



Publisher: Soil Science Society of Iran

Journal of Soil Biology<https://sbj.areeo.ac.ir/>

Review Article

Enhancing Agricultural Sustainability through Biofertilizers: A Comprehensive Review of Endophytic Fungi, *Trichoderma*, Mycorrhiza, and PGPR with a Reflection on Iranian Research

Ahmad Akhavan^{1*} 

1- Assistant Professor, Department of Plant Production and Protection, Institute of Agriculture, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Tehran, Iran. Ahmad.akhavan@irost.ir

Article Info

Extended Abstract

Received: 2025-09-27**Accepted:** 2026-02-16**Keywords:**

Agricultural policy,
Climate change,
Salt tolerance,
Soil microbiome,
Sustainable agriculture.

Corresponding author's email:Ahmad.akhavan@irost.ir**DOI:**

10.22092/SBJ.2026.3705
84.287

Background and Objectives: The escalating global demand for food production, driven by a rapidly growing population projected to reach 9.6 to 12.3 billion by 2100, has intensified the pressure on agricultural systems. To meet this demand, traditional agriculture has heavily relied on chemical fertilizers. However, this approach has led to widespread environmental degradation, including soil depletion, groundwater pollution, eutrophication, and a significant reduction in biodiversity. Furthermore, climate change poses a severe threat to global food security, particularly in arid and semi-arid regions like Iran, where abiotic stresses such as drought and salinity are becoming increasingly prevalent. Predictions indicate that climate change could reduce the yields of major staple crops like wheat and rice by over 15% in developing regions by the mid-century. Consequently, there is an urgent need to transition towards sustainable agricultural practices that maintain soil health and crop productivity without the adverse effects of synthetic inputs. Biofertilizers, comprising beneficial microorganisms such as endophytic fungi, *Trichoderma* spp. arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), and plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR), emerge as promising eco-friendly solutions. These biological agents employ various mechanisms, including biological nitrogen fixation, phosphate solubilization, siderophore production, and the synthesis of phytohormones, to enhance nutrient use efficiency and plant resilience. Despite the proven efficacy of these microorganisms in controlled environments, their adoption in Iranian agriculture remains limited due to technological, awareness, and commercialization gaps. The primary objectives of this review are to synthesize the current knowledge on the mechanisms and applications of these biofertilizers, evaluate their role in mitigating abiotic stresses with a specific emphasis on findings from Iranian agricultural research, and critically assess the challenges and future prospects for the commercialization of biofertilizers in Iran.

Review Methods: A systematic review was conducted to analyze the landscape of biofertilizer research and application in the context of sustainable agriculture. A comprehensive multi-database search strategy was employed, utilizing international platforms such as Scopus, Web of Science, and ScienceDirect, as well as Iranian national repositories including MagIran, Scientific Information Database (SID), and Civilica. This dual approach ensured the inclusion of both global advancements and localized studies relevant to Iran's specific agro-climatic conditions. The review covered publications spanning from January 2000 to September 2025. Key search terms included "biofertilizers", "sustainable agriculture", "endophytic fungi", "drought resistance", "PGPR", "Trichoderma", "Mycorrhiza", and "Iran". The study critically synthesized data regarding nutrient mobilization mechanisms, physiological responses to stress, and soil health indicators. Furthermore, the review analyzed the current status of biofertilizer registration and standardization in Iran, referencing national standards (ISIRI) to evaluate the gap between research output and market availability.

Results: The synthesized literature reveals that biofertilizers significantly enhance agricultural sustainability through a complex network of direct and indirect mechanisms. Regarding nutrient mobilization, Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) play a pivotal role by extending hyphal networks into the soil matrix, thereby increasing the absorptive surface area of roots. This mechanism significantly enhances the uptake of immobile nutrients, particularly Phosphorus (P) and Zinc (Zn), and can reduce the necessity for chemical phosphorus fertilizers by approximately 20-40%. Concurrently, Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) such as *Azotobacter*, *Azospirillum*, and *Rhizobium* facilitate biological nitrogen fixation, capable of contributing up to 300 kg of nitrogen per hectare annually, while also solubilizing insoluble phosphates through the secretion of organic acids. In the context of stress mitigation, the review highlights that biofertilizers induce systemic tolerance to abiotic stresses, which is crucial for farming in Iran's dry climate. Beneficial microbes upregulate the expression of stress-responsive genes, enhance the activity of antioxidant enzymes like Superoxide Dismutase (SOD) and Catalase (CAT) to scavenge Reactive Oxygen Species (ROS), and promote the accumulation of osmolytes such as proline. Specifically, *Trichoderma* species have been shown to alleviate salinity stress in crops like pistachio and tomato by regulating the Na⁺/K⁺ ratio and enhancing root architecture. Endophytic fungi contribute by synthesizing phytohormones (IAA, GA) that boost root biomass and maintain chlorophyll content under water-deficit conditions. Analysis of Iranian research indicates significant positive outcomes in field trials. Application of combined biofertilizers has demonstrated yield increases ranging from 10% to 67% in strategic and medicinal crops such as saffron, quinoa, canola, and medicinal herbs, alongside improvements in quality parameters like protein and oil content. However, despite the existence of over 900 research articles and the establishment of national standards (ISIRI 22300-22306), the commercialization landscape presents a paradox. While the scientific infrastructure exists, Iran's market share of biofertilizers remains below 5%. The review identifies key barriers, including the instability of microbial formulations under harsh field conditions, lack of farmer awareness, and insufficient policy incentives compared to subsidized chemical fertilizers.

Conclusion: This comprehensive review confirms that biofertilizers harnessing endophytic fungi, *Trichoderma*, mycorrhizae, and PGPR offer a robust and viable framework for transitioning to sustainable agriculture. These biological inputs address critical nutrient inefficiencies and environmental stresses while allowing for a significant reduction in chemical input dependency. The evidence confirms their efficacy in enhancing crop yields (10-40%) and improving stress tolerance, which is vital for food security in changing climates. However, bridging the significant gap between research findings and practical application in Iran requires a multi-faceted approach. Future development priorities must shift from simple single-strain inoculants to the development of stable, multi-strain consortia adapted to local abiotic stresses (salinity and heat). Furthermore, the establishment of strict quality control protocols based on national standards and the implementation of supportive policy incentives are essential to build farmer confidence. By integrating these biotechnological tools with modern agronomic practices, it is possible to foster resilient agroecosystems that ensure both economic viability and environmental harmony.

Cite this article: Akhavan, A., 2026. Enhancing Agricultural Sustainability through Biofertilizers: A Comprehensive Review of Endophytic Fungi, *Trichoderma*, Mycorrhiza, and PGPR with a Reflection on Iranian. Review article. *Journal of Soil Biology*, 13 (2),229-261.



DOI: 10.22092/SBJ.2026.370584.287

Publisher: Soil Science Society of Iran



دو فصلنامه

نشریه زیست‌شناسی خاک

<https://sbj.areeo.ac.ir/>


مقاله مروری

کودهای زیستی در گذار به کشاورزی پایدار: کاوشی جامع در نقش قارچ‌های اندوفیت، تریکودرما، مایکوریزا و باکتری‌های محرک رشد گیاه با تأملی بر پژوهش‌های ایرانی

احمد اخوان^{*۱}

۱- استادیار گروه تولیدات گیاهی و گیاه‌پزشکی، پژوهشکده کشاورزی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۵ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۷

چکیده

کشاورزی سنتی برای افزایش تولید به مصرف فزاینده نهاده‌های شیمیایی متکی شده که پیامدهایی همچون آلودگی محیط‌زیست، تخریب خاک و تهدید سلامت را در پی داشته است. پر کردن شکاف تولید بدون آسیب به زیست‌کره از طریق جایگزین‌هایی مانند کودهای زیستی امکان‌پذیر است. این مقاله مروری با هدف پر کردن شکاف دانش در حوزه کودهای زیستی، ارائه تصویر جامع و به‌روز از کارایی آن‌ها، تحلیل چالش‌ها و جهت‌گیری‌های آینده، تأثیرگذاری بر سیاست‌گذاری و بازار، ارزش‌گذاری بر پژوهش‌های داخلی و ایجاد منبعی قابل‌دسترس برای دانشجویان نگاشته شده است. باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن هوا را به فرم قابل جذب تبدیل می‌کنند. باکتری‌هایی مانند *پسودوموناس* و *باسیلوس*، مواد معدنی از جمله فسفر و پتاسیم را برای گیاهان قابل‌دسترس می‌کنند. قارچ‌های مایکوریزا با گسترش شبکه هیفی، جذب آب و مواد مغذی را در شرایط خشکی و شوری بهبود می‌بخشند. قارچ *تریکودرما* با تولید آنزیم‌ها و هورمون‌ها، مقاومت گیاه به بیماری‌ها و تنش‌ها را افزایش می‌دهد. دستاوردهای تحقیقات داخلی نشان می‌دهد که کاربرد این کودها می‌تواند عملکرد محصولات استراتژیک را ۱۰ تا ۴۰ درصد بهبود بخشد، سلامت خاک را تقویت کند و کارایی مصرف آب را در شرایط تنش افزایش دهد. نقطه قوت اصلی، دانش فنی بومی و اثربخشی سوبه‌های میکروبی بومی در شرایط اقلیمی کشور است. با این حال، چالش‌هایی مانند پراکندگی پژوهش‌ها، نبود فرمولاسیون‌های پایدار و تجاری، کمبود زیرساخت ترویجی و ضعف در سیاست‌گذاری یکپارچه، مانع توسعه مقیاس‌پذیر این فناوری شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: تغییرات اقلیمی، تحمل شوری، سیاست‌گذاری کشاورزی، میکروبیوم خاک.

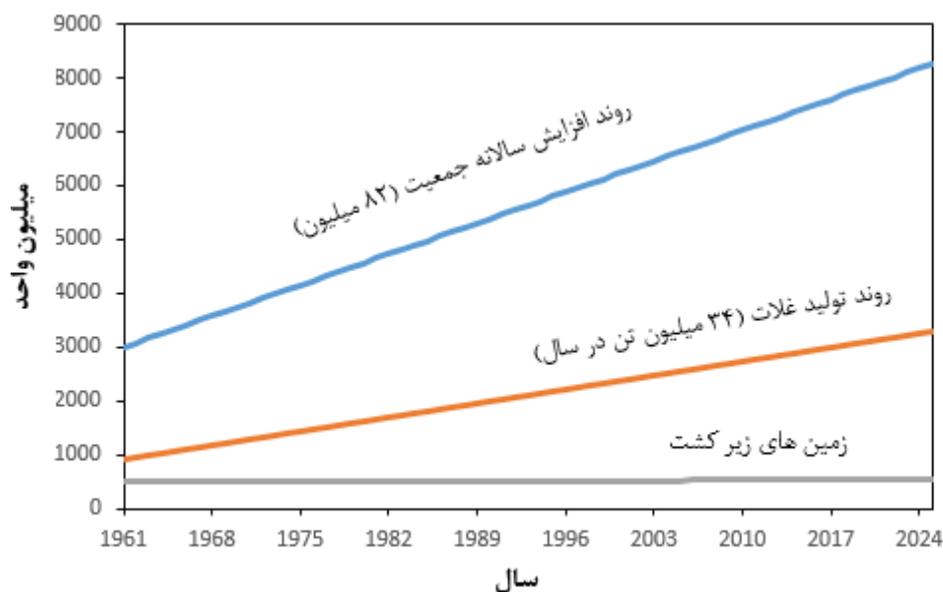
مقدمه

کشاورزی پایدار: ضرورت جایگزینی عوامل

زیستی به جای نهاده‌های شیمیایی

جمعیت جهان همچنان در حال رشد است و این امر فشار بی‌سابقه‌ای بر سیستم تولید جهانی غذا وارد کرده و منجر به تخریب گسترده منابع طبیعی و فشار بیش از حد بر منابع آب‌و خاک شده است. عوامل دیگری مانند گرمایش جهانی، تغییر الگوهای مصرف غذایی، محدودیت مواد مغذی خاک و کاهش حاصلخیزی آن، این چالش بزرگ در تأمین امنیت غذایی را تشدید می‌کنند. آمارهای جهانی نشان می‌دهد که جمعیت جهان در طی سال‌های ۲۰۵۰ تا ۲۱۰۰ به ۹/۶ تا ۱۲/۳ میلیارد نفر خواهد رسید (شکل ۱). این جمعیت رو به رشد نیازمند تأمین مواد غذایی برای در امان ماندن از گرسنگی است و به تبع آن باید میزان تولید غذا بین ۶۰ تا ۷۰ درصد افزایش یابد. تغذیه جمعیت بیشتر با زمین‌های کمتر، کاری دشوار و پیچیده است (Heydari, 2019).

تغییرات اقلیمی یک واقعیت انکارناپذیر است و درک ارتباط بین تغییرات اقلیمی و تولید محصولات کشاورزی برای توسعه ظرفیت‌های لازم جهت تضمین تأمین غذای کافی برای جمعیت رو به رشد، امری حیاتی است. تغییرات اقلیمی موجب حذف بسیاری از گونه‌ها، افزایش تبخیر و تعرق و کاهش تولید بسیاری از گونه‌های گیاهی شده است. خشکی به عنوان یکی از مخرب‌ترین تنش‌های غیرزیستی، بیش از تمام بیماری‌های گیاهی باعث کاهش عملکرد محصولات می‌شود و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰، نیمی از اراضی کشاورزی تحت تأثیر خشکی قرار بگیرند (Mohammadi et al., 2023). تأمین غذای جمعیت رو به رشد جهان، درحالی‌که زمین‌های کشاورزی روز به روز محدودتر می‌شوند، چالشی بزرگ است (Dzvene et al., 2025). این مسئله نیازمند افزایش بهره‌وری زمین‌های موجود، به‌کارگیری فناوری‌های نوین، مدیریت پایدار منابع و بازنگری در الگوهای تولید و مصرف غذاست.



شکل ۱- نرخ رشد جمعیت، تولید سالانه غلات و افزایش مساحت زمین‌های زیر کشت در طی سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۲۵. Figure 1. Population growth rate, annual grain production, and increase in cultivated land area during the years 1961 to 2025. (<http://www.fao.org/faostat/en#data>)

که هم قابل تجدید باشد و هم به منابع فشار مضاعف وارد نکند. یکی از راه‌حل‌های مطرح، استفاده از ریزجانداران مفید مانند باکتری‌ها، جلبک‌های سبز-آبی^۴، قارچ‌های میکوریزایی، تریکودرما، باکتری‌های محرک رشد گیاه^۵، نانوذرات مختلف و سایر موجودات میکروسکوپی مفید است که می‌توانند جایگزین مناسبی برای کودهای شیمیایی مرسوم با چالش‌هایی مانند هزینه بالا و پتانسیل آلاینده‌گی باشند. در این زمینه، کودهای زیستی (بیوفرتیلايزرها) و میکروبیوم‌های مهندسی‌شده مقاوم به شوری به عنوان راهکارهای قابل اجرا پدیدار شده‌اند که مزایای متعددی نظیر بهبود جذب عناصر غذایی، افزایش سلامت خاک و کاهش تنش ارائه می‌دهند (Araganji et al., 2025). فلاح نصرت‌آباد و همکاران، (۲۰۱۷) نتیجه گرفتند که استفاده یکپارچه از کود آلی و تلقیح باکتریایی در گندم، نه تنها کارایی فسفر را بهبود می‌بخشد، بلکه نیاز به کود شیمیایی را کاهش می‌دهد (تا ۲۵ درصد صرفه‌جویی در سوپر فسفات تریپل) و پایداری کشاورزی را افزایش می‌دهد. این رویکرد برای خاک‌های آهکی ایران مناسب است و می‌تواند در کشاورزی پایدار اعمال شود (Nosratabad et al., 2017).

کودهای زیستی مبتنی بر ریزجانداران مزایای قابل توجهی نسبت به کودهای شیمیایی دارند: ماندگاری بالاتر در خاک، اقتصادی، غیرسمی بودن، قابل تجدید بودن و سازگاری کامل با محیط‌زیست. تحقیقات نشان می‌دهد استفاده از این ریزجانداران در کشاورزی نوین می‌تواند پایه‌گذار تحولی اساسی در جهت سیستم کشاورزی پایدار و دوست‌دار محیط‌زیست باشد (Khosravi et al., 2024). هند، ایالات متحده و چین جزء سه کشور اول در زمینه استفاده از کودهای زیستی هستند. برای شناسایی گونه‌ها و سویه‌هایی که می‌توانند به عنوان کود زیستی یا عوامل کنترل زیستی عمل کنند، ملزومات متعددی از جمله

تغییرات اقلیمی از هم‌اکنون بر تولید جهانی غذا تأثیر گذاشته و بهره‌وری و عملکرد پیش‌بینی‌شده محصولات غذایی اصلی در تمام مناطق جهان را کاهش داده است. این شرایط مردم را در برابر ناامنی غذایی و تغذیه‌ای آسیب‌پذیرتر کرده است. مدل‌های شبیه‌سازی^۱ DSSAT و^۲ APSIM پیش‌بینی می‌کنند که در کشورهای آسیایی از جمله هند و پاکستان تا میانه قرن (۲۰۴۰-۲۰۶۹)، بازده برنج ۲/۱۵ تا ۲/۱۷ درصد و بازده گندم ۱/۱۴ تا ۱۲ درصد کاهش خواهد یافت؛ زیرا دمای حداکثر ۸/۲ درجه سانتی-گراد و دمای حداقل ۲/۲ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت (Habib-ur-Rahman et al., 2022). پژوهشگران با استفاده از مدل‌های پنبلی در آفریقای زیر صحرا^۳ پیش‌بینی می‌کنند که تا میانه قرن، تولید کلی ذرت ۲۲ درصد، سورگوم ۱۷ درصد، ارزن ۱۷ درصد، بادام‌زمینی ۱۸ درصد و کاساوا ۸ درصد کاهش خواهد یافت. این مطالعات نشان می‌دهند با احتمال ۹۵ درصد، میزان آسیب بیش از ۷ درصد و با احتمال ۵ درصد بیش از ۲۷ درصد خواهد بود.

