Publisher: Soil Science Society of Iran

Journal of Soil Biology

https://sbj.areeo.ac.ir

Review article

Enhancing agricultural productivity using PGPR and nanoparticles: mechanisms, challenges, and future directions

Bahman Khoshru[1*], Alireza Fallah Nosratabad[2], Houshang Khosravi[3], Ahmad Asgharzadeh[3] and Laleh Faridian[4]

1-Postdoctoral Researcher, Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj 31785-311, Iran. bahmankhoshru@yahoo.com

2-Professor of Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj 31785-311, Iran. a.r.fallah1350@gmail.com

3-Associate Professor of Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj 31785-311, Iran. khosravi_1971@yahoo.com , a_asgharzadeh_2000@yahoo.com

4-Department of Soil Science, Islamic Azad University, Isfahan (Khorasgan) Branch, Isfahan, Iran. laleh.faridian@gmail.com

Article Info

Received:
Feb1,2025
Accepted:
April 19,2025
Keywords:
Food security, Nano-fertilizers, Nutrient uptake, Sustainable agriculture, Synergy

Corresponding author's email:
bahmankhoshru@yahoo.com

DOI:
10.22092/SBJ.2025.368425.277

Extended Abstract

Background and objective: The growing global population and increasing food demand necessitate sustainable agricultural practices that enhance productivity while minimizing environmental impact. Conventional agriculture's reliance on synthetic inputs has led to significant environmental degradation. In this context, integrating biotechnological approaches, particularly using plant growth-promoting bacteria (PGPR) and nanotechnology, offers a promising strategy. PGPR, a diverse group of rhizosphere bacteria, promote plant growth through direct mechanisms like enhancing nutrient availability (nitrogen fixation, phosphorus solubilization, potassium mobilization), producing phytohormones (auxins, gibberellins, cytokinins), and synthesizing siderophores. Indirect mechanisms involve suppressing pathogens through antibiotics, lytic enzymes, and induced systemic resistance (ISR). Nanoparticles, with their unique physicochemical properties (high surface area-to-volume ratio, quantum effects, enhanced reactivity), offer advantages in agriculture. They act as carriers for targeted delivery of nutrients and agrochemicals, improving efficiency and reducing contamination. They also directly influence plant physiological processes. Combining PGPR and nanoparticles shows promising synergistic effects, potentially leading to greater improvements in plant growth and yield. This synergy stems from enhanced bacterial colonization, improved nutrient delivery, and direct effects on plant physiology. This study aims to: (1) review the mechanisms by which PGPR and nanoparticles influence plant growth; (2) investigate their synergistic interactions; (3) analyze their practical applications; (4) discuss challenges and limitations; and (5) provide future research recommendations for optimizing their application in sustainable agriculture.

Material and Methods: This study employed a comprehensive literature review of existing research on PGPR and nanoparticle applications in agriculture. Scientific articles, reports, books, reviews, and conference proceedings were collected from databases like Scopus, Web of Science, PubMed, Google Scholar, and Sciencedirect. Keywords and Boolean operators were used for the search, including "plant growth-promoting bacteria," "PGPR," "nanoparticles," "nanotechnology in agriculture," "Nutrient uptake," "Plant hormones," "Biotic/abiotic stress," "Sustainable agriculture," "Nanofertilizers," and related terms. The collected literature was critically evaluated for relevance, methodological rigor, and scientific quality. Studies investigating the synergistic effects of combining PGPR and nanoparticles were prioritized. Information extracted included types of PGPR and nanoparticles, application methods, plant species, experimental conditions, and measured parameters (plant growth, yield, nutrient uptake, stress tolerance).

Results: The literature review provides compelling evidence of the beneficial effects of PGPR and nanoparticles on plant growth and yield. PGPR have consistently been shown to enhance nutrient availability, stimulate root development, improve water use efficiency, and increase plant resistance to various biotic and abiotic stresses. Numerous studies have demonstrated the ability of PGPR to fix atmospheric nitrogen, solubilize insoluble phosphorus, and mobilize potassium, making these essential nutrients available to plants. Furthermore, PGPR are known to produce various phytohormones, such as auxins, gibberellins, and cytokinins, which play crucial roles in regulating plant growth and development, including cell elongation, cell division, and differentiation. The production of siderophores by PGPR has also been shown to improve iron uptake by plants, especially in calcareous soils. Nanoparticles, with their unique properties, serve as effective carriers for delivering nutrients, pesticides, and other agrochemicals to plants, improving their efficiency and reducing environmental contamination. Studies have also demonstrated the direct effects of nanoparticles on plant physiological processes, such as enhancing photosynthesis by improving chlorophyll content and photosynthetic efficiency, and influencing stomatal regulation. The combined application of PGPR and nanoparticles consistently results in synergistic effects, leading to greater improvements in plant growth and yield compared to the application of either technology alone. This synergy can be attributed to several factors. Nanoparticles can enhance the colonization of plant roots by PGPR by providing a protective microenvironment and improving bacterial attachment. Conversely, PGPR can facilitate the uptake and translocation of nanoparticles within the plant. The combination of PGPR and nanoparticles has been shown to improve plant tolerance to various abiotic stresses, such as drought, salinity, and heavy metal toxicity.

Conclusion: The combined application of PGPR and nanoparticles represents a promising and sustainable approach for enhancing agricultural productivity and minimizing environmental impact. The synergistic interactions between these two technologies offer significant potential for improving plant growth, yield, and quality. PGPR contribute by enhancing nutrient availability, producing phytohormones, and inducing systemic resistance, while nanoparticles act as efficient delivery systems for nutrients and other agrochemicals and directly influence plant physiological processes. The combined application of these technologies often results in greater improvements in plant growth and yield compared to individual applications, demonstrating a clear synergistic effect. However, several challenges need to be addressed before widespread adoption of this approach. These challenges include the potential toxicity of certain nanoparticles to plants and soil microorganisms, the need for further research on the long-term environmental impacts of nanoparticles, the cost-effectiveness of nanoparticle production and application, and the development of standardized protocols for application. Furthermore, understanding the precise mechanisms of interaction between specific PGPR strains and different types of nanoparticles is crucial. Future research should focus on: (1) elucidating the complex interactions between PGPR, nanoparticles, plants, and the soil microbiome at the molecular level; (2) conducting comprehensive risk assessments to evaluate the potential environmental and human health impacts of nanoparticles used in agriculture; (3) developing sustainable and cost-effective methods for producing and applying nanoparticles in agriculture; (4) optimizing the application methods and formulations of PGPR and nanoparticles for different crops and environmental conditions; (5) establishing clear regulatory frameworks for the use of nanoparticles in agriculture; (6) investigating the long-term effects of repeated applications of nanoparticles on soil health and ecosystem functioning; and (7) exploring the potential of using nanobiosensors for monitoring the effects of nanoparticles in the environment. By addressing these challenges and pursuing these research directions, the synergistic potential of PGPR and nanoparticles can be fully exploited to contribute to a more sustainable and productive agricultural future.

Cite this article: Khoshru, B., Fallah Nosrat Abad,A.R., Khosravi,H., Asgharzadeh,A., Farididan,L.,2025. Enhancing agricultural productivity using PGPR and nanoparticles: mechanisms, challenges, and future directions. Journal of Soil Biology, 12 (2)،279-313.

CC BY NC

DOI: 10.22092/SBJ.2025.368425.277
Publisher: Soil Science Society of Iran

دو فصلنامه

نشریه زیست‌شناسی خاک

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

مقاله مروری

افزایش بهره‌وری محصولات کشاورزی با باکتری‌های محرک رشد گیاه و نانوذرات: سازوکارها، چالش‌ها و جهت‌گیری‌های آینده

بهمن خوشرو[۱*]، علیرضا فلاح نصرت‌آباد[۲]، هوشنگ خسروی[۳]، احمد اصغرزاده[۳] و لاله فریدیان[۴]

۱-محقق پسادکترا، موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.bahmankhoshru@yahoo.com

۲-استاد موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.a.r.fallah1350@gmail.com

۳-دانشیار موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. khosravi_1971@yahoo.com , a_asgharzadeh_2000@yahoo.com

۴-گروه علوم خاک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایرانlaleh.faridian@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۶ پذیرش: ۱۴۰۴/۱/۳۰

چکیده

در دهه‌های اخیر، توجه به کشاورزی پایدار و بهره‌برداری مؤثر از منابع طبیعی به طور فزاینده‌ای افزایش یافته است. باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) و ذرات نانو به عنوان دو فناوری نوین در زیست‌فناوری کشاورزی، توانسته‌اند به بهبود رشد و کیفیت محصولات کشاورزی کمک شایانی کنند. PGPRها، گروه متنوعی از باکتری‌های مفید خاکزی هستند که از طریق سازوکارهای مستقیم و غیرمستقیم، رشد گیاهان را بهبود می‌بخشند. از سوی دیگر، ذرات نانو با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی منحصربه‌فرد خود، نقش‌های متعددی در کشاورزی ایفا می‌کنند و می‌توانند به عنوان حامل‌های مؤثر مواد مغذی و آفت‌کش‌ها عمل کرده و مستقیماً بر فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه تأثیر بگذارند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که استفاده ترکیبی از PGPR و نانوذرات می‌تواند اثرات هم‌افزایی قابل توجهی بر عملکرد محصولات کشاورزی داشته باشد. به عنوان مثال، کاربرد *Bacillus subtilis* با کود NPK در مزارع کلزا منجر به افزایش حدود ۴۶ درصدی عملکرد دانه در دو سال متوالی شده است. همچنین، استفاده از نانوذرات اکسید روی، آهن و Zn-Fe همراه با *Azotobacter* در گندم، افزایش چشمگیر ۸۸ درصدی در عملکرد دانه را نشان داده است. در شرایط تنش آلودگی خاک، ترکیب *Actinobacterium sp.* و نانوذرات سلنیوم موجب افزایش ۷۴ درصدی زیتوده در سویا گردید. علاوه بر این، استفاده از نانوذرات نقره با *Bacillus pumilus* و *Pseudomonas moraviensis* وزن تر پیاز را به ترتیب ۷۵ و ۳۳ درصد افزایش داده است. این اثرات هم‌افزایی احتمالاً از طریق بهبود جذب مواد مغذی، تولید هورمون‌های رشد گیاهی، افزایش تحمل به تنش و بهبود کلونیزاسیون ریشه، بهبود جذب مواد مغذی و تحریک سیستم ایمنی گیاه صورت می‌گیرد. با وجود این نتایج امیدوارکننده، استفاده از این فناوری‌ها با چالش‌هایی نظیر سمیت احتمالی برخی نانوذرات، اثرات بلندمدت زیست‌محیطی و نیاز به تدوین پروتکل‌های استاندارد برای تولید و مصرف همراه است. بنابراین، تحقیقات بیشتری برای بهینه‌سازی کاربرد این ترکیبات و درک کامل مکانیسم‌های عمل آن‌ها ضروری است.

واژه های کلیدی: امنیت غذایی، کودهای نانو، جذب مواد مغذی، کشاورزی پایدار، هم افزایی.

استناد: خوشرو،ب.، فلاح نصرت آباد،ع.، خسروی،ه.، اصغرزاده،ا.، فریدیان،ل.، ۱۴۰۴.افزایش بهره‌وری محصولات کشاورزی با باکتری‌های محرک رشد گیاه و نانوذرات: سازوکارها، چالش‌ها و جهت‌گیری‌های آینده. نشریه زیست شناسی خاک(۲)۱۲، ۳۱۳-۲۷۹

مقدمه

رشد روزافزون جمعیت جهانی و نیاز به تأمین غذای کافی، بهره‌برداری فزاینده از منابع طبیعی را اجتناب‌ناپذیر ساخته است. در این میان، کشاورزی به‌عنوان یکی از بخش‌های اصلی تأمین امنیت غذایی، تحت فشارهای شدید زیست‌محیطی و اقتصادی قرار گرفته است. مصرف بی‌رویه کودها و آفت‌کش‌های شیمیایی به‌منظور افزایش تولید محصولات کشاورزی، گرچه در کوتاه‌مدت مؤثر بوده است، اما در بلندمدت به تخریب خاک، کاهش تنوع زیستی و آلودگی محیط‌زیست منجر شده است (Atieno et al., 2020; Zhou et al., 2024). این مسائل، لزوم یافتن روش‌های پایدار و کارآمد برای بهبود عملکرد محصولات کشاورزی را بیش‌ازپیش آشکار می‌سازد. کشاورزی پایدار، به‌عنوان راهکاری جامع برای تأمین امنیت غذایی نسل‌های حاضر و آینده، بر حفظ تعادل میان تولید اقتصادی، سلامت محیط‌زیست و رفاه اجتماعی تأکید دارد. تخریب خاک، آلودگی منابع آبی و کاهش تنوع زیستی ناشی از استفاده بی‌رویه از کودها و سموم شیمیایی، ضرورت حرکت به این رویکرد را بیش از پیش آشکار کرده است. کشاورزی پایدار نه‌تنها با کاهش اثرات زیان‌بار بر محیط‌زیست به حفظ منابع طبیعی کمک می‌کند، بلکه با به‌کارگیری فناوری‌های نوین مانند ذرات نانو و استفاده از ریزجانداران مفید همچون باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR[1])، می‌تواند به افزایش بهره‌وری و کاهش وابستگی به نهاده‌های شیمیایی کمک کرده و گامی مؤثر در مقابله با تغییرات اقلیمی و حفظ اکوسیستم‌های کشاورزی باشد (Antoun and Prevost, 2005).

یکی از راهکارهای مطرح برای دستیابی به کشاورزی پایدار، استفاده از رویکردهای زیستی همچون کاربرد باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) است. این ریزجانداران مفید از طریق مکانیسم‌های مختلفی از جمله بهبود جذب عناصر غذایی و تولید هورمون‌های گیاهی، در افزایش رشد گیاه و حاصلخیزی خاک نقش مهمی ایفا می‌کنند (Glick, 1995; Goswami et al., 2016).

فناوری نانو نیز به‌عنوان یک ابزار نوین در حوزه کشاورزی، پتانسیل بالایی در افزایش بهره‌وری و پایداری سیستم‌های کشاورزی نشان داده است (Ali et al., 2018). ذرات نانو (NPs[2])، به دلیل خصوصیات منحصربه‌فرد خود نظیر اندازه کوچک، نسبت سطح به حجم بالا و واکنش‌پذیری زیاد، می‌توانند در بهبود جذب عناصر غذایی، افزایش کارایی کودها و آفت‌کش‌ها و کاهش تلفات آنها نقش‌آفرینی کنند (Vega-Celedón et al., 2021). همچنین، ترکیب فناوری نانو با ریزجانداران مفید مانندPGPRها، به‌عنوان یک رویکرد میان‌رشته‌ای نوین، افق‌های جدیدی را برای دستیابی به کشاورزی پایدار گشوده است. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که ترکیب ذرات نانو و PGPR نتایج چشمگیری در افزایش بهره‌وری و پایداری کشاورزی به همراه داشته است (Jahangir et al., 2020; Kapoor et al., 2023). به‌عنوان مثال، ترکیب ذرات نانو نقره (Ag-NPs) با باکتری *Bacillus subtilis* در کشت ذرت موجب افزایش رشد گیاه و کنترل بیماری‌های قارچی شده است، که تأثیر دوگانه این فناوری را در بهبود رشد گیاه و کاهش آلودگی‌های بیماری‌زا نشان می‌دهد (Ghazy et al., 2021). در مطالعه‌ای دیگر، استفاده از ذرات نانو آهن (Fe_3O_4) همراه با باکتری *Pseudomonas fluorescens* تأثیرات قابل‌توجهی بر رشد گوجه‌فرنگی و تحمل به شوری نشان داده است. این ترکیب با بهبود جذب عناصر غذایی و کاهش اثرات منفی تنش‌های اکسیداتیو، منجر به افزایش سلامت و بهره‌وری گیاه شده است (Aghaei et al., 2024). همچنین، کاربرد ذرات نانو سیلیس (SiO_2) به همراه *Azospirillum lipoferum* بررسی شده است که تأثیر قابل‌توجهی بر افزایش رشد ریشه و جذب مواد معدنی در گیاه زراعی

[1] Plant Growth-Promoting Rhizobacteria

[2] Nano particles

گندم نشان داده است. به گفته محققان، این اثرات ناشی از تعامل بهینه بین ذرات نانو و PGPR است که به تقویت سیستم ریشه کمک می‌کند (Akhtar et al., 2021). این نتایج به‌خوبی نشان‌دهنده نقش کلیدی ذرات نانو و PGPR در دستیابی به کشاورزی پایدار و کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی است.

در این مطالعه مروری، نقش ذرات نانو و باکتری‌های محرک رشد گیاه در بهبود رشد گیاهان، افزایش بهره‌وری کشاورزی و کاهش اثرات زیست‌محیطی بررسی می‌شود. هدف اصلی این مطالعه، ارائه چشم‌اندازی جامع از توانمندی‌های این دو رویکرد و تبیین تعاملات بالقوه میان آنها برای بهبود عملکرد کشاورزی و حفظ پایداری محیط‌زیست است. همچنین، چالش‌ها و فرصت‌های پیش‌رو در استفاده از این فناوری‌ها مورد بحث قرار گرفته است.

باکتری‌های محرک رشد گیاه

باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های حیاتی در توسعه کشاورزی پایدار مورد توجه قرار گرفته‌اند. این ریزجانداران خاکزی به دلیل توانایی کلونیزه کردن ریزوسفر و اثرات مثبت‌شان بر رشد و توسعه گیاه، نقشی کلیدی در بهبود عملکرد کشاورزی ایفا می‌کنند (Khoshru et al., 2020). اصطلاح PGPR برای نخستین بار در دهه ۱۹۷۰ توسط کلوپر و همکاران معرفی شد و از آن زمان، مطالعات گسترده‌ای برای بررسی سازوکارهای تأثیر این باکتری‌ها انجام شده است (Glick, 1995). PGPRها از طریق ایجاد ارتباط همزیستی با گیاهان میزبان، نقش‌هایی نظیر افزایش رشد ریشه، بهبود جذب عناصر غذایی و تقویت مقاومت گیاه در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی را ایفا می‌کنند (Khoshru et al., 2024; Khosravi et al., 2024). تعامل طولانی‌مدت بین گیاهان و ریزجانداران خاکی باعث تکامل PGPRها به‌اندوفیت‌های درون‌سلولی اختیاری شده است که می‌توانند هم در بافت گیاه و هم در محیط اطراف آن زندگی کنند (Bulgarelli et al., 2013). PGPRها تنها بخش کوچکی از جوامع میکروبی ریزوسفر (حدود ۲ تا ۵ درصد) را تشکیل می‌دهند، اما همین سهم اندک تأثیر بسزایی بر باروری خاک و پایداری کشاورزی دارد (Antoun and Prevost, 2005). جنس‌های مختلفی از باکتری‌ها نظیر *Arthrobacter*، *Burkholderia*، *Azospirillum*، *Azotobacter*، *Bacillus*، *Pseudomonas* و غیره به‌عنوان PGPR شناسایی شده‌اند که هر یک با عملکردهای مختلفی در ارتقای رشد گیاه نقش دارند (جدول ۱) (Vega-Celedón et al., 2021).

