Potentials and challenges of biofertilizers in sustainable agriculture

A.Fallah Nosratabad and B.Khoshru*

Professor of Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Promotion Organization, Karaj, Iran.**a.r.fallah1350@gmail.com**

Postdoctoral Researcher, Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Karaj, Iran.,Organization (AREEO)**: bahmankhoshru@yahoo.com**

« **Review Article** »

Received: June 18, 2024, and Accepted: September 11, 2024

Extended Abstract

Background and Objectives

The rapid growth of the global population has intensified the demand for food production, which has consequently led to a significant increase in the use of chemical fertilizers in agriculture. While these fertilizers have been effective in boosting crop yields, their widespread and prolonged use has raised serious concerns due to their adverse effects on human health, soil quality, water resources, and overall environmental sustainability. These concerns include soil degradation, contamination of water bodies through runoff, and the disruption of natural ecosystems. In response, there has been a shift towards more sustainable agricultural practices that aim to minimize these negative impacts while maintaining or even enhancing agricultural productivity. Biofertilizers have emerged as a promising alternative in this context. Unlike chemical fertilizers, biofertilizers are composed of living microorganisms, primarily beneficial rhizospheric bacteria that can naturally enhance the availability of essential nutrients such as nitrogen, phosphorus, potassium, iron, and zinc to plants. Moreover, these microorganisms produce a range of bioactive compounds including growth-promoting hormones, siderophores, and antibiotics, which can stimulate plant growth, enhance resistance to pathogens, and improve soil health. The objective of this article is to provide a comprehensive review of the various components of biofertilizers, discussing their potential benefits, the challenges associated with their use, and their future prospects in the context of sustainable agriculture.

Materials and Methods

This study explores the different components of biofertilizers, focusing on their composition, properties, and applications. The types of biofertolizers reviewed include powders, granules, liquids, polymer-encapsulated forms, dried fluid beds, and gels. Each of these biofertolizers offers unique advantages and faces specific challenges that can impact the effectiveness of them. For instance, powder and granular biofertolizers are popular due to their ease of handling, transportation, and storage, but they may suffer from reduced microbial viability over time. Liquid biofertolizers, while offering a more immediate and homogenous distribution of nutrients, are more susceptible to contamination and require more stringent storage conditions. The article also discusses the critical aspects of biofertilizer production, including the selection of appropriate microbial strains based on their functionality and compatibility with target crops and soil types. The choice of carrier materials (organic, inorganic, liquid, or synthetic) plays a significant role in maintaining the viability and activity of the microorganisms. Additionally, the article examines the use of additives such as adhesives, stabilizers, and protective agents that can enhance the biofertolizer's performance. The production process involves several essential steps: the preparation and sterilization of carriers to eliminate contaminants, the inoculation and growth of microbial strains under controlled conditions, and the packaging of the final product to ensure shelf-life and ease of application.

*- Corresponding author's email**: Bahmankhoshru@yahoo.com**

CC BY

Results

The findings from this review indicate that the choice of biofertilizer components greatly influences its effectiveness in the field. Powder and granular biofertilizers are found to be suitable for large-scale applications due to their stability and ease of use; however, they often face biofertilizers related to the survival rate of the beneficial microorganisms during storage and application. Liquid biofertilizers, on the other hand, provide a rapid supply of nutrients and are easier to apply in irrigation systems, but their efficacy can be compromised by contamination risks and the need for cold storage. More advanced biofertilizers, such as polymer-encapsulated, dried fluid bed, and gel forms, show promising results in protecting microorganisms from environmental stresses such as desiccation, and temperature fluctuations. These formulations can provide controlled release of nutrients and ensure longer shelf life. However, their production is often more complex and costly, requiring advanced technology and materials. The research highlights that an integrated approach combining multiple components or optimizing specific formulations based on local conditions and crop requirements could enhance the effectiveness and adoption of biofertilizers in sustainable agriculture.

Conclusion

The development and optimization of biofertilizer components are crucial for their success in sustainable agriculture. High-quality biofertilizers that ensure the survival and activity of beneficial microorganisms can significantly reduce the dependency on chemical fertilizers, thereby minimizing their negative environmental and health impacts. The growing interest in sustainable agricultural practices, coupled with increasing public awareness of the benefits of biofertilizers, suggests a promising future for these products. Further research and innovation are needed to address the challenges associated with their production, formulation, and application to ensure maximum efficacy and build trust among farmers. Technological advancements, such as improved encapsulation techniques and the use of novel carrier materials, are expected to enhance the performance of biofertilizers, making them a key component of future agricultural systems aimed at protecting soil and environmental health.

Keywords: Effectiveness, carrier, encapsulation, inoculant, soil health.

پتانسیل‌ها و چالش‌های کودهای زیستی در کشاورزی پایدار

علیرضا فلاح نصرت آباد و بهمن خوشرو*

استاد پژوهشی موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

A.R.fallah1350@gmail.com

پژوهشگر پسادکترا، موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

Bahmankhoshru@yahoo.com

«مقاله مروری»

دریافت:۱۴۰۳/۳/۲۹ و پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۲۱

چکیده

افزایش جهانی جمعیت منجر به افزایش تقاضا برای استفاده از کودهای شیمیایی در بخش کشاورزی شده که این امر تأثیرات منفی بر سلامت انسان و محیط زیست گذاشته است. لذا تمرکز تحقیقات به سمت کشاورزی پایدار و تولید محصولات سازگار با محیط زیست معطوف شده است. کودهای زیستی به عنوان یک راهکار پایدار در این زمینه، مزایای قابل توجهی دارند. این کودها حاوی مواد فعال از جمله باکتری‌های مفید ریزوسفری هستند که قابلیت‌های متنوعی نظیر تامین و افزایش فراهمی زیستی عناصر غذایی (مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، روی)، تولید هورمون‌های تحریک‌کننده رشد، سیدروفورها و آنتی‌بیوتیک‌ها و غیره را دارند، که این امر به بهبود تنوع زیستی، حاصلخیزی خاک و افزایش تولید محصول کمک می‌کند. علاقه به استفاده از کودهای زیستی و پتانسیل آن‌ها برای کشاورزی پایدار در حال افزایش است. در این راستا، فرمولاسیون کودهای زیستی به منظور ایجاد یک محیط مناسب برای ریزجانداران و تضمین بقای آن‌ها پس از ورود به خاک ضروری است. انواع کودهای زیستی شامل پودری، گرانول‌ها، مایعات، محصور در پلیمر، بستر سیال خشک شده و ژل‌ها می‌باشد که هرکدام مزایا و چالش‌های خاص خود را دارند. این مقاله ضمن بررسی اجزای کودهای زیستی، بر اهمیت توسعه و تولید کودهای زیستی با کیفیت بالا برای افزایش اثربخشی و ایجاد اعتماد در میان کشاورزان تأکید می‌کند. آینده کودهای زیستی نیز با توجه به افزایش آگاهی عمومی نسبت به مزایای آن‌ها و تلاش‌های گسترده برای کاهش تأثیرات منفی کودهای شیمیایی، بسیار امیدوارکننده به نظر می‌رسد. با پیشرفت‌های فنآوری و نوآوری‌های مستمر، کودهای زیستی می‌توانند نقش محوری در کشاورزی پایدار و حفظ محیط زیست ایفا کنند.

کلیدواژه: اثربخشی، حامل، کپسوله کردن، مایه تلقیح، سلامت خاک

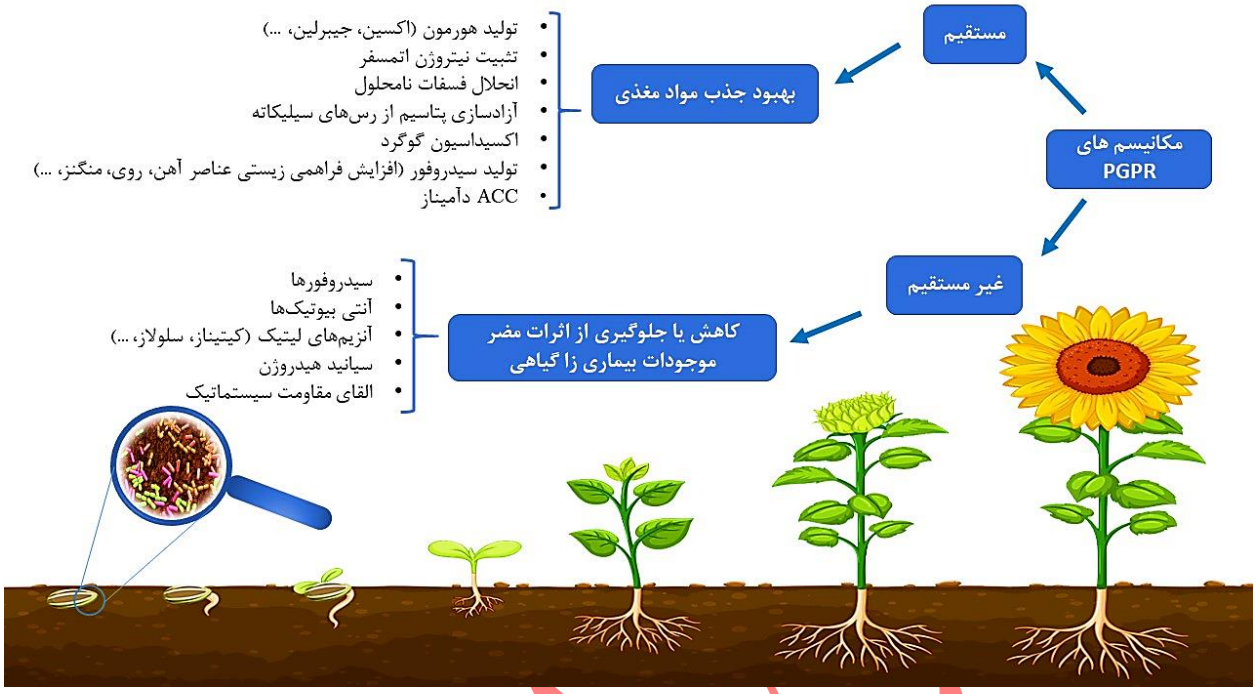
* -آدرس ایمیل نویسند مسئول:**Bahmankhoshru@yahoo.com**