کودهای شیمیایی، اگرچه در افزایش عملکرد محصولات مؤثرند، به طور قابل توجهی به آلودگی زیست-محیطی، از جمله انتشار گازهای گلخانه‌ای، سرشارسازی و تخریب خاک کمک می‌کنند. هزینه‌های فزاینده و محدودیت در دسترسی به این نهاده‌ها نیازمند راهبردهای جایگزین برای مدیریت عناصر غذایی است. اگرچه کودهای شیمیایی در افزایش عملکرد محصول نقش ویژه‌ای داشته‌اند، اما کاربرد بی‌رویه یا نادرست آن‌ها می‌تواند خطراتی برای سلامت انسان ایجاد کرده و با آلودگی منابع آب و خاک، تعادل بوم‌شناختی را مختل کند (Shafiee and Azmi, 2024). به‌طورکلی، تنها ۱۰ تا ۴۰ درصد از کودهای اعمال‌شده توسط گیاهان جذب می‌شوند، درحالی-که گاهاً ۶۰ تا ۹۰ درصد آن هدر می‌رود. بنابراین، امروزه بسیاری از متخصصان علوم خاک و تغذیه گیاهان به دنبال روش‌های جایگزین برای تولید پایدار محصولات هستند

^۴ آسپروولینا^۵ PGPRs^۱ Decision Support System for Agrotechnology Transfer^۲ Agricultural Production Systems sIMulator^۳ Sub-Saharan Africa

تأثیر بر رشد گیاه، اثر بر تولید محصول، پاسخ تحت تنش- های زیستی و غیر زیستی، و ارزیابی کلی کارایی تجاری باید رعایت شود. بازار جهانی کودهای زیستی به ریزوبیوم (۱۶ درصد)، آزوتوباکتر (۱۷ درصد)، آزوسپریلوم (۱۶ درصد)، جلبک‌های سبز-آبی (۱۳ درصد)، باکتری‌های حل‌کننده فسفات (۱۵ درصد)، میکوریزا (۱۷ درصد)، تریکودرما (۴ درصد) و غیره (۲ درصد) تقسیم می‌شود. این ریزجانداران اصلی توسط شرکت‌های پیشرو کشاورزی جهانی مانند Bayer CropScience AG, Mapleton, Agri Biotech Pty Limited, Lallemand Inc., CBF China Bio-Fertilizer AG, Symborg SL, National Fertilizer Ltd. و غیره استفاده شده‌اند.

هدف این مقاله مروری، ارائه تحلیل جامع از پژوهش‌های داخلی و مطالعات بین‌المللی معتبر در زمینه کودهای زیستی شامل میکوریزا، قارچ‌های تریکودرما، میکروبیوم‌های مقاوم به شوری و باکتری‌های محرک رشد گیاه است. در این مطالعه، با بررسی نظام‌مند چندین مقاله علمی، آخرین دستاوردها در زمینه به‌کارگیری هیف‌های قارچی و مهندسی میکروبیوم برای بهبود جذب عناصر غذایی و افزایش تحمل به شوری در شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک ارزیابی شده است.

کودهای زیستی: ریزجانداران محرک رشد گیاه، سازوکارهای تأمین درشت‌مغذی‌ها و افزایش مقاومت به تنش‌های محیطی

مدیریت تغذیه گیاه کلیدی‌ترین عامل در افزایش پایدار تولید کشاورزی است که عمدتاً بر پایه تأمین عناصر پرمصرف نیتروژن (N)، فسفر (P) و پتاسیم (K) استوار است. این عناصر نقش محوری در فرآیندهای مورفولوژیک، متابولیک و بیوشیمیایی گیاه دارند و بر ویژگی‌هایی مانند ارتفاع، انشعاب ریشه، شاخه‌زنی، گل‌دهی و میوه‌دهی تأثیر مستقیم می‌گذارند (Valojai et al., 2021). نیتروژن، به عنوان جزء اصلی پروتئین‌ها و تنظیم‌کننده فعالیت‌های آنزیمی، کمبود آن منجر به

اختلالات شدید مورفولوژیک مانند کاهش ارتفاع، طول برگ و زیست‌توده می‌شود (Sheoran et al., 2021). فسفر در معماری ریشه، تشکیل گل و بذر، و انتقال انرژی نقش دارد و جزء اساسی کوآنزیم‌ها و فسفولیپیدها است. پتاسیم نیز تنظیم‌کننده تقسیم سلولی، انتقال آب، بیوسنتز پروتئین و سینتیک فتوسنتز است (Akbari, Mohammadabad et al., 2025). عدم تعادل این عناصر، که اغلب در خاک‌های کشاورزی مشاهده می‌شود، ضرورت راهبردهای دقیق کوددهی را برجسته می‌کند. کشاورزی متعارف در دهه‌های اخیر با چالش‌های زیست-محیطی جدی ناشی از مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی روبرو بوده که منجر به کاهش ماده آلی خاک، اسیدی شدن، آلودگی منابع آبی و تهدید تنوع زیستی شده است. هرچند کودهای شیمیایی رشد سریع ایجاد می‌کنند، اما اثرات بلندمدت منفی بر ساختار و حاصلخیزی خاک دارند. در مقابل، کودهای زیستی مبتنی بر ریزجانداران مفید (تثبیت‌کننده‌های N، حل‌کننده‌های P و K) دسترسی به این عناصر پر مصرف را از طریق مکانیسم‌های طبیعی تسهیل می‌کنند. مقایسه مطالعات نشان می‌دهد که کودهای زیستی عملکرد محصول را ۱۰-۴۰ درصد افزایش می‌دهند، با اثرات برتر در خاک‌های فقیر و اقلیم‌های خشک، اما کارایی آن‌ها اغلب ناسازگار است و در شرایط مزرعه‌ای کمتر از آزمایش‌های کنترل‌شده ظاهر می‌شود، که عمدتاً ناشی از عوامل محیطی مانند pH خاک، رقابت میکروبی و کمبود ماده آلی است. برای رفع این محدودیت‌ها، مهندسی ژنتیکی ریزجانداران پیشنهاد شده تا بقا و عملکرد در شرایط سخت بهبود یابد (Ali et al., 2020). سویه‌های اصلاح‌شده می‌توانند جذب NPK، تولید هورمون‌ها و مقاومت به تنش را تقویت کنند و حتی گیاهان غیربقولات را قادر به تثبیت نیتروژن سازند.

کودهای زیستی از مکانیسم‌های مستقیم (تثبیت N، انحلال P/K) و غیرمستقیم (تولید فیتوهورمون، کنترل پاتوژن) بهره می‌برند. قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار (AMF) سطح جذب ریشه را تا ۱۰۰ برابر افزایش داده و

غلاف و گل) است (Golestanifar et al., 2024). گیاهان در برابر تنش‌های خشکی و شوری سه استراتژی اصلی دارند: الف) سازگاری از طریق کاهش مصرف منابع و تنظیم رشد (مانند اکالیپتوس، آگاو و کاکتوس ساگوارو)، ب) اجتناب با چرخه زندگی کوتاه یا فرار از دوره تنش (مانند گیاهان یک‌ساله‌ای چون چنگ مریم^۷)، و ج) تحمل که اغلب با کاهش عملکرد همراه است (مانند ذرت، جو و سویا). گونه‌هایی مانند سالیکورنیا و گز نیز به شوری سازگارند.

گیاهان در طول تکامل، راهبردهای دفاعی مختلفی برای مقابله با خشک‌سالی توسعه داده‌اند، از جمله: تنظیم باز شدن روزنه‌ها، تنظیم اسمزی (مانند تجمع مواد محلول برای حفظ فشار سلولی)، سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی (خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد). این مکانیسم‌ها به گیاهان اجازه می‌دهند در برابر خشک‌سالی مقاومت کنند (Saeidnia and Hamid, 2024). اگرچه روش‌های مهندسی ژنتیک برای افزایش تحمل گیاهان به خشک‌سالی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، اما مقررات سختگیرانه، کاربرد عملی آن‌ها در کشاورزی را محدود کرده است. از سوی دیگر، استفاده طولانی‌مدت از آفت‌کش‌ها و کودهای شیمیایی اگرچه در کوتاه‌مدت مؤثرند، اما باعث کاهش کیفیت خاک، تجمع فلزات سنگین و تهدید سلامت انسان و محیط‌زیست می‌شوند. بنابراین، استفاده از عوامل میکروبی به‌عنوان روشی ایمن و سازگار با محیط‌زیست برای بهبود مقاومت گیاهان به خشک‌سالی، اهمیت بالایی دارد. میکروب‌ها با گیاه میزبان رابطه همزیستی متقابل برقرار می‌کنند: گیاه مواد مغذی را تأمین می‌کند و میکروب‌ها با تولید هورمون‌های مهم، سازگاری گیاه با تنش را افزایش می‌دهند (Pavithra and Yapa, 2018). فارچ-های میکوریزا/ با افزایش جذب آب و مواد مغذی از خاک، تولید اسمولیت‌ها (مانند پرولین) و کاهش آسیب اکسیداتیو، به گیاهان در مقابله با خشک‌سالی کمک می‌کنند. باکتری‌های محرک رشد با ترشح فیتوهورمون‌ها (مانند اکسین و

دسترس‌ی به فسفر کم‌متحرک را بهبود می‌بخشند (Mirzaei et al., 2023). باکتری‌هایی مانند ریزوبیوم و آزوسپیریوم^۸ تا ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن تثبیت می‌کنند. کاربرد مداوم (۳-۴ سال) جمعیت میکروبی مفید را احیا کرده، ساختار خاک، pH و ظرفیت نگهداری آب را بهبود می‌بخشد و مصرف کود شیمیایی را تا ۵۰ درصد کاهش می‌دهد. مطالعات میدانی کاربرد ترکیبی را مؤثرتر می‌دانند، اما تأکید می‌کنند که اثربخشی به سازگاری سویه‌ها با شرایط محلی خاک بستگی دارد (Maquén-Perleche et al., 2023). از مزایای برجسته کودهای زیستی، افزایش مقاومت به تنش خشکی است که در مناطق خشک ایران حیاتی است. گیاهان تلقیح‌شده با میکوریزا تا ۳۰ درصد رطوبت بیشتری ذخیره کرده، تخلخل خاک را افزایش و چگالی ظاهری را کاهش می‌دهند.

کودهای زیستی و مدیریت تنش‌های غیرزیستی

خشکی، شوری و تغییرات اقلیمی

خشک‌سالی ۴۵ درصد از کل زمین‌های قابل کشت در دنیا را تحت تأثیر قرار داده و پیامدهای منفی برای سیستم‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی دارد. کمبود آب، چرخه‌های نیتروژن و کربن در اکوسیستم‌ها را مختل می‌کند، که چالشی جدی برای کشاورزی پایدار جهت تأمین امنیت غذایی جمعیت رو به رشد جهان است (AghaKouchak et al., 2021). بروز خشک‌سالی و تنش شوری یک سری از تغییرات را در گیاهان ایجاد می‌کند که از آن جمله می‌توان بر تغییرات فیزیولوژیک و مورفولوژیک اشاره کرد. تأثیرات سلولی و بیوشیمیایی شامل: اختلال در گسترش، تقسیم و تمایز سلولی، کاهش جذب و انتقال مواد مغذی خاک، کاهش فعالیت آنزیم اصلی فرآیند تثبیت کربن^۷ و محدودیت فتوسنتز است. تغییرات مورفولوژیک ایجاد شده در اثر خشکی و تنش شوری شامل: کاهش گسترش برگ، بسته شدن روزنه‌ها و پیری زودرس برگ، کاهش پتانسیل آب در اندام‌های مختلف گیاهی (برگ،

⁷Rubisco

⁸ Anastatica hierochuntica

جیبرلین) و متابولیت‌های دیگر، رشد گیاه را تحت شرایط خشکی تقویت می‌کنند. جنس‌های رایج این باکتری‌ها شامل باسیلوس، پسودوموناس، ریزوبیوم و آزوسپریلیوم است. سیانوباکتری‌ها: گونه‌هایی مانند آنابنا و نوستوک با ترشح ترکیبات فعال زیستی (اسیدهای آمینه، پلی‌ساکاریدها و ویتامین‌ها)، رشد گیاهان تحت تنش خشکی را بهبود می‌بخشند. به عنوان مثال، گیاهان گندمی که بذرها را با سیانوباکتری‌ها تیمار شده‌اند، در مقایسه با گیاهان شاهد، محتوای آب نسبی، کلروفیل و فعالیت فتوسنتزی بالاتری نشان می‌دهند (Sneha et al., 2023). ترکیبات طبیعی مانند تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی، قندها و پلی‌آمین‌ها نیز با بهبود ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، تعادل مواد مغذی و القای ژن‌های پاسخ‌دهنده به خشکی، مقاومت گیاهان را افزایش می‌دهند.

قارچ‌های اندوفیت (ریشه‌زی): همزیستی‌های ریشه‌ای برای مقاومت به بیماری‌ها، تنش‌ها و بهبود رشد

به همه موجوداتی که در اندام‌های گیاهی ساکن می‌شوند و در دوره‌هایی از چرخه زندگی خود می‌توانند بافت‌های داخلی گیاه را بدون ایجاد آسیب آشکار برای میزبان کلونیزه کنند قارچ‌های اندوفیت گفته می‌شود (Kavehnia et al., 2023). این ریزجانداران نقش کلیدی در افزایش مقاومت گیاه به تنش‌های زیستی (بیماری‌زها) و غیرزیستی (مانند خشکی، شوری) دارند. اندوفیت‌ها ممکن است مقادیر فراوانی از ترکیبات با پتانسیل کاربردی در کشاورزی، صنعت و پزشکی مدرن تولید کنند، مانند آنتی‌بیوتیک‌های نوین (Lugdunin, Teixobactin, Odilorhabdin)، ضدقارچ‌ها، سرکوب‌کننده‌های سیستم ایمنی و ترکیبات ضدسرطان. گیاهان دارویی به عنوان مخزنی از اندوفیت‌های قارچی حاوی متابولیت‌های نوین با اهمیت دارویی شناخته شده‌اند. ترکیبات طبیعی متنوع تولید

شده توسط قارچ‌های اندوفیت، دارای ساختارهای منحصر به فرد و فعالیت‌های زیستی چشمگیری هستند که نشان‌دهنده منبع عظیمی با پتانسیل گسترده برای استفاده در پزشکی، کشاورزی و صنعت است. از جمله ترکیبات دیگری که توسط اندوفیت‌ها تولید می‌شود ترکیباتی مانند تاکسول^۹ است که در درمان سرطان پستان استفاده می‌شود (Ashnavar et al., 2022). در پژوهشی با غربالگری ۶۵۰۰ جدایه اندوفیت از گیاهان مختلف مشخص شد که اندوفیت‌های جدا شده از زیستگاه‌های خاص (مانند گیاهان دارویی) فعالیت زیستی بالاتری در مهار جلبک‌ها و علف‌های هرز نشان می‌دهند. گیاهانی مانند خرزمره (*Catharanthus roseus*) و سرخدار (*Taxus spp*) میزبان اندوفیت‌های تولیدکننده ترکیبات ضدسرطان هستند. به عنوان نمونه اندوفیت *Pestalotiopsis microspora* از سرخدار، تاکسول تولید می‌کند.

سه گونه *Talaromyces*، *T. trachyspermus* و *Pseudeurotium ovale* از کلزا *Brassica napus* و گونه *Fusarium napiforme* از ذرت *Zea mays* برای نخستین بار از ایران گزارش شده‌اند. دو گونه *Fusarium* و *Cladosporium cladosporioides* از گاوچاق کن *Lactuca serriola* گونه‌های *Alternaria alternata* و *Podospora anserina* از سویا *Glycine max*، گونه *A. alternata* از گل‌گاوزبان بدل *Nonea annua*، دو گونه *Talaromyces trachyspermus* و *Trametes trogii* از کلزا، گونه *C. cladosporioides* از خربزه وحشی *Cucumis melo* و گونه‌های *Biscogniauxia mediterranea* و *Fusarium incarnatum* از گاوپنبه *Abuthilon theophrasti* گونه *F. napiforme* از ذرت، گونه *Trichoderma sp.* از گشنیز *Coriandrum sativum* و گونه *C. cladosporioides* از تاج خروس *Amaranthus retroflexus*، برای نخستین بار در دنیا از میزبان‌های گیاهی جدید در ایران گزارش شده است. همچنین از سویا

⁹ Taxol

عملکرد آن به اثبات رسیده است می‌توان به *Beauveria bassiana* در گیاه میزبان لوبیا (افزایش رشد، مکانیسم نامشخص)، *Pochonia chlamydosporia* در گیاه میزبان گوجه‌فرنگی (افزایش رشد ریشه و ساقه، کنترل نماتد)، *Serendipita indica* در گیاه *Arabidopsis* (افزایش وزن خشک ریشه و ساقه، هم در حالت انفرادی و هم همراه با ریزوباکتری‌ها)، *Epichloë trembladerae* در هویج (افزایش رشد گیاه، تغییر در ترشحات ریشه برای تقویت همزیستی با قارچ‌های میکوریز آربوسکولار)، *Phoma sp* در گیاه ذرت (افزایش رشد گیاه، توسعه سیستم ریشه)، *Fusarium equiseti* در گیاهان خیار و نخود (کاهش آنتراکنوز و پوسیدگی ریشه، افزایش وزن خشک ساقه خیار) اشاره کرد (Rajini et al., 2020). خلاصه عملکرد قارچ‌های اندوفیت و تأثیر آن‌ها بر گیاه در (جدول ۱) نگاشته شده است.

گونه *Fusarium solani* از کلزا گونه *Fusarium avenaceum* و از ذرت دو گونه *Fusarium brachygibbosum* و *Fusarium fujikuroi* برای نخستین بار در ایران از میزبان‌های گیاهی جدید گزارش شده است (Sima, et al., 2005).

