مجله ایمنی زیستی

دوره ۱۷، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۳

ISSN 2716-9804 الکترونیکی، ISSN 2717-0632 چاپی

کودهای زیستی: از سلامت خاک تا ایمنی‌زیستی

نوع مقاله: مروری 20.1001.1.27170632.1403.17.3.6.8

اعظم علی‌اصغری وشاره[۱،۲]، علی محمدی[۲،۳*]

۱- استادیارگروه میکروبیولوژی، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران

۲- مرکز تحقیقات میکروبیولوژی کاربردی و بیوتکنولوژی میکروبی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران

۳- دانشیار گروه میکروبیولوژی، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران

a.mohammadi@alzahra.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۵

صفحه ۱۱۹-۱۰۰

چکیده

کودهای زیستی به عنوان یکی از نوآوری‌های زیست‌محیطی، با بهره‌گیری از ترکیبات میکروبی شامل باکتری‌های محرک رشد گیاه و قارچ‌های همزیست، تأثیر بسزایی در بهبود کیفیت خاک و افزایش کارآمدی جذب عناصر غذایی دارند. مطالعات علمی نشان داده‌اند که این کودها در مقایسه با کودهای شیمیایی، به طور قابل‌توجهی تجمع ترکیبات نیتروژنی و فلزات سنگین در محصولات کشاورزی را کاهش می‌دهند. مکانیسم‌های عملکرد کودهای زیستی شامل فعالیت‌هایی نظیر تثبیت نیتروژن، انحلال فسفات‌های معدنی و تولید ترکیبات مؤثر بر تحریک رشد گیاه است. پژوهش‌ها همچنین به نقش این کودها در افزایش تنوع میکروبی خاک و بهبود ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آن، نظیر ظرفیت تبادل کاتیونی و محتوای مواد آلی، اشاره دارند. مقاله حاضر ضمن معرفی انواع کودهای زیستی به بررسی اثرات زیست‌محیطی این فناوری پرداخته و پیشنهادهایی برای بهینه‌سازی کاربرد آن به منظور توسعه کشاورزی پایدار و حفاظت زیستی ارائه می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهند که استفاده از کودهای زیستی نه تنها از ورود آلاینده‌ها به زنجیره غذایی جلوگیری می‌کند بلکه سلامت اکوسیستم‌های کشاورزی را نیز تضمین می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: تنوع زیستی، حفاظت زیستی، کشاورزی پایدار، میکروارگانیسم‌های مفید

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.6.8]

مقدمه

در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰، استفاده گسترده از کودهای شیمیایی به منظور افزایش حاصلخیزی خاک موجب وقوع انقلاب سبز و افزایش تولیدات غذایی در سطح جهانی شد، اما پیامدهای نامطلوبی بر محیط زیست بر جای گذاشت. امروزه مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی که طی سال‌ها موجب آلودگی تدریجی خاک و منابع آبی شده‌اند، به یکی از چالش‌های مهم بخش کشاورزی در مسیر پایداری تبدیل شده است (Ataei et al. 2022). کشاورزی جهانی در حال حاضر عمدتاً به استفاده از آفت‌کش‌ها و کودهای شیمیایی متکی است، اما کاربرد گسترده این مواد مخاطرات قابل توجهی برای محیط زیست و سلامت انسان ایجاد می‌کند. آفت‌کش‌های شیمیایی با اثرات سمی بر سیستم ایمنی، اختلالات تنفسی، تغییرات در سیستم تولیدمثل، عدم تعادل هورمونی و افزایش خطر سرطان‌زایی مرتبط شناخته شده‌اند. تولید کودهای شیمیایی، که به عنوان کودهای معدنی نیز شناخته می شوند، فرآیندی بسیار پرانرژی است و مسئول ۲ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای در سطح جهانی محسوب می‌شود (Rana et al. 2019; Verardi et al. 2025). علاوه بر این، کشاورزی مبتنی بر مواد شیمیایی تأثیر نامطلوبی بر جامعه میکروبی مفید خاک داشته و به طور قابل توجهی موجب کاهش تنوع زیستی میکروبی شده است (Vassilev et al. 2015). اگرچه این کودها در کشاورزی مدرن به دلیل توانایی در تأمین عناصر غذایی اصلی (نیتروژن، فسفر و پتاسیم) نقش محوری دارند، اما استفاده بیش از حد یا نادرست از آنها با پیامدهای منفی زیست‌محیطی متعددی همراه بوده است (Azimzadeh and Mohammadzadeh, 2023). از جمله این اثرات می‌توان به اسیدی شدن خاک، اختلال در تعادل یونی، مهار فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید، تجمع مواد مضر، شور شدن خاک، آلودگی آب‌های زیرزمینی ناشی از آبشویی عناصر غذایی و تخریب خاک اشاره کرد (Van Der Putten et al. 2013; Verardi et al. 2025).

بنابراین، این مواد شیمیایی تأثیرات عمیقی بر نسل‌های آینده خواهند داشت. در این راستا، رویکردهای سازگار با محیط زیست در حال گسترش هستند که در میان آن‌ها، کودهای زیستی نقش کلیدی در کشاورزی پایدار ایفا می‌کنند (Kumar et al. 2018). کودهای زیستی (Biofertilizer) شامل میکروارگانیسم‌هایی هستند که با افزایش جذب عناصر غذایی توسط گیاه میزبان، رشد گیاهان را بهبود می‌بخشند. این میکروارگانیسم‌ها هنگامی که به خاک، بذر یا گیاه اضافه می‌شوند، در ناحیه ریزوسفر یا درون بافت‌های گیاه استقرار می‌یابند (Daniel et al. 2022). تعدادی از میکروارگانیسم‌ها از جمله

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.6.8]

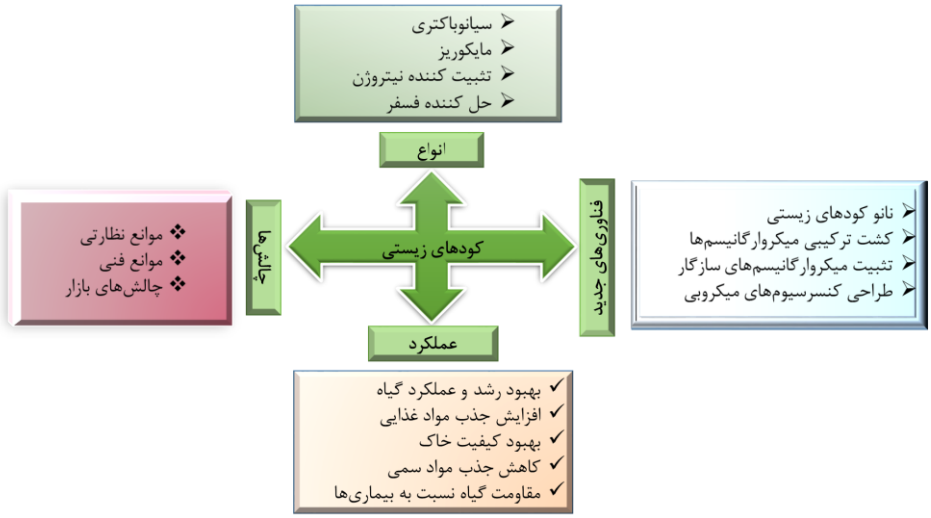
باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن خاک و سیانوباکتری‌ها، باکتری‌های حل‌کننده فسفات، کپک‌ها و قارچ‌ها به طور متداول به عنوان کودهای زیستی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به همین ترتیب، میکروارگانیسم‌های تولیدکننده هورمون‌های گیاهی نیز در تولید این کودها به کار می‌روند. این موجودات با تولید ترکیبات محرک رشد مانند اسید ایندول استیک، اسیدهای آمینه و ویتامین‌ها، همزمان به تغذیه گیاه کمک کرده، حاصلخیزی و بهره‌وری خاک را بهبود بخشیده و در عین حال عملکرد محصول را حفظ می‌کنند (Daniel et al. 2022). با این حال، استانداردسازی، کنترل کیفیت و چالش‌های مقرراتی از موانع اصلی در پذیرش گسترده کودهای زیستی محسوب می‌شوند. رفع این موانع برای بهره‌برداری کامل از پتانسیل کودهای زیستی در کشاورزی جهانی حیاتی است (Nawaz et al. 2025).

