Crop Biotechnology *Open Access*

Autumn (2024) 14 (1): 107-121.
DOI: 10.30473/cb.2024.71040.1965

REVIEW ARTICLE

Algae-based biofertilizers: applications and challenges

Seyed Majid Azizi[1*(ORCID:0000000336293055)], Saeed Soheilivand[1]

[1]Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran (ABRII), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

Correspondence
Seyed Majid Azizi
Email: m.azizi@abrii.ac.ir

Received: 16/Apr/2024
Accepted: 22/Jun/2024

How to cite
Azizi, S.M., & Soheilivand, S. (2024). Algae-based biofertilizers: applications and challenges. *Crop Biotechnology*, *14*(1), 107-121.
(DOI: 10.30473/cb.2024.71040.1965)

ABSTRACT

The global algae market was valued at USD 19.8 Billion in the year 2021 and it is expected to reach USD 36 Billion in 2028 by Compound Annual Growth Rate (CAGR) of 10.5%. Eukaryotic green algae and Gram-negative prokaryotic cyanobacteria are widely used in pharmaceutical, food, cosmetic, aquaculture, poultry and biofuel industries. Algae are also used in agriculture based on sustainable development by facilitating increased access to nutrients, maintaining organic carbon and soil fertility, increasing plant growth and crop yield, and stimulating soil microbial activity. Heterocyte-forming cyanobacteria, which have acclimated to diverse environmental conditions, represent a unique subset of photosynthetic prokaryotes capable of nitrogen fixation via the nitrogenase enzyme system. In addition, green algae and cyanobacteria by producing metabolites such as growth hormones, extracellular polymeric substances and antimicrobial compounds play an important role in their colonization in the phyllosphere and rhizosphere of plants and the proliferation of microbial and eukaryotic communities in the soil. Currently, the development of the consortium of cyanobacteria with bacteria or fungi or microalgae and biofilms based on them has expanded the scope of using algae. This review focuses on the application of algae in the production of crops and the protection and management of natural resources, the challenges of using algae and their commercial aspects in agriculture.

KEYWORDS

Biofilm; Bio-fertilizer; Cyanobacteria; Consortium; Microalgae.

Copyright © 2024 The Authors. Published by Payame Noor University.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

زیست‌فناوری گیاهان زراعی

سال چهاردهم، شماره یکم، پیاپی ۴۷، پاییز ۱۴۰۳ (۱۲۱-۱۰۷)

DOI: 10.30473/cb.2024.71040.1965

«مقاله مروری»

کودهای زیستی مبتنی بر جلبک: کاربردها و چالش‌ها

سید مجید عزیزی[1*](ارکید: ۰۰۰۰۰۰۰۳۳۶۲۹۳۰۵۵)، سعید سهیلی‌وند[1]

[1]استادیار پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

نویسنده مسئول:
سید مجید عزیزی
رایانامه: m.azizi@abrii.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۸
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۲

استناد به این مقاله:
عزیزی، سیدمجید و سهیلی‌وند، سعید (۱۴۰۳). کودهای زیستی مبتنی بر جلبک: کاربردها و چالش‌ها. فصلنامه علمی زیست فناوری گیاهان زراعی، ۱۴(۱)، ۱۲۱-۱۰۷.
(DOI: 10.30473/cb.2024.71040.1965)

چکیده

تجارت جهانی جلبک‌ها، ۱۹/۸ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۱ بوده و پیش¬بینی می¬شود در سال ۲۰۲۸ با نرخ رشد مرکب سالیانه ۱۰/۵ درصد به به ۳۶ میلیارد دلار برسد. جلبک‌های سبز یوکاریوتی و سیانوباکتری‌های پروکاریوتی گرم منفی در صنایع دارویی، غذایی، آرایشی، آبزی¬پروری، جیره غذایی طیور و سوخت‌های زیستی کاربرد گسترده‌ای دارند. همچنین، جلبک‌ها به واسطه افزایش دسترسی به مواد مغذی، حفظ کربن آلی و حاصلخیزی خاک، افزایش رشد و عملکرد گیاه و تحریک فعالیت میکروبی خاک؛ در کشاورزی مبتنی بر توسعه پایدار کاربرد دارند. سیانوباکتری‌های تولیدکننده هتروسیت که نسبت به دامنه وسیعی از شرایط محیطی سازگار شده اند، گروه ویژه‌ای از پروکاریوت‌های فتوسنتزکننده هستند که قادرند نیتروژن اتمسفری را توسط سیستم آنزیمی نیتروژناز تثبیت کنند. علاوه بر این، جلبک‌های سبز و سیانوباکتری‌ها با تولید متابولیت‌هایی مانند هورمون‌های رشد، پلیمرهای خارج سلولی و ترکیبات ضد میکروبی نقش مهمی در کلونیزه شدن آن‌ها در فیلوسفر و ریزوسفر گیاهان و تکثیر جوامع میکروبی و یوکاریوتی در خاک دارند. در حال حاضر، توسعه کنسرسیوم سیانوباکتری‌ها با باکتری‌ها یا قارچ‌ها یا ریزجلبک‌ها و بیوفیلم‌های مبتنی بر آن‌ها دامنه استفاده از جلبک‌ها را توسعه بخشیده است. این بررسی به کاربرد جلبک‌ها در تولید محصولات زراعی، چالش‌های کاربرد جلبک‌ها و جنبه‌های تجاری آن‌ها در بخش کشاورزی تمرکز دارد.

واژه‌های کلیدی
بایوفیلم، سیانوباکتری، ریزجلبک، کنسرسیوم، کود زیستی.

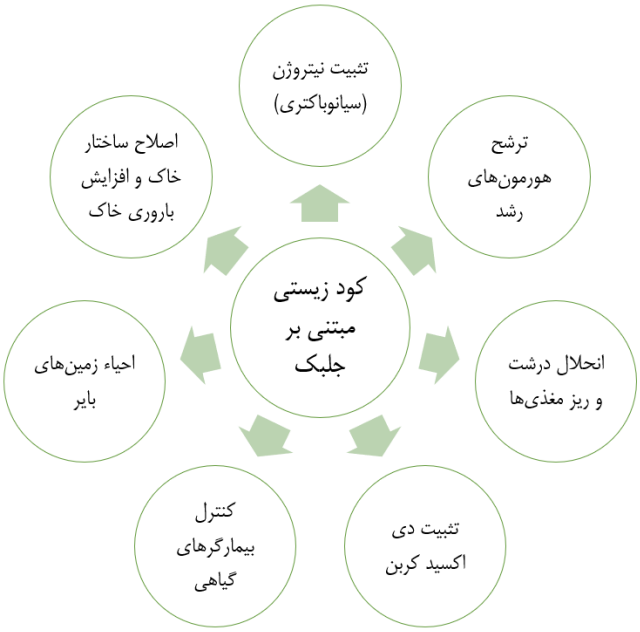
حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است. ۱۴۰۳ ©. ناشر این مقاله، دانشگاه پیام نور است.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشرشده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.
Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

مقدمه

کودهای زیستی به دلیل افزایش بهره‌وری تولید محصولات، کاهش اثرات آلایندگی کودهای شیمیایی و مقرون به صرفه بودن اهمیت قابل توجهی در کشاورزی مبتنی بر توسعه پایدار دارند (Singh *et al.*, 2011). تجارت جهانی کودهای شیمیایی و کودهای زیستی، به ترتیب ۱۹۳ و ۲/۸ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۱ بوده و پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۲۸ با نرخ رشد مرکب سالیانه ۴/۱ و ۱۰/۹ درصد به ۲۴۰ و ۵/۲ میلیارد دلار برسد (https://www.grandviewresearch.com). در میان انواع مختلف کودهای زیستی، فرمولاسیون‌های مبتنی بر ارگانیسم‌های فتوسنتزی مانند ریزجلبک‌های یوکاریوتی، سیانوباکتری‌های پروکاریوتی و درشت جلبک‌ها به دلیل افزایش نرخ تثبیت نیتروژن، ترشح هورمون‌های رشد، انحلال درشت و ریز مغذی‌ها، تثبیت دی اکسید کربن، کنترل بیمارگرهای گیاهی، احیاء زمین‌های بایر، اصلاح ساختار خاک و افزایش باروری خاک (شکل ۱) از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند (Li *et al.*, 2017).

تجارت جهانی کودهای زیستی جلبکی، ۱/۰۶ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۱ بوده و پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۲۸ با نرخ رشد مرکب سالیانه ۱۰/۱ درصد به ۲/۰۲ میلیارد دلار برسد (https://www.grandviewresearch.com). درشت جلبک‌ها و ریز جلبک‌ها نقش ویژه‌ای در ترسیب زیستی دی اکسید کربن داشته و ۵۰ درصد از کل فتوسنتز کره زمین توسط جلبک‌ها انجام می‌شود (Dawiec-Liśniewska *et al.*, 2022). مشارکت جلبک‌ها در کانی سازی، تجمع مواد آلی، درشت و ریز مغذی‌ها و تولید ترکیبات زیست فعال مانند پلیمرهای خارج سلولی، پلی‌ساکاریدها، هورمون‌های رشد و ترکیبات ضد میکروبی؛ رشد گیاه را بهبود بخشیده و کاندید مناسبی برای تولید کودهای زیستی می‌باشند (Gayathri *et al.*, 2015). جلبک‌ها نقشی کلیدی در حفظ بهره‌وری اکوسیستم‌های آبی و خشکی از طریق فتوسنتز، تثبیت نیتروژن و در دسترس قرار دادن مواد مغذی دارند (Prasanna *et al.*, 2016). همچنین، جلبک‌ها نقشی کلیدی در کنترل بیمارگرهای گیاهی (مانند باکتری، قارچ و نماتد) با تولید آنزیم‌های هیدرولیتیک، بنزوئیک اسید و ماژوسکولونیک اسید دارند (Braun and Colla, 2023). این ترکیبات ضد میکروبی با اختلال در غشاء سیتوپلاسمی و مهار سنتز پروتئین، میکروب‌های بیماریزا را سرکوب می‌کنند. سیانوباکتری‌ها برای کلونیزه شدن در ریزوسفر و اجزاء گیاه؛ به عنوان یک عامل آنتاگونیستی علیه بیمارگرها و آفات گیاهی، فعالیت آنزیم‌های دفاعی گیاه را با تولید و انتشار آنزیم‌های هیدرولیتیک، متابولیت‌های ضد میکروبی، ترانسپورترها و عوامل شلاته کننده تحریک می‌کنند (Swain *et al.*, 2017).



