CC BY

مقاله مروری:

تولید بیوپلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر از ریزجلبک‌ها و کاربرد آنها در آبزی‌پروری پایدار: از تصفیه پساب تا پلیمرهای زیستی

بنیامین رستمی[۱]، رامین مناف‌فر*[۱]، مهدی محمودیان[۲]

*raminmanaffar@gmail.com

۱ - گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- پژوهشکده تحقیقات نانوفناوری، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

تاریخ دریافت: فروردین ۱۴۰۵ تاریخ پذیرش: خرداد ۱۴۰۵

چکیده

افزایش مصرف پلاستیک در صنعت صید، آبزی‌پروری و نگهداری و عرضه آبزیان زینتی، به یکی از چالش‌های زیست‌محیطی این بخش تبدیل شده است. در سال‌های اخیر، تولید مواد پلیمری زیست‌پایه از منابع تجدیدپذیر، از جمله زیست‌توده جلبکی، به‌عنوان یکی از رویکردهای بالقوه برای کاهش وابستگی به پلیمرهای نفت‌پایه مورد توجه قرار گرفته است. ریزجلبک‌ها، سیانوباکتری‌هایی مانند اسپیرولینا و برخی جلبک‌های رشته‌ای، به دلیل رشد سریع، ترکیب زیست‌شیمیایی متنوع و قابلیت تولید زیست‌توده در سامانه‌های آبی، می‌توانند در تولید پلیمرهای زیستی، تأمین مواد اولیه پلیمری و ساخت کامپوزیت‌های زیست‌پایه نقش داشته باشند. افزون بر این، برخی از این زیست‌سامانه‌ها قابلیت جذب بخشی از مواد مغذی موجود در آب و پساب را دارند و می‌توانند از طریق بازیابی منابع و تولید زیست‌توده قابل برداشت، به توسعه رویکردهای زیست‌اقتصاد چرخشی کمک کنند. از این منظر، پیوند میان تصفیه پساب و تولید مواد زیست‌پایه، ظرفیتی بالقوه برای توسعه سامانه‌های یکپارچه و پایدار فراهم می‌آورد. در صنعت آبزیان زینتی نیز بسته‌بندی، تجهیزات و محصولات مصرفی مورد استفاده در مراکز تکثیر، پرورش و عرضه می‌توانند از جمله حوزه‌های بالقوه کاربرد این مواد باشند. بااین‌حال، استفاده از آنها در کیسه‌های حمل ماهی و اجزای در تماس مستقیم با آب آکواریوم مستلزم ارزیابی دقیق استحکام مکانیکی، پایداری، قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری در شرایط واقعی، ترکیبات آزادشونده و ایمنی برای آبزیان است. مقاله حاضر با مرور ترکیبات زیست‌توده جلبکی، مسیرهای تولید پلیمرها و مواد کامپوزیتی زیست‌پایه، ظرفیت ریزجلبک‌ها، سیانوباکتری‌ها و جلبک‌های رشته‌ای و امکان بهره‌گیری از پساب برای تولید زیست‌توده، کاربردهای بالقوه این مواد در آبزی‌پروری و صنعت آبزیان زینتی را بررسی می‌کند. همچنین، چالش‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی مرتبط با توسعه این فناوری‌ها و الزامات ارزیابی ایمنی آنها را با هدف تبیین فرصت‌ها و محدودیت‌های استقرار سامانه‌های یکپارچه تصفیه پساب و تولید مواد زیستی مورد بحث قرار می‌دهد.

کلمات کلیدی: آبزی‌پروری پایدار، آبزیان زینتی، بیوپلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر، ریزجلبک‌ها، اسپیرولینا، تصفیه پساب، زیست‌اقتصاد چرخشی

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.22034/JOA.13.3.29]

مقدمه

پلاستیک‌ها به دلیل وزن کم، استحکام، انعطاف‌پذیری، مقاومت شیمیایی و هزینه تولید نسبتاً پایین در بسیاری از فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی و صنعت آبزی‌پروری کاربرد گسترده‌ای دارند. این مواد در مراحل مختلف از صید وصیادی در اقیانوس‌ها، پرورش، نگهداری، بسته‌بندی، انتقال و عرضه آبزیان استفاده می‌شوند. در صنعت آبزیان زینتی نیز کیسه‌های حمل و نقل ماهی، ظروف، بسته‌بندی خوراک و تجهیزات، مواد مصرفی فروشگاه‌ها و مراکز تکثیر و بسته‌بندی محصولات جانبی، بخشی از زنجیره تأمین را تشکیل می‌دهند. با این‌حال، ماندگاری بالای بسیاری از پلاستیک‌های متداول و مدیریت نامناسب پسماند آنها می‌تواند به ورود مواد پلاستیکی و ذرات حاصل از تخریب آنها به محیط‌های آبی منجر شود (Cheah *et al*., 2023).

توسعه مواد جایگزین با منشأ تجدیدپذیر و قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری مناسب، یکی از مسیرهای پیشنهادی برای کاهش وابستگی به پلیمرهای متداول است (Adetunji and Erasmus, 2024). در این میان، جلبک‌ها به دلیل قابلیت تولید زیست‌توده در سامانه‌های آبی، تنوع ترکیبات آلی و امکان استفاده از برخی جریان‌های غنی از مواد مغذی، به عنوان مواد اولیه بالقوه برای تولید محصولات زیستی مورد توجه قرار گرفته‌اند (Cheah *et al*., 2023; Sudhakar *et al*., 2024). با این‌حال، ظرفیت جلبک‌ها تنها به تولید مواد پلیمری محدود نمی‌شود. برخی گونه‌های جلبکی در سامانه‌های تصفیه آب و پساب نیز بررسی شده‌اند و می‌توانند بخشی از نیتروژن و فسفر موجود در محیط را جذب کنند. بررسی Nie و همکاران (۲۰۲۰) نشان می‌دهد که استفاده از ریزجلبک‌ها برای حذف مواد مغذی از پساب آبزی‌پروری ظرفیت قابل‌توجهی دارد. با این‌حال، تغییرات ترکیب پساب، محدودیت نور، هزینه برداشت زیست‌توده و پیچیدگی بهره‌برداری از موانع توسعه این سامانه‌ها هستند.

همچنین جلبک‌های رشته‌ای به دلیل ساختار قابل برداشت و قابلیت نگهداشت در سامانه‌های کشت، برای تصفیه برخی جریان‌های پساب مورد توجه قرار گرفته‌اند (Liu *et al*., 2020). این ویژگی‌ها امکان طرح یک رویکرد یکپارچه را فراهم می‌کند که در آن جلبک‌ها ابتدا برای بازیابی مواد مغذی و تولید زیست‌توده به کار گرفته شوند و سپس زیست‌توده برداشت‌شده، در صورت برخورداری از کیفیت مناسب، برای تولید مواد زیست‌پایه مورد استفاده قرار گیرد. چنین رویکردی می‌تواند به جای در نظر گرفتن زیست‌توده حاصل از تصفیه به عنوان یک پسماند، آن را بخشی از یک زنجیره ارزش زیستی در نظر بگیرد. تولید بیوپلاستیک از زیست‌توده جلبکی حاصل از پساب، مسیری در حال توسعه است و توجیه‌پذیری آن به کیفیت زیست‌توده، بازده تولید پلیمر، هزینه فرآوری و ویژگی‌های محصول نهایی وابسته است (Sharma *et al*., 2024; Chaudry *et al*., 2025).