نخستین کودهای زیستی مورد استفاده در ایران مایه تلقیح‌های ریزوبیومی سویا بودند که در اوایل دهه ۱۳۴۰ از سوی شرکت آمریکایی نیتراژین به کشور وارد شده و همزمان با توسعه کشت سویا در ایران به کار گرفته می‌شدند. تولید داخلی این کودها از سال ۱۳۷۹ آغاز شد و بدین ترتیب، واردات آن‌ها خاتمه یافت. در سال‌های بعد، واحدهای تولیدی داخلی اقدام به توسعه و تولید انواع مختلف کودهای زیستی کردند. این تولیدات شامل کودهای میکروبی فسفاته گرانوله، مایه تلقیح باکتری‌های تیوباسیلوس و کودهایی با ترکیبات حاوی باکتری‌های تحریک‌کننده رشد گیاه نظیر ازتوباکتر، آزوسپریلوم، سودوموناس‌های فلورسنت، باسیلوس‌ها و همچنین باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد بودند (Rahmani et al. 2012).

هدف از این مطالعه مروری، تبیین جایگاه و نقش کودهای زیستی در کشاورزی مدرن و تحلیل چالش‌ها و فرصت‌های پیش‌رو در به‌کارگیری این فناوری‌ها با تأکید بر ابعاد زیست‌محیطی و ایمنی زیستی است. به‌منظور ارائه یک نمای سازمان‌دهی شده از این حوزه مطالعاتی، اجزا، مزایا، فناوری‌های نوین و چالش‌های اصلی آن در شکل شماره ۱ نمایش داده شده است.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.6.8]



شکل ۱- انواع، مزایا، فناوری‌های نوین و چالش‌های اساسی در توسعه و کاربرد کودهای زیستی

کودهای زیستی

کود زیستی به عنوان ماده‌ای که حاوی میکروارگانیسم‌های زنده است و هنگامی که به بذر، سطوح گیاه یا خاک اعمال می‌شود، درون ریزوسفر یا گیاه استقرار یافته و با افزایش تأمین یا دسترسی به مواد مغذی اولیه برای گیاه میزبان، موجب رشد آن می‌شود، تعریف شده است (Vessey, 2003). این میکروارگانیسم‌ها عموماً با عنوان میکروب‌های تقویت‌کننده رشد گیاه (Plant-growth-promoting microbes, PGPM) باکتری‌های تقویت‌کننده رشد گیاه (Plant-growth-promoting bacteria, PGPB) یا ریزوباکتری‌های تقویت‌کننده رشد گیاه (Plant-growth promoting rhizobacteria, PGPR) شناخته می‌شوند. تاریخچه تجاری کودهای زیستی در سال ۱۸۹۵ با تولید نیتراژین (حاوی سویه‌های ریزوبیوم تثبیت‌کننده نیتروژن) آغاز شد. در دهه ۱۹۵۰، باکتری‌های حل‌کننده فسفر به عنوان کود زیستی مورد استفاده قرار گرفتند تا فسفر موجود در خاک را به فرم قابل جذب برای گیاهان تبدیل کنند. تاکنون، انواع قارچ‌ها، جلبک‌ها و باکتری‌ها گزارش شده‌اند که از طریق مکانیسم‌های گوناگون، اثر تقویت‌کننده رشد بر گیاهان دارند (Zhao et al. 2024).

کودهای زیستی پتانسیل بالایی به عنوان منابع تجدیدپذیر و سازگار با محیط زیست از خود نشان می‌دهند. میکروارگانیسم‌های مورد استفاده در این کودها شامل طیف وسیعی از باکتری‌ها از قبیل باکتری‌های فتوسنتزکننده و تثبیت کننده نیتروژن، همچنین قارچ‌هایی مانند تریکودرما و انواع مخمرها می‌باشند (Bhattacharjee and Dey, 2014). استفاده از کودهای زیستی در کشاورزی می‌تواند به‌طور مؤثری منجر به افزایش عملکرد محصول و کاهش مصرف کودهای شیمیایی شود.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.6.8]

بر اساس مطالعات انجام شده، کاربرد تلفیقی کودهای زیستی و شیمیایی می‌تواند تا ۴۰ درصد باعث بهبود عملکرد محصول شده و حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد از نیاز به کودهای شیمیایی را کاهش دهد (Pal et al. 2015). اهمیت میکروارگانیسم‌های موجود در کودهای زیستی در توانایی آنها برای تولید نیتروژن، پتاسیم، فسفر و سایر مواد مغذی مورد نیاز گیاه نهفته است. این میکروارگانیسم‌ها را می‌توان به روش‌های مختلفی مانند محلول‌پاشی برگی (مشابه کودهای شیمیایی)، اختلاط مستقیم با خاک به عنوان مایه تلقیح، یا حتی به عنوان پوشش بذر مورد استفاده قرار داد. علاوه بر این، بسیاری از کودهای زیستی قادر به ترشح هورمون‌های رشد گیاهی مانند اکسین، سیتوکینین و بیوتین، و همچنین ویتامین‌های ضروری برای رشد گیاه هستند. این میکروارگانیسم‌ها از طریق ترشح آنتی‌بیوتیک‌های موثر در برابر عوامل بیماری‌زای گیاهی، نقش محافظتی برای گیاه ایفا می‌کنند. همچنین آن‌ها قادرند گیاه را در برابر تنش‌های محیطی مانند شوری و خشکی محافظت نمایند. میکروارگانیسم‌های موجود در کودهای زیستی با افزایش مقاومت گیاه در برابر عوامل تنش‌زای زیستی و غیرزیستی، موجب بهبود عملکرد محصولات کشاورزی می‌شوند. این ویژگی‌ها، کودهای زیستی را به گزینه‌ای کارآمد و سازگار با محیط زیست در کشاورزی پایدار تبدیل کرده است (Ataei et al. 2022).

نتایج یک مطالعه نشان داد که کاربرد پایدار کودهای زیستی به‌ویژه در سطوح بالا، می‌تواند بیماری پژمردگی فوزاریومی موز را به‌طور مؤثری کنترل نماید. تغییرات معنادار در جوامع میکروبی خاک، از جمله افزایش فراوانی *Firmicutes* و *Bacillus* و کاهش عوامل بیماری‌زای قارچی مانند *Fusarium*، همراه با بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک (افزایش pH، نیتروژن کل، کربن و فسفر قابل دسترس) از مکانیسم‌های احتمالی این اثرگذاری بودند. این یافته‌ها حاکی از آن است که کودهای زیستی می‌توانند از طریق تعدیل ترکیب جامعه میکروبی خاک و بهبود شرایط شیمیایی آن، به عنوان یک راهکار پایدار در مدیریت بیماری‌های گیاهی مورد استفاده قرار گیرند (Shen et al. 2015).

در مطالعه‌ای با بررسی تأثیر کاربرد توأم کود زیستی حاوی *Pseudomonas putida* سویه P3-57 و سطوح مختلف کود شیمیایی NPK (۱۰۰٪ و ۷۰٪ مقدار توصیه شده) بر خیار در شرایط گلخانه تجاری، مشخص شد که کاهش ۳۰٪ کود شیمیایی موجب کاهش معنی‌دار عملکرد و نمره پذیرش کلی میوه در ارزیابی حسی گردید. اگرچه تیمارهای P3-57 و کود زیستی تجاری بارور (Barvar NPK®) تأثیر معنی‌داری بر جبران

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.6.8]

کاهش عملکرد نداشتند، اما در شرایط مصرف ٪۷۰ کود شیمیایی، با بهبود برخی صفات حسی، کیفیت میوه را افزایش دادند. جالب‌تر آنکه تیمار P3-57 همراه با ٪۱۰۰ کود شیمیایی، بالاترین نمره پذیرش کلی را (ناشی از بهبود عطر، طعم و آبمیوه) و همچنین کمترین سطوح نیترات و فلزات سنگین را دارا بود. این تیمار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز و بیان ژن‌های مرتبط با ایمنی گیاه را به‌طور معنی‌داری افزایش داد (Kafi et al. 2021).