شکل ۱. مزایای کاربرد کودهای زیستی مبتنی بر جلبک در کشاورزی پایدار.

تحریک فعالیت آنزیم‌های دفاعی گیاه با افزایش ایمنی در برابر عوامل بیمارگر، افزایش رشد و عملکرد محصول همراه می‌باشد. استقرار سیانوباکتری‌ها در خاک به دلیل قابلیت‌های آن‌ها به منظور افزایش رشد گیاه و عملکرد محصول، تعدیل فعالیت میکروبی خاک و اصلاح مواد مغذی خاک به خوبی مستند شده است (Chabili *et al*., 2024). علاوه بر این، استفاده از کود زیستی جلبک برای افزایش حاصلخیزی خاک، رشد گیاه، کیفیت و ویژگی‌های تغذیه‌ای میوه و عملکرد دانه مفید می‌باشد. همچنین تلقیح سیانوباکتری‌ها در خاک، در دسترس بودن میکرو مغذی‌ها (روی، مس، آهن و غیره) و درشت مغذی‌ها (کربن، نیتروژن، فسفر و پتاسیم) و انتقال آن‌ها به گیاهان را فراهم می‌نماید (Coppens *et al*., 2016). گزارشات متعددی در خصوص استفاده از سیانوباکتری‌ها به ویژه سویه‌های هتروسیست (تثبیت کننده نیتروژن) به عنوان کودهای زیستی در مزارع برنج منتشر شده است. از سوی دیگر گزارشات متعددی در خصوص امکان کاربرد سویه‌های هتروسیست و غیر هتروسیست و کنسرسیوم آن‌ها با جلبک‌های سبز، باکتری‌ها و قارچ‌ها به عنوان کودهای زیستی منتشر شده است (Ng *et al*., 2024). تلقیح سیانوباکتری‌ها در خاک و یا به عنوان پوشش بذر یا پخش در مزارع؛ باعث افزایش سرعت جوانه زنی، رشد گیاه و عملکرد در غلات، محصولات باغبانی و سبزیجات می‌شود (Ammar *et al*., 2022). بررسی حاضر، سیانوباکتری‌ها و جلبک‌های سبز را به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای استفاده در کودهای زیستی، عاملی برای بهبود ساختار و عملکرد خاک و افزایش رشد و عملکرد گیاه برجسته می‌کند. همچنین، پیشرفت‌های اخیر و مزایای زیست‌محیطی جلبک‌ها و مداخلات آتی مورد نیاز مبتنی بر یک راه حل پایدار و مؤثر در کشاورزی مدرن مورد بحث قرار می‌گیرد.

جلبک‌ها به عنوان کودهای زیستی، محرک‌های رشد گیاهان و عامل افزایش باروری خاک

جلبک‌ها در اکوسیستم‌های متنوعی مانند بیابان‌های سرد و گرم، پوسته خاک، در شکاف سنگ‌ها یا در اعماق اقیانوس‌ها یافت می‌شوند. ریزجلبک‌ها در این زیستگاه‌ها عمدتاً دارای اشکال تک سلولی بوده و بخش قابل توجهی از ترسیب زیستی کربن توسط این موجودات انجام می‌شود (Osorio-Reyes *et al*., 2023). جلبک‌ها همچنین اثرات مثبتی بر کیفیت و باروری خاک، جامعه میکروبی خاک و تسهیل فعل و انفعالات میکروبی خاک دارند. همچنین ریزجلبک‌های سبز به عنوان کود زیستی در بهبود حاصلخیزی خاک، افزایش جوانه زنی بذر، رشد گیاه، عملکرد و ارزش غذایی محصول نقش دارند (Priya *et al*., 2015a). توانایی تثبیت نیتروژن توسط سیانوباکتری‌ها به خوبی شناخته شده است. با این حال، جلبک‌ها می‌توانند در معدنی سازی مواد مغذی، تولید هورمون‌های رشد، کنترل زیستی، احیاء زمین‌های بایر، بهبود مکانیسم دفاعی گیاه و غیره مفید باشند (Nanjappan *et al*., 2007). صفات مختلف مرتبط با سیانوباکترها و ریزجلبک‌های سبز که آن‌ها را به عنوان گزینه‌ای امیدوارکننده در کشاورزی مدرن تبدیل می‌کند، در بخش‌های ذیل به تفصیل مورد بحث قرار می‌گیرد.

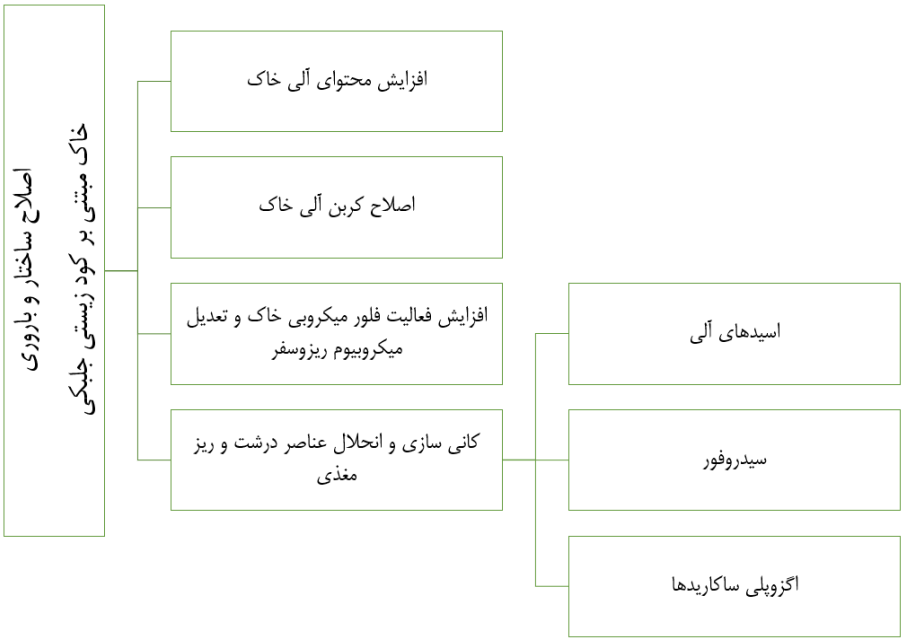
تثبیت نیتروژن توسط سیانوباکتری‌ها

سیانوباکتری‌ها، به دلیل دارا بودن سلول‌های تخصصی به نام هتروسیست، قادر به تثبیت نیتروژن اتمسفری می‌باشند. سیانوباکتری‌ها برای تامین نیتروژن خود با گیاهان رقابت نمی‌کنند بلکه در دسترس بودن نیتروژن خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند. مطالعات اخیر، افزایش قابل توجهی در محتوای نیتروژن خاک پس از تلقیح سیانوباکتری‌ها یا کنسرسیوم آن‌ها در محصولات کشاورزی را نشان داده است. تلقیح سیانوباکتری‌ها در بخش کشاورزی می‌تواند به صرفه جویی ۲۵ تا ۴۰ درصدی کودهای شیمیایی نیتروژن دار کمک کند (Prasanna *et al*., 2017). تلقیح سیانوباکتری‌های رشته‌ای تثبیت کننده نیتروژن در مزرعه برنج منجر به کاهش مصرف ۵۰ درصدی کودهای شیمیایی نیتروژن دار با عملکرد و کیفیت مشابه دانه می‌شود (Prasanna *et al*., 2017). همچنین، گزارش‌های اخیر دامنه استفاده از سیانوباکتری‌های هتروسیست برای تثبیت نیتروژن را در طیف گسترده ای از سبزیجات، پنبه و محصولات غذایی نشان داده است. سوارنا لاکشمی و همکاران (۲۰۱۳) گزارش نمودند که تلقیح خاک مزارع گندم با بیوفیلم سیانوباکتری هتروسیست جنس Anabaena باعث افزایش ۵۷ و ۴۰ درصدی نیتروژن خاک به ترتیب نسبت به دوز توصیه شده کود شیمیایی نیتروژن دار به میزان ۵۰ و ۱۰۰ درصد می‌شود (Swarnalakshmi *et al*., 2013). عثمان و همکاران (۲۰۱۰) پتانسیل دو سیانوباکتری *Nostoc entophytum* و *Oscillatoria augustissima* را به عنوان کودهای زیستی در گیاه زراعی نخود ارزیابی کردند. مطالعه آن‌ها نشان داد که تلقیح سیانوباکتری‌ها منجر به صرفه‌جویی ۵۰ درصدی در مصرف کودهای شیمیایی نیتروژن دار ضمن افزایش ارزش غذایی دانه نخود می‌شود (Osman *et al*., 2010). جهان و پرساد (۲۰۰۶) با تلقیح سویه‌های سیانوباکتری تثبیت‌کننده نیتروژن در مزارع برنج، ضمن صرفه جویی ۲۵ درصدی در

مصرف کودهای شیمیایی نیتروژن دار عملکرد کاه و دانه را به میزان قابل‌توجهی افزایش دادند (Jha and Prasad 2006). اینوک و همکاران (۲۰۰۹) گزارش نمودند که تلقیح سیانوباکتری رشته ای هتروسیست جنس Nostoc در مزارع برنج منجر به عملکرد محصول مشابه با کودهای شیمیایی نیتروژن دار می‌شود (Innok *et al*., 2009). سینگ و داتا (۲۰۰۷) گزارش نمودند که تلقیح سیانوباکتری *Anabaena variabilis* به عنوان تثبیت کننده نیتروژن، رشد و عملکرد برنج را در مقایسه با کود شیمیایی نیتروژن دار در شرایط مزرعه افزایش می‌دهد (Singh and Datta, 2007). ممکن است نگرانی‌های زیست‌محیطی در مورد شتشوی بیش از حد نیتروژن تثبیت شده در خاک به دلیل استفاده از سیانوباکتری‌های تثبیت کننده نیتروژن وجود داشته باشد، با این حال، میزان آن در مقایسه با شستشوی ناشی از کودهای شیمیایی می‌تواند بسیار کم باشد. سیانوباکتری‌های مولد اگزوپلی ساکارید، پوسته‌های زیستی خاک را تشکیل می‌دهند و ضمن تثبیت نیتروژن از شسته شدن نیتروژن خاک جلوگیری می‌نمایند (Mager and Thomas, 2011). به طور کلی سیانوباکتری‌ها با فراهم نمودن ۲۵ تا ۴۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، هزینه تامین کود برای جامعه کشاورز را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهند (Liu *et al*., 2024).

