Applied Biology, Volume 11, Issue 41, 2021

Research Article

An overview of microalgae harvest from aquatic environments using biological methods[1]

Hasan Bakhtiari | PhD. Student, Environmental, Qom province Water and Wastewater Company, Qom, Iran. hbg1385@yahoo.com
Reza Ansari Tadi | Masters, Herbal Biology, Qom province Water and Wastewater Company, Qom, Iran. qomansari@gmail.com
Abooali Golzary | PhD.School of Environment, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran **(Corresponding Author)**. abooaligolzary@ut.ac.ir

Abstract

Background: The main habitat of microalgae is natural or man-made aquatic environments. Microalgae are used in the process of water and wastewater treatment or biomass production that can be used in the production of biodiesel, biofertilizers, supplements and feed for poultry and aquatic animals. Microalgae extraction methods from aqueous medium such as gravitational deposition, centrifugation, filtration and screening, flotation, electrolyte separation and flocculation have been used.

Methods: In the flocculation method, different flocculants have been proposed for the deposition of microalgae (sulfate and chloride compounds of metals such as iron, aluminum and zinc, cationic compounds such as cationic starch and biopolymers such as chitosan, etc.). Disadvantages such as the high amount of flocculants required, the production of wastes that need to be re-separated, the low sedimentation efficiency and the high price of flocculants have made the search for cheap.

Results: Low-consumption flocculants without the need for re-separation seriously considered by researchers. Factors such as quantity and type Biofluccolants and environmental factors such as temperature, pH, mixing rate play a role in biofluctuation efficiency. Studies show that the isolation of microalgae in the bioflucculation method in some cases increases up to 99%.

Conclusion: The present review shows that sedimentary microorganisms such as bacteria, diatoms and specific microalgae can be used as biofluccullants and microalgae can be harvested and isolated for various purposes in an environmentally friendly manner.

Keywords: Biofluolants, Microalgae, Harvesting, Biological methods, Biorefineries.

1. **Received:** 2020/08/09 ; **Accepted:** 2020/10/07

**Copyright © the authors

http://sjoapb.journal.qom-iau.ac.ir

بیولوژی کاربردی، دوره ۱۱، شماره ۴۱، بهار ۱۴۰۰

مقاله پژوهشی

مروری بر برداشت میکروجلبک‌ها از محیط‌های آبی با استفاده از روش‌های زیستی[۱]

حسن بختیاری | دانشجوی دکتری محیط زیست، شرکت آب و فاضلاب استان قم، قم، ایران. hbg1385@yahoo.com
رضا انصاری طادی | کارشناسی ارشد، زیست‌شناسی گیاهی، شرکت آب و فاضلاب استان قم، قم، ایران. qomansari@gmail.com
ابوعلی گلزاری | دکتری، دانشکده محیط زیست، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران (**نویسنده مسئول**). abooaligolzary@ut.ac.ir

چکیده

هدف: زیستگاه اصلی میکروجلبک‌ها محیط‌های آبی طبیعی یا انسان ساخت می‌باشد. میکروجلبک‌ها در فرایند تصفیه آب و فاضلاب و یا تولید توده زیستی قابل استفاده در تولید بیودیزل، تولید کود بیولوژیک، مکمّل‌ها و خوراک دام و طیور و آبزیان استفاده می‌شوند. روش‌های برداشت میکروجلبک‌ها از محیط آبی نظیر رسوب گرانشی، سانتریفیوژ کردن، فیلتراسیون و غربال‌گری، شناورسازی، جداسازی الکترولیتی و فلوکولاسیون مورد استفاده قرار گرفته است.

روش‌شناسی: در روش فلوکولاسیون که فلوکولانت‌های مختلف جهت ته‌نشین‌سازی میکروجلبک‌ها پیشنهاد شده است (ترکیبات سولفات و کلرید فلزاتی چون آهن، آلومینیوم و روی، ترکیبات کاتیونی مانند نشاسته کاتیونی و پلیمرهای زیستی نظیر کیتوزان و ...) معایبی همچون مقدار بالای فلوکولانت مورد نیاز، تولید پسماندهایی که نیاز به جداسازی مجدد دارند را نشان می‌دهد.

یافته‌ها: پایین بودن بازده ته‌نشین‌سازی و قیمت بالای فلوکولانت موجب شده، جستجو برای یافتن فلوکولانت‌های ارزان، کم مصرف و بی‌نیاز به جداسازی مجدد، به طور جدی مورد توجه محققان قرار گیرد. عواملی نظیر مقدار و نوع بیوفلوکولانت و عوامل محیطی نظیر دما، pH، در سرعت اختلاط در راندمان بیوفلوکولاسیون نقش دارد. در این تحقیق روشی ارزان و پربازده بیوفلوکولاسیون بررسی و شرایط بهینه ارائه گردید. مطالعات نشان می‌دهد که جداسازی میکروجلبک‌ها در روش بیوفلوکولاسیون در برخی موارد تا ۹۹٪ افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری: تحقیق مروری حاضر گویای آن است که می توان از میکروارگانیسم‌های ته‌نشین‌شونده نظیر باکتری‌ها، دیاتوم‌ها و میکروجلبک‌های خاص به عنوان بیوفلوکولانت استفاده نمود و با روشی دوست‌دار محیط زیست، میکروجلبک‌ها را برای مقاصد مختلف برداشت و جداسازی کرد.

کلیدواژه‌ها: بیوفلوکولانت، میکروجلبک، روش‌های زیستی، زیست پالایشگاه‌ها.

---

۱. **تاریخ دریافت:** ۱۳۹۹/۰۵/۱۹ ؛ **تاریخ پذیرش:** ۱۳۹۹/۰۷/۱۶

۱. مقدمه

میکروجلبک‌ها از نخستین ساکنان کره زمین بوده و قدمت حضور آنها در پهنه‌های آبی به میلیون‌ها سال پیش برمی‌گردد. موجوداتی که از لحاظ طبقه‌بندی جانداران جزء میکروارگانیسم‌ها دسته‌بندی می‌شوند و در عین حال مهم‌ترین ویژگی گیاهان، یعنی قابلیت فتوسنتز را دارا هستند. آنها گونه‌های بسیار متنوعی دارند و تاکنون هزاران نوع از آنها در محیط‌های آبی مختلف در سرتاسر زمین شناسایی شده است (۱). آنها گرچه قابلیت زیست در خاک را نیز دارند، اما زیستگاه اصلی آنها محیط‌های آبی است. آنها در پهنه‌های آبی طبیعی نظیر اقیانوس‌ها، دریاها، دریاچه‌ها، رودها، خلیج‌ها و... با فراوانی بالا یافت می‌شوند. در عین حال در محیط‌های آبی ساخته بشر نظیر سدها، استخرها، حوضچه‌ها، چاه‌ها و... نیز حضور دارند. حضور آنها بسته به نوع و فراوانی گونه‌های مختلف می‌تواند بر ویژگی‌های ظاهری و شیمیایی آب اثرات منفی بگذارد. اهمیت زدایش این موجودات میکروسکوپی از آب‌های قابل شرب به حدی است که روش‌های مختلفی برای این منظور مورد مطالعه و طراحی قرار گرفته است (۲).

میکروجلبک‌ها به طور طبیعی در منابع آب قابل شرب رشد نموده و در صورت مساعد بودن شرایط زیستی، به سرعت تکثیر می‌شوند. حضور آنها علاوه بر بد بو شدن آب، منجر به ایجاد مزه نامطلوب نیز می‌گردد. همچنین باعث افزایش مواد آلی محلول در آب شده و ممکن است منبع تری هالومتان‌ها بعد از کلرزنی باشد. آنها فیلتراسیون آب را نیز مشکل کرده و منجر به گرفتگی فیلترها شده و عملکرد عادی فیلتر شنی را تا یک ششم کارکرد معمولی کاهش می‌دهند. گاهی کنترل نمودن رشد جلبک‌ها در منابع آب‌های شرب، امر مشکلی است که بایستی با اضافه نمودن مواد شیمیایی به آب، از آن جلوگیری نمود. بسیاری از دیاتومه‌ها نظیر *Cyclotella*, *Synedra*, *Melosiera*, *Asterionella*, *Fragillaria* و برخی از جلبک‌های سبز نظیر *volvox*, *Chlomydomonas* می‌توانند مشکلاتی را در منابع آب شرب ایجاد نمایند (۳). همچنین گونه‌های سمی سیانوباکتری‌ها و ترکیبات سمّی تولید شده توسط آنها می‌تواند باعث مشکلات بهداشتی برای مصرف‌کنندگان آب‌های آلوده گردد.