در پژوهشی با هدف جایگزینی قارچ‌کش‌های شیمیایی آلاینده، توانمندی اکتینومیست‌های موجود در محدوده ریشه به‌عنوان عوامل کنترل زیستی در گلخانه‌های تجاری مورد بررسی قرار گرفت. از میان جدایه‌های منتخب، سویه *Amycolatopsis* 1119 موفق شد به‌طور کامل از وقوع مرگ گیاهچه خیار جلوگیری کند. همچنین، در شرایط گلخانه‌ای تجاری، این سویه موجب افزایش ۲۰ درصدی عملکرد میوه و کاهش ۷۰ درصدی نیترات آن شد. بررسی مکانیسم عمل نشان داد که این سویه قادر است بدون نیاز به حضور پاتوژن، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش داده و بیان ژن‌های مرتبط با مقاومت القایی و اکتسابی سیستمیک را در گیاه خیار فعال کند. نتایج به دست آمده، سویه مذکور را به‌عنوان گزینه‌ای بسیار امیدبخش برای تولید کودهای زیستی ارتقاءدهنده عملکرد و تقویت‌کننده سیستم دفاعی گیاه در شرایط اجرایی معرفی می‌کند (Alipour Kafi et al. 2021).

کودهای زیستی از نظر ساختار و عملکرد با کودهای شیمیایی و آلی تفاوت دارند، چرا که این کودها مستقیماً مواد مغذی به محصولات زراعی عرضه نمی‌کنند، بلکه حاوی کشت‌هایی از باکتری‌ها و قارچ‌های ویژه بوده و از ساختاری نسبتاً ساده و هزینه راه‌اندازی پایینی برخوردارند. مطالعات نشان می‌دهد کودهای زیستی در مقایسه با کودهای شیمیایی، نرخ رشد بالاتر و توسعه عملکرد بهتری در تولید برنج ایجاد می‌کنند (Azimzadeh and Mohammadzadeh, 2023). بنابراین، این نوع کودها می‌توانند به عنوان راهکاری مؤثر برای تأمین غذای جمعیت رو به رشد جهانی مورد استفاده قرار گیرند، به ویژه در شرایطی که کشاورزی با تنش‌ها و تغییرات محیطی متعددی مواجه است (Suhag, 2016).

استفاده از سیانوباکتری‌ها به عنوان کود زیستی

سیانوباکترها یا جلبک های سبز آبی میکروارگانیسم‌های تثبیت کننده نیتروژن فوتوسنتتیک هستند که توانایی سازگاری با انواع محیط‌ها و خاک های مختلف را دارند (Sahu et al. 2012). سیانوباکتری‌ها از جمله

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.6.8]

میکروارگانیسم‌های امیدبخش برای توسعه پایدار کشاورزی محسوب می‌شوند. سیانوباکتری‌های دیازوتروف به عنوان تولیدکنندگان کودهای زیستی سازگار با محیط زیست، در دسترس و کم‌هزینه هستند. این میکروارگانیسم‌ها قادرند کمبود نیتروژن گیاهان را برطرف کنند، هوادهی خاک را بهبود بخشند، ظرفیت نگهداری آب را افزایش دهند و ویتامین B12 به خاک اضافه نمایند. کارآمدترین سیانوباکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن شامل گونه‌های *Nostoc linkia*، *Anabaena variabilis*، *Aulosira fertilisima*، *Calothrix* sp.، *Tolypothrix* sp. و *Scytonema* sp. هستند که در مناطق کشت برنج یافت می‌شوند. گونه‌های *Anabaena* و *Nostoc* که بر سطح خاک و سنگ‌ها زندگی می‌کنند، قادر به تثبیت ۲۰ تا ۲۵ کیلوگرم نیتروژن اتمسفری در هکتار هستند. *Anabaena* می‌تواند تا ۶۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار در هر فصل زراعی تثبیت کند و همچنین خاک را با مواد آلی غنی سازد (Chittora et al. 2020). سیانوباکتری‌ها به دلیل دارا بودن مزایای متعدد می‌توانند به عنوان کود زیستی بالقوه مورد استفاده قرار گیرند. این میکروارگانیسم‌ها قادرند تخلخل خاک را افزایش دهند، شوری خاک را کاهش دهند، مواد چسبنده مانند اگزوپلی‌ساکاریدها را تولید کنند، مولکول‌های زیست‌فعال ثانویه، اسیدهای آمینه، ویتامین‌ها و فیتوهورمون‌هایی مانند اکسین‌ها را سنتز نمایند و ظرفیت نگهداری آب خاک را بهبود بخشند. علاوه بر این، سیانوباکتری‌ها از طریق مکانیسم‌های مختلف در پالایش زیستی مشارکت داشته و بدین ترتیب نقش دوگانه ایفا می‌کنند (Bibi et al. 2024).

در مطالعه‌ای بر روی گیاه نخود، دو گونه سیانوباکتریایی *Nostoc entophytum* و *Oscillatoria angustissima* به عنوان جایگزین کود شیمیایی ارزیابی شدند. نتایج نشان داد تلقیح خاک با هر یک از گونه‌ها یا ترکیب آن‌ها موجب افزایش معنادار درصد جوانه‌زنی، شاخص‌های رشدی و غلظت رنگدانه‌های فتوسنتزی نخود گردید. کاربرد تلفیقی (یک گونه سیانوباکتری همراه با نصف دوز توصیه‌شده کود شیمیایی) به عنوان مؤثرترین تیمار، ضمن افزایش محتوای پروتئین و کربوهیدرات دانه‌ها، عملکردی برتر نسبت به مصرف کامل کود شیمیایی نشان داد و امکان کاهش ۵۰ درصدی مصرف کودهای شیمیایی را فراهم نمود. تغییرات پروفیل پروتئینی دانه‌ها تحت تیمارهای مختلف، تفاوت‌های عملکردی را تأیید کرد. بررسی مکانیسمی نشان داد *N. entophytum* با برتری در تثبیت نیتروژن، تولید اگزوپلی‌ساکاریدها و ترشح هورمون‌های اکسین/سیتوکینین، در حالی که *O. angustissima* دارای محتوای جیبرلین بالاتری بود. این یافته‌ها

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.6.8]

گویای پتانسیل کاربردی سیانوباکتری‌ها در کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی از طریق سازوکارهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی اختصاصی است (Osman et al. 2010).

کودهای زیستی مبتنی بر سیانوباکتری‌ها توجه قابل ملاحظه‌ای در تولید محصولات کشاورزی به خود جلب کرده‌اند. امروزه فرمولاسیون‌های متنوعی در بازار موجود بوده و شرکت‌های متعدد کشاورزی-شیمیایی، عصاره‌ها یا مایه‌های تلقیح سیانوباکتریایی را در محصولات نوآورانه کود زیستی به کار می‌گیرند. کاربرد سیانوباکتری‌ها به عنوان کود زیستی برای رشد گیاهان عمدتاً از دو روش تلقیح مستقیم در خاک به صورت زیست‌توده تازه یا خشک‌شده و استفاده از فرآورده‌های استخراجی (مانند عصاره خام، فرکشن‌ها یا فیلترات‌ها) محقق می‌شود. همچنین امکان بهره‌گیری از این میکروارگانیسم‌ها در اصلاح بذر وجود دارد (Hakkoum et al. 2025).