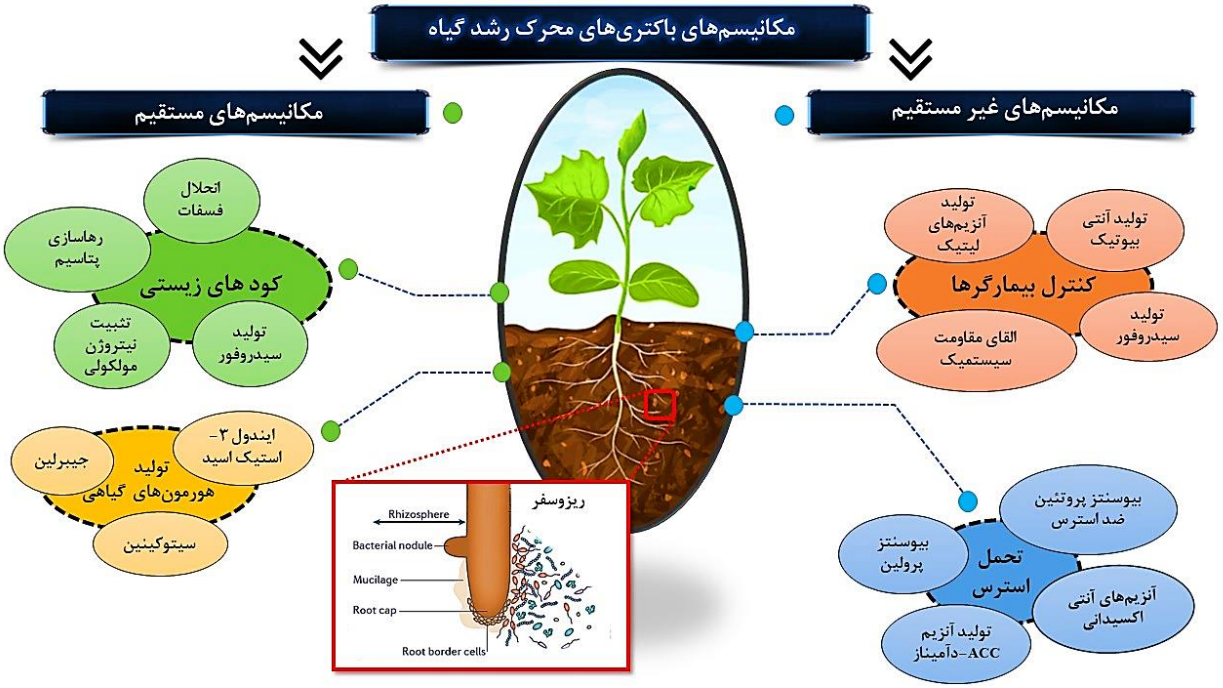
در سال‌های اخیر، استفاده از PGPRها به‌عنوان مکمل (یا جایگزینی) برای کودهای شیمیایی به دلیل آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف بی‌رویه کودها و آفت‌کش‌های شیمیایی مورد توجه ویژه قرار گرفته است. این باکتری‌ها با کاهش وابستگی به مواد شیمیایی و حفظ سلامت خاک، به توسعه سیستم‌های کشاورزی پایدار کمک می‌کنند. کودهای زیستی مبتنی بر PGPR بدون ایجاد آثار مخرب بر محیط زیست یا سلامت انسان، بهره‌وری محصولات کشاورزی را افزایش می‌دهند (Atieno et al., 2020). کاربردهای گسترده PGPR، از تولید کودهای زیستی تا ارتقای مقاومت گیاهان به تنش‌ها و پاکسازی محیط زیست، آن‌ها را به یکی از محورهای اصلی در تحقیقات زیست‌فناوری کشاورزی تبدیل کرده است (Shah et al., 2021a; Khosravi et al., 2024).

سازوکارهای اثرگذاری PGPR

باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر رشد و توسعه گیاه تأثیر می‌گذارند و این تأثیرگذاری از طریق سازوکارهای متنوع و پیچیده‌ای صورت می‌گیرد. در سازوکار مستقیم، PGPRها با بهبود تغذیه گیاه و فراهم کردن مواد مغذی ضروری، نقش قابل‌توجهی در افزایش رشد گیاه ایفا می‌کنند. به‌عنوان نمونه، این باکتری‌ها نیتروژن اتمسفر را تثبیت می‌کنند و عناصر معدنی نظیر فسفر، پتاسیم، روی و آهن خاک را به

شکل قابل‌جذب برای گیاه تبدیل می‌کنند. علاوه بر این، تنظیم و تعدیل سطح هورمون‌های گیاهی نظیر اکسین‌ها، سیتوکینین‌ها، جیبرلین‌ها، اسید آبسیزیک و اتیلن از دیگر سازوکارهای مستقیم آن‌ها است که منجر به تحریک رشد و نمو گیاه می‌شود (Parray et al., 2016; Kalam et al., 2020; Gouda et al., 2018; Fallah Nosratabab and Khoshru, 2024).

از سوی دیگر، سازوکار غیرمستقیم PGPRها بیشتر بر سلامت و افزایش مقاومت گیاه متمرکز است. این باکتری‌ها از طریق سرکوب بیمارگرهای گیاهی و مهار ریزجانداران مضر نقش محافظتی ایفا می‌کنند. ابزارهایی که برای این منظور به کار می‌برند شامل تولید ترکیبات ضد میکروبی نظیر سیانید هیدروژن، سیدروفورها، آنتی‌بیوتیک‌ها و متابولیت‌های ضد میکروبی است. همچنین، PGPRها با تولید آنزیم‌های کشنده[۳] نظیر کیتینازها[۴]، گلوکانازها[۵] و پروتئازها[۶] و رقابت برای مواد مغذی و جایگاه درون ریزوسفر، فضای زیستی ریشه را برای گیاه بهینه می‌کنند. افزون بر این، آن‌ها توانایی ایجاد مقاومت سیستمیک القایی (ISR[۷]) در گیاهان را دارند که به مقابله با طیف گسترده‌ای از بیمارگرهای ریشه و برگی کمک می‌کند (Meena et al., 2020; Islam et al., 2016; Berg et al., 2017; Sayyed et al., 2019). این سازوکارها باعث می‌شود که PGPR ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل زیستی در کشاورزی پایدار شناخته شوند.



شکل ۱- سازوکارهای تحریک رشد گیاه بواسطه PGPR.

کاربردهای PGPR در کشاورزی

همانطور که گفته شد PGPR نقش مهمی در افزایش رشد و عملکرد گیاهان دارند. این باکتری‌ها با تولید هورمون‌های گیاهی مانند اکسین و جیبرلین، موجب بهبود توسعه سیستم ریشه‌ای و جذب بهتر عناصر غذایی از خاک می‌شوند (Patel and Saraf, 2017). همچنین، از افزایش فراهمی زیستی عناصر غذایی مانند تثبیت نیتروژن، انحلال فسفات‌های نامحلول و آزادسازی پتاسیم، عناصر موردنیاز

[۳] Lytic enzymes
[۴] Chitinases
[۵] Glucanases
[۶] Proteases
[۷] Induced systemic resistance

گیاه را فراهم می‌کنند (Constantia and Ferniah, 2020). PGPRها مقاومت گیاهان را به تنش‌های غیرزیستی نظیر خشکی، شوری، دمای بالا و فلزات سنگین افزایش می‌دهند و با تنظیم اسمولیت‌ها و آنتی‌اکسیدان‌ها، سازگاری گیاهان را با شرایط نامساعد بهبود می‌بخشند (Silambarasan et al., 2019; Belimov et al., 2020, Shirinbayan et al., 2019). این باکتری‌ها با تولید متابولیت‌های ضدمیکروبی، رقابت با عوامل بیماری‌زا و القای مقاومت سیستمیک، از بروز بیماری‌های قارچی، باکتریایی و نماتدی جلوگیری کرده و نیاز به سموم شیمیایی را کاهش می‌دهند (Chandran et al., 2021). بر این اساس، نقش PGPR در کشاورزی پایدار به‌عنوان کود و آفت‌کش زیستی بسیار برجسته است، زیرا وابستگی به کودهای شیمیایی را کاهش داده و کیفیت محصولات کشاورزی را از نظر مواد مغذی، طعم و ماندگاری ارتقا می‌دهند. در زیست‌فناوری کشاورزی، این باکتری‌ها برای تولید محصولات زیستی مانند پلی‌هیدروکسی‌آلکانوات‌ها (PHAs[۸]) و زیست‌پالایی خاک‌های آلوده نیز به‌کار می‌روند (Weyens et al., 2009b; Evangelou and Deram, 2014).

مطالعات مختلف تأثیر عملی PGPR را در بهبود عملکرد و سلامت گیاهان نشان داده‌اند. به‌عنوان نمونه، استفاده از *Pseudomonas fluorescens* در کشت گندم باعث بهبود رشد ریشه و افزایش جذب فسفر شده است (Adesemoye et al., 2009). همچنین، *Azospirillum brasilense* به‌طور مؤثر تحمل گیاه ذرت به خشکی را افزایش داده و منجر به رشد بهتر در شرایط کم‌آبی شده است (Bashan et al., 2014). *Rhizobium leguminosarum*نیز در همزیستی با گیاهان نخودفرنگی توانسته است نیتروژن خاک را تثبیت کرده و به کاهش مصرف کودهای نیتروژنه کمک کند (Peoples et al., 2009). در مدیریت بیماری‌ها، *Bacillus subtilis* با تولید متابولیت‌های ضدمیکروبی، از پیشرفت بیماری پوسیدگی ریشه در گوجه‌فرنگی جلوگیری کرده است (Choudhary and Johri, 2009). همچنین، کاربرد *Pseudomonas putida* در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین موجب کاهش سمیت خاک و بهبود سلامت گیاهان شده است (Weyens et al., 2009b). این نتایج نشان می‌دهند کهPGPRها با کاربردهای متنوع، ابزارهای مؤثری برای افزایش بهره‌وری کشاورزی و بهبود پایداری زیست‌محیطی هستند.

[۸] Polyhydroxyalkanoates

جدول ۱- کاربرد باکتری‌های محرک رشد گیاه در کشاورزی به همراه اثرات آنها روی محصولات مختلف

ردیف	سویه‌های باکتریایی	محصول	شرایط ارزیابی	نکات برجسته	مرجع
۱	*Enterobacter hormaechei* ، *Rhizobium* spp. و *Pseudomonas fluorescence*	فلفل	گلخانه – استفاده از بذر تلقیح شده	گیاهان تلقیح شده علاوه بر مقاومت در برابر تنش خشکی، طول ساقه و ریشه بالاتری را نشان دادند.	(Admassie et al., 2022)
۲	*Bacillus subtilis* (MW644678, MW644686, MW644650, MW644649)	چغندرقند	گلخانه– با استفاده از بذر چغندرقند تیمار شده با هر باکتری	فعالیت ضد قارچی علیه *Sclerotome rolfsii Sacc* و کاهش شدت و بروز بیماری پوسیدگی ریشه. همچنین افزایش طول اندام هوایی و ریشه و وزن‌تر و خشک گیاه نیز ثبت شد.	(Farhaoui et al., 2022)
۳	*Streptomyces corchorusii* TKR8, *Streptomyces corchorusii* JAS2 and *Streptomyces misionensis* TBS5	برنج	گلخانه– با استفاده از بذور تلقیح شده	گیاهان تیمار شده، بهبودی در رشد گیاهان برنج و عملکرد دانه نشان دادند. علاوه بر این، کاهش شدت بیماری پوسیدگی خوشه باکتریایی برنج (BPB[۹]) در گیاهان تیمار شده مشاهده شد.	(Ngalimat et al., 2022)
۴	کنسرسیوم باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPB[۱۰])	دانه روغنی کلزا	آزمایش گلدانی با استفاده از خاک طبیعی آلوده به کادمیوم	کنسرسیوم‌های مبتنی بر PGPB رشد گیاه را افزایش دادند، جذب و استخراج گیاهی کادمیوم در کلزا و حذف آن از خاک را افزایش دادند.	(Wang et al., 2022)
۵	*Enterobacter cloacae* و *Burkholderia cepacia*	سیر	رشد در شرایط آزمایشگاهی	شاخص‌های فیزیولوژیک و رشد سیر با تلقیح PGPB افزایش یافت.	(Costa Júnior et al., 2020)
۶	*Methylobacterium oryzae* MNL7 و *Paenibacillus polymyxa* MaAL70	شالیزار غرقاب	خاک مزرعه	عملکرد دانه و کیفیت مواد مغذی دانه برنج با تلقیح بهبود یافت. در همین حال، انتشار متان در مقایسه با تیمارهای بدون تلقیح کاهش یافت.	(Rani et al., 2021)
۷	*Paenibacillus taichungensis* ، *Enterobacter* sp. ،*Rhizobium* sp. ،*Paenibacillus* sp. ، *Pseudomonas* sp.	ارکیده کاتلیا واکر	تلقیح نهال‌ها در شرایط آزمایشگاهی	بهبود اکتساب مواد مغذی، فعالیت آنتی اکسیدانی آنزیمی و غیر آنزیمی و افزایش رشد کلی گیاه.	(Andrade et al., 2023)
۸	*Pseudomonas gessardii* EU LUNA-25 و *Erwinia rhapontici* EU-B1SP1	تاج خروس	شرایط کنترل شده (گلدان) و طبیعی (مزرعه آزمایشی).	استفاده از کنسرسیوم باکتری‌ها، رشد محصولات (رشد و عملکرد دانه) را افزایش دادند.	(Devi et al., 2022)
۹	*Acinetobacter calcoaceticus* P23, *Pseudomonas fulva* Ps6 and *Chryseobacterium* strains	علف اردک[۱۱]	تولید زیست توده با استفاده از محتوای نیتروژن کم و پساب کارخانه مواد غذایی با نمک بالا	کابرد ترکیبی PGPRها، رشد محصول را افزایش دادند،	(Khairina et al., 2020)
۱۰	*A. Azotobacter chroococum* و *vinelandii*	بادمجان	تلقیح ریشه در گیاهان در معرض سطوح مختلف تنش خشکی	تلقیح گیاهان تحت تنش خشکی، منجر به افزایش تولید ماده خشک، محتوای نسبی آب برگ، غلظت عناصر (K، Ca و Mg) در برگ، میزان پروتئین در ریشه و همچنین میزان ترکیبات فنلی و پرولین شد..	(Kiran et al., 2022)

ذرات نانو در کشاورزی

کاربرد ذرات نانو (NPs) در کشاورزی به‌عنوان یک فناوری نوآورانه و چندمنظوره شناخته می‌شوند که نقش قابل‌توجهی در بهبود بهره‌وری، پایداری و حفاظت از محیط زیست ایفا می‌کنند. در کشاورزی، ذرات نانو به‌طور گسترده‌ای در رهایش کنترل‌شده کودها و آفت‌کش‌ها، افزایش دسترسی به عناصر غذایی ضروری و تقویت مقاومت گیاهان در برابر تنش‌های زیستی (مانند بیماری‌ها

[۹] Bacterial Panicle Blight

[۱۰] Plant Growth-Promoting Bacteria

[۱۱] Lemna sp.

و آفات) و غیرزیستی (مانند خشکی و شوری) استفاده می‌شوند (Kah et al., 2018).

تعریف و خواص

ذرات نانو که اندازه آن‌ها در محدوده ۱ تا ۱۰۰ نانومتر قرار دارد و به دلیل سطح به حجم بسیار بالا، خواص منحصربه‌فرد فیزیکی، شیمیایی و زیستی از خود نشان می‌دهند. این ویژگی‌ها شامل واکنش‌پذیری شیمیایی بالا، پایداری حرارتی افزایش‌یافته، خواص نوری استثنایی مانند پدیده پلاسمون سطحی[۱۲] (نوسانات جمعی الکترون‌های آزاد در سطح یک فلز در پاسخ به تحریک امواج الکترومغناطیسی) و هدایت الکتریکی و حرارتی بهبودیافته است (Rao et al., 2021). همچنین، اندازه کوچک این ذرات امکان نفوذ و تعامل بهتر آن‌ها را با ساختارهای زیستی، مانند دیواره سلولی و غشای گیاهان و میکروب‌ها را فراهم می‌آورد. این خصوصیات ذرات نانو را به ابزارهای قدرتمندی برای کاربردهای مختلف تبدیل کرده است. در کشاورزی، از ذرات نانو به‌عنوان حامل‌هایی برای آزادسازی کنترل‌شده کودها و آفت‌کش‌ها استفاده می‌شود، که این امر بهره‌وری نهاده‌ها را افزایش داده و اثرات منفی زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد. به‌علاوه، برخی از ذرات نانو خاصیت ضدمیکروبی دارند و می‌توانند در برابر بیمارگرهای گیاهی مؤثر باشند. این ویژگی‌ها ذرات نانو را در طیف گسترده‌ای از حوزه‌ها، از کشاورزی و داروسازی تا فناوری‌های زیست‌محیطی، کاربردی و ارزشمند کرده است (Bhattacharyya et al., 2016).

ذرات نانو فلزی

ذرات نانو فلزی از پرکاربردترین ذرات نانو در کشاورزی هستند که به دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی منحصربه‌فرد خود، در طیف گسترده‌ای از کاربردها مورد استفاده قرار می‌گیرند. ذرات نانو نقره[۱۳] (AgNPs) به دلیل ویژگی‌های قوی ضدباکتریایی و ضدقارچی، در مدیریت بیماری‌های گیاهی کاربرد دارند. این ذرات نانو می‌توانند رشد ریزجانداران بیماری‌زا مانند *Fusarium* و *Pseudomonas syringae* را مهار کنند (Singh et al., 2021). ذرات نانو آهن[۱۴] (FeNPs)، به دلیل توانایی بالای خود در تأمین آهن قابل‌جذب برای گیاهان، در رفع کمبود آهن و بهبود فرایند فتوسنتز مؤثر بوده و منجر به افزایش رشد و عملکرد محصول می‌شوند (Kashyap et al., 2020). علاوه بر این، ذرات نانو مس[۱۵] (CuNPs) با خاصیت ضدمیکروبی قوی خود، در جلوگیری از بیماری‌های قارچی و باکتریایی نقش دارند. این ذرات نانو به‌عنوان جایگزینی برای قارچ‌کش‌های شیمیایی معرفی شده‌اند که می‌توانند خطرات زیست‌محیطی را کاهش دهند. ذرات نانو روی[۱۶] (ZnNPs) نیز به‌عنوان نانوکود عمل کرده و نقش کلیدی در بهبود عملکرد فیزیولوژیکی گیاهان از جمله تولید هورمون‌های رشد و بهبود کیفیت دانه داشته‌اند. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از ذرات نانو روی می‌تواند رشد گیاهانی مانند گندم و برنج را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد (Zhang et al., 2021; Mazhar et al., 2023). در کنار مزایای این ذرات نانو در مدیریت بیماری‌های گیاهی، لازم است اثرات احتمالی آن‌ها بر جمعیت میکروبی مفید خاک، از جمله باکتری‌های محرک رشد گیاه(PGPR) ، نیز مورد توجه قرار گیرد و استفاده از آن‌ها با در نظر گرفتن غلظت و نحوه کاربرد مناسب صورت پذیرد.