مواد آلی خاک، کانی‌سازی و انحلال مواد مغذی ماکرو/میکرو توسط جلبک‌ها

خاک‌ورزی بیش از حد و استفاده مکرر از ماشین آلات سنگین؛ ثبات ساختاری خاک، نفوذ آب و توانایی تجمع مواد مغذی را تغییر می‌دهد. حفظ سطوح کافی از مواد آلی خاک و ساختار مناسب خاک برای کشاورزی پایدار ضروری است. سیانوباکتری‌ها و ریزجلبک‌های سبز به دلیل جذب دی اکسید کربن اتمسفر از طریق فتوسنتز منبع مهمی از مواد آلی در بخش کشاورزی هستند. سیانوباکتری‌ها و ریزجلبک‌های سبز همچنین به واسطه دفع کربن (اگزوپلی ساکاریدها) در خاک، مخزن کربن آلی خاک را بهبود و رشد سایر میکروارگانیسم‌ها و جانوران را افزایش می‌دهند (Renuka *et al*., 2016). علاوه بر این، سیانوباکتری‌ها و ریزجلبک‌های سبز از طریق تغذیه و تجزیه زیست توده جلبکی، محتوای آلی خاک را افزایش می‌دهند. تلقیح جلبک‌های سبز و سیانوباکتری‌ها در مزارع مختلف منجر به افزایش فعالیت فلور میکروبی خاک و کربن آلی کل خاک می‌شوند (Renuka *et al*., 2016) (شکل ۲).



شکل ۲. مزایای کاربرد کودهای زیستی مبتنی بر جلبک در اصلاح ساختار و باروری خاک.

ایلماز و سونمز (۲۰۱۷) آزمایش گلدانی را در شرایط گلخانه‌ای برای ارزیابی پتانسیل کودهای زیستی مختلف بر روی کربن آلی خاک انجام دادند. یافته‌های آن‌ها نشان داد، کود زیستی مبتنی بر سیانوباکتری‌ها و ریزجلبک‌های سبز به طور قابل توجهی کربن آلی خاک را در مقایسه با سایر تیمارها افزایش می‌دهد (Yilmaz and Sönmez, 2017). سیانوباکتری‌ها و ریزجلبک‌های سبز علاوه بر اصلاح کربن آلی خاک، به کانی سازی و حل شدن عناصر ماکرو و ریز مغذی اولیه در خاک نیز کمک می‌کنند. فرآیندی که در آن موجودات زنده به تجمع و ترکیب با ترکیبات معدنی آلی یا معدنی کمک می‌کنند، زیست کانی‌سازی اطلاق می‌شود. کانی‌سازی سیانوباکتری‌ها و ریزجلبک‌های سبز با تولید اسیدهای آلی، سیدروفور و اگزوپلی ساکاریدها همراه می‌باشد (شکل ۲) (Braun and Colla, 2023). اسیدهای آلی مانند اسید هیومیک، در فرآیند هوازدگی مواد معدنی نقش حیاتی ایفا می‌کنند. سیانوباکتری‌ها موادی شبیه اسید هیومیک ترشح می‌کنند که از اهمیت کشاورزی برخوردار می‌باشد. اگزوپلی ساکاریدهای ترشح شده از سیانوباکتری *Microcystis aeruginosa* به عنوان پمپ های بیولوژیکی عمل نموده و جذب زیستی فنانترن را تسهیل می‌بخشند (Bai *et al*., 2016). یاندیگری و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که سیانوباکترهای *Westiellopsis prolifica* و *Anabaena variabilis* می‌توانند کلسیم فسفات نامحلول خارج سلولی و سنگ فسفات Mussorie را به فرم محلول تبدیل نمایند (Yandigeri, 2010). پاور و همکاران (۲۰۰۷) گزارش کردند که سیانوباکتری‌ها می‌توانند کربنات منیزیم خاک تالاب را به فرم محلول تبدیل نمایند. مطالعه آن‌ها نشان داد که انحلال کربنات منیزیم توسط سیانوباکتری‌ها نقش مهمی در تشکیل کربنات منیزیم طبیعی در تالاب‌های قلیایی آمریکا و کانادا دارد (Power *et al*., 2007). سیدروفورها ترکیبات آلی تولید شده توسط میکروارگانیسم‌ها هستند که به شلاته کردن آهن فریک در شرایط کمبود آهن کمک نموده و آن‌ها را در دسترس میکروب‌ها و گیاهان قرار می‌دهند. سیانوباکتری‌هایی مانند *Anabaena flosaquae* و *Anabaena cylindrica* توانایی تولید سیدروفور برای شلاته نمودن ریزمغذی‌هایی مانند آهن، مس و غیره را دارند (Bibi *et al*., 2024). مطالعات محدودی نیز در خصوص توانایی جلبک‌های سبز Scenedesmus و Chlorella به منظور تشکیل سیدروفورهای آهن از طریق آزادسازی شلاته کننده‌های آهن انجام شده است (Benderliev *et al*., 2003). چندین گزارش در مورد غنی‌سازی ریزمغذی‌هایی مانند آهن، منگنز، مس و روی با هدف افزایش کیفی و کمی عملکرد غلات مبتنی بر کنسرسیوم‌های سیانوباکتری و جلبک‌های سبز منتشر شده است. با این حال، مطالعات عمیقی در خصوص مکانیسم‌های دخیل در انتقال آن‌ها از خاک به ریشه و اندام‌های هوایی گیاه باید انجام شود. همچنین، تلقیح سیانوباکتری‌ها ضمن تعدیل میکروبیوم ریزوسفر منجر به تغییر ساختار و فراوانی جوامع میکروبی درگیر در کانی سازی و حل شدن مواد مغذی می‌شود. تلقیح سیانوباکتری *Calothrix elenkinii* تغییرات مفیدی در میکروبیوم گیاه و ریزوسفر ایجاد می‌نماید (Manjunath *et al*., 2016). تولید و ترشح اگزوپلی ساکاریدها، یکی از مکانیسم‌های اصلی تعدیل و بهبود فعالیت میکروبی خاک به واسطه تلقیح سیانوباکتری‌ها می‌باشد. اگزوپلی ساکاریدهای ترشح شده توسط سیانوباکتری‌ها و جلبک‌های سبز با تشکیل بیوفیلم‌های مفید در ریزوسفر گیاه، کربن آلی برای رشد میکروب‌های مفید کشاورزی را فراهم می‌نمایند. این بیوفیلم‌ها متشکل از سیانوباکتری‌های فوتوتروف هوازی، جلبک‌های سبز، دیاتوم‌ها و باکتری‌های فوتوتروف بی‌هوازی و به دنبال آن باکتری‌ها و قارچ‌های هتروتروف می‌باشند (Chabili *et al*., 2024). ترشح اگزوپلی ساکاریدها به صورت ماتریکس هیدراته توسط ارگانیسم‌های فوتوتروف و هتروتروف به نگه داشتن سلول‌ها در کنار هم، ثبات مکانیکی سلول‌ها و به تشکیل میکروکلونی‌ها کمک می‌کنند. همچنین اگزوپلی ساکاریدها ضمن محافظت سلول‌ها از خورندگان جلبکی، جریان مواد مغذی را تسهیل می‌بخشند. اگزوپلی ساکاریدها متشکل از ترکیبات آلی (پلی ساکاریدهای خارج سلولی، پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و غیره) و ترکیبات معدنی (کربنات، سیلیس، و غیره) بوده و منبع اصلی کربن آلی خاک می‌باشند. اگزوپلی ساکاریدها همچنین به انتقال نور به مناطق عمیق‌تر بیوفیلم کمک می‌کنند (Bondoc *et al*., 2016). سیانوباکتری‌های فوتوتروف و جلبک‌های سبز در چنین بیوفیلم‌هایی، کربن و اکسیژن آلی را به واسطه فتوسنتز و نیتروژن را از طریق تثبیت بیولوژیکی نیتروژن فراهم می‌کنند. ارگانیسم‌های فوتوتروفیک، کربن و نیتروژن آلی را به ارگانیسم‌های هتروتروفیک در بیوفیلم‌ها به واسطه محصولات جانبی فتوسنتز و لیز سلولی ارائه می‌دهند (Ng *et al*., 2024). در ادامه ارگانیسم‌های هتروتروفیک به طور متوالی به بازیافت و بازسازی مواد مغذی کمک می‌کنند. ارتباط بیوفیلم‌ها با عناصر خاک به واسطه اگزوپلی ساکاریدها، آنزیم‌ها و اسیدهای آلی به

حل شدن مواد مغذی خاک کمک می‌کند. کانی سازی خاک با تغییر در شرایطی مانند پتانسیل ردوکس، pH و غیره از طریق فعالیت میکروبی در بیوفیلم‌ها و افزایش زیست فراهمی مواد مغذی تسهیل می‌شود (Roeselers *et al*., 2008). ژن‌ها و مکانیسم‌های مولکولی مختلفی که در عملکرد چنین بیوفیلم‌هایی دخیل هستند، توسط بهارتی و همکاران (۲۰۱۷) بررسی شده‌اند. بیان متفاوت ژن‌ها در فاز پلانکتونیک بیوفیلم و انتقال ژن بین اعضاء متشکل بیوفیلم‌ها گزارش شد. با این حال، اطلاعات کمی در خصوص بیوفیلم‌های فوتوتروفیک منتشر شده است. شناسایی ژن‌های مسئول تشکیل بیوفیلم و شناخت مکانیسم‌های مولکولی درگیر در سیگنال‌دهی بین شرکاء مختلف، درک ما را از شکل‌گیری و توسعه بیوفیلم‌های مبتنی بر ریزجلبک‌ها در بخش کشاورزی افزایش می‌دهد (Bharti *et al*., 2017).