جداسازی و حذف میکروجلبك‌ها از محیط آبی، با روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد. این روش‌ها شامل یك یا چند مرحله بوده و دربرگیرنده روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی جهت دستیابی به جداسازی مناسب جامد – مایع می‌باشند. تجربه نشان داده است که هنوز روش

جامعی برای برداشت وجود ندارد و این زمینه هنوز برای پژوهش فعال است تا یك سیستم جمع‌آوری مناسب و اقتصادی برای گونه‌های مختلف جلبك حاصل شود. از آنجا که سلول‌ها به طور معمول حامل بار منفی و مواد آلی آلگوژنیك اضافی هستند، در محلول به حالت پایدار باقی می‌مانند (۴). این موضوع به همراه پائین بودن جزء وزنی جلبک در محیط کشت، باعث بالا بودن هزینه برداشت جلبك می‌شود. رایج‌ترین روش‌های برداشت، شامل رسوب‌گیری گرانشی، سانتریفوژ، فیلتر و میکروغربالگری، اولترافیلتراسیون، شناورسازی، گاهی اوقات همراه با یك مرحله فلوکولاسیون اضافی یا ترکیب فلوکولاسیون- شناورسازی و تکنیك‌های الکتروفورز می‌باشد. انتخاب روش جداسازی، به خواص میکروجلبك مثل چگالی، اندازه و ارزش محصولات مد نظر بستگی دارد (۵). اقتصادی شدن و مقرون به صرفه شدن استفاده از میکروجلبک‌ها مستلزم حل برخی مشکلات حال حاضر آنها است که یکی از کلیدی‌ترین و هزینه‌برترین قسمت آنها جداسازی میکروجلبک از محیط کشت است که حدود ۲۰-۳۰ درصد هزینه کل را در بر می‌گیرد و به عنوان یک عامل محدودکننده برای تبدیل این زیست توده به سوخت زیستی و محصولات ارزشمند می‌باشد (۶).

هدف پژوهش حاضر معرفی عمده‌ترین روش‌های حذف و جداسازی میکروجلبک‌ها از محیط‌های آبی است. همچنین مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه فلوکولانت مناسب و ارزیابی توانایی آن در ته‌نشین‌سازی میکروجلبک‌ها ارائه می‌شود که در آن از میکروارگانیسم‌های ته‌نشین‌شونده نظیر باکتری‌ها، دیاتوم‌ها و میکروجلبک‌های خاص به عنوان بیوفلوکولانت استفاده شده است.

۲. روش‌های حذف میکروجلبک‌ها از محیط‌های آبی

شایع‌ترین روش‌های حذف میکروجلبک‌ها از محیط‌های آبی شامل روش رسوب‌گرانشی، سانتریفوژ کردن، فیلتراسیون و اولترافیلتراسیون، فلوکولاسیون (ته‌نشین‌سازی) و شناورسازی می‌باشد. البته گاهی از روش‌های ترکیبی به طور مثال ترکیب فلوکولاسیون- شناورسازی بدین منظور استفاده می‌شود. انتخاب روش جداسازی به خواص میکروجلبك مثل چگالی و اندازه بستگی دارد (۷). گلزاری و همکاران (۲۰۱۵) در دانشگاه تهران روش‌های مختلف جداسازی میکروجلبک‌ها از آب شیرین را بررسی کرده و تمرکز خود را بر روی روش‌های انعقاد شیمیایی و الکتروکواگولاسیون و فیلتراسیون و سانتریفیوژ معطوف داشتند (۷). در جدول ۱ مقایسه‌ای بین

تعدادی از روش‌های برداشت ریزجلبک از محیط کشت ارائه شده است.

جدول ۱- مقایسه‌ی روش‌های مختلف برداشت ریزجلبک، براساس غلظت و وزن ریزجلبک (۸)

نوع فرآیند برداشت	تشریح	غلظت ریزجلبک پس از برداشت (٪)	درصد دفع ریزجلبک از محیط کشت (٪)	نیاز به مواد شیمیایی	مصرف انرژی (kWh/m3)	محدودیت‌ها
انعقاد/ لخته‌سازی	برمبنای سلول‌های ریزجلبکی که حامل بار منفی هستند	–	۹۸-۶۶	بله	نیاز به انرژی کم به منظور اختلاط آهسته؛ گستره وسیع	فقط به عنوان مرحله‌ی مقدماتی؛ لخته‌سازها در مقادیر بالا گران هستند. این فرآیند زمان‌بر است
شناورسازی	بر پایه‌ی به دام انداختن سلول‌های ریزجلبک با استفاده از حباب‌های هوایی میکروپخش شده	۶-۳	۹۰-۵۰	بله	شناورسازی هوا با حلالیت زیاد (۲۰-۱۰)	محدودیت‌های اقتصادی و فنی
ته‌نشینی گرانشی	بر پایه‌ی قانون استوکس	۳-۰/۵	۹-۱۰	خیر	بسیار بالا (۸)	فقط مناسب ریزجلبک‌های درشت (قطر بزرگ‌تر از ۷۰ میکرون)
سانتریفیوژ	بر پایه‌ی قانون استوکس	۲۲-۱۲	>۹۰	خیر	انرژی زیاد	هزینه‌ی نگهداری بالا
تکنیک‌های الکتروفورز	بر پایه‌ی توانایی ریزجلبک که رفتاری به صورت ذرات کلوییدی دارند	وابسته به فرآیند	متنوع	بله	متنوع	تعویض دوره‌ای الکترودها
فیلتراسیون غشایی	بر پایه‌ی اندازه‌ی مولکول	۲۷-۵	۱۰۰-۹۰	خیر	۰/۴	رسوب غشایی

همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است، هر یک از فرآیندهای مختلف برداشت ریزجلبک‌ها معایب و مزایایی دارند که در ادامه به تشریح این روش‌ها با جزئیات پرداخته خواهد شد.

۲-۱. رسوب گرانشی

ته‌نشینی و رسوب معمولاً برای جداسازی میکروجلبك‌ها در تصفیه آب و فاضلاب استفاده می‌شود. چگالی و شعاع سلول‌های جلبك و عامل ته‌نشینی بر میزان ته‌نشینی جامدات معلق تأثیر

می‌گذارد (۹). اگرچه ته‌نشینی یك فرآیند ساده است، ولی غالباً فرآیندی کند بوده و گاهی اوقات در محیط‌های با دمای بالا، باعث فاسد شدن زیست توده می‌شود. ته‌نشینی گرانش بستگی شدیدی به دانسیته ذرات میکروجلبك دارد (۱۰). روش رسوب گرانشی در مورد میکروجلبک‌های با دانسیته پائین به خوبی عمل نمی‌کند. بنابراین، اغلب از روش‌های فلوکولاسیون کمکی برای افزایش بهره‌وری رسوب گرانشی استفاده می‌شود (۱۱).

۲-۲. سانتریفیوژ کردن

جداسازی میکروجلبك‌ها از طریق سانتریفیوژ، به طور کلی به عنوان روشی با راندمان ضبط بالا (>۹۰٪) در نرخ جریان پایین و مصرف انرژی زیاد معرفی می‌شود (۱۲). اگرچه برای باکتری‌ها روش‌های گرانشی، به آسانی قابل اعمال نیست، برای مخمرها و میکروجلبك‌ها با قطر بزرگ‌تر از ۵ میکرون و دیواره نسبتاً ضخیم آنها امکان‌پذیر است. بیشتر میکروجلبك‌ها را می‌توان از محیط مایع با استفاده از سانتریفیوژ جدا کرد (۱۳). تست‌های آزمایشگاهی سانتریفیوژ برای پساب حوضچه‌ها با شدت g۱۰۰۰-۵۰۰۰ انجام شده و نشان داده که در حدود ۹۰-۸۰% میکروجلبك می‌تواند در طی ۵-۲ دقیقه بازیابی شود (۱۴). همچنین قرارگیری سلول‌های میکروجلبك در معرض نیروهای گرانشی و برشی بالا می‌تواند به ساختار سلولی آسیب برساند. سانتریفیوژهای تجاری با شتاب حداقل g۱۰۰۰۰ جداسازی را افزایش داده و همچنین سانتریفیوژهای دکانتوری نیز با موفقیت استفاده شده است. در حال حاضر، سانتریفیوژ کردن روشی پرهزینه، وقت‌گیر و انرژی بر برای جداسازی میکروجلبک‌ها، به خصوص در مقیاس صنعتی محسوب می‌شود (۱۵-۱۷).