ذرات نانو کربنی

ذرات نانو کربنی، شامل فولرن‌ها[۱۷]، نانولوله‌های کربنی (CNTs[۱۸]) و گرافن[۱۹]، به دلیل ساختار منحصربه‌فرد و خواص فیزیکی و شیمیایی برجسته، در بهبود رشد و توسعه گیاهان نقش مهمی ایفا می‌کنند. فولرن‌ها به دلیل پایداری شیمیایی و ظرفیت بالای جذب، می‌توانند به‌عنوان حامل‌های مؤثر مواد مغذی و تنظیم‌کننده‌های رشد عمل کنند (Jha and Yadav, 2023). نانولوله‌های کربنی نیز به دلیل قابلیت نفوذ به بافت‌های گیاهی، انتقال آب و مواد مغذی را بهبود می‌بخشند و از طریق افزایش فتوسنتز و رشد ریشه، عملکرد محصول را ارتقا می‌دهند (Hao et al., 2023). علاوه بر این، گرافن و مشتقات آن مانند اکسید گرافن، با خواص آنتی‌اکسیدانی و ظرفیت بالای تبادل یونی، می‌توانند در کاهش اثرات تنش‌های زیستی و غیرزیستی مؤثر باشند (Zahedi et al., 2023).

---

[۱۲] Surface Plasmon
[۱۳] Silver nanoparticles
[۱۴] Iron nanoparticles
[۱۵] Copper nanoparticles
[۱۶] Zinc nanoparticles
[۱۷] Fullerenes
[۱۸] Carbon nanotubes
[۱۹] Graphene

مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از نانولوله‌های کربنی در گیاهانی مانند گوجه‌فرنگی، انتقال مواد مغذی مانند پتاسیم را بهبود داده و رشد ریشه را افزایش داده است (Khodakovskaya et al., 2012). همچنین، اکسید گرافن در کاهش اثرات تنش‌های شوری و خشکی بر برنج مؤثر بوده و با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، سازگاری گیاهان با شرایط نامطلوب را بهبود بخشیده است (Zhang et al., 2020). این اثرات می‌توانند به طور مکمل با مکانیسم‌های عملکرد PGPR در بهبود جذب مواد مغذی، تحمل به تنش‌ها و در نهایت افزایش عملکرد گیاهان عمل کنند. بنابراین، ذرات نانو کربنی به‌عنوان ابزاری نوآورانه، نقش مهمی در ارتقای کشاورزی پایدار ایفا می‌کنند.

ذرات نانو پلیمری و زیستی

ذرات نانو پلیمری و زیستی به دلیل زیست‌تخریب‌پذیری، پایداری بالا و سازگاری با محیط‌زیست، کاربرد گسترده‌ای در کشاورزی پایدار پیدا کرده‌اند. این ذرات نانو نقش مهمی در رهایش کنترل‌شده نهاده‌هایی مانند کودها و آفت‌کش‌ها ایفا می‌کنند و از هدررفت مواد شیمیایی جلوگیری می‌کنند (Pavithran et al., 2024). نانوکپسول‌های پلیمری، که معمولاً از پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA[۲۰])، کیتوزان یا آلژینات ساخته می‌شوند، قادر به حمل و آزادسازی تدریجی آفت‌کش‌ها یا مواد مغذی هستند. این ویژگی موجب کاهش نیاز به مصرف مکرر نهاده‌ها و به حداقل رساندن اثرات زیست‌محیطی می‌شود (Vejan et al., 2021). همچنین، ذرات نانو زیستی تولیدشده از مواد طبیعی مانند پروتئین‌ها یا پلی‌ساکاریدها، ایمنی بالاتری برای محیط‌زیست و موجودات زنده دارند و در بهبود بهره‌وری کشاورزی مؤثر هستند. برای مثال، مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از نانوکپسول‌های پلیمری حاوی آفت‌کش‌ها در مزارع برنج توانسته است کارایی کنترل آفات را تا ۵۰ درصد افزایش دهد و مصرف آفت‌کش‌ها را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد(Grillo et al., 2014) . همچنین، ذرات نانو کیتوزانی به‌عنوان حامل کود نیتروژن در گیاه ذرت، بهبود چشمگیری در جذب نیتروژن و رشد گیاه نشان داده‌اند (Raliya et al., 2016).

نانوکامپوزیت‌ها[۲۱]

نانوکامپوزیت‌ها، ترکیبی از ذرات نانو با ماتریکس‌های آلی یا غیرآلی، به دلیل خواص مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی بهبودیافته، جایگاه ویژه‌ای در کشاورزی مدرن پیدا کرده‌اند. این مواد به‌طور گسترده در اصلاح خاک، افزایش بهره‌وری کودها و بهبود کیفیت بذرها به کار می‌روند. به دلیل سطح تماس بالای ذرات نانو در نانوکامپوزیت‌ها، این مواد قادر به بهبود تبادل مواد مغذی و کنترل آزادسازی آن‌ها هستند که به‌طور مستقیم به رشد و توسعه گیاهان کمک می‌کند. همچنین، نانوکامپوزیت‌های زیستی، به دلیل سازگاری با محیط‌زیست و قابلیت تجزیه زیستی، نقش مهمی در کشاورزی پایدار ایفا می‌کنند (Menossi et al., 2022). برای مثال، نانوکامپوزیت‌های حاوی ذرات نانو زئولیت و پلیمرها در اصلاح خاک شور توانسته‌اند جذب سدیم را کاهش داده و دسترسی گیاه به مواد مغذی را افزایش دهند (Miloševic et al., 2020). علاوه بر این، نانوکامپوزیت‌های کیتوزان-سیلیکای اصلاح‌شده به‌عنوان حامل‌های کود نیتروژن نشان داده‌اند که می‌توانند نیتروژن را به‌صورت تدریجی آزاد کنند و راندمان استفاده از کود را بهبود بخشند (Fertahi et al., 2021).

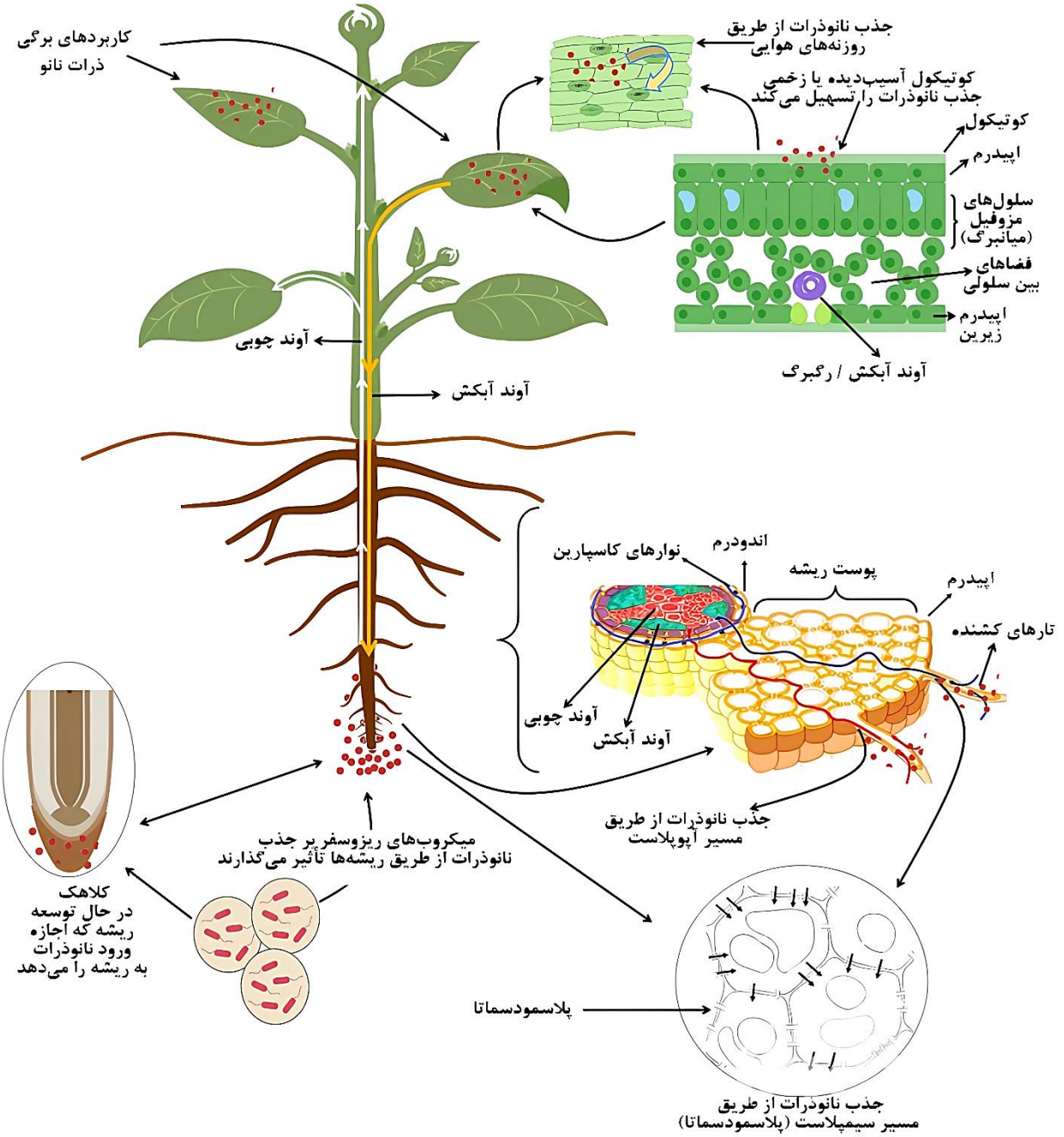
تأثیر ذرات نانو بر رشد گیاه

تأثیر ذرات نانو بر رشد گیاهان، موضوعی پیچیده و چندوجهی است که تحقیقات گسترده‌ای را به خود اختصاص داده و جنبه‌های مختلفی از فیزیولوژی و مورفولوژی گیاه را در بر می‌گیرد. مطالعات نشان داده‌اند که

[۲۰] Polylactic Acid

[۲۱] Nanocomposites

غلظت‌های پایین برخی ذرات نانو، بر خلاف تصور اولیه مبنی بر اثرات صرفاً سمی، می‌توانند به طور قابل توجهی رشد گیاهان و جوانه‌زنی بذرها را تحریک کنند (Xin et al., 2020). این اثرات تحریک‌کننده، به ویژه در غلظت‌های بهینه، می‌توانند منجر به افزایش عملکرد و بهبود کیفیت محصولات کشاورزی شوند. به عنوان مثال، پاشیدن ذرات نانو اکسید روی (ZnO) با غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر بر روی برگ‌های گیاه قهوه، نه تنها منجر به افزایش رشد بلکه باعث تجمع زیست‌توده گیاه نیز شد. محققان این اثر را به افزایش نرخ خالص فتوسنتز و در نتیجه، بهبود رشد گیاه نسبت دادند (Rossi et al., 2019). این نشان می‌دهد که ذرات نانو ZnO می‌توانند به عنوان یک کود برگی با قابلیت جذب بالا عمل کرده و فرآیند فتوسنتز را بهبود بخشند. مطالعه دیگری نشان داد که غلظت پایین ذرات نانو آهن (Fe) می‌تواند رشد جوانه‌های فلفل را تحریک کند. تجزیه و تحلیل میکروسکوپی نشان داد که ذرات نانو آهن با ایجاد تغییر در بافت برگ، از جمله افزایش تعداد کلروپلاست‌ها (اندامک‌های مسئول فتوسنتز) و تجمع ذرات در نقاط خاص و همچنین تنظیم توسعه دسته‌های آوندی (مسیرهای انتقال آب و مواد غذایی)، به طور مستقیم به رشد گیاه کمک می‌کنند (Nechitailo et al., 2018). این یافته حاکی از نقش ذرات نانو در بهبود ساختار و عملکرد اندام‌های گیاهی است. در بررسی تأثیر ذرات نانو مس (Cu) بر نخود، مشخص شد که تیمار با این ذرات نانو به طور معنی‌داری پارامترهای رشدی از جمله ارتفاع، طول ریشه وزن تازه و وزن خشک جوانه‌ها را افزایش می‌دهد. با استفاده از دستگاه آنالیز کارایی گیاه برای اندازه‌گیری کلروفیل و ارزیابی فتوسنتز، نتیجه‌گیری شد که ذرات نانو مس با افزایش فتوسنتز، رشد گیاه را بهبود می‌بخشند (Sutulienė et al., 2022). این نشان می‌دهد که ذرات نانو مس نیز می‌توانند در بهبود فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه مؤثر باشند. به طور کلی، نتایج پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهند که قرار گرفتن در معرض دوزهای پایین ذرات نانو می‌تواند جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهان مختلف را بهبود بخشد، اما سازوکار دقیق اثرات مثبت ذرات نانو بر گیاهان هنوز به طور کامل مشخص نشده و نیازمند تحقیقات بیشتر است. عواملی مانند نوع نانوذره، اندازه، شکل، بار سطحی، غلظت و نوع گیاه، در نحوه تأثیرگذاری ذرات نانو نقش دارند (Francis et al., 2024). با وجود این پیچیدگی‌ها و عوامل مؤثر، درک نحوه ورود و انتقال نانوذرات در ساختار گیاهان برای تفسیر دقیق اثرات آن‌ها ضروری است. شکل ۲، مسیرهای مختلف جذب و انتقال نانوذرات در گیاهان را به تصویر می‌کشد، از جمله کاربرد برگی و جذب از طریق ریشه با جزئیاتی از مسیرهای آپوپلاست و سیمپلاست و همچنین نقش احتمالی میکروب‌های ریزوسفر در این فرآیند.



شکل ۲- مرور اجمالی مسیرهای ورود و انتقال نانوذرات در ساختارهای مختلف گیاهی (Khan et al., 2022)

تأثیر ذرات نانو بر کیفیت خاک

خاک به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی اکوسیستم‌های زمینی، طیف گسترده‌ای از عملکردهای اکولوژیکی را بر عهده دارد. از منظر کشاورزی پایدار و حفاظت محیط‌زیست، ظرفیت یک خاک برای عملکرد در محدوده‌های اکوسیستم و استفاده از زمین، به‌منظور حفظ بهره‌وری زیستی، نگهداری کیفیت محیط‌زیست و ارتقاء سلامت گیاه و حیوان تعریف شده است (Verma et al., 2022; Anikwe and Ife, 2023; Sharma et al., 2023). این تعریف بر نقش محوری خاک در تضمین پایداری تولیدات کشاورزی و حفاظت از محیط‌زیست تأکید دارد. کیفیت خاک به‌واسطه ترکیبی از شاخص‌های شیمیایی، زیستی و فیزیکی تعیین می‌شود. عناصر شیمیایی کلیدی مؤثر بر کیفیت خاک شامل ماده آلی خاک، pH و در دسترس بودن ماکرومغذی‌ها مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم هستند. این مواد نقش اساسی در تأمین نیازهای غذایی گیاهان و حفظ چرخه‌های زیستی خاک ایفا می‌کنند. از

سوی دیگر، شاخص‌های زیستی شامل تنفس خاک، زیست‌توده میکروبی، معدنی‌شدن نیتروژن و فعالیت‌های آنزیمی خارج‌سلولی بوده که نشان‌دهنده وضعیت سلامت زیستی خاک و فعالیت ریزجانداران مفید می‌باشند. همچنین، شاخص‌های فیزیکی نظیر چگالی ظاهری، پایداری ساختاری و ظرفیت نگهداری آب به توانایی خاک در پشتیبانی از رشد گیاه و حفظ آب اشاره دارند (Nielsen and Winding, 2002; Bunemann et al., 2018).

در سال‌های اخیر، کاربرد ذرات نانو (NPs) و PGPR توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. تحقیقات نشان داده‌اند که کاربرد همزمان ذرات نانو و PGPRمی‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود کیفیت خاک و افزایش بهره‌وری کشاورزی داشته باشد. ذرات نانو با ارائه سطوح وسیع‌تر و فراهم کردن مواد مغذی بیشتر، شرایط بهینه‌ای را برای فعالیت و بقایPGPR ها فراهم می‌کنند. این هم‌افزایی منجر به بهبود کارایی PGPR در ارتقاء فرآیندهای زیستی خاک می‌شود (Nayana et al., 2020; Akhtar et al., 2021). کاربرد همزمان این دو فناوری نه‌تنها می‌تواند بهره‌وری گیاهان را افزایش دهد، بلکه باعث بهبود شاخص‌های کیفی خاک نظیر محتوای ماده آلی، فعالیت آنزیمی و پایداری ساختاری نیز می‌شود. این رویکرد نوین به‌ویژه در خاک‌های تخریب‌شده یا کم‌بازده، پتانسیل بالایی برای بازسازی و احیای خاک دارد و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مؤثر در مدیریت پایدار منابع خاک مورد استفاده قرار گیرد (Alharbi et al., 2023).