سازوکارهای عمل این قارچ‌ها شامل بهبود جذب آب و مواد مغذی، ترشح هورمون‌های رشد (جبرلیک اسید، اسید ایندول استیک)، متابولیت‌های آنتی‌اکسیدانی، تنظیم بیان ژن‌های مرتبط با خشکی (ژن‌های کدکننده آکواپورین و پروتئین‌های شوک حرارتی) است (Scholz et al., 2023). از گونه‌های مؤثری از این قارچ‌ها که به عنوان کود زیستی تولید و وارد بازار شده است می‌توان به *Rhizophagus irregularis* و گونه‌های شورپسند مانند *Neocamarosporium goegapense* در گیاهان دولپه‌ای اشاره کرد (Bilal et al., 2020). از گونه‌های مهم دیگر قارچ‌های اندوفیت که قابلیت کود زیستی داشته و

جدول ۱- خلاصه عملکرد قارچ‌های اندوفیت و تأثیر بر گیاه

Table 1. Summary of endophytic fungal function and effect on the plant

منابع References	توضیحات Description	موضوع Topic
Schulz et al., 2002	موجوداتی که بدون آسیب به گیاه در بافت‌های داخلی آن زندگی می‌کنند. Organisms that live in the internal tissues of a plant without harming it.	تعریف قارچ‌های اندوفیت Definition of endophytic fungi
Kavehnia et al., 2023	تبادل مواد مغذی و ایجاد تحمل در برابر تنش‌ها Nutrient exchange and stress tolerance	همزیستی با گیاه Symbiosis with plants
Nazari et al., 2021	مقاومت به خشکی، شوری و بیماری‌زها Resistance to drought, salinity and pathogens	نقش در تنش‌زدایی Role in de-escalation
Ashnavar et al., 2022	آنتی‌بیوتیک‌ها، ضد سرطان، ایمونوساپرسانت‌ها مانند تاکسول Antibiotics, anticancer drugs, immunosuppressants such as Taxol	تولید ترکیبات زیستی Production of biological compounds
Schulz et al., 2002	گیاهان دارویی مانند خرزهره و سرخدار Medicinal plants such as oleander and yew	منابع اندوفیت‌های دارویی Sources of medicinal endophytes
Sima et al., 2005	<i>Piriformospora indica</i> , <i>Epichloë spp</i> , <i>Fusarium spp</i> , <i>Talaromyces spp</i>	گونه‌های کلیدی Key species
Scholz et al., 2023	ترشح هورمون رشد، آنتی‌اکسیدان‌ها، تنظیم ژن‌های مرتبط با تنش تنش Growth hormone secretion, antioxidants, regulation of stress-related genes	مکانیزم‌های عملکرد Mechanisms of action

مایکوریزا: پل ارتباطی بین گیاه و خاک برای جذب بهینه مواد مغذی

چهار گروه اصلی مایکوریزا شامل اکتومایکوریزا (*EcM*)، مایکوریزا آربوسکولار (*AMF*)، مایکوریزا ارکیده (*OrM*) و مایکوریزا رودودندرون (*ErM*) هستند. تلقیح مایکوریزا منجر به بهبود جذب آب و مواد مغذی، افزایش نرخ فتوسنتز، تنظیم فشار اسمزی و افزایش تحمل به خشکی می‌شود. این قارچ‌ها کربوهیدرات‌ها را از گیاه دریافت می‌کنند و در عوض مواد معدنی را به گیاه تحویل می‌دهند. شبکه هیف‌های قارچی^{۱۰} چرخه مواد مغذی، ذخیره کربن، و تشکیل خاکدانه‌ها را بهبود می‌بخشد (Sepasi et al., 2024). فرآیند قارچ‌های آربوسکولار مایکوریزا برای بهبود رشد در سویا و ذرت شامل بهبود معماری ریشه و کارایی مصرف آب، کاهش آسیب اکسیداتیو و تنظیم هورمون‌های درونزا (Pavithra and Yapa, 2018)، القای بیان ژن‌های آکوپورین (*GintAQPF1/2*)، پروتئین^{۱۱} LEA و ژن‌های بیوستنز پرولین تحت تنش خشکی، تعدیل سطح اسید آبسزیک اسید و کاهش بیان ژن‌های ۳-۱۴ GF و IPS برای حفظ آب سلولی در ذرت است. مشابه این فرآیند در تنباکو، لیلیکی ایرانی و کینوا نیز دیده شده است (Rostami et al., 2024). قارچ‌های مایکوریزا با افزایش جذب عناصر کم‌مصرف و کاهش نیاز به کودهای شیمیایی، به پایداری بلند مدت خاک کمک می‌کنند. ترشحات هیف‌های این قارچ‌ها و همکاری با میکروبیوم هیفوسفر، تجزیه مواد آلی و معدنی را تسهیل می‌کند. انتقال کربن از گیاه به خاک از طریق هیف‌های قارچی، ترسیب کربن در خاک را افزایش می‌دهد و در کاهش تغییرات اقلیمی مؤثر است (Sepasi et al., 2024). شبکه‌های هیف‌های این قارچ‌ها با ایجاد چسبندگی بین ذرات خاک، از فرسایش و فشردگی خاک جلوگیری می‌کنند.

قارچ‌های میکوریز آربوسکولار نقش مهمی در جذب و انتقال مواد مغذی در سیستم‌های خاک-گیاه ایفا

می‌کنند. این کودهای زیستی به‌طور قابل‌توجهی کارایی استفاده از فسفر و کارایی استفاده از نیتروژن را افزایش می‌دهند. به‌ویژه، کودهای زیستی دارای هر دو ویژگی تثبیت نیتروژن و حل‌کنندگی فسفر، بیشترین پتانسیل را برای بهبود عملکرد محصول نشان می‌دهند. جالب توجه است که قارچ‌های میکوریز آربوسکولار، به عنوان گروهی از ریزجانداران خاک که همزیستی متقابلی با اکثر گیاهان خشکی برقرار می‌کنند، به دلیل توانایی خود در بهبود جذب مواد مغذی گیاه و مقاومت به تنش‌های غیرزیستی مختلف مانند خشکی شناخته شده‌اند (Negi et al., 2023). این قارچ‌ها ساختارهای آربوسکول را در سلول‌های پوستی ریشه گیاهان میزبان خود تشکیل می‌دهند که در آن مواد معدنی غیرآلی، به‌ویژه فسفر و ترکیبات کربن را مبادله می‌کنند. با وجود فراوانی و طیف گسترده روابط آن‌ها با گونه‌های گیاهی، تنها حدود ۲۴۰ گونه در شاخه *Glomeromycota* توصیف شده‌اند.

کشاورزی فشرده (استفاده بیش از حد از کودهای معدنی نیتروژن و فسفر، تک‌کشتی، شخم زدن مستمر، و مصرف آفت‌کش‌ها) سبب کاهش فراوانی و تنوع جوامع میکوریزا می‌شود (Babalola et al., 2022). در مقابل استفاده از کودهای آلی، مصرف متعادل کودهای فسفره و تنوع کشت شرایط مطلوبی را برای قارچ‌های میکوریزا فراهم می‌کند. اندازه‌گیری‌های میدانی نشان می‌دهند که پارامترهای AMF مانند تراکم اسپور، زیست‌توده، کلونیزاسیون ریشه، و نشانگرهای زیستی (اغلب ارتباط مستقیمی با عملکرد محصول ندارند. این موضوع به بحث درباره اهمیت میکوریزا در افزایش عملکرد محصولات و مناسب بودن روش‌های ارزیابی کنونی دامن زده است. تحلیل‌های اخیر حاکی از آن است که مایه‌زنی قارچ‌های میکوریزا در مزارع می‌تواند باعث افزایش عملکرد غلات شود، اما این اثر در مطالعاتی که از مایه‌زنی استفاده نشده، کم‌رنگ‌تر است. آزمایش‌های مزرعه‌ای در ایران و سوئیس نشان داده است که واکنش رشد ذرت به مایه‌زنی قارچ‌های

^{۱۱}پروتئین‌های تجمع‌کننده در اواخر دوره جنینی

^{۱۰}mycelium

پروتئین‌های گلوبالین^{۱۲} گروهی از پروتئین‌های مقاوم به حرارت و گلیکوپروتئین‌ها هستند که عمدتاً توسط قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار تولید می‌شوند. این پروتئین‌ها در دیواره هیف‌ها و اسپوره‌های قارچی ذخیره شده و پس از مرگ قارچ، به خاک آزاد می‌شوند. این پروتئین‌ها سالانه ۰/۹ تا ۵/۷ مگاگرم در هکتار تولید شده و از ۶ تا ۴۲ سال در خاک باقی می‌مانند. در خاک‌های مرتعی و جنگلی، آربوسکولار میکوریزا با افزایش کربن آلی خاک، ماکرواگرگیت‌ها و سطح پروتئین‌های گلوبالین مرتبط است، اما این ارتباط در خاک‌های زراعی ضعیف‌تر است (Mao et al., 2019). این یافته‌ها نشان می‌دهند آربوسکولار میکوریزا نه تنها در جذب مواد مغذی، بلکه در ترسیب کربن و کاهش تغییرات اقلیمی نقش کلیدی ایفا می‌کنند. ریشه گیاهان و AMF از عوامل اصلی تشکیل خاکدانه‌ها هستند. در مناطق نفوذ گسترده ریشه (مثل زمین‌های کشاورزی)، تأثیر ریشه‌ها بر تشکیل خاکدانه‌ها ممکن است قوی‌تر از آربوسکولار میکوریزا باشد. در مناطق بدون ریشه (خارج از ناحیه ریشه)، نقش آربوسکولار میکوریزا در تشکیل خاکدانه‌ها پررنگ‌تر است (Ziaean et al., 2020). خلاصه‌ای از برخی کارکردهای قارچ‌های میکوریزا بر رشد گیاهان در (جدول ۲) نگاشته شده است.

میکوریزا بین ۱۲ درصد کاهش تا ۴۰ درصد افزایش متغیر است که با فراوانی قارچ‌های بیماری‌زا مرتبط است (Lutz et al., 2023).

قارچ‌های میکوریزا سالانه حدود ۳۶ درصد از انتشار دی اکسیدکربن (CO₂) ناشی از سوخت‌های فسیلی را از طریق تخصیص کربن به شبکه زیرزمینی هیف‌های خود جذب می‌کنند (Hawkins et al., 2023). ورودی کربن به خاک توسط قارچ‌های میکوریزا از طریق منابعی مانند: بقایای گیاهی، ترشحات ریشه، هیف‌ها، ترشحات بقایای قارچی، پروتئین‌های گلوبالین، میکروب‌های مرتبط با هیف‌ها افزایش می‌یابد و به تشکیل مواد آلی معدنی شده کمک می‌کند. سازوکار ترسیب کربن توسط آربوسکولار میکوریزا شامل افزایش ترشحات ریشه‌ای است. گیاهان میکوریزایی مانند گوجه‌فرنگی و ذرت، به ترتیب ۳۳ درصد و ۴۷ درصد ریزودپوزیسیون بیشتری دارند (Zhao et al., 2019). تجزیه بقایای آلی؛ آربوسکولار میکوریزا در بیشتر موارد تجزیه بقایای آلی و آزادسازی نیتروژن را تسریع می‌کنند، ترشحات هیف‌ها (قندها، کربوکسیلات‌ها و اسیدهای آمینه) با مواد معدنی خاک ترکیب شده و مواد آلی معدنی شده تشکیل می‌دهند (Liang et al., 2017).

جدول ۲- خلاصه‌ای از برخی کارکردهای قارچ‌های میکوریزا بر رشد گیاه

Table 2 - Summary of some functions of mycorrhizal fungi on plant growth

منابع References	اثرات اصلی Main effects	سازوکارها Mechanisms	دسته‌بندی Category
Sepasi et al., 2024	افزایش جذب فسفر و نیتروژن، کاهش نیاز به کود شیمیایی Increased absorption of phosphorus and nitrogen, reducing the need for chemical fertilizers	گسترش شبکه هیف‌ها برای انتقال P، N و عناصر کم‌مصرف Expansion of hyphal networks for the transport of P, N and trace elements	جذب مواد مغذی Absorption of nutrients
Pavithra and Yapa, 2018	افزایش تحمل به کم‌آبی، بهبود کارایی مصرف آب Increased tolerance to water deficit, improved water use efficiency	تنظیم فشار اسمزی، القای بیان ژن‌های آکوابورین، تنظیم ABA و ژن‌های LEA Regulation of osmotic pressure, induction of aquaporin gene expression, regulation of ABA and LEA genes	بهبود مقاومت به خشکی Improved drought resistance
Sepasi et al., 2024	بهبود تخلخل خاک، تثبیت کربن، کاهش فرسایش Improve soil porosity, carbon fixation, reduce erosion	تشکیل خاکدانه‌ها، انتقال کربن به خاک، سنتز GRSP Aggregate formation, carbon transfer to soil, GRSP synthesis	ساختار خاک و ترسیب کربن Soil structure and carbon sequestration
Lutz et al., 2023	افزایش کارآمدی مایه‌زنی و عملکرد محصول Increasing inoculation efficiency and crop yield	تعامل با باکتری‌ها و قارچ‌های دیگر در اطراف هیف Interaction with other bacteria and fungi around hyphae	تعادل میکروبیوم هیفوسفر Hyfosphere microbiome balance
Ali et al., 2020	بهبود مدیریت N و P، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای Improving N and P management, reducing emissions	کاهش اتلاف NO_3^- و P، کاهش انتشار N_2O Reduce NO_3^- and P losses, reduce N_2O emissions	کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای Reducing greenhouse gas emissions
Babalola et al., 2022	حفظ فراوانی AMF، پایداری بلندمدت خاک Maintaining AMF abundance, long-term soil stability	تأثیر تنوع کشت و مصرف کودها بر AMF The effect of crop diversity and fertilizer use on AMF	تنوع زیستی و مدیریت زراعی Biodiversity and crop management

تریکودرما: سربازان نامرئی کنترل زیستی در خاک

قارچ‌های تریکودرما علاوه بر ترشح متابولیت‌های ثانویه، آنزیم‌های هیدرولیتیک نیز تولید می‌کنند که ساختار گیاه (تحریک رشد ریشه و ریشه‌چه‌ها، تقویت دیواره سلولی، افزایش محتوای کلروفیل، افزایش ضخامت و استحکام ساقه، فعال‌سازی مسیرهای سیگنال‌دهی دفاعی گیاه) را بهبود می‌بخشند. گزارش شده است که قارچ *Trichoderma fungalis* با گونه‌های گیاهی رابطه همزیستی برقرار می‌کند. در پژوهش دیگری نیز مشخص گردید که گونه *Trichoderma spp* طول ریشه و ساقه گوجه‌فرنگی را به ترتیب به میزان ۵۴ و ۴۵/۵ درصد، و نیز وزن خشک ریشه و ساقه، به ترتیب به میزان ۸۰ و ۶۰ درصد در مقایسه با شاهد سالم افزایش داده است (Heidarzadeh et al., 2016).

پراکنش و استقرار سویه‌های تریکودرما عمدتاً تحت تأثیر مؤلفه‌های زیست‌محیطی مانند pH، رطوبت، دمای خاک، ماده آلی، تهویه خاک، محتویات مغذی و انواع گیاهان قرار می‌گیرد. تریکودرما هارزیانوم از جمله قارچ‌های گونه تریکودرما است که یک قارچ غیرجنسی فراگیر است و به عنوان عامل کنترل بیولوژیک علیه چندین قارچ بیماری‌زای گیاهی به کار می‌رود. استقرار این قارچ در ریشه، رشد ریشه و کل گیاه کاکائو را تقویت کرده و در نتیجه بهره‌وری و عملکرد آن را افزایش می‌دهد (Akbari et al., 2024). این قارچ همچنین با تقویت ظرفیت آنتی-اکسیدانی گیاهان برای خشتی‌سازی بهتر گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و افزایش فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیلایز (PAL)، اثرات منفی تنش کم‌آبی را کاهش می‌دهد. تریکودرما با افزایش جذب مواد مغذی و آب، تنظیم فیتوهورمون‌ها (مانند اتیلن، اسید آبسزیک، سیتوکینین،

اکسین، جیبرلین و زآتین) و فعال‌سازی مواد مغذی خاک از طریق ترشح آنزیم‌های خارج سلولی (مانند فسفاتاز، اوره‌آز و سوکراز) رشد گیاه را در تمام مراحل بهبود می‌بخشد. این قارچ به گیاهان کمک می‌کند تا در برابر تنش‌های زیستی (آفات و بیماری‌زها) و غیرزیستی (شوری، دماهای بالا و پایین، خشکی، فلزات سنگین و غیره) مقاومت کنند. همچنین در کنترل عوامل بیماری‌زای گیاهی مانند *Rhizoctonia*, *Fusarium*, *Pythium* و *Phytophthora* و غیره مؤثر است. در پژوهشی کاربرد پیش‌گیرانه گونه‌های بومی تریکودرما یعنی (*arviridae*, *virens.harzianum*) به صورت اسپور پاشی دو روز پیش از آلودگی مصنوعی فوزاریوم به‌طور معنی‌داری موجب کاهش درصد و شدت آلودگی فوزاریوم سنبله و افزایش وزن هزار دانه در گندم شد و به‌عنوان راهکاری مؤثر در مدیریت زیستی این بیماری شناخته گردید (Baghani et al., 2012).

Trichoderma بیان ژن‌های مرتبط با دفاع گیاه (مانند ژن‌های PR و مهارکننده‌های پروتئاز) را افزایش می‌دهد. در کل، انتقال ژن‌های خاص از تریکودرما به گیاهان (مثل آکوپورین‌ها) مقاومت به تنش‌ها را بهبود می‌بخشد. به عنوان مثال گونه بومی ایرانی تریکودرما هارزیانوم به‌طور معنی‌داری ($P \leq 0/5$)، درصد وقوع (۸/۳) و شدت (۴/۱) بیماری پوسیدگی ریشه گندم، را ۳۵ روز پس از تلقیح کاهش و وزن هزار دانه (۳۸ گرم) را نسبت به تیمار شاهد در شرایط گلخانه‌ای افزایش داد. این قارچ با حل کردن مواد معدنی در خاک، دسترسی گیاهان به مواد مغذی مانند آهن، فسفر و نیتروژن و برخی ریز مغزی‌ها را افزایش می‌دهد و موجب افزایش درصد جوانه‌زنی بذرها می‌شود.