مقدمه

اهمیت کشاورزی سنتی در تامین مواد غذایی برای بشر بسیار زیاد است، اما رشد جمعیت نیازمند روش‌های بهره‌وری پایدار می‌باشد. با کاهش زمین‌های کشاورزی و افزایش تقاضای غذایی، استفاده از فناوری‌های نوآورانه برای تغذیه جمعیت فعلی و جمعیت پیش‌بینی شده در سال ۲۰۵۰ (حدود ۱۰ میلیارد نفر) ضروری است (اللی و وانلو، ۲۰۰۹). از زمان انقلاب سبز، مصرف کودهای شیمیایی برای افزایش حاصلخیزی خاک و رشد محصول افزایش یافته است. با این حال، استفاده بیش از حد از این کودها باعث تخریب خاک، آلودگی و مشکلات زیست‌محیطی می‌شود. این مشکلات شامل تجمع مواد شیمیایی در خاک و آب‌های زیرزمینی، اتروفیکاسیون، اسیدی شدن خاک و افزایش بروز بیماری‌ها است (عجرتون، ۲۰۰۹). تقاضای جهانی برای غذا، استفاده از کودهای شیمیایی را اجتناب‌ناپذیر می‌کند و لذا اثرات نامطلوب طولانی مدت آن‌ها بسیار جدی است. در نتیجه، کشاورزی ارگانیک و استفاده از کودهای زیستی به عنوان جایگزین‌های سازگار با محیط زیست و پایدار در حال گسترش است (کوور و همکاران، ۲۰۲۰).

کود زیستی به محصولی اطلاق می‌شود که حاوی ریزجانداران خاک یا متابولیت‌های آنها است که برای تقویت رشد گیاهان مصرف می شوند (آرمنده و فلاح، ۱۳۹۷؛ خوشرو و ساریخانی، ۱۳۹۷؛ فلاح نصرت آباد، ۱۴۰۰؛ اصغرزاده و همکاران، ۱۴۰۲؛ بهاتاچاریا و جها، ۲۰۱۲؛ خسروی و همکاران، ۲۰۲۴). در تعریف دیگر، کود زیستی ماده‌ای حاوی ریزجانداران زنده است که وقتی روی بذر، سطوح گیاه یا خاک استفاده شود، ریزوسفر یا داخل گیاه را کلونیزه می‌کند و با افزایش فراهمی مواد غذایی اولیه به رشد گیاه میزبان و توسعه آن کمک می‌کند (وسی، ۲۰۰۳). ریزجانداران موجود در کودهای زیستی به عنوان ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR[1]) نیز شناخته می‌شوند و می‌توانند پس از تلقیح، مزایایی برای گیاهان میزبان داشته باشند و رویکردی پایدار برای افزایش تولید محصول ارائه دهند (فلاح و همکاران، ۱۳۹۹؛ امامی و همکارانف ۱۴۰۰؛ خسروی، ۱۴۰۲؛ حامد و همکاران، ۲۰۲۴). میکروب‌های مفید می‌توانند بر اساس نحوه اثرگذاری خود به دو گروه کلی افزایش دهندگان رشد گیاه و حافظان سلامت گیاه تقسیم شوند (خاوازی و ملکوتی. ۱۳۸۱؛ اخگر و همکاران، ۱۴۰۰؛ فلاح نصرت آباد، ۱۴۰۱). افزایش رشد گیاه با تامین مواد غذایی و آب و افزایش سلامت گیاه با از بین بردن یا کاهش اثر بیمارگرها و آلاینده‌های شیمیایی فراهم می‌گردد (فلاح نصرت آباد، ۱۴۰۱؛ نهرا و چادهاری، ۲۰۱۵؛ دل انگیز و همکاران، ۲۰۲۱؛ مرادی و همکاران، ۲۰۲۱؛ خوشرو و همکاران، ۲۰۲۳، میترا و همکاران، ۲۰۲۳؛ خسروی و همکاران، ۲۰۲۴). این میکروب‌ها می‌توانند به طور مستقیم یا غیرمستقیم بر رشد و نمو گیاه تأثیر بگذارند (شکل ۱)، که شامل تسهیل جذب مواد مغذی توسط گیاهان (مانند تثبیت نیتروژن مولکولی اتمسفر، انحلال فسفات‌های نامحلول، آزادسازی پتاسیم از کانی‌های میکا، تامین آهن، روی و غیره)، توسعه سطح ریشه (بواسطه تولید هورمون‌ها)، کاهش اثرات مضر عوامل بیماری‌زا و غیره (بهاتاچاریا و جها ۲۰۱۲؛ خالد و همکاران ۲۰۰۹مک‌کوئیلکن و همکاران ۱۹۹۸؛ وسی ۲۰۰۳؛ بهاتاچاریا و جها ۲۰۱۲؛ خوشرو و همکاران، ۲۰۲۰) می‌باشند. کودهای زیستی می‌توانند از نظر اقتصادی اهمیت زیادی داشته باشند زیرا آن‌ها قادرند جایگزین بخشی از مواد شیمیایی که هزینه‌های بالایی در کشاورزی دارند گردند. لذا توسعه کودهای زیستی پاسخی به افزایش برای کشاورزی سازگار با محیط زیست است.

[1] Plant growth-promoting rhizobacteria



شکل ۱- مکانیسم‌های مستقیم و غیر مستقیم PGPR برای تحریک رشد گیاه

تجاری‌سازی PGPR در سال ۱۸۹۵ در ایالات متحده و انگلستان با تلقیح ریزوبیوم‌ها در حبوبات آغاز شد (بروکول و باتوملی، ۱۹۹۵) و در طول زمان، علاقه به استفاده از سایر PGPR افزایش یافته و اخیراً طیف زیادی از محصولات جدید زیستی توسعه یافته‌اند. در حال حاضر اکثر تلقیح‌های غیر ریزوبیومی PGPR حاوی باکتری‌هایی از جنس *Azospirillum* (باکتری‌های همیار تثبیت‌کننده نیتروژن)، *Pseudomonas* یا *Bacillus* (باکتری‌های حل‌کننده فسفات (PSB[۲]) و عوامل کنترل زیستی[۳]) و سایر PGPR هستند. تنوع PGPR به طور بالقوه در خاک زیاد بوده و دامنه مکانیسم‌های عمل آن‌ها بسیار گسترده است بطوریکه بسیاری از آنها هنوز شناسایی نشده و لذا مورد بهره‌برداری قرار نگرفته‌اند (سماوات و همکاران، ۱۳۹۲). مکانیسم‌های مختلف درگیر در تحریک رشد و توسعه گیاه به نوع گیاه و سویه باکتری بستگی داشته و اثرات مفید آنها نیز ممکن است در شرایط محیطی مختلف، بسیار متفاوت باشد. علاوه بر این، ریزجانداران پس از کاربرد در خاک، با شرایط رقابتی و اغلب سخت مواجه می‌شوند که ممکن است اثرات مفید آنها را به شدت کاهش دهد (اوکان و ایتزیگسون، ۱۹۹۵؛ فلاح و همکاران، ۱۴۰۱؛ خوشرو و همکاران، ۲۰۲۰).

پتانسیل بازار کودهای زیستی، نه تنها در کشورهای توسعه یافته، بلکه در کشورهای در حال توسعه نیز قابل توجه است (مالوسا و همکاران، ۲۰۱۲).

بازار جهانی کودهای زیستی، در حال تجربه رشد قابل توجهی است، به طوری که اندازه این بازار در سال ۲۰۲۳ به حدود ۳/۵ میلیارد دلار رسید و انتظار می‌رود با سرعت رشد ترکیبی سالانه (CAGR[۴]) حدود ۱۱٪، از سال ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۸ به اندازه ۵/۲ میلیارد دلاری برسد (جوشی و قوراهاف، ۲۰۲۲). این رشد ناشی از چندین عامل کلیدی است، از جمله افزایش آگاهی و تقاضا برای روش‌های کشاورزی پایدار، نگرانی‌های زیست‌محیطی در مورد تأثیرات منفی کودهای شیمیایی و سیاست‌های حمایتی دولت‌ها که استفاده از کودهای زیستی را ترویج می‌کنند (کومار و همکاران، ۲۰۲۴). علاوه بر این، روند رو به رشد کشاورزی ارگانیک و افزایش تقاضا برای محصولات غذایی

[۲] Phosphate-solubilizing bacteria

[۳] Biocontrol agents

[۴] Compound annual growth rate

ارگانیک نیز بازار را تقویت می‌کند. از نظر جغرافیایی، آمریکای شمالی به دلیل روش‌های پیشرفته کشاورزی و آگاهی بالای کشاورزان بر بازار تسلط دارد. اروپا به دلیل قوانین سختگیرانه بر کودهای شیمیایی و افزایش کشاورزی ارگانیک رشد قابل توجهی را تجربه می‌کند. منطقه آسیا و اقیانوسیه به دلیل وسعت زیاد زمین‌های کشاورزی، جمعیت بالا و افزایش حمایت‌های دولتی سریع‌ترین رشد را دارد. آمریکای لاتین و خاورمیانه و آفریقا بازارهای در حال ظهور با پذیرش رو به رشد روش‌های پایدار هستند (فریر و همکاران، ۲۰۲۴). روندهای صنعتی نشان می‌دهد که پیشرفت‌های فناوری در تولید و تکنیک‌های کاربرد کودهای زیستی نقش مهمی در رشد بازار ایفا می‌کند. همچنین افزایش همکاری‌ها و مشارکت‌ها بین شرکت‌ها و مؤسسات تحقیقاتی منجر به تنوع محصولات و توسعه کودهای زیستی چند منظوره می‌شود که نیازهای مختلف محصولات را برآورده می‌کند (کومار و همکاران، ۲۰۲۴). برای مثال در ویتنام تخمین زده شده است که اگر به جای کودهای شیمیایی از باکتری های ریزوبیومی استفاده شود، هزینه کودهای نیتروژنی را می‌توان از ۳۰ میلیون دلار به حدود ۱ میلیون دلار در سال کاهش داد (هریج، ۲۰۰۸).