بهبود کیفیت خاک از طریق کاربرد ترکیبی PGPR و ذرات نانو حاصل می‌شود، که با عملکردهای چندگانه خود اثرات تنش خشکی را کاهش می‌دهند. گزارش شده است که هنگامی که محتوای آب خاک به نصف ظرفیت مزرعه‌ای کاهش یافت، کاربرد همزمان NPs و PGPR به‌طور قابل‌توجهی شاخص‌هایی نظیر pH، هدایت الکتریکی (EC)، نیترات، فسفر، پتاسیم قابل استخراج و ماده آلی را در مقایسه با استفاده جداگانه از NPs یا PGPR بهبود داد (Akhtar et al., 2021; Rajput et al., 2023a). Sun و همکاران (2022) گزارش کردند که وقتی ذرات نانو FeO با خاک آلوده به آرسنیک (As) همراه با PGPR گونه *Providencia vermicola* به‌کار برده شدند، نتایج به‌طور قابل‌توجهی بهبود یافت و اثرات موثرتری به دست آمد. بر این اساس، نتایج نشان داد که استفاده ترکیبی از *P. vermicola* و FeO-NPs می‌تواند سمیت آرسنیک را در گیاهچه‌های زنیان[۲۲] کاهش داده و رشد و ترکیب گیاه را تحت تنش فلزات بهبود بخشد؛ این اثر از طریق ترشح متعادل اسیدهای آلی مشاهده شد (Sun et al., 2022). یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهند که ظرفیت بالاتر نگهداری آب خاک و کاهش همزمان تنش خشکی، بقای PGPRها را تقویت کرده و موجب افزایش جمعیت آنها می‌شود، که در نتیجه این باکتری‌ها فعالیت‌های خود را به شکلی مؤثرتر انجام می‌دهند (Ahmad et al., 2022).

با وجود پتانسیل بالای نانوذرات در بهبود جنبه‌های مختلف کشاورزی، استفاده از آن‌ها در کنار میکروارگانیسم‌های مفید خاک، به ویژه PGPR، می‌تواند مزایای متعددی را به همراه داشته باشد. تعامل بین نانوذرات و PGPR می‌تواند منجر به اثرات هم‌افزایی در بهبود رشد گیاه، افزایش جذب مواد مغذی، ارتقای تحمل به تنش‌ها و مدیریت بیماری‌ها شود. در بخش‌های بعدی این مطالعه مروری، به بررسی دقیق‌تر این برهمکنش‌ها و نقش آن‌ها در توسعه سیستم‌های کشاورزی پایدار خواهیم پرداخت.

PGPR و ذرات نانو

ترکیب ذرات نانو و PGPR به‌عنوان یک رویکرد نوآورانه در توسعه کودهای زیستی مورد توجه قرار گرفته است. این فناوری جدید به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه مانند هند در حال بررسی و پژوهش است و نتایج امیدوارکننده‌ای به همراه داشته است. ذرات نانو به دلیل خواص منحصربه‌فرد خود، از جمله سطح ویژه بالا

[۲۲] *Trachyspermum ammi*

واکنش‌پذیری شیمیایی بالا و قابلیت نفوذ به ریزمحیط‌های میکروبی، می‌توانند در بهبود کارایی باکتری‌های PGPR مؤثر باشند. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که استفاده هم‌زمان از ذرات نانو و باکتری‌های PGPR می‌تواند یک اثر هم‌افزایی یا سینرژیک ایجاد کند که عملکرد هر دو عنصر را بهبود می‌بخشد (Malusá and Vassilev, 2014; Prasad et al., 2017). به‌طور خاص، مطالعات نشان داده‌اند که این ترکیب منجر به بهبود تثبیت نیتروژن توسط باکتری‌های محرک رشد می‌شود، که تأثیر مستقیم بر حاصلخیزی خاک و افزایش بهره‌وری محصول دارد (Timmusk et al., 2018). علاوه بر این، افزایش زیست‌توده گیاه وزن ریشه و برگ و نیز بهبود دسترسی به فسفر خاک از دیگر نتایج مثبت گزارش شده است (Merinero et al., 2022). برای مثال، زمانی که ذرات نانو به‌طور هم‌زمان با PGPR مورد استفاده قرار می‌گیرند، تولید اکسین (IAA) توسط باکتری‌ها افزایش می‌یابد که تأثیر مثبتی بر رشد و توسعه گیاه دارد. این یافته‌ها اهمیت نقش ذرات نانو را به‌عنوان محرکی برای فعالیت‌های بیولوژیکی PGPR برجسته می‌سازد (Malusá and Vassilev, 2014). یکی دیگر از جنبه‌های مهم این ترکیب، افزایش مقاومت گیاهان به تنش‌های زیستی و غیرزیستی است. به‌عنوان نمونه، ترکیب ذرات نانو و PGPR می‌تواند مقاومت گیاهان را به تنش‌هایی مانند شوری، خشکی و آلودگی فلزات سنگین افزایش دهد. این اثرات احتمالاً به‌دلیل تغییر در فعالیت‌های متابولیکی گیاه و تنظیم مسیرهای سیگنال‌دهی است که از سوی این ترکیب القا می‌شوند. (Prasad et al., 2017).

مکانیسم‌های هم‌افزایی بین نانوذرات و PGPR

تعامل همزمان نانوذرات و PGPR می‌تواند از طریق مکانیسم‌های مختلفی مانند افزایش فراهمی زیستی مواد مغذی، بهبود جذب نانوذرات توسط گیاه، تغییرات متابولیکی مفید و برهم‌کنش‌های مستقیم با باکتری، به اثرات هم‌افزایی منجر شود. این مکانیسم‌ها نقش مهمی در افزایش رشد، عملکرد و مقاومت گیاهان در برابر تنش‌های محیطی ایفا می‌کنند.

افزایش فراهمی زیستی مواد مغذی برای PGPR توسط نانوذرات

نانوذرات (NPs) می‌توانند با افزایش فراهمی زیستی عناصر غذایی در خاک، شرایط رشد بهتری برای باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) ایجاد کنند. به عنوان مثال، نانوذرات اکسید آهن (Fe3O4) به دلیل سطح ویژه بالا و قابلیت تبادل یونی، آهن را به‌آرامی در محیط آزاد کرده و در دسترس PGPR هایی مانند *Pseudomonas fluorescens* قرار می‌دهند. این باکتری با ترشح سیدروفور، قابلیت جذب آهن توسط گیاه را افزایش می‌دهد (Rai et al., 2021). همچنین، نانوذرات هیدروکسی‌آپاتیت (nHA) می‌توانند فسفر را به‌تدریج آزاد کرده و با افزایش انحلال فسفات‌های نامحلول، فعالیت آنزیم فسفاتاز ترشح‌شده توسط PGPR را تحریک کنند که منجر به افزایش جذب فسفر توسط گیاه می‌شود (Chen et al., 2020).

تسهیل جذب یا استفاده از نانوذرات توسط گیاه به کمک PGPR

PGPRها از طریق اثرات فیتوهورمونی و اصلاح محیط ریزوسفر می‌توانند جذب نانوذرات توسط گیاه را تسهیل کنند. این باکتری‌ها با تولید اکسین (IAA) و سیتوکینین، رشد و توسعه ریشه را تحریک کرده و سطح جذب مؤثر را افزایش می‌دهند. در یک مطالعه، *Azospirillum brasilense* موجب افزایش توسعه ریشه در گندم شده و جذب نانوذرات روی (ZnO) را بهبود بخشید (Kalia et al., 2022). علاوه بر این، PGPRها با ترشح سیدروفور و اسیدهای آلی می‌توانند نانوذرات فلزی را حل کرده و جذب آن‌ها را برای گیاه آسان‌تر کنند. به عنوان مثال، نانوذرات اکسید آهن در حضور *Pseudomonas putida* سریع‌تر حل شده و آهن بیشتری برای گیاه فراهم می‌کنند (Rajput et al., 2021).

تغییرات متابولیکی در گیاه در اثر استفاده همزمان از نانوذرات وPGPR

ا ستفاده همزمان از نانوذرات و PGPR می‌تواند تغییرات متابولیکی قابل توجهی در گیاه ایجاد کند که منجر به افزایش رشد و مقاومت به تنش‌های زیستی و غیرزیستی می‌شود. نانوذرات اکسید تیتانیوم (TiO_2) با افزایش تولید کلروفیل و بهبود کارایی فتو سنتز، ر شد گیاه را افزایش می دهند. همزمان، PGPRهایی مانند B. subtilis با تولید فیتوهورمون ها و بهبود جذب مواد مغذی، عملکرد گیاه را تقویت می‌کنند (Wang et al., 2023). این اثر هم‌افزایی به بهبود تولید قند، افزایش انرژی سلولی و تقویت مقاومت گیاه در برابر تنش‌های اکسیداتیو منجر می‌شود.

تعاملات فیزیکی و شیمیایی مستقیم بین نانوذرات و PGPR

نانوذرات می‌توانند به‌طور مستقیم با PGPR تعامل کرده و فعالیت آن‌ها را تقویت کنند. به عنوان مثال، نانوذرات نقره (AgNPs) در غلظت‌های پایین، رشد و تولید بیوفیلم توسط P. aeruginosa را تحریک کرده و زیست‌توده میکروبی را افزایش می‌دهند (Shang et al., 2022). این بیوفیلم‌ها نه‌تنها موجب حفاظت از باکتری‌ها در برابر عوامل نامطلوب می‌شوند، بلکه پایداری بیشتر و تعامل مؤثرتری با ریزوسفر گیاه ایجاد می‌کنند. همچنین، نانوذرات فلزی مانند ZnO از طریق برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی به دیواره سلولی PGPR متصل شده و با تحریک متابولیسم باکتری، تولید ترکیبات محرک رشد را افزایش می‌دهند (Das et al., 2021).

مزایای ترکیب PGPR و ذرات نانو

افزایش بقا و فعالیت میکروبی

یکی از مزایای اصلی کاربرد همزمان PGPR با ذرات نانو، افزایش بقا و فعالیت میکروبی است. مواد نانو به دلیل خواص منحصر به‌فرد خود، از جمله پایداری حرارتی بالا، توانایی جذب پرتوهای مضر و محافظت در برابر تنش های محیطی، می‌توانند از ریز جانداران مفید موجود در کودهای زیستی محافظت کنند. این ترکیب می‌تواند در شرایط محیطی سخت، مانند دماهای بالا یا پایین و اشعه ماوراء بنفش، پایداری ریزجانداران را به میزان قابل توجهی افزایش دهد (Verma et al., 2022). به عنوان مثال، پوشش‌دهی PGPR با ذرات نانو می‌تواند اثرات مخرب عوامل تنشی محیطی را کاهش دهد و امکان بقای طولانی‌مدت ریزجانداران را فراهم کند (Verma et al., 2024).

علاوه بر این، ذرات نانو با ویژگی‌هایی نظیر اندازه کوچک و مساحت سطح بالا، انتقال کارآمدتر ریزجانداران به نواحی ریشه را تسهیل می‌کنند. این ویژگی به جذب بهتر باکتری‌ها در ریزوسفر کمک کرده و آن‌ها را به ریشه‌های گیاه نزدیک‌تر می‌کند، جایی که اثرات مفیدشان را می‌توانند اعمال کنند. این فرآیند نه‌تنها بقای PGPR را بهبود می‌بخشد، بلکه تعامل آن‌ها با گیاهان را نیز تقویت می‌کند، که به طور مستقیم منجر به افزایش سلامت خاک و رشد بهتر گیاهان می‌شود (Verma et al., 2024). همچنین، استفاده از ذرات نانو به‌عنوان حامل یا محافظ می‌تواند فعالیت متابولیکی باکتری‌ها را افزایش دهد، که به نوبه خود باعث تقویت فرآیندهایی مانند تثبیت نیتروژن، تولید اکسین و حل‌سازی فسفر می‌شود. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که این تعامل سینرژیک (هم‌افزایی) می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر افزایش بهره‌وری محصولات کشاورزی و کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی داشته باشد (Verma et al., 2024).

افزایش مقاومت به عوامل تنشی

کاربرد همزمان ذرات نانو و ریزجانداران مفید، به‌ویژه PGPR، نقش مهمی در کاهش اثرات تنش های غیرزیستی بر محصولات کشاورزی دارد. این ترکیب می‌تواند از طریق مکانیزم های مختلفی تحمل گیاهان را بهبود بخشیده و خسارات ناشی از تنش‌هایی نظیر شوری،

خشکی، دماهای بالا و پایین و فلزات سنگین را کاهش دهد. برای مثال، در شرایط تنش شوری، استفاده از ذرات نانو مس اکسید (CuO) به همراه باکتری‌های *Bacillus* spp. و *Lactobacillus casei* تأثیر مثبتی بر کاهش آسیب DNA و بهبود متیلاسیون DNA در گیاهان گندم نشان داده است. این فرمولاسیون منجر به افزایش تحمل گیاهان به تنش شوری شده و بهبود قابل‌توجهی در رشد و توسعه گیاهان تحت این شرایط ایجاد کرده است (Hosseinpour et al., 2021). همچنین ذرات نانو سیلیس، اگرچه مستقیماً تأثیر معناداری بر افزایش جمعیت باکتری‌های PGPR ندارند، اما نقش مهمی در بهبود اتصال و کلونیزاسیون این باکتری‌ها در گیاهان ایفا می‌کنند. این ذرات نانو تولید پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی (EPS) توسط PGPR را تحریک کرده و در نتیجه ظرفیت نگه‌داری آب و فشار اسمزی ساختار بیوفیلم را افزایش می‌دهند. این فرآیندها در شرایط تنش خشکی، تأثیر مثبتی بر افزایش زیست‌توده گیاهان و بهبود مقاومت آن‌ها نشان داده‌اند (Fetsiukh et al., 2021). تأثیرات مثبت ذرات نانو در ترکیب با PGPR به این موارد محدود نمی‌شود. این ترکیب می‌تواند از طریق بهبود فعالیت آنزیم های آنتی‌اکسیدان در گیاهان، کاهش تولید گونه های فعال اکسیژن (ROS[۲۳]) و افزایش کارایی فتوسنتز، سلامت کلی گیاهان را در برابر تنش‌های غیرزیستی تقویت کند.

افزایش مقاومت به عوامل بیماریزای گیاه

از مزایای ترکیب ذرات نانو و کودهای زیستی، افزایش مقاومت گیاهان در برابر عوامل بیماری‌زا است. این ترکیب می‌تواند از دو طریق اصلی بر سلامت گیاه تأثیر بگذارد: تحریک پاسخ های ایمنی گیاه و تقویت جوامع میکروبی مفید که از رشد عوامل بیماری‌زا جلوگیری می‌کنند (Verma et al., 2024). ذرات نانو به‌ویژه دارای توانایی منحصربه‌فردی در برانگیختن پاسخ‌های ایمنی ذاتی گیاهان هستند. این ذرات از طریق تغییر در مسیرهای سیگنال‌دهی گیاه، تولید متابولیت‌های ثانویه و تقویت فعالیت آنزیم‌های دفاعی، مقاومت گیاه را در برابر عفونت‌های میکروبی افزایش می‌دهند برای مثال، ذرات نانو نقره (Ag NPs) به دلیل خواص ضدباکتریایی و ضدقارچی خود، توانایی مهار رشد عوامل بیماری‌زا را داشته و به گیاهان در مقابله با بیماری‌های گیاهی کمک می‌کنند (Verma et al., 2024) از سوی دیگر، کودهای زیستی حاوی باکتری‌های PGPR با ایجاد رقابت زیستی و ترشح ترکیبات ضدمیکروبی، نقش مهمی در مهار رشد عوامل بیماری‌زا ایفا می‌کنند (Wang et al., 2024). ترکیب کودهای زیستی و ذرات نانو می‌تواند اثرات هم‌افزایی ایجاد کرده و به طور قابل‌توجهی کارایی این دو عامل را افزایش دهد. این ترکیب می‌تواند تراکم جوامع میکروبی مفید در منطقه ریشه را افزایش داده و از رشد و توسعه بیمارگرهای خاکزاد جلوگیری کند (Karunakaran et al. 2024). استفاده از ذرات نانو در فرمول کودهای زیستی می‌تواند سیستم ایمنی گیاه را به‌طور پایدار تحریک کرده و منجر به کاهش شدت بیماری شود. این ترکیب همچنین باعث تقویت دیواره سلولی گیاهان و افزایش تولید متابولیت‌های دفاعی مانند فیتوالکسین‌ها[۲۴] می‌شود که به مقاومت گیاه در برابر عوامل بیماری‌زا کمک می‌کنند (Abdelghany et al., 2022).

تاثیر کاربرد همزمان نانو ذرات و باکتری‌های محرک رشد بر افزایش رشد و عملکرد گیاه؛ مطالعات موردی

اثرات ترکیبی ذرات نانو و PGPR به عنوان یک راهکار نوین در کشاورزی، پتانسیل چشمگیری در بهبود رشد، عملکرد و سلامت گیاهان نشان داده است. این رویکرد، مزایایی فراتر از کاربرد جداگانه هر یک از این عوامل ارائه می‌دهد. سازوکارهای متعددی در اثرگذاری این ترکیب دخیل هستند؛ از جمله افزایش دسترسی مواد مغذی

[۲۳] Reactive Oxygen Species

[۲۴] Phytoalexins

که از طریق عملکرد ذرات نانو به عنوان حامل مواد مغذی و فعالیت PGPRها در تثبیت نیتروژن، انحلال فسفات، تولید سیدروفورها و غیره حاصل می‌شود (Dimkpa et al., 2020). تحریک سیستم ایمنی گیاه نیز از دیگر مزایای این ترکیب است. ذرات نانو با فعال‌سازی پاسخ‌های ایمنی ذاتی و PGPRها با سازوکارهایی مانند رقابت زیستی، تولید آنتی‌بیوتیک و القای مقاومت سیستمیک القایی (ISR)، حفاظت قوی‌تری در برابر عوامل بیماری‌زا فراهم می‌کنند (Ghorbani et al., 2021; Kumar et al., 2022). بهبود ساختار و عملکرد ریشه از طریق تحریک رشد و توسعه ریشه توسط ذرات نانو و تولید هورمون‌های گیاهی توسط PGPRها، منجر به افزایش سطح جذب مواد مغذی و آب می‌شود (Nair et al., 2016). همچنین، این ترکیب با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان توسط ذرات نانو و تولید ترکیبات محافظتی توسط PGPRها، به گیاه در مقابله با تنش‌های محیطی مانند خشکی، شوری و فلزات سنگین کمک می‌کند (Aqeel et al., 2021). مطالعات موردی متعددی اثرات مثبت این ترکیب را نشان داده‌اند. به عنوان مثال، استفاده توأم از ذرات نانو ZnO و باکتری *Azospirillum* باعث افزایش معنی‌دار ارتفاع گیاه وزن خشک ریشه و اندام هوایی و میزان کلروفیل در گندم شده و جذب عناصر غذایی را نیز بهبود می‌بخشد (Aghaei et al., 2024). ترکیب ذرات نانو سیلیکون و باکتری *Bacillus methylotrophicus* نیز وزن‌تر و خشک ریشه و اندام هوایی سیب‌زمینی را افزایش داده و بیماری پوسیدگی نرم را مهار می‌کند (Viani et al., 2020). همچنین، ذرات نانو نقره می‌توانند رشد قارچ‌های بیماری‌زای خیار را مهار کنند (Tripathi et al., 2017). تأثیر کاربرد همزمان برخی از نانو ذرات و ریزجانداران مفید بر گیاهان در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- تأثیر کاربرد ترکیبی ذرات نانو و ریزجانداران بر گیاهان