قارچ تریکودرما با افزایش تولید اسید ایندول استیک، رشد ریشه و وزن خشک را افزایش می‌دهد. از طریق افزایش جذب پتاسیم و کاهش جذب سدیم موجب کاهش مرگ گیاهچه‌ها می‌شود (Taufiq and

Yusnawan, 2020). گونه تریکودرما هارزیانوم با کاهش تولید مالون‌دی‌آلدئید (MDA) و افزایش تولید و فعالیت کاتالاز (CAT) و گونه تریکودرما *citrinoviride* با کاهش تولید H_2O_2 و افزایش فعالیت سوپراکسید دیسموتاز (SOD) موجب کاهش تنش اکسیداسیونی در گیاهان می‌شوند (Yasmeen and Shaheed Siddiqui, 2017,). گزارش شده است که گونه‌های مختلف تریکودرما نظیر *viride* در خاک‌های شور موجب افزایش تولید کلروفیل و آنتوسیانین، بهبود جذب آب و عناصر غذایی می‌شوند (Soliman et al., 2020). تریکودرما *asperellum* موجب کنترل فوزاریوم^{۱۳} و رایزوکتینیا^{۱۴} در خاک‌های شور می‌شود.

سازوکار ایجاد آسیب برای گیاهان در اثر خشکسالی شامل: کاهش پتانسیل آب برگ و بسته شدن روزنه‌ها (اختلال در فتوسنتز و تنفس)؛ تغییر ساختار خاک (محدودیت در نفوذ ریشه و جذب آب و مواد مغذی) و آسیب اکسیداتیو به سلول‌های گیاهی (افزایش گونه‌های اکسیژن فعال) است. قارچ‌های تریکودرما برای مبارزه با خشکسالی از طریق افزایش رشد ریشه (دسترسی بهتر به آب و عناصر غذایی) (Rawal et al., 2022)، افزایش کارایی مصرف آب (جلوگیری از هدر رفت آب به واسطه توسعه محیط جذب آب و افزایش خلل و فرج)؛ افزایش فعالیت آنزیم‌های CAT، SOD موجب تنظیم آنتی‌اکسیدان‌ها شده و گونه‌های فعال اکسیژن، پراکسیداز (POD) و مالون‌دی‌آلدئید^{۱۵} (MDA) کاهش می‌یابد (Pehlivan et al., 2018). تریکودرما با تنظیم هورمون‌های گیاهی از طریق کاهش تولید ABA (هورمون تنش) و افزایش تولید اکسین (IAA) موجب بهبود رشد گیاه می‌شود (Khoshmanzar et al., 2020). خلاصه‌ای از عملکرد گونه‌های مختلف قارچ‌های تریکودرما بر رشد گیاهان در (جدول ۳) نگاشته شده است.

^{۱۵}محصول نهایی و شاخص تجزیه اکسیداتیو لیپیدهای (چربی‌های) غشای سلولی بر اثر حمله ROS است.

^{۱۳}*Fusarium*
^{۱۴}*Rhizoctonia*

جدول ۳- خلاصه‌ای از عملکرد گونه‌های مختلف قارچ‌های تریکودرما بر رشد گیاه

Table 3 - Summary of the effect of different species of *Trichoderma* fungi on plant growth

منابع نمونه Sample Sources	اثرات اصلی Main Effects	سازوکارها Mechanisms	دسته‌بندی Category
Heidarzadeh et al., 2016	افزایش رشد ریشه، کلروفیل، ضخامت ساقه، زیست‌توده Increase root growth, chlorophyll, stem thickness, biomass	ترشح متابولیت‌های ثانویه، آنزیم‌های هیدرولیتیک Secretion of secondary metabolites, hydrolytic enzymes	تحریک رشد گیاه Plant growth stimulation
Yang et al., 2021; Akbari et al., 2024; Heidarzadeh et al., 2016	افزایش مقاومت به خشکی، افزایش پرولین، رشد تحت تنش Increase drought resistance, increase proline, growth under stress	کاهش ROS، افزایش کارایی مصرف آب، تنظیم هورمون‌ها Reduction of ROS, increase in water use efficiency, regulation of hormones	تنش خشکی Drought stress
Yasmeen and Siddiqui, 2017	کاهش مرگ گیاهچه، بهبود کلروفیل، کنترل قارچ‌های بیماری‌زا Reduce seedling death, improve chlorophyll, control pathogenic fungi	افزایش جذب K^+ ، کاهش جذب Na^+ ، کاهش MDA، افزایش آنزیم‌های آنتی-اکسیدانی Increase in K^+ absorption, decrease in Na^+ absorption, decrease in MDA, increase in antioxidant enzymes	تنش شوری Salinity stress
Baghani et al., 2012	مهار <i>Rhizoctonia</i> ، <i>Fusarium</i> ، افزایش عملکرد گندم Suppress <i>Fusarium</i> , <i>Rhizoctonia</i> , increase wheat yield	تولید آنزیم‌های هیدرولیتیک، متابولیت‌های آنتی‌بیوتیکی Production of hydrolytic enzymes, antibiotic metabolites	کنترل زیستی پاتوژن‌ها Biological control of pathogens
Baghani et al., 2012	تنظیم رشد و مقاومت به تنش Regulate growth and stress resistance	تنظیم ET، JA، IAA، ABA، افزایش زاتین و جیبرلین Regulation of ABA, IAA, JA, ET, increase in zeatin and gibberellin	تنظیم فیتوهورمون‌ها Regulation of phytohormones
Rawal et al., 2022	افزایش جذب N، P، Fe و بهبود جوانه‌زنی Increase N, P, Fe absorption and improve germination	ترشح آنزیم‌های فسفاتاز، اوره‌از، سوکراز Secretion of phosphatase, urease, sucrose enzymes	افزایش جذب عناصر غذایی Increase in nutrient uptake
Akbari et al., 2024	افزایش مقاومت به بیماری و تنش Increase disease and stress resistance	هم‌افزایی در بهبود مقاومت و زیست‌توده Synergy in improving resistance and biomass	هم‌زیستی با میکوریزا Symbiosis with mycorrhiza

محرك رشد گیاه نظیر *ازتوباکتر* علاوه بر تثبیت نیتروژن، با انحلال فسفات‌های نامحلول، تولید هورمون‌های گیاهی مثل ایندول استیک اسید، هیدروژن سیانید، و سیدروفور موجب افزایش شاخص‌های رشد گیاه، جذب عناصر غذایی و عملکرد دانه گیاه برنج می‌گردند (Alikhani, et al., 2022).

یکی از مهم‌ترین نقش‌های باکتری‌های محرك رشد، تعدیل شبکه هورمونی گیاه در شرایط تنش است. این باکتری‌ها با کاهش سطح ACC (پیش‌ساز اتیلن)، تولید سیتوکینین‌ها و تنظیم تعادل (اسید آبسزیک (ABA))، موجب بهبود باز و بسته‌شدن روزنه‌ها، حفظ پتانسیل آب برگ و افزایش کارایی فتوسنتز می‌شوند. در این چهارچوب، سویه‌هایی نظیر *Bacillus subtilis*

باکتری‌های محرك رشد؛ از تثبیت نیتروژن تا

تنظیم شبکه‌های هورمونی و تنش

باکتری‌های محرك رشد ریزوسفری با کلونیزه کردن ریشه، ریزوسفر یا حتی اندام‌های هوایی گیاهان و سازوکارها شامل تثبیت نیتروژن، حل عناصر غذایی کم‌تحرک، تولید فیتوهورمون‌ها، سنتز سیدروفورها، آنزیم ACC دامیناز، ترکیبات ضدپاتوژن و تنظیم پاسخ‌های آنتی‌اکسیدانی رشد گیاه را بهبود می‌بخشد (Upadhyay, et al., 2022). از ارکان کلیدی گذار از کشاورزی نهادمحور به کشاورزی پایدار محسوب می‌شوند. به طوریکه علیخانی و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهش‌های خود نتیجه گرفتند که باکتری‌های

افزایش جذب آهن و رقابت با پاتوژن‌ها، سلامت گیاه را بهبود می‌بخشد (Czarnes et al., 2020). در پسته، سویه‌های سیدروفورزا توانسته‌اند شاخص‌های فتوسنتزی و ترکیبات فنولی را به‌طور معنی‌داری افزایش دهند (Bahraminejad et al., 2023). خلاصه‌ای از عملکرد برخی باکتری‌های محرک رشد در گیاه در (جدول ۴) نشان داده شده است. ویرایش ژنی با CRISPR-Cas9 و مهندسی متابولیک امکان افزایش تولید هورمون‌ها و بازده تثبیت نیتروژن را فراهم کرده است. با این حال، چالش‌های زیست‌محیطی، ایمنی زیستی و پذیرش مقرراتی این فناوری‌ها نباید نادیده گرفته شود.

Azospirillum و *Pseudomonas fluorescens* *brasilense* نه تنها رشد گیاه را تقویت می‌کنند، بلکه با فعال‌سازی مسیرهای دفاعی القایی، اثرات غیرمستقیم بر کاهش خسارت آفات نیز دارند؛ به طوری که در خیار، کاهش معنی‌دار باروری و طول عمر کنه تارتن دولکه‌ای گزارش شده است (Darini et al., 2025). در پژوهش دیگری استفاده از کود زیستی باکتری *سودوموناس فلورسنس* محرک رشد گیاه با توانایی حل‌پذیری فسفات‌های نامحلول در همه صفات، عملکرد بهتری از گیاه شاهد نشان داده است (Shariati et al., 2017). گزارش شده است که استفاده از حامل‌های حاوی مواد آلی بالا مانند ورمی‌کمپوست می‌تواند بقای باکتری را افزایش داده و منجر به بهبود کارایی مایه تلقیح بیولوژیک شود.

در یک مطالعه روی آفتابگردان سویه‌های مختلف *Pseudomonas* و *Bacillus* از خاک‌های ایران جدا و نشان داده شد که این باکتری‌ها باعث افزایش طول و وزن اندام‌های گیاهی می‌شوند (Sedri et al., 2022). در گندم‌های دیم نیز، کاربرد تجاری باکتری‌های محرک رشد مانند *Nitroxin* و *Nitrokarra* همراه با مدیریت مصرف کودهای شیمیایی منجر به افزایش عملکرد و کیفیت دانه شد، ضمن اینکه امکان کاهش مصرف نیتروژن، فسفر و روی را نیز فراهم کرد (Sedri et al., 2022). علاوه بر این، تلقیح بذر گندم با باکتری‌های *Azotobacter chroococcum*، *Azospirillum brasilense* و *Pseudomonas putida* تحت تنش شوری باعث بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شد. باکتری‌هایی نظیر *Rhizobium*، *Mesorhizobium* و *Burkholderia* سالانه سهم قابل توجهی از نیتروژن خاک را تأمین می‌کنند. همچنین، باکتری‌های حل‌کننده فسفر و پتاسیم از طریق ترشح اسیدهای آلی، قابلیت جذب این عناصر را افزایش داده و نیاز به کودهای شیمیایی را تا حدود ۲۵-۳۰ درصد کاهش می‌دهند (Adnan et al., 2025). تولید سیدروفورها توسط *Pseudomonas* و *Bacillus* با

جدول ۴- خلاصه‌ای از عملکرد برخی باکتری‌های محرک رشد (PGPR) در گیاه

Table 4. Summary of the function of some plant growth promoting bacteria (PGPR) in plants

منابع References	اثرات اصلی Main effects	گونه‌های نمونه Example species	مکانیسم‌ها Mechanisms	دسته‌بندی Classification
Sheoran., et al., 2021	تبدیل N_2 به NH_4^+ ؛ کاهش ۵۰-۱۶٪ نیاز به کود ازتی Convert N_2 to NH_4^+ ; Reduce nitrogen fertilizer requirement by 16-50%	Rhizobium, Mesorhizobium, Burkholderia	نیتروژناز (نیتروژن هوازی) Nitrogenase (aerobic nitrogenase)	تثبیت نیتروژن Nitrogen fixation
Adnan et al., 2025; Breedt et al., 2025	افزایش جذب P و K تا ۲۵-۳۰٪ مصرف کود شیمیایی Increase P and K uptake by 25-30%; Reduce chemical fertilizer usage	Pseudomonas, Bacillus, Enterobacter, Paenibacillus	ترشح اسیدهای آلی (گلوکونیک، کتوگلو تاریک، اگزالات، سیتریک) Excretion of organic acids (gluconic, ketoglutaric, oxalate, citric)	انحلال پذیری فسفر و پتاسیم Phosphorus and potassium solubility
Upadhyay et al., 2022	تحریک رشد ریشه و شاخساره؛ کاهش اتیلن تنش-زا Stimulate root and shoot growth; Reduce stress-inducing ethylene	Bacillus subtilis, Azospirillum brasilense	اکسین (IAA)، جیبرلین، ACC سیتوکینین؛ آنزیم ACC دی‌آمیناز Auxin (IAA), gibberellin, cytokinin; ACC deaminase enzyme	تولید فیتوهورمون-ها Phytohormone production
Bahraminejad et al., 2023; Khoshru et al., 2020	بهبود جذب Fe؛ افزایش رنگ‌دانه‌ها و فعالیت فتوسنتز Improved Fe uptake; Increase pigments and photosynthetic activity	Pseudomonas, Bacillus, Enterobacter cloacae	تولید مولکول‌های کم-جرم برای کمپلکس‌سازی Fe^{3+} Production of low-mass molecules for Fe^{3+} complexation	سیدروفور و جذب آهن Siderophore and iron uptake
Kumar et al., 2010; Fouzia et al., 2015	مهار پاتوژن‌های خاکریزی و پوسیدگی ریشه Suppress soil-borne pathogens and root rot	Pseudomonas fluorescens, Sinorhizobium fredii	تولید آنتی‌بیوتیک‌ها (۲،۴-DAPG، HCN) آنزیم‌های ضدقارچ Production of antibiotics (2,4-DAPG, (HCN, antifungal enzymes)	کنترل بیماری‌ها Disease control
Meena et al., 2016; Hou et al., 2018	تقویت تحمل خشکی، شوری و آلودگی؛ حفظ رطوبت و سلامت سلولی Enhance drought, salinity, and pollution tolerance; Maintain moisture and cellular health	B. amyloliquefaciens, B. musilagenosus, Actinobacteria + نانوذرات	افزایش آنزیم‌های آنتی-اکسیدانی (POD، SOD، EPS)، تجزیه آفت‌کش‌ها Increase in antioxidant enzymes (POD, SOD), EPS, degradation of pesticides	مقاومت به تنش‌ها Stress resistance

کودهای زیستی در ایران

سابقه تاریخی تولید و مصرف کودهای زیستی در ایران تولید و مصرف کودهای زیستی در کشور ایران بیش از دو دهه است که شروع شده و هر سال نیز شتاب بیشتری می‌گیرد. سابقه مصرف کود زیستی در ایران به سال ۱۳۴۰ بازمی‌گردد. با این حال، اولین گام مؤثر در ایران برای تولید و استفاده از کودهای زیستی مربوط به سال ۱۳۷۵ و به ایجاد بخش تحقیقات بیولوژی خاک در مؤسسه تحقیقات آب و خاک مرتبط است. در سال ۱۳۸۰ کود زیستی ریزوبیوم برای تلقیح سویا تولید و به بخش خصوصی واگذار گردید (Khosravi, 2022). در ادامه و در قالب برنامه‌های مؤسسه تحقیقات خاک و آب، تولید و عرضه محصولات مبتنی بر باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن، حل‌کننده فسفات و آهن، و تولیدکننده فیتوهورمون‌ها شکل گرفت. سهم کودهای زیستی از مصرف سالانه حدود ۳-۵ میلیون تن کود شیمیایی کشور همچنان کمتر از ۵ درصد برآورد می‌شود؛ رقمی که نشان‌دهنده شکاف عمیق میان سطح پژوهش‌های دانشگاهی و عرضه واقعی محصولات در بازار است. در سامانه جامع مواد کودی کشور (<https://www.kswri.ir>) بیش از ۱۶۰ نوع کود زیستی مایع و جامد ثبت رسمی شده است که وارد بازار و مصرف توسط کشاورزان شده‌اند.

سم و بهبوددهنده‌های رشد گیاه اقدام کند (<https://bbk.com/iran.com/content/17074>). طبق گزارش‌های بخش تحقیقات موسسه خاک و آب هفت استاندارد ملی در این زمینه تدوین شده است. این استانداردها شامل ۱- کودهای زیستی - به شماره استاندارد ۲۲۳۰۰، ۲- کودهای زیستی مایه تلقیح‌های حاوی باکتری‌های حل‌کننده فسفات - ویژگی‌ها و روش‌های آزمون به شماره استاندارد ۲۲۳۰۱، ۳- کودهای زیستی حاوی باکتری‌های ریزوبیوم - ویژگی‌ها و روش‌های آزمون به شماره استاندارد ۲۲۳۰۲، ۴- کودهای زیستی مایه تلقیح‌های حاوی کمپوست ساز - ویژگی‌ها و روش‌های آزمون به شماره استاندارد ۲۲۳۰۳، ۵- کودهای زیستی مایه تلقیح‌های حاوی قارچ‌های میکوریز آربسکولار - ویژگی‌ها و روش‌های آزمون به شماره استاندارد ۲۲۳۰۴، ۶- کودهای زیستی حاوی ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه - ویژگی‌ها و روش‌های آزمون به شماره استاندارد ۲۲۳۰۵، ۷- کودهای زیستی حاوی باکتری‌های تیوباسیلوس - ویژگی‌ها و روش‌های آزمون به شماره استاندارد ۲۲۳۰۶. فایل کامل این استانداردها در سایت سازمان ملی استاندارد (<http://standard.isiri.gov.ir>) در دسترس است.