کودهای زیستی تثبیت کننده نیتروژن

نیتروژن یکی از محدودکننده‌ترین عناصر غذایی برای رشد گیاهان محسوب می‌شود. از آنجا که گیاهان قادر به استفاده مستقیم از نیتروژن مولکولی موجود در اتمسفر نیستند، برای رشد مطلوب نیازمند نیتروژن تثبیت‌شده از منابع خارجی هستند. این عنصر ابتدا باید به فرم آمونیاک احیا شود تا برای گیاهان قابل جذب باشد. در حال حاضر، کودهای شیمیایی نیتروژنه به‌عنوان منبع اصلی تأمین نیتروژن مورد نیاز گیاهان مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، تولید و مصرف این کودها چالش‌های زیست‌محیطی متعددی به‌همراه دارد، از جمله انتشار گازهای گلخانه‌ای در فرآیند تولید و آلودگی منابع آب‌های زیرزمینی و سطحی در اثر شستشوی نیترات‌ها. همچنین، تولید کودهای شیمیایی به مصرف منابع فسیلی غیرقابل تجدید مانند نفت و زغال‌سنگ وابسته است. کاربرد گسترده و مداوم این کودها در کشاورزی تجاری، علاوه بر کاهش حاصلخیزی خاک، پایداری سیستم‌های کشاورزی را نیز تهدید می‌کند. این چالش‌ها، ضرورت یافتن راهکارهای جایگزین و پایدار برای تأمین نیتروژن مورد نیاز گیاهان را بیش از پیش آشکار می‌سازد. در این میان، تثبیت بیولوژیکی نیتروژن به‌عنوان یک راه‌حل امیدوارکننده مطرح می‌شود. این فرآیند که طی آن نیتروژن اتمسفری به آمونیاک تبدیل می‌شود، به‌صورت انحصاری توسط گروه‌های محدودی از پروکاریوت‌ها و با کمک آنزیم نیتروژناز انجام می‌گیرد. میکروارگانیسم‌های دارای این قابلیت می‌توانند به‌عنوان کودهای زیستی کارآمد مورد استفاده قرار گیرند و جایگزینی پایدار برای کودهای شیمیایی باشند (Gupta et al. 2012).

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.6.8]

باکتری *Azospirillum* یک باکتری تثبیت کننده نیتروژن است که می‌تواند یک رابطه همزیستی با گیاهان غیربقولات ایجاد کند. یک کود زیستی تجاری که حاوی این باکتری است، با تولید مواد ضد قارچی و ضد میکروبی و همچنین افزایش سنتز هورمون‌های گیاهی به بهبود رشد و عملکرد گیاه کمک می‌کند. علاوه بر این، مقاومت سیستمیک القایی را در گیاهان مختلف افزایش می‌دهد (Raffi and Charyulu, 2021). باکتری *Rhizobium* یک باکتری تثبیت کننده نیتروژن است که یک رابطه همزیستی با گیاهان خانواده بقولات ایجاد می‌کند. کود زیستی حاوی این باکتری به تثبیت نیتروژن اتمسفر برای استفاده توسط گیاهان کمک می‌کند. باکتری *Azotobacter* یک باکتری تثبیت کننده نیتروژن آزاد است که قادر به تثبیت نیتروژن اتمسفر و تبدیل آن به شکلی است که گیاهان می‌توانند از آن استفاده کنند. کود زیستی حاوی این باکتری با کمک به حل شدن فسفات‌ها، افزایش تولید هورمون‌های گیاهی و سرکوب پاتوژن‌های گیاهی و تخریب آفت‌کش‌ها، به بهبود حاصلخیزی خاک و تقویت رشد گیاه کمک می‌کند (Das, 2019).

کود زیستی حل کننده فسفر

فسفر یک درشت مغذی مورد نیاز برای عملکرد مناسب گیاهان است. از آنجایی که فسفر نقش حیاتی در هر جنبه ای از رشد و نمو گیاه دارد، کمبود آن می‌تواند رشد و نمو گیاه را کاهش دهد. اگرچه خاک دارای فسفر کل به شکل ترکیبات آلی و معدنی است، اما بیشتر آن‌ها غیرفعال می‌مانند و بنابراین در دسترس گیاهان نیستند. میکروارگانیسم‌های حل کننده فسفات گروهی از میکروارگانیسم‌های مفید هستند که قادر به هیدرولیز ترکیبات فسفر نامحلول آلی و معدنی به فرم محلول فسفر هستند که به راحتی توسط گیاهان قابل جذب هستند. کودهای زیستی حل کننده فسفات یک رویکرد سازگار با محیط زیست و از نظر اقتصادی مناسب برای غلبه بر کمبود فسفر و جذب بعدی آن توسط گیاهان ارائه می‌دهد (Kalayu, 2019).

کود زیستی مایکوریز

مایکوریزا نوعی همزیستی متقابل بین قارچ‌ها و گیاهان آوندی است که در آن قارچ‌ها به صورت درون‌سلولی به عنوان مایکوریز آربوسکولار (Arbuscular Mycorrhiza, AMF) با تشکیل ساختارهای آربوسکول، یا به صورت برون‌سلولی به عنوان اکتومایکوریز (Ectomycorrhiza) با ایجاد شبکه‌های هیفایی در اطراف ریشه، گیاه را کلونیزه می‌کنند (Sadhana, 2014). قارچ‌های میکوریز آربوسکولار می‌توانند در تولید کودهای زیستی به‌کار روند که با بهبود کیفیت خاک، تقاضا

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.6.8]

برای کودهای شیمیایی را در محصولات غذایی تحت تنش‌های غیرزیستی کاهش می‌دهند. بنابراین، کودهای غنی‌شده با AMF را می‌توان به‌عنوان کودهای زیستی هوشمند در نظر گرفت که موجب افزایش رشد زیست‌توده در محصولات غذایی تحت شرایط تنش‌زای ناشی از تغییرات آب و هوایی می‌شوند. هیف‌های این قارچ‌ها توانایی نفوذ به منافذ بسیار ریز سلول‌های ریشه را دارند و می‌توانند کربوهیدرات‌ها و مواد معدنی را درون ریشه مبادله کنند. قارچ‌های AMF با افزایش سطح جذب ریشه، کارایی گیاهان در جذب آب و مواد مغذی مانند نیتروژن، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، روی و مس را به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد. این قارچ‌ها به ویژه در جذب و انتقال فسفات به گیاهان تخصص دارند (Alam and Roy, 2024). مطالعات نشان داده‌اند که قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در کاهش جذب عناصر سمی مانند آرسنیک توسط گیاهان نقش مؤثری دارند. در یک مطالعه مشخص شد که میزان آرسنیک در دانه‌ها با کاربرد روش‌های مختلف اصلاح خاک به طور متوسط ۴۵ درصد کاهش یافت. به‌طور خاص، غلظت آرسنیک در دانه‌ها در تیمارهای قارچ میکوریز آربوسکولار ۵۷ درصد و در تیمارهای سلنیوم ۶۰ درصد کاهش نشان داد (Alam et al. 2022).

جدول ۱- مطالعات منتخب در زمینه تأثیر کودهای زیستی میکروبی بر رشد و عملکرد گیاهان (۲۰۲۵-۲۰۲۰)

میکروارگانیسم	روش کاربرد	گیاه	تاثیر	منبع
Chorococcum sp.	تیمار بذر	خیار، گوجه‌فرنگی، فلفل، ماش	افزایش پروتئین کل، لیپیدها، کربوهیدرات؛ ترکیبات فنلی	(Deepika and Mubarakali, 2020)
Asterarcys quadricellulare	اسپری برگ	سیب‌زمینی	افزایش عملکرد، کلروفیل، اسید آمینه، قند و فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز.	(Cordeiro et al. 2022)
Chlorella sp.; *Scenedes mus* sp.; *Synechocystis* sp.; *L. platensis*	خاک/خیساندن ریشه	گوجه‌فرنگی	افزایش رنگدانه‌های کلروفیل و اکسیژن محلول	(Supraja et al. 2020)
Bacillus subtilis	تیمار خاک	کلم	بهبود عملکرد گیاه و تنوع میکروبی خاک	(Ng et al. 2025)
Bacillus velezensis	شرایط آزمایشگاهی	سویا	حل کردن فسفات‌ها از طریق مسیر تولید آنزیم فسفاتاز	(Vitorino et al. 2024)
Bacillus pumilus	تیمار بذر با محلول اسپور	برنج	بهبود رشد اولیه در مخزن؛ افزایش جذب نیتروژن و رشد رویشی در مزرعه، افزایش عملکرد و اجزای	(Agake et al. 2022)

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.6.8]