۲-۳. فیلتراسیون و غربال‌گیری

اگرچه فیلتراسیون معمولاً در مقیاس آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد، در استفاده با مقیاس بزرگ‌تر، برخی مشکلات مانند گرفتگی غشاء، تشکیل کیك‌های متراکم و به طور خاص هزینه‌های نگهداری بالا، باعث آزار می‌شود (۱۳). فیلتراسیون اقتصادی، محدود به میکروجلبك‌های رشته‌ای یا توده‌ای بزرگ می‌شود. فیلتراسیون فشاری و یا خلاء می‌تواند برای بازیابی میکروجلبك‌های نسبتاً بزرگ مورد استفاده قرار گیرد، اما غلظتی از توده زیستی برای مؤثر بودن این فرآیند مورد نیاز است (۱۸). مصرف برق برای این عملیات در حدود kw/m3 2-3 است که بی‌شباهت به میزان مورد نیاز برای سانتریفیوژ نیست (۱۹، ۲۰).

۲-٤. شناورسازی

شناورسازی یك فرآیند جداسازی گرانشی است که در آن حباب‌های هوا یا گاز، به ذرات جامد متصل شده و سپس آنها را به سطح مایع حمل می‌کند. شناورسازی روش معمولی است که جهت حذف میکروجلبك‌ها از آب مخزن قبل از استفاده از آن به عنوان آب آشامیدنی بکار می‌رود. براساس اندازه حباب مورد استفاده در فرآیند شناورسازی، کاربردشان را می‌توان به شناورسازی هوای محلول، شناورسازی پراکنده و شناورسازی الکترولیت‌ها تقسیم کرد. چن و همکاران اشاره کردند که شناورسازی به دلیل حذف میکروجلبك، بسیار مفیدتر و موثرتر از ته‌نشین‌سازی می‌باشد (۱۱، ۲۱).

۲-٤-۱. شناورسازی با هوای محلول

شناورسازی با هوای محلول شامل تولید حباب‌های ریز با وافشاری سیال متراکم است. حباب‌های ریز کمتر از ۱۰mm به فلوکوله‌ها چسبیده و آنها را بسیار شناور می‌کند و باعث حرکت سریع آنها به سطح تانك جداسازی می‌شود. شناورسازی می‌تواند ذرات با قطر کوچك‌تر از ۵۰۰ میکرومتر را با برخورد حباب و ذرات و سپس چسبندگی حباب و ذره جذب کند. حباب‌های جلبکی غلیظ شده حاصل (۱۰%-۷ وزن خشك) به عنوان دوغاب حذف می‌شود (۲۲). این فرآیندها در آب شیرین به خوبی کار می‌کند و قادر به استفاده در حجم‌های زیاد مورد نیاز در تأسیسات تجاری نیز می‌باشد (بیشتر از۱۰۰۰۰ متر مکعب در روز) که با اضافه کردن ازن و فلوکولنت همراه است (۲۳). نقطه ضعف اصلی این روش آلودگی مواد با عامل لخته‌کننده می‌باشد که ممکن است به طور قابل توجهی ارزش آنها را کاهش دهد. فلوکولاسیون شیمیایی همراه با شناورسازی با هوای محلول برای جداسازی میکروجلبك‌ها مورد استفاده قرار گرفته است که ریزجلبك‌ها رابه طور مؤثرتر از ته‌نشینی حذف می‌کند (۲۴، ۲۵).

۲-٤-۲. شناورسازی با هوای پراکنده

شناورسازی با هوای پراکنده شامل حباب‌های ۱۵۰۰-۷۰۰ میکرومتر تولید شده به کمک همزن مکانیکی سرعت بالا همراه با سیستم تزریق هوا می‌باشد (۲۳، ۲۶). چن[1] و همکاران

1. Chen

بازده‌های شناورسازی با هوای پراکنده را با استفاده از سه نوع جمع‌کننده مقایسه کردند و کاتیونی که به طور موثری *Scenedesmus quadricauda* را حذف کرده بود، گزارش دادند (۲۱).

۲-۵. جداسازی الکترولیتی

روش الکترولیتی یکی دیگر از روش‌های بالقوه برای جداسازی جلبك‌ها بدون نیاز به اضافه کردن هرگونه مواد شیمیایی است. در این روش، میدان مغناطیسی با باردار کردن جلبك باعث جداسازی آن از محلول می‌شود. الکترولیز آب با تولید هیدروژن، باعث چسبیدن فلوکه‌های ریزجلبك شده و آنها را به سطح می‌آورد. مکانیزم انعقاد الکتریکی شامل سه مرحله متوالی می‌باشد، مرحله اول تولید انعقادکننده‌ها با اکسیداسیون الکترولیتی الکترود مصرفی، مرحله دوم ناپایداری ذرات سوسپانسیونی و شکستن امولسیون و مرحله آخر تجمع فاز ناپایدار به شکل لخته‌ها است (۲۷).

پوئل من[1] و همکاران نشان دادند با بکارگیری فلوکولاسیون الکترولیتی، بازده حذف جلبك ۹۵%-۸۰ می‌باشد (۲۸). گائو[2] و همکاران حذف جلبك با استفاده از تکنولوژی انعقاد-شناورسازی الکتریکی[3] را مطالعه کردند و نشان دادند آلومینیوم یك ماده آندی بسیار عالی برای حذف جلبك در مقایسه با آهن می‌باشد (۲۹). مزایای مختلفی برای روش‌های الکتروشیمیایی وجود دارد که شامل سازگاری با محیط زیست، تطبیق‌پذیری، بهره‌وری انرژی، ایمنی، انتخاب‌پذیری و اقتصادی بودن آن است. نتایج نشان داده که تکنولوژی ECF برای حذف جلبك از دو نقطه نظر فنی و اقتصادی مؤثر می‌باشد (۳۰-۳۲).

۲-۶. فلوکلوسیون

سلول‌های میکروجلبك‌ها، در نتیجه جذب یون‌های حاصل از مواد آلی و تجزیه یا یونیزاسیون گروه‌های عاملی سطحی، بار منفی دارند که مانع از تجمع آنها در سوسپانسیون می‌شود. با برهم زدن پایداری سیستم می‌توان به جداسازی موثر دست یافت. فلوکولاسیون فرآیندی است که در آن ذرات پراکنده به هم چسبیده و تشکیل ذرات بزرگ‌تر جهت ته‌نشینی می‌دهند. اندازه ذره بزرگ‌تر منجر به

1. Poelman
2. Gao
3. ECF

ته‌نشینی سریع‌تر (رجوع به قانون استوکس) و یا واکنش بهتر با حباب‌های شناور می‌شود. در اینجا دو طبقه‌بندی اصلی از فلوکوله‌کننده‌ها با توجه به ترکیب شیمیایی‌شان وجود دارد (۱) فلوکولانت‌های معدنی (۲) فلوکولانت‌های آلی/ فلوکولانت‌های پلی الکترولیت. این مواد شیمیایی کاتیونی، میکروجلبک‌ها را بدون اثر بر ترکیب و سمّیت محصولات آن، منعقد می‌کند (۳۳).

۲-۶-۱. فلوکلوسیون با منعقدکننده‌های معدنی

منعقدکننده‌های مواد معدنی مثل $Al_2(SO_4)_3$ (سولفات آلومینیوم)، $FeCl_3$ (کلرید آهن) و $Fe_2(SO_4)_3$ (سولفات آهن) می‌باشند. علی‌رغم وجود مزایای زیاد فلوکولاسیون، استفاده از فلوکولنت‌های معدنی، اشکالاتی دارد. غلظت بالای فلوکولانت‌های معدنی برای جداسازی جامد - مایع میکروجلبک‌ها نیازاست که در نتیجه آن میزان بالائی از لجن تولید شده و محصول نهایی به نمک‌های آلومینیوم و آهن اضافی آلوده است. همچنین فرآیند به میزان pH حساس بوده و هرچند برخی انعقادکننده‌ها ممکن است برای برخی گونه‌های میکروجلبک‌ها بکار رود، ولی برای دیگر گونه‌ها کاربرد ندارد (۳۴).