وضعیت انتشارات علمی در حوزه کودهای زیستی

در ایران

در طی سال‌های اخیر طبق (شکل ۲) تا سال ۱۴۰۳ تعداد ۹۳۳ عنوان مقاله پژوهشی در حوزه کشاورزی و منابع طبیعی که در آن از کلمه کود زیستی استفاده شده به چاپ رسیده است (Magiran). همچنین در پایگاه داده Scince Direct نیز تعداد ۶۲ عنوان مقاله با موضوع کود زیستی^{۱۶} که در کشور ایران اجرا شده و در این پایگاه به چاپ رسیده است، مشاهده شد (شکل ۲). گرچه روند رشد تحقیق بر روی کودهای زیستی در کشور ما نیز مشهود است، اما این تحقیقات نسبت به کشورهای مطرح دیگر مانند هند، چین و آمریکا در رتبه‌های بسیار پایین‌تری است. در

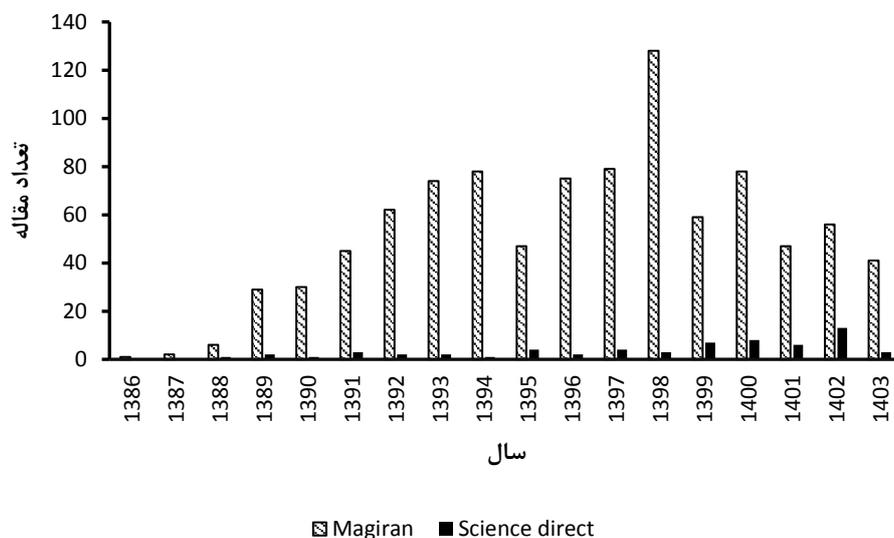
استانداردسازی کودهای زیستی در ایران

در این راستا و در سال‌های اخیر، با رأی نمایندگان مجلس شورای اسلامی، سازمان ملی استاندارد مکلف به تهیه استاندارد انواع کود، آفت‌کش‌ها و بهبوددهنده‌های رشد گیاه شد. بر اساس ماده ۹ اصلاح شده این لایحه، با هدف حفظ و پایداری حاصلخیزی انواع خاک و بهینه‌سازی تولید و مصرف انواع کود، آفت‌کش‌ها، سموم و بهبوددهنده‌های رشد گیاه، سازمان ملی استاندارد مکلف است که با همکاری وزارت بهداشت و درمان، سازمان حفاظت نسبت به تدوین استاندارد انواع کود، آفت‌کش‌ها،

^{۱۶}Biofertilizer

یافت شد. در مورد آفت‌کش‌های زیستی نیز متأسفانه مطالعات محدودی در این زمینه به چاپ رسیده است.

جستجوی همین عبارت برای کشور چین، هند و آمریکا به ترتیب ۴۲۰۰، ۴۶۰۰ و ۴۰۰۰ مقاله در همین بازه زمانی



شکل ۲- نمودار فراوانی مقالات مرتبط با موضوع کود زیستی در پایگاه‌های داده Magiran و Sciencedirect با محور ایران
Figure 3 - Frequency chart of articles related to the topic of biofertilizer in the Magiran and Sciencedirect databases with a focus on Iran

در مراحل مختلف رشد) موجب افزایش معنی‌دار درصد اسانس تا ۲/۲۳ درصد بازده تیمول تا ۷۴/۵۹ درصد در گیاه مرزه سهندی شد. همچنین، این کودهای زیستی با بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، سوپراکسید دسموتاز) و افزایش ترکیبات تنظیم‌کننده اسمزی (پرولین و فنل)، اثرات منفی تنش خشکی را کاهش داده و عملکرد سرشاخه گلدار و تولید اسانس را حتی در شرایط کم‌آبی بهینه کردند (Zakerian et al., 2025). استفاده از عصاره جلبک دریایی سارگاسوم (2 g.L^{-1}) در شرایط تنش خشکی ملایم (۶۰ درصد ظرفیت زراعی)، موجب افزایش معنی‌دار فنول کل (82 mg.g^{-1})، فلاونوئید کل (mg.g^{-1}) (۶۴/۳۳)، فعالیت آنتی‌اکسیدانی (۷۶ درصد) و عملکرد اسانس در گیاه ترخون شد. این تیمار با بهبود شاخص‌های رشدی و بیوشیمیایی، اثرات منفی تنش خشکی شدید (۴۰ درصد ظرفیت زراعی) را تعدیل کرده و به‌عنوان راهکاری مؤثر برای افزایش مقاومت گیاه و تولید متابولیت‌های ثانویه پیشنهاد گردید (Bakhshi et al., 2025). کاربرد ترکیبی کود گاوی (۴۰ تن در هکتار)، کود زیستی NPK و اسید جیبرلیک (250 ppm) موجب افزایش معنی‌دار ارتفاع بوته

پژوهش‌های میدانی و کاربردهای کودهای

زیستی در ایران

با مرور برخی از تحقیقات اجراء شده در زمینه کودهای زیستی این مهم روشن می‌شود که استفاده از این کودها با توجه به سویه‌های بومی آن‌ها می‌تواند تحولاتی بسیار مهم در امر کشاورزی کشور ما ایجاد بکند. به عنوان مثال، کاربرد کود زیستی (باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن و قارچ میکوریزا) و نانو کودهای پتاسیمی میزان پروتئین و روغن دانه کینوا را به ترتیب ۶۷/۳ و ۹۰/۲ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داده است (Mirtayebi et al., 2024). در پژوهشی با استفاده از عصاره جلبک دریایی (*Ascophyllum nodosum*) با غلظت ۰/۳ درصد عملکرد دانه و محتوای پروتئین سویا در هر دو شرایط بذر نرمال و فرسوده به طور معنی‌داری افزایش یافته بود. در واقع کاربرد توام پیش تیمار و محلول‌پاشی با عصاره جلبک فوق جهت افزایش عملکرد دانه و درصد پروتئین در بذور نرمال و فرسوده سویا پیشنهاد شد (Arab et al., 2023). استفاده از قارچ‌های میکوریزایی *Glomus intraradices* و *Glomus mosseae* در شرایط تنش خشکی (قطع آبیاری

and Moghaddam, 2024). کلز/ نیز از جمله گیاهان حیاتی مؤثر در تولید روغن است و تحقیقات مختلفی بر روی آن انجام شده است. ترکیب کودهای زیستی از توبرور^۱ و فسفوبارور^۲ با 250 kg.h^{-1} نیتروژن، بیشترین تعداد دانه در بوته و عملکرد دانه را در گیاه کلز/ ایجاد می‌کند و درصد روغن را نیز به‌طور معنی‌داری بهبود می‌بخشد (Raei et al., 2025). استفاده ترکیبی از ورمی‌کمپوست (۱۵ درصد حجمی) و/زتوباکتر در شرایط تنش خشکی ملایم (۷۰ درصد ظرفیت زراعی)، موجب افزایش معنی‌دار فنل کل و حفظ محتوای نسبی آب برگ در گیاه علف چشمه شد، درحالی‌که در تنش شدید (۴۰ درصد) این کودها با کاهش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز و سوپر اکسید دیسموتاز) و بهبود رشد رویشی، نقش کلیدی در تعدیل اثرات تنش خشکی ایفا کردند (Mohebbi et al., 2024). استفاده ترکیبی از قارچ میکوریزا (*Funneliformis moseae*) و باکتری *Bacillus subtilis* تحت آبیاری پس از ۲۰ درصد تخلیه رطوبتی خاک، بالاترین وزن خشک اندام هوایی (21.71 g)، نیتروژن (23.58 mg.g^{-1}) و پروتئین برگ (50.69 mg.g^{-1}) را در گیاه ماریتیغال ایجاد کرد. این کودهای زیستی با بهبود جذب آب و عناصر غذایی و تقویت فتوسنتز، مقاومت گیاه به تنش خشکی شدید (۸۰ درصد تخلیه رطوبتی) را افزایش دادند و به عنوان راهکاری مؤثر برای کشت پایدار پیشنهاد شدند (Ghorbani et al., 2024). استفاده ترکیبی از کود زیستی میکوریزا و سوپر جاذب رطوبتی (80 kg.h^{-1}) در شرایط کم‌آبیاری شدید (۵۰ درصد نیاز آبی)، عملکرد سیب‌زمینی، بهره‌وری مصرف آب و کیفیت غده‌ها (شامل ماده خشک و بازارپسندی) را به‌طور معناداری افزایش داد و آلودگی به بیماری اسکب را کاهش داد (Parvizi and Ghadami Firoozabadi, 2024). قارچ اندوفیت *Aspergillus terreus* با افزایش سرعت جوانه‌زنی (۹۵ درصد) و ارزش جوانه‌زنی (۳/۷۳ درصد)، همراه با بهبود جذب فسفر برگ (۰/۵۱۹ درصد) و وزن

(۲۶،۵۳cm)، وزن پیاز مادر ($3/53 \text{ g}$) و تعداد پیازهای دختر (۱۳/۳۳ عدد) در واحد سطح در گیاه بن سرخ^{۱۷} شد. این تیمارها با بهبود عملکرد زیستی ۱۸ درصد افزایش و کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی، به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کشت پایدار و حفاظت از این گونه بومی ایران پیشنهاد شدند (Sharifi et al., 2025). محلول‌پاشی عصاره جلبک دریایی در غلظت 1500 ppm در شرایط تنش شوری ($1/6 \text{ mmoh.cm}^{-1}$ تا ۸) با افزایش پروتئین، پتاسیم، کلروفیل و قندهای محلول، اثرات منفی شوری را در گل‌گاوزبان کاهش داد و جذب سدیم را تا ۱۵ درصد کم کرد. این عصاره با بهبود عملکرد فیزیولوژیکی گیاه و قیمت پایین، به‌عنوان کود زیستی مؤثر برای کشت در خاک-خاک‌های شور پیشنهاد شد (Rahimkhani et al., 2024). استفاده از ریزجانداران حل‌کننده پتاسیم مانند *Aspergillus niger* و *Pseudomonas fluorescens* به‌طور معنی‌داری رهاسازی پتاسیم از کانی‌های سیلیکاتی خاک را افزایش داده و رشد گیاه ذرت را بهبود بخشیدند. تیمار با باکتری *P. fluorescens* بیشترین تأثیر را نشان داد و موجب افزایش ۱۸/۲ درصدی ارتفاع گیاه، ۱۸/۲ درصدی قطر ساقه و ۸۰ درصدی وزن خشک اندام هوایی نسبت به تیمار شاهد شد. همچنین، این باکتری غلظت پتاسیم محلول و فسفر قابل‌دسترس خاک را به ترتیب ۱/۲ و ۱/۳ برابر نسبت به قارچ افزایش داد. این رویکرد به‌عنوان راهکاری کم‌هزینه و سازگار با محیط‌زیست برای جایگزینی کودهای شیمیایی پتاسیمی و تقویت کشاورزی پایدار پیشنهاد شد (Ashrafi Saeidlou et al., 2025). در اکثر پژوهش‌های انجام شده کودهای زیستی مبتنی بر میکوریزا/ تأثیری مهم بر رشد گیاه داشته‌اند. در پژوهشی که مرتبط با این موضوع است، مشخص گردید که تیمار قارچ میکوریزا/ به همراه اسید هیومیک در غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در هر گلدان و اسید سالیسیلیک 200 mg.L^{-1} تیمار مؤثری برای بهبود رشد رویشی، صفات بیوشیمیایی و جذب عناصر غذایی در گیاه بادرنجوبه است (Mohamadabadi

¹⁷Allium jesdianum

مناسب کودهای شیمیایی و زیستی می‌تواند کیفیت اسانس و عملکرد اقتصادی مریم‌گلی را بهینه کند (Abbaszadeh et al., 2024). استفاده از قارچ میکوریزا در شرایط تنش خشکی (۵۰ درصد ظرفیت زراعی) موجب افزایش ۲۱۰ درصد عملکرد خشک بوته و بهبود شاخص‌های رشدی مانند کلروفیل و مساحت برگ در اکوتیپ‌های مختلف آویشن شیرازی نسبت به تیمار شاهد شد. تفاوت معنادار پاسخ اکوتیپ‌ها به تنش و میکوریزا، نشان‌دهنده پتانسیل ژنتیکی بالای این گونه بومی برای انتخاب ژنوتیپ‌های برتر و کشت پایدار در شرایط خشکی است (Aghababapoor et al., 2024). کودهای زیستی قارچی نسبت به کودهای زیستی باکتریایی کارایی بیشتری در بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه و فعالیت‌های آنزیمی خاک نشان می‌دهند. در بین فرمولاسیون‌های مختلف کودهای قارچی، فرم پودری قارچ میکوریز آریسکولار نسبت به فرم مایع از کارایی بیشتری در افزایش مقاومت گندم به تنش خشکی برخوردار بوده است. استفاده از قارچ میکوریز آریسکولار (فرم پودری) در شرایط تنش خشکی شدید (۶۵ درصد نیاز آبی) به‌طور معناداری فعالیت آنزیم‌های خاک (بتا-گلوکوزیداز و فسفاتاز) و شاخص‌های فیزیولوژیکی گندم (کلروفیل و کاروتنوئید) را بهبود بخشید، درحالی‌که باکتری *P. fluorescens* تولیدکننده ACC-دآمیناز تنها در کاهش پرولین (یکی از ۲۰ اسیدآمینو اصلی سازنده ساختمان پروتئین) مؤثر بود. تعامل مثبت بین فعالیت آنزیم‌های خاک و ویژگی‌های گیاهی تحت تأثیر کودهای زیستی، به‌ویژه قارچ‌ها، نقش کلیدی در افزایش مقاومت گندم به خشکی ایفا می‌کند (Hosseini et al., 2024). مایه‌زنی نهال‌ها با کودهای زیستی نیز از جمله موضوعات جذاب تحقیقاتی است. در یکی از این پژوهش‌ها که گیاه فندق مورد آزمایش قرار گرفته بود، نتایج پس از چهار سال نشان داد نهال‌های مایه‌زنی شده، از لحاظ همه مشخصه‌های مورد بررسی در مقایسه با نهال شاهد (مایه-زنی نشده) برتر هستند. به طوری که در این نهال‌ها، سطح برگ و سطح ویژه برگ به ترتیب ۴۰/۹ و ۲۱/۳ درصد و

خشک شاخساره ($16/40 \text{ mg.g}^{-1}$)، به‌عنوان گزینه برتر برای تولید کود زیستی جهت کشت جو شناسایی شد. این قارچ با کلونیزه‌سازی ریشه (بالای ۳۰ درصد) و تقویت شاخص‌های رشدی، راهکاری مؤثر برای افزایش بهره‌وری در کشاورزی است (Sadeghi et al., 2025). استفاده از قارچ مایکوریزا *G. etunicatum* موجب بهبود رشد رویشی (طول ساقه ۶۸,۳۵ سانتیمتر، وزن تر ریزوم ۵,۳۵ g) و افزایش فیبر ریزوم (۲۸/۴ درصد) در گیاه زنجبیل شد، درحالی‌که ترکیب این قارچ با تریکودرما بیشترین میزان اسانس (۴ درصد) و ترکیبات مؤثری مانند ژرانیال و کامفن را تولید کرد. این نتایج نشان می‌دهد کاربرد قارچ‌های مایکوریزا به‌ویژه *G. etunicatum* به‌عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود عملکرد و کیفیت زنجبیل در کشاورزی پایدار است (ezvaninia et al., 2024). ترکیب کودهای زیستی از توباکتر، پسودوموناس و باسیلوس با ورمی‌کمپوست (10 ton.h^{-1}) و کود شیمیایی NP (100 kg.h^{-1}) موجب افزایش ۷۶ درصد وزن خشک برگ و ۸۱ درصد وزن خشک بنه زعفران شد و بیشترین عملکرد گل تر (kg.h^{-1}) را در تیمار ورمی‌کمپوست + ۲۰۰ کیلوگرم NP ایجاد کرد (Alizadeh et al., 2024). استفاده ترکیبی از کود آلی (24 ton.ha^{-1}) و کود زیستی (مایکوریزا) یا ایتروباکتر) تحت آبیاری ۸۰ درصد نیاز آبی، عملکرد دانه ماش را تا $124/3 \text{ g.m}^{-2}$ افزایش داد، درحالی‌که آبیاری کامل (۱۰۰ درصد) با همین تیمارها به $126/1 \text{ g.m}^{-2}$ رسید. این نتایج نشان می‌دهد که کاربرد کودهای آلی و زیستی، کاهش اثرات تنش خشکی و بهبود عملکرد ماش را حتی در شرایط کم‌آبی امکان‌پذیر می‌سازند (Sadeghi et al., 2024). Kochsafhani et al., 2024). استفاده از کودهای شیمیایی اوره و سوپرفسفات موجب افزایش ترکیباتی مانند آلفا-توجون (۲۵/۰ درصد) عملکرد اسانس تا kg.h^{-1} در ۹۷,۵۷ مریم‌گلی شد، درحالی‌که کودهای زیستی (مایکوریزا و سودوموناس) سطوح لینالول و کامفن را بهبود بخشیدند. اگرچه درصد اسانس تحت تأثیر کودها قرار نگرفت که احتمالاً به علت عوامل ژنتیکی است، ترکیب

