مجله علوم شیلاتی
J F S

iجلبک‌ها و کشاورزی پایدار؛ از تولید فرآورده جلبکی تا کاربرد در مزرعه

هادی غفاری*[*1]، مهدی گلشن[1]

[1] مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

چکیده

خاک یک سامانه زنده و پیچیده است که سلامت آن برای پایداری تولید کشاورزی اهمیت اساسی دارد. کاهش ماده آلی، شوری، کمبود آب، فرسایش و مصرف نامتوازن نهاده‌ها از عواملی هستند که می‌توانند کیفیت خاک و کارایی تولید را کاهش دهند. در این میان، جلبک‌های دریایی، ریزجلبک‌ها و سیانوباکتری‌ها به عنوان منابع زیستی مورد توجه قرار گرفته‌اند. فرآورده‌های جلبکی ممکن است از طریق تأمین بخشی از عناصر غذایی یا در بسیاری از موارد، از طریق تحریک فرایندهای طبیعی گیاه بر رشد ریشه، کارایی مصرف عناصر و تحمل برخی تنش‌های محیطی اثر بگذارند. با این‌حال، هر فرآورده جلبکی الزاماً کود نیست و بسیاری از آنها از نظر کارکرد در گروه زیست‌تحریک‌کننده‌ها قرار می‌گیرند. هدف این مقاله، علاوه بر معرفی ظرفیت‌های جلبک در کشاورزی، ارائه یک نگاه کاربردی به دو گروه اصلی مخاطبان است: تولیدکننده‌ای که قصد دارد فرآورده جلبکی استاندارد تولید کرده و کشاورزانی که می‌خواهند چنین محصولی را به‌درستی انتخاب و مصرف کند. بر این اساس، انتخاب گونه، تولید زیست‌توده، فرآوری، فرمولاسیون، کنترل کیفیت، آزمون اثربخشی و ایمنی در بخش تولید و انتخاب محصول، رعایت برچسب، دوز و روش مصرف و ارزیابی نتیجه در مزرعه نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. شواهد مزرعه‌ای نشان می‌دهد که اثر فرآورده‌های جلبکی به نوع محصول، روش تهیه و کاربرد، خاک و اقلیم وابسته است. بنابراین، این فرآورده‌ها باید به عنوان بخشی از مدیریت تلفیقی تغذیه و سلامت خاک، نه جایگزین همه کودهای اصلی، دیده شوند.

واژگان کلیدی: فرآورده‌های جلبکی، زیست‌تحریک‌کننده‌ها، سلامت خاک، مدیریت تلفیقی، تولید استاندارد، کشاورزی پایدار

* نگارنده مسئول: hadi.ghafarii@gmail.com

مقدمه

خاک فقط بستر نگهداری گیاه نیست؛ سامانه‌ای زنده است که در آن آب، مواد معدنی، ماده آلی، ریشه گیاه و جامعه میکروبی با یکدیگر تعامل دارند. بنابراین، کشاورزی پایدار فقط به افزایش عملکرد یک محصول در یک فصل محدود نمی‌شود بلکه حفظ ظرفیت تولید خاک و افزایش کارایی مصرف آب و عناصر غذایی را نیز دنبال می‌کند. در چنین شرایطی، منابع زیستی و نهاده‌هایی که بتوانند در کنار مدیریت صحیح خاک و تغذیه، کارایی تولید را افزایش دهند، اهمیت پیدا کرده‌اند.

جلبک‌های دریایی و ریزجلبک‌ها دارای ترکیبات متنوعی از جمله پلی‌ساکاریدها، مواد معدنی، پروتئین‌ها، اسیدهای آمینه و ترکیبات زیست‌فعال هستند. شواهد پژوهشی نشان داده‌اند که برخی فرآورده‌های جلبکی می‌توانند رشد گیاه، توسعه ریشه و پاسخ به تنش‌های غیرزیستی را تحت تأثیر قرار دهند (Craigie, 2011; Ali *et al*., 2021).

نحوه تأثیر کود جلبکی بر گیاه و خاک

۱ . تحریک رشد و توسعه ریشه

ریشه سالم سطح تماس بیشتری با خاک ایجاد می‌کند و در جذب آب و عناصر غذایی نقش اساسی دارد. برخی عصاره‌های جلبکی می‌توانند فرایندهای رشد و توسعه ریشه را تحریک کنند. با این‌حال، شدت پاسخ به گونه جلبک، روش استخراج، غلظت مصرف و نوع گیاه وابسته است (Ali *et al*., 2021).

