lost at sea: Where is all the plastic?", *Science*, 304(5672), 838-838, <https://doi.org/10.1126/science.1094559>.
- Varshini, V., Anusha Gowri, R.V., Sandhya, S., Nirmal, L.A., and Jacob, S., (2024), "Cultivation of *Scenedesmus obliquus* NCIM 5526 in a sol-gel transition medium for lipid production", *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-14, <https://doi.org/10.1007/s13762-024-06231-1>.
- Vianello, A., Da Ros, L., Boldrin, A., Marceta, T., and Moschino, V., (2018), "First evaluation of floating microplastics in the Northwestern Adriatic Sea", *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 28546-28561, <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2812-6>.
- Wang, C., and Lan, C.Q., (2018), "Effects of shear stress on microalgae—A review", *Biotechnology Advances*, 36(4), 986-1002, <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.03.001>.
- Wang, X., Zhao, Y., Zhao, L., Wan, Q., Ma, L., Liang, J., Li, H., Dong, J., and Zhang, M., (2023), "Effects of microplastics on the growth, photosynthetic efficiency and nutrient composition in freshwater algae *Chlorella vulgaris* Beij", *Aquatic Toxicology*, 261, 106615, <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2023.106615>.
- Xiong, J.Q., Kurade, M.B., Abou-Shanab, R.A., Ji, M.K., Choi, J., Kim, J.O., and Jeon, B.H., (2016), "Biodegradation of carbamazepine using freshwater microalgae *Chlamydomonas mexicana* and *Scenedesmus obliquus* and the determination of its metabolic fate", *Bioresource Technology*, 205, 183-190, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.038>.
- Zhang, C., Chen, X., Wang, J., and Tan, L., (2017), "Toxic effects of microplastic on marine microalgae *Skeletonema costatum*: interactions between microplastic and algae", *Environmental Pollution*, 220, 1282-1288, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.11.005>.
- Zhang, Y., Ren, L., Chu, H., Zhou, X., Yao, T., and Zhang, Y., (2019), "Optimization for *Scenedesmus obliquus* cultivation: the effects of temperature, light intensity and pH on growth and biochemical composition", *Microbiology and Biotechnology Letters*, 47(4), 614-620, <https://doi.org/10.4014/mbl.1906.06005>.
- and Luo, S., (2022), "Effect of microplastics on the removal of nitrogen and phosphorus from synthetic piggy digestate by microalgae", *Polymers*, 14(20), 4349, <https://doi.org/10.3390/polym14204349>.
- Miranda, J.R., Passarinho, P.C., and Gouveia, L., (2012), "Pre-treatment optimization of *Scenedesmus obliquus* microalga for bioethanol production", *Bioresource Technology*, 104, 342-348, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.059>.
- Mukherjee, S., Chaudhuri, U.R., and Kundu, P.P., (2015), "Biotic oxidation of polyethylene using a bio-surfactant produced by *B. licheniformis*: A novel technique", *RSC Advances*, 5(92), 75089-75097, <https://doi.org/10.1039/C5RA13549D>.
- Natarajan, L., Soupam, D., Dey, S., Chandrasekaran, N., Kundu, R., Paul, S., and Mukherjee, A., (2022), "Toxicity of polystyrene microplastics in freshwater algae *Scenedesmus obliquus*: Effects of particle size and surface charge", *Toxicology Reports*, 9, 1953-1961, <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2022.10.013>.
- Padervand, M., Lichtfouse, E., Robert, D., and Wang, C., (2020), "Removal of microplastics from the environment, A review", *Environmental Chemistry Letters*, 18(3), 807-828, <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00983-1>.
- Pandey, S., Narayanan, I., Vinayagam, R., Selvaraj, R., Varadavenkatesan, T., and Pugazhendhi, A., (2023), "A review on the effect of blue green 11 medium and its constituents on microalgal growth and lipid production", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 109984, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109984>.
- Park, T.J., Lee, S.H., Lee, M.S., Lee, J.K., Park, J.H., and Zoh, K.D., (2020), "Distributions of microplastics in surface water, fish, and sediment in the vicinity of a sewage treatment plant", *Water*, 12(12), 3333, <https://doi.org/10.3390/w12123333>.
- Priya, A.K., Jalil, A.A., Dutta, K., Rajendran, S., Vasseghian, Y., Karimi-Maleh, H., and Soto-Moscoso, M., (2022), "Algal degradation of microplastic from the environment: Mechanism, challenges, and future prospects", *Algal Research*, 67, 102848, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102848>.
- Rai, S.K., (2013), "Occurrence of genus *Scenedesmus* Mayen (Chlorophyceae) from East Nepal", *Nepalese Journal of Biosciences*, 3(1), 26-37, <https://doi.org/10.3126/njbs.v3i1.41425>.
- Rodríguez-Narvaez, O.M., Goonetilleke, A., Perez, L., and Bandala, E.R., (2021), "Engineered technologies for the separation and degradation of microplastics in water: a review", *Chemical Engineering Journal*, 414, 128692, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128692>.
- Schiavo, S., Oliviero, M., Chiavarini, S., Dumontet, S., and Manzo, S., (2021), "Polyethylene, Polystyrene, and Polypropylene leachate impact upon marine microalgae *Dunaliella tertiolecta*", *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 84(6), 249-260, <https://doi.org/10.1080/15287394.2020.1860173>.
- Sivan, A., (2011), "New perspectives in plastic biodegradation", *Current Opinion in*



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.