Journal of Research in Environmental Health
Volume 12, Issue 1

Microalgae and Cyanobacteria in Sustainable Pesticide Management: Biodegradation and Biopesticide Production

Bahareh Nowruzi
* Associate professor, Department of Biology, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran. **(Corresponding Author)** baharehnowruzi77@iau.ac.ir
Parya Rouhi
Department of Biology, SR.C, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
Saba Ansari
Department of Biology, SR.C, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Abstract

Background and Objective: The extensive use of chemical pesticides, despite improving crop yields, has led to persistent contamination of water and soil, biodiversity decline, and human health risks. Microalgae and cyanobacteria offer a dual functionality—production of biopesticides and degradation of pollutants—yet an integrated analytical comparison of these roles is lacking. This review aimed to analyze the evidence to identify which strains and metabolites possess the greatest potential to replace or reduce high-risk chemical pesticides, and to highlight existing research gaps.

Materials and Methods: This narrative and integrative review searched PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar for articles published between 2020 and 2025 using the keywords "microalgae," "cyanobacteria," "biodegradation," "bioremediation," and "biopesticide." Studies were included if they provided quantitative data on pesticidal efficacy or enzymatic degradation rates and clearly identified the algal or cyanobacterial strain. From approximately 100 retrieved records, 58 met the inclusion criteria. Extracted evidence was organized and analyzed by pesticide class, mechanism of action, and algal strain."

Results: The analysis revealed that Spirulina platensis and Sargassum wightii exhibited the highest insecticidal and antibacterial activity in vitro, respectively, whereas Nostoc muscorum and Coleofasciculus chthonoplastes were most efficient in degrading organophosphate pesticides (chlorpyrifos and malathion). Notably, field-condition degradation rates were, on average, 45% lower than laboratory-based data. The predominant pesticidal mechanism was photosynthetic inhibition via cyanobacterin, while enzymatic degradation was primarily driven by phosphotriesterase-mediated hydrolysis. A critical research gap identified was the lack of pilot-scale studies on combined formulations and chronic toxicity assessments on non-target organisms. The overall evidence weighting suggests that current research prioritizes "biodegradation," while "biopesticide development" remains at an early stage.

Conclusion: This review confirms the proven dual potential of microalgae and cyanobacteria in biopesticide production and pesticide bioremediation. However, bridging the gap between laboratory success and field application necessitates targeted research on formulation optimization, environmental stability of metabolites, and long-term safety evaluations.

Keywords: Crop Protection, Cyanobacteria, Environmental Biodegradation, Microalgae, Pesticides

Open Access Policy: This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. To view a copy ofthis licence, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Received: 2025/10/07
Accepted: 2026/02/21
Doi: 10.22038/jreh.2026.27798

Citation: Nowruzi B, Rouhi P, Ansari S. Microalgae and Cyanobacteria in Sustainable Pesticide Management: Biodegradation and Biopesticide Production. *Journal of Research in Environmental Health*. 12 (1):32-48.

ریزجلبک‌ها و سیانوباکتری‌ها در مدیریت پایدار آفت‌کش‌ها: تجزیه‌ی زیستی و تولید آفت‌کش‌های زیستی

بهاره نوروزی
* دانشیار گروه زیست‌شناسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. **(نویسنده مسئول)**
baharehnowruzi77@iau.ac.ir
پریا روحی
دانشجوی کارشناسی ارشد گروه زیست‌شناسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
سبا انصاری
دانشجوی کارشناسی ارشد گروه زیست‌شناسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

زمینه و هدف: کاربرد گسترده آفت‌کش‌های شیمیایی در کنار افزایش عملکرد کشاورزی به آلودگی پایدار منابع آب و خاک، کاهش تنوع زیستی و تهدید سلامت انسان منجر شده است. ریزجلبک‌ها و سیانوباکتری‌ها موجوداتی با عملکرد دوگانه (تولید آفت‌کش زیستی و تجزیه آلاینده‌ها) هستند؛ با این‌حال، شکاف دانشی در تحلیل یکپارچه این دو نقش و مقایسه اثربخشی آن‌ها وجود دارد. هدف این مرور، تحلیل شواهد موجود برای پاسخ به این پرسش است که کدام سویه‌ها و متابولیت‌ها بیش‌ترین پتانسیل را در جایگزینی و یا کاهش آفت‌کش‌های شیمیایی پرخطر دارند و خلأهای پژوهشی این مسیر در کجا قرار دارد.

مواد و روش‌ها: این مطالعه از نوع مرور روایی و یکپارچه است. جست‌وجوی مقالات در پایگاه‌های PubMed، Scopus، Web of Science و Google Scholar برای بازه‌ی زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ با کلیدواژه‌های «ریزجلبک»، «سیانوباکتری»، «تجزیه زیستی»، «پالایش زیستی» و «آفت‌کش زیستی» انجام شد. مقالات دارای داده‌های کمی از اثربخشی آفت‌کشی یا نرخ تجزیه آنزیمی و با ذکر دقیق سویه جلبکی وارد مطالعه شدند. از میان حدود ۱۰۰ مقاله بازیابی‌شده، ۵۸ مقاله معیارهای ورود را احراز کردند و شواهد بر اساس کلاس آفت‌کش، مکانیسم اثر و سویه جلبکی سازمان‌دهی و تحلیل شدند.

یافته‌ها: تحلیل شواهد نشان داد گونه‌های *Spirulina platensis* و *Sargassum wightii* به‌ترتیب بیش‌ترین فعالیت حشره‌کشی و ضدباکتریایی را در شرایط آزمایشگاهی نشان داده‌اند، درحالی‌که سویه‌های *Nostoc muscorum* و *Coleofasciculus chthonoplastes* در تجزیه آفت‌کش‌های ارگانوفسفره (کلرپیریفوس و مالاتیون) کارآمدتر عمل کرده‌اند. با این‌حال، میانگین نرخ تجزیه در شرایط مزرعه‌ای تا ۴۵ درصد پایین‌تر از نتایج آزمایشگاهی گزارش شده است. مکانیسم غالب در متابولیت‌های ضدآفت، مهار فتوسنتز (توسط سیانوباکتری) و در تجزیه‌ی آنزیمی، هیدرولیز توسط فسفوتری‌استرازها شناسایی شد. مهم‌ترین خلأ پژوهشی مشاهده شده، فقدان مطالعات نیمه‌صنعتی روی فرمولاسیون‌های ترکیبی و عدم ارزیابی سمیت مزمن بر موجودات غیرهدف است. مقایسه کلان شواهد نشان می‌دهد اولویت پژوهشی فعلی بر «تجزیه» متمرکز است، در حالی‌که «تولید بیوآفت‌کش» هنوز در مراحل ابتدایی توسعه قرار دارد

نتیجه‌گیری: این مرور نشان داد که ریزجلبک‌ها و سیانوباکتری‌ها ظرفیت دوگانه اثبات‌شده‌ای در تولید آفت‌کش‌های زیستی و پالایش آفت‌کش‌های شیمیایی دارند، اما گذار از موفقیت‌های آزمایشگاهی به کاربرد میدانی نیازمند پژوهش‌های هدفمند در بهینه‌سازی فرمولاسیون، افزایش پایداری متابولیت‌ها در شرایط محیطی واقعی و ارزیابی ایمنی بلندمدت است.

کلیدواژه: آفت‌کش، تجزیه زیستی، حفاظت گیاهی، ریزجلبک، سیانوباکتری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۲
نوع مقاله: مروری

استناد: نوروزی ب، روحی پ، انصاری س. ریزجلبک‌ها و سیانوباکتری‌ها در مدیریت پایدار آفت‌کش‌ها: تجزیه‌ی زیستی و تولید آفت‌کش‌های زیستی. *فصلنامه‌ی پژوهش در بهداشت محیط*. بهار ۱۴۰۵; ۱۲ (۱): ۳۲-۴۸.

مقدمه

امروزه تأمین امنیت غذایی برای جمعیت رو به رشد جهان وابستگی فزاینده‌ای به آفت‌کش‌های شیمیایی ایجاد کرده است؛ اما پیامد این وابستگی، فراتر از آلودگی گذرای محیط، به شکل‌گیری چرخه‌ای معیوب از «مقاومت دارویی آفات» انجامیده که خود مصرف سموم قوی‌تر و ماندگارتر را تحمیل می‌کند (۱, ۲). در میان انواع آلاینده‌ها، آفت‌کش‌های ارگانوفسفره و ارگانوکلرینه به‌دلیل نیمه‌عمر طولانی، قابلیت تجمع زیستی و اثرات مزمن عصبی و سرطان‌زایی، بحرانی‌ترین تهدید را برای سلامت اکوسیستم و انسان ایجاد می‌کنند (۲-۴). راهکارهای متداول پاکسازی نظیر اکسیداسیون پیشرفته و جذب سطحی، به‌رغم کارایی نسبی، اغلب پرهزینه، انرژی‌بر و مستعد تولید محصولات جانبی سمی هستند و مهم‌تر از آن، هیچ‌یک هم‌زمان قادر به حذف آلاینده و جایگزینی آن با یک عامل کنترل آفت ایمن نیستند (۲, ۵). این خلأ عملکردی، ضرورت جست‌وجوی راهکاری تلفیقی با قابلیت «تجزیه‌ی آلاینده موجود» و «تولید آفت‌کش جایگزین» را آشکار می‌سازد.

ریزجلبک‌ها و به‌ویژه سیانوباکتری‌ها، به‌دلیل برخورداری از سیستم‌های آنزیمی چندگانه (ازجمله فسفوتری‌استرازها، دی‌اکسیژنازها و مونواکسیژنازها) و نیز توانایی سنتز متابولیت‌های ثانویه با فعالیت زیستی گسترده، از معدود گروه‌های زیستی هستند که این پتانسیل دوگانه را به‌طور ذاتی دارند (۶, ۷). مرورهای پیشین یا صرفاً بر جنبه پالایش زیستی این میکروارگانیسم‌ها متمرکز بوده‌اند (۸, ۹) یا تنها فهرستی از متابولیت‌های آفت‌کش آن‌ها ارائه داده‌اند (۶, ۱۰). هیچ مطالعه‌ای تاکنون این دو عملکرد را در کنار یکدیگر تحلیل نکرده و اثربخشی سویه‌ها را با معیارهای کمی مقایسه ننموده است. شکاف دانشی اصلی، نبود یک تحلیل یکپارچه است که مشخص کند کدام سویه‌ها در کدام یک از این دو نقش کارآمدترند و مهم‌ترین محدودیت‌ها برای عبور از فاز آزمایشگاهی به مقیاس میدانی چیست (۱۱, ۱۲)مرور حاضر با تحلیل تطبیقی و وزن‌دهی شواهد موجود در این دو حوزه، به این شکاف پاسخ می‌دهد و با شناسایی چالش‌های تجاری‌سازی و کاربرد میدانی، مسیر پژوهش‌های آینده را ترسیم می‌کند.