	آن، افزایش عملکرد و کیفیت گیاه			
Glomus، *Claroideoglomus*، *Aculospora*	اختلاط کود زیستی با خاک	برنج	افزایش کلونیزاسیون ریشه توسط قارچ و تراکم اسپور در طول زمان. بهبود پارامترهای رشدی و خصوصیات مؤثر بر عملکرد، افزایش رشد، بهره‌وری و عملکرد گیاه برنج.	(Kalamulla et al. 2022)
Azospirillum sp. و *Azotobacter* sp.	تیمار خاک	گوجه گیلاسی	کاهش اثرات منفی تنش شوری و بهبود معنی‌دار صفات کمی و کیفی: افزایش ارتفاع گیاه، قطر ساقه، سطح برگ، طول ریشه، وزن تر ریشه، عملکرد، محتوای کلروفیل برگ	(El-Beltagi et al. 2022)
Azospirillum sp. B510	مایه‌زنی (کشت مزرعه‌ای)	برنج	افزایش معنادار رشد و عملکرد برنج؛ ایجاد صفات مطلوب مانند ارتفاع کوتاه‌تر و ظرفیت پنجه‌زنی بالاتر؛ تبدیل شدن به باکتری غالب در ریزوسفر و کمک به حفظ حاصلخیزی خاک	(Sarkodee-Addo et al. 2021)
Trichoderma guizhouense NJAU4742	اضافه شدن به کود آلی و اصلاح خاک	کلم	افزایش زیست‌توده گیاه کلم، بهبود رشد گیاه	(Wang et al. 2023)

فناوری‌های جدید در تولید کودهای زیستی

اگرچه کودهای زیستی مزایای متعددی دارند، یک چالش اساسی در پایین بودن بازده جذب آنها توسط گیاهان نهفته است. مطالعات نشان می‌دهد بخش قابل توجهی از این کودها یا به فرم غیرقابل جذب در خاک باقی می‌ماند یا قبل از رسیدن به ریشه گیاه، در محیط پراکنده می‌شود. این محدودیت منجر به کاهش کارایی و افزایش هزینه‌های مصرف می‌گردد. فناوری نانو با ارائه نانوکودهای زیستی راه‌حل نویدبخشی برای این چالش ارائه کرده است. این نسل جدید از کودها دارای مزایای متعددی از جمله افزایش مقاومت گیاهان در برابر تنش‌های غیرزیستی، بهبود ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاهان، ارتقای عملکرد بیوشیمیایی و متابولیکی گیاه، اصلاح ساختار و ترکیب خاک در بلندمدت می‌باشند. این ویژگی‌ها، نانوکودهای زیستی را به

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.6.8]

گزینه‌ای ایده‌آل برای کشاورزی پایدار تبدیل کرده است که همزمان هم بهره‌وری را افزایش می‌دهد و هم اثرات مخرب زیست‌محیطی را به حداقل می‌رساند (Zafar et al. 2024). نانو کودهای زیستی از نانوذرات (طلا، نقره، اکسید آهن و روی) یا نانوکامپوزیت‌ها (نانوفرم‌های ترکیبات آلی) تشکیل شده‌اند (Kaur et al. 2024).

نانوکودها حاوی مواد مغذی هستند که در ساختارهای کپسوله‌شده یا پوشش‌دار با نانومواد قرار گرفته‌اند و عموماً دارای اندازه ذراتی بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر می‌باشند. یکی از ویژگی‌های کلیدی نانوکودها، قابلیت آن‌ها در آزادسازی کنترل‌شده و تدریجی مواد مغذی است (Ghasemalipour Ghasemi, 2023). اندازه نانوذرات نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش کارایی و جذب بهینه آن‌ها توسط گیاهان دارد. برای دستیابی به پاسخ مطلوب گیاهی، فرمولاسیون مناسب انواع مواد مغذی ضروری است. نانوکودها از ویژگی‌های حیاتی برخوردارند که در میان آن‌ها، سطح تماس گسترده نانوذرات نقش اساسی در حفظ و نگهداری مؤثر مواد مغذی ایفا می‌کند. همچنین، این سیستم‌ها امکان آزادسازی کنترل‌شده و تدریجی مواد مغذی را فراهم می‌کنند که با الگوی نیاز تغذیه‌ای گیاهان سازگاری کامل دارد (Patel et al. 2023).

رویکردهای پیشرفته در فناوری کودهای زیستی میکروبی بر کشت تلفیقی و تثبیت مشترک میکروارگانیسم‌های سازگار تمرکز دارند. کشت ترکیبی دو یا چند میکروارگانیسم مختلف، به صورت آزاد یا تثبیت شده، روش مؤثری برای افزایش تولید ترکیبات موجود و حتی کشف ترکیبات ناشناخته‌ای است که معمولاً در کشت‌های خالص مشاهده نمی‌شوند. توسعه سیستم‌های مصنوعی میکروبی جهت بررسی تعاملات در محیط خاک و گیاه می‌تواند به طراحی کنسرسیوم‌های میکروبی با ویژگی‌های عملکردی متنوع منجر شود که هدف آن احیا، حفظ و یا ارتقای حاصلخیزی خاک است. فرآیندهای تخمیر حالت جامد بستری مناسب برای کشت ترکیبی میکروارگانیسم‌های سازگار فراهم می‌کنند که امکان مطالعه تعاملات، تغییرات در پروفایل متابولیتی و تولید محصولات جدید را به وجود می‌آورد. همچنین، سیستم‌های تخمیر حالت جامد و سلول‌های تثبیت‌شده می‌توانند برای ارزیابی تحمل میکروارگانیسم‌های مفید گیاهی در برابر شرایط تنش‌زا و فعالیت متابولیکی آنها مورد استفاده قرار گیرند. یافته‌های این مطالعات می‌تواند منجر به تولید کودهای زیستی شود که با شرایط سخت مانند خشکی، دماهای بالا یا پایین، غلظت زیاد نمک و مقادیر غیرمعمول pH سازگار باشند (Vassilev et al. 2015).

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.6.8]

ملاحظات و چالش‌های ایمنی زیستی

ایمنی زیستی به مجموعه‌ای از اقدامات اطلاق می‌شود که برای پیشگیری از خسارات زیستی به انسان و محیط زیست طراحی شده‌اند. منابع متعددی وجود دارند که دستورالعمل‌های دقیقی درباره نحوه کار با میکروارگانیسم‌های متعلق به طبقات مختلف ایمنی زیستی که در آزمایشگاه‌های سنتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، ارائه می‌کنند. این سیستم با هدف کاهش خطرات زیستی، میکروارگانیسم‌ها را بر اساس سطح بیماری‌زایی و خطر آنها در چهار رده دسته‌بندی می‌کند که شامل BSL-1 تا BSL-4 است. در سطح BSL-1، ارگانیسم‌های غیربیماری‌زا قرار دارند که ایمن تلقی شده و تنها به پروتکل‌های پایه در آزمایشگاه نیاز دارند. سطح BSL-2 شامل عوامل با خطر متوسط است که توانایی ایجاد عفونت دارند اما درمان‌های مؤثری برای آن‌ها موجود است؛ کار در این سطح نیازمند مهار ویژه و آموزش تخصصی است. سطح BSL-3 مربوط به عوامل بیماری‌زای با خطر فردی بالا است که در صورت مواجهه ممکن است موجب عفونت‌های جدی شوند، اما انتقال آنها معمولاً محدود به افراد می‌شود. کار با این سطح نیازمند تجهیزات پیشرفته و اقدامات مهار شده خاص است. در سطح آخر، یعنی BSL-4، می‌توان خطرناک‌ترین عوامل بیماری‌زا را یافت که عمدتاً از طریق آئروسل منتقل می‌شوند و هیچ نوع درمان یا واکسنی برای آنها موجود نیست. کار با این عوامل مستلزم رعایت شدیدترین پروتکل‌های ایمنی، آموزش اختصاصی و کنترل دقیق دسترسی است (Keswani et al. 2019).