۲-۶-۲. فلوکلوسیون با منعقدکننده‌های آلی

برای نیل به ته‌نشینی مؤثر، اندازه فلوکولنت باید بزرگ‌تر از ۱۰۰میکرو نباشد که با افزودن پلیمر زنجیری با وزن مولکولی بالا، اندازه فلوکولنت، افزایش یافته و ته‌نشینی میکروجلبک بهبود یابد. فلوکولنت‌های آلی زیست تخریب‌پذیر مثل کیتوسان که منشاء طبیعی دارند، زیست توده جلبک را آلوده نمی‌کند و باعث می‌شود این زیست توده در غذا، خوراکی و مواد غذایی قابل استفاده باشد. مؤثرترین فلوکولنت‌ها برای بازیابی میکروجلبک‌ها فلوکولانت‌های کاتیونی هستند. پلی الکترولیت‌های آنیونی و غیر یونی در فلوکوله کردن میکروجلبک‌ها موفق نبوده‌اند، که این امر را می‌توان با دافعه موجود بین بارها یا فاصله ناکافی برای اتصال ذرات توضیح داد. وزن مولکولی پلیمر، دانسیته بار مولکول‌ها، دوز، غلظت زیست توده، قدرت یونی و pH محیط و میزان اختلاط در سیال، همه اینها در بازده فلوکولاسیون موثر هستند (۲۱). بیلانویچ[1] و همکاران اشاره کردند که فلوکوله کردن با پلیمرهای کاتیونی با شوری بالای محیط دریایی مهار می‌شود. به این دلیل، این مواد برای

1. Bilanovic

فلوکولاسیون جلبک‌های موجود در آب شور به دلیل ماهیت آنیونی‌شان مناسب نیست (۲۴).

۲-۶-۳. فلوکولاسیون ترکیبی

فرآیند فلوکولاسیون ترکیبی یك فرآیند چند مرحله‌ای با استفاده از بیش از یك نوع از فلوکولنت است. ساکنیك[1] و همکاران (۱۹۸۸) فرآیند فولکوله شدن ترکیبی را با استفاده از میکروجلبك دریایی مورد بررسی قرار دادند (۲۶). برای القاء فولکوله شدن در آب دریا، دو روش بدست آمد. اولین آن ترکیب پلی الکترولیت‌ها با فلوکولنت‌های معدنی مثل کلرید آهن یا آلومینیوم بوده و دومین آن اکسیداسیون ازنی به همراه منعقدکننده می‌باشد. با این وجود، افزودن منعقدکننده‌ها، روش انتخابی برای تولید ارزان و پایدار نیست. پیشرفت‌های اخیر شامل تقویت خودلخته‌سازی سلول‌ها می‌باشد که می‌تواند در طی محدودیت کربن یا با تغییر pH رخ دهد. تجارب دیگری در خصوص استفاده از روش‌های ترکیبی یا استفاده از دو میکروارگانیسم جهت انجام فلوکولاسیون وجود دارد. همچنین پتانسیل‌های استفاده از روش ترکیبی برای تصفیه فاضلاب شهری مورد بررسی قرار گرفته است (۳۵).

۲-۶-۴. خود فلوکلوسیون

گونه‌های خاصی به طور طبیعی فلوکوله می‌شوند، و برخی دیگر در پاسخ محرك‌های محیطی مانند استرس نیتروژن، pH و میزان اکسیژن حل شده، فلوکوله می‌شوند. خود فلوکولاسیون، در اثر رسوب نمك‌های کربناته با سلول‌های جلبك در pH بالا و در نتیجه مصرف فتوسنتزی دی اکسید کربن جلبك اتفاق می‌افتد. از این‌رو، کشت طولانی مدت در زیر نور خورشید با دی اکسید کربن محدود در خود فلوکوله شدن سلول‌های جلبك برای جداسازی کمك می‌کند. تجربیات آزمایشگاهی همچنین نشان داده است که می‌توان با افزودن NaOH برای نیل به مقادیر pH معین، خود فلوکوله شدن را شبیه‌سازی کرد (۲۶، ۳۶).

۲-۶-۵. بیوفلوکولاسیون

روش‌های مختلفی به منظور حذف میکروجلبک‌ها از محیط‌های آبی ارائه شده است، اما بیشتر این روش‌ها در مقیاس بسیار بالا (استخرهای تصفیه آب) قابل بهره‌برداری نیست و فاقد

1. Sukenik

کارایی لازم بوده و هزینه‌های بالایی را در بر دارد. از میان روش‌های مختلف، ته‌نشین‌سازی به کمک فلوکولانت‌ها به دلیل قابلیت استفاده در مقیاس بالا و هزینه‌های کم‌تر، نسبت به سایر روش‌ها بیشتر مورد توجه است (۳۷). ته‌نشین‌سازی از جمله مراحل مهم در فرآیند تصفیه آب در تصفیه‌خانه‌ها محسوب می‌شود. فلوکولانت‌های مختلفی جهت ته‌نشین‌سازی مواد معلق و میکروجلبک‌ها پیشنهاد شده است، از جمله ترکیبات سولفات و کلرید فلزاتی چون آهن، آلومینیوم و روی، ترکیبات کاتیونی مانند نشاسته کاتیونی و پلیمرهای زیستی نظیر کیتوزان و... . از جمله معایب استفاده از فلوکولانت‌های رایج، مقدار بالای فلوکولانت مورد نیاز، تولید پسماندهای نیازمند به جداسازی مجدد، پایین بودن بازده ته‌نشین‌سازی و قیمت بالای فلوکولانت مورد استفاده می‌باشد (۳۸).

۳. مزایای استفاده از بیوفلوکولانت‌ها

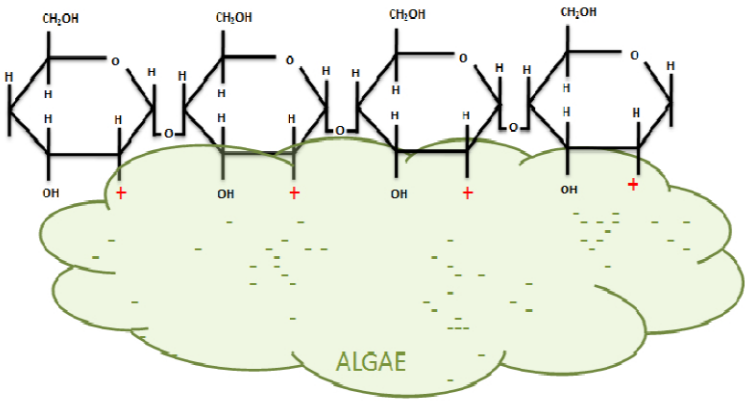
استفاده از فلوکولانت‌های موجود معایبی همچون مصرف بالا، تولید پسماندهای نیازمند به جداسازی مجدد، قیمت بالا و پایین بودن بازده ته‌نشین‌سازی را درپی دارد. یافتن فلوکولنت ارزان و بی‌ضرر که بازده ته‌نشینی بالایی داشته باشد می‌تواند تا حدّ بسیاری به بالا بردن بازده فرآیند ته‌نشین‌سازی میکروجلبک‌ها و صرفه بیشتر اقتصادی آن کمک کند (۳۸). میکروارگانیسم‌های ته‌نشین‌شونده (مانند گونه‌های خاصی از میکروجلبک‌ها نظیر سند سموس، دیاتوم‌ها و گونه‌هایی از باکتری‌ها نظیر باسیلوس) که از جمله بیوفلوکولانت‌ها محسوب می‌شوند، می‌توانند برای ته‌نشین کردن میکروجلبک‌ها با بازده بالا و صرف هزینه کم‌تر استفاده شوند. از جمله مزایای استفاده از میکروارگانیسم‌های ته‌نشین‌شونده، تولید توده زیستی بی‌ضرر حاصل از ته‌نشین‌سازی میکروجلبک‌ها به کمک میکروارگانیسم‌های ته‌نشین‌شونده که می‌تواند به عنوان سوخت زیستی، کود بیولوژیک در کشاورزی و یا غذای مکمّل دام، طیور و یا آبزیان مورد استفاده قرار گیرد. همچنین در فرایند تصفیه فاضلاب، این میکروارگانیسم‌ها از مواد موجود در فاضلاب تغذیه و موجب بهبود فرآیند تصفیه فاضلاب و کاهش غلظت آلاینده‌های موجود در آن می‌شوند (۳۹،۴۰).