سموم کشاورزی؛ تهدیدی پنهان بر محیط زیست

آفت‌کش‌ها (سموم) مواد شیمیایی هستند که از محصولات کشاورزی در برابر آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز محافظت می‌کنند. این ترکیبات با روش‌هایی مانند دفع‌کردن، کنترل‌کردن یا از بین‌بردن عوامل مضر، از آسیب به گیاهان جلوگیری می‌کنند. سموم علاوه بر کشاورزی در حوزه‌هایی نظیر مدیریت فضای سبز، جنگل‌داری و مصارف خانگی نیز کاربرد دارند. در دهه‌های اخیر؛ هم‌زمان با افزایش نیاز به محصولات غذایی و تشدید اثر تغییرات اقلیمی، تولید سموم با فرمولاسیون‌های قوی‌تر و موثرتر برای پاسخگویی به نیاز روزافزون به امنیت غذایی در حال توسعه است (۲).

سموم به روش‌های سم‌پاشی به‌صورت مایع، فرآوری بذر، استفاده از فرمولاسیون‌های گرانول و تزریق به خاک به‌کار برده می‌شوند و پس از اعمال، از طریق مکانیسم‌های متنوعی مانند رواناب سطحی، نفوذ به آب‌های زیرزمینی، تبخیر، جذب سطحی توسط خاک و تجزیه میکروبی در محیط انتشار می‌یابند که این فرآیند منجر به باقی ماندن بقایای آن در محصولات غذایی نظیر میوه و سبزیجات و هم‌چنین منابع آب آشامیدنی می‌گردد. میزان جذب و دفع سموم توسط ذرات خاک تعیین‌کننده توانایی تحرک و دسترسی زیستی آن‌ها می‌باشد (۳). سموم از نظر گونه هدف، به گروه‌هایی نظیر حشره‌کش‌ها، قارچ‌کش‌ها، علف‌کش‌ها و نماتدکش‌ها و از نظر ساختار شیمیایی، به گروه‌هایی مانند ارگانوکلرین‌ها، ارگانوفسفات‌ها، کاربامات‌ها و پیرتروئیدها طبقه‌بندی می‌شوند. در بین دسته‌های گروه اول، حشره‌کش‌ها معمولاً از سمیت بالاتری برخوردارند و پس از آن‌ها قارچ‌کش‌ها و علف‌کش‌ها قرار دارند. پایداری محیطی و نرخ تجزیه سموم نیز به‌طور مستقیم به ساختار شیمیایی آن‌ها وابسته است (۱۳). زمانی که تاثیرات مضر سموم بیشتر از مزایای استفاده از آن‌ها شود، پیامدهای غیر قابل چشم‌پوشی برای محیط زیست و سلامت انسان به‌دنبال خواهد داشت و هر دو اکوسیستم خشکی و آبزی تحت تأثیر قرار می‌گیرند. آلودگی منابع آبی تأثیرات نامطلوبی بر موجودات آب‌زی ازجمله ماهی‌ها و گیاهان آبزی بر جای می‌گذارد و می‌تواند منجر به کاهش اکسیژن محلول در آب و افزایش تقاضای بیوشیمیایی اکسیژن شود.

هم‌چنین، سموم باعث کاهش جمعیت حشرات مفید ازجمله زنبورهای عسل و سوسک‌های گرده‌افشان می‌شوند. آلودگی خاک ناشی از سموم نیز تأثیر منفی بر کیفیت محصولات غذایی و پایداری سیستم‌های کشاورزی دارد (۵).

تاثیر سموم و آفات کشاورزی بر سلامت انسان

سموم راه‌های مختلفی مانند بلع، استنشاق و نفوذ از طریق پوست برای ورود به بدن انسان دارد و بیشترین آمار، مربوط به مسمومیت از طریق مصرف غذاهای آلوده می‌باشد. دامنه‌ی اثرات مضر سموم بر روی انسان از اثرات حاد مانند استفراغ، سردرد، سرگیجه و تحریک چشم‌ها و پوست تا اثرات مزمن مانند سرطان، اثرات عصبی، دیابت، بیماری‌های تنفسی و اختلالات ژنتیکی متغیر است. ارتباط معناداری بین قرارگیری بلندمدت در معرض سموم و بروز این دسته از بیماری‌های مزمن وجود دارد. این یافته‌ها بر ضرورت کنترل و کاهش آلاینده‌ها در زنجیره غذایی و محیط زیست تأکید می‌کنند (۳).

روش کار

این مطالعه از نوع مرور روایی و یکپارچه است. جست‌وجوی مقالات در سه پایگاه علمی PubMed، Scopus و Web of Science و هم‌چنین Google Scholar برای پوشش گسترده‌تر مقالات و گزارش‌های علمی، انجام گردید. بازه‌ی زمانی اصلی جست‌وجو از ژانویه ۲۰۲۰ تا ژوئن ۲۰۲۵ در نظر گرفته شد، زیرا بیشترین رشد انتشارات در زمینه کاربردهای زیست‌فناورانه ریزجلبک‌ها و سیانوباکتری‌ها در این بازه زمانی رخ داده است. با این‌حال، برای ردیابی مقالات پایه و منابع کلاسیک در زمینه کشف متابولیت‌ها، جست‌وجوی هدفمند در منابع قدیمی‌تر نیز از طریق بررسی فهرست منابع مقالات کلیدی انجام شد.

کلیدواژه‌های اصلی شامل «ریزجلبک»، «سیانوباکتری»، «تجزیه‌ی زیستی»، «پالایش زیستی»، «آفت‌کش زیستی» و «متابولیت ثانویه» بودند که به‌صورت ترکیبی و با در نظر گرفتن معادل‌های انگلیسی آن‌ها به‌کار گرفته شدند. معیارهای ورود مقالات شامل: (۱) مطالعات اصیل و مرورهای منتشرشده به زبان انگلیسی، (۲) ارائه داده‌های کمی از اثربخشی آفت‌کشی یا نرخ تجزیه‌ی آنزیمی و (۳) شناسایی دقیق سویه‌ی جلبک یا سیانوباکتری مورد استفاده بود. مقالاتی که صرفاً به جنبه‌های اکولوژیک شکوفایی جلبکی می‌پرداختند، فاقد داوری همتا بودند، یا از عصاره‌های مخلوط گیاهی-جلبکی استفاده کرده بودند، کنار گذاشته شدند.

پس از حذف موارد تکراری، عناوین و چکیده‌ها توسط دو نویسنده به‌طور مستقل بررسی شدند. از میان حدود ۱۰۰ مقاله بازیابی‌شده، ۵۸ مقاله معیارهای ورود را احراز کردند و اختلاف‌نظرها از طریق بحث و اجماع برطرف شد. داده‌های استخراج‌شده شامل نام سویه، نوع متابولیت یا عصاره، ارگانیسم هدف، مکانیسم اثر و نرخ اثربخشی یا تجزیه بود. شواهد نهایی بر اساس کلاس آفت‌کش، مکانیسم اثر و سویه جلبکی دسته‌بندی و تحلیل شدند.

یافته‌ها

نقش محوری ریزجلبک‌ها و به‌ویژه سیانوباکتری‌ها در تجزیه‌ی زیستی سموم

در سال‌های اخیر، نیاز روزافزونی برای توسعه روش‌های مفید و ایمن در راستای حذف سموم از محیط زیست مشاهده شده است. روش‌های متداولی نظیر جذب سطحی و فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (مانند تخریب فوتوکاتالیستی، واکنش فنتون، و ترمیم اولتراسونیک) استفاده می‌شوند، اما این تکنیک‌ها غالباً پرهزینه بوده و محدودیت‌های عملیاتی متعددی دارند (۸). در مقابل، تجزیه زیستی که مبتنی بر فعالیت میکروارگانیسم‌ها است، یک روش ایده آل محسوب می‌شود؛ زیرا تجزیه کامل ترکیبات سمی، بدون تولید محصولات ثانویه خطرناک را تضمین می‌کند (۱۳). تحلیل تجمعی شواهد نشان می‌دهد که دو گروه اصلی از میکروارگانیسم‌ها در این زمینه فعال هستند: باکتری‌های هتروتروف و سیانوباکتری‌ها. با این حال، سیانوباکتری‌ها به دلیل عدم نیاز به منبع کربن خارجی و توانایی انجام فتوسنتز، از نظر اقتصادی و عملیاتی برتری دارند. مکانیسم تجزیه میکروبی عمدتاً توسط آنزیم‌های تخصصی مانند مونواکسیژنازها، اکسیدوردوکتازها، دی‌اکسیژنازها و هیدرولازها کاتالیز می‌شودکه در نهایت به واکنش‌های متابولیکی متنوعی نظیر اکسیداسیون، احیا و هیدرولیز منجر می‌شوند (۸). با این وجود، یک یافته‌ی مهم و کمتر بحث شده در مقالات موجود این است که سرعت تجزیه زیستی در شرایط

طبیعی به‌طور متوسط ۴۰ تا ۵۰ درصد کمتر از شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی است (۱۴, ۱۵).

جلبک‌ها و سیانوباکتری‌ها: یک منبع زیستی ارزشمند در آفت‌کشی

جلبک‌ها انواع مختلفی از ارگانیسم‌های فتوسنتزکننده از ماکروجلبک‌های یوکاریوتی تا ریزجلبک‌های پروکاریوتی و سیانوباکتری‌ها را در برمی‌گیرند. تحلیل کمی ۵۸ مقاله این مرور نشان می‌دهد که سیانوباکتری‌ها سهم غالب را در مطالعات آفت‌کشی به‌خود اختصاص داده‌اند، در حالی‌که ریزجلبک‌های یوکاریوتی عمدتاً در حوزه‌های ضدقارچی و ضدویروسی متمرکز شده‌اند (۶, ۱۰). این موجودات خودتغذیه کننده می‌باشند و به اشکال تک سلولی، رشته‌ای، بستر یا کلونی در انواع مختلف زیستگاه‌ها ازجمله آب‌های دریایی و شیرین، زیستگاه‌های زمینی و حتی محیط‌های بسیار آلوده یافت می‌شوند (۱۶). این تفاوت توزیع، بازتابی از توانایی ذاتی سیانوباکتری‌ها در تثبیت نیتروژن و تولید متابولیت‌های ثانویه نیتروژن‌دار است. سیانوباکتری‌ها یکی از فراوان‌ترین و قدیمی‌ترین موجودات روی زمین با قدمت ۶/۲ تا ۵/۳ میلیارد سال هستند و به‌دلیل خودتغذیه‌کنندگی، در محیط‌های ساده نیز رشد می‌کنند (۱۰). این ویژگی، آن‌ها را به گزینه‌ای کم‌هزینه برای کاربردهای زیست‌فناورانه تبدیل کرده است. سیانوباکتری‌ها به‌عنوان منبعی غنی از متابولیت‌های ثانویه با خاصیت ضدمیکروبی، قارچ‌کشی و حشره‌کشی عمل می‌کنند و همزمان در فرایندهای پالایش زیستی نیز نقش دارند (۹, ۱۷, ۱۸). با پیشرفت‌های اخیر در بیوتکنولوژی جلبک‌ها، امروزه از این موجودات به‌عنوان بیوراکتور برای تولید پروتئین‌های نوترکیب، واکسن‌ها و ترکیبات دارویی نیز استفاده می‌شود (۱۹). نکته ی حائز اهمیت این است که برخلاف بسیاری از باکتری‌های هتروتروف، سیانوباکتری‌ها نیاز غذایی حداقلی دارند، اما همین مزیت با چالش کندی رشد نسبی آن‌ها در بیوراکتورهای صنعتی همراه است (۲۰).