در این زمینه، لازم است سه مفهوم ذیل شامل: ۱- استفاده از جلبک برای تصفیه آب ۲- استفاده از زیست‌توده جلبکی به عنوان ماده اولیه تولید مواد پلیمری ۳- کاربرد محصول نهایی در صنعت آبزی‌پروری به تفکیک مورد بررسی قرار گیرند.

در حال حاضر، نمی‌توان گفت همه پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر برای مثال، ۱۰ یا ۱۰۰ برابر سریع‌تر از پلاستیک‌های معمولی در دریا تجزیه می‌شوند. نوع پلیمر، دمای آب، فعالیت میکروبی، عمق، رسوبات و شکل و ضخامت محصول بر سرعت تجزیه اثر می‌گذارند. با این‌حال، در مقایسه با پلاستیک‌های متداول که ممکن است، صدها سال در محیط باقی بمانند. برخی بیوپلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر در شرایط مناسب قابلیت تجزیه زیستی بیشتری دارند و می‌توانند زمان ماندگاری و انباشت پسماندهای پلاستیکی را کاهش دهند.

مقاله حاضر، بررسی مسیرهای اصلی تولید بیوپلاستیک از زیست‌توده جلبکی، ظرفیت جلبک‌های رشته‌ای و ریزجلبک‌ها در بازیابی مواد مغذی امکان پیوند تصفیه پساب با تولید مواد زیستی و کاربردهای بالقوه این فناوری در صنعت آبزی‌پروری به‌ویژه آبزیان زینتی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

مفهوم بیوپلاستیک و تفاوت آن با پلاستیک زیست‌تخریب‌پذیر

بیوپلاستیک اصطلاحی کلی برای موادی است که ممکن است منشأ زیستی داشته باشند، زیست‌تخریب‌پذیر باشند یا هم‌زمان دارای هر دو ویژگی باشند. بنابراین، زیست‌پایه بودن یک پلیمر لزوماً به معنای قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری آن نیست (Adetunji and Erasmus, 2024).

پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA) را می‌توان از مواد اولیه زیستی تولید کرد، اما تخریب آن به شرایط محیطی و ویژگی‌های محصول وابسته است. در مقابل پلی‌هیدروکسی‌آلکانوات‌ها (PHA)

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.22034/JOA.13.3.29]

پلیمرهایی هستند که برخی میکروارگانیسم‌ها تولید می‌کنند و قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری آنها در شرایط مناسب تأیید شده است (Sudhakar *et al*., 2024). همچنین افزودن پودر جلبک به پلیمرهای نفت‌پایه می‌تواند سهم مواد زیستی را افزایش دهد، اما الزاماً محصولی کاملاً زیست‌تخریب‌پذیر ایجاد نمی‌کند، زیرا رفتار تخریب به ویژگی‌های هر دو جزء بستگی دارد (Cheah *et al*., 2023).

زیست‌تخریب‌پذیری به ساختار پلیمر و شرایط محیطی (دما، رطوبت، اکسیژن) و فعالیت میکروبی وابسته است. از این‌رو، تخریب در کمپوست صنعتی را نمی‌توان معادل تخریب در آب شیرین، آب شور یا رسوبات دانست. همچنین خردشدن ماده به ذرات کوچک‌تر لزوماً به معنای تجزیه زیستی کامل آن نیست (Cheah *et al*., 2023; Chaudry *et al*., 2025).

در صنعت آبزی‌پروری و آبزیان زینتی، علاوه بر دوام و قابلیت تخریب محصول، احتمال آزادسازی مواد، تغییر کیفیت آب و اثرات احتمالی بر آبزیان و میکروارگانیسم‌های مفید نیز باید بررسی شود. بنابراین، انتخاب بیوپلاستیک مناسب مستلزم ارزیابی هم‌زمان عملکرد محصول، زیست‌تخریب‌پذیری در محیط هدف و ایمنی زیستی آن است.

اهمیت جلبک‌ها در تولید بیوپلاستیک

جلبک‌ها از نظر ترکیب شیمیایی تنوع زیادی دارند و گونه‌های مختلف می‌توانند مقادیر متفاوتی از پروتئین، کربوهیدرات، پلی‌ساکارید، لیپید و سایر ترکیبات آلی را در زیست‌توده خود تجمع دهند. این تنوع، مسیرهای متعددی برای استفاده از جلبک‌ها در تولید مواد زیست‌پایه فراهم می‌کند (Cheah *et al*., 2023; Sudhakar *et al*., 2024).

یکی از مزیت‌های بالقوه جلبک‌ها آن است که تولید زیست‌توده آنها می‌تواند در سامانه‌های آبی و بدون نیاز گسترده به زمین‌های زراعی به‌خصوص در زمین‌های لم یزرع انجام شود. برخی گونه‌ها نیز از توانایی رشد در محیط‌های غنی از مواد مغذی برخوردارند که از این ظرفیت می‌توان در طراحی سامانه‌هایی استفاده کرد که علاوه بر تولید زیست‌توده، بخشی از مواد مغذی موجود در پساب را نیز بازیابی می‌کنند (Nie *et al*., 2020).

از دیدگاه زیست‌فناوری، ترکیب شیمیایی زیست‌توده جلبکی را می‌توان تا حدی با تغییر شرایط کشت (شدت نور، دسترسی به نیتروژن و فسفر، منبع کربن، شوری) و سایر عوامل محیطی تغییر داد. با این‌حال، شرایط بهینه برای بیشترین تولید زیست‌توده الزاماً همان شرایطی نیست که بیشترین مقدار ترکیب مورد نیاز را برای تولید پلیمر فراهم می‌کند (Adetunji and Erasmus, 2024).

در سامانه‌های یکپارچه تصفیه پساب و تولید مواد زیستی، باید میان دو هدف تعادل برقرار شود: نخست، حذف یا بازیابی مواد مغذی از آب؛ دوم، تولید زیست‌توده‌ای با ترکیب مناسب برای فرآوری صنعتی. در برخی موارد، افزایش نرخ رشد جلبک می‌تواند مطلوب باشد درحالی‌که در سایر موارد، ترکیب شیمیایی زیست‌توده یا سهولت برداشت آن اهمیت بیشتری دارد (Liu *et al*., 2020; Chaudry *et al*., 2025).

استفاده چندمرحله‌ای از زیست‌توده نیز می‌تواند از نظر اقتصادی سودمند باشد، برای مثال، در یک پالایشگاه زیستی ممکن است، ابتدا ترکیبات با ارزش بالا استخراج شوند و سپس بخش باقی‌مانده برای تولید مواد پلیمری یا سایر محصولات به‌کار رود. البته، مزیت اقتصادی این روش باید با توجه به هزینه جداسازی، کیفیت محصول و میزان بازیابی مواد ارزیابی شود (Sudhakar *et al*., 2024).

ترکیبات اصلی زیست‌توده جلبکی مؤثر در تولید بیوپلاستیک

الف: پلی‌ساکاریدها

پلی‌ساکاریدها از مهم‌ترین ترکیبات زیستی برای تولید فیلم‌ها و پوشش‌های پلیمری محسوب می‌شوند. بسیاری از پلی‌ساکاریدها می‌توانند شبکه‌های پلیمری تشکیل دهند که پس از فرآوری به شکل فیلم، پوشش یا کامپوزیت درمی‌آیند (Adetunji and Erasmus, 2024). در جلبک‌های دریایی، ترکیباتی مانند آلژینات، آگار و کاراگینان اهمیت ویژه‌ای دارند. در ریزجلبک‌ها و سیانوباکتری‌ها نیز برخی پلی‌ساکاریدهای داخل‌سلولی و خارج‌سلولی می‌توانند در تولید مواد زیستی نقش داشته باشند. با این‌حال، نوع پلی‌ساکارید و مقدار آن میان گونه‌ها و شرایط کشت متفاوت است (Sudhakar *et al*., 2024). پلی‌ساکاریدهای خالص‌شده ممکن است ویژگی‌های فیلم‌سازی مناسبی داشته باشند، اما مقاومت مکانیکی و پایداری آن‌ها در برابر آب می‌تواند محدود باشد .ازاین‌رو، استفاده از نرم‌کننده‌ها یا ترکیب چند پلیمر برای اصلاح خواص محصول مورد بررسی قرار می‌گیرد (Adetunji and Erasmus, 2024).