با وجود مزایای فراوان کودهای زیستی، ارزیابی ایمنی زیستی و بررسی تاثیرات آن‌ها بر اکوسیستم خاک به‌عنوان یک ضرورت اساسی برای تجاری‌سازی پایدار مطرح است. اگرچه اثرات ناخواسته کودهای زیستی بر شبکه غذایی خاک و ریزوسفر غالباً محدود و زودگذر گزارش شده‌اند، اما انجام نظارت جامع بر این اثرات برای ارزیابی دقیق ایمنی و پایداری اکولوژیک آن‌ها اجتناب‌ناپذیر است. پیشرفت در روش‌های مولکولی مستقل از کشت، مانند PCR کمی، ریزآرایه و تحلیل mRNA، امکان درک بهتر از تأثیرات این کودها بر ساختار، عملکرد و پویایی جوامع میکروبی بومی را فراهم کرده است. با این وجود، تنوع نتایج حاصل از پژوهش‌های موجود، که تحت تأثیر عوامل مختلف مرتبط با خاک، گیاه و روش‌های کاربرد قرار دارد، ضرورت انجام مطالعات بلندمدت‌تر با رویکردهای ترکیبی و دقت بالاتر را پیش از ارزیابی قطعی ایمنی یک کود زیستی مشخص نشان می‌دهد. ازاین‌رو، طراحی تحقیقات آینده باید به گونه‌ای صورت گیرد که علاوه بر تغییرات جامعه میکروبی، تاب‌آوری

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.6.8]

اکوسیستم خاک و پیامدهای عملکردی این تغییرات را نیز در بازه‌های زمانی طولانی‌تر مورد بررسی قرار دهد (Sharma et al. 2012).

برای ارتقای کشاورزی پایدار، پژوهش‌های جهانی گسترده‌ای در حال انجام است که روی توسعه کودهای زیستی متمرکز هستند. با این حال، مشخص شده که برخی از میکروارگانیسم‌هایی که به عنوان کودهای زیستی مورد استفاده قرار می‌گیرند، پتانسیل عمل به عنوان عوامل بیماری‌زای فرصت‌طلب را دارند و در سطح بی‌خطرزیستی ۲ طبقه‌بندی می‌شوند. این مسئله، تهدیدات جدی برای سلامت انسان و محیط زیست به همراه دارد. با وجود این نگرانی‌ها، شواهد علمی بیشتری در مجامع مختلف مزایای استفاده از میکروارگانیسم‌های سطح بی‌خطرزیستی ۲ را به عنوان کود زیستی تأیید کرده‌اند. پیشنهاد می‌شود آزمایشگاه‌های پژوهشی و صنعتی فعال در زمینه توسعه کودهای زیستی برای تجاری‌سازی یا عرضه در محیط، ابتدا میکروارگانیسم‌های مورد استفاده را با بهره‌گیری از روش‌های سیستماتیک چندجانبه و چندمرحله‌ای میکروبی شناسایی کنند. این رویکرد می‌تواند پیش از ادامه فرآیند توسعه و استفاده محیطی، گروه خطر و ویژگی‌های بی‌خطرزیستی آن‌ها را تعیین کند. همچنین توصیه می‌شود برای تهیه فرمولاسیون و کاربرد در مقیاس مزرعه، از میکروارگانیسم‌های گروه خطر-۱ و سطح بی‌خطرزیستی ۱ استفاده شود. در مقابل، میکروارگانیسم‌های سطح بی‌خطرزیستی ۲ باید تنها در محیط‌های تحقیقاتی تحت روش‌های مهار دقیق و مطابق با مقررات سختگیرانه مورد بررسی قرار گیرند (Keswani et al. 2019).

عدم وجود فرآیندهای نظارتی منسجم و مستندات جامع در سطح بین‌المللی، ثبت محصولات جدید کود زیستی را برای تولیدکنندگان با چالش‌های قابل توجهی مواجه کرده است. با وجود پذیرش روزافزون کودهای زیستی و تکنیک‌های کشاورزی ارگانیک از سوی کشورها، نبود مطالعات جامع و قطعی در زمینه تاثیر این تلقیح‌های میکروبی بر انسان‌ها، حیوانات و محیط زیست، نگرانی‌هایی در مورد خطرات بالقوه آنها ایجاد کرده است. علاوه بر این، کمبود زیرساخت‌ها و شبکه‌های بازاریابی مناسب، دسترسی به کودهای زیستی را محدود کرده است. وجود میکروب‌های فعال با طول عمر محدود در این محصولات، فرآیند بازاریابی آنها را دشوار می‌کند. همچنین، شرایط حمل‌ونقل، نگهداری و توزیع این مواد، به ویژه در مناطقی با شرایط آب‌وهوایی متنوع چالش‌های بیشتری را ایجاد می‌کند. از سوی دیگر، فقدان دستورالعمل‌های استاندارد برای بسته‌بندی، برچسب‌گذاری و قیمت‌گذاری این محصولات بر پیچیدگی موضوع افزوده است. در همین راستا، یکی دیگر از

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.6.8]

چالش‌های اساسی به آگاهی کم کشاورزان در کشورهای وابسته به کشاورزی بازمی‌گردد. بسیاری از این کشاورزان تحصیلات محدودی دارند و از مزایا و کاربرد صحیح کودهای زیستی بی‌اطلاع هستند. فقدان مشاوره علمی و راهکارهای معتبر برای بهره‌وری صحیح از تکنیک‌های کشاورزی مبتنی بر میکروب، دستیابی گسترده‌تر به این محصولات را با موانع جدی روبه‌رو کرده است (Bharti and Suryavanshi, 2021).

چالش‌های مرتبط با تجاری‌سازی کودهای زیستی عبارت‌اند از تأمین به‌موقع کشت‌ها، عملکرد کند این نوع کودها، وجود محصولات بی‌کیفیت در بازار، تولید محدود در سطح صنعتی و نیاز به توسعه فرمولاسیون‌های پیشرفته و طراحی کودهای زیستی جدید. رفع این موانع برای پذیرش گسترده و موفقیت تجاری این کودها امری ضروری به شمار می‌رود (Yadav and Yadav, 2024).

تلاش برای تجاری‌سازی کودهای زیستی چشم‌اندازی همراه با چالش‌ها و فرصت‌های فراوان را به نمایش می‌گذارد. از جمله چالش‌های مهم این حوزه، موانع نظارتی هستند که عمدتاً به مسائل ایمنی زیستی و کنترل کیفیت مربوط می‌شوند و به عنوان دغدغه‌هایی جدی نیازمند بررسی و حل‌وفصل می‌باشند. علاوه بر این، مسائل فنی نظیر پایداری سویه‌ها، پیچیدگی‌های مرتبط با فرمولاسیون زیستی و نیاز به سازگاری با کودهای شیمیایی، موانع بزرگی بر سر راه استفاده گسترده از این کودها ایجاد کرده‌اند. همچنین، چالش‌های موجود در بازار، از جمله پذیرش مصرف‌کنندگان و رقابت‌پذیری اقتصادی، مسیر تجاری‌سازی کودهای زیستی را با دشواری‌های بیشتری روبه‌رو کرده‌اند. با این حال، در دل این چالش‌ها فرصت‌های ارزشمندی نیز نهفته است. پیشرفت در حوزه مهندسی ریزوسفر، به‌کارگیری مهندسی ژنتیک و توسعه فرمولاسیون‌های چند ویژگی، چند سویه‌ای و چند ماده مغذی، مسیرهای نوینی برای افزایش کارایی و اثربخشی کودهای زیستی فراهم می‌سازد. همچنین ادغام فناوری نانو و بررسی دقیق‌تر پویایی بازار، زمینه را برای بهره‌گیری بهینه‌تر از کودهای زیستی مهیا می‌کند و چشم‌انداز امیدوارکننده‌ای برای آینده این محصولات ارائه می‌دهد (Yadav and Yadav, 2024).

در آینده، ضروری است تمرکز بر توسعه میکروارگانیسم‌های جهش‌یافته و اصلاح‌شده ژنتیکی به عنوان کودهای زیستی تقویت گردد. این رویکرد می‌تواند در مقایسه با گونه‌های طبیعی عملکرد مطلوب‌تری داشته باشد و به‌عنوان یک راهکار پایدار برای بخش کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد (Chakraborty and Akhtar, 2021).