در ایران نیز، پتانسیل بازار کودهای زیستی به دلیل تنوع اقلیمی، نیاز به بهبود حاصلخیزی خاک‌ها و افزایش توجه به کشاورزی ارگانیک، بالا است. بر اساس داده‌های جدید، مصرف کودهای زیستی در ایران در چند سال اخیر رشد قابل توجهی داشته است. همچنین، برنامه‌های دولتی و حمایت‌های مالی از تولید کنندگان کودهای زیستی و تحقیقات مرتبط با آن، نشان‌دهنده تمایل کشور به افزایش سهم کودهای زیستی در کشاورزی ملی است. برخی از شرکت‌های ایرانی برتر تولیدکننده کودهای زیستی و برخی از تولیدات آنها به شرح زیر است:۱) شرکت ایران ایگنیشن (واقع در مازندران) تولیدکننده کود میکروبی فسفاته گرانوله با ظرفیت سالانه ۲۰۰۰۰ تن و مایه تلقیح حل‌کننده فسفر با ظرفیت سالانه ۲۰۰۰ تن می‌باشد. ۲) شرکت فن‌آوری زیستی طبیعت‌گرا (واقع در کرج)، محصولاتی نظیر بیوفارم به عنوان محرک رشد با ظرفیت سالانه ۳۰۰۰ تن، بیوسوی ریزوبیومی با ظرفیت سالانه ۷۵ تن، بیوفسفات تریپل، به‌رشد و مایکو گرو تولید می‌کند. ۳) شرکت فرآوری شیمیایی زنجان (واقع در زنجان) مایه تلقیح *تیوباسیلوس* اکسید کننده گوگرد با ظرفیت سالانه ۲۰۰۰ تن و نیتراژین به عنوان محرک رشد تولید می‌نماید. ۴) شرکت فن‌آوری زیستی مهرآسیا (واقع در سمنان) محصولات ازتوباکتر و نیتروکسین به عنوان محرک رشد هر کدام با ظرفیت سالانه ۳۰۰۰ تن و بیوسولفور اکسید کننده گوگرد را تولید می‌کند. ۵) شرکت زیست فناور سبز (واقع در قم) تولید کننده بارور ۲ به عنوان محرک رشد می‌باشد. ۶) شرکت صنایع زیست فناوری کارا (واقع در ساوه) محصولی به نام کارا به عنوان محرک رشد تولید می‌کند. (اسدی و همکاران، ۱۳۹۱). با توجه به اینکه تولید کودهای زیستی و نیاز کودهای زیستی کشور با هم همسو می‌شوند تا بتوانند بهبود شرایط خاک و تأمین نیازهای کودی گیاهان را در کشور تضمین کنند، لذا در (جدول۱)، نیازهای کودهای زیستی کشور ارائه شده است.

جدول ۱- نیاز کودهای زیستی کشور بر حسب تن (مشیری و همکاران، ۱۴۰۲)

ردیف	نوع کود	۱۳۹۹-۱۴۰۰			۱۴۰۰-۱۴۰۱			۱۴۰۱-۱۴۰۲		
		زراعت	باغبانی	کل	زراعت	باغبانی	کل	زراعت	باغبانی	کل
۱	ریزوبیومی	۶۳۱	۰	۶۳۱	۶۴۳	۰	۶۴۳	۴۸۰	۰	۴۸۰
۲	فسفاته گرانوله	۴۲۴۱۵	۱۷۴۶۸	۵۹۸۸۳	۴۱۵۸۱	۱۷۷۶۲	۵۹۳۴۳	۴۰۹۹۲	۱۷۸۱۹	۵۸۸۱۱
۳	اکسیدکننده گوگرد	۵۳۰	۰	۵۳۰	۵۵۰	۰	۵۵۰	۵۰۵	۰	۵۰۵
۴	محرک رشد	۴۸۰	۰	۴۸۰	۴۸۰	۰	۴۸۰	۴۸۰	۰	۴۸۰
۵	ویژه گندم (فلاویت)	۰	۸۶۹۵	۸۶۹۵	۰	۸۸۴۰	۸۸۴۰	۰	۸۸۷۰	۸۸۷۰
۶	میکوریز	۲۱۳	۰	۲۱۳	۲۳۳	۰	۲۳۳	۲۰۹	۰	۲۰۹
۸	جمع	۴۴۲۶۹	۲۶۱۶۳	۷۰۴۳۲	۴۳۴۸۷	۲۶۶۰۲	۷۰۰۸۹	۴۲۶۶۶	۲۶۶۸۹	۶۹۳۵۵

کاربرد و تلقیح محصولات کشاورزی با ریزجانداران مفید و کارآمد می‌تواند منجر به افزایش بهره‌وری محصول و درآمد کشاورزان شود. با این حال سطح پذیرش کودهای زیستی به دلیل کیفیت پایین و نامناسب، محدود است. برای به حداکثر رساندن شانس موفقیت، یک کود زیستی باید چند ویژگی را داشته باشد: ۱- باید یک محیط محافظتی برای ریزجانداران فراهم کند ۲- رشد بهینه آنها را فراهم کند و از کاهش جمعیت آنها (در طول ذخیره سازی) جلوگیری کند ۳- حمل و نقل و استفاده آن آسان باشد ۴- پس از ورود به خاک سازگار با محیط زیست باشد و ۵- از مواد مقرون به صرفه و در دسترس ساخته شده باشد (هانگریا و همکاران، ۲۰۰۵؛ کومار و همکاران، ۲۰۲۴). یکی از چالش‌های عمده برای صنعت کودهای زیستی، عدم وجود فرمولی مناسب که برای استفاده در مزرعه مناسب باشد. یک ریزجاندار ممکن است در شرایط آزمایشگاهی امیدوارکننده به نظر برسد، در حالی که فرموله کردن و تبدیل آن به یک محصول تجاری که بتواند در طیف وسیعی در مزرعه نیز نتایجی مشابه نتایج آزمایشگاهی ارایه نماید گامی بس دشوار است (استفنز و راسک، ۲۰۰۰؛ ماهاپاترا و همکاران، ۲۰۲۲). موفقیت کودهای زیستی به محصول هدف، هزینه تمام شده، بازارپسندی، محدودیت‌های محیطی و سهولت استفاده بستگی دارد (آرورا و همکاران، ۲۰۱۱). برخی از تولیدکنندگان اقدام به تهیه مایه تلقیحی کردند که حاوی دو یا چند نوع ریزجاندار (مانند ریزوبیوم‌ها و PSB یا PSB و میکوریز) بوده تا مزایای حاصل را برای گیاهان میزبان به حداکثر برسانند. با اینکه مطالعات متعددی اثرات مثبت این نوع مایه تلقیح‌ها را توصیف و اثربخشی آنها را اثبات کرده‌اند (عبدالا و همکاران، ۲۰۰۱؛ مالوسا و همکاران، ۲۰۱۲؛ سونجا و همکاران، ۲۰۰۷؛ خوشرو همکاران، ۲۰۲۰) ولی برخی از مشکلات فنی مانند ناسازگار بودن، هزینه تولید و تجاری‌سازی هنوز وجود دارد (هریج، ۲۰۰۸؛ استفنز و راسک، ۲۰۰۰). مهمترین عامل در طول تولید مایه‌تلقیح تضمین کیفیت محصولات است که برای افزایش شانس موفقیت بسیار مهم است (یانگ، ۲۰۰۷). عدم تکرارپذیری و ثبات در نتایج به دست آمده در شرایط مزرعه به دلیل کیفیت پایین، بر تجاری سازی کودهای زیستی تأثیر زیادی می‌گذارد (وسی، ۲۰۰۳).

هدف از این مقاله مروری، ارائه یک تحلیل جامع و سیستماتیک از پیشرفت‌ها و چالش‌های موجود در زمینه کودهای زیستی و مایه‌تلقیح‌های میکروبی است. این مقاله به بررسی اهمیت اجزای کودهای زیستی در افزایش کارایی و پایداری مایه‌تلقیح‌های میکروبی، نقش انتخاب و بهینه‌سازی سویه‌های میکروبی و تاثیر حامل‌های مختلف بر عملکرد این محصولات می‌پردازد. علاوه بر این، مقاله به مقایسه روش‌های مختلف تهیه انواع کودهای زیستی مانند کودهای زیستی جامد، مایع و روش‌های نوین محصورسازی سلول‌ها در ماتریکس‌های پلیمری می‌پردازد. هدف اصلی این مقاله، فراهم آوردن اطلاعاتی کاربردی برای پژوهشگران و تولیدکنندگان است تا از طریق بهبود روند تولید کودهای زیستی، کارایی و پایداری مایه تلقیح‌های میکروبی را افزایش دهند و به بهبود کلی سلامت خاک و بهره‌وری محصولات کشاورزی کمک کنند.