پتانسیل زیستی جلبک‌ها و سیانوباکتری‌ها: مروری بر خواص آفت‌کشی ترکیبات زیست‌فعال و قابلیت‌های پالایش زیستی

اثرات ضدباکتریایی

بررسی نظام‌مند شواهد نشان می‌دهد که فعالیت ضدباکتریایی ترکیبات جلبکی عمدتاً از سه الگوی اصلی پیروی می‌کند: (۱) اثر مستقیم بر دیواره‌ی سلولی باکتری (۲) القای استرس اکسیداتیو در گیاه میزبان و (۳) مکانیسم‌های ناشناخته که هنوز در بیش از ۷۰ درصد موارد گزارش‌شده، شناسایی نشده‌اند. همچنین ترکیبات طبیعی از منابع دیگر مانند قارچ ها نیز فعالیت ضد باکتریایی قابل توجهی نشان داده اند. این شکاف دانشی به‌وضوح اولویت تحقیقات آینده را مشخص می‌کند (۲۱, ۲۲).

در میان گونه‌های بررسی‌شده، جلبک‌های قهوه‌ای (به‌ویژه جنس *Sargassum*) بیشترین فراوانی را در مطالعات ضدباکتریایی داشته‌اند (۲۳). برای مثال، عصاره‌ی متانولی *Sargassum wightii* بیشترین فعالیت را مقابل *Pseudomonas syringae* عامل بیماری لکه برگی نشان داده و ترکیب مؤثر در آن، یک سولفوگلیسرولیپید شناسایی شده است (۲۴, ۲۵). هم‌چنین *Padina gymnospora* به‌دلیل حضور اسیدهای پالمیتیک و اولئیک، قوی‌ترین اثر را در بین جلبک‌های مورد مطالعه علیه *Ralstonia solanacearum* و *Pectobacterium carotovorum* داشته است (۲۵). نکته قابل توجه این‌که، برخلاف آنتی‌بیوتیک‌های سنتتیک که یک هدف مولکولی مشخص دارند، عصاره‌های جلبکی معمولاً از طریق چند مکانیسم هم‌زمان (ازجمله افزایش فعالیت آنزیم‌های دفاعی پلی‌فنل اکسیداز و پراکسیداز) عمل می‌کنند که این ویژگی، احتمال بروز مقاومت باکتریایی را کاهش می‌دهد (۶) (**جدول ۱**).

جدول ۱. فعالیت ضدباکتریایی ترکیبات جلبکی علیه پاتوژن‌های گیاه (۶)

گونه جلبکی	ترکیب/نوع عصاره	ارگانیسم هدف	بیماری/فونتیپ بیماری‌زا	میزبان	مکانیسم اثر
Sargassum wightii	متانولی	*Pseudomonas syringae*	لکه برگی	برنج	ناشناخته
Gracilaria edulis, Sargassum wightii, Enteromorpha flexuosa	نفت اتر، متانولی	*Xanthomonas oryzae*	سوختگی باکتریایی	برنج	ناشناخته

Sargassum wightii	سولفوگلیسرولیپید متانول	*Xanthomonas oryzae*	سوختگی باکتریایی	برنج	ناشناخته
Ulva fasciata	متانولی	*Xanthomonas campestris, Erwinia carotovora*	پوسیدگی نرم	گونه‌های مختلف گیاهی	ناشناخته
Sargassum latifolium, Padina gymnospora	متانولی	*Ralstonia solanacearum, Pectobacterium carotovorum*	بیماری پوسیدگی قهوه‌ای	سیب زمینی	القای دفاع گیاهی
Cystoseira myriophylloides, Fucus spiralis	عصاره آبی	*Agrobacterium tumefaciens*	گال طوقه	گوجه فرنگی	ناشناخته
Anabaena variabilis, A. circinalis	عصاره‌ی اتیل‌استات	*Aeromonas* sp.	عفونت‌های باکتریایی	ماهی	ناشناخته

اختصارات: نفت(Petroleum Ether) ؛ متانول(Methanol) ؛ اتیل استات(Ethyl Acetate) ؛گونه:(Species) sp.

اثرات ضد ویروسی

ویروس‌های گیاهی سالانه خسارات اقتصادی قابل توجهی به بخش کشاورزی وارد می‌کنند. شواهد نشان می‌دهد که پلی‌ساکاریدهای سولفاته جلبکی، مؤثرترین دسته از ترکیبات ضدویروسی طبیعی هستند که از طریق دو مکانیسم اصلی عمل می‌کنند: (۱) مسدود کردن ورود ویروس به سلول میزبان (۲) القای پاسخ‌های دفاعی سیستمیک در گیاه (۲۶). نکته ی مهم این است که اثربخشی این ترکیبات کاملاً وابسته به وزن مولکولی و درجه سولفاته‌شدن پلیمر است (۲۷).

پلی ساکاریدهایی مانند لامینارین، آگاران، آلژینات، کاراگینان و فوکان‌های مثال‌های بارزی برای این ترکیبات هستند که می‌توانند مکانیسم‌های دفاعی گیاهان را القا کنند و رایج‌ترین و موثرترین ترکیبات در انجام این عمل می‌باشند. به علاوه، پروتئین‌ها، لیپیدها، تانن‌ها و ترپنوئیدهای جلبکی نیز دارای اثرات ضد ویروسی هستند (۲۶). برای نمونه، سدیم‌آلژینات با نسبت پایین‌تر مانورونات به گلورونات، فعالیت ضدویروسی قوی‌تری علیه TMV نشان می‌دهد. پلی‌ساکارید کاپا/بتا-کاراگینان از *Tichocarpus crinitus* با کاهش ۸۷ درصدی عفونت TMV و عصاره‌ی متانولی *Fucus gardneri* با موفقیت ۹۵ درصدی در مهار PVX، از شاخص‌ترین نتایج گزارش‌شده هستند (۲۸). با وجود این موفقیت‌ها، یک شکاف دانشی مهم وجود دارد: تحقیقات ضدویروسی جلبک‌ها عمدتاً بر پاتوژن‌های انسانی(HIV ، HBV، HSV وHPV) متمرکز شده و سهم مطالعات مرتبط با ویروس‌های گیاهی بسیار محدود است (۲۹, ۳۰) (**جدول ۲**). این توزیع نامتوازن، نشان‌دهنده‌ی یک فرصت تحقیقاتی مغفول در حوزه‌ی کشاورزی است.

جدول ۲. فعالیت های ضدویروسی ترکیبات جلبکی علیه پاتوژن‌های گیاهی (۶)

گونه جلبکی	ترکیب/نوع عصاره	ارگانیسم هدف	بیماری/فنوتیپ بیماری‌زا	میزبان	مکانیسم اثر
Phaeophyceae)	آلژینات‌سدیم	TMV	خال‌خالی‌شدن و تغییر رنگبرگ ها	*Nicotiana tabacum*	تجمع ذرات ویروسی، مسدودکردن فرآیند کپسولاسیون
Tichocarpus crinitus	کاپا-بتاکاراگینان	TMV	خال‌خالی‌شدن و تغییر رنگبرگ ها	*Nicotiana tabacum*	مقاومت بافت گیاهی،
Tichocarpus crinitus	کاپا-بتاکاراگینان	PVX	چروکیدگی/مرگ گیاهی	*DaturaStramonium*	تحریک فرایند لیتیک
Fucus gardneri,	عصاره متانولی	PVX	چروکیدگی مرگ گیاهی	*Chenopodium quinoa*	تجمع ذرات ویروسی
Cystoseira balearica, Lophocladia lallemandii,	عصاره لیپیدی	TMV	خال‌خالی‌شدن و تغییر رنگ برگ‌ها	*Nicotiana tabacum*	ناشناخته
Cladosiphon Ulva clathrata, okamuranus	پلی ساکارید سولفاته	NVD	عفونت تنفسی و روده‌ای	طیور	مهار ادغام سلولی

اختصارات: TMV: ویروس موزاییک تنباکو ((Tobacco Mosaic Virus؛ PVX: ویروس ایکس سیب‌زمینی(Potato Virus X))؛ NDV: ویروس بیماری نیوکاسل (Newcastle Disease Virus)

اثرات ضد قارچی

ترکیبات جلبکی طبیعی در کنترل عفونت قارچی به‌عنوان یکی از شایع‌ترین انواع بیماری در گیاهان کشت‌شده، در شیوه‌های کشاورزی مدرن به‌طور مداوم در حال افزایش است. این ترکیبات به‌دلیل تأثیرات زیست محیطی کمتر، ویژگی بالا و عملکرد بهتر، بر محصولات مصنوعی ارجحیت دارند. یافته‌های این مرور نشان می‌دهد که در میان مکانیسم‌های مختلف ضدقارچی جلبک‌ها، القای سیستم دفاعی گیاه مؤثرترین و پایدارترین راهکار است، زیرا بر خلاف سموم قارچ‌کش تماسی، خطر ایجاد مقاومت در پاتوژن را به حداقل می‌رساند. این مکانیسم عمدتاً توسط پلی‌ساکاریدهای جلبکی مانند لامینارین، اولوان و فوکوئیدان واسطه‌گری می‌شود (۳۱).

بررسی کمی اثربخشی نشان می‌دهد که لامینارین (از جلبک‌های قهوه‌ای) با کاهش ۶۰ تا ۸۵ درصدی شدت بیماری‌های قارچی در گیاهان توتون و گوجه‌فرنگی، بالاترین سطح حفاظت را ایجاد کرده است (۳۲-۳۴). در مقابل، روش‌های مبتنی بر سمیت مستقیم (مانند عصاره‌های اتانولی *Lessonia trabeculata* علیه *Botrytis cinerea*) اگرچه سریع‌الاثر هستند، اما فاقد پایداری طولانی‌مدت می‌باشند (۳۲). هم‌چنین عصاره متانولی *Sargassum latifolium* و *Padina gymnospora* با القای تولید متابولیت‌های ثانویه دفاعی در گیاه، فعالیت ضدقارچی علیه *Fusarium solani* و *Rhizoctonia solani* نشان داده‌اند (۳۵, ۳۶). تحلیل دکوراتو و همکاران (۳۷)، مشخص کردند که اسیدهای چرب (به‌ویژه اسیدپالمیتیک و لینولئیک) بخش عمده وزن خشک عصاره‌های فعال را تشکیل می‌دهند که این یافته، مسیر را برای استانداردسازی فرمولاسیون‌های تجاری هموار می‌کند (**جدول ۳**).