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.22034/JOA.13.3.29]

ب: پروتئین‌ها

پروتئین‌های جلبکی نیز می‌توانند در ساخت فیلم‌های زیستی نقش داشته باشند. بسیاری از ریزجلبک‌ها و سیانوباکتری‌ها دارای مقدار قابل‌توجهی پروتئین هستند. با این‌حال، پروتئین خام به‌تنهایی لزوماً یک ماده فیلم‌ساز مناسب نیست و خواص محصول به نوع پروتئین، روش استخراج، برهم‌کنش‌های مولکولی و شرایط فرآوری بستگی دارد (Cheah *et al*., 2023). فیلم‌های پروتئینی می‌توانند از نظر قابلیت تشکیل شبکه و خواص سدکنندگی مورد توجه باشند، اما حساسیت به رطوبت و محدودیت‌های مکانیکی ممکن است استفاده از آنها را در محیط‌های مرطوب دشوار کند. این مسئله برای کاربردهای آبزی‌پروری که بسته‌بندی و تجهیزات اغلب در معرض رطوبت قرار دارند، اهمیت ویژه‌ای دارد.

پ: پلی‌هیدروکسی‌آلکانوات‌ها

پلی‌هیدروکسی‌آلکانوات‌ها (PHA) گروهی از پلی‌استرهای زیستی هستند که برخی میکروارگانیسم‌ها آنها را در شرایط خاص به عنوان ذخیره کربن و انرژی تولید می‌کنند (Feyzi *et al*., 2025). تولید PHA با استفاده از زیست‌توده جلبکی ممکن است از چند مسیر انجام شود: تولید مستقیم به‌وسیله برخی سامانه‌های زیستی، استفاده از ترکیبات استخراجی از جلبک به عنوان خوراک میکروبی یا تبدیل زیست‌توده جلبکی به مواد واسطه و سپس تولید پلیمر (Sudhakar *et al*., 2024; Chaudry *et al*., 2025). مسیرهای غیرمستقیم، جلبک ممکن است منبع کربن باشد، اما تولید نهایی پلیمر به فعالیت میکروارگانیسم تولیدکننده وابسته است. بنابراین، نباید هر نوع تجمع مواد آلی در زیست‌توده جلبکی را معادل تولید مستقیم PHAدر نظر گرفت.

ت: لیپیدها و سایر ترکیبات آلی

لیپیدهای جلبکی بیشتر در تولید سوخت‌های زیستی و برخی مواد شیمیایی مورد توجه قرار گرفته‌اند، اما با توجه به ترکیب خوراک و فرایند تبدیل، می‌توان از آنها برای تولید مواد واسطه مورد استفاده در ساخت پلیمرها نیز بهره گرفت .استفاده از این مسیرها نیازمند بررسی بازده تبدیل، هزینه جداسازی و میزان مصرف مواد شیمیایی است (Cheah *et al*., 2023; Sudhakar *et al*., 2024).

در مجموع، انتخاب گونه جلبکی باید بر اساس ترکیب شیمیایی، سرعت رشد، قابلیت برداشت، سازگاری با شرایط کشت و مسیر نهایی تولید محصول انجام شود؛ نه صرفاً بر اساس مقدار پروتئین یا زیست‌توده کل.

مسیرهای تولید بیوپلاستیک از زیست‌توده جلبکی

تولید بیوپلاستیک از جلبک‌ها به یک روش محدود نیست. انتخاب مسیر تولید به نوع جلبک، ترکیبات موجود در زیست‌توده، خواص مورد انتظار از محصول و هزینه‌های فرآوری بستگی دارد . سه مسیر کلی شامل استفاده مستقیم از زیست‌توده، استخراج ترکیبات زیستی و تبدیل شیمیایی یا زیستی مواد اولیه جلبکی قابل تفکیک است (Adetunji and Erasmus, 2024; Chaudry *et al*., 2025).

در روش استفاده مستقیم از زیست‌توده جلبکی زیست‌توده خشک و آسیاب‌شده جلبکی با یک یا چند ماده پلیمری ترکیب می‌شود و محصولی به شکل فیلم، ورق یا قطعه قالب‌گیری‌شده به دست می‌آید. این روش از نظر فرایندی می‌تواند ساده‌تر از استخراج و خالص‌سازی کامل ترکیبات باشد و امکان استفاده از بخش بزرگی از زیست‌توده را فراهم کند (Sudhakar *et al*., 2024). با این‌حال، استفاده مستقیم از زیست‌توده ممکن است خواص مکانیکی، رنگ، بو، یکنواختی و مقاومت در برابر رطوبت محصول را تحت تأثیر قرار دهد. برای مثال، افزایش مقدار پودر جلبک در یک کامپوزیت ممکن است سهم ماده زیستی را بالا ببرد، اما در صورت ایجاد ناپیوستگی در ماتریس پلیمری، استحکام کششی یا مقاومت در برابر پارگی کاهش یابد .بنابراین، مقدار مناسب زیست‌توده باید با آزمون‌های تجربی تعیین شود. اما در روش استخراج ترکیبات پلیمری ترکیبات خاصی مانند پلی‌ساکاریدها یا سایر اجزای قابل استفاده از زیست‌توده جلبکی جدا می‌شوند و پس از آماده‌سازی، به عنوان ماده اولیه تولید فیلم یا کامپوزیت به‌کار می‌روند. کنترل ترکیب ماده اولیه در این مسیر می‌تواند آسان‌تر باشد، اما مراحل استخراج، خالص‌سازی، شست‌وشو و خشک‌کردن هزینه و مصرف انرژی را افزایش می‌دهد (Adetunji and Erasmus, 2024). برای انتخاب این روش باید بررسی شود که آیا بهبود خواص محصول نهایی، هزینه اضافی استخراج را توجیه می‌کند یا خیر. در کاربردهایی که خلوص و یکنواختی ماده اهمیت زیادی دارد، استخراج ترکیبات منتخب ممکن است مناسب‌تر از استفاده مستقیم از زیست‌توده باشد.

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.22034/JOA.13.3.29]

در مسیر سوم (تبدیل زیستی یا شیمیایی زیست‌توده به مواد اولیه)، پلیمر ابتدا کربوهیدرات‌ها و سایر ترکیبات آلی جلبکی به مواد واسطی تبدیل می شوند که می‌توانند برای تولید پلیمرها استفاده شوند. در برخی فرایندها، زیست‌توده ابتدا به قندهای قابل تخمیر تبدیل می‌شود و سپس میکروارگانیسم‌ها این مواد را به ترکیبات مورد نیاز برای ساخت پلیمر تبدیل می‌کنند. تولید برخی پلیمرها از طریق مسیرهای تخمیری یا تبدیل شیمیایی، از جمله مسیرهای مورد بررسی در پژوهش‌های بیوپلاستیک جلبکی است. در این مسیرها، بازده تبدیل، نیاز به پیش‌تیمار، مصرف مواد شیمیایی، تولید پسماند و هزینه جداسازی محصول، عوامل تعیین‌کننده هستند. استفاده از زیست‌توده حاصل از تصفیه پساب نیز ممکن است به مراحل اضافی شست‌وشو یا حذف آلاینده‌ها نیاز داشته باشد و این موضوع باید در ارزیابی اقتصادی لحاظ شود. در جدول ۱ مقایسه کلی در خصوص مراحل و محدودیت‌های تولید بیوپلاستیک‌ها ارائه شده است. این مقایسه کیفی است و رتبه‌بندی اقتصادی قطعی محسوب نمی‌شود، زیرا هزینه نهایی هر مسیر به گونه جلبکی، مقیاس تولید، کیفیت زیست‌توده، قیمت مواد کمکی و مشخصات محصول وابسته است (Chaudry *et al*., 2025; Sudhakar *et al*., 2024).