تولید مایه‌تلقیح‌های میکروبی

به منظور افزایش زمان نگهداری، سهولت در کاربرد و بهبود کارایی، کودهای زیستی باید دارای فرمولاسیون‌های مناسبی باشند. اجزای کودهای زیستی نقش مهمی در انتقال میکروب‌های مفید از محل تولید به مزرعه ایفا می‌کنند. آنها امکان انتقال مواد زیستی فعال یا نهفته (اسپور) به محل هدف اعم از خاک یا گیاه را فراهم می‌کنند (شارما و همکاران، ۲۰۲۳). تهیه یک مایه‌تلقیح موثر، یک فرآیند چند مرحله‌ای است که در طی آن یک یا چند سویه ریزجاندار در یک حامل مشخص قرار می‌گیرند. این روند شامل اضافه کردن عوامل چسبنده و افزودنی‌های دیگر است که در طول دوره ذخیره‌سازی و حمل و نقل باعث حفاظت از سلول‌ها می‌شود (بارتی و همکاران، ۲۰۱۷). با توجه به اینکه مایه‌تلقیح‌ها اغلب در شرایطی دور

از شرایط ایده‌آل، نظیر دمای بالا و در معرض نور نگهداری می‌شوند، ضروری است که طول عمر طولانی داشته باشند. این بدان معناست که ریزجانداران در شرایط دشوار باید درون حامل قادر به زنده‌مانی با جمعیت بالا باشند، زنده مانی ریزجانداران به هر دلیلی از جمله مقاومت خود آن یا محافظت مناسب ماده حامل ضروری می باشد (شریعتی و همکاران، ۱۳۹۲؛ سیف و همکاران، ۲۰۲۱). یک کود زیستی باکیفیت همچنین باید شرایط مطلوبی را برای افزایش طول عمر ریزجانداران در خاک و به حداکثر رساندن فعالیت آن‌ها به منظور ایجاد بیشترین فایده پس از تلقیح به گیاهان میزبان فراهم کند (مک‌کویلکن و همکاران، ۱۹۹۸).

برای اطمینان از استفاده گسترده و مقرون‌به‌صرفه مایه تلقیح توسط کشاورزان، آنها باید به گونه‌ای تهیه شوند که به راحتی قابل استفاده و اجرا باشند. این موضوع به ویژه برای تضمین انتقال موثر ریزجانداران به گیاهان هدف در شرایط مناسب اهمیت دارد. با وجود اینکه فرمولاسیون و کیفیت کودهای زیستی یک مسئله حیاتی به شمار می‌آید ولی مطالعات نشان می‌دهند که در طول سال‌های اخیر، پژوهش‌های اندکی در این زمینه صورت گرفته است. بررسی‌های انجام شده توسط خاویر و همکاران (۲۰۰۴) بیانگر این است که از دهه ۱۹۸۰ تحقیقات بیشتر بر ژنتیک و فیزیولوژی باکتری‌های ریزوبیوم‌ها متمرکز بوده‌اند و کمتر از ۱٪ از مقالات به جنبه‌های اجزا و فرمولاسیون کودهای زیستی پرداخته‌اند. با یک جستجوی ساده در سایتی مانند Pub Med می‌توان فهمید که در بازه زمانی ۲۰۰۹-۲۰۲۴، حدود ۲۱۳۴ مقاله مرتبط با جنبه‌های مختلف کودهای زیستی منتشر شده است که از این بین تنها ۱۷۰ مورد (حدود ۸ درصد) از آنها به جنبه فرمولاسیون کودهای زیستی پرداخته‌اند (پابمد، ۲۰۲۴). اما نیاز مبرم به فرمولاسیون‌های بهبودیافته برای توسعه و تجاری‌سازی محصولات زیستی جدیدی که کارآمدتر، پایدارتر، با کیفیت بالاتر وجود دارد که نیازهای کشاورزان را بهتر برآورده کنند (استفنز و راسک، ۲۰۰۰). هر فرمولاسیونی دارای ویژگی‌های منحصر به فرد، مزایا و معایب مربوط به خود می‌باشد. لازم است در طول فرآیند تولید یک مایه تلقیح، مراحل مختلف با دقت مورد توجه قرار گیرند تا احتمال موفقیت یا شکست یک محصول تعیین شود. دقت در هر مرحله از فرآیند تولید می‌تواند بر روی نتیجه نهایی تأثیر گذار باشد و باید به دقت ارزیابی و اجرا شود.

موفقیت یک کود زیستی به عوامل مختلفی بستگی دارد، که از جمله آنها می‌توان به محصول هدف، محدودیت‌های محیطی، هزینه، سهولت استفاده، دسترسی به بازار و کارآمد بودن آن اشاره کرد. برای مایه تلقیح‌های باکتریایی اغلب از پیت به عنوان ماده حامل استفاده می‌کنند. با این حال، پیت به طور گسترده‌ای در دسترس نیست و فرآیند استخراج آن تأثیرات نامطلوبی بر جو و اکوسیستم دارد. بنابراین، به منظور کاهش این اثرات منفی، توسعه کودهای زیستی با حامل‌های بهبودیافته جدید به‌عنوان جایگزین‌های پیت نیاز است (سیوارام و همکاران، ۲۰۲۳). در تحقیقات متعدد از مواد مختلفی به عنوان حامل در فرمولاسیون کودهای زیستی استفاده شده است (جدول ۲).

جدول ۲ – برخی از کودهای زیستی مبتنی بر حامل به همراه اثرات سودمند آنها بر روی محصولات مختلف

ردیف	حامل و افزودنی	میکروب	گیاه	اثرات	منبع
۱	باگاس، خاک اره، پودر پوست موز	*باسیلوس سافنسیس* SCAL1	ذرت	پارامترهای فیزیولوژیکی و فعالیت آنزیمی آنتی اکسیدانی	خان (۲۰۲۳)
۲	خاکستر پوسته برنج استریل شده و خاک آبرفتی (۱:۲)	*ازتوباکتر، ریزوبیوم، ترکودرما*	کدو	افزایش توسعه ریشه و عملکرد گیاه	اکتر و همکاران (۲۰۲۳)
۳	باگاس+پرلیت	*باسیلوس لیچنی فورمیس و پانتوایا دیسپرسا*	برنج	افزایش فسفر اندام هوایی به ترتیب ۱۵۳/۴درصد و ۱۰۶/۸ درصد و عملکرد دانه به ترتیب ۸۴/۵ درصد و ۷۴/۳۹ درصد.	راوات و همکاران (۲۰۲۲)
۴	پودر پوسته نارگیل	*سودوموناس اوریزاهابیتانز* LSE-3، *برادی ریزوبیوم* LSBR-3	سویا	افزایش عملکرد دانه و میزان فسفر به ترتیب ۱۰/۸۵ درصد و ۱۱/۳ درصد.	کوماوات و همکاران (۲۰۲۲)
۵	پیت+ کائولن+سنگ فسفات	*ریزوبیوم و ازتوباکتر*	سویا	افزایش تعداد غلاف‌های پر شده و وزن دانه سویا	اکسانی و همکاران (۲۰۲۱)
۶	پیت+ پرلیت	*ازتوباکتر کروکوکوم و ازتوباکتر وینلندی*	ذرت	افزایش طول ساقه و ریشه، تعداد برگ و ریشه، میزان کلروفیل ذرت	جین و همکاران (۲۰۲۱)
۷	بیوچار+پیت	*اسینتوباکتر پیتی* gp-1	سویا	افزایش فسفر اندام هوایی و ریشه به ترتیب ۸۰/۳۵ درصد و ۲۶۱/۳ درصد و وزن خشک کل ۴۳۱/۵ درصد.	هی و وان (۲۰۲۱).
۸	تالک + کربوکسی متیل سلولز (CMC)	*باسیلوس، سودوموناس پوتیدا، سودوموناس جسینی* MP1	لوبیا چشم بلبلی، بامیه، خیار، کاهو، نخود	بهبود جوانه زنی بذر و رشد گیاه، افزایش بقای میکروبی، افزایش فراهمی زیستی مواد مغذی خاک	بشیر و همکاران (۲۰۱۹)؛ جوشی و همکاران (۲۰۱۹)
۹	ورمی‌کمپوست، پرلیت و خاک فسفات	*سودوموناس فلوئورسنس*	ذرت	افزایش سبزینگی، ارتفاع، فسفر اندام هوایی، وزن خشک اندام هوایی و ریشه	شریعتی و همکاران (۱۳۹۸)
۱۰	پیت + شکر	*آزوسپیریلوم برازیلنس*	گندم	افزایش رشد گیاه	پیسینین و همکاران (۲۰۱۳)
۱۱	کربوکسی متیل سلولز/نشاسته ذرت + اکسید منیزیم	*آزوسپیریلوم آمازوننس، گلوکون استوباکتر دیازوتروفیکاس*	نیشکر	افزایش ماندگاری باکتری‌ها، افزایش کلونیزاسیون	داسیلوا و همکاران (۲۰۱۲)
۱۲	خاک اره + کربوکسی متیل سلولز	*انسیفر ملیلوتی، برادیریزوبیوم*	لوبیا مخملی[۵]	افزایش گره زایی، افزایش ماندگاری میکروب	عرون و همکاران (۲۰۱۲)
۱۳	تالک + صمغ زانتان	پنی باسیلوس *آلوی*[۶]	پنبه	بهبود رشد گیاه، کاهش بیماری ناشی از Thielaviopsis Basicola	شوینا و همکاران (۲۰۱۱)
۱۴	امولسیون روغن کانولا	*سینوریزوبیوم ملیلوتی*	یونجه	افزایش بقای میکروب، افزایش گره زایی	جان و همکاران (۲۰۱۱)
۱۵	تالک	*سودوموناس فلورسنس*	برنج	بهبود جذب مواد مغذی گیاه و تحریک رشد آن، کاهش بیماری در گیاه	ساراواناکومار و همکاران (۲۰۰۷)
۱۶	تالک + کیتین	*سودوموناس فلورسنس*	ماش	تحریک رشد گیاه	ساراواناکومار و همکاران (۲۰۰۷)
۱۷	اگزالیک اسید صنعتی	*برادی ریزوبیوم جاپانیکوم*	سویا	بهبود رشد و گره‌زایی گیاه، افزایش ماندگاری میکروب	رباح و همکاران (۲۰۰۷)
۱۸	خاک رسی + کروبوکسی متیل سلولز / صمغ عربی	*برادی ریزوبیوم جاپانیکوم، باسیلوس مگاتریوم*	سویا	افزایش بقای میکروب، بهبود رشد گیاه،	آلباردا و همکاران (۲۰۰۸)
۱۹	آلژینات + اسید هیومیک	*سودوموناس پوتیدا، باسیلوس سوبتیلیس*	کاهو[۷]	افزایش رشد و عملکرد گیاه	رخا و همکاران (۲۰۰۷)
۲۰	خاک رسی + گوگرد عنصری	*تیوباسیلوس، ریزوبیوم*	بادام زمینی	افزایش رشد و گره‌زایی گیاه	آناندام و همکاران (۲۰۰۷)