پیشینه استفاده از بیوفلوکولانت‌ها

ته‌نشین‌سازی میکروجلبک‌ها به کمک بیوفلوکولانت‌ها از دو دهه قبل مطرح شده و مورد بررسی قرار گرفته است. بیوفلوکولانت‌ها در واقع به عنوان جایگزینی برای فلوکولنت‌های شیمیایی

و کاتیون‌های فلزی مطرح شدند. در ابتدا تمرکز بر روی یافتن ترکیبات طبیعی قابل استخراج از منابع گیاهی، حیوانی و پسماندها بود (۴۱). اما استفاده از پلیمرهای زیستی به عنوان بیوفلوکولانت نظیر کیتوزان که از پوسته بدن موجودات دریایی بدست می‌آمد، مورد توجه قرار گرفت (۴۲).

Hansel و همکاران (۲۰۱۴)، مراحل سنتز نشاسته کاتیونی را ارائه نمودند. آنها با بررسی انواع نشاسته کاتیونی با ساختارهای مختلف، توانستند به بازده ته‌نشینی بیش از ۹۰% دست یابند (۴۳). یکی از مهم‌ترین بیوفلوکولانت‌های پیشنهادی که همچنان مورد توجه است، نشاسته کاتیونی می‌باشد (۴۴). همچنین Anthony & Sims (۲۰۱۳) توانستند با استفاده از ۱/۴% وزنی نشاسته کاتیونی به بازده ته‌نشین‌سازی ۸۵% برای گونه‌های کلرلا و سندسموس موجود در پساب دست یابند. آنها همچنین مکانیسم اثر نشاسته کاتیونی بر توده زیستی جلبک که منجر به ته‌نشینی آن می‌شود را در قالب شکل ۱ نشان دادند (۴۵).

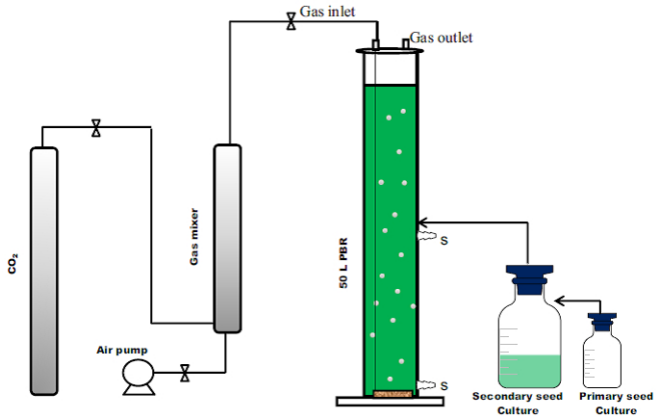


Representation of coagulation and flocculation mechanism of cationic starch

شکل ۱- مکانیسم اثر نشاسته کاتیونی بر توده زیستی جلبک (٤٥)

اگرچه بیوفلوکولانت‌هایی نظیر کیتوزان و نشاسته کاتیونی بازده نسبتاً مطلوبی در ته‌نشین‌سازی میکروجلبک‌ها از خود نشان داده‌اند، اما داده‌های حاصل، مربوط به مقیاس آزمایشگاهی بوده و تاکنون طرحی برای ته‌نشین‌سازی میکروجلبک‌ها در مقیاس وسیع با استفاده از این بیوفلوکولانت‌ها به اجرا درنیامده است. همچنین هزینه تولید این بیوفلوکولانت‌ها با توجه به مقدار مورد نیاز برای کاربرد در مقیاس صنعتی، بالا بوده و هیچ‌گونه صرفه اقتصادی برای آن قابل تصور نیست (۴۶).

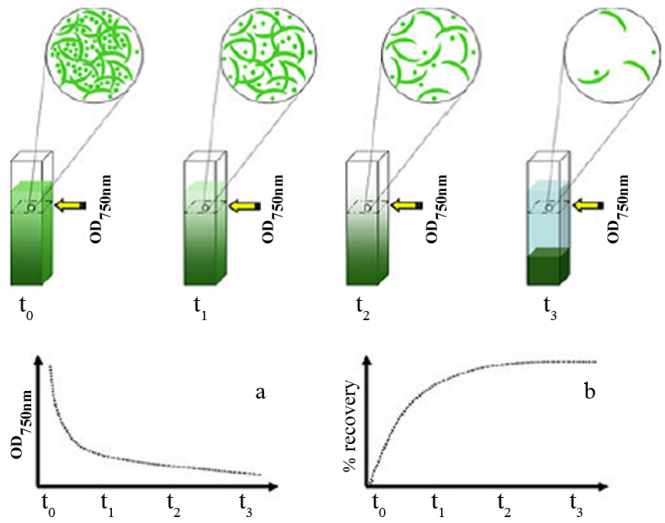
ته‌نشین‌سازی میکروجلبک‌ها به کمک میکروارگانیسم‌های ته‌نشین‌شونده ایده جدیدی است که در چند سال گذشته مطرح شده و مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. اساس این روش استفاده از میکروارگانیسم‌ها به عنوان بیوفلوکولانت‌های زنده به منظور ته‌نشین‌سازی میکروجلبک است. در برخی تحقیقات این فن‌آوری شامل تولید میکروجلبک‌ها با قارچ‌ها یا سایر باکتری‌ها برای دستیابی به گندله‌سازی بهینه با قطر ۲ تا ۱۰ میلی متر است. این گندله امکان حذف کامل سلول‌های جلبک از محیط مایع را فراهم می‌آورد تا با استفاده از فیلتراسیون ساده، امکان استخراج و برداشت آنها فراهم شود. علاوه بر این، فرآیند گندله‌سازی منجر به افزایش معنی‌دار عملکرد زیست توده، لیپید و تولید محصولات زیستی می‌شود. در صورت موفقیت‌آمیز بودن مقیاس، این فناوری پتانسیل بهبود پایداری و دوام اقتصادی تولید سوخت‌های زیستی جلبک را دارد (۴۷،۴۸). تاثیر زمان بر بازدهی ته‌نشینی میکروجلبک توسط میکروارگانیسم ته‌نشین‌شونده نیز در برخی مطالعات بررسی شده است. نتایج نشان داد زمان مناسب برای ته‌نشینی در بیوفلوکولانت‌های مختلف، متفاوت می‌باشد. Ndikubwimana و همکاران همچنین شمایی از سیستم طراحی شده برای انجام فرآیند ته‌نشین‌سازی مداوم در مقیاس پایین را مطابق شکل ۲ ارائه کردند (۴۹).



شکل۲- شمایی از سیستم ته‌نشین‌سازی مداوم به کمک بیوفلوکولانت‌های زنده در مقیاس پایین (۴۹)

Salim و همکاران (۲۰۱۱) از میکروجلبک *Scendesmus obliqus* به منظور ته‌نشین‌سازی میکروجلبک *Chlorella vulgaris* استفاده نموده و به بازده حدود ۸۰% دست یافتند. در این تحقیق مکانیسم اثر جلبک سندسموس بر میکروجلبک کلرولا ولگاریس نیز مطرح شده است. در

این مطالعه پس از کشت گونه‌های مورد نظر در شرایط استاندارد و افزودن میکروارگانیسم ته‌نشین‌شونده با نسبت جرمی مشخص به کشت میکروجلبک، از روش اندازه‌گیری دانسیته نوری به کمک دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۷۵۰nm برای سنجش میزان ته‌نشینی میکروجلبک مورد آزمایش استفاده شد (۴۶).



شکل ۳۰- اندازه‌گیری بازده ته‌نشین‌سازی به کمک روش اسپکتروفتومتری (٤٦)

Ummalyma و همکاران (۲۰۱۷) روش ته‌نشینی میکروجلبک‌ها به کمک باکتری‌ها را روشی مناسب جهت استفاده در فرآیندهای تصفیه پساب معرفی کردند که علاوه بر ته‌نشینی میکروجلبک‌ها، به حذف ترکیبات نیتروژن و فسفر موجود در پساب نیز منجر می‌شود و این امر موجب ارتقای کیفیت آب تصفیه شده خواهد شد (۵۰).