تثبیت‌کننده نیتروژن از جنس *ازتوباکتر* و *آزوسپیریلیوم* است که علاوه بر تثبیت نیتروژن هوا و متعادل کردن جذب عناصر غذایی پرمصرف و کم‌مصرف مورد نیاز گیاه، با سنتز و ترشح مواد محرک رشد گیاهان مانند اکسین، همچنین ترشح آمینواسیدهای مختلف سبب رشد و توسعه ریشه و اندام‌های هوایی گیاه می‌گردد. در یکی از پژوهش‌هایی که با این ماده انجام شده است، مشخص گردید که استفاده از کود زیستی نیتروکسین به‌طور معناداری موجب بهبود عملکرد دانه (۴۴۳۸ کیلوگرم/هکتار)، پروتئین دانه (۳۲/۷۱ درصد) و موسیلاژ (۲۵/۸۶ درصد) در گیاه گوار می‌شود، درحالی‌که بیوسولفور (حاوی باکتری تیوباسیلوس) بیشترین تأثیر را بر تعداد دانه در نیام (۵/۱۷) و وزن هزار دانه (۳۵/۶۷ g) داشت. این نتایج نشان می‌دهد ترکیب نیتروکسین و بیوسولفور به‌عنوان راهکارهای مؤثر برای بهبود ویژگی‌های کمی و کیفی گوار در کشاورزی پایدار هستند (Jahantigh et al., 2024). قارچ‌های تریکودرما با هیف‌های گسترده یک شبکه قوی برای جذب عناصر غذایی ایجاد می‌کنند و در بهبود رشد گیاه بسیار مؤثرند. استفاده از قارچ‌های تریکودرما جهش‌یافته با تابش گاما به‌عنوان بیواستیمولانت (ریزجاندارانی هستند که هنگامی که به گیاهان یا خاک اعمال می‌شوند، سلامت، رشد یا تحمل به تنش گیاهان را بهبود می‌بخشند، اما به‌عنوان مواد مغذی عمل نمی‌کنند)، بهبود معناداری در سطح کلروفیل، کاروتنوئید و فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و پلی‌فنول اکسیداز در گیاه کاهو ایجاد کرد، به‌طوری‌که این جهش‌ها نسبت به گونه‌های وحشی اثرات تقویتی قوی‌تری نشان دادند (Rezalou et al., 2023). استفاده از باکتری باسیلوس سابتیلوس^{۱۸} در شرایط تنش شوری (8 dS.m^{-1}) موجب کاهش نشت یونی برگ، افزایش آنتی‌اکسیدان و تعادل سدیم-پتاسیم در گل جعفری نارنجی شد و عملکرد بهتری نسبت به *Bacillus velezensis* نشان داد. این باکتری با بهبود شاخص‌های رشدی (قطر گل، وزن خشک اندام) و فیزیولوژیک (کلروفیل، پرولین)، راه‌کاری مؤثر

مشخصه‌های فیزیولوژیک شامل فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، کلروفیل و کارایی مصرف آب به ترتیب ۶۶/۸، ۶۵، ۴۰/۸ و ۱۴۶/۵ درصد در مقایسه با نهال‌های شاهد افزایش داشت. نهال‌های فندق مایه‌زنی شده با تریکودرما هارزیانوم در سه مبداء جغرافیایی فندقلو (اردبیل)، مکش (گیلان) و مکیدی (ارسباران) پس از چهار سال، بهبود معناداری در سطح برگ (۴۰/۹ درصد)، فتوسنتز (۶۶/۸ درصد)، هدایت روزنه‌ای (۶۵ درصد) و کارایی مصرف آب (۱۴۶/۵ درصد) نشان دادند، به طوری که نهال‌های مبداء فندقلو با افزایش کلروفیل (۴۰/۸ درصد)، به‌عنوان برترین تیمار برای کشت پایدار فندق در عرصه‌های جنگلی پیشنهاد شدند (Rostamikia et al., 2024). گیاه زعفران نیز از جمله گیاهان بسیار ارزشمندی است که نیازمند توجه بیشتر برای کسب درآمد اقتصادی بیشتر است و چون گیاهی با نیاز تغذیه‌ای و آبی کم است، تیمار آن با کودهای زیستی می‌تواند در تحقق تولید بیشتر راه‌گشای کشاورزان مناطق مختلف باشد. بررسی تأثیر کودهای زیستی و تنش خشکی بر میزان عناصر برگ و بنه و همچنین کیفیت کلاله در زعفران به‌صورت کم آبیاری در سه سطح (۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد) به‌عنوان عامل اصلی و باکتری‌های آزادی تثبیت‌کننده نیتروژن (B-N)، باکتری‌های حل‌کننده پتاسیم (B-K)، باکتری‌های حل‌کننده فسفات (B-P)، ترکیب آن‌ها و شاهد بدون کود در هشت سطح به‌عنوان عامل فرعی نتایج جالبی را ایجاد کرده است. استفاده از کود زیستی ترکیبی NPK تحت آبیاری کامل (۱۰۰ درصد نیاز آبی) بیشترین تعداد بنه (۴۱۵ عدد/مترمربع) و وزن خشک کلاله (0.492 g.m^{-2}) را در زعفران ایجاد کرد، درحالی‌که حتی در شرایط تنش خشکی (۵۰-۷۵ درصد نیاز آبی)، کاربرد این کودها به‌طور معناداری عملکرد بنه و گل را بهبود بخشید. این نتایج نشان می‌دهد ترکیب کودهای زیستی با مدیریت آبیاری بهینه، راه‌کاری کلیدی برای کاهش مصرف آب و دستیابی به عملکرد اقتصادی مطلوب در کشت زعفران است (Ali et al., 2024). کود زیستی نیتروکسین حاوی موثرترین‌های

¹⁸*Bacillus subtilis*

برای کشت گل جعفری در خاک‌های شور و کاهش وابستگی به روش‌های شیمیایی است (Grayloo et al., 2024). در پژوهش دیگری از ۹ سویه برتر جنس سودوموناس، ۶ سویه باسیلوس سوبتیلیس و ۵ سویه باسیلوس تورنجینسیس به عنوان باکتری‌های محرک رشد و زیست مهارگر در بهبود رشد قارچ دکمه‌ای استفاده شد. استفاده از سویه‌های سودوموناس و باسیلوس سوبتیلیس، رشد میسلیم قارچ دکمه‌ای را به‌طور معناداری تحریک کرد، درحالی‌که سویه‌های منتخب *B.thuringiensis* به‌ترتیب بیشترین اثر مهارکنندگی را بر قارچ‌های بیماری‌زای تریکودرما و مایکوگون نشان دادند. ترکیب این باکتری‌ها به‌عنوان اجتماع زیستی، راهکاری امیدوارکننده برای افزایش عملکرد قارچ و کنترل همزمان پاتوژن‌ها در صنعت پرورش قارچ است (Asgharzadeh et al., 2024). خلاصه برخی از کودهای زیستی استفاده شده در پژوهش‌های ایرانی و تأثیر آن‌ها بر رشد گیاه در (جدول ۵) نگاشته شده است.

جدول ۵- برخی از کودهای زیستی استفاده شده در ایران و تأثیر آنها بر گیاه
Table 5 - Some of the biofertilizers used in Iran and their effects on plants

رفرنس Reference	سازوکار عمل mechanism of action	کارکرد اصلی Main function	منبع (کود زیستی) Source (biofertilizer)
Mirtayebi et al., 2024	تثبیت نیتروژن، بهبود جذب عناصر غذایی Nitrogen fixation, improved nutrient absorption	افزایش پروتئین و روغن دانه کینوا Increasing protein and oil in quinoa seeds	باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن + قارچ میکوریزا + نانوکود پتاسیمی Nitrogen-fixing bacteria + mycorrhizal fungi + potassium nanofertilizer
Arab et al., 2023	پیش تیمار و محلول‌پاشی، تحریک رشد و متابولیت‌ها Pretreatment and foliar spraying, growth stimulation and metabolites	افزایش عملکرد دانه و درصد پروتئین سویا Increasing grain yield and soybean protein percentage	عصاره جلبک دریایی (Ascophyllum nodosum) Seaweed extract
Zakerian et al., 2025	بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و ترکیبات تنظیم‌کننده اسمزی Improvement of antioxidant enzyme activity and osmotic regulating compounds	افزایش اسانس و بازده تیمول در مرزه Increasing essential oil and thymol yield in savory	قارچ‌های میکوریزا Mycorrhizal fungi Glomus intraradices and G. mosseae
Bakhshi et al., 2025	بهبود شاخص‌های رشدی و بیوشیمیایی Improvement of growth and biochemical indices	افزایش فنول، فلاونوئید و عملکرد اسانس Increasing phenol, flavonoid and tarragon essential oil yield	ترخون Seaweed extract (Sargassum, 2 g/L)
Sharifi et al., 2025	بهبود عملکرد زیستی و کاهش وابستگی به کود شیمیایی Improvement of biological performance and reduction of dependence on chemical fertilizers	افزایش ارتفاع بوته، وزن پیاز مادر و تعداد پیازهای دختر در بن سرخ Increasing plant height, mother bulb weight and number of daughter bulbs in Allium jesdianum	اسید + NPK زیستی کود + گاوی کود ترکیبی جیبرلیک Combination of cow manure + NPK biofertilizer + Gibberellic acid
Rahimkhani et al., 2024	جذب سدیم Increase protein, potassium, chlorophyll and reduce sodium absorption	کاهش اثرات شوری در گل گاوزبان Reducing the effects of salinity in borage	عصاره جلبک دریایی (1500 ppm) Seaweed extract (1500 ppm)
Ashrafi Saeidlou et al., 2025	رها سازی پتاسیم از کانی‌های سیلیکاتی و بهبود جذب فسفر و پتاسیم Release potassium from silicate minerals and improve phosphorus and potassium absorption	افزایش رشد و ارتفاع گیاه ذرت Increase in corn plant growth and height	میکروارگانیسم‌های محلول‌ساز پتاسیم (Pseudomonas fluorescens and Aspergillus niger)
Mohamadabadi & Moghaddam, 2024	کلونیزه‌سازی ریشه و تحریک فعالیت آنزیم‌ها Root colonization and stimulate enzyme activity	بهبود رشد رویشی، صفات بیوشیمیایی و جذب عناصر بادرنجبویه Improvement in vegetative growth, biochemical traits and nutrient uptake of lemon balm	قارچ میکوریزا + اسید هیومیک + اسید سالیسیلیک Mycorrhizal fungi + humic acid + salicylic acid
Raei et al., 2025	بهبود جذب نیتروژن و متابولیت‌ها Improvement of nitrogen and metabolites absorption	افزایش تعداد دانه و عملکرد کلزا Increase in seed number and yield of rapeseed	ترکیب کودهای زیستی از توبرارور و فسفوبارور + نیتروژن Combination of biofertilizers Azotobaror and Phosphobaror + nitrogen
Mohebbi et al., 2024	بهبود رشد رویشی و فعالیت آنزیم‌های آنتی-اکسیدانی Improve vegetative growth and antioxidant enzyme activity	افزایش فنل کل و حفظ آب برگ در علف چشمه Increase in total phenols and leaf water retention in spring grass	ترکیب ورمی کمپوست + ازتوباکتر Combination of vermicompost + Azotobacter
Ghorbani et al., 2024	بهبود جذب آب و عناصر غذایی، تقویت فتوسنتز Improve water and nutrient absorption, enhance photosynthesis	افزایش وزن خشک اندام هوایی، نیتروژن و پروتئین برگ ماریتیغال Increase in shoot dry weight, nitrogen and leaf protein of marigold	میکوریزا + باسیلوس سبیلیس Mycorrhizal fungi + Bacillus subtilis
Parvizi & Ghadami Firoozabadi, 2024	بهبود بهره‌وری آب و کاهش بیماری Improve water efficiency and reduce disease	افزایش عملکرد و کیفیت غده سیب‌زمینی Increase in potato tuber yield and quality	قارچ میکوریزا + سوپر جاذب رطوبتی Mycorrhizal fungi + super moisture absorber

عملکرد، اثرگذاری و انتقال‌پذیری نتایج به شرایط

مزرعه‌ای

مطالعات انجام‌شده بر محصولات عمده ایران مانند گندم، ذرت و کلزا در محیط‌های کنترل‌شده آزمایشگاهی و گلخانه‌ای افزایش عملکرد ۱۰ تا ۲۰ درصدی را گزارش کرده‌اند. با این حال، کاهش محسوس کارایی در مزرعه به دلیل عوامل محیطی خشن، رقابت میکروبی شدید، خاک‌های قلیایی و شور، و دمای بالا، نشان می‌دهد که انتقال فناوری به مزرعه با فقدان پایداری عملکرد همراه است. نبود داده‌های بلندمدت و چند منطقه‌ای، طراحی‌های آزمایشی ناهمگن، تداخل مصرف کودهای شیمیایی با تلقیح زیستی، و نبود ارزیابی اقتصادی واقعی کارایی باعث شده قابلیت تعمیم نتایج محدود بماند و اعتماد کشاورزان به محصولات زیستی به‌کندی افزایش یابد.

ظرفیت علمی، زیرساخت‌های موجود و نقاط

قوت توسعه

ایران در حوزه پژوهش‌های میکروبی خاک زیرساخت علمی قابل توجهی شامل کلکسیون‌های سویه‌ای، آزمایشگاه‌های استاندارد و تجربه‌های پژوهشی در اختیار دارد. همکاری نسبی میان مراکز تحقیقاتی و برخی واحدهای صنعتی، زمینه تولید چندین محصول ثبت‌شده را فراهم کرده است. افزون بر آن، افزایش توجه به کشاورزی ارگانیک، سلامت غذا و کاهش آثار زیست‌محیطی کودهای شیمیایی فرصت مناسبی برای توسعه بازار کودهای زیستی ایجاد کرده است. رشد آگاهی عمومی و فشارهای زیست-محیطی جهانی نیز تقاضای بالقوه برای جایگزین‌های کم‌کربن را افزایش می‌دهد و این موضوع یکی از نقاط قوت ساختاری کشور در مسیر آینده‌پژوهی کودهای زیستی محسوب می‌شود.

ضعف‌ها و چالش‌های فنی تولید و کاربری

چالش‌های فنی یکی از موانع اصلی موفقیت تجاری کودهای زیستی در ایران است. رقابت میکروبی شدید ریزوسفر، ناپایداری کلونیزاسیون، شوری و قلیائیت گسترده خاک‌های کشور، دوره‌های خشکی و گرمای شدید، و وجود فلزات سنگین در برخی مناطق باعث کاهش بقا و عملکرد میکروارگانیسم‌های تلقیحی می‌شوند. فرمولاسیون-فرمولاسیون‌های تک‌سویه، عدم کنترل کیفیت کافی، محدودیت در فناوری‌های حامل، و نیاز به زنجیره سرد و نگهداری خاص از دیگر عوامل محدودکننده هستند. این چالش‌ها موجب شده کارایی آزمایشگاهی به‌طور کامل به عملکرد مزرعه‌ای قابل اتکا تبدیل نشود؛ پدیده‌ای که یکی از دلایل کاهش پذیرش در میان کشاورزان است. بسیاری از میکروبی‌های مفید که می‌توانند به عنوان کودهای زیستی بالقوه مورد استفاده قرار گیرند، هنوز فراتر از دانش کشاورزان، متخصصان کشاورزی و دانشمندان هستند، زیرا پرداختن به دشواری‌های ایجاد آگاهی و دستیابی به پذیرش گسترده‌تر با سرعت کمی انجام می‌شود. تحقیق و توسعه با شناسایی مشکلات و چالش‌های موجود در تولید و پذیرش کودهای زیستی و ترویج راه‌حل‌ها و استراتژی‌های مربوطه، کلید تولید بیشتر کودهای زیستی است. نوسانات محیطی در زیستگاه طبیعی که باعث کاهش کارایی کودهای زیستی در ایجاد اثرات مفید بر محصولات می‌شود باید مورد دقت ویژه قرار بگیرد. محدودیت عمده دیگری نیز وجود دارد که انتقال کود زیستی از آزمایشگاه به کاربرد مزرعه‌ای است، جایی که جدایه می‌تواند توانایی‌های متفاوتی در افزایش رشد گیاه در شرایط آزمایشگاه و مزرعه داشته باشد. عوامل دیگری که توسعه، تولید، کاربرد و دسترسی به کودهای زیستی را در مقیاس وسیع محدود می‌کنند، شامل موارد زیر می‌شوند: عدم آگاهی، شبکه بازاریابی و تبلیغات، عدم دسترسی به سویه و حامل مناسب، آلاینده‌ها، شرایط محیطی متغیر، کمبود بودجه، مساحت زمین، انبارها، حمل‌ونقل، محدودیت‌های کنترل کیفیت، عدم وجود برچسب‌گذاری نام‌ها و تاریخ‌های استفاده و غیره، از جمله دلایلی هستند

(ریوولی وروئونز ایتالیا)، اتاکمیکال (بمبئی هند)، شرکت بین‌المللی کروماندل (سکوماندر هند)، شرکت ایلسا (آرژینانو ایتالیا)، شرکت سیگما (تگزاس آمریکا)، شرکت بایر کراپ (لورکوزن آلمان)، مارون (دیویس آمریکا)، سام فیتوفارما (هند)، بی‌آس‌اف (آلمان)، کامسون بیو (هند) و ایساگرو (میلانو ایتالیا) سالانه حجم انبوهی از کودهای زیستی را تولید و روانه بازار می‌کنند و حضور قدرتمندی در نقاط مختلف دنیا دارند که در نتیجه تبلیغات صحیح و سرمایه‌گذاری وسیع و ارتباط قوی تحقیقات و کشاورزی است.

خلأهای پژوهشی و مسیرهای آینده توسعه

چالش‌های باقی‌مانده نشان می‌دهد که توسعه واقعی کودهای زیستی در ایران نیازمند پژوهش‌های هدفمند و هماهنگ با مسائل بوم‌شناختی کشور است. خلأهای کلیدی شامل مطالعات بلندمدت ۵-۱۰ ساله، تجزیه و تحلیل اقتصادی-زیست‌محیطی واقعی، شناخت مکانیسم‌های مولکولی پایداری، فرمولاسیون‌های چندمیکروبی، سویه‌های بومی مقاوم به شوری و گرما، و تولید محصولات تلفیقی همراه با قارچ‌های میکوریزا و بیوجار است. در کنار این مسیرها، همگرایی پژوهش-صنعت-کشاورز، ایجاد استانداردهای ملی کیفیت، و شکل‌دهی نظام مشوق مالی می‌تواند فاصله میان دستاوردهای آزمایشگاهی و نیاز واقعی مزرعه را کاهش دهد.