کلونیزاسیون جلبک‌ها در ریزوسفر و فیلوسفر گیاهان

سیانوباکتری‌ها به طور موفقیت‌آمیزی در خاک مستقر شده و در بخش‌های مختلف گیاه کلونیزه می‌شوند. انواع مختلفی از همزیستی سیانوباکتری‌ها با سایر جلبک‌ها، قارچ‌ها، ژیمنوسپرم‌ها، پتریدوفیت‌ها و گیاهان آوندی گزارش شده است (Ng *et al*., 2024). مطالعه‌ای توسط کرینگز و همکاران (۲۰۰۹) نشان داد که سیانوباکتری‌ها توانایی ورود از طریق روزنه‌ها و کلونیزه شدن در اتاقک‌های زیر روزنه‌ای، فضاهای بین سلولی، سلول‌های پارانشیم و منطقه آربوسکول میکوریزی دارند (Krings *et al*., 2009). گانتر و همکاران (۱۹۹۳) توانایی سیانوباکتری Nostoc برای ایجاد ارتباط با ریشه‌های گیاه گندم با استفاده از نیتروژن نشان‌دار را گزارش کردند. در حالی‌که سیانوباکتری Anabaena توانایی کلونیزاسیون نداشت. سیانوباکتری Nostoc در فضاهای بین‌سلولی، سلول‌های اپیدرمی و کورتکس گیاه گندم به شکل رشته‌های متحرک سلولی کلنیزه شده و سونیکاسیون ملایم یا آسیب مکانیکی به بافت‌های ریشه گندم در افزایش کلونیزاسیون سیانوباکتری مفید می‌باشد (Gantar *et al*., 1993). کارتیکیان و همکاران (۲۰۰۹) رشته‌های سیانوباکتری را در داخل ریشه‌های موئین و در ناحیه کورتکس گیاه برنج و گندم مشاهده کردند که همراه با افزایش رشد، تثبیت نیتروژن و تولید IAA بود. همچنین با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و ابزار انگشت نگاری DNA توانایی سیانوباکترها برای کلونیزه شدن در بخش‌های مختلف گیاه برنج و گندم ارزیابی و گزارش شد کلونیزاسیون موجب برانگیختن سیستم دفاعی گیاه، تقویت تثبیت نیتروژن و افزایش رشد گیاهان می‌شود (Karthikeyan *et al*., 2009). پریا و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که سیانوباکتری *Calothrix elenkinii* می‌تواند در بافت‌های ریشه و اندام هوایی گیاه برنج کلونیزه شده و جمعیت میکروبی تثبیت‌کننده های نیتروژن و حل‌کننده فسفر را تحریک کند (Priya *et al*., 2015b). تلقیح سیانوباکتری‌ها عملکرد همزیستی نخود را بهبود بخشید و تغییرات مفیدی در پروفایل جامعه میکروبی خاک و گره‌های ریزوسفر ایجاد کرد (Ramakrishnan *et al*., 2017). بنابراین، تجزیه و تحلیل عمیق تنوع سیانوباکتری‌ها در روابط همزیستی با گیاهان در کشاورزی پایدار سودمند خواهد بود.

تولید هورمون‌های رشد توسط جلبک‌ها

فیتوهورمون‌ها نقش مهمی در رشد و نمو گیاهان دارند. افزودن هورمون‌های گیاهی (مصنوعی یا طبیعی) در کشاورزی برای افزایش بهره‌وری و عملکرد محصول و کنترل علف‌های هرز گزارش شده است. با این حال، خطر بالقوه انتقال هورمون‌های گیاهی در مناطق مجاور و منابع آبی یک نگرانی زیست محیطی است. جلبک‌ها در تولید هورمون‌های رشد مانند اکسین‌ها، سیتوکینین‌ها، اسید جاسمونیک و غیره نقش دارند که می‌توانند به عنوان محرک‌های زیستی در کشاورزی مورد استفاده قرار گیرند (Chabili *et al*., 2024). بسیاری از ریزجلبک‌های سبز و سویه‌های سیانوباکتری هورمون‌های داخل سلولی دارند، در حالی‌که در برخی جنس‌ها، هورمون‌ها در محیط رشد و محیط اطراف تولید یا ترشح می‌شوند (Santi *et al*., 2013). استیرک و همکاران (۲۰۰۲) گزارش کردند که ریزجلبک‌های Chlorophyta و Cyanophyta هورمون‌های سیتوکینین و اکسین تولید می‌کنند. با این حال، سطوح تولیدی هورمون‌ها با قابلیت کاربرد در کشاورزی بسیار پایین بود. اما گزارش‌هایی در مورد استفاده از هورمون‌های سیانوباکتری برای رشد در شرایط آزمایشگاهی گیاهان ارزشمند منتشر شده است (Stirk *et al*., 2002). تلقیح زیست توده ریزجلبک سبز و زیست توده سیانوباکتری باعث بهبود پاسخ آندروژنی در کشت بساک و مطالعات باززایی ذرت شد. هورمون‌های رشد به‌دست‌آمده از *Phormidium foveolarum* که یک سیانوباکتری رایج در شالیزارها است، جوانه‌زنی و رشد نشاء برنج را تسریع می‌کند (Hussain and Hasnain, 2011). حسین و حسنایین (۲۰۱۱) پتانسیل هورمون‌های (سیتوکینین و

اکسین) ترشح شده توسط سویه‌های سیانوباکتری را برای تحریک رشد در شرایط کنترل شده و مزرعه مورد مطالعه قرار دادند. مطالعه آن‌ها همبستگی مثبت بین هورمون‌های سیانوباکتری (سیتوکینین و اکسین) و پارامترهای رشد گیاه مانند طول ساقه، طول ریشه، طول سنبله و وزن دانه‌ها را نشان داد. افزایش سطح فیتوهورمون در گیاه را می‌توان به تعامل سیانوباکتری-گیاه در ریزوسفر نسبت داد (Hussain and Hasnain, 2011). مظهر و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که در حضور سیانوباکتری‌ها، افزایشی در سطح هورمون‌های اکسین درون‌زا و برون‌زا در گیاه گندم مشاهده می‌شود که تحت تاثیر سیگنال دهی بین گیاه و سیانوباکتری‌ها می‌باشد (Mazha *et al*., 2013). گایاتری و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که اثر هورمون‌های خارج سلولی *Aphanothece* sp. MBDU 515 مشابه هورمون‌های مصنوعی (IAA and IBA) به منظور ریزازدیادی *Arachis hypogaea* و *Moringa oleifera* می‌باشد. استفاده از هورمون‌های سیانوباکتری نیز باعث کاهش تجمع ترکیبات فنولی در *A. hypogaea* شد (Gayathri *et al*., 2015). بنابراین، استفاده از پتانسیل هورمون‌های سیانوباکتری‌ها در زراعت گیاهان می‌تواند یک رویکرد سازگار با محیط زیست برای تحریک رشد گیاه باشد (Osorio-Reyes *et al*., 2023). با این حال، تحقیقات در زمینه ارزیابی کاربرد هورمون‌های جلبکی در عرصه کمتر انجام شده است و نیاز به بررسی‌های بیشتری دارد.

برانگیختن مکانیسم‌های دفاعی گیاهان توسط جلبک‌ها

سیانوباکتری‌ها با برانگیختن فعالیت‌های آنتی اکسیدانی و مرتبط با بیماری‌زایی گیاه مانند β- ۱ و ۳ اندوگلوکاناز، کیتیناز، کاتالاز، پراکسیداز، پلی فنل اکسیداز، فنیل آلانین آمونیاک لیاز و غیره مکانیسم‌های دفاعی گیاهان را تعدیل می‌کنند. پریا و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که تلقیح سیانوباکتری *Calothrix elenkinii* به طور قابل توجهی باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های دفاعی گیاه مانند پراکسیداز، پلی فنل اکسیداز و فنیل آلانین آمونیاک لیاز در ریشه و اندام هوایی در گیاه برنج می‌شود (Priya *et al*., 2015b). کومار و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که تلقیح سویه‌های سیانوباکتری، به میزان قابل توجهی فعالیت β- ۱ و ۳ اندوگلوکاناز را در ریشه و اندام هوایی بذور گیاهان ادویه‌ای افزایش می‌دهد (Kumar *et al*., 2013). بابو و همکاران (۲۰۱۵) اثر تلقیح سیانوباکتری‌های Anabaena و Calothrix را بر فعالیت آنزیم‌های دفاعی گیاه گندم مطالعه و گزارش کردند بیشترین فعالیت پراکسیداز، پلی فنل اکسیداز و فنیل آلانین آمونیاک لیاز در تیمارهای تلقیح شده با Anabaena به دست آمد (Babu *et al*., 2015). گرزیک و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که تلقیح جلبک سبز همچنین می‌تواند پاسخ دفاعی گیاه را با افزایش فعالیت RNA در گیاه بهبود بخشد. آن‌ها همچنین گزارش کردند که استفاده از کودهای زیستی مبتنی بر جلبک باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های جذب کننده مواد مغذی مانند دهیدروژناز، نیترات ردوکتاز و اسید یا آلکالین فسفاتاز در برگ *Salix viminalis* می‌شود. با این حال، مکانیسم‌های واقعی درگیر در تعامل جلبک و گیاه در افزایش فعالیت آنزیم‌های دفاعی به بررسی‌های جامع نیاز دارند (Grzesik *et al*., 2017). سیانوباکتری‌های هتروسیست با تثبیت نیتروژن و کانی‌سازی به غنی‌سازی مواد مغذی کمک می‌کنند، در حالی که جلبک‌های سبز و سیانوباکتری‌های غیرهتروسیست عمدتاً از طریق آزادسازی مواد مغذی نامحلول به غنی سازی مواد مغذی کمک می‌کنند. توانایی فتوسنتزی ریزجلبک‌ها و کاربرد آن‌ها در خاک منجر به غنی‌سازی کربن خاک، بهبود مواد آلی خاک، تسهیل فرآیندهای کانی‌سازی می‌شود و دسترسی به عناصر درشت و ریز مغذی را در خاک و ریزوسفر افزایش می‌دهد (Renuka *et al*., 2018). همچنین ریزجلبک‌ها با تولید متابولیت‌های ارزشمند مانند هورمون‌ها، پلی ساکاریدها و غیره بهره‌وری تولید محصولات کشاورزی را افزایش می‌دهند. همچنین، برخی از گونه‌ها توانایی حل کردن درشت/ ریز مغذی‌ها را دارند. ریزجلبک‌ها ممکن است مواد مغذی را به روش محلول پاشی نیز فراهم کنند. در این خصوص، گونه‌هایی که می‌توانند کلونیزه شوند، دارای رنگدانه‌ها یا متابولیت‌هایی هستند تا محیط خشن حاکم بر فیلوسفر را تحمل کنند (Osorio-Reyes *et al*., 2023). فعل و انفعالات میکروجلبک / سیانوباکتری به طور مستقیم و غیرمستقیم به بهبود ایمنی و استحکام گیاه در مواجهه با تنش‌های غیرزیستی / زیستی کمک می‌کند. بنابراین، شناسایی گونه‌های ریزجلبکی رویکردی کارآمد در کشاورزی پایدار می‌باشد (Renuka *et al*., 2018).