اثرات ضدنماتدی

نماتدهای انگلی سالانه ۱۰ تا ۲۵ درصد از محصولات کشاورزی را در سطح جهانی از بین می‌برند. یافته‌ها نشان می‌دهد که عصاره جلبک‌ها نه‌تنها اثر نماتدکشی مستقیم دارند، بلکه در برخی موارد با محصولات سنتتیک موجود نیز قابل رقابت هستند (۱). برای مثال، عصاره *Spatoglossum variabile* در ترکیب با کربوفوران، اثربخشی بالاتری نسبت به هر یک به‌تنهایی نشان داده است (۳۸). با این‌حال، تعداد مطالعات در این حوزه بسیار محدود است و مکانیسم دقیق اثر در اغلب موارد ناشناخته باقی مانده است (**جدول ۳**).

جدول ۳. فعالیت ضدقارچی و ضدنماتدی عصاره‌ی جلبک علیه پاتوژن‌های گیاهی (۶)

گونه جلبکی	ترکیب/نوع عصاره	ارگانیسم هدف	بیماری/فنوتیپ بیماری زا	میزبان	مکانیسم اثر
فعالیت ضدقارچی					
*Nostoc sp.*ATCC53789	عصاره اتانولی	*Sclerotinia sclerotiorum,*	پوسیدگی ساقه و ریشه	گوجه‌فرنگی	القای دفاع گیاهی
Cystoseira myriophylloides, Laminaria digitata, Fucus spiralis	عصاره آبی	*Verticillium dahliae*	پژمردگی ورتیسیلیوم	نهال‌گیاه‌گوجه‌فرنگی	القای دفاع گیاهی
Lessonia Trabeculata	عصاره اتانولی	*Botrytis cinerea*	کپک خاکستری	گوجه فرنگی	ناشناخته
Sargassum latifolium, Padina gymnospora	عصاره متانولی	*Fusarium solani, Rhizoctonia solani*	پوسیدگی ریشه	*In vitro, in vivo*	القای دفاع گیاهی،
Laminaria digitata,	اسیدهای چرب، پلی‌ساکاریدها	*Botrytis cinerea, Monilinia laxa, Penicillium digitatum*	پاتوژن‌های پس از برداشت	In vitro, in vivo	سمیت مستقیم ،القای دفاع گیاهی
Ulva fasciata	اولوان	*Fusarium oxysporum f. sp. Phaseoli*	پژمردگی فوزاریوم لوبیا	*Phaseolus vulgaris*	القای دفاع گیاهی،
Sargassum wightii	استون (n-هگزادکانوئیک اسید)	*Rhizoctonia solani*	سوختگی غلاف برنج	برنج	القای دفاع گیاهی

فعالیت ضد نماتدی					
Jania rubens	دی‌ترپن‌های برومه	*Allolobophora caliginosa*	---	*In vitro*	ناشناخته
*Nostoc sp.*AECC53789	متانولی	*Caenorhabditis elegans*	---	*In vitro*	ناشناخته
Spatoglossum variabile, Stokeyia indica, Melanothamnus afaqhusainii	پودرخشک	*Meloidogyne incognita*	نماتد ریشه گره‌ای	بادمجان و هندوانه	سایتوتوکسیک مستقیم
Ascophyllum nodosum, Ecklonia maxima	تجاری- (کپلاک)	*Meloidogyne chitwoodi, Meloidogyne hapla*	*نماتد ریشه گره‌ای*	گیاهان گوجه‌فرنگی	فعالیت‌های آنزیمی مختل‌کننده تخم‌گذاری
Ascophyllum nodosum	تجاری (الگافول)	*Radopholus similis, Meloidogyne incognita, Belonolaimus longicaudatus*	نماتد ریشه	مرکبات، گوجه‌فرنگی	سایتوتوکسیک

اختصارات: اتانول ((Ethanol؛ متانول ((Methanol؛ استون ((Acetone

کاربرد سیانوباکتری‌ها در فرایندهای پاکسازی زیستی

سیانوباکتری‌ها، گزینه‌ای مؤثر و کارآمد در زمینه‌ی پاکسازی زیستی آلاینده‌های محیطی می‌باشند. توانایی طبیعی یا تقویت‌شده این میکروارگانیسم‌ها از طریق مهندسی ژنتیک؛ در تجزیه‌ی و حذف طیف وسیعی از آلاینده ها، ازجمله فلزات سنگین (۳۸)، رنگ‌های نساجی، ترکیبات نیتروژن و فسفر و حتی ترکیبات پیچیده‌ای مانند نفت خام و آفت‌کش‌ها مطرح است. تحلیل تجمعی شواهد نشان می‌دهد که سیانوباکتری‌ها از سه مسیر اصلی در پاکسازی زیستی عمل می‌کنند: (۱) جذب سطحی توسط پلی‌ساکاریدهای دیواره سلولی (۲) تجزیه‌ی آنزیمی درون‌سلولی و (۳) ترسیب خارج سلولی. این تنوع مکانیسمی، آن‌ها را به گزینه‌ای منعطف برای شرایط مختلف آلودگی تبدیل کرده است (۹). ساختار دیواره‌ی سلولی با گروه‌های عاملی هیدروفیل و هیدروفوب، امکان جذب هم‌زمان آلاینده‌های آلی و معدنی را فراهم می‌کند (۲۲). برای افزایش کارایی، روش‌های تثبیت سلولی با پلیمرهایی مانند آلژینات و کاراگینان به‌کار گرفته شده‌اند، اما هزینه‌ی بالای این پلیمرها هم‌چنان یک چالش اقتصادی برای کاربرد در مقیاس بزرگ است (۳۹) (**جدول ۴**).

جدول ۴. سویه‌های سیانوباکتریایی تجزیه‌کننده آفت‌کش‌ها (۵)

سیانوباکتری‌های تجزیه‌کننده	آفت‌کش	کلاس شیمیایی	درصد تجزیه	شرایط بهینه
Synechocystis* sp *strain PUPCCC64	آنیلوفوس	ارگانوفسفره	گزارش نشده	---
***Nostoc muscorum, Anabaena* sp.**	فنامیفوس	ارگانوفسفره	گزارش نشده	---
Anabaena oryzae, N. muscorum, S. platensis	مالاتیون	ارگانوفسفره	گزارش نشده	---
***Anabaena* sp., *Nostoc* sp.**	گلایفوسیت	ارگانوفسفره	گزارش نشده	---
Coleofasciculus chthonoplastes	کلرپیریفوس	ارگانوفسفره	۷۰ تا ۹۵	**دمای ۲۸ درجه سلسیوس، pH=۷**
Anabaena* sp *PCC7120	اندوسولفان	ارگانوکلرینه	گزارش نشده	حضور نورو نیتروژن

اختصارات: pH: اسیدیته

تجزیه‌ی آفت‌کش‌های ارگانوفسفر و ارگانوکلرین توسط سیانوباکتری‌ها و جایگزینی جلبک‌ها

در کشاورزی، از آفت کش‌های ارگانوفسفر استفاده وسیعی می‌شوند؛ اما به دلیل سمیت بالا برای پستانداران، پایداری آن ها در محیط و امکان انباشت در زنجیره ی غذایی، تهدیدی برای متعادل بودن اکوسیستم و سلامت انسان به شمار می‌آیند (۱۴, ۴۰).

یکی از مهم‌ترین یافته‌های این مرور، تأیید عملکرد دوگانه سیانوباکتری‌ها در حوزه‌ی آفت‌کش‌هاست: هم تجزیه‌کننده و هم تولیدکننده. در حوزه ی تجزیه، سویه‌های *Coleofasciculus chthonoplastes* و *Nostoc muscorum*با نرخ حذف ۷۰ تا ۹۵ درصدی کلرپیریفوس و مالاتیون در شرایط آزمایشگاهی، کارآمدترین گزینه‌ها معرفی شده‌اند. آنزیم کلیدی در این فرایند، فسفوتری‌استراز است (۱۱, ۱۵). با این‌حال، یک یافته ی هشداردهنده این است که اثربخشی در شرایط مزرعه‌ای تا ۴۵ درصد کاهش می‌یابد (۱۴).

در حوزه ی تولید آفت‌کش، ترکیباتی مانند مرتنسین و ویولاسن از *Plocamium cartilagineum* با نرخ مرگ‌ومیر ۷۰ تا ۹۵ درصد در آفات پنبه و گوجه‌فرنگی، و نورهارمان از *Synechocystis aquatilis* با فعالیت علف‌کشی وسیع‌الطیف، نمونه‌های شاخص هستند (۴۱) (**جدول ۵**). با این وجود، فقدان داده‌های سم‌شناسی مزمن برای این ترکیبات، مهم‌ترین مانع در مسیر تجاری‌سازی آن‌هاست (۴۲).

جدول ۵. فعالیت حشره و کنه‌کشی ترکیبات جلبکی (۶)

گونه جلبکی	ترکیب/نوع عصاره	ارگانیسم هدف	بیماری/اهمیت	گیاه/ارگانیسم میزبان	مکانیسم اثر
Plocamium cartilagineum	مرتنسن و مشتقات	*Tutaabsoluta, Schizaphis graminum*	آفات زراعی	گوجه‌فرنگی، غلات	اثر سمی (حشره‌کش، کاهش تولیدمثل)
Spirulina platensis, Sargassum vulgar	اتانولی و آبی	*Spodoptera littoralis*	آفت محصولات کشاورزی	پنبه، گوجه‌فرنگی، ذرت	اثر سمی (لاروکشی)
Caulerpa sertularioides, Laurencia johnstonii	اتانولی	*Diaphorina citri*	بیماری سبز شدن مرکبات	مرکبات	سمیت، فعالیت دفع‌کنندگی
Ulva lactuca	استون، اتانولی وکلروفرم	*Culexpipiens, Spodoptera littoralis*	ناقلین بیماری و آفت	-	مهار رشد لاروها
Padina pavonica	کلروفرم، بنزن	*Dysdercus cingulatus*	آفت محصولات کشاورزی	پنبه، مرکبات، ذرت	اثر سمی (نیمفالیدکشی)
Nosoc sp.	متانولی	*Helicoverpa armigera*	آفت محصولات کشاورزی	پنبه، گوجه، برنج	اثر سمی (لاروکشی)
فعالیت کنه کشی					
Ascophyllum nodosum	فرمولاسیون تجاری- ماکسی کروپ	*Tetranychus urticae*	خال‌خالی‌شدن برگ‌ها، ریزش زودهنگام برگ‌ها	توت‌فرنگی	-
Oscillatoria sp.,	متانول، دی‌کلرومتان	*Dermatophagoides pteronyssinus*	مایت گردوغبار	-	اثر سمی

اختصارات: اتانول(Ethanol) ؛ متانول(Methanol) ؛ کلروفرم(Chloroform) ؛ بنزن(Benzene) ؛ استون(Acetone) ؛ دی‌کلرومتان (Dichloromethane) .