جدول ۱: مقایسه کلی مسیرهای تولید بیوپلاستیک به‌وسیله ریز جلبک‌ها

مسیر تولید	مزیت بالقوه	محدودیت اصلی	کاربردهای اولیه قابل بررسی
استفاده مستقیم از زیست‌توده	کاهش نیاز به استخراج کامل ترکیبات	تغییرپذیری خواص، رنگ و حساسیت به رطوبت	قطعات و بسته‌بندی‌های غیرحساس
استخراج ترکیبات جلبکی	کنترل بهتر ترکیب ماده اولیه	هزینه استخراج و خالص‌سازی	فیلم‌ها و پوشش‌های زیستی
تبدیل زیستی یا شیمیایی	امکان تولید مواد واسطه یا پلیمرهای مشخص	پیچیدگی فرایند و هزینه تبدیل	پلیمرهای تخصصی و محصولات مهندسی‌شده
استفاده از زیست‌توده حاصل از پساب	امکان پیوند تصفیه آب با بازیابی منابع	خطر آلودگی و هزینه کنترل کیفیت	محصولات غیرغذایی و غیرتماسی، مشروط به ارزیابی ایمنی

ظرفیت اسپیرولینا و جلبک‌های رشته‌ای در تولید بیوپلاستیک

اسپیرولینا و ریز جلبک‌ها

اسپیرولینا سیانوباکتری‌های متعلق به جنس *Limnospira* که در منابع قدیمی‌تر اغلب با نام *Arthrospira* شناخته می‌شوند، به دلیل رشد در شرایط کشت کنترل‌شده و تولید زیست‌توده غنی از ترکیبات آلی در زیست‌فناوری مورد توجه قرار گرفته‌اند (Hooti and Manaffar, 2003; Karchin *et al*., 2026). بر اساس مطالعات موجود ترکیب این زیست‌توده با سایر پلیمرها می‌تواند در تولید کامپوزیت‌ها یا مواد فیلم‌ساز مورد توجه قرار گیرد (Cheah *et al*., 2023; Sudhakar *et al*., 2024; Feyzi *et al*., 2025).

با این‌حال، فراوانی پروتئین در *Limnospira* به‌خودی‌خود به معنای مناسب‌بودن آن برای تولید مستقیم بیوپلاستیک نیست. برای انتخاب این سیانوباکتری به عنوان ماده اولیه باید مشخص شود که کدام بخش از زیست‌توده، چه نقشی در محصول نهایی خواهد داشت و آیا هزینه آماده‌سازی آن با عملکرد محصول تناسب دارد یا خیر. در صورت استفاده از *Limnospira* در تولید کامپوزیت، ویژگی‌هایی مانند اندازه ذرات، درصد زیست‌توده، نوع ماتریس پلیمری، نرم‌کننده، شرایط اختلاط و روش قالب‌گیری باید بهینه شوند. همچنین پایداری محصول در برابر رطوبت و خواص مکانیکی آن باید با مواد متداول مورد استفاده در صنعت آبزی‌پروری مقایسه شود.

علاوه بر اسپیرولینا، ریزجلبک‌های سبز مانند *Chlorella vulgaris* و *Chlamydomonas reinhardtii* نیز در پژوهش‌های مرتبط با تولید بیوپلاستیک و زیست‌پلیمرها مورد توجه قرار گرفته‌اند. زیست‌توده این ریزجلبک‌ها حاوی پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها و لیپیدهایی است که می‌توانند به عنوان مواد اولیه یا اجزاء ترکیبی در ساخت مواد زیستی استفاده شوند. همچنین برخی ریزجلبک‌ها و سیانوباکتری‌ها از قابلیت تولید پلی‌هیدروکسی‌آلکانوات‌ها (PHA) یا پیش‌سازهای آنها برخوردارند، ترکیباتی که در توسعه پلیمرهای زیست‌پایه اهمیت دارند. یکی از رویکردهای مهم در این زمینه، استفاده مستقیم از زیست‌توده جلبکی یا بقایای آن پس از استخراج ترکیبات

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-11-29]
[DOI: 10.22034/JOA.13.3.29]

ارزشمند، در ساخت فیلم‌ها و کامپوزیت‌های زیستی است. در این روش، زیست‌توده جلبکی می‌تواند با پلیمرهای زیست‌پایه یا سایر مواد سازگار ترکیب شود تا ویژگی‌هایی مانند استحکام، انعطاف‌پذیری و خواص سدکنندگی محصول تنظیم شوند (Dino and Kishore, 2024; Mogany *et al*., 2024).

جلبک‌های رشته‌ای

جلبک‌های رشته‌ای، برخلاف بسیاری از ریزجلبک‌های تک‌سلولی، می‌توانند به صورت توده‌های رشته‌ای برداشت شوند. این ویژگی در برخی سامانه‌های تصفیه پساب، جداسازی زیست‌توده از آب را آسان‌تر می‌کند و می‌تواند هزینه و پیچیدگی برداشت را کاهش دهد. گونه‌هایی از جنس‌های *Oedogonium*، *Cladophora*، *Spirogyra* و *Stigeoclonium* در پژوهش‌های مربوط به تصفیه آب و پساب مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با این‌حال، عملکرد آنها به نوع پساب، دما، شدت نور، بار مواد مغذی، ترکیب جامعه میکروبی و طراحی سامانه وابسته است (Liu *et al*., 2020).

قابلیت برداشت آسان‌تر یک جلبک رشته‌ای می‌تواند برای طراحی سامانه‌های یکپارچه اهمیت داشته باشد، اما به‌تنهایی نشان نمی‌دهد که زیست‌توده آن برای تولید پلیمر مناسب است. برای این منظور باید مقدار ترکیبات مورد نیاز، بازده فرآوری و خواص ماده نهایی نیز تعیین شود.

تصفیه پساب با جلبک‌ها و استفاده از زیست‌توده برای تولید بیوپلاستیک

پساب‌های حاصل از آبزی‌پروری و برخی فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی ممکن است حاوی نیتروژن، فسفر و مواد آلی باشند. ورود کنترل‌نشده این مواد به محیط‌های طبیعی می‌تواند به غنی‌شدن بیش از حد آب و اختلال در تعادل اکولوژیک منجر شود. برخی ریزجلبک‌ها با جذب مواد مغذی برای رشد و برخی سازوکارهای زیستی و فیزیکوشیمیایی می‌توانند در کاهش بخشی از بار آلودگی نقش داشته باشند (Nie *et al*., 2020).