مدیریت آفات و بیماری‌های گیاهی مبتنی بر جلبک‌ها

استفاده از سموم شیمیایی علیه پاتوژن‌ها و آفات، برای پایداری اکوسیستم‌های کشاورزی خطرناک است. این امر منجر به کشف رویکردهای پایدار برای کنترل پاتوژن‌ها و آفات شده است.

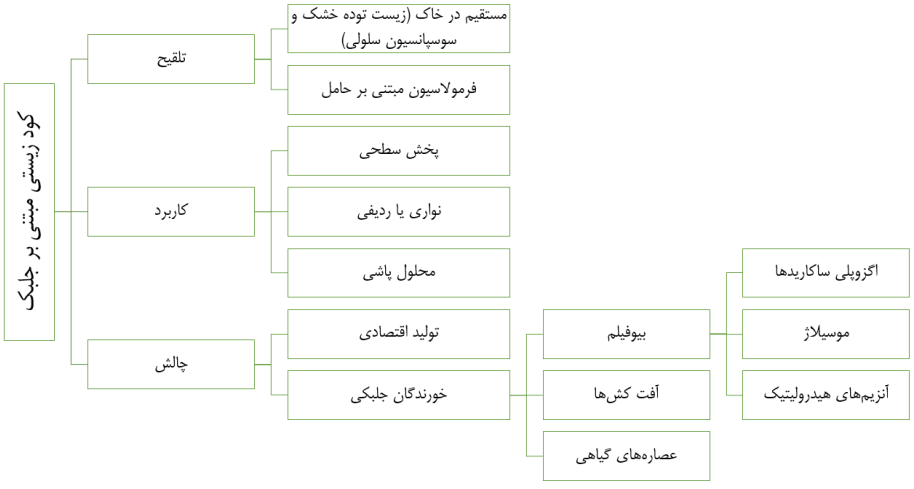
باکتری‌ها و قارچ‌ها ارگانیسم‌های کارآمدی برای کنترل زیستی پاتوژن‌ها می‌باشند. در چند دهه گذشته، ریزجلبک‌ها، عمدتاً سیانوباکتری‌ها، نیز به عنوان ارگانیسم‌های بالقوه برای کنترل بیولوژیکی پاتوژن‌ها معرفی شده‌اند (Ng *et al*., 2024). سیانوباکتری‌ها علاوه بر کاهش استفاده از مواد شیمیایی مضر برای محیط زیست، به بهبود مقاومت گیاه در برابر عوامل بیماریزا و افزایش عملکرد محصول منجر می‌شوند (Renuka *et al*., 2018). همچنین گزارش شده است که ریزجلبک‌های سبز و عصاره درشت جلبک‌های سبز دارای خواص آنتی بیوتیکی علیه باکتری‌ها و قارچ های بیمارگر گیاهی می‌باشند (Mashjoor *et al*., 2016). با این حال، بر اساس بررسی منابع انجام شده گزارشی در مورد استفاده از ریزجلبک سبز در کنترل بیولوژیکی آفات گیاهی منتشر نشده است.

روش‌های کاربرد کودهای زیستی مبتنی بر جلبک

کنسرسیوم و بیوفیلم‌های سیانوباکتری‌ها و جلبک‌های سبز از رویکردهای کارآمد برای دستیابی به بیشینه کلونیزاسیون و اثر بخشی کودهای زیستی جلبکی می‌باشند. کنسرسیوم سیانوباکتری‌ها و جلبک‌های سبز با افزایش نرخ تثبیت نیتروژن، ترشح سیدروفور، خواص آنتی بیوتیکی و تولید فیتوهورمون‌ها اثر بخشی کودهای زیستی جلبکی را افزایش می‌دهند. همچنین بیوفیلم‌ها با افزایش فعالیت میکروبی و حاصلخیزی خاک، رشد گیاه را بهبود می‌بخشند (Renuka *et al*., 2018). توسعه روش‌های استفاده از کود زیستی، از پیش نیازهای مهم برای استفاده اقتصادی از کود در بخش کشاورزی محسوب می‌شود. نحوه تلقیح جلبک‌های سبز و سیانوباکتری‌ها شامل تلقیح مستقیم در خاک به‌عنوان زیست توده خشک (قرص، گرانول، پودر و غیره) یا کشت مایع و فرمولاسیون آن‌ها با حامل‌های مناسب مانند کودهای شیمیایی / آفت کش‌ها و کاربرد به روش پخش سطحی، نواری یا ردیفی و محلول پاشی می‌باشد (شکل ۳).

زیست توده ریز جلبک‌ها را می‌توان مستقیماً به عنوان زیست توده خشک یا به صورت کشت مایع در خاک استفاده کرد. هر دو روش در افزایش حاصلخیزی خاک و بهره‌وری محصول موثر می‌باشند (Xiao and Zheng, 2016).

روش‌های پخش سطحی، نواری یا ردیفی را می‌توان با استفاده از گرانول و فرمولاسیون مبتنی بر حامل‌هایی مانند ترکیب با کود یا سایر حامل‌های مناسب انجام داد. محلول پاشی روش دیگری برای کاربرد کود زیستی ریز جلبکی است. محلول پاشی را می‌توان با استفاده از مایع رویی کشت یا سوسپانسیون سلولی تهیه و با رویکردهای کوددهی (افزودن جلبک کود در سیستم‌های آبیاری)، خاک‌پاشی، سمپاشی هوایی و سمپاش خودکششی در عرصه استفاده نمود. در مناطق دیم، استفاده از سمپاشی هوایی و سمپاش خودکششی به دلیل بهبود کارایی مصرف مواد مغذی مفید می‌باشد. گزارشات متعددی اثربخشی این روش‌ها را برای استفاده موفقیت آمیز از سیانوباکتری‌ها/ ریزجلبک‌های سبز به عنوان کودهای زیستی نشان داده است (Renuka *et al*., 2018).



شکل ۳. رویکردهای تلقیح جلبک، کاربرد و چالش‌های استفاده از جلبک در کشاورزی پایدار.