۲ .کمک به استفاده بهتر از عناصر غذایی

کودهای متعارف عمدتاً برای تأمین مستقیم عناصر غذایی به‌کار می‌روند درحالی‌که یک زیست‌تحریک‌کننده ممکن است با اثر بر فرایندهای فیزیولوژیک گیاه، استفاده مؤثرتر از منابع غذایی موجود را تقویت کند. در یک فراتحلیل از مطالعات مزرعه‌ای چین، کاربرد کودهای جلبکی با افزایش متوسط عملکرد همراه بود، اما شدت اثر بر اساس روش تهیه و کاربرد، اقلیم و ویژگی‌های خاک متفاوت بود (Pei *et al*., 2024).

۳ .کمک به تحمل برخی تنش‌ها

برخی فرآورده‌های جلبکی می‌توانند پاسخ‌های دفاعی گیاه را تحریک کنند و در شرایطی مانند خشکی و شوری مورد استفاده قرار گیرند. این اثر به معنای رفع شوری خاک یا جبران کمبود آب نیست بلکه می‌تواند بخشی از برنامه مدیریت تنش باشد (Ali et al., 2021).

٤ .تعامل با محیط ریشه و جامعه میکروبی

ریزجلبک‌ها و سیانوباکتری‌ها علاوه بر تأمین برخی ترکیبات زیستی، می‌توانند از طریق تعامل با خاک و ریزجانداران ساکن محیط ریشه، بر شرایط رشد گیاه اثر بگذارند. این اثرات ممکن است از مسیرهای مختلفی ایجاد شوند؛ از جمله تغییر در فعالیت زیستی خاک، تأثیر بر جمعیت و فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید، مشارکت در چرخه و دسترسی عناصر غذایی و تغییر برخی ویژگی‌های

فیزیکی و شیمیایی محیط ریشه. در نتیجه، کاربرد فرآورده‌های جلبکی می‌تواند به بهبود شرایط زیستی اطراف ریشه و فراهم شدن محیط مناسب‌تر برای جذب عناصر غذایی و رشد گیاه کمک کند.

یکی از جنبه‌های مهم این تعامل، ارتباط ریزجلبک‌ها و سیانوباکتری‌ها با جامعه میکروبی خاک است. این موجودات ممکن است با فراهم کردن ترکیبات آلی و مواد قابل استفاده برای سایر میکروارگانیسم‌ها، بر فعالیت و پویایی جمعیت‌های میکروبی اثر بگذارند. همچنین برخی سیانوباکتری‌ها به دلیل توانایی تثبیت نیتروژن و مشارکت در چرخه عناصر غذایی، از نظر بهبود حاصلخیزی زیستی خاک مورد توجه هستند. بااین‌حال، شدت و جهت این اثرات به گونه جلبکی، نوع خاک، وضعیت مواد آلی، شرایط رطوبتی و دمایی و ترکیب جامعه میکروبی موجود بستگی دارد.

مطالعات Jose و همکاران (۲۰۲٤) نیز نشان می‌دهد که زیست‌توده‌ها و فرآورده‌های تلقیحی مبتنی بر ریزجلبک‌ها در ارتباط با خاک و محیط ریشه، به عنوان گزینه‌هایی برای بهبود شرایط رشد گیاه مورد توجه قرار گرفته‌اند. بااین‌حال، مشاهده اثر مثبت در شرایط آزمایشگاهی یا در یک نوع خاک، لزوماً به معنای تکرار همان نتیجه در سایر خاک‌ها و شرایط مزرعه نیست. از این‌رو، برای انتخاب و کاربرد این فرآورده‌ها باید نوع جلبک، روش تولید و فرآوری، ویژگی‌های خاک و گیاه هدف و نتایج آزمون‌های مزرعه‌ای در نظر گرفته شود . برای بهره‌بردار، نکته مهم این است که اثر فرآورده جلبکی را تنها بر اساس ترکیبات آن ارزیابی نکند بلکه به شواهد مربوط به عملکرد آن در خاک و شرایط کشت مشابه مزرعه خود نیز توجه داشته باشد.