ذره نانو	مقدار ذره نانو	باکتری محرک رشد گیاه	نوع گیاه	نتایج	منبع
اکسید روی (ZnO)	۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ گرم در لیتر	*Azotobacter chroococcum, Azospirillum lipoferum and Pseudomonas putida*	ترتیکاله	آنزیم فسفاتاز اسیدی، مقدار روی و پروتئین دانه	Kamari et al., 2017
نانواکسید آهن و نانوسیلیکون	۱ گرم در لیتر	*Azospirillum lipoferum and Pseudomonas putida*	ترتیکاله	افزایش عملکرد در شرایط محدودیت آبی	Aghaei etal., 2024
نانوکلات آهن	دو در هزار	*Mesorhizobium ciceri*	نخود دیم	میزان گره‌زایی ریشه، شاخص‌های زراعی و عملکرد دانه	Hamzei et al., 2014
اکسید مس (CuO)	۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم	میکروب‌های خاک	گندم	افزایش نیتریفیکاسیون، رشد گیاه و تثبیت N2	Guan et al., 2020
سیلیس (SiO_2)	۵۰ میکروگرم در میلی لیتر	*Bacillus thuringiensis, Paenibacillus polymyxa, Alcaligenes faecalis*	گندم	چسبیدن باکتری به ریشه توسط NPs، و تلقیح دوگانه، تحت شرایط استرس در پیت خاک زیست‌توده گیاه را افزایش داد	Timmusk et al., 2018
سیلیس (SiO_2)	۰/۰۵ پی پی‌ام	*Pseudomonas stutzeri*	شاهی	افزایش وزن خشک اندام هوایی و ریشه	Boroumand et al., 2020
	۰/۰۷	*Mesorhizobium spp*			
سیلیس (SiO_2)	۰/۵ گرم در کیلوگرم	حل‌کننده‌های فسفات تثبیت‌کننده نیتروژن آزادکننده پتاسیم	ذرت	افزایش جمعیت باکتری‌ها، زیست‌توده کل و محتوای مواد مغذی خاک	Rangaraj et al., 2014
	۱۰ میلی گرم در لیتر	*Bacillus megaterium Bacillus Brevis*	فلفل قرمز	افزایش ۸۵ درصدی در تولید سیتوکینین	Kurdish et al., 2015
طلا (Au)	۰/۰۱۳ درصد	جامعه میکروبی خاک	کاهو	افزایش نسبت ریشه به اندام هوایی	.Shankar et al 2004
آهن، روی و منگنز (Fe، Zn و Mn)	۴ و ۸ لیتر در هکتار	*Azotobacter spp. Pseudomonas Spp*	گندم بهاره	افزایش طول و تعداد سنبله، تعداد دانه، تعداد دانه در سنبله وزن دانه و تعداد روزها تا رسیدن به بلوغ فیزیولوژیکی	Mardalipour et al 2014
نقره (Ag)	۵۰ پی پی‌ام	خاک ریزوسفری	لوبیاچشم‌بلب/لی	پارامترهای رشد لوبیاچشم‌بلبلی و گره‌بندی ریشه بود افزایش یافت	Pallavi et al. 2016
			خردل هندی	تغییری مشاهده نشد	
اکسید روی (ZnO)	۵۰۰ میلی گرم درلیتر	*Azospirillum lipoferum, Bacillus coagulans, Bacillus circulance, and Bacillus subtilis*	گندم	افزایش تحمل به تنش شوری آب و خاک	Alharbi et al., 2023

علیرغم گزارشاتی مثبت مرتبط با ادغام کودهای زیستی و ذرات نانو و اثرات سینرژیستی آن، اما سؤالات و چالش‌هایی همچنان در این زمینه وجود دارد. استفاده از ترکیب ذرات نانو و کودهای زیستی همچنان در مراحل اولیه خود باقی مانده و نیازمند تحقیقات بیشتر برای ایجاد فرمولاسیون‌ها و دوزهای استاندارد شده است. درک جامع از تعامل‌های خاص بین ذرات نانو و PGPR در کودهای زیستی و محیط اطراف برای پیشرفت این زمینه ضروری است. اگرچه گزارشاتی نشان از اثرات هم‌افزایی ذرات نانو و کودهای زیستی است با این حال برخی از چالش‌هایی همچنان در این زمینه وجود دارد (Rehmanullah et al., 2020; Rai et al., 2023).

آماده‌سازی کودهای زیستی نانو

آماده سازی کودهای زیستی نانو یکی از مراحل کلیدی در بهبود کارایی و کاهش سمیت بالقوه نانوذرات بر PGPR است. در این فرآیند، انتخاب نوع نانوذره، غلظت بهینه، روش‌های فرمولاسیون و شرایط نگهداری نقش اساسی در حفظ زیست‌پذیری PGPR و اثربخشی کود دارند. نتایج پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که غلظت پایین و کنترل شده نانوذرات می‌تواند رشد گیاه و فعالیت PGPRرا بهبود بخشد، در حالی که غلظت‌های بالا منجر به سمیت و کاهش زیست‌پذیری می شود. علاوه بر این، روش‌های نوین فرمولاسیون مانند کپسوله‌سازی نانوذرات در پلیمرهای زیست‌سازگار یا پوشش‌های زیستی، با کاهش تماس مستقیم PGPR با نانوذرات، اثرات بازدارنده را به حداقل می‌رسانند و پایداری و کارایی کود را افزایش می‌دهند. در نهایت، شرایط نگهداری بهینه، شامل دمای پایین، محیط تاریک و pH مناسب، برای حفظ فعالیت زیستی PGPR و پایداری نانوذرات ضروری است. این عوامل، در کنار یکدیگر، به بهبود عملکرد کودهای زیستی نانو و افزایش بهره‌وری گیاهان زراعی منجر می‌شوند.

غلظت بهینه نانوذرات

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که غلظت نانوذرات به‌طور مستقیم بر زیست‌پذیریPGPR، عملکرد گیاه و جذب عناصر غذایی تأثیر می گذارد. نتایج پژوهش‌ها حاکی از آن است که غلظت‌های پایین‌تر از حد بحرانی (معمولاً در محدوده ۱۰ تا ۵۰ میلی‌گرم در لیتر) دارای اثرات تحریک‌کننده بر رشد گیاه، فعالیت آنزیمی و تکثیر PGPRهستند، در حالی که غلظت‌های بالاتر می‌تواند منجر به تخریب غشای سلولی، تولید رادیکال‌های آزاد و کاهش زیست‌پذیری PGPR شود (López-Valdez et al., 2021; Shaikh et al., 2023). به عنوان مثال، در پژوهشی، نانوذرات اکسید روی (ZnO) در غلظت‌های پایین (۲۰ میلی‌گرم در لیتر) سبب افزایش رشد و بهبود فعالیت PGPR شدند، اما در غلظت‌های بالاتر (۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) اثرات بازدارنده و سمیت نشان دادند (Tripathi et al., 2022). بنابراین، تعیین غلظت های بهینه با توجه به نوع نانوذره، گونه PGPR و شرایط کشت، برای دستیابی به حداکثر کارایی ضروری است. به‌منظور کاهش خطر سمیت و افزایش پایداری، توصیه می‌شود از فرمولاسیون‌های آهسته‌رهش یا نانوذرات پوشش‌دار استفاده شود تا توزیع تدریجی و کنترل‌شده نانوذرات در محیط فراهم شود. این رویکرد نه تنها سمیت بالقوه را کاهش می‌دهد، بلکه فعالیت همزیستی PGPR و نانوذرات را نیز بهبود می‌بخشد (Zhang et al., 2024).

نوع نانوذره

انتخاب نوع مناسب نانوذره برای فرمولاسیون کود زیستی نانو نقش کلیدی در حفظ زیست‌پذیری PGPRو بهبود عملکرد گیاه دارد. مطالعات نشان داده‌اند که نانوذرات اکسید روی (ZnO) در غلظت‌های پایین (۱۰ تا ۵۰ میلی‌گرم در لیتر) می‌توانند با افزایش جذب عناصر غذایی و بهبود فعالیت آنزیمی PGPR به رشد گیاه کمک کنند، اما در غلظت‌های بالاتر، منجر به آسیب اکسیداتیو و کاهش زیست‌پذیری باکتری‌ها می‌شوند (Tripathi et al., 2022). در مقابل، نانوذرات نقره (AgNPs) به دلیل خاصیت ضدمیکروبی قوی، پتانسیل بالایی برای کنترل عوامل بیماری‌زا دارند؛ با این حال، در برخی موارد، این نانوذرات اثرات بازدارنده‌ای بر PGPR نیز نشان داده‌اند، که می‌تواند زیست‌پذیری و عملکرد باکتری‌های مفید را کاهش دهد (Patel et al., 2021).

برای کاهش اثرات منفی برPGPR، پیشنهاد می‌شود از نانوذراتی با سمیت کمتر، مانند نانوذرات سیلیکون (Si-NPs) یا نانوذرات آهن(Fe-NPs)، در فرمولاسیون کودهای زیستی نانو استفاده شود. این ذرات نانو به دلیل زیست‌سازگاری بالا، پایداری مناسب و سمیت پایین، می‌توانند بدون آسیب بهPGPR، رشد گیاه را بهبود بخشند (Wang et al., 2023). همچنین، نانوذرات آهن با افزایش دسترسی به ریزمغذی‌ها و کاهش تنش‌های

اکسیداتیو، به فعالیت همزیستی PGPR و گیاه کمک می‌کنند. در این راستا، به‌کارگیری فرمولاسیون‌های ترکیبی (مانند پوشش‌دهی نانوذرات با پلیمرهای زیست سازگار) می‌تواند اثرات سمیت بالقوه را کاهش داده و کارایی کودهای زیستی نانو را بهبود بخشد.

شرایط نگهداری

شرایط نگهداری مناسب، عامل کلیدی در حفظ پایداری نانوذرات و زیست‌پذیری PGPR در کودهای زیستی نانو است. مطالعات نشان داده‌اند که دمای نگهداری، pH محلول، مدت زمان ذخیره‌سازی و نور محیط تأثیر مستقیمی بر فعالیت زیستی PGPR و پایداری شیمیایی نانوذرات دارند (Elmer & White, 2018). برای حفظ زیست‌پذیریPGPR، پیشنهاد می‌شود که کودهای زیستی نانو در دمای پایین (۸-۴ درجه سلسیوس) و محیط‌های تاریک و خشک نگهداری شوند. این شرایط باعث کاهش متابولیسم باکتری‌ها و افزایش طول عمر آن‌ها می‌شود. همچنین، نگهداری در محیط تاریک از واکنش‌های فتوشیمیایی و اکسیداسیون نانوذرات جلوگیری کرده و مانع از کاهش کارایی آن‌ها می‌شود (Singh et al., 2020).

pH محلول نیز عامل مهمی در حفظ پایداری است. برای جلوگیری از تجمع یا رسوب نانوذرات، محلول‌های حاوی کود زیستی نانو باید در pH نزدیک به خنثی (۷/۵-۶/۵) نگهداری شوند. pH خارج از این محدوده می‌تواند منجر به نابودی PGPR یا ناپایداری نانوذرات شود. علاوه بر این، مدت زمان ذخیره‌سازی نیز باید محدود باشد، زیرا افزایش زمان نگهداری می‌تواند منجر به کاهش زنده‌مانی باکتری‌ها و تغییر ساختار نانوذرات شود. بر اساس مطالعات، کودهای زیستی نانو در شرایط بهینه، می‌توانند حداقل ۳ تا ۶ ماه بدون افت کارایی ذخیره شوند (Zhao et al., 2021). برای افزایش ماندگاری و کارایی، می‌توان از روش‌های پایدار سازی مانند کپسوله سازی PGPR در پلیمرهای زیست‌تخریب پذیر یا ژل های زیستی و پوشش‌دهی نانوذرات با عوامل پایدارکننده (مانند پلی‌ساکاریدها یا پروتئین‌ها) استفاده کرد. این روش‌ها می‌توانند حفاظت بیشتری از PGPR و نانوذرات در برابر عوامل محیطی فراهم کرده و طول عمر کود را افزایش دهند.

روش‌های فرمولاسیون

فرمولاسیون مناسب کودهای زیستی نانو نقش مهمی در کاهش سمیت نانوذرات بر PGPR و بهبود کارایی محصول دارد. در این بخش، روش های نوین فرمولاسیون مورد بررسی قرار گرفته‌اند که می‌توانند اثرات منفی نانوذرات را کاهش داده و اثربخشی آن‌ها را افزایش دهند. یکی از روش‌های مؤثر، کپسوله سازی نانوذرات در پلیمرهای زیست‌سازگار یا لیپوزوم‌ها است. این فناوری باعث رهایش کنترل‌شده و تدریجی نانوذرات می‌شود و از تماس مستقیم و بیش از حد آن‌ها با PGPR جلوگیری می‌کند. در نتیجه، سمیت کاهش یافته و کارایی نانوذرات در انتقال مواد مغذی یا کنترل بیماری افزایش می یابد (Chhipa & Joshi, 2016). علاوه بر این، استفاده از پوشش‌های زیستی (Bio-coating) به‌عنوان راهکاری دیگر پیشنهاد شده است. در این روش، PGPR با مواد حفاظتی طبیعی مانند آلژینات، کیتوزان یا پلی‌ساکاریدها پوشش‌دهی می‌شوند. این پوشش‌ها باعث محافظت از PGPRدر برابر اثرات بازدارنده نانوذرات شده و زیست‌پذیری آن‌ها را در محیط افزایش می‌دهند (Rai et al., 2021). همچنین، پوشش‌های زیستی می‌توانند با افزایش ماندگاری PGPR و بهبود تحمل به تنش های محیطی، عملکرد کودهای زیستی نانو را در شرایط مزرعه بهبود بخشند. فرمولاسیون‌های هیبریدی نیز به‌عنوان راهکاری نوین معرفی شده‌اند. در این روش، نانوذرات و PGPRبه‌صورت همزمان در یک ماتریکس زیستی پایدارسازی می‌شوند. این رویکرد نه‌تنها سمیت نانوذرات را کاهش می‌دهد، بلکه سینرژی بالاتری بین اثرات PGPR و نانوذرات ایجاد می‌کند که منجر به بهبود رشد

و مقاومت گیاه در برابر عوامل بیماری‌زا می‌شود (Mahanty et al., 2022).

سایر عوامل مؤثر

در بخش تکمیلی، سایر عوامل کلیدی که بر آماده‌سازی و کاربرد کود زیستی نانو تأثیرگذار هستند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. یکی از این عوامل، روش‌های اختلاط و همگن‌سازی نانوذرات با PGPR است. اختلاط یکنواخت و پایدار نانوذرات با PGPR برای حفظ زیست‌پذیری باکتری‌ها و جلوگیری از تجمع یا رسوب نانوذرات ضروری است. روش‌هایی مانند امولسیون‌سازی، التراسونیکاسیون یا همگن‌سازی مکانیکی می‌توانند به توزیع یکنواخت و پایدار نانوذرات در فرمولاسیون کمک کنند (Mukherjee et al., 2020). عامل دیگر، زمان و نحوه کاربرد کود زیستی نانو در مزرعه است. مطالعات نشان داده‌اند که محلول‌پاشی برگی در مراحل اولیه رشد می‌تواند کارایی جذب را افزایش دهد، در حالی که کاربرد خاکی اثر طولانی مدت‌تری دارد و تعامل بیشتری با PGPR ایجاد می‌کند (Lateef et al., 2021). همچنین، تکرار و تناوب کاربرد نقش مهمی در اثربخشی کود دارد. کاربرد مکرر یا غلظت‌های بیش از حد نانوذرات می‌تواند منجر به تجمع آن‌ها در خاک و کاهش فعالیت میکروبی شود. در این راستا، فرمولاسیون‌های آهسته‌رهش (Slow-release) پیشنهاد شده‌اند که می‌توانند رهایش تدریجی نانوذرات را کنترل کرده و در عین حفظ تأثیر مثبت بر رشد گیاه، سمیت احتمالی بر PGPR را کاهش دهند (Kumar et al., 2021). در نهایت، ملاحظات زیست‌محیطی در زمان کاربرد نیز باید در نظر گرفته شوند. به عنوان مثال، کاربرد نانوذرات در شرایط تنش های محیطی (مانند خشکی یا شوری) می‌تواند بر پایداری و کارایی PGPR و عملکرد گیاه تأثیرگذار باشد. بنابراین، پیشنهاد شده است که ارزیابی‌های میدانی طولانی‌مدت برای تعیین اثرات نانوذرات بر میکروبیوم خاک و عملکرد گیاه انجام شود.

چالش‌ها و محدودیت‌ها

کاربرد ذرات نانو در کشاورزی به دلیل خواص منحصربه‌فرد آنها مزایای بسیاری دارد، اما استفاده از این فناوری با چالش‌های متعددی نیز همراه است که نیازمند بررسی دقیق و تحقیقات بیشتر است.

اثرات سمی احتمالی بر گیاهان و ریزجانداران خاک

یکی از نگرانی های اصلی، احتمال سمیت نانوذرات برای گیاهان و میکروارگانیسم‌های خاک است. مطالعات نشان داده‌اند که برخی ذرات نانو فلزی نظیر ذرات نانو نقره (Ag NPs) می‌توانند به ریشه گیاهان نفوذ کرده و حتی به قسمت‌های قابل خوردن مانند دانه‌ها انتقال یابند، که این امر تهدیدی جدی برای سلامت انسان محسوب می‌شود (Yan and Chen, 2019). به عنوان نمونه، تجمع ذرات نانو نقره در ریشه‌ها، برگ‌ها و دانه‌های بادام‌زمینی به اثبات رسیده است (Rui et al., 2017). این ذرات نانو همچنین می‌توانند در سلول‌های گیاهانی مانند پیاز تجمع یافته و به ساختارهای زیستی نفوذ کنند (Fouda et al., 2020). مطالعات دیگر نیز نشان داده‌اند که ذرات نانو طلا (Au NPs) می‌توانند از طریق ریشه وارد سیستم آوندی گیاهان شده و در برگ‌ها و دیگر بخش‌های گیاه تجمع یابند (Feichtmeier et al., 2015). گزارش شده که ذرات نانو اکسید فلزی نظیر ذرات نانو اکسید مس (CuO NPs) و اکسید روی (ZnO NPs) با نفوذ به ریشه گیاهان، ساختار سلولی را تغییر داده و باعث سمیت گیاه[۲۵] می شوند (Rajput et al., 2020). در گیاه گندم، تجمع این ذرات نانو روی سطح ریشه منجر

[۲۵] Phytotoxicity

به تغییر در ساختار مریستم‌های رأسی[۲۶] و کاهش طول ریشه شده است (Lahuta et al., 2022). در موارد دیگر، ذرات نانو اکسید آهن (Fe_2O_3 NPs) و تیتانیوم (TiO_2 NPs) نیز با تجمع در سلول‌های گیاهی، ساختار ریشه و سیستم آوندی گیاهان را تحت تأثیر قرار داده و باعث کاهش جذب آب و مواد مغذی، تغییر در نرخ فتوسنتز و اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه شده است (Katarína et al., 2021). علاوه بر این، برخی تحقیقات نشان داده‌اند که نانوذرات می‌توانند بر جوامع میکروبی خاک نیز اثرات منفی داشته باشند، از جمله تغییر در تنوع و فعالیت آن‌ها، که می‌تواند بر چرخه‌های بیوژئوشیمیایی خاک تأثیر بگذارد (Dimkpa et al., 2013).