چگونگی استفاده از کودهای زیستی جلبکی به نیاز گیاه به مکمل‌های غذایی، کنترل زیستی پاتوژن‌های گیاهی و نوع محصول (بذر یا نشاء) بستگی دارد. گارسیا و سومرفلد (۲۰۱۶) گزارش کردند که تیمار بذرها با مایع رویی کشت یا سوسپانسیون سلولی جلبک اثرات مثبتی بر جوانه زنی بذر و رشد گیاه دارد (Garcia *et al*., 2016). کانی سازی زیست توده جلبکی می‌تواند در یک دوره ۲۰ تا ۳۰ روزه انجام شود و مواد مغذی را در دسترس گیاه قرار دهد (Coppens *et al*., 2016). با این وجود، استانداردسازی و بهینه‌سازی میزان زیست توده مورد استفاده قبل از کاربرد آن‌ها در عرصه ضروری است. مطالعاتی در خصوص بهینه سازی غلظت زیست توده جلبکی برای دستیابی به بیشینه عملکرد کودهای زیستی انجام شده است. با این حال، بسته به ترکیب مواد مغذی خاک، نوع ریزجلبک‌ها / سیانوباکتری‌ها و ویژگی‌های زیست توده می‌تواند متفاوت باشد. استفاده از کود جلبکی از طریق محلول پاشی می‌تواند رویکردی مفید باشد، زیرا اثرات مستقیمی بر روی گیاه دارد، به ویژه اگر عصاره آن غنی از هورمون‌های گیاهی باشد. گزارش‌های مختلف مزایای رویکرد فوق را در افزایش رشد گیاه، عملکرد، فیزیولوژی، کلروفیل، فتوسنتز، ماندگاری غشاء سلولی و کنترل زیستی پاتوژن‌های گیاهی اثبات کرده‌اند. محلول پاشی عصاره‌های ریزجلبک نیز برای بهبود کارایی مصرف آب و عملکرد روزنه در گیاهان گزارش شده است. با این حال، مکانیسم عمل آن‌ها رمزگشایی نشده است و نیاز به مطالعات بیشتر دارد (Renuka *et al*., 2018). استفاده از فرمولاسیون سلول‌های زنده سیانوباکتری‌ها و ریزجلبک‌ها با حامل‌های مناسب، مهم‌ترین روش کاربرد آن‌ها در بخش کشاورزی است (Ammar *et al*., 2022). مقرون به صرفه ترین رویکرد برای کاربرد سیانوباکتری‌ها، استفاده از خاک به عنوان حامل می‌باشد. با این حال محدودیت اصلی در استفاده از خاک، آلودگی خاک و هوا می‌باشد، که کاربرد آن را محدود کند. این امر منجر به جستجوی سایر حامل‌های مناسب و مقرون به صرفه به عنوان حامل‌های سیانوباکتریایی و ریز جلبکی مانند کاه گندم، کمپوست کاه شلتوک، ورمیکولیت، خاک رس، فضولات حیوانی و ضایعات کشاورزی و غیره شده است. این حامل‌ها برای رشد و استقرار سیانوباکترها و رشد ریزجلبک‌ها مناسب هستند و استقرار موفق آن‌ها در عرصه در مطالعات مختلف گزارش شده است (Renuka *et al*., 2018). از چالش‌های اصلی در فرمولاسیون حامل‌های جلبکی در دسترس بودن و مقرون به صرفه بودن می‌باشد. استفاده از پسماندهای کشاورزی و صنعتی گزینه‌ای مفید و ارزان قیمت می‌باشد. با این حال، تخریب ضایعات لیگنوسلولزی کشاورزی و صنعتی از چالش های این رویکرد می‌باشد. وان و همکاران (۲۰۱۶) کارایی ضایعات مختلف کشاورزی و صنعتی مانند باگاس نیشکر، کاه گندم، سبوس گندم و ذغال سنگ نارس را به عنوان حامل سیانوباکتری‌ها ارزیابی کردند. بیشینه میزان بقاء جلبک‌ها و فعالیت آنزیم نیتروژناز در ذغال سنگ نارس و سپس در کاه گندم و باگاس نیشکر مشاهده شد. ضایعات کشاورزی و صنعتی به عنوان حامل ارزان قیمت، برای تلقیح جلبک و کمک به بازیافت مواد مغذی در کشاورزی کارآمد می‌باشند (Wan *et al*., 2016). یکی دیگر از حامل‌های مناسب برای تکثیر سیانوباکتری‌ها، خاک رس می‌باشد که دارای سطح و ظرفیت نگهداری آب بالایی است. وان و همکاران (۲۰۱۶) پتانسیل فرمولاسیون‌های مختلف مبتنی بر حامل سیانوباکتری‌ها مانند خاک، کاه گندم و خاک رس در کشت برنج را ارزیابی کردند. آن‌ها گزارش کردند که بالاترین عملکرد دانه با استفاده از خاک رس و کاه گندم با ۷۵ درصد مکمل کود شیمیایی نیتروژن به دست آمد. این در حالیست که بیشینه عملکرد گیاه با فرمولاسیون مبتنی بر حامل خاک، با افزودن دوز کامل کود نیتروژن به دست آمد. بنابراین، کاه گندم و حامل‌های مبتنی بر خاک رس منجر به صرفه‌جویی در مصرف کود شیمیایی نیتروژن می‌شوند (Wan *et al*., 2016). مطالعه‌ای توسط پراسانا و همکاران (۲۰۱۳) نشان داد که ورمی کمپوست می‌تواند به عنوان یک حامل موثر برای تکثیر سیانوباکتری در مزارع برنج استفاده شود. آن‌ها استقرار موفقیت آمیز تلقیح سیانوباکتری در مزارع برنج با استفاده از تکنیک‌های مولکولی و بهبود فعالیت میکروبی خاک را گزارش کردند (Prasanna *et al*., 2013). رنوکا و همکاران (۲۰۱۷) از حامل مخلوط ورمیکولیت و کمپوست برای ریزجلبک‌های سبز و سیانوباکتری‌ها به عنوان کودهای زیستی استفاده کردند (Renuka *et al*., 2017). استفاده از فضولات دامی به عنوان حامل کودهای زیستی ریزجلبک می‌تواند کاربرد ریزجلبک‌ها را بسیار مقرون به صرفه کند. به طور کلی، فضولات دامی سرشار از مواد آلی، ریز مغذی‌ها و درشت مغذی‌ها هستند. مواد مغذی فضولات دامی، می‌تواند رشد ریزجلبک‌ها را تحریک کند. با این حال، چالش اصلی استفاده از فضولات دامی وجود آنتی بیوتیک‌ها و داروها و بوی نامطبوع می‌باشد. در کاربرد فضولات دامی در مزارع کشاورزی، انباشتگی مواد دارویی و آنتی‌بیوتیک‌ها در گیاه گزارش شده است. در این خصوص، تلقیح ریزجلبک‌ها با فضولات دامی به دلیل توانایی ریزجلبک‌های سبز

در تخریب ترکیبات دارویی می‌تواند مفید باشد (Renuka *et al*., 2017). استفاده از پسماندهای شهری مانند لجن خشک شده به عنوان حامل کودهای زیستی ریزجلبک می‌تواند کاربرد ریزجلبک‌ها را به دلیل دارا بودن بالای مواد مغذی مقرون‌به‌صرفه کند (Wang *et al*., 2024). از معایب استفاده از حامل پسماندهای شهری وجود ترکیبات دارویی، فلزات سنگین و باکتری‌های بیماری‌زا می‌باشد. با این حال، ریزجلبک‌ها در کاهش جذب فلزات سنگین توسط گیاه می‌توانند مفید باشند. توانایی ریزجلبک‌ها در تخریب ترکیبات دارویی و کاهش قابل توجه بار میکروبی مبنایی برای استفاده از حامل پسماندهای شهری برای کاربرد ریزجلبک‌ها به عنوان کودهای زیستی فراهم می‌کند (Yu *et al*., 2017). تلقیح مبتنی بر حامل ریزجلبک‌های سبز در خاک به مطالعات بیشتری نیاز دارد. محدودیت اصلی برای موفقیت کودهای زیستی مبتنی بر ریزجلبک/سیانوباکتری، حضور خورندگان ریزجلبک در مزارع کشاورزی است که تأثیر منفی بر کارایی این موجودات به عنوان کودهای زیستی دارد. خورندگان، تا حد زیادی بر بهره‌وری جلبک‌ها در اکوسیستم‌های آبی – خاکی تأثیر می‌گذارند. این خورندگان شامل ریز سخت پوستان، تک یاخته‌ها، آمیب‌ها، حلزون‌ها و نماتدها و غیره هستند. اگرچه استفاده از آفت کش‌ها برای کنترل آن‌ها توصیه می‌شود (شکل ۳)، اما گزینه سازگار با محیط زیست نیست. اخیراً از عصاره‌های گیاهی زیتون تلخ، تنباکو، نسترن و غیره در کنترل خورندگان ریزجلبک‌های سبز و سیانوباکتری‌ها استفاده شده است (Renuka *et al*., 2018). عصاره‌های گیاهی به عنوان حامل ریزجلبک‌ها، برای کنترل زیستی خورندگان ریزجلبک در مزرعه برنج استفاده شده است. این حامل‌های گیاهی، پتانسیل رشد و تثبیت نیتروژن سیانوباکتری‌های تلقیح شده را افزایش دادند (Ma *et al*., 2017). در این زمینه، استفاده از کودهای زیستی بیوفیلم شده به دلیل تولید اگزوپلی ساکارید و موسیلاژ، نویدبخش کنترل خورندگان جلبک‌ها است (شکل ۳). موسیلاژ از سیانوباکتری‌ها در برابر خورندگان محافظت می‌کند. همچنین ارتباط باکتری/قارچ در بیوفیلم‌ها باعث تولید ترکیبات بازدارنده از جمله آنزیم‌های هیدرولیتیک می‌شود که به کنترل خورندگان کمک می‌کند (Day *et al*., 2017). تولید کودهای شیمیایی یک صنعت انرژی بر بوده و حمل و نقل و استفاده از آن‌ها به سوخت و انرژی زیادی نیاز دارد. با این حال، هزینه تولید کودهای زیستی جلبکی، چالش استفاده از آن‌ها می‌باشد. هزینه کاربرد آن‌ها می‌تواند از ارزان تا بسیار گران قیمت‌تر از کود شیمیایی بسته به عواملی که باید مورد استفاده قرار می‌گیرد متفاوت است. به عنوان مثال، محلول پاشی، که ممکن است به تجهیزات پیچیده نیاز داشته باشد، می‌تواند تا حد زیادی هزینه کاربرد کودهای زیستی جلبکی را افزایش دهد. روش‌های پخش سطحی و نواری یا ردیفی مبتنی بر استفاده از گرانول‌های کود زیستی جلبکی نیز می‌تواند هزینه کاربرد کودهای زیستی جلبکی را تا حد زیادی افزایش دهد (Renuka *et al*., 2018). همچنین، استفاده از فرمولاسیون جلبک مبتنی بر حامل، به دلیل حجم بیشتر مورد نیاز در مزرعه، یک چالش است. در این صورت، تیمار بذر با سوسپانسیون ریزجلبک روشی اقتصادی برای کاربرد کودهای زیستی جلبکی در مزرعه می‌باشد که تأثیر مستقیمی بر رشد و عملکرد گیاه دارد. به طور کلی، اکثر این فرمولاسیون‌ها با افزایش ۱۰ تا ۱۲ درصدی عملکرد محصول و بهبود نیتروژن و کربن خاک، مصرف نیتروژن را به میزان ۲۰ تا ۲۵ کیلوگرم در هکتار کاهش می‌دهند. با تعمیم این موضوع به کشور هند، می‌توان حدس زد که کاربرد کودهای زیستی جلبکی در ۹ تا ۹/۵ میلیون هکتار مزرعه کشت برنج در دشت های هندو گنگ (که در آن حداقل ۱۲۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار استفاده می شود)، می‌توان صرفه جویی خالص بیش از ۳۱ تا ۳۸ میلیون دلاری را ضمن ارتقاء سلامت خاک و بهره‌وری تولید محصول فراهم نمود (Ammar *et al*., 2022).