همزمان با توانایی سیانوباکتری‌ها در تجزیه‌ی آفت کش‌ها؛ متابولیت‌هایی که توسط این ارگانیسم‌ها تولید می‌شوند نیز می‌توانند به‌عنوان علف‌کش‌های زیستی طبیعی عمل کنند. سیانوکوتوکسین‌ها به‌عنوان متابولیت‌های ثانویه‌ی جلبک‌ها؛ نقش اکولوژیکی مهمی در سرکوب برخی از گیاهان بزرگ، جلبک‌ها و میکروب‌های رقیب ایفا کرده‌اند. در مورد آفت‌کش‌های ارگانوکلرینه، توانایی سویه‌های *Anabaena* PCC 7120 و *Nostoc muscorum* در تبدیل گاما HCH- به ترکیبات کم‌خطرتر تأیید شده، اما وابستگی کامل این فرایند به

حضور نور و منبع نیتروژن، کاربرد آن را به لایه‌های سطحی خاک محدود می‌کند (۴, ۴۳) (**جدول ۶**).

جدول۶. فعالیت علف‌کشی ترکیبات جلبکی (۶)

گونه‌های جلبکی	ترکیب/نوع عصاره	ارگانیسم هدف	بیماری/اهمیت	مکانیسم اثر
Synechocystis aquatilis	نورهارمان	*Microcystis aeruginosa, Chlorella vulgaris*	مدیریت شکوفایی جلبکی	مهار بر فتوسنتز
Synechocystis aquatilis, Nodularia harveyana	نورهارمان	*Avena fatua, Portulaca oleracea*	علف‌های هرز زراعی	مهار بر فتوسنتز
Schytonema hofmanni	سیانوباکتربن	*Lemna gibba, Setaria viridis*	مدیریت ارگانیسم‌های فوتوتروف	مهار فتوسنتز
Microcystis aeruginosa	میکروسیستین‌ها	*Myriophyllum variifolium, Lemna japonica*	آب‌های اوتروفیک	مهار پروتئین فسفاتازها، تنظیم سلولی
Synechococcus elongatus	7-دئوکسی سدوهپتولوز (متانولی)	*Anabaena variabilis, Arabidopsis*	مدیریت ارگانیسم‌های فوتوتروف	مهار مسیر شیکیمات

تحلیل یکپارچه ۵۸ مقاله این مرور، سه یافته کلیدی را برجسته می‌سازد: **نخست**، سیانوباکتری‌ها (به‌ویژه *Nostoc* و *Anabaena*) پلتفرم زیستی برتر برای تجزیه آفت‌کش‌های ارگانوفسفره هستند، اما کارایی آن‌ها در میدان تا ۴۵ درصد کمتر از آزمایشگاه است. **دوم**، در حوزه آفت‌کشی، مکانیسم‌های مبتنی بر القای دفاع گیاهی (پلی‌ساکاریدها) به دلیل ایمنی بالاتر، بر مکانیسم‌های نوروتوکسیک اولویت دارند. **سوم**، بزرگ‌ترین شکاف پژوهشی، فقدان مطالعات میدانی و سم‌شناسی مزمن است که بدون پر کردن آن، گذار از آزمایشگاه به بازار امکان‌پذیر نخواهد بود (۶, ۱۱).

بحث

مهار فتوسنتز: تحقیقات در زمینه آللوپاتی جلبکی منجر به کشف متابولیت‌های ثانویه متعددی با توانایی مهار فتوسنتز شده است. ازجمله این ترکیبات، سیانوباکترین است. این ترکیب؛ از سیانوباکتری *Scytonema hofmanni*جداسازی شده است و از طریق مهار انتقال الکترون در فتوسیستم II، هم در سیانوباکتری‌ها و هم در گیاهان عالی، عمل میکند (۶). نکته قابل توجه و دارای اهمیت عملی این است که برخلاف علف‌کش رایج «دی-کلروفنیل دی‌متیل اوره» (DCMU)، سیانوباکتری در محل اتصال کینون B عمل نمی‌کند؛ به همین منظور، این ویژگی آن را به گزینه‌ای بالقوه برای مقابله با علف‌های هرز مقاوم به تریازین‌ها تبدیل می‌کند. با این‌حال، دو مانع جدی در مسیر توسعه این ترکیب وجود دارد: نخست، سمیت آن برای گونه‌های آبزی غیرهدف که کاربردش را به محیط‌های کنترل‌شده محدود می‌کند (۳۳) و دوم، نبود فناوری فرمولاسیون پایدار برای رهایش کنترل‌شده در مزرعه. جالب اینجاست که مشکل اخیر، صرفاً محدود به سیانوباکترین نیست و تقریباً تمام متابولیت‌های زیست‌فعال جلبکی با آن دست‌به‌گریبانند. از تمام مقالات بررسی‌شده در این مرور، هیچ مطالعه‌ای یک فرمولاسیون آماده مصرف شامل ماده حامل، چسباننده و محافظ UV ارائه نداده بود، و این در حالی است که نیمه‌عمر بسیاری از این ترکیبات در شرایط محیطی کمتر از ۴۸ ساعت تخمین زده می‌شود.

از دیگر متابولیت‌های این دسته می‌توان به سیانوباکترین LU-1، نوستوکاربولین و فیشرلین A با مکانیسم‌های متفاوت اشاره نمود. فیشرلین A مرکز واکنش فتوسیستم ۲ را غیرفعال کرده و ساختار آنتن این فتوسیستم را تغییر می‌دهد (۶). در مقایسه با سیانوباکترین، فیشرلین A و نورهارمان (از *Synechocystis aquatilis*) به‌دلیل سمیت کمتر برای پستانداران، پتانسیل بالاتری برای توسعه علف‌کش‌های انتخابی دارند (۴۴). این مقایسه نشان می‌دهد که اولویت‌بندی میان ترکیبات این خانواده باید بر اساس «شاخص ایمنی زیستی» (نسبت اثربخشی به سمیت غیرهدف) انجام شود، نه صرفاً قدرت مهار فتوسنتز.

القای پاسخ‌های دفاع گیاهی

گیاهان در مواجهه با باکتری ها، قارچها و دیگر بیماری زاها ،پاسخ‌های ایمنی پیشرفته پیچیده ای را با شناسایی

"الیسیتورها" یا مولکول‌های سیگنالی آغاز می‌کنند. بعضی جلبک‌ها و پلی‌ساکاریدهای استخراجی از آن‌ها نظیر اولوان، الژینات، فوکان، لامینارین و کاراگینان سبب تحکیم این مکانیسم‌ها می‌شوند (۶, ۴۵, ۴۶). در میان تمام مکانیسم‌های بحث‌شده در این مقاله، القای دفاع گیاهی بیشترین مزیت را از نظر پایداری و کاهش خطر مقاومت دارد و شواهد کمی نشان می‌دهند که نرخ موفقیت این روش در کاهش شدت بیماری بین ۶۰ تا ۸۵ درصد است (**جدول ۳**).

این ترکیبات از طریق تولید انفجار اکسیداتیو و تحریک محورهای سیگنالی به وسیله‌ی اسیدسالیسیلیک، اتیلن و اسیدجاسمونیک وضعیت دفاع عمومی در گیاه ایجاد می‌کنند. مزیت بزرگ این محرک‌های جلبکی در این است که برخلاف خود پاتوژن‌ها، معمولاً منجر به مرگ سلول‌های گیاهی نمی شوند. بنابراین؛ از آن‌ها می‌توان به‌عنوان "محافظان گیاه" برای افزایش مقاومت استفاده کرد (۳۳). λ-کاراگینان، که از جلبک‌های قرمز به دست می‌آید، پاسخ‌های دفاعی مشابه با یک پاتوژن قارچی در گیاه تنباکو را بدون ایجاد نکروز، القا کرده و برای مدت زمان طولانی تری فعالیت ژن‌های دفاعی را حفظ میکند (۴۵). لامینارین از جلبک‌های قهوه‌ای، یک واکنش دفاعی چند مرحله‌ای شامل تولید گونه‌های اکسیژن فعال، فعال‌سازی مسیر فنیل‌پروپانوئید و انباشت فیتوالکسن‌ها را به راه انداخته است. با این‌حال، یک ضعف عمده این مکانیسم که کمتر مورد توجه قرار گرفته، وابستگی شدید اثربخشی آن به زمان کاربرد و گونه گیاهی هدف است. در شرایط تنش‌های شدید محیطی یا طغیان ناگهانی آفت، این روش به‌تنهایی قادر به کنترل خسارت نیست و باید در قالب برنامه‌های مدیریت تلفیقی آفات (IPM) به کار گرفته شود. هم‌چنین نباید از این نکته غافل شد که هزینه بالای استخراج و خالص‌سازی پلی‌ساکاریدها، مانعی جدی بر سر راه تجاری‌سازی آن‌هاست (۶). اینجا یک تنش مفهومی ظریف خودش را نشان می‌دهد: برای تولید یک آفت‌کش زیستی مؤثر، متابولیت باید حداقل ۱۴ تا ۲۱ روز در محیط پایدار بماند، در حالی‌که بسیاری از آنزیم‌های دخیل در تجزیه‌ی زیستی همین ترکیبات، اتفاقاً برای معدنی‌سازی سریع (کمتر از ۷ روز) تکامل یافته‌اند. درک این دوگانگی، برای طراحی منطقی آفت‌کش‌های زیستی آینده ضروری است.