اثرات ضد میکروبی نانوذرات بر باکتری‌ها

نانوذرات به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردی مانند اندازه کوچک، سطح ویژه بالا و واکنش‌پذیری زیاد، اثرات ضد میکروبی قوی علیه باکتری‌ها دارند. این اثرات از طریق مکانیسم‌های مختلفی اعمال می‌شوند. یکی از مکانیسم‌های اصلی، تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) مانند رادیکال‌های هیدروکسیل (OH)، سوپراکسید (O^{2-}) و پراکسید هیدروژن (H_2O_2) است. این گونه‌ها به لیپیدها، پروتئین‌ها و DNA سلولی آسیب زده و منجر به استرس اکسیداتیو، اختلال در عملکرد سلولی و در نهایت مرگ باکتری می‌شوند(Kumar et al., 2020) . مکانیسم دیگر، آسیب مستقیم به غشای سلولی است. نانوذراتی مانند نقره و اکسید روی با غشای فسفولیپیدی سلول‌های باکتریایی برهم‌کنش کرده و باعث ایجاد حفره، نشت محتوای سلولی و اختلال در تعادل اسمزی می‌شوند. اختلال در عملکرد آنزیم‌ها و DNA نیز مکانیسم دیگری است که نانوذرات از طریق آن مانع از فعالیت‌های حیاتی باکتری‌ها می شوند. به عنوان مثال، نانوذرات نقره با اتصال به گروه‌های تیول در آنزیم‌های سلولی، عملکرد آن‌ها را مختل کرده و مانع از تکثیر DNA می‌شوند (Rai et al., 2012).

عوامل مؤثر بر سمیت نانوذرات برای باکتری‌ها

سمیت نانوذرات علیه باکتری‌ها تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد که شامل نوع نانوذره، اندازه، شکل، بار سطحی و غلظت آن‌ها است. نوع نانوذره، عامل کلیدی در سمیت آن است؛ به‌عنوان مثال، نانوذرات نقره و مس اثرات ضد باکتریایی قوی‌تری نسبت به نانوذرات سیلیکا یا آهن دارند. اندازه نانوذرات نیز نقش مهمی ایفا می‌کند؛ هرچه نانوذرات کوچک‌تر باشند، سطح تماس بیشتری با سلول‌های باکتریایی دارند و اثربخشی ضد میکروبی آن‌ها افزایش می‌یابد (Morones et al., 2005). شکل نانوذرات نیز بر میزان سمیت تأثیر می‌گذارد؛ مطالعات نشان داده‌اند که نانوذرات با شکل‌های نامنظم یا لبه‌های تیز، آسیب بیشتری به دیواره سلولی باکتری وارد می‌کنند. بار سطحی نانوذرات نیز اهمیت دارد؛ به‌طور معمول، نانوذرات دارای بار مثبت به دلیل برهم‌کنش الکترواستاتیکی با غشای بار منفی باکتری‌ها، اثرات ضد میکروبی بیشتری دارند. علاوه بر این، غلظت نانوذرات تعیین‌کننده شدت سمیت است؛ در غلظت‌های بالا، سمیت بیشتری مشاهده می‌شود، در حالی که غلظت‌های پایین‌تر ممکن است فقط اثر مهاری ملایمی داشته باشند.

تأثیرات نانوذرات بر باکتری‌های مفید خاک و پیامدهای آن برای کشاورزی پایدار

در حالی که نانوذرات می‌توانند عوامل بیماری‌زا را کنترل کنند، تأثیرات منفی آن ها بر PGPR یکی از نگرانی‌های مهم در کشاورزی پایدار است. PGPRها نقش مهمی در تثبیت زیستی نیتروژن، حل‌کنندگی فسفر، تولید هورمون‌های گیاهی و القای مقاومت سیستمیک

[۲۶] Apical Meristems

دارند. با این حال، مطالعات نشـان داده‌اند که نانوذرات در غلظت‌های بالا می‌توانند زیســـت‌توده و تنوع میکروبی را کاهش داده و فعالیت آنزیم های خاک را مختل کنند (Simonin & Richaume, 2015). برای مثال، نانوذرات اکســـید مس در دوزهای بالا می‌توانند رشـــد و فعالیت باکتری‌های مفیدی مانند *Pseudomonas fluorescens* و *Bacillus subtilis* را مهار کرده و در نتیجه بر عملکرد گیاه تأثیر منفی بگذارند (Wang et al., 2020). این مســـئله می‌تواند منجر به کاهش کیفیت خاک، کاهش بهره‌وری محصـــولات کشـــاورزی و بر هم خوردن تعادل میکروبیوم خاک شود.

آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی

اندازه کوچک و واکنش‌پذیری بالای نانوذرات، به‌ویژه در شـــرایط غیر اشـــباع و متخلخل خاک، می‌تواند منجر به افزایش تحرک آن‌ها در محیط زیست شود و خطر آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی را به همراه داشته باشد (Tourinho et al., 2012; de Moraes et al., 2021). پایداری بالای برخی نانوذرات، مانند اکســـیدهای فلزی (مانند نانوذرات اکســـید تیتانیوم و اکســـید روی)، در محیط‌هـای خـاکی و آبی، احتمـال تجمع آن‌هـا را در پروفیل‌های زیرین خاک و منابع آب افزایش می‌دهد. این تجمع می‌تواند منجر به تغییر در ســـاختار میکروبی خاک، ســـمیت برای موجودات زنده و اختلال در فرآیندهای زیســـتی طبیعی شـــود (Rashid et al., 2017). مطالعات نشان داده‌اند که نانوذرات از طریق فرایندهایی مانند جذب ســـطحی، ترســـیب یا کمپلکس شـــدن با ترکیبات آلی و معدنی، می‌توانند رفتار متفاوتی در محیط‌های مختلف از خود نشـــان دهند (Sharma et al., 2019). با این حال، درک ســـرنوشـــت و رفتار بلندمدت آن‌ها همچنان محدود اســـت. برای ارزیابی دقیق خطرات احتمالی، تحقیقات بیشـــتری در زمینه دینامیک انتقال، برهم‌کنش با ترکیبات خاک و تأثیر بر میکروبیوم‌های خاک مورد نیاز اســـت. همچنین، توســـعـه فنـاوری‌هـایی مـانـنـد روکش‌هـای زیست‌سازگار یا اصلاح سطح نانوذرات می‌تواند به کاهش تحرک و سمیت آن‌ها در محیط زیست کمک کند (Khan et al., 2020).

هزینه‌های تولید و مصرف و صرفه اقتصادی

تولید نانوذرات با کیفیت بالا و در مقیاس صنعتی مســـتلزم فناوری های پیشـــرفته، مواد اولیه خالص و فرآیندهای پیچیده‌ای مانند سنتز شیمیایی یا زیستی، اصلاح ســـطح و خالص‌ســـازی اســـت که می‌تواند بســـیار پرهزینه باشـــد (Shah et al., 2021b). علاوه بر هزینه تولید، هزینه‌های جانبی مانند حمل‌ونقل، ذخیره‌ســـازی و پایش کیفیت نیز بر قیمت نهایی تأثیر می‌گذارد. این مســـئله، به‌ویژه در کشـــورهای در حال توســـعه، مانعی جدی برای پذیرش گســـترده این فناوری توســـط کشـــاورزان، به‌ویژه کشـــاورزان خرده‌پا، ایجاد می‌کند. یکی دیگر از چالش‌های اقتصـــادی، هزینه های کاربردی و اثربخشـــی بلندمدت نانوذرات اســـت. در حالی که نانوکودها و نانوآفت‌کش‌ها ممکن اســـت در کوتاه‌مدت عملکرد گیاه را افزایش دهند، ارزیابی مزایای اقتصـــادی بلندمدت آن ها (مانند بهبود بهره‌وری مصـــرف کود یا کاهش هزینه های نهاده های شـــیمیایی) همچنان نیازمند تحقیقات بیشـــتری اســـت (Parisi et al., 2015). برای افزایش صـــرفه اقتصـــادی، توسعه روش‌های سنتز ارزان‌تر (مانند سنتز سبز با استفاده از عصـــاره‌های گیاهی یا میکروارگانیســـم‌ها) و بهینه‌ســـازی کارایی نانوذرات از طریق کنترل دوز مصـــرف و روش‌های کاربردی هدفمند (مانند ســـیســـتم‌های کپســـوله‌ســـازی کنترل شده)، می‌تواند هزینه‌های تولید و مصرف را کاهش داده و پذیرش این فناوری را در مقیاس وسـیع‌تر تســـهیل کند (Khan et al., 2020).

میزان دقیق مصرف و استانداردهای بین‌المللی

در حال حاضر، دستورالعمل‌ها و استانداردهای مشـــخص و مدونی برای میزان مصـــرف نانوذرات در

کشاورزی در سطح بین‌المللی وجود ندارد. این خلأ نظارتی می‌تواند منجر به استفاده نادرست و غیراصولی از نانوذرات شود که خطر بروز اثرات ناخواسته زیست‌محیطی و مخاطرات برای سلامت انسان را افزایش می‌دهد (Rizwan et al., 2017). تعیین دوزهای بهینه و ایمن برای انواع مختلف نانوذرات و محصولات کشاورزی نیازمند تحقیقات جامع، چندرشته‌ای و بلندمدت است. عواملی مانند ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی نانوذرات (مانند اندازه، شکل، بار سطحی و ترکیب شیمیایی)، نوع خاک، شرایط اقلیمی و ویژگی‌های گیاه، همگی بر اثربخشی و رفتار نانوذرات در محیط کشاورزی تأثیر می‌گذارند (Khan et al., 2019). علاوه بر این، نبود هماهنگی بین استانداردهای ملی و منطقه‌ای، چالشی دیگر در پذیرش گسترده نانوذرات در کشاورزی است. برای مثال، اتحادیه اروپا مقررات سختگیرانه‌تری در زمینه ارزیابی ریسک نانوذرات دارد، در حالی که برخی کشورهای در حال توسعه فاقد پروتکل‌های نظارتی مشخص هستند (FAO, 2020). این ناهماهنگی می‌تواند مانع از تجارت بین‌المللی محصولات کشاورزی مبتنی بر نانوذرات شود. به منظور ارتقای ایمنی و کارایی، تدوین پروتکل‌های استاندارد برای ارزیابی سمیت، پایداری و دوز بهینه نانوذرات ضروری است. همچنین، توسعه پایگاه‌های داده جامع برای ثبت و تحلیل اثرات زیست‌محیطی و کشاورزی نانوذرات می‌تواند به بهبود مدیریت و تنظیم مقررات کمک کند.

توصیه مصرف با توجه به سطح تحقیقات فعلی

با وجود پتانسیل بالای نانوذرات در بهبود بهره‌وری کشاورزی، به دلیل ابهامات موجود در مورد اثرات بلندمدت زیست‌محیطی و سمیت احتمالی آن‌ها، توصیه مصرف گسترده این مواد در حال حاضر نیازمند احتیاط است. اگرچه مطالعات آزمایشگاهی و گلخانه‌ای نتایج امیدوارکننده‌ای در زمینه افزایش عملکرد گیاه و بهبود جذب عناصر غذایی نشان داده‌اند، اما شواهد کافی از ایمنی و پایداری این فناوری در شرایط میدانی و در مقیاس وسیع وجود ندارد (Khan et al., 2019; Rizwan et al., 2017). در حال حاضر، تحقیقات بیشتری برای شناسایی مکانیسم‌های اثرگذاری نانوذرات، سرنوشت زیست‌محیطی آن‌ها (مانند انتقال، تجمع و تجزیه در خاک و آب) و ارزیابی ریسک‌های احتمالی در سیستم‌های کشاورزی واقعی ضروری است. این مطالعات باید به بررسی اثرات مزمن و تجمعی بر میکروبیوم خاک، سلامت گیاه، موجودات غیر هدف و زنجیره غذایی بپردازند. علاوه بر این، توسعه پروتکل‌های استاندارد برای تولید، فرمولاسیون، کاربرد و پایش نانوذرات در کشاورزی از اهمیت بالایی برخوردار است. این پروتکل‌ها باید شامل دستورالعمل‌های مشخص برای دوز مصرف، زمان‌بندی مناسب و روش‌های کاربردی ایمن باشند. همچنین، ایجاد پایگاه‌های داده جامع از اثرات زیست‌محیطی و کشاورزی نانوذرات می‌تواند به بهبود مدیریت ریسک و تدوین مقررات ایمنی کمک کند (FAO, 2020).

محدودیت‌های فناورانه و اثرات بر تنوع زیستی

توسعه و کاربرد ذرات نانو و PGPR همچنان با محدودیت‌های فناورانه روبه‌رو است. این محدودیت‌ها شامل پیچیدگی در طراحی ذرات نانو با قابلیت‌های خاص، هزینه‌های بالای تولید و نیاز به تجهیزات پیشرفته برای ارزیابی و نظارت بر تعامل آن‌ها در محیط خاک است (Grieger et al., 2012; Shah et al., 2021b). یکی دیگر از نگرانی‌های کلیدی، تأثیرات بالقوه ذرات نانو و PGPR بر تنوع زیستی و اکوسیستم‌های طبیعی است. تغییر در ساختار و ترکیب جوامع میکروبی خاک می‌تواند اثرات نامطلوبی بر زنجیره‌های غذایی و کارکردهای اکوسیستمی داشته باشد. تجمع ذرات نانو در خاک و گیاهان ممکن است بر زیست‌پذیری گونه‌های مفید تأثیر بگذارد و حتی منجر به بروز عدم تعادل در اکوسیستم شود (Dimkpa et al., 2013). این موارد نیازمند بررسی‌های جامع و پایش دقیق اثرات زیست‌محیطی در بلندمدت است. همچنین، ورود ذرات نانو به بدن انسان از طریق مصرف مواد غذایی می‌تواند خطراتی برای سلامتی ایجاد

کند، چراکه شواهد نشان می‌دهد این ذرات قادر به عبور از موانع زیستی بدن هستند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با بررسی جامع پتانسیل باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) و نانوذرات در ارتقاء بهره‌وری و پایداری کشاورزی، نشان می‌دهد که این دو فناوری نوین، ابزارهای قدرتمندی برای بهبود عملکرد و کیفیت محصولات کشاورزی هستند. PGPRها با سازوکارهای گوناگون، از جمله افزایش دسترسی به عناصر غذایی ضروری، تولید هورمون‌های تنظیم‌کننده رشد و تقویت سیستم دفاعی گیاه در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی، نقش حیاتی در افزایش عملکرد و سلامت گیاه ایفا می‌کنند. از سوی دیگر، نانوذرات به دلیل سطح ویژه بالا، واکنش‌پذیری زیاد و قابلیت حمل مواد مغذی، به‌عنوان حامل‌های مؤثر برای انتقال عناصر غذایی عمل کرده و فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه را بهبود می‌بخشند. ترکیب این دو رویکرد می‌تواند اثرات هم‌افزایی چشمگیری به همراه داشته باشد و منجر به افزایش کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی شود. مطالعات موردی بررسی‌شده در این مقاله تأیید می‌کنند که کاربرد تلفیقی PGPR و نانوذرات، بهبودهای قابل توجهی در عملکرد گیاه، جذب عناصر غذایی و مقاومت به تنش‌های محیطی ایجاد کرده است. با این حال، چالش‌ها و محدودیت‌هایی نیز در این زمینه وجود دارد که نیازمند توجه و بررسی بیشتر است. ناشناخته بودن کامل سازوکارهای اثرگذاری نانوذرات بر گیاهان، نگرانی‌های زیست‌محیطی، سمیت احتمالی آن‌ها، تنوع پاسخ گیاهان مختلف به نانوذرات و PGPR، هزینه‌های تولید و کاربرد نانوذرات و نبود استانداردهای مشخص برای تولید و استفاده از آن‌ها، از جمله این چالش‌ها هستند. به‌ویژه، اثرات نامطلوب نانوذرات بر باکتری‌های مفید خاک (مانندPGPR) می‌تواند تعادل میکروبیوم خاک را مختل کرده و پایداری زیستی را تحت تأثیر قرار دهد. از این رو، کاربرد کنترل‌شده و هدفمند نانوذرات در کشاورزی ضروری است. برای رفع این چالش‌ها و استفاده مؤثر از فناوری PGPR و نانوذرات، پیشنهاد می‌شود تحقیقات آتی بر موارد زیر متمرکز شوند: نخست، بررسی دقیق‌تر سازوکارهای مولکولی و فیزیولوژیکی اثر نانوذرات بر گیاهان و PGPR ها، به‌ویژه در شرایط مزرعه، ضروری است. دوم، ارزیابی جامع اثرات زیست‌محیطی و سمیت نانوذرات در خاک، آب و گیاه در بلندمدت، با تمرکز بر تأثیر آن‌ها بر میکروبیوم خاک، اهمیت ویژه‌ای دارد. همچنین، مطالعه اثرات تلفیقی PGPRو نانوذرات بر طیف وسیع‌تری از گیاهان و در شرایط میدانی می‌تواند به بررسی پایداری و اثربخشی این فناوری در مقیاس وسیع کمک کند. توسعه روش‌های تولید سبز و پایدار برای سنتز نانوذرات، مانند استفاده از عصاره‌های گیاهی یا قارچ‌ها، می‌تواند اثرات زیست‌محیطی را کاهش دهد. افزون بر این، بهینه‌سازی غلظت و دوز مصرفی نانوذرات برای کاهش سمیت آن‌ها برPGPRها و سایر میکروارگانیسم‌های مفید خاک و همچنین استفاده از روش‌های کپسوله سازی و فرمولاسیون‌های آهسته‌رهش می‌تواند تماس مستقیم نانوذرات با میکروبیوم خاک را محدود کرده و اثرات نامطلوب را کاهش دهد. در این راستا، تدوین استانداردهای بین‌المللی و دستورالعمل‌های مشخص برای تولید، کاربرد و پایش نانوذرات در کشاورزی ضروری است. همچنین، بررسی تأثیر نانوذرات بر کیفیت و ارزش غذایی محصولات کشاورزی، از جمله میزان عناصر غذایی، آنتی‌اکسیدان‌ها و ترکیبات مفید، باید در دستور کار پژوهش‌های آینده قرار گیرد. در نهایت، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند نانوبیوسنسورها برای پایش اثرات نانوذرات در محیط زیست و تعیین میزان تجمع آن‌ها در زنجیره غذایی، می‌تواند به افزایش ایمنی و اثربخشی این فناوری کمک کند. در مجموع، با انجام این تحقیقات و رفع چالش‌های موجود، می‌توان از پتانسیل بالای PGPR و نانوذرات به‌صورت مؤثرتری در جهت توسعه کشاورزی پایدار، افزایش بهره‌وری محصولات و حفظ سلامت محیط زیست و انسان بهره برد. تلفیق اصول زیست‌فناوری، نانوفناوری و مدیریت هوشمند منابع

زیستی می‌تواند راهگشای دستیابی به کشاورزی مدرن، کارآمد و پایدار باشد.