کود جلبکی یا زیست‌تحریک‌کننده

این دو اصطلاح، یعنی «کود» و «زیست‌تحریک‌کننده»، باید بر اساس هدف و کارکرد اصلی محصول از یکدیگر تفکیک شوند و نباید به جای هم به‌کار روند. اگر هدف اصلی محصول تأمین عناصر غذایی موردنیاز گیاه باشد، باید نوع و مقدار این عناصر در ترکیب محصول مشخص شود. اما اگر محصول با هدف تحریک فرایندهای طبیعی گیاه، بهبود رشد ریشه یا افزایش تحمل به تنش‌های محیطی تولید شده باشد، اصطلاح «زیست‌تحریک‌کننده» مناسب‌تر است. بنابراین، تولیدکننده باید پیش از انتخاب عنوان و معرفی محصول، کارکرد و هدف اصلی آن را به‌روشنی تعیین کند (Rouphael & Colla, 2020 ; Ali *et al.,* 2021; El Boukhari *et al.*, 2020) .

از جلبک تا محصول: مسیر فرآوری و تولید

تولید زیست‌توده جلبکی به‌تنهایی به معنای تولید یک نهاده کشاورزی استاندارد نیست. برای تبدیل جلبک به محصول قابل اعتماد، یک زنجیره مشخص از انتخاب ماده اولیه تا آزمون مزرعه‌ای لازم است. روش فرآوری و استخراج می‌تواند ترکیب و فعالیت زیستی محصول نهایی را تغییر دهد (El Boukhari *et al.*, 2020).

۱ . انتخاب و شناسایی گونه: گونه یا زیست‌توده باید به طور روشن شناسایی شود و سابقه ایمنی و کاربرد آن مشخص باشد.

۲ . تولید زیست‌توده: شرایط کشت، کیفیت آب و مواد غذایی و شرایط برداشت باید ثبت و قابل تکرار باشند.

۳ . پایدارسازی و فرآوری: روش خشک‌کردن، نگهداری یا استخراج باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که ویژگی‌های محصول هدف حفظ شود.

٤ . تعیین ترکیبات شاخص: محصول باید بر اساس شاخص‌هایی که برای نوع محصول اهمیت دارند، قابل توصیف و کنترل باشد.

٥ . فرمولاسیون: غلظت، pH، پایداری، سازگاری و شرایط نگهداری باید بررسی شوند.

٦ . کنترل ایمنی: با توجه به ماده اولیه و مسیر تولید، بررسی آلودگی‌های احتمالی (فلزات سنگین و آلودگی میکروبی)، ضروری است.

۷ . تعیین دوز: دوز مصرف نباید صرفاً بر اساس حدس تعیین شود؛ باید در آزمون‌های کنترل‌شده و سپس مزرعه‌ای، اعتبارسنجی شود.

۸ .آزمون اثربخشی: محصول باید در مقایسه با شاهد و با روش مشخص بر محصول هدف ارزیابی شود.

چک‌لیست کوتاه برای تولیدکننده

یک تولیدکننده پیش از عرضه محصول بهتر است بتواند به پرسش‌های ذیل پاسخ دهد:

- جلبک یا ماده اولیه دقیقاً چیست؟
- محصول کود است یا زیست‌تحریک‌کننده ؟
- شاخص یا ماده مؤثره قابل اندازه‌گیری چیست؟
- محصول در چه دوزی و برای چه گیاهانی آزمایش شده است؟
- شرایط نگهداری و پایداری آن چیست؟
- آیا ایمنی و کیفیت آن کنترل شده است؟

کشاورز چگونه فرآورده جلبکی مناسب را انتخاب و مصرف کند

برای کشاورز، مهم‌ترین نکته این است که فرآورده جلبکی را بر اساس «هدف مصرف» انتخاب کند، نه صرفاً بر اساس نام جلبک یا تبلیغات محصول. ابتدا باید مشخص شود که هدف، کمک به رشد، توسعه ریشه، تحمل تنش، تغذیه یا مدیریت خاک است. سپس محصولی انتخاب شود که برای همان هدف و محصول زراعی یا باغی، اطلاعات مصرف و شواهد کافی داشته باشد.

پنج توصیه ساده برای کشاورز

۱ . برچسب محصول را بخوانید و نام ماده اولیه، نوع محصول، غلظت، روش مصرف، دوز و شرایط نگهداری را بررسی کنید.