[۵] Mucuna pruriens

[۶] Paenibacillus alvei

[۷] Lectuca sativa

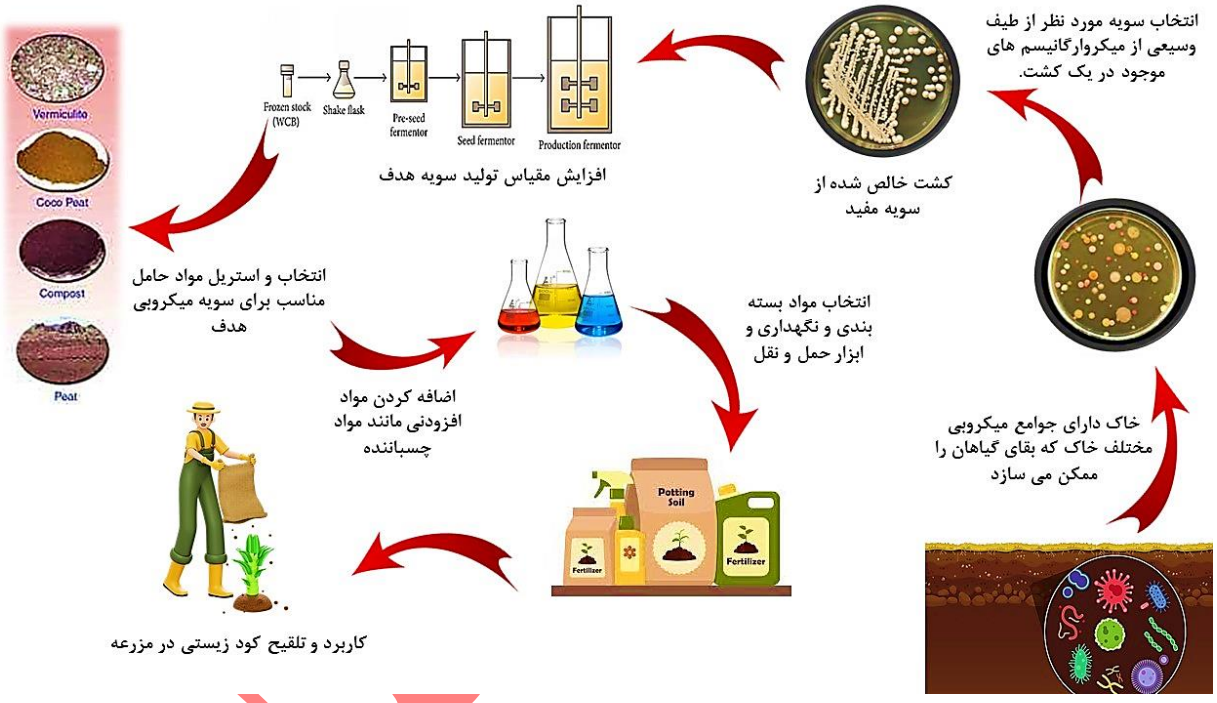
۲۱	پیت + ورمیکولیت	کنسرسیوم ۶ باکتری محرک رشد گیاه	خربزه	بهبود رشد گیاه، افزایش تحمل گیاه در برابر بیماری	کوکالیس-بورل و همکاران (۲۰۰۳)
۲۲	پیت + کیتین + میسلیوم A. niger	*باسیلوس، کلبسیلا*	بادام زمینی، لوبیای سودانی[۸]	افزایش درصد جوانه زنی بذر، بهبود سرعت تکثیر، افزایش تحمل در برابر بیماری	مانجولا و پودیله (۲۰۰۱)
۲۳	پرلیت + صمغ عربی	*ریزوبیوم لگومینوزارم، باسیلوس مگاتریوم*	سویا	افزایش ماندگاری میکروب در دمای پایین	دازا و همکاران (۲۰۰۰)
۲۴	خاک فسفات + گوگرد + باگاس	*سودوموناس* C16-2O و *انتروباکتر* S16-3	ذرت (سینگل‌گراس ۷۰۴)	بهبود وزن تر و خشک ریشه و بخش هوایی، شاخص کلروفیل، افزایش مقدار و جذب فسفر ریشه و بخش هوایی	ساریخانی و همکاران (۱۳۹۶)
۲۵	باگاس+ پرلیت	*اسینتوباکتر کلسیترانس* و *اگروماپسیس ایتالیکاس*	ذرت (S.C. 704)	افزایش جذب روی در بخش هوایی و ریشه ذرت	خوشرو و همکاران (۱۴۰۱)

کارآیی مایه تلقیح‌ها تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار می‌گیرد که شامل فاز رشد میکروب‌ها، دمای ذخیره‌سازی و سرعت خشک شدن یا از دست دادن آب هستند (شکل ۲). فاز رشد میکروب مایه‌تلقیح می‌تواند شامل فرم فعال یا غیرفعال مانند اسپورها و یا کیست‌های گونه‌های مختلف باشد. این عامل به طور قابل توجهی بر بقا و کارآیی مایه تلقیح تأثیر می‌گذارد. یک عامل مهم در اجزای مایه‌تلقیح‌ها، درصد رطوبت حامل است برای مثال پیت غیراستریل برای ریزوبیوم‌ها تحت شرایط رطوبت بالا اثرات منفی بیشتری نسبت به پیت استریل دارد. به طوریکه محدوده رطوبتی برای پیت غیراستریل ۴۰٪ تا ۵۰٪ بوده ولی برای پیت استریل، رطوبت ۶۰٪ مناسب است. در مورد بسته‌بندی مایه تلقیح ها، معمولاً مواد پلی‌اتیلنی با چگالی بالا به کار می‌روند زیرا تبادل گاز و ورود اکسیژن را تسهیل کرده و از تلفات دی اکسیدکربن جلوگیری می‌کنند. این مواد همچنین تحت تأثیر اشعه‌های گاما قرار نمی‌گیرند (لو و همکاران، ۲۰۰۳). علیرغم اینکه حامل‌های استریل مزایای بیشتری نسبت به حامل‌های غیراستریل دارند، ولی فرآیند تولید آن‌ها هزینه‌برتر است. استریلیزاسیون برای کنترل آلودگی‌های میکروبی ضروری است و می‌تواند از طریق تابش گاما یا روش‌های اتوکلاو کردن انجام شود.

شکل ۲- عوامل تاثیرگذار بر کیفیت کودهای زیستی

[۸] Pigeon pea

تولید کودهای زیستی شامل یک فرآیند دقیق و گام به گام است که طی آن یک یا چند ریزجاندار مفید در یک محیط حامل خاص، همراه با افزودنی‌هایی مانند عوامل چسبنده (که به ذخیره‌سازی و حمل و نقل کمک می‌کنند) قرار می گیرد. شکل ۳ شماتیکی از کل فرآیند تهیه کودهای زیستی را ارائه می‌دهد. از آنجایی که مایه تلقیح‌ها پس از تولید، نیاز به نگهداری طولانی مدت دارند لذا ریزجانداران باید یا ذاتاً مقاوم باشند یا به اندازه کافی محافظت شوند تا بقای آن‌ها در تعداد زیاد حتی در شرایط نامساعد تضمین شود. یک کود زیستی با کیفیت به میکروب‌ها اجازه می‌دهد که در خاک پایدار باقی بمانند و به این ترتیب فعالیت آن‌ها را افزایش داده و با ایجاد شرایط بهینه، حداکثر مزایا را فراهم می‌کنند (حسن و بانو، ۲۰۱۶).



شکل ۳- نمایی از فرآیند کلی تولید کودهای زیستی

اجزای کود زیستی

سویه میکروبی

کودهای زیستی حاوی انواع مختلفی از موجودات میکروسکوپی[۹] هستند که کاربرد تجاری دارند، این ریزجانداران شامل باکتری‌ها، قارچ‌ها، جلبک‌ها و اکتینومیست‌ها می‌باشند که عملکردهای مختلف و متفاوتی مانند تثبیت نیتروژن یا محلول کردن عناصر غذایی مختلف خاک و غیره از خود نشان می‌دهند (دینش کومار و همکاران، ۲۰۱۸). سویه‌های میکروبی مورد استفاده در این کودها به عنوان ریزجانداران محرک رشد گیاه (PGPMs[۱۰]) شناخته می‌شوند.