نتیجه‌گیری

در این مرور، مزایای چشمگیر قارچ‌های میکوریزا و تریکودرما و باکتری‌های محرک رشد در تقویت رشد گیاهان، کنترل آفات، ارتقای اکوسیستمی سالم-سالم‌تر، مبارزه با انواع تنش‌های محیطی از جمله خشک-سالی و غیره، برجسته شده و بر اهمیت روز افزون آن‌ها تأکید شده است. با وجود این مزایا، حضور این محصولات در بازار در مقایسه با کودهای شیمیایی سنتی هنوز محدود

که به موجب آن‌ها کودهای زیستی فراتر از دانش کشاورزان، متخصصان کشاورزی و بوم‌شناسان هستند. تولید کودهای زیستی باید مطابق با پروتکل‌ها و استانداردهای سازمان بین‌المللی استانداردسازی باشد. نظارت توسط مقامات ذی‌ربط، چه از دولت و چه از بخش عمومی، باید انجام شود تا حفظ کیفیت در طول تولید این کودهای زیستی و اعتبار محصول بررسی شود. سویه‌های مناسب، مواد حامل و یک سیستم انتقال خوب نقش مهمی در کارایی، اثربخشی و کاربرد این کودهای زیستی دارند. مواد بیولوژیکی مانند پلی‌ساکاریدها می‌توانند برای کارایی، پایداری و ماندگاری بهتر با کودهای زیستی ترکیب شوند. بهینه‌سازی این کودهای زیستی باید همراه با سایر روش‌های کشاورزی انجام شود. ترویج و ایجاد آگاهی می‌تواند از طریق افزودن مفهوم کودهای زیستی در سرفصل‌های دانشگاهی، برنامه درسی آموزشی، کارگاه‌ها، کنفرانس‌ها، سمینارها، آموزش در مؤسسات آموزشی، رسانه‌ها و همکاری‌های تحقیقاتی باشد.

چالش‌های اجتماعی-اقتصادی، سیاست‌گذاری و

بازار

فراتر از مسائل فنی، موانع اجتماعی-اقتصادی و سیاستی نقشی تعیین‌کننده در کندی توسعه فناوری دارند. یارانه گسترده کودهای شیمیایی، فقدان مشوق اقتصادی برای مصرف کود زیستی، ضعف نظام بازاریابی، کمبود آموزش عملی و عدم حضور مؤثر کارشناسان در کنار کشاورزان، فرآیند پذیرش را کند کرده‌اند. آمار رسمی از میزان تولید، مصرف، سهم بازار و بازده اقتصادی کودهای زیستی در کشور منتشر نمی‌شود و این خلأ داده‌ای عملاً مانع ارزیابی بازار، سرمایه‌گذاری صنعتی، و سیاست‌گذاری مؤثر است. نبود استانداردهای ملی کیفیت و عدم الزام آزمایش‌های کارایی مزرعه‌ای پیش از صدور مجوز تولید نیز اعتماد مصرف‌کننده را کاهش می‌دهد و کیفیت بازار را ناهمگون می‌کند. شرکت‌های مطرح بین‌المللی در زمینه تولید کودها و آفت‌کش‌های زیستی مانند شرکت ایتالپولینا

در ایران نیز، یکی از مهم‌ترین پیشنهادها اجرای، توسعه فرمولاسیون‌های بومی‌سازی‌شده متناسب با چالش‌های غالب کشور نظیر شوری، خشکی، دمای بالا و ماده آلی پایین خاک است. استفاده از سویه‌های بومی جداسازی شده از خاک‌های شور و بیابانی، تلفیق آن‌ها با قارچ‌های میکوریزای سازگار با تنش‌های حرارتی، و به‌کارگیری حامل‌های آلی و معدنی مناسب، می‌تواند پایداری و کارایی این کودها را در شرایط میدانی افزایش دهد. تجربه‌های جهانی نشان می‌دهد که فرمولاسیون‌های چندجزئی (پلی‌میکروبی) نسبت به تک‌سویه‌ها، عملکرد پایدارتر و دامنه کاربرد وسیع‌تری دارند.

از منظر اجرایی، استانداردسازی فرمولاسیون‌ها و شاخص‌های کیفی یکی از پیش‌نیازهای اساسی توسعه بازار کودهای زیستی است. تدوین پروتکل‌های ملی برای تعیین جمعیت فعال، پایداری در طول زمان، شرایط نگهداری و بسته‌بندی، و انجام آزمون‌های طول عمر در دما و رطوبت-های مختلف، می‌تواند فاصله میان پژوهش و بازار را کاهش دهد. همچنین، ارزیابی بقای عامل زیستی در فرمولاسیون-های مختلف (پودر، مایع، گرانول یا کپسول)، تحلیل هزینه-فایده و آزمون مقیاس‌پذیری در مزارع تجاری، باید به‌عنوان بخشی از الزامات پژوهشی و صنعتی در نظر گرفته شود.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافی متوجه نویسندگان مقاله نمی‌باشد. نویسندگان از اخلاق نشر از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و انتشار دوگانه پرهیز نموده و منافع تجاری در این راستا وجود ندارد. نویسندگان در نوشتن مقاله از هیچ منبعی و جهی دریافت ننموده است.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

تمام جملات و منابع استفاده شده از تمام منابع به سهولت قابل دسترسی و آماده‌ارایه به مخاطبان است.

است که لزوم پژوهش و توسعه بیشتر را ضروری می‌سازد. در این مورد ضروری‌ترین عامل ترغیب کشاورزان و آشنا کردن عموم مردم با این نوع از کودهای نوظهور است. همچنین آزمایش کارایی واقعی این کودها در شرایط طبیعی و به دور از شرایط آزمایشگاهی از ضروریات است. حجم مطالعات مربوط به این نوع کودها نیز رو به رشد است و چند گروه محقق داخلی نیز به ایزوله سازی سویه‌های محلی پرداخته‌اند. اما بیشتر نتایج مثبت برای شرایط کنترل شده مانند گلخانه است و مطالعات در شرایط میدانی کمتر گزارش شده است. گاهی مشاهده می‌شود که نمونه‌ها کوچک، تکرارها ناکافی و تحلیل مناسب اثر تعامل (عامل*مکان*سال) صورت نگرفته است. تولیدکنندگان مختلف روش‌های متفاوتی برای تعیین جمعیت فعال و کیفیت مایه‌ها به کار می‌برند و استاندارد واحدی در همه مطالعات وجود ندارد. استفاده از توالی یابی کامل و یا حداقل توالی یابی مولکولی برای تضمین هویت و بررسی ژن‌های عملکردی نادر است. بسیاری از مقالات فقط گزارش افزایش عملکرد یا پارامترهای رشدی را داده‌اند؛ اما داده‌های دقیق در مورد تغییرات میکروبیوم خاک، آنزیم‌های خاک، دسترس‌پذیری فسفر/نیتروژن/پتاسیم و مسیریابی مکانیسمی محدود است.

بر اساس جمع‌بندی نتایج این مرور و با توجه به تجربه‌های موفق جهانی، گذار از کاربرد ساده مایه‌کوب‌های میکروبی به توسعه فرمولاسیون‌های کودی پایدار، هدفمند و سازگار با تنش یکی از کلیدی‌ترین عوامل موفقیت کودهای زیستی در کشاورزی مدرن محسوب می‌شود. در بسیاری از کشورها، تمرکز تحقیقات و صنعت از سویه‌محوری صرف، به سمت طراحی فرمولاسیون‌هایی با قابلیت بقای بالا، آزادسازی کنترل‌شده و سازگاری با شرایط متغیر خاک و اقلیم سوق یافته است. این رویکرد باعث شده اثربخشی کودهای زیستی در مقیاس مزرعه‌ای افزایش یافته و اعتماد کشاورزان به این نهاده‌ها تقویت شود.

References

1. Abbaszadeh, B., Layegh Haghghi, M., Azimi, R., and Valizadeh, N., 2024. A study on the effects of chemical and biological fertilizers on the essential oil content of sage (*Salvia officinalis* L.). *Plant Productions*, 47(3), pp.455-474. DOI: 10.22055/ppd.2024.47372.2188. (In Persian).
2. Adnan, M., Fahad, S., Saleem, M. H., and Lal, R., 2025. Sustainable phosphorus management in calcareous soils: problems and prospects. *Journal of Plant Nutrition*, pp.1-22. DOI: 10.1080/01904167.2025.2477269.
3. Aghababapoor Dehkordi, A., Houshmand, S., Mohammady, S., and Ravash, R., 2024. Effects of Mycorrhizal Fungi Symbiosis on Some Morpho-Physiological Traits of *Zataria multiflora* Boiss. Ecotypes under Drought Stress Conditions. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 40(3), pp.449-466. DOI: 10.22092/ijmapr.2024.363502.3375. (In Persian).
4. Aghakouchak, A., Mirchi, A., Madani, K., Di Baldassarre, G., Nazemi, A., Alborzi, A., Anjileli, H., Azarderakhsh, M., Chiang, F., and Hassanzadeh, E., 2021. Anthropogenic drought: Definition, challenges, and opportunities. *Wiley Online Library*. DOI: 10.1029/2019RG000683.
5. Akbari Mohammadabad, N., Azimi, M. S., Yegane, H., Khoshalsarmast, M., Malekzadeh, E., 2025. Study of some soil characteristics and arbuscular mycorrhizal fungi symbiosis with the yellow fritillaria (*Fritillaria raddeana* Regel). *The Journal of Range and Watershed Management*. 78(2), pp.159-172. DOI: 10.22059/jrwm.2024.376990.1765. (In Persian).
6. Akbari, S. I., Prismantoro, D., Permadi, N., Rossiana, N., Miranti, M., Mispan, M. S., Mohamed, Z., and Doni, F., 2024. Bioprospecting the roles of Trichoderma in alleviating plants' drought tolerance: Principles, mechanisms of action, and prospects. *Microbiological Research*, 283, p.127665. DOI: 10.1016/j.micres.2024.127665.
7. Ali, R., Zulaykha, K. D., and Sajjad, N., 2020. Genetically modified microbes as biofertilizers. *Bioremediation and Biotechnology*, Vol 4: Techniques for Noxious Substances Remediation, pp.275-293. DOI: 10.1007/978-3-030-48690-7_13.
8. Ali, S., 2024. Saffron (*Crocus sativus* L.) as a Promising Complementary Treatment for Depression: A Review of Basic and Clinical Studies. *Journal of Saffron Research*, 12(2), pp.208-226. DOI: 10.22077/jsr.2025.8449.1250. (In Persian).
9. Alikhani, H.A., Shariati, S., Etesami, H. and Fallah Nosrat Abad, A., 2022. Azotobacter as a Rice Plant (*Oryza sativa* L.) Growth Promoting Biofertilizer. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(3), pp.633-661. DOI: 10.22059/ijswr.2022.337184.669182. (In Persian).
10. Alizadeh, M. B., Makarian, H., Ebadi, A., Eizadi Darbandi, E., Gholami, A., and Nasiri dehsorkhi, A. 2024., Evaluation of the effect of different fertilizer sources on some characteristics of the corm and flower yield of saffron. *Crop Science Research in Arid Regions*, 6(3), pp.171-184. DOI: 10.22034/CSRAR.2024.390675.1331. (In Persian).
11. Arab, S., Firouzabadi, M. B., Gholami, A., and haydari, M., 2023. The Effect of Seaweed Extract (*Ascophyllum nodosum*) on Quantitative and Qualitative Yield of Soybean. *Agroecology*, 1(16), 143-147. DOI: 10.22067/AGRY.2022.78292.1124. (In Persian).
12. Araganji, S., Kumari, S., Solanki, P., and Yadav, R., 2025. Biofertilizer mediated growth promotion in jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* L.) cv. chandra: a study on ksb and pseudomonas application. *Plant Archives*, 25(1), 1431-1436. DOI: 10.51470/plantarchives.2025.v25.supplement-1.196.
13. Asgharzadeh, A., Saghafi, K., Fattahifar, E., Jenaghi, M., and Alizadeh, N., 2024. Impact of plant growth-promoting bacteria on the growth of button mushroom hyphae and control of pathogenic factors under in vitro conditions. *Journal of Soil Biology*, 11(2),

- pp.139-154. DOI: 10.22092/SBJ.2024.361318.245. (In Persian).
14. Ashnavar, M., Rahnama, K., Sarmast, M. K., and Ghasemnezhad, A., 2022. The role of endophytic fungi isolated from native Iranian yew (*Taxus baccata*) in biological control of *Fusarium oxysporum*. *Ecology of Iranian Forests*. 10(20), pp.1-10. DOI: 10.52547/ifej.10.20.1. (In Persian).
 15. Ashrafi Saeidlou, S., Rasouli-Sadaghiani, M. H., Samadi, A., Barin, M., and Sepehr, E., 2025. Study of Silicate-Solubilizing Microorganisms Impact on the Dissolution of Soil Non-Exchangeable Potassium, Growth Indices of Maize (*Zea mays* L.), and Nutrient Uptake. *Applied Soil Research*, 12(4), pp.15-29. DOI: 10.30466/ASR.2025.55524.1858. (In Persian).
 16. Babalola, B. J., Li, J., Willing, C. E., Zheng, Y., Wang, Y. L., Gan, H. Y., Li, X. C., Wang, C., Adams, C. A., and Gao, C., 2022. Nitrogen fertilisation disrupts the temporal dynamics of arbuscular mycorrhizal fungal hyphae but not spore density and community composition in a wheat field. *New Phytologist*, 234(6), pp.2057-2072. DOI: 10.1111/nph.18043.
 17. Baghani, F., Rahnama, K., Aghajani, M., and Dehghan, M., 2012. Biological control of *Fusarium* head blight (*Fusarium graminearum*) by application of three native *Trichoderma* species in field. *International Journal of Plant Production*. 19(2), pp.123-140. DOI: 20.1001.1.23222050.1391.19.2.8.6. (In Persian).
 18. Bahraminejad, F., Nasibi, F., Oloumi, H., and Arab, R., 2023. A comparative study of inoculation with two growth-promoting and siderophore-producing bacteria (*Enterobacter cloacae* and *Bacillus cereus*) on iron availability in pistachio seedlings (*Pistacia Vera* L.). *Applied Biology*. 36(1), pp.85-108. DOI: 10.22051/jab.2023.40791.1493. (In Persian).
 19. Bakhshi, A., Abdossi, V., and Ghanbari Jahromi, M., 2025. Effects of seaweed extract on the growth and biochemical characteristics of Tarragon (*Artemisia dracunculus* L.) under drought stress. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 41(1), pp.145-163. DOI: 10.22092/ijmapr.2024.364983.3425. (In Persian).
 20. Bilal, S., Shahzad, R., Imran, M., Jan, R., Kim, K. M., and lee, I.-J., 2020. Synergistic association of endophytic fungi enhances *Glycine max* L. resilience to combined abiotic stresses: Heavy metals, high temperature and drought stress. *Industrial Crops and Products*, 143, p.111931. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111931.
 21. Breedts, G., Korsten, L., and Gokul, J. K., 2025. Enhancing multi-season wheat yield through plant growth-promoting rhizobacteria using consortium and individual isolate applications. *Folia Microbiologica*, 1-10. DOI: 10.1007/s12223-025-01245-9.
 22. Czarnes, S., Mercier, P. E., Lemoine, D. G., Hamzaoui, J., and Legendre, L., 2020. Impact of soil water content on maize responses to the plant growth-promoting rhizobacterium *Azospirillum lipoferum* CRT1. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 206(5), pp.505-516. DOI:10.1111/jac.12399.
 23. Darini, E., Alizadeh, H., Khanamani, M. and Sedaratian-Jahromi, A., 2025. The effect of plant growth-promoting rhizobacteria on biological and reproductive parameters of two-spotted spider mite in cucumber. *Plant Pest Research*. 14(4), pp.45-57. DOI: 10.22124/IPRJ.2025.29302.1618. (In Persian).
 24. Dzvene, A. R., Zhou, L., Slayi, M., and Dirwai, T. L., 2025. A scoping review on challenges and measures for climate change in arid and semi-arid agri-food systems. *Discover Sustainability*, 6(1), pp.151. DOI: 10.1007/s43621-025-00945-z.
 25. Fouzia, A., Allaoua, S., Hafsa, C.-S., and Mostefa, G., 2015. Plant growth promoting and antagonistic traits of indigenous fluorescent *Pseudomonas* spp. isolated from wheat rhizosphere and *A. halimus* endosphere. *European scientific journal*, 11(24).
 26. Ghorbani, L., Salehi, A., Movahhdi Dehnavi, M., Balouchi, H., and Rostampour, P., 2024. Investigating the effects of biofertilizers on the absorption