Nguyen و همکاران (۲۰۱۸) مطالعه‌ای مروری بر روی مبانی و کاربردهای بیوفلوکولاسیون انجام دادند. در این مطالعه تاثیر انواع محیط‌های کشت، مقادیر مختلف توده زیستی میکروجلبک و درصدهای مختلف بیوفلوکولانت‌های استفاده شده مورد بررسی قرار گرفت (۵۱،۵۲). Alam و همکاران (۲۰۱۴) با مطالعه تاثیر جلبک Chlorella vulgaris بر روی ته‌نشینی میکروجلبک *Scenedesmus obliquus*، تأثیر شکل سلولی میکروارگانیسم ته‌نشین‌شونده بر بازده ته‌نشینی میکروجلبک بررسی شد. از آنجا که سلول‌های کلرلا ولگاریس به صورت منفرد و با قطر سلولی

حدود ۱۰-۵ میکرون بوده و شکل سلولی میکروجلبک سندسموس به صورت کلنی ۴ تایی است، انتظار می‌رود تعداد سلول‌های کلرلا جهت اتصال به هر سلول سندسموس، سنگین‌سازی و در نهایت ته‌نشین‌سازی آن افزایش یابد. در نتیجه، میزان بیوفلوکولانت مورد نیاز به ازای وزن مشخص، از توده زیستی افزایش خواهد داشت. این مطالعه نشان داد، در انتخاب میکروارگانیسم ته‌نشین‌شونده مناسب به عنوان بیوفلوکولانت زنده، باید به دانسیته و شکل سلولی میکروجلبک مورد نظر و میکروارگانیسم ته‌نشین‌شونده توجه شود (۵۳).

بهره‌گیری از مهندسی ژنتیك در ارتقای عمکرد فلوکولاسیون از رویکردهای علمی جدید در زمینه توسعه و بهینه‌سازی کاربرد میکروجلبك‌ها است. فرآوری در مخمرها ترانسفورماتورهای *Chlamydomonas reinhardtii* توانایی خود لخته شدن بین ۲ تا ۳/۵ برابر بالاتر از سویه کنترل نشده ترانسفورماتور را نشان دادند. پیوند موفقیت‌آمیز *C. reinhardtii* با دو ژن بدون پروموتر درهایی را برای ایجاد یک سیستم دگرگونی جهانی مبتنی بر پروموتورهای درون‌زا، قابل استفاده برای هرگونه میکروجلبك باز می‌کند (۵۴). جدول ۲ خلاصه مهم‌ترین مطالعات پیشین در مورد ته‌نشین‌سازی میکروجلبک‌ها به کمک میکروارگانیسم‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۲- خلاصه مهم‌ترین مطالعات پیشین در مورد ته‌نشین‌سازی میکروجلبک‌ها به کمک میکروارگانیسم‌ها

ردیف	نوع میکروجلبک	میکروارگانیسم ته‌نشین‌شونده	مقدار بیوفلوکولانت	عوامل موثر	بازده ته‌نشینی	مرجع
۱	*Botryococcus braunii*	*Paenibacillus sp.* باکتری	–	–	۹۵	(۵۵)
۲	*Chlorella vulgaris*	*Scendesmus obliqus*	–	–	۸۰	(۴۶)
۳	*Chlorella vulgaris*	*Aspergillus niger* قارچ	–	pH غلظت گلوکز	۸۰/۳	(۵۶)
۴	*Nannochloropsis oceanica*	*Solibacillus silvestris* باکتری	۱ به ۳ حجمی	غلظت بیوفلوکولانت/ زمان	۹۰	(۵۷)
۵	*Chlorella vulgaris*	*Aspergilus oryzae* قارچ	–	pH غلظت کربن آلی	۹۹	(۵۸)
۶	*Scendesmus obliqus*	*Chlorella vulgaris*	–	شکل سلولی	۶۲	(۵۳)
۷	*Desmodesmus brasiliensis*	*Bacilus licheniformis* باکتری	۲/۵ میلی‌گرم بر لیتر	زمان	۹۵	(۴۹)
۸	*Chlamydomonas reinhardtii*	*Sacchaaromyes bayanus* مخمر	–	–	۸۰	(۵۴)
۹	*Chlorella vulgaris*	*Scenedesmus obliquus* میکروجلبک	–	–	۹۰	(۵۹)
۱۰	*Chlorella vulgaris*	قارچ	۱۰ میلی‌گرم در لیتر	غلظت توده میکروجلبک	۹۵	(۵۱)

٤. نتیجه‌گیری

وجود میکروجلبک‌ها در گستره وسیع اکوسیستم‌های آبی طبیعی و انسان‌ساخت، باعث بروز اثرات مختلفی در زندگی موجودات و انسان‌ها شده است. بیماری‌زائی و اثرات ناشی از برخی از گونه‌های میکروجلبکی محرز و قطعی می‌باشد. برخی از گونه‌های سیانوباکتریائی که در محیط‌های آبی بوده و منجر به مسمومیت جانوران یا انسان‌ها می‌شوند را می‌توان ذکر کرد. این مسمومیّت عمدتاً در قالب حضور ترکیبات مختلف سیانوتوکسینی بررسی و اثبات شده است. میکروجلبک‌ها به دلیل فعالیت فتوسنتزی می‌توانند در تأمین اکسیژن مورد نیاز موجودات آبزی نقش موثری ایفا نمایند. این نقش و عملکرد در فرایندهای تصفیه طبیعی فاضلاب و یا سیستم‌های تصفیه نظیر برکه‌های تثبیت، مورد استفاده قرار می‌گیرد. میکروجلبک‌ها به عنوان منابع زیست توده مورد استفاده در تولید سوخت‌های زیستی مورد توجه قرار گرفته‌اند. لازمه این امر امکان پرورش و تولید زیست توده میکروجلبکی در محیط آبی و اجرای فرایندهای جداسازی آنها از محیط‌های آبی است. هر یک از روش‌های جداسازی بکار رفته میکروجلبک‌ها از محیط آبی، دارای معایب و مزایای مشخصی می‌باشد که شاخص‌هایی نظیر هزینه و قسمت تمام شده، سادگی یا پیچیدگی فرایند، نیاز به انرژی، وجود یا فقدان باقیمانده و لجن، از جمله آنها می‌باشد.

یکی از معیارهای انتخاب یك روش مناسب جداسازی میکروجلبک‌ها، حفظ کیفیت محصول است. رسوب گرانشی برای محصولات کم‌ارزش، استفاده می‌شود که فلوکولاسیون برای افزایش بازده همراه آن است. رسوب یا حوضچه‌های ته‌نشینی نیز برای بازیابی زیست توده از فرآیندهای فاضلابی، استفاده می‌شود. برای محصولات با ارزش بالا، برای بازیابی جلبك با کیفیت بالا، از جمله در مصارف غذایی و مکمّل‌های مواد مغذی، اغلب استفاده از سانتریفیوژهای عملیاتی پیوسته پیشنهاد می‌شود که می‌تواند حجم زیاد بیومس را پردازش کند. هزینه‌های سانتریفیوژ برای تغلیظ سریع انواع میکروارگانیسم‌ها قابل توجه می‌باشد (جدول ۳).