انتخاب PGPMs برای کودهای زیستی بستگی به نوع محصول، شرایط محیطی و خصوصیات زمین (مزرعه) هدف دارد. سویه‌های باکتریایی نقش مهمی در اکوسیستم‌های خاکی ایفا می‌کنند. خاک به طور طبیعی شامل مجموعه‌های متنوعی از جوامع باکتریایی است که برخی از آن‌ها می‌توانند برای رشد گیاهان، موثر و مفید باشند (علیخانی و همکاران، ۱۴۰۱). ریشه‌های فعال گیاه، موادی را از خود ترشح می‌کنند که باکتری‌ها را جذب کرده و باعث ایجاد ارتباطی میان آن‌ها و امکان استفاده از توانایی‌های آنها در بهبود دسترسی به عناصر غذایی در منطقه ریشه می‌شود (احمد و خان، ۲۰۱۲). باکتری‌ها همچنین موادی مانند اسید ایندول-۳- استیک (IAA[۱۱]) را

[۹] Bio inoculants

[۱۰] Plant growth-promoting microorganisms

[۱۱] Indole-3-acetic acid

ترشح می‌کنند که به رشد ریشه و گیاه کمک می‌کند. این مواد همچنین مقاومت گیاهان در برابر تنش‌های غیرزیستی و زیستی گیاهی را بهبود می‌بخشند (المریک و نیوتن، ۲۰۰۷؛ یائو و همکاران، ۲۰۱۰؛ کی و همکاران، ۲۰۱۶؛ خوشرو و همکاران، ۲۰۲۰).

انتخاب ریزجاندارانی که در کودهای زیستی به کار گرفته می‌شوند، از اهمیت بالایی برخوردار است. ریزجاندارانی که در رقابت با جمعیت‌های بومی موجود در خاک، کارآمد و کارا باشند، بسیار مهم هستند (خسروی و همکاران، ۲۰۲۴). سویه‌های مورد استفاده برای تلقیح، اعم از باکتری، قارچ یا سایر میکروب‌ها، باید ویژگی‌هایی نظیر ثبات ژنتیکی، قابلیت ایجاد اثرات مثبت روی محصولات هدف، توانایی در رقابت با جمعیت‌های محلی، قابلیت انتقال به میزبان و ماندگاری مناسب در خاک (حتی در نبود گیاه میزبان) را داشته باشند. ترجیحاً به جای استفاده از یک سویه از ترکیب سویه‌ها استفاده می‌شود، زیرا هر دو سویه باید با هم سازگار باشند تا یک تلقیح کارآمد تشکیل دهند. مطالعات اخیر استفاده از انواع مختلف سویه‌ها در فرمولاسیون کودهای زیستی را مورد تاکید قرار داده‌اند. همچنین در فرآیند تولید، سویه‌ها باید قادر به رشد در محیط‌های مصنوعی باشند (به جز AMF که بدون وجود گیاه میزبان قادر به رشد نیست)، در طول فرآیندهای انکوباسیون یا ذخیره‌سازی و همچنین روی بذرها و در خاک توانایی سازگاری و رشد را داشته باشند. باید با مواد شیمیایی کشاورزی که ممکن است روی بذرها استفاده میشوند نیز سازگار باشند (هریج، ۲۰۰۸). بسیار مهم است که میکروب‌های زنده بتوانند در برابر فرآیندهای متفاوت در طول تولید مقاومت کنند و خصوصیات کاربردی خود را حفظ نمایند (زاویر و همکاران، ۲۰۰۴).

موفقیت کودهای زیستی به دو عامل کلیدی نوع سویه میکروبی مورد استفاده و اجزای مایه تلقیح بستگی دارد. اجزای مورد استفاده در کودهای زیستی نقش مهمی در تعیین موفقیت بالقوه آنها ایفا می‌کند. توسعه یک کود زیستی موفق شامل انتخاب سویه مناسب و کارآمد، انتخاب حامل مناسب برای تلقیح‌های مبتنی بر حامل و اجرای یک فرمولاسیون موثر است (آرورا و همکاران، ۲۰۱۱).

کنسرسیوم میکروبی

کنسرسیوم میکروبی مجموعه‌ای از ریزجانداران است که به صورت هماهنگ با یکدیگر زندگی و فعالیت می‌کنند. برای رسیدن به یک کنسرسیوم میکروبی، ابتدا باید هدف مشخص شود که می‌تواند شامل تجزیه مواد آلی، تولید مواد زیستی، بهبود خاک، درمان بیماری‌ها و یا سایر اهداف باشد. سپس ریزجاندارانی که بر اساس توانایی‌های خاصشان انتخاب شده‌اند، از محیط‌های مختلف مانند خاک، آب، گیاهان و یا بدن موجودات زنده جمع‌آوری می‌شوند (هرناندز-آلوارز و همکاران، ۲۰۲۳). این نمونه‌ها بر روی محیط‌های کشت مناسب کشت داده شده و کلنی‌های مختلف رشد می‌کنند. کلنی‌ها بر اساس ویژگی‌های ظاهری و یا عملکردی جداسازی و با استفاده از تکنیک‌های مولکولی مانند PCR و توالی‌یابی ژنتیکی شناسایی می‌شوند. سپس ریزجانداران انتخاب شده در شرایط آزمایشگاهی با یکدیگر مخلوط می‌شوند تا هماهنگی و توانایی همزیستی آنها بررسی شود (سینیواساگان و بابالوآ، ۲۰۲۱). شرایط محیطی مانند pH، دما، رطوبت و مواد غذایی بهینه‌سازی می‌شوند تا کنسرسیوم میکروبی به بهترین شکل عمل کند. عملکرد کنسرسیوم در شرایط مختلف آزمایش می‌شود تا کارایی و پایداری آن مورد ارزیابی قرار گیرد. انتخاب باکتری‌ها برای تهیه کنسرسیوم باید بر اساس تنوع ژنتیکی، توانایی‌های مکمل، همزیستی، تحمل شرایط محیطی، تولید مواد مفید و استفاده از منابع مشترک صورت گیرد (اودوه و همکاران، ۲۰۲۰). باکتری‌هایی که توانایی‌های مکمل دارند می‌توانند به صورت هماهنگ با یکدیگر عمل کنند و باکتری‌هایی که توانایی همزیستی دارند باید انتخاب شوند. تحمل به شرایط محیطی و توانایی تولید مواد مفید نیز از دیگر معیارهای انتخاب باکتری‌ها برای کنسرسیوم می‌باشد (خان، ۲۰۲۲).

حامل در فرمولاسیون مایه‌تلقیح

خاک‌های خشک و نیمه‌خشک بیشتر مستعد شوری، تغییرات دما، کمبود مواد مغذی و کمبود آب هستند، که این موضوعات چالش‌های زیادی برای استفاده از مایه تلقیح‌ها ایجاد می‌کند (اگامبردیوا، ۲۰۰۷). مایه تلقیح‌های میکروبی با مشکلاتی همچون بقا و کلونیزاسیون در ریزوسفر مواجه هستند که در نهایت بر سلامت گیاه و بازده رشد تأثیر می‌گذارد (رخا و همکاران، ۲۰۰۷). کیفیت و عملکرد خاک‌های خشک به دلیل کمبود جمعیت و تنوع میکروبی، دچار مشکلاتی می‌شوند که منجر به کاهش توانایی در تامین مواد مغذی و مقابله با بیماری‌ها می‌شود (ون دایک و پروسر، ۲۰۰۰). با این وجود به لطف روش‌های تولید بهبودیافته و استفاده از حامل‌های مناسب، مایه تلقیح‌های زیستی می‌توانند در شرایط تنش‌زا نیز موثر باشند. این بدان معناست که حتی در محیط‌های نامساعد، ریزجانداران مفید می‌توانند زنده بمانند و به گیاهان کمک کنند تا با تنش‌ها بهتر مقابله کنند و رشد و توسعه یابند. این امر به افزایش بهره‌وری کشاورزی و پایداری سیستم‌های کشاورزی در مواجهه با چالش‌های محیطی کمک می‌کند (اگامبردیوا و همکاران، ۲۰۱۱).

حامل‌ها به عنوان واسطه‌ای برای تحویل ریزجانداران زنده از کارخانه به مزرعه عمل می‌کنند (باشان و همکاران، ۲۰۱۴). حامل، بخش عمده‌ای (از نظر حجمی و وزنی) از یک مایه تلقیح را شامل می‌شود و نقش مهمی در تضمین انتقال جمعیت مناسب سلول‌های زنده در شرایط مزرعه ایفا می کند. حامل‌ها از دو طریق فیزیکی و تغذیه‌ای که در مکانیسم اولی با ایجاد مکان‌های محافظ در داخل منافذ و در دومی با ایجاد شرایط تغذیه‌ای روی بستر کشت یک محیط حفاظتی موقت برای مایه تلقیح‌های میکروبی در خاک فراهم می‌کنند (آرورا، ۲۰۱۱).

انتخاب یک حامل خوب تأثیر زیادی بر شکل فیزیکی مایه تلقیح زیستی دارد و هیچ حاملی وجود ندارد که برای همه ریزجانداران مناسب باشد. مواد حامل از منابع مختلفی تهیه می‌شوند که می‌تواند آلی، معدنی یا سنتزی باشد. بر اساس منبع آنها، این مواد به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌شوند. معمولاً در عمل از مخلوط حامل‌ها استفاده می‌شود که ترکیبی از دو یا چند نوع حامل می‌باشد. این مخلوط‌ها می‌توانند شامل ترکیب خاک، پیت، کمپوست، پوسته‌ها و بسیاری موارد دیگر باشند (هریج، ۲۰۰۸). در ادامه برخی از انواع مختلف حامل‌های رایج در تهیه کودهای زیستی ارائه شده است.