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.6.8]

نتیجه‌گیری

کودهای زیستی به‌عنوان یکی از جایگزین‌های پایدار و سازگار با محیط‌زیست برای کودهای شیمیایی، نقشی کلیدی در بهبود کیفیت خاک، افزایش حاصلخیزی آن و استحکام امنیت زیستی ایفا می‌کنند. مطالعات انجام‌شده نشان داده‌اند که استفاده از این کودها نه‌تنها موجب ارتقای ساختار میکروبیولوژیک خاک و کاهش سطح آلاینده‌های ناشی از ترکیبات شیمیایی می‌شود، بلکه تأثیر چشمگیری در حفظ تنوع زیستی و تقویت پایداری اکوسیستم‌های کشاورزی دارد. علاوه بر این، به‌کارگیری کودهای زیستی، با ایجاد مقاومت بیشتر در گیاهان نسبت به بیماری‌ها و تنش‌های محیطی، نقشی برجسته در افزایش امنیت غذایی و تحقق کشاورزی پایدار ایفا می‌کند. با وجود مزایای قابل‌توجه این فناوری، دستیابی به گسترش مطلوب در تولید و مصرف کودهای زیستی نیازمند اقداماتی نظیر آموزش گسترده‌تر کشاورزان، حمایت مستمر از سوی سیاست‌گذاران و ترویج و توسعه فناوری‌های بومی است. این اقدامات می‌توانند زمینه را برای بهره‌برداری وسیع‌تر و عملی‌تر از ظرفیت‌های این نوع کودها فراهم کنند. در نهایت، پیوند میان دانش سنتی و یافته‌های مدرن علمی قادر است راهکارهای جامع‌تری برای حل مشکلات زیست‌محیطی و چالش‌های امنیت زیستی ارائه دهد، و بدین طریق به بهبود وضعیت موجود و تضمین آینده‌ای پایدار کمک کند.

فهرست منابع

References

Agake SI, Ohwaki Y, Kojima K, Yoshikawa E, Artigas Ramirez MD, Bellingrath-Kimura SD, Yamada T, Ookawa T, Ohkama-Ohtsu N, Yokoyama T. 2022. Biofertilizer with *Bacillus pumilus* TUAT1 spores improves growth, productivity, and lodging resistance in forage rice. Agronomy. 12: 2325. https://doi.org/10.3390/agronomy12102325.

Alam MZ, Hoque MA, Carpenter-Boggs L. 2022. Mycorrhizal fungi, biochar, and selenium increase biomass of Vigna radiata and reduce arsenic uptake. Toxicological & Environmental Chemistry. 104: 84-102. https://doi.org/10.1080/02772248.2022.2028790.

Alam MZ, Roy MD. 2024. The reduction of abiotic stress in food crops through climate-smart mycorrhiza-enriched biofertilizer. AIMS Microbiology. 10: 674. http://doi.org/10.3934/microbiol.2024031.

Alipour Kafi S, Karimi E, Akhlaghi Motlagh M, Amini Z, Mohammadi A, Sadeghi A. 2021. Isolation and identification of *Amycolatopsis* sp. strain 1119 with potential to improve cucumber fruit yield and induce plant defense responses in commercial greenhouse. Plant and Soil. 468: 125-145. https://doi.org/10.1007/s11104-021-05097-3.

Ataei P, Karimi H, Klöckne CH, Es'haghi SR, Zarei R. 2022. The promotion of biofertilizer application on farms: Farmers' intentional processes. Environmental Technology & Innovation. 28: 102722. https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102722.

Azimzadeh Y, Mohammadzadeh A. 2023. Biochar mechanisms to reduce plant vulnerability to pests and diseases. Journal of Biosafety. 16(1): 37-60. (In Farsi with English abstract)

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.6.8]

Bharti N, Suryavanshi M. 2021. Quality control and regulations of biofertilizers: Current scenario and future prospects. Biofertilizers. Elsevier, USA. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821667-5.00018-X.

Bhattacharjee R, Dey U. 2014. Biofertilizer, a way towards organic agriculture: A review. African Journal of Microbiology Research. 8: 2332-2343.

Bibi S, Saadaoui I, Bibi A, Al-Ghouti M, Abu-Dieyeh MH. 2024. Applications, advancements, and challenges of cyanobacteria-based biofertilizers for sustainable agro and ecosystems in arid climates. Bioresource Technology Reports. 25: 101789. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101789.

Chakraborty T, Akhtar N. 2021. Biofertilizers: prospects and challenges for future. Biofertilizers. 43: 575-590. https://doi.org/10.1002/9781119724995.ch20.

Chittora D, Meena M, Barupal T, Swapnil P, Sharma K. 2020. Cyanobacteria as a source of biofertilizers for sustainable agriculture. Biochemistry and Biophysics Reports. 22: 100737. https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2020.100737.

Cordeiro ECN, Mógor AF, Amatussi JO, Mógor G, Marques HMC, de Lara GB. 2022. Microalga biofertilizer improves potato growth and yield, stimulating amino acid metabolism. Journal of Applied Phycology. 34: 385-394. https://doi.org/10.1007/s10811-021-02656-0.

Daniel AI, Fadaka AO, Gokul A, Bakare OO, Aina O, Fisher S, Burt AF, Mavumengwana V, Keyster M, Klein A. 2022. Biofertilizer: the future of food security and food safety. Microorganisms. 10: 1220. http://doi.org/10.3390/microorganisms10061220.

Das HK. 2019. Azotobacters as biofertilizer. Advances in Applied Microbiology. 108: 1-43. https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2019.07.001.

Deepika P, MubarakAli D. 2020. Production and assessment of microalgal liquid fertilizer for the enhanced growth of four crop plants. Biocatalytical Agricultural Biotechnology. 28: 101701. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101701.

El-Beltagi HS, Ahmad I, Basit A, Abd El-Lateef HM, Yasir M, Tanveer Shah S, Ullah I, Elsayed Mohamed M, Ali I, Ali F, Ali S, Aziz I, Kandeel M, Zohaib Ikram M. 2022. Effect of *Azospirillum* and *Azotobacter* species on the performance of cherry tomato under different salinity levels. Gesunde Pflanzen. 74: 487-499. https://doi.org/10.1007/s10343-022-00625-2.

Ghasemalipour A, Ghasemi F. 2023. Gold and silver nanoparticles: Green synthesis, characterization and applications in biotechnology. Journal of Biosafety. 16(2): 31-62. (In Farsi with English abstract)

Gupta G, Panwar J, Akhtar MS, Jha PN. 2012. Endophytic nitrogen-fixing bacteria as biofertilizer. Sustainable Agriculture Reviews: 11: 183-221. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5449-2_8.

Hakkoum Z, Minaoui F, Chabili A, Douma M, Mouhri K, Loudiki M. 2025. Biofertilizing Effect of soil *Cyanobacterium anabaena* cylindrica–based formulations on wheat growth, physiology, and soil fertility. Agriculture. 15: 189. https://doi.org/10.3390/agriculture15020189.

Kafi AS, Arabhosseini S, Karimi E, Koobaz P, Mohammadi A, Sadeghi A. 2021. *Pseudomonas putida* P3-57 induces cucumber (*Cucumis sativus* L.) defense responses and improves fruit quality characteristics under commercial greenhouse conditions. Scientia Horticulturae. 280: 109942. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109942.

Kalamulla R, Sandaruwan D, Karunarathna SC, Stephenson SL, Tibpromma S, Elgorban AM, Al-Rejaie S, Yapa PN, Suwannarach N. 2022. Assessment of community dynamics of arbuscular mycorrhizal fungi in the Rice (*Oryza sativa* L.) Rhizosphere and potential application as biofertilizer. Sustainability. 14: 16537. https://doi.org/10.3390/su142416537.

Kalayu G. 2019. Phosphate solubilizing microorganisms: promising approach as biofertilizers. International Journal of Agronomy. 2019: 4917256. https://doi.org/10.1155/2019/4917256.

Kaur H, Athwal S, Garg K. 2024. Futuristic approaches in biofertilizer industry: Challenges, opportunities, and future directions. Metabolomics, Proteomics and Gene Editing Approaches in Biofertilizer Industry: Volume II. 15-33. https://doi.org/10.1007/978-981-97-2910-4_2.

Keswani C, Prakash O, Bharti N, Vílchez JI, Sansinenea E, Lally RD, Borriss R, Singh SP, Gupta

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.6.8]

VK, Fraceto LF, de Lima R, Singh HB. 2019. Re-addressing the biosafety issues of plant growth promoting rhizobacteria. Science of the Total Environment. 690: 841-852. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.046.