جدول ۳ - جدول مقایسه مزایا و معایب روش‌های حذف میکروجلبک از محیط آبی

عنوان روش	مزایا	معایب
رسوب گرانشی	سادگی فرایند	کندی فرایند، وابستگی شدید به دانسیته ذرات
سانتریفیوژ کردن	مناسب جهت میکروجلبک‌های با دیواره ضخیم	هزینه بالا، انرژی مورد نیاز بالا و آسیب به ساختار سلولی

عنوان روش	مزایا	معایب
فیلتراسیون و غربالگری	مناسب در مقیاس آزمایشگاهی مناسب جهت بازیابی میکروجلبک‌های بزرگ	هزینه نگهداری بالا نیازمند انرژی بالا (2-3 kw/m3)
شناورسازی	انتخاب‌پذیری و اقتصادی بودن توانایی مناسب در حذف میکروجلبک‌ها	آلودگی زیست‌توده با عامل لخته‌کننده
فلوکولاسیون	عملکرد مناسب در شرایط بهینه	تولید لجن و پسماند، باقیمانده آهن و آلومینیوم بالا، قیمت و هزینه بالای فلوکولانت، حساسیت بهpH
بیوفلوکولاسیون	فقدان اثرات زیست محیطی منفی، استحصال توده زیستی مفید، بهبود عملکرد فرایندهای تصفیه، توجیه اقتصادی مناسب	محدودیت عملکرد در شرایط خاص و غیرکنترل شده

بیوفلوکولاسیون یکی از روش‌های مورد توجه در سالیان اخیر بوده است. این روش براساس استفاده از انواع میکروارگانیسم‌ها (باکتری‌ها، جلبک‌ها، قارچ‌ها و...) در فرایند تشکیل فلوک و جداسازی میکروجلبک‌ها از محیط آبی است. مکانیسم‌های مختلف برای ایجاد پل و اتصال بین میکروجلبک‌های محیط آبی و عامل فلوکولانت، مطرح می‌باشد. در هر صورت براساس نتایج پژوهش‌های آزمایشگاهی، عملکرد فلوکولانت‌های زیستی در بسیاری از موارد موثر و در برخی گزارش‌ها تا حدود ۹۹% از میکروجلبک‌ها نیز گزارش شده است. هیچ‌گونه پسماند و باقیمانده نامطلوبی در روش بیوفلوکولاسیون دیده نمی‌شود و فاقد اثرات زیست محیطی نامطلوب است. زیست توده استحصال شده، خالص و فاقد ترکیبات شیمیایی مضر برای فرایندهای بعدی مورد استفاده در تولید سوخت زیستی می‌باشد. همچنین برخلاف سایر روش‌های جداسازی میکروجلبک‌ها، هزینه تمام شده این روش بویژه در بخش انرژی کم‌تر بوده و توجیه اقتصادی برای بکارگیری روش بیوفلوکولاسیون را بیشتر می‌نماید. کاربرد بیوفلوکولاسیون در فرایندهای تصفیه آب مخاطرات ناشی از استفاده از مواد شیمیایی و باقیمانده آنها در آب را مرتفع می‌نماید. همچنین برخی از مطالعات، تاثیر استفاده از بیوفلوکولاسیون در حذف سایر شاخص‌های کیفی آب نظیر حذف TSS و ترکیبات نیتروژن و فسفر را نشان می‌دهد. راندمان جداسازی و ته‌نشینی میکروجلبک‌ها در فرایند بیوفلوکولاسیون متاثر از عوامل متعددی می‌باشد. نوع بیوفلوکولانت، میزان بیوفلوکولانت، شرایط محیطی نظیر PH، دما و سرعت اختلاط، از مهم‌ترین عواملی هستند که در مطالعات مورد توجه بوده‌اند. بر این اساس محدودیت عملکرد در شرایط خاص و غیر کنترل شده از معایب بکارگیری بیوفلوکولاسیون می‌باشد.

با بررسی مطالعات گذشته و پیدا کردن گونه‌های میکروارگانیسمی مناسب جهت جداسازی و ته‌نشین‌سازی میکروجلبک‌ها، امکان ارائه فلوکولانت‌های زیستی به عنوان جایگزین فلوکولانت‌های رایج تجاری که دارای معایبی همچون عدم بازدهی کافی، تولید پسماندهای نیازمند به جداسازی مجدد و قیمت بالای فلوکولانت می‌باشند، فراهم خواهد شد. این روش جایگزین مناسب که میزان هزینه‌ها و مشکلات زیست محیطی را به حداقل می‌رساند، باید به‌طور جدی مورد توجه قرار گرفته و در مقیاس نیمه صنعتی و سرانجام در مقیاس بالا و صنعتی اجرایی شود. نتایج این تحقیق در شناسایی و انتخاب بیوفلوکولانت مناسب در حذف جلبک‌ها در فرایندهای تصفیه آب و فاضلاب و در فرایندهای اولیه تولید سوخت‌های زیستی از میکروجلبک‌ها کاربرد دارد.

References

1. Singh J, Saxena RC. *An introduction to microalgae: diversity and significance*. Handbook of marine microalgae. Elsevier. 2015: 11-24.
2. Cohen Z. *Chemicals from microalgae*. CRC Press. 1999.
3. Eloranta P, Kwandrans J. Indicator value of freshwater red algae in running waters for water quality assessment. *Oceanological and Hydrobiological Studies*. 2004; 33(1): 47-54.
4. Suthers I, Rissik D, Richardson A. Plankton: A guide to their ecology and monitoring for water quality. CSIRO publishing. 2019.
5. York PV, Johnson LR. *The Freshwater Algal Flora of the British Isles: An Identification Guide to Freshwater and Terrestrial Algae*. Cambridge University Press. 2002.
6. Bartram J, Chorus I. *Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management*. CRC Press. 1999.
7. Golzary A, Imanian S, Abdoli MA, Khodadadi A, Karbassi A. A cost-effective strategy for marine microalgae separation by electro-coagulation-flotation process aimed at bio-crude oil production: Optimization and evaluation study. *Separation and Purification Technology*. 2015; 147: 65-156.
8. Wei P, Cheng L-H, Zhang L, Xu X-H, Chen H-l, Gao C-j. A review of membrane technology for bioethanol production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014; 30: 40-388.
9. Schenk PM, Thomas-Hall SR, Stephens E, Marx UC, Mussgnug JH, Posten C & et al. Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production. *Bioenergy research*. 2008; 1(1): 20-43.
10. Choi S, Lee J, Kwon D, Cho K. Settling characteristics of problem algae in the water treatment process. *Water Science and Technology*. 2006; 53(7): 9-113.
11. Uduman N, Qi Y, Danquah MK, Forde GM, Hoadley A. Dewatering of microalgal cultures: a major bottleneck to algae-based fuels. *Journal of renewable and sustainable energy*. 2010; 2(1): 012701.
12. Dassey AJ, Theegala CS. Harvesting economics and strategies using centrifugation for cost effective separation of microalgae cells for biodiesel applications. *Bioresource technology*. 2013; 128: 5-241.
13. Grima EM, Belarbi E-H, Fernández FA, Medina AR, Chisti Y. Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. *Biotechnology advances*. 2003; 20(7-8): 491-515.
14. Knuckey RM, Brown MR, Robert R, Frampton DM. Production of microalgal concentrates by flocculation and their assessment as aquaculture feeds. *Aquacultural Engineering*. 2006; 35(3): 13-300.
15. Brennan L, Owende P. Biofuels from microalgae: a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2010; 14(2): 77-557.