۲ . دوز توصیه‌شده را رعایت کنید؛ مصرف بیشتر الزاماً به معنی اثر بیشتر نیست.

۳ . فرآورده جلبکی را خودسرانه جایگزین برنامه اصلی تغذیه گیاه نکنید.

٤ . اگر محصول برای محلول‌پاشی، مصرف خاکی یا همراه آبیاری توصیه شده است، همان روش را رعایت کرده و از اختلاط‌های توصیه‌نشده پرهیز کنید.

۵ . نتیجه را با شاخص قابل اندازه‌گیری مانند رشد، عملکرد، کیفیت محصول یا یک ویژگی مشخص خاک، ارزیابی کنید.

یک مثال کاربردی: اگر هدف کاهش اثر تنش شوری باشد

در یک مزرعه شور، فرآورده جلبکی نباید به عنوان درمان مستقیم شوری معرفی شود. نخست باید وضعیت خاک، آب آبیاری و نیاز تغذیه‌ای گیاه بررسی شود. سپس در صورت مناسب بودن محصول، فرآورده جلبکی طبق برچسب و دوز اعتبارسنجی‌شده در کنار برنامه مدیریت شوری استفاده شود. هدف از مصرف می‌تواند کمک به حفظ رشد و تحمل گیاه باشد، نه حذف نمک از خاک. این رویکرد با شواهد موجود درباره نقش زیست‌تحریک‌کننده‌های جلبکی در پاسخ گیاه به تنش سازگار است (Ali *et al*., 2021).

سه اشتباه رایج در مصرف فرآورده‌های جلبکی

- هر محصول جلبکی را کود کامل بدانیم. بسیاری از فرآورده‌ها بیشتر نقش زیست‌تحریک‌کننده دارند.
- فرآورده جلبکی را جایگزین همه کودهای اصلی کنیم. این کار بدون آزمون خاک و بررسی نیاز غذایی گیاه قابل دفاع نیست.
- افزایش دوز را معادل افزایش اثر بدانیم. پاسخ گیاه به دوز می‌تواند غیرخطی باشد و محصول باید در دامنه اعتبارسنجی‌شده مصرف شود.

استانداردسازی: کلید اعتماد کشاورز به کود جلبکی

اگر دو تولیدکننده از دو گونه یا حتی از یک گونه جلبکی با دو روش استخراج متفاوت استفاده کنند، ممکن است، محصولاتی با ترکیب و عملکرد متفاوت تولید شود. به همین دلیل، هویت ماده اولیه، روش فرآوری، ترکیبات شاخص، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، پایداری، ایمنی و دوز مصرف باید قابل کنترل باشند (El Boukhari *et al.*, 2020). برای کشاورز نیز استانداردسازی به معنای امکان مقایسه محصولات و کاهش ریسک تصمیم‌گیری است. محصولی که مشخصات روشن و دستور مصرف معتبر دارد، بهتر از محصولی است که فقط با عنوان کلی «کود جلبکی» عرضه می‌شود.

جلبک: جایگزین کامل یا مکمل کود شیمیایی؟

پاسخ را نمی‌توان با یک بله یا خیر کلی بیان کرد. بسیاری از فرآورده‌های جلبکی برای تحریک فرایندهای طبیعی گیاه طراحی شده‌اند و الزاماً مقدار عناصر غذایی مورد نیاز گیاه را تأمین نمی‌کنند. بنابراین، رویکرد منطقی‌تر، استفاده از آنها در چارچوب

مدیریت تلفیقی تغذیه گیاه، آب و خاک است. شواهد مزرعه‌ای نیز نشان می‌دهد که اثر کودهای جلبکی به شرایط محیطی و روش تهیه و کاربرد وابسته است (Pei *et al.*, 2024).

فرصت‌های پیش‌روی ایران و نقش پژوهش

برای ایران، یکی از مسیرهای مهم می‌تواند شناسایی و ارزیابی گونه‌های بومی، بهینه‌سازی تولید زیست‌توده، توسعه روش‌های استخراج، طراحی فرمولاسیون و انجام آزمون‌های گلخانه‌ای و مزرعه‌ای باشد. در این مسیر، همکاری میان جلبک‌شناسان، زیست‌فناوران، متخصصان خاک و تغذیه گیاه، فیزیولوژیست‌های گیاهی و بخش تولید می‌تواند فاصله میان یک ایده پژوهشی و محصول قابل استفاده را کاهش دهد.