Kumar MS, Reddy GC, Phogat M, Korav S. 2018. Role of bio-fertilizers towards sustainable agricultural development: A review. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. 7: 1915-1921.

Nawaz M, Shabbir S, Manzoor N, Xu H, Wang Z, Arshad KT, Zohaib A, Farooq TH, Sun J. 2025. Recent advances in biofertilizer development. Agricultural nutrient pollution and climate change: Challenges and opportunities. Environmental. 44: 271-309. https://doi.org/10.1007/978-3-031-80912-5_10.

Ng FL, Lin TC, Wang E, Lee TY, Chen GT, Su JF, Chen WL. 2025. Bacillus-based biofertilizer influences soil microbiome to enhance soil health for sustainable agriculture. Sustainability. 17: 6293. https://doi.org/10.3390/su17146293.

Osman MEH, El-Sheekh MM, El-Naggar AH, Gheda SF. 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. https://doi.org/10.1007/s00374-010-0491-7.

Pal S, Singh HB, Farooqui A, Rakshit A. 2015. Fungal biofertilizers in Indian agriculture: perception, demand and promotion. Journal of Eco-friendly Agriculture. 10: 101-113.

Patel C, Singh J, Karunakaran A, Ramakrishna W. 2023. Evolution of nano-biofertilizer as a green technology for agriculture. Agriculture. 13: 1865. https://doi.org/10.3390/agriculture13101865.

Raffi MM, Charyulu PBN. 2021. *Azospirillum*-biofertilizer for sustainable cereal crop production: Current status. Recent developments in applied microbiology and biochemistry. Elsevier, USA. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821406-0.00018-7.

Rahmani H, Khavazi K, Asgharzadeh A, Rajali F, Aliabad M. 2012. Biofertilizers in Iran: Opportunities and Challenges. Soil Research. 26: 77-98.

Rana A, Sharma N, Tyagi M. 2019. Impact of chemical pesticides vs. biopesticides on human health and environment. International Journal of All Research Writings. 2: 45-51.

Sadhana B. 2014. Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) as a biofertilizer-a review. International Journal of Current Microbiology and Applied Science. 3: 384-400.

Sahu D, Priyadarshani I, Rath B. 2012. Cyanobacteria–as potential biofertilizer. CIBTech Journal of Microbiology. 1: 20-26.

Sharma S, Gupta R, Dugar G, Srivastava AK. 2012. Impact of application of biofertilizers on soil structure and resident microbial community structure and function. Bacteria in agrobiology: Plant probiotics. Springer, USA. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27515-9_4.

Shen Z, Ruan Y, Wang B, Zhong S, Su L, Li R, Shen Q. 2015. Effect of biofertilizer for suppressing *Fusarium* wilt disease of banana as well as enhancing microbial and chemical properties of soil under greenhouse trial. Applied Soil Ecology. 93: 111-119. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.04.013.

Sarkodee-Addo E, Tokiwa C, Bonney P, Aboagye DA, Yeboah A, Abebrese SO, Bam R, Nartey EK, Okazaki S, Yasuda M. 2021. Biofertilizer activity of *Azospirillum* sp. B510 on the rice productivity in Ghana. Microorganisms. 9: 2000. https://doi.org/10.3390/microorganisms9092000.

Suhag M. 2016. Potential of biofertilizers to replace chemical fertilizers. International Journal of Advances Research and Science Engineering Technology. 3: 163-167.

Supraja KV, Behera B, Balasubramanian P. 2020. Performance evaluation of hydroponic system for co-cultivation of microalgae and tomato plant. Journal of Cleaner Production. 272: 122823. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122823.

Van der Putten WH, Bardgett RD, Bever JD, Bezemer TM, Casper BB, Fukami T, Kardol P, Klironomos JN, Kulmatiski A, Schweitzer JA, Suding KN, Van de Voorde TFJ, Wardle DA. 2013. Plant–soil feedbacks: the past, the present and future challenges. Journal of Ecology. 101: 265-276. https://doi.org/10.1111/1365-2745.12054.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.6.8]

Vassilev N, Vassileva M, Lopez A, Martos V, Reyes A, Maksimovic I, Eichler-Löbermann B, Malusa E. 2015. Unexploited potential of some biotechnological techniques for biofertilizer production and formulation. Applied Microbiology and Biotechnology. 99: 4983-4996. https://doi.org/10.1007/s00253-015-6656-4.

Verardi A, Sangiorgio P, Della Mura B, Moliterni S, Spagnoletta A, Dimatteo S, Bassi D, Cortimiglia C, Rebuzzi R, Palazzo S. 2025. Tenebrio molitor frass: A cutting-edge biofertilizer for sustainable agriculture and advanced adsorbent precursor for environmental remediation. Agronomy. 15: 758. https://doi.org/10.3390/agronomy15030758.

Vessey JK. 2003. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. Plant and Soil. 255: 571-586.

Vitorino LC, da Silva EJ, Oliveira MS, Silva IO, Santos LS, Mendonça MAC, Oliveira TCS, Bessa LA. 2024. Effect of a *Bacillus velezensis* and *Lysinibacillus fusiformis*-based biofertilizer on phosphorus acquisition and grain yield of soybean. Frontiers in Plant Science. 15: 1433828. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1433828.

Wang Y, Liu Z, Hao X, Wang Z, Wang Z, Liu S, Tao C, Wang D, Wang B, Shen Z, Shen Q, Li R. 2023. Biodiversity of the beneficial soil-borne fungi steered by *Trichoderma*-amended biofertilizers stimulates plant production. Biofilms and Microbiomes. 9: 46. https://doi.org/10.1038/s41522-023-00416-1.

Yadav A, Yadav K. 2024. Challenges and opportunities in biofertilizer commercialization. SVOA Microbiology. 5: 1-14. https://doi.org/10.58624/SVOAMB.2024.05.037.

Zafar S, Bilal M, Ali MF, Mahmood A, Kijsomporn J, Wong LS, Kumar V, Alotaibi S. 2024. Nano-biofertilizer an eco-friendly and sustainable approach for the improvement of crops under abiotic stresses. Environmental and Sustainability Indicators. 7: 100470. https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100470.

Zhao G, Zhu X, Zheng G, Meng G, Dong Z, Baek JH, Jeon Cho, Yao Y, Xuan YH, Zhang J, Jia B. 2024. Development of biofertilizers for sustainable agriculture over four decades (1980–2022). Geography and Sustainability. 5: 19-28. https://doi.org/10.1016/j.geosus.2023.09.006.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.6.8]

Biofertilizers: From Soil Health to Biosafety

Azam Aliasghari Veshareh[1,2], Ali Mohammadi [*2,3]

1-Assistant Professor, Department of Microbiology, Faculty of Biological Sciences, Alzahra University, Tehran, Iran
2- Research Center for Applied Microbiology and Microbial Biotechnology, Alzahra University, Tehran, Iran
3- Associate Professor, Department of Microbiology, Faculty of Biological Sciences, Alzahra University, Tehran, Iran
a.mohammadi@alzahra.ac.ir

Abstract

Biofertilizers, as one of the environmental innovations, significantly improve soil quality and enhance nutrient uptake efficiency by utilizing microbial compounds, including Plant Growth Promoting Bacteria (PGPB) and symbiotic fungi. Scientific studies have shown that these fertilizers significantly reduce the accumulation of nitrogenous compounds and heavy metals in agricultural products compared to chemical fertilizers. The functional mechanisms of biofertilizers include activities such as nitrogen fixation, dissolution of mineral phosphates, and the production of compounds that stimulate plant growth. Research also indicates the role of these fertilizers in enhancing soil microbial diversity and improving its physicochemical properties, such as cation exchange capacity and organic matter content. The present article introduces various types of biofertilizers, examines the environmental impacts of this technology, and offers suggestions for optimizing its application to promote sustainable agriculture and biological conservation. Findings indicate that the use of biofertilizers not only prevents pollutants from entering the food chain but also ensures the health of agricultural ecosystems.

Keywords: Biodiversity, Bioconservation, Sustainable Agriculture, Beneficial Microorganisms

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.3.6.8]