میزان حذف آلاینده‌ها به نوع ماده، گونه جلبکی، زمان ماند، شدت نور، دما، pH، غلظت اولیه مواد مغذی و ویژگی‌های سامانه بستگی دارد. همچنین کاهش غلظت یک ماده در آب لزوماً به معنای نابودی آن نیست؛ ممکن است بخشی از ماده به زیست‌توده منتقل شده باشد. بنابراین، ارزیابی عملکرد تصفیه باید کیفیت آب خروجی و ترکیب زیست‌توده برداشت‌شده را نیز در نظر بگیرد.

در مورد جلبک‌های رشته‌ای، سهولت برداشت می‌تواند از مزیت‌های مهم سامانه باشد. این جلبک‌ها از قابلیت نگهداشت در راکتور یا حوضچه برخوردارند و در برخی شرایط، جداسازی آنها از آب آسان‌تر از جداسازی ریزجلبک‌های تک‌سلولی است (Liu *et al*., 2020). با این‌حال، انتخاب گونه و طراحی سامانه باید بر اساس ویژگی‌های واقعی پساب انجام شود.

در رویکرد یکپارچه، ابتدا از جلبک برای رشد در پساب و جذب بخشی از مواد مغذی استفاده می‌شود. سپس زیست‌توده برداشت و از نظر ترکیب شیمیایی و وجود آلاینده‌های احتمالی ارزیابی می‌شود. در صورت مناسب‌بودن کیفیت، زیست‌توده می‌تواند مستقیماً در کامپوزیت‌ها استفاده شود یا پس از استخراج و تبدیل، به ماده اولیه تولید پلیمر تبدیل گردد (Sharma *et al*., 2024; Chaudry *et al*., 2025).

این رویکرد از نظر مفهومی می‌تواند دو هدف را به یکدیگر پیوند دهد: بهبود کیفیت پساب و ایجاد ارزش افزوده از زیست‌توده. با این‌حال، کاهش هزینه تصفیه یا افزایش سودآوری فقط زمانی قابل انتظار است که هزینه‌های کشت، برداشت، شست‌وشو، خشک‌کردن، کنترل کیفیت و فرآوری در مجموع قابل‌قبول باشند. از این‌رو، استفاده از زیست‌توده پساب در تولید بیوپلاستیک باید با موازنه جرم، ارزیابی اقتصادی و بررسی چرخه عمر همراه شود.

همچنین برای آغاز مطالعات یکپارچه، جریان‌هایی با ترکیب نسبتاً مشخص و بار آلودگی قابل‌کنترل، مانند برخی پساب‌های آبزی‌پروری پس از پیش‌تصفیه، می‌توانند گزینه‌های پژوهشی مناسبی باشند. با این‌حال، حتی در این موارد نیز باید آلودگی میکروبی، فلزات و سایر آلاینده‌های مرتبط با منشأ پساب بررسی شوند (Nie *et al*., 2020).

در مقابل، پساب‌های صنعتی با ترکیب نامشخص یا احتمال بالای آلودگی خطرناک، بدون شناسایی آلاینده‌ها و ارزیابی دقیق، نباید به عنوان منبع آماده برای تولید مواد زیستی معرفی شوند. از این‌رو، زیست‌توده حاصل از تصفیه پساب ممکن است، حاوی فلزات سنگین، ترکیبات آلی و عوامل میکروبی باشد. بنابراین، حذف آلاینده‌ها از آب به‌تنهایی تضمین‌کننده ایمنی زیست‌توده نیست و پیش از استفاده، باید آلودگی‌های احتمالی و امکان آزادسازی آنها از محصول نهایی ارزیابی شود.

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.22034/JOA.13.3.29]

این‌که آیا یک گونه می‌تواند هم‌زمان برای تصفیه پساب و تولید بیوپلاستیک مناسب باشد نیز یکی از مقولات مهم در این حوزه زیست‌فناوری است. گونه‌ای که در حذف مواد مغذی عملکرد خوبی دارد، ممکن است از نظر مقدار پلی‌ساکارید، قابلیت فرآوری یا خواص مکانیکی محصول نهایی برتری نداشته باشد. برعکس، گونه‌ای که ترکیب شیمیایی مطلوبی برای تولید مواد پلیمری دارد، ممکن است در پساب موردنظر رشد ضعیفی نشان دهد یا نسبت به آلاینده‌های موجود حساس باشد. از این‌رو، بهتر است انتخاب گونه بر اساس ارزیابی هم‌زمان دو مجموعه شاخص انجام شود: شاخص‌های تصفیه، شامل نرخ حذف نیتروژن و فسفر، رشد، پایداری کشت و قابلیت برداشت و شاخص‌های تولید ماده، شامل ترکیب زیست‌توده، بازده فرآوری، خواص مکانیکی و رفتار تخریب محصول. در برخی موارد، استفاده از دو مرحله کشت یا دو گونه متفاوت می‌تواند از تلاش برای یافتن یک گونه با عملکرد بهینه در همه ویژگی‌ها عملی‌تر باشد (Liu *et al*., 2020; Chaudry *et al*., 2025).

اقتصاد چرخشی و استفاده چندمرحله‌ای از زیست‌توده جلبکی

اقتصاد چرخشی در زیست‌فناوری جلبکی بر پیوند تصفیه پساب، بازیابی مواد مغذی و تولید محصولات زیستی با ارزش افزوده تأکید دارد (Chaudry *et al*., 2025; Sharma *et al*., 2024).

در این رویکرد، بخشی از پساب آبزی‌پروری پس از پیش‌تصفیه می‌تواند برای کشت جلبک استفاده شود؛ جلبک‌ها بخشی از نیتروژن و فسفر را جذب می‌کنند و زیست‌توده حاصل، پس از ارزیابی کیفیت، ممکن است به عنوان ماده اولیه تولید بیوپلاستیک یا کامپوزیت به‌کار رود (Nie *et al*., 2020).

یکی از رویکردهای نوآورانه، بازیابی آب و مواد مغذی همراه با استفاده آبشاری از زیست‌توده است. بدین معنا که ابتدا ترکیبات با ارزش‌تر استخراج‌شده و سپس بخش باقی‌مانده برای تولید مواد زیستی استفاده شود. با این‌حال، این راهبرد تنها زمانی توجیه‌پذیر است که کیفیت زیست‌توده، احتمال وجود آلاینده‌ها، هزینه جداسازی و امکان استفاده از باقی‌مانده به طور جداگانه ارزیابی شوند (Sudhakar *et al*., 2024). همچنین استفاده از زیست‌توده مرطوب یا روش‌های کم‌مصرف آبگیری، در صورت سازگاری با فرایند تولید، می‌تواند نیاز انرژی را کاهش دهد. در نهایت، مزیت واقعی این سامانه باید با تحلیل اقتصادی و ارزیابی چرخه عمر مشخص شود (شکل ۱).



شکل ۱: نمایی شماتیک از اقتصاد چرخشی در تولید بیوپلاستیک‌های جلبکی و کاربرد آن در آبزی‌پروری و صنعت آبزیان زینتی

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.22034/JOA.13.3.29]

کاربردهای بالقوه بیوپلاستیک‌ها در صنعت آبزی‌پروری

صنعت آبزیان شامل مجموعه‌ای از فعالیت‌ها از صید وصیادی، تولید خوراک و پرورش تا برداشت، نگهداری، بسته‌بندی و انتقال آبزیان است. در هر یک از این مراحل، مواد پلاستیکی با ویژگی‌های متفاوت استفاده می‌شوند. بنابراین، جایگزینی آنها با بیوپلاستیک‌ها باید بر اساس عملکرد مورد نیاز هر محصول انجام شود و نمی‌توان یک فرمولاسیون را برای همه کاربردها مناسب دانست.