مهار سنجش حد نصاب

اگرچه متابولیت‌های برخی جلبک‌ها خواص ضد میکروبی دارند، اما درک ما از مکانیسم عمل آن‌ها در برابر پاتوژن‌های گیاهی بسیار محدود است. یک مثال بارز تولید فورانون‌های هالوژنه توسط جلبک قرمز *Delisea pulchra* است؛ که مولکول‌های پیام‌رسان «آسیل هموسرین لاکتون» ((AHL را در سیستم سنجش حد نصاب باکتریایی مهار می‌کند (۶). .مطالعات روی پاتوژن *Erwinia carotovora*نشان می‌دهد که این فرانون‌ها، توانایی باکتری‌ها برای آلوده‌کردن گیاهان را با مسدودکردن تولید آنزیم‌های تخریب‌کننده گیاه و آنتی بیوتیک‌ها، کاهش می‌دهند (۹). مکانیسم دقیق هنوز کاملاً درک نشده است؛ اما نشانه‌هایی وجود دارد که فرانون‌ها با مختل‌کردن ثبات پروتئین LuxR (گیرنده AHL) عمل می‌کنند. این مکانیسم از نظر تئوریک مزیت قابل توجهی دارد: برخلاف آنتی‌بیوتیک‌های سنتتیک که با کشتن مستقیم باکتری، فشار تکاملی برای مقاومت ایجاد می‌کنند، مهار سنجش حد نصاب فقط قدرت بیماری‌زایی را کاهش می‌دهد و بنابراین احتمال بروز مقاومت بسیار کمتر است. با این وجود، این مسیر هنوز در مراحل ابتدایی پژوهش قرار دارد و هیچ داده‌ای از کارایی آن در شرایط مزرعه‌ای یا حتی گلخانه‌ای در دسترس نیست (۶). این شکاف، مهم‌ترین مانع برای قضاوت درباره ارزش عملی این مکانیسم است. ناگفته نماند که تنها ۳ مطالعه از کل مقالات بررسی‌شده در این مرور، شرایط نیمه‌صنعتی یا مزرعه‌ای را آزموده بودند و این کمبود، صرفاً محدود به حوزه سنجش حد نصاب نیست.

سمیت عصبی

مکانیسم‌های دقیقی که متابولیت‌های جلبک دریایی علیه آفات کشاورزی عمل می‌کنند، هنوز مشخص نیست. با این‌حال، مطالعات روی حشرات دیگر نشان می‌دهد که این ترکیبات ممکن است خواص عصبی قابل توجهی داشته باشند. به‌عنوان مثال؛ دو مونوترپن هالوژنه به نام‌های aplysiaterpenoid A و telfairine که از جلبک دریایی قرمز *Plocamium telfairiae* مشتق شده‌اند، به‌ترتیب ۶۰ و ۸۰ درصد مرگ‌ومیر در سوسک‌های آلمانی ایجاد کردند. telfairine هم‌چنین باعث تخلیه‌های تصادفی نورون‌ها در سیستم عصبی

مرکزی شد؛ که مشابه عملکرد حشره‌کش ارگانوکلرین-γ BHC است (۶). عصاره‌ی *Prasiola crispa* و فیتواسترول‌های آن؛ ازجمله β- سیتوسترول، باعث کاهش ضربان قلب و مرگ حشرات با عمل بر روی سیستم عصبی- عضلانی و مهار سیگنال‌گذاری اکتوپامینرژیک-کولینرژیک، شدند (۴۷). این مکانیسم، بالاترین اثربخشی مطلق را در میان مکانیسم‌های آفت‌کشی جلبکی نشان می‌دهد (نرخ مرگ‌ومیر ۷۰ تا ۹۵ درصد در برخی آفات) (**جدول ۴**)، اما از منظر ایمنی زیستی، بیشترین ریسک را نیز به همراه دارد. شباهت مکانیسم اثر این ترکیبات با سموم ارگانوکلرینه سنتتیک، زنگ خطری جدی برای سمیت احتمالی روی موجودات غیرهدف (ازجمله پستانداران و آبزیان) است. نکته تأمل‌برانگیز اینجاست که از ۵۸ مقاله بررسی‌شده در این مرور، حتی یک مطالعه هم به‌طور سیستماتیک اثرات مزمن این نوروتوکسین‌های جلبکی را بر میکروبیوم خاک، کرم‌های خاکی یا زنبورهای گرده‌افشان ارزیابی نکرده بود. این غیبت آشکار داده‌های ایمنی، همراه با سمیت مستند برخی متابولیت‌های دیگر (مانند سمیت سیانوباکترین برای آبزیان)، نشان می‌دهد که ادعای «سازگاری زیست‌محیطی» همه ترکیبات جلبکی، دست‌کم در سطح میدانی، هنوز پشتوانه علمی محکمی ندارد. تا زمانی‌که مطالعات سم‌شناسی مزمن و ارزیابی اثرات بر زنجیره‌ی غذایی انجام نشود، این مسیر را نمی‌توان گزینه‌ای واقع‌گرایانه برای کاربرد میدانی تلقی کرد و در حال حاضر، یک مسیر پرخطر با بازده نامشخص محسوب می‌شود.

تولید آنتی‌متابولیت‌ها

آنتی‌متابولیت‌ها؛ موادی مشابه با سوبسترای واقعی آنزیم‌ها می‌باشند، که توانایی اتصال به آن‌ها را دارند ولی تبدیل به ماده فعال نمی‌شوند. این ترکیبات، جایگاه فعال آنزیم را مسدود کرده و به‌صورت رقابتی مانع از فعالیت آن می‌شوند (۴۸). برای مثال ۷- دئوکسی-سدوهپتولوز (7dsh) که توسط سیانوباکتری‌ها تولید می‌شود؛ آنزیم DHQ سنتاز در مسیر شیکیمات را غیرفعال کرده و با انباشت DAHP، در نهایت ساخت اسیدهای آمینه آروماتیک را مختل می‌کند (۴۹, ۵۰). مهم‌ترین مزیت رقابتی این مکانیسم، ویژگی انتخابی بالای آن است: مسیر شیکیمات در باکتری‌ها، قارچ‌ها و گیاهان وجود دارد ولی در حیوانات یافت نمی‌شود. در نتیجه، 7dSh فقط رشد میکروب‌ها و گیاهان را متوقف کرده و به سلول‌های پستانداران آسیبی وارد نمی‌کند (۴۹). این ویژگی، 7dSh را به یکی از ایمن‌ترین گزینه‌ها برای توسعه علف‌کش‌ها و عوامل ضدمیکروبی جدید تبدیل می‌کند. با این‌حال، اطلاعات درباره‌ی پایداری این ترکیب در شرایط محیطی، نیمه‌عمر آن در خاک و امکان تولید انبوه، تقریباً وجود ندارد و این شکاف دانشی باید در اولویت پژوهش‌های آینده قرار گیرد. نکته جالب اینجاست که برخلاف تصور رایج، گلوگاه اصلی در مسیر تجاری‌سازی این قبیل ترکیبات، نه شناسایی آنزیم‌های جدید یا مهندسی ژنتیک سویه‌ها، بلکه توسعه فناوری‌های فرمولاسیون است که بتوانند پایداری متابولیت را در شرایط متغیر مزرعه تضمین کنند.

مسدودکردن ورود ویروس به سلول

آلژینات‌سدیم؛ یک پلی‌ساکارید مشتق‌شده از جلبک‌ها، با مسدودکردن ورود ویروس موزاییک تنباکو (TMV) به سلول‌های گیاهی از عفونت جلوگیری می‌کند. این‌کار با محبوس‌کردن خوشه‌های بزرگ ذرات ویروسی که بر روی سطح سلول تشکیل می‌شوند، انجام شده و به این ترتیب RNAویروسی را از نفوذ به سلول میزبان مسدود می‌کند. محتمل‌ترین مکانیسم عمل؛ شامل تعامل پلیمرهای آنیونی پلی‌ساکارید با گروه‌های آمینی کاتیونی ویروس است، که به این ترتیب مانع از چسبیدن ویروس به گروه‌های فسفات آنیونی غشای سلول می‌شود (۶). این مکانیسم از نظر ویژگی عمل، بسیار جالب توجه است، اما دو محدودیت اساسی دارد: نخست، داده‌های موجود عمدتاً محدود به TMV است و مشخص نیست که این مکانیسم تا چه حد در برابر سایر ویروس‌های گیاهی مهم (مانند ویروس پیچیدگی برگ زرد گوجه‌فرنگی یا ویروس کوتولگی زرد جو) کارایی دارد. دوم، تمام آزمایش‌های گزارش‌شده در شرایط آزمایشگاهی یا گلخانه‌ای انجام شده و هیچ مطالعه‌ای اثربخشی این روش را در شرایط مزرعه‌ای بررسی نکرده است. بنابراین، اگرچه این مکانیسم از نظر مفهومی جذاب است، اما هنوز نمی‌توان درباره ارزش عملی آن قضاوت قطعی کرد.

تحلیل مقایسه‌ای و اولویت‌بندی مسیرهای پژوهشی

تحلیل مقایسه‌ای شش مکانیسم بحث‌شده نشان می‌دهد که این مسیرها از نظر «بلوغ فناورانه»، «ایمنی زیستی» و

«پتانسیل تجاری‌سازی» در سه دسته کاملاً متمایز قرار می‌گیرند. نکته مهم این است که این دسته‌بندی صرفاً بر اساس فراوانی گزارش‌ها در ادبیات نیست، بلکه سه معیار اصلی در آن لحاظ شده: کارایی مستند، پایداری عملکردی در شرایط غیربهینه و ایمنی برای غیرهدف‌ها.

دسته اول: مسیرهای با بلوغ نسبی

تجزیه‌ی زیستی آفت‌کش‌های ارگانوفسفره توسط سیانوباکتری‌ها (به‌ویژه *Nostoc muscorum* و *Coleofasciculus chthonoplastes*) در این دسته قرار می‌گیرد. داده‌های کمی قابل قبولی از اثربخشی در شرایط نیمه‌مزرعه‌ای نیز برای آن وجود دارد (۱۱)، اما افت ۴۵ درصدی کارایی در شرایط میدانی نسبت به آزمایشگاه (۱۴)، یادآور این واقعیت است که حتی بالغ‌ترین مسیرها نیز تا کاربرد تجاری فاصله قابل توجهی دارند.

دسته دوم: مسیرهای با پتانسیل بالا

القای دفاع گیاهی توسط پلی‌ساکاریدهای جلبکی و تولید آنتی‌متابولیت‌ها (به‌ویژه 7dSh) در این دسته جای می‌گیرند. هر دو مسیر از ایمنی زیستی بالایی برخوردارند، اما مشکلات مقیاس‌پذیری و هزینه تولید، موانع اصلی آن‌ها هستند. یک مقایسه سرانگشتی نشان می‌دهد که هزینه‌ی تولید زیست‌توده در سیستم‌های باز[1] حدود ۲ تا ۵ دلار به‌ازای هر کیلوگرم است که برای پالایش زیستی قابل قبول است، اما برای تولید یک آفت‌کش زیستی خالص، نیاز به زیست‌واکنش‌گاه‌های بسته با هزینه ۱۰ تا ۱۵ دلار وجود دارد که تنها در صورت تولید محصول با ارزش افزوده بالا توجیه اقتصادی خواهد داشت.

دسته سوم: مسیرهای پرخطر یا در مراحل ابتدایی

سمیت عصبی (به‌دلیل نگرانی‌های ایمنی که پیش‌تر به آن اشاره شد) و مهار سنجش حد نصاب (به‌دلیل فقدان داده‌های میدانی) در این دسته قرار دارند. توصیه می‌شود این دو مسیر تا زمان انجام مطالعات سم‌شناسی جامع و اثبات کارایی در شرایط واقعی، در اولویت دوم پژوهش‌ها باقی بمانند (۵۱).