انواع حامل

حامل‌های آلی

حامل‌های آلی یا ارگانیک عمدتاً به دلیل منشاء طبیعی، قابلیت تجزیه‌پذیری و توانایی حمایت از حیات میکروبی، نقش مهمی در کودهای زیستی ایفا می‌کنند. این حامل‌ها محیطی مناسب برای رشد و نگهداری ریزجانداران مفید فراهم می‌کنند که باعث افزایش حاصلخیزی خاک و سلامت گیاهان می‌شوند. برخی از حامل‌های آلی معمولاً شامل پیت، کمپوست، زغال چوب، کود حیوانی، خاک اره، باگاس، پیت نارگیل، پوسته برنج و غیره هستند. هر یک از این مواد دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی هستند که به مناسب بودن آنها به عنوان حامل کمک می‌کند، مانند ظرفیت نگهداری آب بالا، هوادهی خوب، غنی بودن از مواد مغذی و توانایی حفظ سطح pH پایدار (ککمک، ۲۰۱۹). با این حال، اثربخشی آنها می‌تواند بسته به عواملی مانند محتوای مواد مغذی، اندازه ذرات و نیاز به استریلیزاسیون برای حذف ریزجانداران بومی متفاوت باشد. انتخاب یک حامل آلی مناسب شامل توازن ملاحظاتی از قبیل دسترسی، هزینه، سازگاری با سویه‌های میکروبی و تأثیرات زیست‌محیطی است (مالوسا و همکاران، ۲۰۱۲).

پیت[۱۲] (زغال سنگ نارس)

پیت به طور گسترده به عنوان حامل برای مایه تلقیح‌های زیستی در سراسر جهان استفاده می‌شود. این ماده به دلیل توانایی حفاظت از باکتری‌ها و شرایط مغذی و محافظتی که دارد به‌خصوص برای تولید مایه‌تلقیح‌های لگوم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (بنگاش و همکاران، ۲۰۲۱). پیت از تجزیه ناقص گیاهان در طی زمان طولانی تشکیل می‌شود و دارای ویژگی‌های مطلوبی نظیر مواد آلی بالا، غیرسمی بودن، ظرفیت بالای جذب و نگهداری آب، قابلیت استریل شدن آسان و اقتصادی بودن است. سطح ویژه زیاد پیت رشد زیاد باکتری‌ها را تسهیل می‌کند. باکتری‌ها در داخل آن از نظر متابولیکی فعال هستند و حتی در دوره نگهداری به رشد خود ادامه می‌دهند. هرچند فراوری پیت هزینه‌بر است، اما به دلیل دسترسی بالا و مزایای متعدد آن، همچنان به عنوان انتخاب اصلی برای مواد حامل در کشاورزی شناخته می‌شود (سینگ و همکاران، ۲۰۱۸).

روش‌های معمول برای آماده‌سازی مایه تلقیح‌ها، شامل تلقیح پیت خنثی و غیر استریل به عنوان حامل مورد استفاده است. در این روش، به هر گرم پیت $۱۰^{۷}$ واحد سلولی تشکیل‌دهنده (CFU) باکتری تلقیح می‌شود، که این تعداد برای دستیابی به کیفیت بالای مایه تلقیح کافی است (دینی و همکاران، ۲۰۲۲). با تلقیح حداقل $۱۰^{۴}$ CFU برای هر گرم از حامل، می‌توان مایه‌ای با تعداد زیادی از سلول‌های قابل تکثیر تولید کرد. در مایه تلقیح نهایی، رشد حداکثری باکتری‌ها تا چگالی $۱۰^{۸}$ الی $۱۰^{۹}$ CFU در هر گرم می‌تواند برای رقابت جدی با سایر آلودگی‌های حامل بسیار کمک‌کننده باشد (گراهام ویس و همکاران، ۱۹۸۷). برای آماده‌سازی حامل پیت، محصول برداشت‌شده از مزرعه، آسیاب و الک می‌شود تا مواد زبر و درشت آن حذف شود. سپس، محصول به آرامی خشک می‌شود تا به میزان ۵ درصد رطوبت برسد. مرحله خشک‌شدن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا فرآیند خشک کردن نامناسب ممکن است منجر به تولید سموم شود. ترجیحاً از هوا برای خشک کردن استفاده می‌شود تا از تولید سموم و آلودگی‌ها جلوگیری شود. در صورت استفاده از خشک‌کن، دما هرگز نباید از ۷۰ الی ۸۰ درجه سلسیوس بیشتر شود. پس از خشک‌شدن، پیت به اندازه کافی خرد و شکننده می‌شود تا از طریق غربال با اندازه ۲۵۰ میکرومتر عبور کند. pH با اضافه کردن آهک به عنوان اصلاح‌کننده حامل تنظیم می‌شود (زیرا پیت معمولاً اسیدی است). در مرحله بعد حامل استریل شده و سوسپانسیون حاوی میکروب با نسبت مناسب به آن اضافه می‌شود. برای کودهای زیستی باکتریایی با حامل پیت، رطوبت در محدوده ۴۰٪ تا ۵۵٪ قابل قبول است (تیتابوتر و همکاران، ۲۰۰۷؛ جوشی و همکاران، ۲۰۲۱). در نهایت، برای افزایش جمعیت باکتری‌ها، حامل تلقیح شده به مدت معینی انکوبه می‌شود. پیت همچنین می‌تواند به عنوان ماده حامل برای مایه تلقیح‌های حاوی قارچ‌های میکوریز (AMF[۱۳]) مورد استفاده قرار گیرد (سیف و همکاران، ۲۰۲۱).

علی‌رغم مزایای زیاد استفاده از پیت به عنوان حامل در فرمولاسیون کودهای زیستی، استفاده از آن دارای برخی معایب می‌باشد. برای مثال کیفیت پیت متغیر و وابسته به منبع آن است که روی اثربخشی نهایی مایه‌تلقیح‌ها تأثیر می‌گذارد و حتی در مراحل مختلف یک کارخانه تولیدی (توسط یک تولید کننده) نیز تفاوت وجود دارد (باشان و همکاران، ۲۰۱۴). در کشور هند پیت، تنها ۵۴ درصد کربن عالی دارد، این در حالی است که این رقم برای استرالیا ۶۵ درصد و برای آمریکا به ۸۶ درصد می رسد (ریلی و پیج، ۲۰۱۶). کودهای زیستی حاوی پیت اغلب دارای سطح آلودگی بالایی هستند که عمر مفید میکروب را کاهش می‌دهد (فاجس، ۱۹۹۲؛ سیوارام و همکاران، ۲۰۲۳). پیت تحمل کمی به تغییرات دمایی دارد و هنگام استریل‌سازی با حرارت، ممکن است ترکیبات سمی آزاد کند. همچنین، پیت می‌تواند باعث کاهش رشد گیاه و ایجاد مشکلات در

[۱۲] Peat

[۱۳] Arbuscular Mycorrhizal fungi

فرآیند آغشته‌سازی با بذر شود و دسترسی به آن نیز محدود به چند کشور است (زاید، ۲۰۱۶). با وجود معایب و مشکلات آن، محققان همچنان از پیت استفاده می‌کنند و با افزودن موادی مانند کیتین، پیروفیلیت[۱۴]، میسلیوم قارچ مانند *Aspergillus niger* و کمپوست ساخته شده از قارچ مانند *Agaricus bisporus*، اثربخشی کود زیستی را بهبود بخشیده و باعث افزایش رشد و بازدهی گیاهان شده‌اند (باشان و همکاران، ۲۰۱۴).

کمپوست

کمپوست به عنوان حامل در فرمولاسیون کودهای زیستی، یک محیط آلی غنی از مواد مغذی است که از حیات میکروبی حمایت کرده و سلامت خاک را بهبود می‌بخشد. کمپوست به واسطه دارا بودن عناصر مغذی ماکرو و میکرو، جمعیت میکروبی متنوعی را پرورش می‌دهد که بهبود چرخه مواد مغذی و ساختار خاک را تسهیل می‌کند. محتوای بالای مواد آلی آن به نگهداری آب و نفوذ ریشه کمک می‌کند، در حالی که ظرفیت بافر pH آن محیط پایداری را برای میکروب‌های مفید ایجاد می‌کند. با این حال، اثربخشی کمپوست به عنوان حامل به کنترل کیفیت آن بستگی دارد، از جمله اطمینان از رسیدگی، اندازه ذرات مناسب و محتوای رطوبت بهینه آن (هو و همکاران، ۲۰۱۶). مدیریت صحیح و در صورت لزوم استریلیزاسیون آن برای حفظ خواص مفید کود زیستی و اطمینان از قابل اعتماد بودن آن ضروری است (مالوسا و همکاران، ۲۰۱۲).

کود حیوانی[۱۵]

کود حیوانی به عنوان حامل در کودهای زیستی، به دلیل محتوای غنی از مواد آلی و مغذی مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم، محیطی مناسب برای رشد و فعالیت میکروب‌های مفید فراهم می‌کند. این کود با افزایش مواد آلی خاک، بهبود ساختار و ظرفیت نگهداری آب و هوا، به ارتقاء حاصلخیزی و سلامت خاک کمک می‌کند. اما برای استفاده موثر، کنترل کیفیت و جلوگیری از آلودگی‌های محیطی و بیماری‌زا ضروری است. فرآیندهای کمپوست‌سازی و استریلیزاسیون می‌توانند در بهینه‌سازی استفاده از کود حیوانی مؤثر باشند (گوندی و همکاران، ۲۰۱۸).