بسته‌بندی خوراک آبزیان

بسته‌بندی خوراک یکی از کاربردهای اولیه قابل بررسی برای مواد زیست‌پایه است. بسته‌بندی مناسب باید در برابر پارگی و سوراخ‌شدن مقاومت داشته باشد و از خوراک در برابر رطوبت، اکسیژن و آلودگی محافظت کند. در خوراک‌های خشک، کنترل جذب رطوبت اهمیت زیادی دارد، زیرا افزایش رطوبت می‌تواند کیفیت نگهداری و پایداری محصول را کاهش دهد. فیلم‌ها و کامپوزیت‌های جلبکی ممکن است برای بسته‌بندی ثانویه یا بسته‌بندی خوراک در شرایط کنترل‌شده بررسی شوند. با این‌حال، برای بسته‌بندی مستقیم خوراک باید نفوذپذیری بخار آب و اکسیژن، مقاومت در برابر پارگی، پایداری در طول نگهداری و احتمال مهاجرت مواد از بسته‌بندی به خوراک ارزیابی شود.

همچنین خوراک ماهیان زینتی معمولاً در بسته‌بندی‌هایی عرضه می‌شود که باید کیفیت محصول را در دوره نگهداری حفظ کنند. در این بخش، فیلم‌ها یا کامپوزیت‌های جلبکی می‌توانند به عنوان مواد بالقوه برای بسته‌بندی بیرونی یا ساختارهای چندلایه بررسی شوند. اگر ماده جدید با خوراک تماس مستقیم داشته باشد، باید احتمال مهاجرت مواد، انتقال بو یا ترکیبات نامطلوب و تغییر ویژگی‌های نگهداری خوراک ارزیابی شود. این موضوع به‌ویژه برای خوراک‌های حساس به رطوبت اهمیت دارد.

بسته‌بندی فعال زیست‌تخریب‌پذیر حاوی ترکیبات طبیعی ضدمیکروبی می‌تواند رویکردی نویدبخش برای بهبود ماندگاری خوراک آبزیان زینتی باشد. خوراک‌های خشک و پلت‌شده این آبزیان ممکن است در طول نگهداری تحت تأثیر جذب رطوبت، فساد میکروبی و اکسیداسیون چربی‌ها قرار گیرند؛ فرایندهایی که می‌توانند کیفیت تغذیه‌ای خوراک را کاهش دهند (Kop *et al*., 2019; O'Keefe and Campabadal, 2022). در این زمینه، استفاده از فیلم‌های زیست‌پایه حاوی زیست‌توده یا عصاره ریزجلبک‌ها، به دلیل قابلیت ایجاد فعالیت آنتی‌اکسیدانی و ضدمیکروبی، ظرفیت بالقوه‌ای برای توسعه بسته‌بندی فعال دارد (Dakhili *et al*., 2025). بر این اساس، طراحی کیسه‌های زیست‌تخریب‌پذیر حاوی ترکیبات زیست‌فعال جلبکی می‌تواند به عنوان رویکردی نوآورانه برای حفظ کیفیت خوراک ماهیان زینتی بررسی شود. با این‌حال، اثربخشی این سامانه باید از طریق ارزیابی رشد میکروبی، اکسیداسیون چربی، نفوذپذیری رطوبت و اکسیژن، خواص مکانیکی فیلم و ایمنی ترکیبات مهاجرت‌کننده به خوراک تعیین شود؛ زیرا شواهد موجود درباره بسته‌بندی فعال مواد غذایی و نگهداری خوراک آبزیان، به‌تنهایی اثربخشی این فناوری را برای خوراک ماهیان زینتی اثبات نمی‌کنند.

صید، پرورش و انتقال آبزیان زینتی

ماندگاری طولانی تجهیزات پلاستیکی صید آبزیان (Ghost Nets) در محیط‌های آبی آنها را به یکی از معضلات جهانی آلودگی دریایی و تهدید تنوع زیستی تبدیل کرده است. استفاده از پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر در ساخت تورها و تجهیزات صیادی به عنوان راهکاری بالقوه برای کاهش آلودگی ناشی از تورهای رهاشده و پدیده صید ارواح مورد توجه قرار گرفته است. در یک مطالعه میدانی، تورهای ساخته‌شده از مخلوط پلی‌استری زیست‌پایه به مدت ۱۲ ماه در فعالیت صیادی آزمایش شدند با این‌حال، استحکام کمتر، سختی بیشتر و هزینه بالا از محدودیت‌های استفاده گسترده از آنها گزارش شد (Loizidou *et al*., 2024). همچنین بررسی تجهیزات صیادی ساخته‌شده از پلی‌بوتیلن سوکسینات (PBS) در محیط رسوبی دریایی نشان داد که پس از ۱۸۰ روز، حدود ۲۷/۳ درصد از ماده آزمایش‌شده به دی‌اکسیدکربن تبدیل شده بود؛ موضوعی که نشان می‌دهد زیست‌تخریب‌پذیری لزوماً به معنای تجزیه سریع و کامل در دریا نیست (Kim *et al*., 2023). به‌علاوه، پژوهش‌های مرتبط با طناب‌های زیست‌پایه در آبزی‌پروری و مرورهای جدید درباره مواد زیست‌تخریب‌پذیر برای تورها، بر ضرورت ایجاد تعادل میان دوام مکانیکی حین استفاده و قابلیت تجزیه پس از رهاشدن تأکید دارند (Arantzamendi *et al*., 2023; Koričan and Vladimir, 2026). در این عرصه، تولید الیاف با استفاده از پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر و مواد اولیه مشتق از جلبک‌ها می‌تواند مسیر پژوهشی امیدوارکننده‌ای باشد. با این‌حال، ارزیابی

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.22034/JOA.13.3.29]

استحکام کششی، مقاومت گره‌ها، کارایی صید، تجزیه و معدنی‌شدن در محیط دریایی و سمیت احتمالی محصولات تجزیه، پیش از پیشنهاد کاربرد عملی این مواد ضروری است.
بسته‌بندی و ملزومات پرورش و فرآوری آبزیان از دیگر کاربردهای بالقوه مواد جلبکی هستند. استفاده از این مواد به خواص سدکنندگی و مکانیکی، مقاومت در برابر رطوبت و نمک، ایمنی تماس با محصول و شرایط نگهداری وابسته است. تجارت ماهیان زینتی زنده نیز می‌تواند زمینه‌ای برای توسعه این کاربردها باشد؛ به‌طوری‌که صادرات ماهیان زینتی زنده تایلند در سال ۲۰۲۴ حدود ۱۹،۹۹ میلیون دلار و ۶۶۰،۷ تن گزارش شده است (World Bank, 2024). این آمار شامل ماهیان زینتی آب شیرین و دریایی است و سهم ماهیان دریایی صیدشده را مشخص نمی‌کند. در این زمینه، توسعه فیلم‌های زیست‌پایه حاوی ترکیبات جلبکی با نفوذپذیری گازی تنظیم‌شده، مقاومت مکانیکی مناسب و پایداری در برابر آب می‌تواند مسیری برای بررسی جایگزینی بخشی از پلاستیک‌های متداول در بسته‌بندی و حمل آبزیان زنده باشد. با این‌حال، نفوذپذیری اکسیژن و دی‌اکسیدکربن، آب‌بندی، مقاومت در برابر پارگی و ایمنی تماس با آبزیان باید به طور تجربی ارزیابی شوند. زیست‌تخریب‌پذیری به‌تنهایی برای جایگزینی پلیمرهای نفت‌پایه کافی نیست و باید عملکرد و پیامدهای زیست‌محیطی مواد نیز بررسی شود. در مراحل اولیه توسعه، بسته‌بندی‌های ثانویه و قطعات فاقد تماس مستقیم با آبزیان می‌توانند گزینه‌های واقع‌بینانه‌تری باشند.
صنعت آبزیان زینتی از نظر مقیاس، نوع محصول و شیوه توزیع با برخی شاخه‌های دیگر آبزی‌پروری تفاوت دارد. در این صنعت، ماهی‌ها و سایر آبزیان زینتی از مراکز تکثیر به مراکز عمده‌فروشی، فروشگاه‌ها و در نهایت مصرف‌کنندگان منتقل می‌شوند. بسته‌بندی و تجهیزات باید ضمن تحمل حمل‌ونقل، کیفیت آب و سلامت موجودات زنده را حفظ کنند. از این‌رو، کاربرد بیوپلاستیک‌های جلبکی در این صنعت باید بر اساس میزان تماس محصول با آبزیان و حساسیت آن کاربرد اولویت‌بندی شود.