تجاری‌سازی کودهای زیستی مبتنی بر جلبک

تجارت جهانی کودهای زیستی مبتنی بر ریزجلبک، سیانوباکتری و درشت جلبک‌ها، به ترتیب ۰/۱۱، ۰/۸۲ و ۰/۱۳ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۱ بوده است و پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۲۸ با نرخ رشد مرکب سالیانه ۹/۷۵، ۱۲/۶ و ۸ درصد به ۰/۲۲، ۱/۵ و ۰/۳۰ میلیارد دلار برسد (https://www.grandviewresearch.com). کود شیمیایی آمونیاک بی آب، محتوی ۸۲ درصد نیتروژن می‌باشد. در حالی که زیست توده ریز جلبکی از ۱ تا ۱۰درصد نیتروژن تشکیل شده است. بنابراین برای رسیدن به سطح مشابهی از کود زیستی، به ۱۵ برابر عوامل ریزجلبکی نسبت به کود شیمیایی آمونیاک بی آب نیاز است (Cabanelas *et al*., 2013). برای تولید ذرت، ۲۰۸ کیلوگرم در هکتار نیتروژن توصیه می‌شود، بنابراین، برای رسیدن به این سطح از نیتروژن، ۳/۱ تن زیست توده ریز جلبک در هکتار مورد نیاز خواهد بود (Engin *et al*., 2005). ریزجلبک‌ها و

سیانوباکتری‌ها مواد مغذی و ترکیبات ارزشمندی برای گیاه فراهم می‌کنند. بنابراین ارزیابی ریزجلبک‌ها، به‌ویژه سیانوباکتری‌ها از نظر محتوای مواد مغذی زیست توده در مزرعه، تصویر واقعی نسبت به زیست توده مورد نیاز جلبکی ارائه نمی‌دهد (Renuka *et al*., 2018). استفاده از ریزجلبک‌های زنده علاوه بر جلوگیری از فرسایش خاک، جلوگیری از شسته شدن عناصر غذایی و حفظ ساختار خاک مزایای مانند در دسترس بودن مداوم مواد مغذی در طول مراحل رشد گیاه دارند (Osorio-Reyes *et al*., 2023). سیانوباکتری‌ها به عنوان سلول‌های در حال رشد در عرصه، رشد گیاه را با صرفه جویی ۲۵ تا ۷۵ درصدی در مصرف کود نیتروژن، تامین سایر عناصر ضروری (درشت و ریزمغذی‌ها) و تولید متابولیت‌های مفید بهبود می‌بخشند. علاوه بر این، زیست توده ریز جلبک‌ها همچنین حاوی ۴۰ تا ۶۰ درصد کربن، ۱ تا ۴ درصد فسفر و سایر عناصر ضروری است. مهمترین ویژگی مفید کودهای زیستی میکروجلبکی، بهبود کربن آلی خاک است که با استفاده از کودهای شیمیایی نمی‌توان به آن دست یافت (Ammar *et al*., 2022). به استثناء منبع نیتروژن در کشت سیانوباکتری‌های هتروسیست، کشت جلبک به مقادیر زیادی مواد مغذی نیاز دارد. استفاده از پساب‌های کشاورزی و صنعتی می‌تواند رویکردی مقرون به صرفه برای این نگرانی ارائه کند. تجاری سازی زیست توده جلبکی تولید شده مبتنی بر پساب صنایع به دلیل وجود مواد ناخواسته مانند فلزات سنگین و عوامل بیماری‌زا نیز یک چالش است. بنابراین، ارائه رویکردهای نوینی برای کاهش هزینه‌های کشت جلبک ضروری به نظر می‌رسد (Renuka *et al*., 2018). یکی دیگر از چالش‌های مرتبط با کودهای زیستی ریزجلبک‌ها و سیانوباکتری‌ها، اطلاعات ناکافی در مورد دوز و روش کاربرد آن‌ها است. همچنین گونه‌های جلبکی که می‌توانند در مقیاس مزرعه در محیط‌های جغرافیایی و انواع خاک‌های متنوع کلونیزه شوند باید شناسایی شوند. با این حال، در سال‌های اخیر، پیشرفت های زیادی در زمینه استفاده تجاری از جلبک‌ها به عنوان کودهای زیستی صورت گرفته است (Ammar *et al*., 2022). آزمایشات میدانی با کودهای زیستی جلبکی در ایالات متحده آمریکا- صحرای آریزونا توسط کمپانی Del Monte Fresh Produce Inc انجام و گزارشات مثبتی در خصوص افزایش نرخ بهره‌وری تولید محصول، احیاء زمین‌های بایر و حاصلخیزی خاک منتشر شده است (Renuka *et al*., 2018). آگاهی بیشتر در مورد استفاده از کود زیستی جلبکی و مزایای آن در حال افزایش است و بازار پتانسیل مناسبی برای استفاده از کودهای زیستی مبتنی بر جلبک دارد. با این حال، چالش‌های مربوط به تجاری سازی باید با تحقیقات گسترده در مقیاس میدانی و توسعه فناوری‌های تولید کود مقرون به صرفه جلبکی مورد توجه قرار گیرد.

نتیجه گیری و پیشنهادها

استفاده از کنسرسیوم‌ها / بیوفیلم‌های جلبک سبز و سیانوباکتری‌ها با میکروب‌های مفید کشاورزی، رویکردی امیدوارکننده برای افزایش بهره‌وری محصولات زراعی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. با این حال موفقیت کودهای زیستی جلبک در عرصه، به تولید اقتصادی زیست توده جلبک‌ها و چگونگی کاربرد آن‌ها بستگی دارد. استفاده از پسماندهای کشاورزی – صنعتی برای کشت جلبک‌ها، رویکردی اقتصادی در مقیاس صنعتی می‌باشد. پالایش کودهای زیستی جلبکی و تجاری‌سازی آن‌ها، تمرکز بر خورندگان جلبکی، مطالعات بر روی ترکیبات زیست فعال سیانوباکتری‌ها و اثرات آن‌ها بر سلامت خاک/گیاه حوزه‌هایی هستند که نیاز به توجه دارند. به منظور درک مکانیسم‌های دخیل در تعاملات هم‌افزایی درگیر در کنسرسیوم‌های جلبکی با گیاه / خاک مطالعات متاژنومیکس، پروتئومیکس و متابولومیکس پیشنهاد می‌شود.

References

Ammar, E. E., Aioub, A. A., Elesawy, A. E., Karkour, A. M., Mouhamed, M. S., Amer, A. A., & El-Shershaby, N. A. (2022). Algae as Bio-fertilizers: Between current situation and future prospective. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *29*(5), 3083-3096.

Babu, S., Bidyarani, N., Chopra, P., Monga, D., Kumar, R., Prasanna, R., ... & Saxena, A. K. (2015). Evaluating microbe-plant interactions and varietal differences for enhancing biocontrol efficacy in root rot disease challenged cotton crop. *European journal of plant pathology*, *142*, 345-362.

Bai, L., Xu, H., Wang, C., Deng, J., & Jiang, H. (2016). Extracellular polymeric substances facilitate the biosorption of phenanthrene on cyanobacteria Microcystis aeruginosa. *Chemosphere*, *162*, 172-180.

Benderliev, K. M., Ivanova, N. I., & Pilarski, P. S. (2003). Singlet oxygen and other reactive oxygen species are involved in regulation of release of iron-

binding chelators from Scenedesmus cells. *Biologia plantarum*, *47*, 523-526.

Bharti, A., Velmourougane, K., & Prasanna, R. (2017). Phototrophic biofilms: diversity, ecology and applications. *Journal of applied phycology*, *29*, 2729-2744.

Bibi, S., Saadaoui, I., Bibi, A., Al-Ghouti, M., & Dieyeh, M. H. A. (2024). Applications, advancements, and challenges of cyanobacteria-based biofertilizers for sustainable agro and ecosystems in arid climates. *Bioresource Technology Reports*, 101789.

Bondoc, K. G. V., Heuschele, J., Gillard, J., Vyverman, W., & Pohnert, G. (2016). Selective silicate-directed motility in diatoms. *Nature Communications*, *7*(1), 10540.

Braun, J. C., & Colla, L. M. (2023). Use of Microalgae for the Development of Biofertilizers and Biostimulants. *BioEnergy Research*, *16*(1), 289-310.

Cabanelas, I. T. D., Ruiz, J., Arbib, Z., Chinalia, F. A., Garrido-Pérez, C., Rogalla, F., ... & Perales, J. A. (2013). Comparing the use of different domestic wastewaters for coupling microalgal production and nutrient removal. *Bioresource technology*, *131*, 429-436.

Chabili, A., Minaoui, F., Hakkoum, Z., Douma, M., Meddich, A., & Loudiki, M. (2024). A comprehensive review of microalgae and cyanobacteria-based biostimulants for agriculture uses. *Plants*, *13*(2), 159.

Coppens, J., Grunert, O., Van Den Hende, S., Vanhoutte, I., Boon, N., Haesaert, G., & De Gelder, L. (2016). The use of microalgae as a high-value organic slow-release fertilizer results in tomatoes with increased carotenoid and sugar levels. *Journal of applied phycology*, *28*, 2367-2377.

Dawiec-Liśniewska, A., Podstawczyk, D., Bastrzyk, A., Czuba, K., Pacyna-Iwanicka, K., Okoro, O. V., & Shavandi, A. (2022). New trends in biotechnological applications of photosynthetic microorganisms. *Biotechnology advances*, *59*, 107988.

Day, J. G., Gong, Y., & Hu, Q. (2017). Microzooplanktonic grazers–A potentially devastating threat to the commercial success of microalgal mass culture. *Algal Research*, *27*, 356-365.

Duffy, M., & Holste, A. (2005). Estimated returns to Iowa farmland. *Journal of ASFMRA*, 102-109.

Gantar, M., Kerby, N. W., & Rowell, P. (1993). Colonization of wheat (Triticum vulgare L.) by N2-fixing cyanobacteria: III. The role of a hormogonia-promoting factor. *New Phytologist*, *124*(3), 505-513.

Garcia-Gonzalez, J., & Sommerfeld, M. (2016). Biofertilizer and biostimulant properties of the microalga Acutodesmus dimorphus. *Journal of applied phycology*, *28*, 1051-1061.

Gayathri, M., Kumar, P. S., Prabha, A. M. L., & Muralitharan, G. (2015). In vitro regeneration of Arachis hypogaea L. and Moringa oleifera Lam. using extracellular phytohormones from Aphanothece sp. MBDU 515. *Algal Research*, *7*, 100-105.

Grzesik, M., Romanowska-Duda, Z., & Kalaji, H. M. (2017). Effectiveness of cyanobacteria and green algae in enhancing the photosynthetic performance and growth of willow (Salix viminalis L.) plants under limited synthetic fertilizers application. *Photosynthetica*, *55*, 510-521.