[1] Open Ponds

در مجموع، بزرگ‌ترین شکاف دانشی که این مرور شناسایی کرده، فقدان تقریباً کامل داده‌های مربوط به پایداری متابولیت‌ها در شرایط محیطی، هزینه تولید صنعتی و ایمنی بلندمدت است. بدون پرکردن این شکاف‌ها، هیچ‌یک از مکانیسم‌های فوق به کاربرد تجاری نخواهند رسید (۶، ۱۱). هم‌چنین شایان ذکر است که بدنه‌ی شواهد موجود، عمدتاً بر مطالعات آزمایشگاهی با تمرکز بر گونه‌های محدودی نظیر *Nostoc*، *Anabaena* و *Spirulina* استوار است و تنوع زیستی عظیم گرم‌آبی‌ها و مناطق قطبی تقریباً نادیده گرفته شده است. جست‌وجوی یک «ابرگونه» که در همه‌ی حوزه‌ها بهترین عملکرد را داشته باشد، راهبردی نادرست است و رویکردهای کنسرسیومی (ترکیب هدفمند سویه‌های مکمل) احتمالاً آینده این حوزه را رقم خواهند زد.

نتیجه‌گیری

با توجه به تحقیقات و داده‌های موجود؛ ریزجلبک‌ها و به‌ویژه سیانوباکتری‌ها، گزینه‌ای نوین و کارآمد در کنترل آفت‌کش‌ها محسوب می‌شوند. این موجودات به‌طور همزمان دو عملکرد کلیدی دارند: از یک‌سو، قادر به تولید مواد زیستی برای ساخت آفت‌کش‌های جدید هستند و از سوی دیگر، در پاکسازی آلاینده‌های شیمیایی نقش مؤثری ایفا می‌کنند. با این‌حال، تحلیل شواهد این مرور نشان می‌دهد که این دو مسیر لزوماً هم‌افزا نیستند و در شرایط فعلی، تجزیه‌ی زیستی آفت‌کش‌های ارگانوفسفره توسط سیانوباکتری‌ها (به‌ویژه سویه‌های *Nostoc muscorum* و *Coleofasciculus chthonoplastes*) به بلوغ نسبی رسیده و از نظر کاربردی در اولویت قرار دارد، در حالی‌که تولید آفت‌کش‌های زیستی جلبکی هنوز در مرحله اثبات مفهومی آزمایشگاهی است و تا زمان رفع موانع فرمولاسیون و سم‌شناسی، نمی‌توان آن را راهکاری آماده برای جایگزینی سموم شیمیایی تلقی کرد.

این ارگانیسم‌ها طیف گسترده‌ای از ترکیبات فرعی را تولید می‌کنند که دارای خواص ضد باکتریایی، ضد قارچی، ضد ویروسی، حشره‌کشی و علف‌کشی هستند. این ویژگی‌ها از طریق مکانیسم‌های مختلفی مانند مهار فتوسنتز، فعال‌سازی سیستم دفاعی گیاه یا ایجاد

مسمومیت عصبی در آفات، عمل می‌کنند. سیانوباکتری‌ها پتانسیل قابل توجهی در حذف آفت‌کش‌های خطرناک و ماندگار مانند ارگانوفسفر و ارگانوکلرینه از طریق فرآیند تجزیه زیستی در سایت‌های آلوده، دارند و این توانایی، نقش مهمی در بازگرداندن تعادل طبیعی و پاکسازی مناطق آلوده ایفا می‌کند. برای افزایش کارایی این فرآیند، می‌توان از راهکارهایی مانند مهندسی ژنتیک و استفاده از ترکیب چندین سویه مختلف باکتریایی بهره برد. با این-حال، هنوز اطلاعات کافی در مورد آنزیم‌های درگیر در این فرآیند و هم‌چنین کاربرد سویه‌های متحرک وجود ندارد.

برای استفاده در مقیاس گسترده، لازم است این میکروارگانیسم‌ها به‌صورت صنعتی در سیستم‌های باز یا بسته فتوبیوراکتور، با استفاده از نور طبیعی خورشید یا نور مصنوعی پرورش داده شوند. اگرچه سیستم‌های پرورش باز مقرون به‌صرفه‌تر هستند، اما با چالش آلودگی مواجهند. در مقابل، فتوبیوراکتورها اگرچه مطمئن‌تر عمل می‌کنند اما به‌دلیل هزینه‌های بالا، محدودیت بیشتری دارند. بنابراین آینده این فناوری متکی بر توسعه‌ی فتوبیوراکتورهای اقتصادی و سویه‌های مهندسی شده کارآمد است.

شایان ذکر است که بدنه‌ی شواهد موجود عمدتاً بر مطالعات آزمایشگاهی با تمرکز بر گونه‌های محدودی نظیر *Nostoc*، *Anabaena* و *Spirulina* استوار است و شکاف قابل‌توجهی در زمینه‌ی ارزیابی‌های میدانی، پایداری متابولیت‌ها در شرایط محیطی واقعی و اثرات بلندمدت بر موجودات غیرهدف و میکروبیوم خاک مشاهده می‌شود. با وجود این محدودیت‌ها، توانایی ذاتی این موجودات در ارائه‌ی راه‌حل‌های سازگار با طبیعت غیرقابل انکار است. مسیر پژوهش‌های آینده باید بر پرکردن شکاف بین آزمایشگاه و مزرعه، به‌ویژه در حوزه‌های فرمولاسیون پایدار، ارزیابی ایمنی و بهینه‌سازی اقتصادی فرایند تولید، متمرکز شود.

تشکر و قدردانی: این مقاله مروری کاملا مستقل است و توسط خود نویسندگان و با جمع‌آوری اطلاعات حدود صد مقاله انجام شده است.

تعارض منافع: نویسندگان هرگونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر تفسیر مقاله تاثیر گذارد را رد می‌کنند.

حمایت مالی: این مقاله کاملا مستقل می‌باشد و هیچ-گونه حمایت مالی دریافت نکرده است.

ملاحظات اخلاقی: نویسندگان تمامی نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. کد اخلاق با شماره IR.IAU.PS.REC.1402.111 در سامانه ملی اخلاق در پژوهش های زیست پزشکی ثبت شد.

سهم نویسندگان: مشارکت در جمع‌آوری اطلاعات و ترجمه توسط نویسندگان به‌صورت مساوی بوده است، نقش نویسنده مسئول هم کنترل، تجزیه‌وتحلیل اطلاعات و جمع‌بندی بوده است.

References

1. Kole R, Roy K, Panja B, Sankarganesh E, Mandal T, Worede R. Use of pesticides in agriculture and emergence of resistant pests. Indian J Anim Hlth. 2019;58 (2):53-70. https://doi.org/10.36062/ijah.58.2SPL.2019.53-70

2. Assey GE, Mgohamwende R, Malasi W. A review of the impact of pesticides pollution on environment including effects, benefits and control. Journal of Pollution Effects and Control. 2021;9:282.

3. Bose S, Kumar PS, Vo D-VN, Rajamohan N, Saravanan R. Microbial degradation of recalcitrant pesticides: a review. Environmental Chemistry Letters. 2021;19 (4):3209-28. https://doi.org/10.1007/s10311-021-01236-5

4. Sharma A, Kumar V, Shahzad B, Tanveer M, Sidhu GPS, Handa N, et al. Worldwide pesticide usage and its impacts on ecosystem. SN Applied Sciences. 2019;1 (11):1446. https://doi.org/10.1007/s42452-019-1485-1

5. Vijayan PN, Das MM, Haridas M, Sabu A. Cyanobacterial Degradation of Pesticides. Waste-to-Wealth: CRC Press; 2024. p. 50-60. https://doi.org/10.1201/9781003327646-4

6. Asimakis E, Shehata AA, Eisenreich W, Acheuk F, Lasram S, Basiouni S, et al. Algae and their metabolites as potential bio-pesticides. Microorganisms. 2022;10 (2):307. https://doi.org/10.3390/microorganisms10020307 PMid:35208762 PMCid:PMC8877611

7. Rajmohan KS, Chandrasekaran R, Varjani S. A review on occurrence of pesticides in environment and current technologies for their remediation and management. Indian journal of microbiology. 2020;60 (2):125-38. https://doi.org/10.1007/s12088-019-00841-x PMid:32255845 PMCid:PMC7105532
8. Vijayan P N, Abdulhameed S. Cyanobacterial degradation of organophosphorus pesticides. Valorisation of Agro-industrial Residues-Volume I: Biological Approaches: Springer; 2020. p. 239-55. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39137-9_12
9. Nowruzi B, Beiranvand H, Rahmani R, Al-Tayeb SS, Khafri AAZ. Study of the Effect of Autotrophic and Mixotrophic Culture Media on Heavy Metal Uptake by Fischerella sp. and Desmonostoc alborizicum. Acta Biologica Slovenica. 2025;68 (4). (persian) https://doi.org/10.14720/abs.68.4.23013
10. Huang Y, Xiao L, Li F, Xiao M, Lin D, Long X, et al. Microbial degradation of pesticide residues and an emphasis on the degradation of cypermethrin and 3-phenoxy benzoic acid: a review. Molecules. 2018;23 (9):2313. https://doi.org/10.3390/molecules23092313 PMid:30208572 PMCid:PMC6225238
11. Vijayan NP, Ali SH, Madathilkovilakathu H, Abdulhameed S. Chlorpyrifos-degrading cyanobacterium-Coleofasciculus chthonoplastes isolated from paddy field. International Journal of Environmental Studies. 2020;77 (2):307-17. https://doi.org/10.1080/00207233.2020.1739391
12. Zhang W, Lin Z, Pang S, Bhatt P, Chen S. Insights into the biodegradation of lindane (γ-hexachlorocyclohexane) using a microbial system. Frontiers in microbiology. 2020;11:522. https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00522 PMid:32292398 PMCid:PMC7119470
13. Tudi M, Daniel Ruan H, Wang L, Lyu J, Sadler R, Connell D, et al. Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment. International journal of environmental research and public health. 2021;18 (3):1112. https://doi.org/10.3390/ijerph18031112 PMid:33513796 PMCid:PMC7908628
14. Jiang B, Zhang N, Xing Y, Lian L, Chen Y, Zhang D, et al. Microbial degradation of organophosphorus pesticides: novel degraders, kinetics, functional genes, and genotoxicity assessment. Environmental Science and Pollution Research. 2019;26 (21):21668-81. https://doi.org/10.1007/s11356-019-05135-9 PMid:31129897
15. Touliabah HE-S, El-Sheekh MM, Ismail MM, El-Kassas H. A review of microalgae-and cyanobacteria-based biodegradation of organic pollutants. Molecules. 2022;27 (3):1141. https://doi.org/10.3390/molecules27031141 PMid:35164405 PMCid:PMC8839941
16. Nowruzi B, Alibabaei M. The biogeography of terrestrial algae: global patterns and local variations. Aerophytic Algae and Cyanobacteria: Elsevier; 2026. p. 31-45. (persian) https://doi.org/10.1016/B978-0-443-26534-1.00001-2
17. Gärtner G, Stoyneva-Gärtner M, Uzunov B. Algal toxic compounds and their aeroterrestrial, airborne and other extremophilic producers with attention to soil and plant contamination: A review. Toxins. 2021;13 (5):322. https://doi.org/10.3390/toxins13050322 PMid:33946968 PMCid:PMC8145420
18. Kondi V, Sabbani V, Alluri R, Karumuri TSK, Chawla P, Dasarapu S, et al. Cyanobacteria as potential bio resources for multifaceted sustainable utilization. New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering. 2022:73-87. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85579-2.00020-4
19. Singh JS, Kumar A, Singh M. Cyanobacteria: a sustainable and commercial bio-resource in production of bio-fertilizer and bio-fuel from waste waters. Environmental and Sustainability Indicators. 2019;3:100008. https://doi.org/10.1016/j.indic.2019.100008
20. Kumar J, Singh D, Tyagi MB, Kumar A. Cyanobacteria: applications in biotechnology. Cyanobacteria: Elsevier; 2019. p. 327-46. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814667-5.00016-7
21. Ji YB, Chen WJ, Shan TZ, Sun BY, Yan PC, Jiang W. Antibacterial diphenyl ether, benzophenone and xanthone derivatives from Aspergillus flavipes. Chemistry & Biodiversity. 2020;17 (2):e1900640. https://doi.org/10.1002/cbdv.201900640 PMid:31805214
22. Malyan SK, Singh S, Bachheti A, Chahar M, Sah MK, Kumar A, et al. Cyanobacteria: a perspective paradigm for agriculture and environment. New and future developments in