Refrences

1. Adesemoye, A.O., Torbert, H.A. and Kloepper, J.W., 2009. Enhanced plant nutrient use efficiency with PGPR and AMF in an integrated nutrient management system. *Canadian Journal of Microbiology*, 55(8), pp.876–884.
2. Aghaei, F., Sharifi, R.S. and Farzaneh, S., 2024. Effects of Nano Iron-Silicon Oxide on Yield and Some Biochemical and Physiological Characteristics of Triticale Under Salinity Stress. *Silicon*, pp.1-13.
3. Aizawa, S., 2014. Sinorhizobium meliloti-nitrogen-fixer in the grassland. *The Flagellar World: Electron Microscopic Images of Bacterial Flagella and Related Surface Structures*. First Edition, Academic Press, pp.82–83.
4. Akhtar, N., Ilyas, N., Hayat, R., Yasmin, H., Noureldeen, A. and Ahmad, P., 2021. Synergistic effects of plant growth promoting rhizobacteria and silicon dioxide nano-particles for amelioration of drought stress in wheat. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, pp.160–176.
5. Al-Hasani, F.J., Hamad, Q.A. and Faheed, N.K., 2024. Enhancing the cell viability and antibacterial properties of alginate-based composite layer by adding active particulates. *Discover Applied Sciences*, 6(2), p.70.
6. Ali, S., Shafique, O., Mahmood, T., Hanif, M.A., Ahmed, I. and Khan, B.A., 2018. A review about perspectives of nanotechnology in agriculture. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 30(2), pp.116–121.
7. Anal, A.K., Singh, H. and Khare, S.K., 2003. Effect of process parameters on microencapsulation of probiotic bacteria using alginate. *Process Biochemistry*, 38(11), pp.1713–1718.
8. Artursson, V., Finlay, R.D. and Jansson, J.K., 2006. Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and bacteria and their potential for stimulating plant growth. *Environmental Microbiology*, 8(1), pp.1–10.
9. Bashan, Y., 1986. Alginate beads as synthetic inoculant carriers for the slow release of bacteria that affect plant growth. *Applied and Environmental Microbiology*, 51, pp.1089–1098.
10. Bashan, Y., de-Bashan, L.E. and Prabhu, S.R., 2016. Superior polymeric formulations and emerging innovative products of bacterial inoculants for sustainable agriculture and the environment. In: Agriculturally important microorganisms: Commercialization and regulatory requirements in Asia. Singapore: Springer Singapore, pp.15–46.
11. Beck, D.P., Materon, L.A. and Afandi, F., 1993. *Practical Rhizobium-Legume Technology Manual*. Technical Manual No. 19. ICARDA, Aleppo, Syria.
12. Bhattacharyya, P. and Jha, D.K., 2012. Plant growth-promoting rhizobacteria: A critical review. *Biotechnology Advances*, 30(4), pp.965–979.
13. Cao, Y., Glass, A.D. and Crawford, N.M., 2022. Understanding the transport and regulation of potassium and its importance for plant nutrition: Insights from genetic and molecular tools. *Plant Physiology*, 188(1), pp.27–38.

14. Cassidy, M.B., Lee, H. and Trevors, J.T., 1996. Environmental applications of immobilized microbial cells: a review. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 16, pp.79–101.
15. Chen, J., Dou, Z., Zhang, Y. and Shi, J., 2020. Enhanced phosphorus availability by hydroxyapatite nanoparticles and phosphate-solubilizing bacteria. *Environmental Science and Pollution Research, 27*(4), pp.4290–4298.
16. Chen, J., Li, J., Zhang, H., Hu, J. and Li, W., 2018. Effects of potassium-solubilizing bacteria on potassium availability and microbial activity in a black soil in Northeast China. *Frontiers in Microbiology*, 9, p.1565.
17. Chhipa, H. and Joshi, P., 2016. Nanofertilizers, nanopesticides, nanosensors in agriculture. *Environmental Chemistry Letters*, 14(2), pp.229–240.
18. Corbo, M.R., Bevilacqua, A., Speranza, B., Di Maggio, B., Gallo, M. and Sinigaglia, M., 2016. Use of alginate beads as carriers for lactic acid bacteria in a structured system and preliminary validation in a meat product. *Meat Science*, 111, pp.98–203.
19. Cui, S. and Zhou, K., 2017. A comparison of the predictive potential of various vegetation indices for leaf chlorophyll content. *Earth Science Informatics*, 10, pp.169–181.
20. Das, S., Dash, P. and Mishra, S., 2021. Synergistic effect of nanoparticles and PGPR on growth and stress tolerance in plants. *Plant and Soil, 466*(1), pp.101–120.
21. Devi, S.H., Bhupenchandra, I., Sinyorita, S., Chongtham, S.K. and Devi, E.L., 2021. Mycorrhizal fungi and sustainable agriculture. *Nitrogen in Agriculture–Physiological, Agricultural and Ecological Aspects*, pp.1–19.
22. Dobermann, A., 2005. Nitrogen use efficiency – state of the art. *Agronomy & Horticulture Faculty Publications*, 316, pp.1–16.
23. Draget, K.I., Taylor, C., Smidsrød, O. and Stokke, B.T., 2020. Alginates. In: *Handbook of Hydrocolloids*. Woodhead Publishing, pp.649–689.
24. Dzul Rashidi, N.F., Jamali, N.S., Mahamad, S.S., Ibrahim, M.F., Abdullah, N., Ismail, S.F. and Siajam, S.I., 2020. Effects of alginate and chitosan on activated carbon as immobilisation beads in biohydrogen production. *Processes*, 8(10), p.1254.
25. Elmer, W.H. and White, J.F., 2018. The use of soil amendments and beneficial microbes to manage plant diseases. *Biological Control*, 121, pp.476–486.
26. Etesami, H., Jeong, B.R. and Glick, B.R., 2021. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi, phosphate–solubilizing bacteria, and silicon to P uptake by plant. *Frontiers in Plant Science*, 12, p.699618.
27. Fageria, N.K., Baligar, V.C. and Clark, R.B., 2001. *Physiology of Crop Production*. New York: CRC Press.
28. Fallah Nosratabab, A., Khoshru, B., 2024. Potentials and challenges of biofertilizers in sustainable agriculture. *Soil Biology Journal*, 12 (1), 19-63.
29. Feichtmeier, N.S., Walther, P. and Leopold, K., 2015. Uptake, effects, and regeneration of barley plants exposed to gold nanoparticles. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, pp.8549–8558.
30. Fenice, M., Selbman, L., Federici, F. and Vassilev, N., 1999. Application of encapsulated Penicillium variabile P16 in solubilization of rock phosphate. *Bioresource Technology*, 73, pp.157–162.
31. Fouda, M.M., Abdelsalam, N.R., El-Naggar, M.E., Zaitoun, A.F., Salim, B.M., Bin-Jumah, M., Allam, A.A., Abo-Marzoka, S.A. and Kandil, E.E., 2020. Impact of high throughput green synthesized silver nanoparticles on agronomic traits of onion. *International Journal of*

Biological Macromolecules, 149, pp.1304–1317.

32. Francis, D.V., Abdalla, A.K., Mahakham, W., Sarmah, A.K. and Ahmed, Z.F., 2024. Interaction of plants and metal nanoparticles: Exploring its molecular mechanisms for sustainable agriculture and crop improvement. *Environment International*, p.108859.
33. Franken, P., 2012. The plant strengthening root endophyte Piriformospora indica: potential application and the biology behind. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 96, pp.1455–1464.
34. Ghazy, N.A., Abd El-Hafez, O.A., El-Bakery, A.M. and El-Geddawy, D.I., 2021. Impact of silver nanoparticles and two biological treatments to control soft rot disease in sugar beet (Beta vulgaris L). *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 31, pp.1–12.
35. Gill, S.S., Gill, R., Trivedi, D.K., Anjum, N.A., Sharma, K.K., Ansari, M.W., et al., 2016. Piriformospora indica: potential and significance in plant stress tolerance. *Frontiers in Microbiology*, 7, p.332.
36. Glaeser, S.P., Imani, J., Alabid, I., Guo, H., Kumar, N., Kampfer, P., et al., 2016. Non-pathogenic rhizobium radiobacter F4 deploys plant beneficial activity independent of its host Piriformospora indica. *The ISME Journal*, 10, pp.871–884.
37. Guzmán-Guzmán, P., Kumar, A., de Los Santos-Villalobos, S., Parra-Cota, F.I., Orozco-Mosqueda, M.D.C., Fadiji, A.E., Hyder, S., Babalola, O.O. and Santoyo, G., 2023. Trichoderma species: Our best fungal allies in the biocontrol of plant diseases—A review. *Plants*, 12(3), p.432.
38. Hao, Y., Yu, Y., Sun, G., Gong, X., Jiang, Y., Lv, G., Zhang, Y., Li, L., Zhao, Y., Sun, D. and Gu, W., 2023. Effects of multi-walled carbon nanotubes and nano-silica on root development, leaf photosynthesis, active oxygen and nitrogen metabolism in maize. *Plants*, 12(8), p.1604.
39. Hatami, M. and Ghorbanpour, M., 2024. Metal and metal oxide nanoparticles-induced reactive oxygen species: Phytotoxicity and detoxification mechanisms in plant cell. *Plant Physiology and Biochemistry*, p.108847.
40. Hayat, R., Ali, S., Amara, U., Khalid, R. and Ahmed, I., 2010. Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review. *Annals of Microbiology*, 60(4), pp.579–598.
41. He, Y., Wu, Z., Tu, L., Han, Y., Zhang, G. and Li, C., 2015. Encapsulation and characterization of slow-release microbial fertilizer from the composites of bentonite and alginate. *Applied Clay Science*, 109–110, pp.68–75.
42. Hodge, A. and Storer, K., 2015. Arbuscular mycorrhiza and nitrogen: implications for individual plants through to ecosystems. *Plant Soil*, 386(1–2), pp.1–19.
43. Hussain, A., Al-Dakheel, A.J., Rehman, S.U., et al., 2018. Role of potassium-solubilizing microorganisms to enhance soil fertility, plant growth, and potassium content. *Sustainable Agriculture Research*, 7(4), pp.1–11.
44. Ivanova, E., Chipeva, V., Ivanova, I., Dousset, X. and Poncelet, D., 2002. Encapsulation of lactic acid bacteria in calcium alginate beads for bacteriocin production. *Journal of Culture Collection*, 3, pp.53–58.
45. Ivanova, E., Teunou, E. and Poncelet, D., 2005. Alginate-based macro capsules as inoculants carriers for production of nitrogen biofertilizers. *Proceedings of the Balkan Scientific Conference of Biology*, Plovdiv, Bulgaria, pp.90–108.
46. Jahangir, S., Javed, K. and Bano, A., 2020. Nanoparticles and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) modulate the physiology of onion plant under salt stress. *Pak. J. Bot.*, 52(4), pp.1473–1480.
47. Jangir, P., Shekhawat, P.K., Bishnoi, A., Ram, H. and Sonin, P.,

2021. Role of *Serendipita indica* in enhancing drought tolerance in crops. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 116, p.101691.

48. Jha, S. and Yadav, A., 2023. Assessment of carbon and fullerene nanomaterials for sustainable crop plants growth and production. In *Engineered Nanomaterials for Sustainable Agricultural Production, Soil Improvement and Stress Management* (pp.145–160). Academic Press.
49. John, R.P., Tyagi, R.D., Brar, S.K., Surampalli, R.Y. and Prevost, D., 2011. Bio-encapsulation of microbial cells for target agricultural delivery. *Crit. Rev. Biotechnol.*, 31, pp.211–226.
50. Jordan, D.C. Family III Rhizobiaceae. In: *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*, pp.234–242.
51. Kalayu, G., 2019. Phosphate solubilizing microorganisms: promising approach as biofertilizers. *International Journal of Agronomy*, 2019(1), p.4917256.
52. Kalia, A., Sood, S. and Bhardwaj, S., 2022. Role of plant growth-promoting rhizobacteria in enhancing ZnO nanoparticle uptake by wheat. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, 18*, 100711.
53. Kalra, Y.P., 1998. *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press.
54. Kapoor, D., Yadav, S., Sharma, M.M.M. and Sharma, P., 2023. Interaction between metal nanoparticles and PGPR on the plant growth and development. In *Nanomaterials and Nanocomposites Exposures to Plants: Response, Interaction, Phytotoxicity and Defense Mechanisms* (pp.327–351). Singapore: Springer Nature Singapore.
55. Katarína, K., Masarovičová, E. and Jampílek, J., 2021. Risks and benefits of metal-based nanoparticles for vascular plants. In *Handbook of Plant and Crop Physiology* (pp.922–963). CRC Press.
56. Khan, I., Awan, S.A., Rizwan, M., Hassan, Z.U., Akram, M.A., Tariq, R., Brestic, M. and Xie, W., 2022. Nanoparticle's uptake and translocation mechanisms in plants via seed priming, foliar treatment, and root exposure: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(60), pp.89823-89833.
57. Khan, M.S., Zaidi, A. and Wani, P.A., 2009. Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture—a review. *Agron. Sustain. Dev.*, 27(1), pp.29–43.
58. Khoshru, B., Fallah Nosratabad, A., Mahjenabadi, V.A.J., Knežević, M., Hinojosa, A.C., Fadiji, A.E., Enagbonma, B.J., Qaderi, S., Patel, M., Baktash, E.M. and Dawood, M.F.A.M., 2024. Multidimensional role of *Pseudomonas*: from biofertilizers to bioremediation and soil ecology to sustainable agriculture. *Journal of Plant Nutrition*, pp.1–27.
59. 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*, p.100268.
60. Kim, Y.J., Park, H.G., Yang, Y.L., Yoon, Y., Kim, S. and Oh, E., 2005. Multifunctional drug delivery system using starch-alginate beads for controlled release. *Biol. Pharm. Bull.*, 28, pp.394–397.
61. Klute, A., 1986. *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Second Edition. ASA-CSSA-SSSA Publisher, Madison, Wisconsin, USA.
62. Kowalska, E., Ziarno, M., Ekielski, A. and Żelaziński, T., 2022. Materials used for the microencapsulation of probiotic bacteria in the food industry. *Molecules*, 27(10), p.3321.

63. Kumar, S., Nehra, M. and Dilbaghi, N., 2021. Nanotechnology-based sustainable agriculture: Current status and future implications. *Biotechnology Reports*, 30, e00677.
64. Kumaresan, G. and Reetha, D., 2012. Development of gel-based formulation enriched with different additives for long term survival of *Azospirillum* inoculant. *International Journal of Recent Scientific Research*, 3, p.11.
65. Lahuta, L.B., Szablińska-Piernik, J., Głowacka, K., Stałanowska, K., Railean-Plugaru, V., Horbowicz, M., Pomastowski, P. and Buszewski, B., 2022. The effect of bio-synthesized silver nanoparticles on germination, early seedling development, and metabolome of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Molecules*, 27(7), p.2303.
66. Lambers, H., 2022. Phosphorus acquisition and utilization in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 73(1), pp.17–42.
67. Lateef, A., Nazir, R., Jamil, N. and Shah, R., 2021. Sustainable agricultural practices through application of bio-nanofertilizers: An emerging perspective. *Environmental Research*, 197, 111023.
68. Lee, B.B., Ibrahim, R., Chu, S.Y., Zulkifli, N.A. and Ravindra, P., 2015. Alginate liquid core capsule formation using the simple extrusion dripping method. *Journal of Polymer Engineering*, 35(4), pp.311–318.
69. Ley, J., Barrio-Duque, A.D., Samad, A., Antonielli, L., Sessitsch, A. and Compant, S., 2019. Beneficial endophytic bacteria-*Serendipita indica* interaction for crop enhancement and resistance to phytopathogens. *Front. Microbiol.*, 10, p.3398.
70. López-Valdez, F., Fernández-Luqueño, F. and de la Rosa, G., 2021. Nanotechnology and plant-microbe interactions: A strategy for improving agricultural sustainability. *Frontiers in Microbiology*, 12, 671791.
71. Lucy, M., Reed, E. and Glick, B.R., 2004. Applications of free living plant growth-promoting rhizobacteria. *Antonie van Leeuwenhoek*, 86(1), pp.1–25.
72. Mahanty, T., Bhattacharjee, S., Goswami, M. and Tribedi, P., 2022. Nano-biofertilizer and nano-biopesticide: A sustainable approach for agricultural applications. *Frontiers in Microbiology*, 13, 854932.
73. Malusá, E., Sas-Paszt, L. and Ciesielska, J., 2012. Technologies for beneficial microorganisms inocula used as biofertilizers. *The Scientific World Journal*, 2012, pp.1–12.
74. Marschner, P., 2012. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3rd ed. London: Academic Press.
75. Martinez, Y., Ribera, J., Schwarze, F.W. and De France, K., 2023. Biotechnological development of *Trichoderma*-based formulations for biological control. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 107(18), pp.5595–5612.
76. Martínez-Cano, B., Mendoza-Meneses, C.J., García-Trejo, J.F., Macías-Bobadilla, G., Aguirre-Becerra, H., Soto-Zarazúa, G.M. and Feregrino-Pérez, A.A., 2022. Review and perspectives of the use of alginate as a polymer matrix for microorganisms applied in agro-industry. *Molecules*, 27(13), p.4248.
77. Mazhar, Z., Akhtar, J., Alhodaib, A., Naz, T., Zafar, M.I., Iqbal, M.M., Fatima, H. and Naz, I., 2023. Efficacy of ZnO nanoparticles in Zn fortification and partitioning of wheat and rice grains under salt stress. *Scientific Reports*, 13(1), p.2022.
78. Meirelles, L.N., Mesquita, E., Corrêa, T.A., Bitencourt, R.D.O.B., Oliveira, J.L., Fraceto, L.F., Camargo, M.G. and Bittencourt, V.R.E.P., 2023. Encapsulation of entomopathogenic fungal conidia: evaluation of stability and control potential of *Rhipicephalus microplus*. *Ticks and Tick-Borne Diseases*, 14(4), p.102184.