چالش‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی

هزینه تولید زیست‌توده، تأمین نور و مواد مغذی، برداشت و آبگیری، خشک‌کردن، استخراج و اصلاح خواص پلیمر از عوامل مؤثر بر قیمت نهایی بیوپلاستیک‌های جلبکی هستند (Adetunji and Erasmus, 2024; Chaudry *et al*., 2025). برداشت ریزجلبک‌های تک‌سلولی از محیط‌های رقیق می‌تواند پرهزینه باشد درحالی‌که جداسازی برخی جلبک‌های رشته‌ای ممکن است آسان‌تر باشد، اما عملکرد نهایی به گونه و روش برداشت وابسته است (Liu *et al*., 2020).
همچنین رقابت با پلاستیک‌های متداول مستلزم دستیابی به خواص مکانیکی، پایداری در برابر آب، قابلیت فرآوری و قیمت قابل‌قبول است. در صنعت آبزیان زینتی، بسته‌بندی‌های ثانویه و برخی ملزومات فاقد تماس مستقیم با آبزیان می‌توانند گزینه‌هایی برای ارزیابی اولیه باشند درحالی‌که محصولات دارای تماس مستقیم با آب یا آبزیان به آزمون‌های ایمنی دقیق‌تری نیاز دارند.
ارزیابی چرخه عمر باید مصرف انرژی، مواد شیمیایی و آب، حمل‌ونقل، عملکرد محصول و مدیریت پایان عمر را دربرگیرد. در سامانه‌های مبتنی بر پساب، مزایای تصفیه و بازیابی مواد مغذی نیز باید در محاسبات لحاظ شوند. در نتیجه، زیست‌پایه‌بودن یا زیست‌تخریب‌پذیری به‌تنهایی تضمین‌کننده برتری زیست‌محیطی نیست و این برتری باید با داده‌های تجربی و مقایسه با محصولات مرجع اثبات شود (Cheah *et al*., 2023; Chaudry *et al*., 2025).
یک دیدگاه مهم برای پژوهش‌های آینده، تخصیص زیست‌توده به محصول بر اساس کیفیت و هزینه آماده‌سازی آن است. برای مثال، زیست‌توده حاصل از پساب، با توجه به نتایج آزمون‌های ایمنی و ویژگی‌های فنی، ممکن است برای برخی مواد غیرغذایی مناسب‌تر از کاربردهای حساس باشد. این تصمیم‌گیری مرحله‌ای می‌تواند از صرف هزینه برای خالص‌سازی غیرضروری جلوگیری کند و مسیر توسعه محصول را واقع‌بینانه‌تر سازد. بر این اساس، برنامه پژوهشی باید از غربالگری گونه‌ها و ارزیابی پساب آغاز شود، سپس به بررسی ایمنی زیست‌توده، ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی و آزمون در شرایط واقعی برسد و در نهایت با تحلیل اقتصادی و چرخه عمر تکمیل شود (Chaudry *et al*., 2025; Sudhakar *et al*., 2024).

بحث و نتیجه‌گیری

تولید بیوپلاستیک از زیست‌توده جلبکی فرصتی برای توسعه مواد زیست‌پایه و بهره‌برداری کارآمدتر از منابع تجدیدپذیر فراهم می‌کند. یکی از مسیرهای امیدوارکننده، پیوند کشت جلبک با

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-11-29]
[DOI: 10.22034/JOA.13.3.29]

تصفیه پساب و بازیابی مواد مغذی است؛ رویکردی که می‌تواند ضمن کاهش نیاز به مواد مغذی مورد نیاز برای کشت، زیست‌توده قابل استفاده برای تولید مواد زیستی فراهم کند. با این‌حال، کیفیت پساب، احتمال تجمع آلاینده‌ها، هزینه برداشت و فرآوری و ویژگی‌های محصول نهایی، عوامل تعیین‌کننده در امکان‌پذیری این سامانه هستند (Nie *et al*., 2020; Sharma *et al*., 2024).

زیست‌توده جلبکی را می‌توان مستقیماً به عنوان جزء سازنده یا تقویت‌کننده کامپوزیت‌های زیستی به‌کار برد یا پس از استخراج و تبدیل ترکیبات آن، برای تولید مواد پلیمری استفاده کرد. انتخاب میان این مسیرها به ترکیب شیمیایی زیست‌توده، خواص مکانیکی موردنیاز، هزینه تولید و آثار زیست‌محیطی فرایند بستگی دارد. همچنین زیست‌پایه بودن محصول به‌تنهایی نشان‌دهنده زیست‌تخریب‌پذیری کامل یا برتری زیست‌محیطی آن نیست و این ویژگی‌ها باید به طور مستقل ارزیابی شوند. در صنعت آبزی‌پروری و آبزیان زینتی، بسته‌بندی‌های ثانویه، بسته‌بندی محصولات خشک و برخی ملزومات مصرفی مراکز تکثیر و فروش می‌توانند از گزینه‌های اولیه برای بررسی کاربرد این مواد باشند. در مقابل، استفاده از بیوپلاستیک‌های جلبکی در کیسه‌های انتقال ماهی یا تجهیزات غوطه‌ور در آکواریوم، به دلیل تماس مستقیم با آبزیان، نیازمند بررسی دقیق‌تر دوام، آزادسازی ترکیبات و ذرات، تغییر کیفیت آب و سمیت احتمالی است. افزون بر این، قابلیت تخریب در کمپوست صنعتی را نمی‌توان بدون شواهد تجربی به آب شیرین، آب شور یا رسوبات تعمیم داد (Cheah *et al*., 2023; Sudhakar *et al*., 2024).

در مجموع، توسعه موفق بیوپلاستیک‌های جلبکی به انتخاب ماده اولیه مناسب، بهینه‌سازی فرایند تولید، ارزیابی عملکرد و ایمنی محصول و بررسی اقتصادی و زیست‌محیطی چرخه عمر آن وابسته است. پیوند تولید زیست‌توده با تصفیه پساب و استفاده هدفمند از محصولات حاصل می‌تواند به افزایش ارزش افزوده و تقویت اقتصاد چرخشی کمک کند؛ مشروط بر آن‌که کیفیت مواد اولیه و ایمنی محصول تضمین شود. از این‌رو، مسیر واقع‌بینانه توسعه این فناوری، تمرکز بر کاربردهای مشخص و قابل ارزیابی و حرکت تدریجی به سوی محصولاتی است که از نظر فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی برای صنعت آبزی‌پروری و آبزیان زینتی توجیه‌پذیر باشند.