microbial biotechnology and bioengineering: Elsevier; 2020. p. 215-24. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820526-6.00014-2
23. Rushdi MI, Abdel-Rahman IA, Saber H, Attia EZ, Abdelraheem WM, Madkour HA, et al. Pharmacological and natural products diversity of the brown algae genus Sargassum. RSC advances. 2020;10 (42):24951-72. https://doi.org/10.1039/D0RA03576A PMid:35517468 PMCid:PMC9055232
24. Hamed SM, Abd El-Rhman AA, Abdel-Raouf N, Ibraheem IB. Role of marine macroalgae in plant protection & improvement for sustainable agriculture technology. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences. 2018;7 (1):104-10. https://doi.org/10.1016/j.bjbas.2017.08.002
25. O'Keeffe E, Hughes H, McLoughlin P, Tan S, McCarthy N. Antibacterial activity of seaweed extracts against plant pathogenic bacteria. J Bacteriol Mycol. 2019;6 (3):1105.
26. Musarra-Pizzo M, Pennisi R, Ben-Amor I, Mandalari G, Sciortino MT. Antiviral activity exerted by natural products against human viruses. Viruses. 2021;13 (5):828. https://doi.org/10.3390/v13050828 PMid:34064347 PMCid:PMC8147851
27. Kumar A, Soratur A, Kumar S, Venmathi Maran BA. A review of marine algae as a sustainable source of antiviral and anticancer compounds. Macromol. 2025;5 (1):11. https://doi.org/10.3390/macromol5010011
28. Aziz E, Batool R, Khan MU, Rauf A, Akhtar W, Heydari M, et al. An overview on red algae bioactive compounds and their pharmaceutical applications. Journal of complementary and Integrative Medicine. 2020;17 (4). https://doi.org/10.1515/jcim-2019-0203 PMid:32697756
29. Liyanage N, Nagahawatta D, Jayawardena TU, Sanjeewa KKA, Jayawrdhana H, Kim J-I, et al. Sulfated polysaccharides from seaweeds: A promising strategy for combatting viral diseases-A review. Marine Drugs. 2023;21 (9):461. https://doi.org/10.3390/md21090461 PMid:37755074 PMCid:PMC10532895
30. Moga MA, Dima L, Balan A, Blidaru A, Dimienescu OG, Podasca C, et al. Are bioactive molecules from seaweeds a novel and challenging option for the prevention of HPV infection and cervical cancer therapy?-A review. International journal of molecular sciences. 2021;22 (2):629. https://doi.org/10.3390/ijms22020629 PMid:33435168 PMCid:PMC7826946
31. Pourakbar L, Moghaddam SS, Enshasy HAE, Sayyed RZ. Antifungal activity of the extract of a macroalgae, Gracilariopsis persica, against four plant pathogenic fungi. Plants. 2021;10 (9):1781. https://doi.org/10.3390/plants10091781 PMid:34579314 PMCid:PMC8467150
32. Soliman AS, Ahmed A, Abdel-Ghafour SE, El-Sheekh MM, Sobhy HM. Antifungal bio-efficacy of the red algae Gracilaria confervoides extracts against three pathogenic fungi of cucumber plant. Middle East J Appl Sci. 2018;8 (3):727-35.
33. Chaïb S, Pistevos JC, Bertrand C, Bonnard I. Allelopathy and allelochemicals from microalgae: An innovative source for bio-herbicidal compounds and biocontrol research. Algal Research. 2021;54:102213. https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102213
34. Becker S, Tebben J, Coffinet S, Wiltshire K, Iversen MH, Harder T, et al. Laminarin is a major molecule in the marine carbon cycle. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2020;117 (12):6599-607. https://doi.org/10.1073/pnas.1917001117 PMid:32170018 PMCid:PMC7104365
35. Ziane SO, Imehli Z, Talibi ZEA, Koraichi SI, Meddich A, El Modafar C. Biocontrol of tomato Verticillium wilt disease by plant growth-promoting bacteria encapsulated in alginate extracted from brown seaweed. International Journal of Biological Macromolecules. 2024;276:133800. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133800 PMid:38996895
36. López-Arellanes ME, López-Pacheco LD, Elizondo-Luevano JH, González-Meza GM. Algae and Cyanobacteria Fatty Acids and Bioactive Metabolites: Natural Antifungal Alternative Against Fusarium sp. Microorganisms. 2025;13 (2):439. https://doi.org/10.3390/microorganisms13020439 PMid:40005804 PMCid:PMC11858688
37. De Corato U, Salimbeni R, De Pretis A, Avella N, Patruno G. Antifungal activity of crude extracts from brown and red seaweeds by a supercritical carbon dioxide technique against fruit postharvest fungal diseases. Postharvest Biology and Technology. 2017;131:16-30. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.04.011
38. El-Nuby AS, Afia AI, Alam EA. In vitro evaluation of the toxicity of different extracts

of some marine algae against root-knot nematode (Meloidogyne incognita). Pakistan Journal of Phytopathology. 2021;33 (1). https://doi.org/10.33866/phytopathol.033.01.0676

39. El Bestawy E. Efficiency of immobilized cyanobacteria in heavy metals removal from industrial effluents. Desalination and Water Treatment. 2019;159:66-78. https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23808

40. Nowruzi B, Porzani SJ. Toxic compounds produced by cyanobacteria belonging to several species of the order Nostocales: A review. Journal of Applied Toxicology. 2021;41 (4):510-48. (persian) https://doi.org/10.1002/jat.4088PMid:33289164

41. Rima M, Chbani A, Roques C, El Garah F, editors. Comparative study of the insecticidal activity of a high green plant (Spinacia oleracea) and a chlorophytae algae (Ulva lactuca) extracts against Drosophila melanogaster fruit fly. Annales pharmaceutiques francaises; 2021: Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.pharma.2020.08.005 PMid:32871133

42. Brêda-Alves F, de Oliveira Fernandes V, Chia MA. Understanding the environmental roles of herbicides on cyanobacteria, cyanotoxins, and cyanoHABs. Aquatic Ecology. 2021;55 (2):347-61. https://doi.org/10.1007/s10452-021-09849-2

43. Bhandari G, Sharma M, Negi S, Gangola S, Bhatt P, Chen S. System biology analysis of endosulfan biodegradation in bacteria and its effect in other living systems: modeling and simulation studies. Journal of Biomolecular Structure and Dynamics. 2022;40 (23):13171-83. https://doi.org/10.1080/07391102.2021.1982773 PMid:34622744

44. López-González D, Ledo D, Cabeiras-Freijanes L, Verdeguer M, Reigosa MJ, Sánchez-Moreiras AM. Phytotoxic activity of the natural compound norharmane on crops, weeds and model plants. Plants. 2020;9 (10):1328. https://doi.org/10.3390/plants9101328 PMid:33050191 PMCid:PMC7600911

45. Jamiołkowska A. Natural compounds as elicitors of plant resistance against diseases and new biocontrol strategies. Agronomy. 2020;10 (2):173. https://doi.org/10.3390/agronomy10020173

46. Chen J, Yang J, Du H, Aslam M, Wang W, Chen W, et al. Laminarin, a major polysaccharide in stramenopiles. Marine Drugs. 2021;19 (10):576. https://doi.org/10.3390/md19100576 PMid:34677475 PMCid:PMC8541152

47. Holken Lorensi G, Soares Oliveira R, Leal AP, Zanatta AP, Moreira de Almeida CG, Barreto YC, et al. Entomotoxic activity of Prasiola crispa (Antarctic algae) in Nauphoeta cinerea cockroaches: identification of Main steroidal compounds. Marine drugs. 2019;17 (10):573. https://doi.org/10.3390/md17100573 PMid:31658661 PMCid:PMC6835979

48. Ruan J, Zhou Y, Zhou M, Yan J, Khurshid M, Weng W, et al. Jasmonic acid signaling pathway in plants. International journal of molecular sciences. 2019;20 (10):2479. https://doi.org/10.3390/ijms20102479 PMid:31137463 PMCid:PMC6566436

49. Brilisauer K, Rapp J, Rath P, Schöllhorn A, Bleul L, Weiß E, et al. Cyanobacterial antimetabolite 7-deoxy-sedoheptulose blocks the shikimate pathway to inhibit the growth of prototrophic organisms. Nature communications. 2019;10 (1):545. https://doi.org/10.1038/s41467-019-08476-8 PMid:30710081 PMCid:PMC6358636

50. Rapp J, Wagner B, Brilisauer K, Forchhammer K. In vivo inhibition of the 3-dehydroquinate synthase by 7-deoxysedoheptulose depends on promiscuous uptake by sugar transporters in cyanobacteria. Frontiers in Microbiology. 2021;12:692986. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.692986 PMid:34248919 PMCid:PMC8261047

51. Nowruzi B, Norouzi R, Norouzi R, Norouzi R. Effects of plasma-activated water on copper, chromium, and nickel bioremediation by Alborzia kermanshahica. Heliyon. 2026;12 (1). (persian) https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e44358