79. Mendoza, J., Romero-Perdomo, F., Hernandez, J.P. and Uribe-Velez, D., 2021. *Bacillus* strains immobilized in alginate macro beads enhance drought stress adaptation of guinea grass. *Rhizosphere*, 19(14), p.100385.

80. Menossi, M., Casalongué, C. and Alvarez, V.A., 2022. Bio-nanocomposites for modern agricultural applications. In *Handbook of Consumer Nanoproducts* (pp.1201–1237). Singapore: Springer Nature Singapore.

81. Merinero, M., Alcudia, A., Begines, B., Martínez, G., Martín-Valero, M.J., Pérez-Romero, J.A., Mateos-Naranjo, E., Redondo-Gómez, S., Navarro-Torre, S., Torres, Y. and Merchán, F., 2022. Assessing the biofortification of wheat plants by combining a plant growth-promoting rhizobacterium (PGPR) and polymeric Fe-nanoparticles: allies or enemies?. *Agronomy*, 12(1), p.228.

82. Mukherjee, A., Majumdar, S. and Servin, A., 2020. Interaction of engineered nanomaterials with soil microbiota and plants: A review. *Frontiers in Microbiology*, 11, 606084.

Patel, S., Singh, M. and Husain, M., 2021. Silver nanoparticles: Mechanisms of antimicrobial action and their potential application in agriculture. *Journal of Applied Microbiology*, 131(4), pp.1867–1883.

83. Narayan, O.M., Verma, N., Jogawat, A., Dua, M. and Johri, A.K., 2021. Sulfur transfer from the endophytic fungus *Serendipita indica* improves maize growth and requires the sulfate transporter. *Plant Cell*, 33(4), pp.1268–1285.

84. Nascimento, F.C., Santos, C.H., Kandasamy, S. and Rigobelo, E., 2019. Efficacy of alginate-and clay-encapsulated microorganisms on the growth of *Araçá-Boi* seedlings (*Eugenia stipitata*). *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, 41, p.43936.

85. Nechitailo, G.S., Bogoslovskaya, O.A., Ol'khovskaya, I.P. and Glushchenko, N.N., 2018. Influence of iron, zinc, and copper nanoparticles on some growth indices of pepper plants. *Nanotechnologies in Russia*, 13, pp.161–167.

86. Nedović, V.A., Kalusevic, A., Manojlovic, V., Levic, S., Bugarski, B. and Gökmen, V., 2017. Encapsulation of food bioactive compounds. In *Food Bioactive Compounds* (pp.285–325). Cham: Springer.

87. Page, A.L., Miller, R.H. and Keeney, D.R., 1982. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. ASA-CSSA-SSSA Publisher, Madison, Wisconsin, USA.

88. Park, J.K. and Chang, H.N., 2000. Microencapsulation of microbial cells. *Biotechnol Adv*, 18, pp.303–319.

89. Pavithran, R.K., Reddy, S.G., Kumar, B.S. and Kugabalasooriar, S., 2024. Enhancing sustainability in agriculture: natural polymer-based controlled release systems for effective pest management and environmental protection. *ES Food & Agroforestry*, 18, p.1276.

90. Perret, X., Staehelin, C. and Broughton, W.J., 2000. Molecular basis of symbiotic promiscuity. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 64(1), p.1.

91. Pitaktamrong, P., Kingkaew, J., Yooyongwech, S., Cha-um, S. and Phisalaphong, M., 2018. Development of arbuscular mycorrhizal fungi-organic fertilizer pellets encapsulated with alginate film. *Engineering Journal*, 22(6), pp.65–79.

92. Rai, M., Bonde, S., Yadav, A. and Ingle, A.P., 2021. Nanotechnology in biofertilizers: Recent trends and future perspectives. *Environmental Chemistry Letters*, 19(3), pp.1911–1928.

Shaikh, S., Nazam, N. and Rizvi, M.A., 2023. Nanoparticles and their bio-interaction with plant growth-

promoting rhizobacteria: Implications for sustainable agriculture. *Journal of Nanobiotechnology*, 21(1), 115.

93. Rai, P.K., Lee, S.S., Zhang, M. and Tsang, D.C.W., 2021. Nanoparticles and plant–microbe interactions: Synergistic effects on plant growth and sustainability. *Journal of Hazardous Materials, 403*, 123102.
94. Rai, P.K., Rai, A., Sharma, N.K., Singh, T. and Kumar, Y., 2023. Limitations of biofertilizers and their revitalization through nanotechnology. *Journal of Cleaner Production*, p.138194.
95. Rajput, V., Minkina, T., Sushkova, S., Behal, A., Maksimov, A., Blicharska, E., Ghazaryan, K., Movsesyan, H. and Barsova, N., 2020. ZnO and CuO nanoparticles: a threat to soil organisms, plants, and human health. *Environmental Geochemistry and Health*, 42, pp.147–158.
96. Rajput, V.D., Minkina, T. and Mandzhieva, S., 2021. Effects of metal oxide nanoparticles on soil, plants, and growth promoting rhizobacteria. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 208*, 111687.
97. Regnault-Roger, C., 2011. Trends for commercialization of biocontrol agent (biopesticide) products. In *Plant Defence: Biological Control* (pp.139–160). Dordrecht: Springer Netherlands.
98. Rehmanullah, Muhammad, Z., Inayat, N. and Majeed, A., 2020. Application of nanoparticles in agriculture as fertilizers and pesticides: challenges and opportunities. In *New Frontiers in Stress Management for Durable Agriculture* (pp.281–293).
99. Rezaei Cherati, S., Anas, M., Liu, S., Shanmugam, S., Pandey, K., Angtuaco, S., Shelton, R., Khalfaoui, A.N., Alena, S.V., Porter, E. and Fite, T., 2022. Comprehensive risk assessment of carbon nanotubes used for agricultural applications. *ACS Nano*, 16(8), pp.12061–12072.
100. Richardson, A.E. and Simpson, R.J., 2011. Soil microorganisms mediating phosphorus availability: update on microbial phosphorus. *Plant Physiology*, 156(3), pp.989–996.
101. Rizwan, M., Ali, S., ur Rehman, M.Z., Riaz, M., Adrees, M., Hussain, A., Zahir, Z.A. and Rinklebe, J., 2021. Effects of nanoparticles on trace element uptake and toxicity in plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 221, p.112437.
102. Rossi, L., Fedenia, L.N., Sharifan, H., Ma, X. and Lombardini, L., 2019. Effects of foliar application of zinc sulfate and zinc nanoparticles in coffee (*Coffea arabica L.*) plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 135, pp.160–166.
103. Rui, M., Ma, C., Tang, X., Yang, J., Jiang, F., Pan, Y., Xiang, Z., Hao, Y., Rui, Y., Cao, W. and Xing, B., 2017. Phytotoxicity of silver nanoparticles to peanut (*Arachis hypogaea L.*): physiological responses and food safety. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(8), pp.6557–6567.
104. Saberi Riseh, R., Ebrahimi-Zarandi, M., Gholizadeh Vazvani, M. and Skorik, Y.A., 2021. Reducing drought stress in plants by encapsulating plant growth-promoting bacteria with polysaccharides. *International Journal of Molecular Science*, 22, p.12979.
105. Saberi Riseh, R., Skorik, Y.A., Kumar Thakur, V., Moradi Pour, M., Tamanadar, E. and Shahidi Noghabi, S., 2021. Encapsulation of plant biocontrol bacteria with alginate as a main polymer material. *International Journal of Molecular Sciences*, 22, p.11165.
106. Schoebitz, M., Roldan, A. and Lopez, M.D., 2013. Bioencapsulation of microbial inoculants for better soil-plant fertilization. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, pp.751–765.

107. Schwartz, A.R., Ortiz, I., Maymon, M., Herbold, C.W., Fujishig, N.A., Vijanderan, J.A., Villella, W., Hanamoto, K., Diener, A., Sanders, E.R., DeMason, D.A. and Hirsch, A.M., 2013. *Bacillus simplex*—A little known PGPB with anti-fungal activity—alters pea legume root architecture and nodule morphology when coinoculated with *Rhizobium leguminosarum* bv. *Viciae*. *Agronomy*, 3, pp.595–620.

108. Shang, Y., Hasan, M. and Akin, D., 2022. Nanoparticle-induced biofilm formation by plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, *19*, 100733.

109. Sharma, M., Schmid, M., Rothballer, M., Hause, G., Zuccaro, A., Imani, J. et al., 2008. Detection and identification of bacteria intimately associated with fungi of the order Sebacinales. *Cell Microbiol.*, 10, pp.2235–2246.

110. Sharma, S.B., Sayyed, R.Z., Trivedi, M.H. and Gobi, T.A., 2021. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus*, 2(1), pp.587–612.

111. Siddhanta, S., Paidi, S.K., Bushley, K., Prasad, R. and Barman, I., 2017. Exploring morphological and biochemical linkages in fungal growth with label-free light sheet microscopy and Raman spectroscopy. *Chem Phys Chem*, 18, pp.72–78.

112. Silva, D., Ribeiro, A.J. and Reis, C.P., 2022. Microencapsulation of probiotics: a review of the different methods and their applications. *Foods*, 11(13), p.1952.

113. Singh, J., Kumar, V. and Kim, K.H., 2020. Nanoparticle-based fertilizers and their application in modern agriculture. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 14, 100308.

114. Singhal, U., Khanuja, M., Prasad, R. and Varma, A., 2017. Impact of synergistic association of ZnO-nanorods and symbiotic fungus *Piriformospora indica DSM 11827* on *Brassica oleracea var. botrytis* (broccoli). *Frontiers in Microbiology*, 8, p.1909.

115. Sivakumar, P.K., Parthasarthi, R., and Lakshmipriya, V.P., 2014. Encapsulation of plant growth promoting inoculant in bacterial alginate beads enriched with humic acid. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3, p.6.

116. Smit, E., Wolters, A.C., Lee, H., Trevors, J.T., and van Elsas, J.D., 1996. Interaction between a genetically marked *Pseudomonas fluorescens* strain and bacteriophage øR2f in soil: Effects of nutrients, alginate encapsulation, and the wheat rhizosphere. *Microbial Ecology*, 31, pp.125–140.

117. Smith, S.E., and Read, D.J., 2008. *Mycorrhizal Symbiosis*. 3rd ed. San Diego: Academic Press.

118. Soares da Costa, L., Henrique Grazziotti, P., Christofaro Silva, A., and et al., 2019. Alginate gel entrapped ectomycorrhizal inoculum promoted growth of *Eucalyptus* clones cutting under nursery conditions. *Canadian Journal of Forest Research*.

119. Sutulienė, R., Ragelienė, L., Duchovskis, P., and Miliauskienė, J., 2022. The effects of nano-copper, -molybdenum, -boron, and -silica on pea (*Pisum sativum L.*) growth, antioxidant properties, and mineral uptake. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, pp.1–14.

120. Syers, J.K., Johnston, A.E., and Curtin, D., 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin*, 18(108), pp.5–50.

121. Szekalska, M., Puciłowska, A., Szymańska, E., Ciosek, P., and Winnicka, K., 2016. Alginate: current use and future perspectives in pharmaceutical and biomedical applications. *International Journal of Polymer Science*, 2016(1), p.7697031.

122. Takei, T., Yoshida, M., Hatate, Y., Shiomori, K., and Kiyoyma, Sh., 2008. Lactic acid bacteria-enclosing poly (ε-caprolactone) microcapsules as soil bioamendment. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, pp.268–272.
123. Tariq, A., Pan, K., Olatunji, O.A., Graciano, C., Li, Z., Sun, F., Sun, X., and et al., 2017. Phosphorus application improves drought tolerance of *Phoebe zhennan*. *Frontiers in Plant Science*, 8, p.5644.
124. Timmusk, S., Seisenbaeva, G., and Behers, L., 2018. Titania (*TiO2*) nanoparticles enhance the performance of growth-promoting rhizobacteria. *Scientific Reports*, 8(1), p.617.
125. Trevors, J.T., van Elsas, J.D., Lee, H., and Wolters, A.C., 1993. Survival of alginate encapsulated *Pseudomonas fluorescens* cells in soil. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 39, pp.637–643.
126. Tripathi, D.K., Singh, S., Singh, V.P. and Prasad, S.M., 2022. Zinc oxide nanoparticles and their interactions with beneficial soil microbes: A review on mechanisms and applications. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 18, 100732.
127. Van Wylick, A., De Laet, L., Peeters, E., and Rahier, H., 2023. Encapsulation of fungal spores for fungi-mediated self-healing concrete. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 378, p.02002). EDP Sciences.
128. Varma, A., Verma, S., Sahay, N., Bütehorn, B., and Franken, P., 1999. *Piriformospora indica*: a cultivable plant-growth-promoting root endophyte. *Applied and Environmental Microbiology*, 65, pp.2741–2744.
129. Vassilev, N., Vassileva, M., Martos, V., Garcia del Moral, L.F., Kowalska, J., Tylkowski, B., and Eligio, M., 2020. Formulation of microbial inoculants by encapsulation in natural polysaccharides: focus on beneficial properties of carrier additives and derivatives. *Frontiers in Plant Science*, 11, p.270.
130. Vejan, P., Khadiran, T., Abdullah, R., and Ahmad, N., 2021. Controlled release fertilizer: A review on developments, applications, and potential in agriculture. *Journal of Controlled Release*, 339, pp.321–334.
131. Vejan, P., Khadiran, T., Abdullah, R., Ismail, S., and Dadrasnia, A., 2019. Encapsulation of plant growth promoting rhizobacteria—prospects and potential in agricultural sector: a review. *Journal of Plant Nutrition*, 42(19), pp.2600–2623.
132. Verma, K.K., Joshi, A., Song, X.P., Singh, S., Kumari, A., Arora, J., Singh, S.K., Solanki, M.K., Seth, C.S., and Li, Y.R., 2024. Synergistic interactions of nanoparticles and plant growth promoting rhizobacteria enhancing soil-plant systems: a multigenerational perspective. *Frontiers in Plant Science*, 15, p.1376214.
133. Vessey, J.K., 2003. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil*, 255(2), pp.571–586.
134. Vitousek, P.M., Menge, D.N.L., Reed, S.C., and Cleveland, C.C., 2013. Biological nitrogen fixation: rates, patterns and ecological controls in terrestrial ecosystems. *Biological Sciences*, 368, p.1621.
135. Wang, N., Wang, B., Wan, Y., Gao, B., and Rajput, V.D., 2023. Alginate-based composites as novel soil conditioners for sustainable applications in agriculture: A critical review. *Journal of Environmental Management*, 348, p.119133.
136. Wang, P., Menzies, N.W. and Lombi, E., 2023. Silicon nanoparticles in agriculture: Potential benefits and risks for plant growth and soil health. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1187321.
137. Wang, Q., Liu, J., and Zhu, H., 2018. Genetic and molecular mechanisms underlying symbiotic specificity in legume-rhizobium interactions. *Plant Science*, 9, p.313.

138. Wang, Y., Zhang, X. and Li, J., 2023. Synergistic effects of PGPR and TiO2 nanoparticles on plant growth and stress tolerance. *Science of The Total Environment, 866*, 161380.
139. Weir, S.C., Dupuis, S.P., Providenti, M.A., Lee, H., and Trevors, J.T., 1995. Nutrient enhanced survival of and phenanthrene mineralization by alginate-encapsulated and free *Pseudomonas sp. UG14Lr* cells in creosote-contaminated soil slurries. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 43, pp.946–951.
140. Westerman, R.L., 1990. *Soil Testing and Plant Analysis*. 3rd ed. Book Series No. 3, SSSA, USA.
141. Wiwattanapatapee, R., Chumthong, A., Penagnoo, A., and Kanjanamaneesathian, M., 2013. Preparation and evaluation of *Bacillus megaterium* alginate microcapsules for control of rice sheath blight disease. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 29, pp.1487–1497.
142. Wu, Z., Zhao, Y., Kaleem, I., and Li, C., 2011. Preparation of calcium–alginate microcapsuled microbial fertilizer coating *Klebsiella oxytoca Rs-5* and its performance under salinity stress. *European Journal of Soil Biology*, 47, pp.152–159.
143. Xin, X., Zhao, F., Rho, J.Y., Goodrich, S.L., Sumerlin, B.S., and He, Z., 2020. Use of polymeric nanoparticles to improve seed germination and plant growth under copper stress. *Science of the Total Environment*, 745, p.141055.
144. Yan, A., and Chen, Z., 2019. Impacts of silver nanoparticles on plants: a focus on the phytotoxicity and underlying mechanism. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(5), p.1003.
145. Younes, N.A., Dawood, M.F., and Wardany, A.A., 2019. Biosafety assessment of graphene nanosheets on leaf ultrastructure, physiological, and yield traits of *Capsicum annuum L.* and *Solanum melongena L. Chemosphere*, 228, pp.318–327.
146. Young, C.C., Rekha, P.D., Lai, W.A., and Arun, A.B., 2006. Bioencapsulation of plant growth-promoting bacteria in alginate beads enriched with humic acid. *Biotechnology and Bioengineering*, 1, pp.76–83.
147. Zahedi, S.M., Abolhassani, M., Hadian-Deljou, M., Feyzi, H., Akbari, A., Rasouli, F., Koçak, M.Z., Kulak, M., and Gohari, G., 2023. Proline-functionalized graphene oxide nanoparticles (GO-pro NPs): A new engineered nanoparticle to ameliorate salinity stress on grape (*Vitis vinifera L. cv Sultana*). *Plant Stress*, 7, p.100128.
148. Zhang, H., Wang, R., Chen, Z., Cui, P., Lu, H., Yang, Y., and Zhang, H., 2021. The effect of zinc oxide nanoparticles for enhancing rice (*Oryza sativa L.*) yield and quality. *Agriculture*, 11(12), p.1247.
149. Zhang, Y., Li, X. and Chen, G., 2024. Controlled release of nanoparticles for agricultural applications: Enhancing plant growth while minimizing environmental impact. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(4), pp.1123–1135.
150. Zhao, L., Huang, Y. and Hu, J., 2021. Nanotechnology for sustainable agriculture: Applications and perspectives. *Science of the Total Environment*, 755, 142466.
151. Zohar-Perez, C., Ritte, E., Chernin, L., Chet, I., and Nussinovitch, A., 2002. Preservation of chitinolytic *Pantoea agglomerans* in a viable form by cellular dried alginate-based carriers. *Biotechnology Progress*, 18, pp.1133–1140.