Hussain, A., & Hasnain, S. (2011). Phytostimulation and biofertilization in wheat by cyanobacteria. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, *38*(1), 85-92.

Innok, S., Chunleuchanon, S., Boonkerd, N., & Teaumroong, N. (2009). Cyanobacterial akinete induction and its application as biofertilizer for rice cultivation. *Journal of Applied Phycology*, *21*, 737-744.

Jha, M. N., & Prasad, A. N. (2006). Efficacy of new inexpensive cyanobacterial biofertilizer including its shelf-life. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *22*, 73-79.

Karthikeyan, N., Prasanna, R., Sood, A., Jaiswal, P., Nayak, S., & Kaushik, B. D. (2009). Physiological characterization and electron microscopic investigation of cyanobacteria associated with wheat rhizosphere. *Folia Microbiologica*, *54*, 43-51.

Karthikeyan, N., Prasanna, R., Nain, L., & Kaushik, B. D. (2007). Evaluating the potential of plant growth promoting cyanobacteria as inoculants for wheat. *European Journal of Soil Biology*, *43*(1), 23-30.

Krings, M., Hass, H., Kerp, H., Taylor, T. N., Agerer, R., & Dotzler, N. (2009). Endophytic cyanobacteria in a 400-million-yr-old land plant: A scenario for the origin of a symbiosis?. *Review of Palaeobotany and Palynology*, *153*(1-2), 62-69.

Kumar, M., Prasanna, R., Bidyarani, N., Babu, S., Mishra, B. K., Kumar, A., ... & Saxena, A. K. (2013). Evaluating the plant growth promoting ability of thermotolerant bacteria and cyanobacteria and their interactions with seed spice crops. *Scientia Horticulturae*, *164*, 94-101.

Li, R., Tao, R., Ling, N., & Chu, G. (2017). Chemical, organic and bio-fertilizer management practices effect on soil physicochemical property and antagonistic bacteria abundance of a cotton field: implications for soil biological quality. *Soil and Tillage Research*, *167*, 30-38.

Ma, A. T., Beld, J., & Brahamsha, B. (2017). An amoebal grazer of cyanobacteria requires cobalamin produced by heterotrophic bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, *83*(10), e00035-17.

Mager, D. M., & Thomas, A. D. (2011). Extracellular polysaccharides from cyanobacterial soil crusts: a review of their role in dryland soil processes. *Journal of Arid Environments*, *75*(2), 91-97.

Manjunath, M., Kanchan, A., Ranjan, K., Venkatachalam, S., Prasanna, R., Ramakrishnan, B., ... & Singh, B. (2016). Beneficial cyanobacteria and

eubacteria synergistically enhance bioavailability of soil nutrients and yield of okra. *Heliyon*, *2*(2).

Mashjoor, S., Yousefzadi, M., Esmaeili, M. A., & Rafiee, R. (2016). Cytotoxicity and antimicrobial activity of marine macro algae (Dictyotaceae and Ulvaceae) from the Persian Gulf. *Cytotechnology*, *68*, 1717-1726.

Mazhar, S., Cohen, J. D., & Hasnain, S. (2013). Auxin producing non-heterocystous Cyanobacteria and their impact on the growth and endogenous auxin homeostasis of wheat. *Journal of Basic Microbiology*, *53*(12), 996-1003.

Ng, Z. Y., Ajeng, A. A., Cheah, W. Y., Ng, E. P., Abdullah, R., & Ling, T. C. (2024). Towards circular economy: Potential of microalgae–bacterial-based biofertilizer on plants. *Journal of Environmental Management*, *349*, 119445.

Osman, M. E. H., El-Sheekh, M. M., El-Naggar, A. H., & Gheda, S. F. (2010). Effect of two species of cyanobacteria as biofertilizers on some metabolic activities, growth, and yield of pea plant. *Biology and fertility of soils*, *46*, 861-875.

Osorio-Reyes, J. G., Valenzuela-Amaro, H. M., Pizaña-Aranda, J. J. P., Ramírez-Gamboa, D., Meléndez-Sánchez, E. R., López-Arellanes, M. E., ... & Martínez-Ruiz, M. (2023). Microalgae-based biotechnology as alternative biofertilizers for soil enhancement and carbon footprint reduction: Advantages and implications. *Marine Drugs*, *21*(2), 93.

Power, I. M., Wilson, S. A., Thom, J. M., Dipple, G. M., & Southam, G. (2007). Biologically induced mineralization of dypingite by cyanobacteria from an alkaline wetland near Atlin, British Columbia, Canada. *Geochemical Transactions*, *8*, 1-16.

Prasanna, R., Ramakrishnan, B., Ranjan, K., Venkatachalam, S., Kanchan, A., Solanki, P., ... & Kranthi, S. (2016). Microbial inoculants with multifaceted traits suppress Rhizoctonia populations and promote plant growth in cotton. *Journal of Phytopathology*, *164*(11-12), 1030-1042.

Prasanna, R., Ramakrishnan, B., Simranjit, K., Ranjan, K., Kanchan, A., Hossain, F., & Nain, L. (2017). Cyanobacterial and rhizobial inoculation modulates the plant physiological attributes and nodule microbial communities of chickpea. *Archives of Microbiology*, *199*, 1311-1323.

Prasanna, R., Sharma, E., Sharma, P., Kumar, A., Kumar, R., Gupta, V., ... & Nain, L. (2013). Soil fertility and establishment potential of inoculated cyanobacteria in rice crop grown under non-flooded conditions. *Paddy and Water Environment*, *11*, 175-183.

Priya, H., Prasanna, R., Ramakrishnan, B., Bidyarani, N., Babu, S., Thapa, S., & Renuka, N. (2015). Influence of cyanobacterial inoculation on the culturable microbiome and growth of rice. *Microbiological Research*, *171*, 78-89.

Ramakrishnan, B., Kaur, S., Prasanna, R., Ranjan, K., Kanchan, A., Hossain, F., ... & Nain, L. (2017). Microbial inoculation of seeds characteristically shapes the rhizosphere microbiome in desi and kabuli chickpea types. *Journal of Soils and Sediments*, *17*, 2040-2053.

Renuka, N., Guldhe, A., Prasanna, R., Singh, P., & Bux, F. (2018). Microalgae as multi-functional options in modern agriculture: current trends, prospects and challenges. *Biotechnology advances*, *36*(4), 1255-1273.

Renuka, N., Prasanna, R., Sood, A., Ahluwalia, A. S., Bansal, R., Babu, S., ... & Nain, L. (2016). Exploring the efficacy of wastewater-grown microalgal biomass as a biofertilizer for wheat. *Environmental science and pollution research*, *23*, 6608-6620.

Renuka, N., Prasanna, R., Sood, A., Bansal, R., Bidyarani, N., Singh, R., ... & Ahluwalia, A. S. (2017). Wastewater grown microalgal biomass as inoculants for improving micronutrient availability in wheat. *Rhizosphere*, *3*, 150-159.

Roeselers, G., Loosdrecht, M. V., & Muyzer, G. (2008). Phototrophic biofilms and their potential applications. *Journal of applied phycology*, *20*, 227-235.

Santi, C., Bogusz, D., & Franche, C. (2013). Biological nitrogen fixation in non-legume plants. *Annals of botany*, *111*(5), 743-767.

Singh, D. P., Prabha, R., Yandigeri, M. S., & Arora, D. K. (2011). Cyanobacteria-mediated phenylpropanoids and phytohormones in rice (Oryza sativa) enhance plant growth and stress tolerance. *Antonie Van Leeuwenhoek*, *100*, 557-568.

Singh, S., & Datta, P. (2007). Outdoor evaluation of herbicide resistant strains of Anabaena variabilis as biofertilizer for rice plants. *Plant and soil*, *296*, 95-102.

Stirk, W. A., Ördög, V., Van Staden, J., & Jäger, K. (2002). Cytokinin-and auxin-like activity in Cyanophyta and microalgae. *Journal of Applied phycology*, *14*, 215-221.

Swain, S. S., Paidesetty, S. K., & Padhy, R. N. (2017). Antibacterial, antifungal and antimycobacterial compounds from cyanobacteria. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, *90*, 760-776.

Swarnalakshmi, K., Prasanna, R., Kumar, A., Pattnaik, S., Chakravarty, K., Shivay, Y. S., ... & Saxena, A. K. (2013). Evaluating the influence of novel cyanobacterial biofilmed biofertilizers on soil fertility and plant nutrition in wheat. *European Journal of Soil Biology*, *55*, 107-116.

Wan, J., Liu, X., Kerr, P. G., Wu, C., & Wu, Y. (2016). Comparison of the properties of periphyton attached to modified agro-waste carriers. *Environmental Science and Pollution Research*, *23*, 3718-3726.

Wang, X., Wang, Q., Hong, Y., & Wang, Z. (2024). A whole process study of dual microalgae cultivation

coupled to domestic wastewater treatment and wheat growth. *Environmental Research*, *254*, 119168.

Xiao, R., & Zheng, Y. (2016). Overview of microalgal extracellular polymeric substances (EPS) and their applications. *Biotechnology advances*, *34*(7), 1225-1244.

Yandigeri, M. S., Yadav, A. K., Meena, K. K., & Pabbi, S. (2010). Effect of mineral phosphates on growth and nitrogen fixation of diazotrophic cyanobacteria Anabaena variabilis and Westiellopsis prolifica. *Antonie van Leeuwenhoek*, *97*, 297-306.

Yilmaz, E., & Sönmez, M. (2017). The role of organic/bio–fertilizer amendment on aggregate stability and organic carbon content in different aggregate scales. *Soil and Tillage Research*, *168*, 118-124.

Yu, Y., Zhou, Y., Wang, Z., Torres, O. L., Guo, R., & Chen, J. (2017). Investigation of the removal mechanism of antibiotic ceftazidime by green algae and subsequent microbic impact assessment. *Scientific reports*, *7*(1), 4168.

Zhang, Z., Xu, M., Fan, Y., Zhang, L., & Wang, H. (2024). Using microalgae to reduce the use of conventional fertilizers in hydroponics and soil-based cultivation. *Science of The Total Environment*, *912*, 169424.