- of nutrients, physiological characteristics and shoot dry weight of milk thistle (*silybum marianum*) medicinal plant under different irrigation regimes *Journal of Crops Improvement*. 26(4), pp.861-881. DOI: 10.22059/jci.2024.360095.2822. (In Persian).
27. Golestanifar, F., Mahmoodi, S., Fallahi, H., and Shahidi, A., 2024. Evaluation of some growth traits of quinoa cultivars (*Chenopodium quinoa* Willd.) affected by moisture levels and planting date in two regions of South Khorasan. *Journal of Plant Production*. 31(3), pp.231-261. DOI: 10.22069/JOPP.2024.21908.3089. (In Persian).
 28. Grayloo, A., Aelaei, M., Mortazavi, S. N., Arghavani, M., and Salehi, F. 2024. The effect of *Bacillus subtilis* and *Bacillus velezensis* bacteria on tolerance to salinity stress in orange marigold (*Tagetes erecta* L.). *Journal of Plant Production Research*. 31(1), pp.189-211. DOI: 10.22069/JOPP.2023.21438.3049. (In Persian).
 29. Habib-ur-Rahman, M., Ahmad, A., Raza, A., Hasnain, M.U., Alharby, H.F., Alzahrani, Y.M., Bamagoos, A.A., Hakeem, K.R., Ahmad, S., Nasim, W. and Ali, S., 2022. Impact of climate change on agricultural production; Issues, challenges, and opportunities in Asia. *Frontiers in Plant Science*, 13, p.925548. DOI: 10.3389/fpls.2022.925548.
 30. Hawkins, H.-J., Cargill, R. I., Van Nuland, M. E., Hagen, S. C., Field, K. J., Sheldrake, M., Soudzilovskaia, N. A., and Kiers, E. T., 2023. Mycorrhizal mycelium as a global carbon pool. *Current Biology*, 33,(11), pp. R560-R573. DOI: 10.1016/j.cub.2023.02.027.
 31. Heidarzadeh, N., Baghaee-Ravari, S., Rouhani, H., and Mahdikhani Moghaddam, E., 2016. Study the effects of some *Trichoderma* spp. on tomato growth parameters using three inoculation methods. *Journal of plant production research*. 23(1), pp. 23-29. DOI: 10.5897/AJB10.1600. (In Persian).
 32. Heydari, N., 2019. Visions and Approaches for Adapting to Climate Change, from Agricultural Water Management and Food Security Aspects. *Journal of Water Management in Agriculture*. 6(1), pp.23-36. (In Persian).
 33. Hosseini, S. S., Rejali, F., and Keshavarz, P., 2024. Effect of Some Biofertilizers on the Physiological Characteristics of Wheat Flag Leaves and Rhizosphere Enzyme Activities at Different Irrigation Levels. *Journal of Soil Biology*, 12(1), pp.65-88. DOI: 10.22092/SBJ.2024.365435.263.
 34. Hou, X., Wu, F., Wang, X.-J., Sun, Z.-T., Zhang, Y., Yang, M.-T., Bai, H., Li, S., and Bai, J.-G., 2018. *Bacillus methylotrophicus* CSY-F1 alleviates drought stress in cucumber (*Cucumis sativus*) grown in soil with high ferulic acid levels. *Plant and Soil*, 431(1), pp.89-105. DOI: 10.1007/s11104-015-2464-y.
 35. Jahantigh, T., Raissi, A., and Piri, H., 2024. Investigating the Effect of Biological Fertilizers on Some Quantitative and Qualitative Characteristics of Guar Plant (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) in Iranshahr City. *Journal of Crops Improvement*, 26(2), pp.471-485. DOI: 10.22059/jci.2024.353499.2787. (In Persian).
 36. Kavehnia, A., Samsampour, D., and Askari Seyahoei, M., 2023. Isolation and morphological and molecular identification of important endophyte fungi of *Pistacia mutica* in Hormozgan province and their effect on increasing salt stress tolerance of California Wonder 3 pepper seedlings. *Journal of Plant Production Research*. 30(3), pp.41-64. DOI: 10.22069/JOPP.2023.20576.2962.
 37. Khoshmanzar, E., Aliasgharzad, N., Neyshabouri, M., Khoshru, B., Arzanlou, M., and Asgari Lajayer, B., 2020. Effects of *Trichoderma* isolates on tomato growth and inducing its tolerance to water-deficit stress. *International journal of environmental science and technology*. 17(2), pp.869-878. DOI: 10.1007/s13762-019-02405-4.
 38. Khoshru, B., Mitra, D., Khoshmanzar, E., Myo, E. M., Uniyal, N., Mahakur, B., Mohapatra, P. K. D., Panneerselvam, P., Boutaj, H., and Alizadeh, M., 2020. Current scenario and future prospects of plant growth-promoting rhizobacteria: an economic valuable resource for the agriculture revival under stressful

- conditions. *Journal of Plant Nutrition*. 43(20), pp.3062-3092. DOI: 10.1080/01904167.2020.1799004.
39. Khosravi, H., 2022. Biofertilizers: Extension, Recommendations and Methods of consumption in Agricultural Crops. *Popularization of Science*. 13(1), pp.76-91. DOI: 10.22034/POPSCI.2022.308930.1133. (In Persian).
 40. Khosravi, H., Khoshru, B., Nosratabad, A. F., and Mitra, D., 2024. Exploring the landscape of biofertilizers containing plant growth-promoting rhizobacteria in Iran: Progress and research prospects. *Current Research in Microbial Sciences*. 7, p.100268. DOI: 10.1016/j.crmicr.2024.100268.
 41. Kumar, H., Bajpai, V. K., Dubey, R., Maheshwari, D., and Kang, S. C., 2010. Wilt disease management and enhancement of growth and yield of *Cajanus cajan* (L) var. Manak by bacterial combinations amended with chemical fertilizer. *Crop protection*, 29(6), pp. 591-598. DOI: 10.1016/j.cropro.2010.01.002.
 42. Li, Z., Wen, W., Qin, M., He, Y., Xu, D., and Li, L., 2022. Biosynthetic mechanisms of secondary metabolites promoted by the interaction between endophytes and plant hosts. *Frontiers in microbiology*, 13, p.928967. DOI: 10.3389/fmicb.2022.928967.
 43. Liang, C., Schimel, J. P., and Jastrow, J. D., 2017. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature microbiology*, 2(8), pp.1-6. DOI: 10.1038/nmicrobiol.2017.105.
 44. Lutz, S., Bodenhausen, N., Hess, J., Valzano-Held, A., Waelchli, J., Deslandes-Herold, G., Schlaeppli, K., and Van Der Heijden, M. G., 2023. Soil microbiome indicators can predict crop growth response to large-scale inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi. *Nature microbiology*, 8(12), pp.2277-2289. DOI: 10.1038/s41564-023-01520-w.
 45. Mao, L., Pan, J., Jiang, S., Shi, G., Qin, M., Zhao, Z., Zhang, Q., An, L., Feng, H., and Liu, Y., 2019. Arbuscular mycorrhizal fungal community recovers faster than plant community in historically disturbed Tibetan grasslands. *Soil Biology and Biochemistry*, 134, pp.131-141. DOI: 10.1016/j.soilbio.2019.03.026.
 46. Meena, V. S., Bahadur, I., Maurya, B. R., Kumar, A., Meena, R. K., Meena, S. K., and Verma, J. P., 2016. Potassium-solubilizing microorganism in evergreen agriculture: an overview. Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture, pp.1-20. DOI: 10.1007/978-81-322-2776-2_1.
 47. Mirtayebi, M., Bostani, A., Diyanat, M., and Amin, A., 2024. Effects of application of biofertilizer and potassium nanofertilizer on yield and some physiological traits of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) under drought stress. *Applied Field Crops Research*, 36(1), pp.65-42. DOI: 10.22092/AJ.2024.359942.1625. (In Persian).
 48. Mirzaei, J., Jaafarian, N., Jafari, M., and Hoseinzadeh, J., 2023. Biodiversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Natural and Agricultural Land and their relationship with soil properties in Zagros Forest. *Journal of Soil Biology*. 11(1), pp.47-62. DOI: 10.22092/SBJ.2023.361383.246. (In Persian).
 49. Mohammadi, E., Mehrabi, A. A., Motamedvaziri, B., 2023. Investigating the necessity of a comprehensive water law in Iran. *Watershed Engineering and Management*. 15(3), pp.467-480. DOI: 10.22092/ijwmse.2022.354374.1894. (In Persian).
 50. Mohebbi, S., Ghanbari Jahromi, M., and Weisany, W., 2024. The Effect of Azotobacter and Vermicompost Application on Growth and Physiological Characteristics of Watercress (*Nasturtium officinale*) under Water Stress. *Journal of Crops Improvement*, 26(4), pp.825-841. DOI: 10.22059/jci.2024.367825.2864. (In Persian).
 51. Negi, N. P., Narwal, P., and Sharma, A., 2023. Plant–microbe interaction in alleviating drought stress. In *The Chemical Dialogue Between Plants and Beneficial Microorganisms*. pp. 49-65. Academic Press. Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-323-91734-6.00022-3.
 52. Nosratabad, A.R.F., Etesami, H. and Shariati, S., 2017. Integrated use of organic fertilizer and bacterial inoculant improves phosphorus use efficiency in

- wheat (*Triticum aestivum* L.) fertilized with triple superphosphate. *Rhizosphere*, 3, pp.109-111. DOI: 10.1016/j.rhisph.2017.03.001.
53. Parvizi, K., and Ghadami f#, A., 2024. Improving water use efficiency, estimating economic benefits and increasing potato tuber quality by the combined application of super absorbent polymer and mycorrhizal biofertilizer. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(4), pp.35-50. DOI: 10.22126/ATWE.2024.10836.1130. (In Persian).
54. Pavithra, D., and Yapa, N., 2018. Arbuscular mycorrhizal fungi inoculation enhances drought stress tolerance of plants. *Groundwater for Sustainable Development*, 7, pp.490-494. DOI: 10.1016/j.gsd.2018.03.005.
55. Pehlivan, N., Saruhan-Guler, N., and Alpay-Karaoglu, Ş., 2018. The effect of *Trichoderma* seed priming to drought resistance in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants. *Hacettepe Journal of Biology and Chemistry*, 46(2), pp. 263-272. DOI: 10.15671/HJBC.2018.234.
56. Raei, Y., Azarnejad, S., Nasrollahzadeh, S., and Kheirizadeh Arough, Y., 2025. Impact of biological and chemical fertilizers on some morphophysiological traits and yield of Canola (*Brassica napus* L.). *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 34,(4) pp.85-101. DOI: 10.22034/SAPS.2023.58690.3125. (In Persian).
57. Rahimkhani, B., Naseri, M., Ahmadian, A., and Alipanah, M., 2024. The Effect of Foliar Application of Seaweed Extract on Morphological and Physiological Traits of *Echium amoenum* Fisch. and Mey Seedlings under Salinity Stress. *Journal Of Horticultural Science*, 38(4), pp.704-693. DOI: 10.22067/jhs.2024.88537.1353. (In Persian).
58. Rajini, S. B., Nandhini, M., Udayashankar, A. C., Niranjana, S. R., Lund, O. S., and Prakash, H. S., 2020. Diversity, plant growth-promoting traits, and biocontrol potential of fungal endophytes of *Sorghum bicolor*. *Plant pathology*, 69(4), pp.642-654. DOI: 10.1111/ppa.13151.
59. Rawal, R., Scheerens, J. C., Fenstermaker, S. M., Francis, D. M., Miller, S. A., and Benitez, M.-S., 2022. Novel *Trichoderma* isolates alleviate water deficit stress in susceptible tomato genotypes. *Frontiers in plant science*, 13, p.869090. DOI: 10.3389/fpls.2022.869090.
60. Rezalou, Z., Shahbazi, S., Alilou, A. A., and Ghorbani, A., 2023. Biostimulant impact of *Trichoderma* species on physiological characteristics of beans. *Iranian Journal of Genetics and Plant Breeding (IJGPB)*, 12(2), pp.(48-37). DOI: 10.30479/IJGPB.2024.19355.1356. (In Persian).
61. Rezvaninia, F., Ebadi, M.-T., and Safaie, N., 2024. Investigating the Use of Mycorrhiza and *Trichoderma* Fungi on Rhizome Yield and Active Ingredients of Ginger. *Journal of Horticulture Science*. 3(38), 551-562. DOI: 10.22067/jhs.2024.85675.1308.
62. Rostami, T., Abbasdokht, H., Makarian, H., Gholipour, M. and Karimzadehasl, K., 2024. Effect of mycorrhiza and phosphorus on phytochemical and antioxidant properties of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) in intercropping system. *Journal of Plant Production Research*. 31(4), 69-88. DOI: 10.22069/JOPP.2023.21943.3096. (In Persian).
63. Rostamikia, Y., Matinizadeh, M., and Rahmani, A., 2024. Evaluation and physiological traits of hazelnut seedlings inoculated with *Trichoderma harzianum* Rifai fungus in field conditions. *Journal of Soil Biology*, 12(1), pp.89-104. DOI: 10.22092/SBJ.2024.363916.258. (In Persian).
64. Sadeghi, A., Farsi, M., Taheri, P., and Sinigani, A., 2025. Effect of Fungi Isolated from the *Chenopodiaceae* Family on the Growth Characteristics and Increasing Phosphorus Absorption of Barley (*Hordeum vulgare*) Plant. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 22(4), pp.359-371. DOI: 10.22067/jcresc.2024.86058.1289. (In Persian).
65. Sadeghi Kochsafhani, P., Mousavi Mirkalaeia, S. A., Moballegghi, M., Samdeliri, M., and Akbarpour, M., 2024. The effect of biological and organic fertilizers on the quantitative and

- qualitative production of mung bean under water stress. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(8), 1345-1358. DOI: 10.22059/IJSWR.2024.373798.669678. (In Persian).
66. Saeidnia, F., and Hamid, R., 2024. Drought stress memory and its relationship with morpho-physiological, biochemical and molecular changes in crop plants. *Iranian Journal of Crop Sciences*. 26(1), pp. 71-93. DOR: 20.1001.1.23223243.2021.19.1.29.0. (In Persian).
67. Scholz, S. S., Barth, E., Clement, G., Marmagne, A., Ludwig-Muller, J., Sakakibara, H., Kiba, T., Vicente-Carbajosa, J., Pollmann, S., and Krapp, A., 2023. The root-colonizing endophyte *Piriformospora indica* supports nitrogen-starved *Arabidopsis thaliana* seedlings with nitrogen metabolites. *International journal of molecular sciences*, 24(20), pp.15372. DOI: 10.3390/ijms242015372.
68. Sedri, M.H., Niedbała, G., Roohi, E., Niazian, M., Szulc, P., Rahmani, H.A. and Feiziasl, V., 2022. Comparative analysis of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and chemical fertilizers on quantitative and qualitative characteristics of rainfed wheat. *Agronomy*, 12(7), p.1524. DOI: 10.3390/agronomy12071524.
69. Sekmen Cetinel, A. H., Gokce, A., Erdik, E., Cetinel, B., and Cetinkaya, N., 2021. The effect of trichoderma citrinoviride treatment under salinity combined to rhizoctonia solani infection in strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.). *Agronomy*, 11(8), p.1589. DOI: 10.3390/agronomy11081589.
70. Sepasi, N., Taheri, A., Zamani, S. M., Jahani, M. and Farashiani, M., 2024. Effect of ectomycorrhizal fungus *Laccaria bicolor* on some physiological and morphological characteristics of *Populus alba* under drought stress and cytospora canker conditions. *Journal of Plant Production Research*, 31(1), pp.47-68. DOI: 10.22069/JOPP.2023.21018.3008. (In Persian).
71. Shafiee, A., and Azmi, A., 2024. Assessment of the effects of sustainable agriculture on water and soil resources (Case study: Homil District of Islamabad Gharb County). *Journal of Agricultural Economics Research*, 16(2). 15-29. DOI: 10.30495/jae.2023.31328.2367. (In Persian).
72. Shariati Sh., Alikhani H.A., Shariati Sh. 2019. Using plant growth promoting bacteria inoculants- *Pseudomonas fluorescens*- to increase growth and nutrient uptake of wheat. *Applied Soil Research*, 7(1): 165-176. (In Persian).
73. Sharifi, Z., Eisvand, H. R., Akbari, N., and Akbarpour, O. A., 2025. Effects of cow manure, biological fertilizer, and gibberellin on reproduction and yield of the endangered medicinal plant *Allium jesdianum* Boiss. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 41(1), pp164-181. DOI: 10.22092/ijmapr.2025.366188.3457. (In Persian).
74. Sheoran, S., Kumar, S., Kumar, P., Meena, R. S., and Rakshit, S., 2021. Nitrogen fixation in maize: breeding opportunities. *Theoretical and Applied Genetics*, 134(5), pp.1263-1280. DOI: 10.1007/s00122-021-03791-5.
75. Sneha, G., Annayya, Hembrom, B. B., Varghese, E., Yadav, R. K., and Abraham, G., 2023. Screening and selection of *Anabaena* spp. for desiccation tolerance through physiological parameters and multivariate analysis. *Journal of Applied Phycology*, 35(3), pp.1273-1284. DOI: 10.1007/s10811-023-02942-z.
76. Soliman, M. H., Alnusaire, T. S., Abdelbak y, N. F., Alayafi, A. A., Hasanuzzaman, M., Rowezak, M. M., El-Esawi, M., and Elkelish, A., 2020. Trichoderma-induced improvement in growth, photosynthetic pigments, proline, and glutathione levels in *Cucurbita pepo* seedlings under salt stress. *Phyton*, 89(3), 473. DOI: 10.32604/phyton.2020.08795.
77. Taufiq, A., and Yusnawan, E., 2020. Influence of Trichoderma as a seed treatment on the growth and yield of groundnut under saline environment. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 8(1), p. 2401. DOI: 10.15243/jdmlm.2020.081.2401.
78. Upadhyay, S. K., Srivastava, A. K., Rajput, V. D., Chauhan, P. K., Bhojiya, A. A., Jain, D., Chaubey, G., Dwivedi, P., Sharma, B., and Minkina, T., 2022. Root exudates: mechanistic insight of plant

- growth promoting rhizobacteria for sustainable crop production. *Frontiers in microbiology*, 13, p.916488. DOI: 10.3389/fmicb.2022.916488.
79. Valojai, S. T. S., Niknejad, Y., Fallah, H., and Tari, D. B., 2021. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium nano-fertilizers on growth and seed of two rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *journal of crop ecophysiology*, 15(57), pp.37-56. DOI: 10.22034/SAPS.2022.49296.2783. (In Persian).
80. Yasmeen ,R., and Shaheed Siddiqui, Z., 2017. Physiological responses of crop plants against *Trichoderma harzianum* in saline environment. *Acta Botanica Croatica*, 76(2), pp.154-162. DOI: 10.1515/botcro-2016-0054.
81. Zakerian, F., Sefidkon, F., Abbaszadeh, B., Kalatejari, S., Layeghhaghighi, M., and Hadi, N., 2025. Effect of drought stress and mycorrhizal fungi on some physiological traits of *Satureja sahendica* Bornm. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 41(1), pp.46-65. DOR: 20.1001.1.16807073.2020.22.3.20.0. (In Persian).
82. Ziaeian, A., Moradi, A., Zareian, G., and Hosseini, M., 2020. Effect of Mycorrhiza Inoculation and Biochar Application on Phosphorus Availability, Growth, and Yield of Sorghum and Some Soil Chemical Properties. *Soil Research*. 33(4), 473-483. DOI: 10.22092/IJSR.2020.127000.461. (In Persian).