برای مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، این موضوع فرصتی برای توسعه کاربردهای با ارزش افزوده زیست‌توده‌های جلبکی و پیوند دادن دانش جلبک با نیازهای بخش کشاورزی است. با این‌حال، هر محصول باید پیش از توصیه عمومی از نظر اثربخشی، ایمنی، پایداری و اقتصاد تولید و مصرف اعتبارسنجی شود.

جمع‌بندی

جلبک‌ها می‌توانند در تولید نهاده‌های کشاورزی با دو کارکرد متفاوت به‌کار روند: برخی فرآورده‌ها با هدف تأمین عناصر غذایی و برخی دیگر با هدف تحریک فرایندهای طبیعی گیاه تولید می‌شوند. مطالعات، اثرات مثبتی از فرآورده‌های جلبکی بر رشد گیاه، توسعه ریشه، تحمل برخی تنش‌ها و بهبود بعضی ویژگی‌های خاک و محیط ریشه گزارش کرده‌اند. بااین‌حال، میزان اثربخشی آنها به نوع فرآورده، گیاه و شرایط مصرف بستگی دارد و نمی‌توان انتظار پاسخ یکسانی در همه شرایط داشت (Ali *et al.*, 2021; Jose *et al.*, 2024; Pei *et al.*, 2024).

برای انتخاب محصول مناسب، کشاورز ابتدا باید هدف خود را مشخص کند: آیا به دنبال تأمین عناصر غذایی است یا می‌خواهد رشد ریشه، رشد عمومی گیاه یا تحمل آن به تنش‌های محیطی را بهبود دهد؟ سپس باید با توجه به این هدف، نوع محصول، ترکیبات درج‌شده روی برچسب، مقدار و روش مصرف توصیه‌شده را بررسی کند. انتخاب محصول متناسب با نیاز گیاه و شرایط مزرعه و ارزیابی نتیجه مصرف، به تصمیم‌گیری آگاهانه‌تر کمک می‌کند.

به‌علاوه، تولیدکننده باید از انتخاب ماده اولیه و تعریف کارکرد محصول تا فرآوری، استانداردسازی، کنترل ایمنی و آزمون‌های مزرعه‌ای را به صورت هدفمند دنبال کند تا مشخصات و دستور مصرف محصول بر پایه شواهد معتبر تعیین شود.

در این راهنما، از ارائه یک «دوز عمومی» برای همه فرآورده‌های جلبکی خودداری شده است، زیرا مقدار و روش مصرف به نوع ماده اولیه، شیوه فرآوری، فرمولاسیون، نوع گیاه، هدف کاربرد و شرایط مزرعه وابسته است. بنابراین، کشاورز باید دوز مصرف را از برچسب معتبر همان محصول دریافت کند و از تعمیم دستور مصرف یک فرآورده به سایر محصولات بپرهیزد.

منابع

Ali, O., Ramsubhag, A. and Jayaraman, J., 2021. Biostimulant Properties of Seaweed Extracts in Plants: Implications towards Sustainable Crop Production. *Plants*, 10(3), 531. https://doi.org/10.3390/plants10030531.

Craigie, J.S., 2011. Seaweed extract stimuli in plant science and agriculture. *Journal of Applied Phycology*, 23(3), 371–393. https://doi.org/10.1007/s10811-010-9560-4.

El Boukhari, M.E.M., Barakate, M., Bouhia, Y. and Lyamlouli, K., 2020. Trends in Seaweed Extract Based Biostimulants: Manufacturing Process and Beneficial Effect on Soil-Plant Systems. *Plants*, 9(3), 359. https://doi.org/10.3390/plants9030359.

Jose, S., Renuka, N., Ratha, S.K., Kumari, S. and Bux, F., 2024. Microalgal bioinoculants for sustainable agriculture and their interactions with soil biotic and abiotic components: A review. *Pedosphere*, 34(2), 297–314. https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2023.12.002.

Pei, B., Zhang, Y., Liu, T., Cao, J., Ji, H., Hu, Z., Wu, X., Wang, F., Lu, Y. and Chen, N., 2024. Effects of seaweed fertilizer application on crops' yield and quality in field conditions in China—A meta-analysis. *PLOS ONE*, 19(7), e0307517. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0307517.

Rouphael, Y. and Colla, G., 2020. Editorial: Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 11, 40. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040.