منابع

Adetunji, A.I. and Erasmus, M., 2024. Green synthesis of bioplastics from microalgae: A state-of-the-art review. *Polymers,* 16(10), 1322. https://doi.org/10.3390/polym16101322.

Arantzamendi, L., Andrés, M., Basurko, O.C. and Suárez, M.J., 2023. Circular and lower impact mussel and seaweed aquaculture by a shift towards bio-based ropes. *Reviews in Aquaculture*, 15(3), 1010–1019. https://doi.org/10.1111/raq.12816

Chaudry, S., Hurtado-McCormick, V., Cheng, K. Y., Willis, A., Speight, R. and Kaksonen, A.H., 2025. Microalgae to bioplastics—Routes and challenges. *Cleaner Engineering and Technology*, 25, 100922. https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.100922

Cheah, W.Y., Er, A.C., Aiyub, K., Mohd Yasin, N.H., Ngan, S.L., Chew, K.W., Khoo, K.S., Ling, T.C., Juan, J.C., Ma, Z. and Show, P.L., 2023. Current status and perspectives of algae-based bioplastics: A reviewed potential for sustainability. *Algal Research*, 71, 103078. https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103078

Dakhili, S., Hashami, Z., Rostami, N., Moradi, S., Moslehishad, M. and Shojaee-Aliabadi, S., 2025. Innovative applications of microalgae in biodegradable food packaging: A review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 19, 101723. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101723

Dino, A. A. and Kishore, G., 2024. Microalgae: An emerging source of bioplastics production. *Discover Environment*, 2, 10. https//doi.org/10.1007/s44274-024-00038-0

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.22034/JOA.13.3.29]

Feyzi, B., Samiee-Zafarghandi, R., Pazoki, M. and Abolghasemi, H., 2025. A review on biodegradable plastic production from microalgae. *Journal of Urban Environmental Management*, 3(2), 103-141. DOI:10.48306/juem.2025.515604.1071

Hooti, V. and Manaffar, R., 2023. Spirulina; the food for future. *Journal of Ornamental Aquatics,* 10(2), 1–13. DOI:20.1001.1.24234575.1402.10.2.1.1.

Karchin, S., Manaffar, R., Imani, A. and Niko, M., 2026. Spirulina- and brittle star-derived bioactive compounds: Emerging opportunities for wound healing and tissue regeneration in ornamental fish. *Journal of Ornamental Aquatics,* 13(2), 47–59.

Kim, J., Park, S., Jung, S., Yun, H., Choi, K., Heo, G., Jin, H.J., Park, S. and Kwak, H.W., 2023. Biodegradation behavior of polybutylene succinate (PBS) fishing gear in marine sedimentary environments for ghost fishing prevention. *Polymer Degradation and Stability*, 216, 110490. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110490

Kop, A., Gamsız, K., Korkut, A.Y. and Sayğı, H., 2019. The effects of different storage temperatures and durations on peroxide values of fish feed ingredients. *Turkish Journal of Agriculture—Food Science and Technology*, 7(Special Issue 3), 43–49. https://doi.org/10.24925/turjaf.v7isp3.43-49.3154

Koričan, M. and Vladimir, N., 2026. Review of biodegradable materials for aquaculture nets: Environmental performance and potential to reduce marine plastic pollution. *Marine Pollution Bulletin*, 228, 119575. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2026.119575

Liu, J., Pemberton, B., Lewis, J., Scales, P.J. and Martin, G.J.O., 2020. Wastewater treatment using filamentous algae—A review. *Bioresource Technology*, 298, 122556. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122556

Loizidou, X.I., Orthodoxou, D.L. and Godet, R., 2024. Bioplastic fishing nets as a sustainable alternative against ghost fishing: Results from the year-long testing among artisanal fishermen for operational effectiveness and social acceptance. *Marine Pollution Bulletin*, 209(Part B), 117300. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117300

Mogany, T., Bhola, V. and Bux, F., 2024. Algal-based bioplastics: Global trends in applied research, technologies, and commercialization. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 38022–38044. https://doi.org/10.1007/s11356-024-33644-9

Nie, X., Mubashar, M., Zhang, S., Qin, Y. and Zhang, X., 2020. Current progress, challenges and perspectives in microalgae-based nutrient removal for aquaculture waste: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 277, 124209. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124209

O'Keefe, T. and Campabadal, C., 2022. Storage and handling of feeds for fish and shrimp. *In Feed and Feeding Practices in Aquaculture* (2nd ed., pp. 337–351). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821598-2.00009-6

Sharma, R., Solanki, P., Chaudhary, M., Gupta, N. and Kaur, P., 2024. Unveiling the potential of microalgae for bioplastic production from

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.22034/JOA.13.3.29]

wastewater, Current trends, innovations, and future prospects. *Biotechnology for Sustainable Materials*, 1, 10. https://doi.org/10.1186/s44316-024-00010-1

Sudhakar, M.P., Maurya, R., Mehariya, S., Karthikeyan, O.P., Dharani, G., Arunkumar, K., Pereda, S.V., Hernández-González, M.C., Buschmann, A.H. and Pugazhendhi, A., 2024. Feasibility of bioplastic production using micro and macroalga, A review. *Environmental Research*, 240(2), 117465. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117465

World Bank, 2024. Thailand: Live ornamental fish exports by country, 2024. World Integrated Trade Solution (WITS), based on UN Comtrade data. https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/THA/year/2024/tradeflow/Exports/partner/ALL/product/030110

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.22034/JOA.13.3.29]

Production of Biodegradable Bioplastics from Microalgae and Their Applications in Sustainable Aquaculture: From Wastewater Treatment to Biopolymers

Rostami B.[1]; Manaffar R.[1*]; Mehdi Mahmoudian M.[2]

*raminmanaffar@gmail.com

1-Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran
2-Nanotechnology Research Institute, Urmia University, Urmia, Iran

Abstract

The increasing use of plastics in fisheries, aquaculture, and the keeping and trade of ornamental aquatic animals has become an environmental challenge for these sectors. In recent years, the production of bio-based polymeric materials from renewable resources, including algal biomass, has attracted attention as a potential approach to reducing dependence on petroleum-based polymers. Microalgae, cyanobacteria such as Spirulina, and certain filamentous algae can contribute to the production of biopolymers, the supply of polymer precursors, and the development of bio-based composites because of their rapid growth, diverse biochemical composition, and ability to produce biomass in aquatic systems. In addition, some of these biological systems can assimilate a proportion of the nutrients present in water and wastewater, potentially supporting resource recovery and the production of harvestable biomass. Accordingly, integrating wastewater treatment with the production of bio-based materials offers potential for developing integrated systems within a circular bioeconomy framework. In the ornamental aquatic animal industry, packaging, equipment, and consumable products used in breeding, rearing, and retail facilities represent potential application areas for these materials. However, their use in fish transport bags and components in direct contact with aquarium water requires careful assessment of mechanical strength, stability, biodegradability under actual operating conditions, leachable compounds, and safety for aquatic organisms. This review examines the biochemical composition of algal biomass, pathways for producing biopolymers and bio-based composite materials, the potential of microalgae, cyanobacteria, and filamentous algae, and the use of wastewater as a resource for biomass production. It also explores potential applications in aquaculture and the ornamental aquatic animal industry, together with the technical, economic, and environmental challenges associated with these technologies and the requirements for safety assessment. The review aims to clarify the opportunities and limitations of developing integrated systems that combine wastewater treatment with the production of bio-based materials.

Keywords: Sustainable aquaculture; ornamental aquatic animals; biodegradable bioplastics; microalgae; Spirulina; wastewater treatment; circular bioeconomy

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.22034/JOA.13.3.29]