16. Heasman M, Diemar J, O'connor W, Sushames T, Foulkes L. Development of extended shelf-life microalgae concentrate diets harvested by centrifugation for bivalve molluscs: a summary. *Aquaculture Research.* 2000; 31(8-9): 59-637.
17. Benemann JR, Oswald WJ. *Systems and economic analysis of microalgae ponds for conversion of CO {sub 2} to biomass*. Final report. California Univ., Berkeley, CA (United States). Dept. of Civil Engineering. 1996.
18. Petrusevski B, Bolier G, Van Breemen A, Alaerts G. Tangential flow filtration: a method to concentrate freshwater algae. *Water Research.* 1995; 29(5): 24-1419.
19. Benemann JR, Oswald WJ. Systems and economic analysis of microalgae ponds for conversion of CO2 to biomass. *Nasa Sti/recon Technical Report N*. 1994; 95.
20. Greenwell HC, Laurens L, Shields R, Lovitt R, Flynn K. Placing microalgae on the biofuels priority list: a review of the technological challenges. *Journal of the royal society interface*. 2009; (46)7: 26-703.
21. Chen Y, Liu J, Ju Y-H. Flotation removal of algae from water. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces.* 1998; 12(1): 49-55.
22. Yoon R, Luttrell G. The effect of bubble size on fine particle flotation. *Mineral Procesing and Extractive Metallurgy Review.* 1989; 5(1-4): 22-101.
23. Rubio J, Souza M, Smith R. Overview of flotation as a wastewater treatment technique. *Minerals engineering*. 2002; 15(3): 55-139.
24. Bilanovic D, Shelef G, Sukenik A. Flocculation of microalgae with cationic polymers: effects of medium salinity. *Biomass.* 1988; 17(1): 65-76.
25. Crossley I, Valade M, Shawcross J. Using lessons learned and advanced methods to design a 1,500 Ml/day DAF water treatment plant. *Water science and technology.* 2001; 43(8): 35-41.
26. Sukenik A, Bilanovic D, Shelef G. Flocculation of microalgae in brackish and sea waters. *Biomass.* 1988; 15(3): 99-187.
27. Gao S, Du M, Tian J, Yang J, Yang J, Ma F & et al. Effects of chloride ions on electro-coagulation-flotation process with aluminum electrodes for algae removal. *Journal of hazardous materials*. 2010; 182(1-3): 34-827.
28. Poelman E, De Pauw N, Jeurissen B. Potential of electrolytic flocculation for recovery of micro-algae. *Resources, conservation and recycling.* 1997; 19(1): 1-10.
29. Gao S, Yang J, Tian J, Ma F, Tu G, Du M. Electro-coagulation-flotation process for algae removal. *Journal of hazardous materials.* 2010; 177(1-3): 43-336.
30. Martinez-Villafane J, Montero-Ocampo C, Garcia-Lara A. Energy and electrode consumption analysis of electrocoagulation for the removal of arsenic from underground water. *Journal of hazardous materials.* 2009; 172(2-3): 22-1617.
31. Kumar M, Ponselvan FIA, Malviya JR, Srivastava VC, Mall ID. Treatment of bio-digester effluent by electrocoagulation using iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials.* 2009; 165(1-3): 52-345.
32. Nanseu-Njiki CP, Tchamango SR, Ngom PC, Darchen A, Ngameni E. Mercury (II) removal from water by electrocoagulation using aluminium and iron electrodes. *Journal*

of Hazardous Materials. 2009; 168(2-3): 6-1430.
33. Benemann JR, Oswald WJ. Systems and economic analysis of microalgae ponds for conversion of CO2 to biomass. *STIN.* 1994; 95: 19554.
34. Greenwell HC, Laurens L, Shields R, Lovitt R, Flynn K. Placing microalgae on the biofuels priority list: a review of the technological challenges. *Journal of the royal society interface.* 2010; 7(46): 26-703.
35. Ismail IM, Fawzy AS, Abdel-Monem NM, Mahmoud MH, El-Halwany MA. Combined coagulation flocculation pre treatment unit for municipal wastewater. *Journal of Advanced Research.* 2012; 3(4): 6-331.
36. Sukenik A, Shelef G. Algal autoflocculation-verification and proposed mechanism. *Biotechnology and bioengineering*. 1984; 26(2): 7-142.
37. Danquah MK, Ang L, Uduman N, Moheimani N, Forde GM. Dewatering of microalgal culture for biodiesel production: exploring polymer flocculation and tangential flow filtration. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology.* 2009; 84(7): 83-1078.
38. Xu L, Brilman DWW, Withag JA, Brem G, Kersten S. Assessment of a dry and a wet route for the production of biofuels from microalgae: energy balance analysis. *Bioresource technology*. 2011; 102(8): 5113-22.
39. You L, Lu F, Li D, Qiao Z, Yin Y. Preparation and flocculation properties of cationic starch/chitosan crosslinking-copolymer. *Journal of Hazardous Materials.* 2009; 172(1): 38-45.
40. Gouveia L. *Microalgae as a Feedstock for Biofuels. Microalgae as a Feedstock for Biofuels*. Springer. 2011: 1-69.
41. Moreno L, Muñoz Prieto E, Casanova H. Flocculatin with chitosan of microalgae native of the Colombian Plateau. *Ciencia en Desarrollo*. 2015; 6(1): 17-24.
42. Kandasamy G, Shaleh SRM. Flotation removal of the microalga Nannochloropsis sp. using Moringa protein-oil emulsion: A novel green approach. *Bioresource technology*. 2018; 247: 31-327.
43. Hansel PA, Riefler RG, Stuart BJ. Efficient flocculation of microalgae for biomass production using cationic starch. *Algal research.* 2014; 5: 9-133.
44. Letelier-Gordo CO, Holdt SL, De Francisci D, Karakashev DB, Angelidaki I. Effective harvesting of the microalgae Chlorella protothecoides via bioflocculation with cationic starch. *Bioresource technology*. 2014; 167: 8-214.
45. Anthony R, Sims R. Cationic starch for microalgae and total phosphorus removal from wastewater. *Journal of Applied Polymer Science.* 2013; 130(4): 8-2572.
46. Salim S, Bosma R, Vermuë MH, Wijffels RH. Harvesting of microalgae by bio-flocculation. *Journal of applied phycology.* 2011; 23(5): 55-849.
47. Xie S, Sun S, Dai SY, Yuan JS. Efficient coagulation of microalgae in cultures with filamentous fungi. *Algal Research.* 2013; 2(1): 28-33.
48. Lee J, Cho D-H, Ramanan R, Kim B-H, Oh H-M, Kim H-S. Microalgae-associated bacteria play a key role in the flocculation of Chlorella vulgaris. *Bioresource technology.* 2013; 131: 195-201.

49. Ndikubwimana T, Zeng X, He N, Xiao Z, Xie Y, Chang J-S & et al. Microalgae biomass harvesting by bioflocculation-interpretation by classical DLVO theory. *Biochemical Engineering Journal.* 2015; 101: 7-160.
50. Ummalyma SB ,Gnansounou E, Sukumaran RK, Sindhu R, Pandey A, Sahoo D. Bioflocculation: an alternative strategy for harvesting of microalgae-an overview. *Bioresource technology.* 2017; 242: 35-227.
51. Nguyen TDP, Le TVA, Show PL, Nguyen TT, Tran MH, Tran TNT & et al. Bioflocculation formation of microalgae-bacteria in enhancing microalgae harvesting and nutrient removal from wastewater effluent. *Bioresource technology.* 2019; 272: 9-34.
52. Liang G, Nguyen AV, Chen W, Nguyen TA, Biggs S. Interaction forces between goethite and polymeric flocculants and their effect on the flocculation of fine goethite particles. Chemical Engineering Journal. 2018; 334: 45-1034.
53. Alam MA, Vandamme D, Chun W, Zhao X, Foubert I, Wang Z & et al. Bioflocculation as an innovative harvesting strategy for microalgae. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology.* 2016; 15(4): 83-573.
54. Díaz-Santos E, Vila M, Vigara J, León R. A new approach to express transgenes in microalgae and its use to increase the flocculation ability of Chlamydomonas reinhardtii. *Journal of Applied Phycology.* 2016; 28(3): 21-1611.
55. Kim D-G, Oh H-M, Park Y-H, Kim H-S, Lee H-G, Ahn C-Y. Optimization of flocculation conditions for Botryococcus braunii using response surface methodology. *Journal of applied phycology*. 2013; 25(3): 82-875.
56. Zhang Z-J, Chen Y-Z, Hu H-R, Sang Y-Z. The beatability-aiding effect of Aspergillus niger crude cellulase on bleached simao pine kraft pulp and its mechanism of action. *BioResources.* 2013; 8(4): 70-5861.
57. Wan C, Zhao X-Q, Guo S-L, Alam MA, Bai F-W. Bioflocculant production from Solibacillus silvestris W01 and its application in cost-effective harvest of marine microalga Nannochloropsis oceanica by flocculation. *Bioresource technology.* 2013; 135: 12-207.
58. Zhou W, Min M, Hu B, Ma X, Liu Y, Wang Q & et al. Filamentous fungi assisted bio-flocculation: a novel alternative technique for harvesting heterotrophic and autotrophic microalgal cells. *Separation and Purification Technology*. 2013; 107: 65-158.
59. Rinanti A, Purwadi R (editors). *Harvesting of freshwater microalgae biomass by Scenedesmus sp. as bioflocculant.* The 4th International Seminar on Sustainable Urban Development: IOP Conference Series, Earth and Environmental Science. 2018.

استناد به این مقاله

بختیاری، حسن؛ انصاری طادی، رضا؛ گلزاری، ابوعلی (۱۴۰۰). مروری بر برداشت میکروجلبک‌ها از محیط‌های آبی با استفاده از روش‌های زیستی. *بیولوژی کاربردی*، دوره ۱۱، شماره ۴۱، ص ۸۵-۱۰۶.