خاک‌اره[۱۶] (پودر چوب)

خاک‌اره به عنوان محصول جانبی صنعت چوب، می‌تواند نقش مهمی در تولید کودهای زیستی ایفا کند. این ماده به دلیل هزینه پایین، قابلیت تجزیه‌پذیری و توانایی بهبود ساختار خاک، انتخابی ایده‌آل برای کاربردهای کشاورزی است. این ماده زمانی که به عنوان حامل برای کشت‌های میکروبی مفید مانند باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن و قارچ‌های میکوریزا به کار می‌رود، محیطی غنی از کربن فراهم می‌آورد که باعث تقویت فعالیت میکروبی و در نتیجه، رشد بهتر گیاه می‌شود (کائور و کائور، ۲۰۲۳). خاک‌اره می‌تواند با سایر مواد آلی ترکیب و کمپوست غنی از مواد مغذی تولید کند. اما مهم است که نسبت بالای کربن به نیتروژن در خاک‌اره به دقت مدیریت شود تا از کمبود نیتروژن جلوگیری شود. با ایجاد تعادل مناسب بین خاک‌اره و مواد غنی از نیتروژن و اطمینان از عدم وجود باقی مانده‌های شیمیایی، می‌توان به بهبود سلامت خاک و افزایش بهره‌وری کشاورزی دست یافت (استلا و سیواساکتیولان، ۲۰۰۹).

[۱۴] Pyrophyllite
[۱۵] Manure
[۱۶] Sawdust

باگاس[۱۷]

باگاس به عنوان بقایای فیبری باقی‌مانده پس از آبگیری نیشکر می‌باشد که دارای پتانسیل قابل‌توجهی به‌عنوان یک حامل در فرمولاسیون کودهای زیستی است. استفاده از آن نه تنها به مدیریت ضایعات کمک می‌کند، بلکه مزایای زراعی متعددی را نیز به همراه دارد. باگاس در مقادیر زیاد، به‌ویژه در مناطقی که نیشکر به‌طور گسترده کشت می‌شود، در دسترس است، بنابراین گزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه برای تهیه کودهای زیستی است. این ماده آلی زیست‌تخریب‌پذیر و سازگار با محیط‌زیست است، که به بازیافت زباله‌های کشاورزی و کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک می‌کند. باگاس با ساختار فیبری و متخلخل خود سطح وسیعی را برای جذب و حفظ تلقیح‌های میکروبی فراهم می‌کند، که باعث افزایش کارایی کودهای زیستی می‌شود. ظرفیت بالای نگهداری رطوبت باگاس نیز برای حفظ زنده‌ماندن کشت‌های میکروبی بسیار مهم است. همچنین، باگاس حاوی مواد مغذی باقی‌مانده از گیاه نیشکر است که می‌تواند رشد ریزجانداران مورد استفاده در کودهای زیستی را تقویت کند. استفاده از باگاس می‌تواند ساختار خاک را با افزایش محتوای آلی و تهویه خاک بهبود بخشد که منجر به رشد بهتر ریشه و نفوذ آب می‌شود. سرعت تجزیه آهسته باگاس آزادسازی طولانی مدت مواد مغذی و فعالیت میکروبی پایدار در خاک را تضمین می‌کند و به حفظ سلامت خاک در درازمدت کمک می‌کند. استفاده از باگاس به‌عنوان حامل برای کودهای زیستی، به یک محصول جانبی کم‌ارزش، ارج داده و یک جریان درآمد اضافی برای صنعت شکر فراهم می‌کند، که با اصول اقتصاد دایره‌ای و کشاورزی پایدار همخوانی دارد (چاندرا و همکاران، ۲۰۱۴؛ کائور و کائور، ۲۰۲۳).

پیت نارگیل (کوکوپیت۱۸)

پیت نارگیل که به نام کوکوپیت یا مغز نارگیل نیز شناخته می‌شود، ماده اسفنجی است که از پوسته نارگیل به دست می‌آید. به دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد خود به عنوان یک حامل بسیار موثر برای کودهای زیستی ظاهر شده است. پیت نارگیل یک محصول جانبی صنعت نارگیل است که آن را به راحتی در مقادیر زیاد در دسترس قرار می‌دهد و به عنوان یک منبع تجدیدپذیر، تامین پایدار برای اهداف کشاورزی را تضمین می‌کند. این ماده دارای ظرفیت نگهداری آب بالایی است که به حفظ سطوح رطوبت ضروری برای بقا و فعالیت ریزجانداران مفید در کودهای زیستی کمک می‌کند و همچنین هوادهی خوبی را فراهم می‌کند، که از غرقابی جلوگیری کرده و اطمینان می دهد که ریشه‌ها اکسیژن کافی دریافت می‌کنند (کرومکاو و همکاران، ۲۰۲۳). پیت نارگیل معمولاً دارای pH خنثی است که آن را برای طیف وسیعی از گیاهان مناسب می‌کند و همچنین حاوی مواد مغذی ضروری مانند پتاسیم، آهن، منگنز، روی و مس است که می‌تواند رشد و فعالیت تلقیح‌های میکروبی را افزایش دهد. به عنوان یک ماده آلی زیست‌تخریب‌پذیر و سازگار با محیط زیست، استفاده از پیت نارگیل در کودهای زیستی از شیوه‌های کشاورزی پایدار حمایت می‌کند و اتکا به حامل‌های مصنوعی را کاهش می‌دهد. پیت نارگیل به طور طبیعی استریل و عاری از عوامل بیماری‌زا است که خطر ورود بیماری‌ها به خاک را کاهش می‌دهد و استفاده از آن می‌تواند پاتوژن‌های مضر موجود در خاک را سرکوب کرده و باعث رشد سالم‌تر گیاهان شود. ساختار پیت نارگیل از کلونیزاسیون و تکثیر ریزجانداران مفید مانند باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن، باکتری‌های حل‌کننده فسفات و قارچ‌های میکوریز حمایت می‌کند، که این فعالیت میکروبی افزایش یافته می‌تواند در دسترس بودن و جذب مواد مغذی توسط گیاهان را بهبود بخشد. پیت نارگیل سبک وزن است و حمل، جابجایی و استفاده از آن را در محیط‌های کشاورزی آسان می‌کند، که این سهولت استفاده می‌تواند هزینه‌های نیروی کار را کاهش داده و کارایی کاربرد کود زیستی را افزایش دهد. پیت نارگیل ماندگاری طولانی دارد که برای ذخیره و توزیع

---

[۱۷] Bagasse

[۱۸] Cocopeat

کودهای زیستی مفید است و می‌تواند خواص مفید خود را در دوره‌های طولانی حفظ کرده و از اثربخشی کودهای زیستی اطمینان حاصل کند (رای و نایاک، ۲۰۲۱).

سبوس گیاهان (گندم و برنج)

سبوس گندم غنی از مواد مغذی اساسی مانند پروتئین‌ها، ویتامین‌ها (به ویژه ویتامین‌های گروه B) و مواد معدنی مانند منیزیم، فسفر و آهن است که می‌تواند پروفایل تغذیه‌ای کودهای زیستی را تقویت کند (استیونسون و همکاران، ۲۰۱۲). به طور مشابه، سبوس برنج دارای غلظت بالای مواد مغذی مانند پروتئین‌ها، چربی‌ها، ویتامین‌ها (به ویژه ویتامین E و ویتامین‌های گروهB) و مواد معدنی مانند فسفر و پتاسیم است که منبع غنی از مواد مغذی برای خاک و گیاهان فراهم می‌کند (ناگندرا و همکاران، ۲۰۱۱). سبوس هر دو گیاه دارای میزان بالای ماده آلی هستند که می‌تواند ساختار خاک را بهبود بخشد، میزان نگهداری آب را افزایش دهد و فعالیت میکروبی در خاک را تقویت کند (کیم و همکارانف ۲۰۰۹). هر دو سبوس تجزیه‌پذیر هستند، به این معنی که به طور طبیعی در خاک تجزیه می‌شوند و به ماده آلی و سلامتی کلی خاک کمک می‌کنند بدون اینکه باقی‌مانده‌های مضر به جا بگذارند. سبوس این گیاهان اغلب محصول جانبی فرآیند آسیاب هستند و نسبتاً ارزان هستند، که آنها را به گزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه برای تولید کودهای زیستی تبدیل می‌کند.

سبوس گندم به دلیل حفظ آب و محتوای بالای مواد آلی به عنوان یک حامل بسیار مناسب برای رشد انبوه میکوریز خارجی[۱۹] و قارچ‌های حل‌کننده فسفات (PSF[۲۰]) استفاده شده است. اگر چه برخی از گونه‌های *باسیلوس* و *سودوموناس* که قادر به تجزیه سلولز هستند، براحتی روی این حامل تکثیر پیدا می‌کنند ولی برخی از قارچ‌های حل‌کننده فسفات به دلیل عدم توانایی تولید آنزیم سلولاز نمی‌توانند در این بستر تکثیر شوند (کوماری و رانی، ۲۰۲۴). عبدالفتاح و همکاران (۲۰۱۳) از شش ماده حامل مختلف برای تهیه مایه تلقیح جامد از *Azotobacter chroococcum* (A101) شامل پیت ماس، پیت ماس + ورمیکولیت، سبوس گندم، پوسته برنج، خاک رس و آلژینات سدیم استفاده کردند. آنها بقای *A. chroococcum* را روی حامل‌های مذکور به صورت ماهانه ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد که در بین حامل‌های مختلف، سبوس گندم دارای بالاترین تراکم باکتری بود. کپسوله کردن با آلژینات نیز بالاترین پایداری و بقای *A. chroococcum* را تا ۶ ماه فراهم کرد.

بیوچار[۲۱] (زغال چوب)

بیوچار نوعی زغال است که از تجزیه مواد آلی تحت دمای بالا و با مقدار محدودی اکسیژن، طی فرآیندی به نام پیرولیز تولید می‌شود. بیوچار به دلیل کاربردهای خاص خود در اصلاح خاک از زغال متمایز می‌شود. بیوچار علاوه بر بهبود حاصلخیزی خاک، برای خدمات اکوسیستمی مانند ذخیره‌سازی کربن که به کاهش تغییرات اقلیمی کمک می‌کند، نیز اهمیت دارد (ساهو و برهماپرکاش، ۲۰۱۶). با این حال، گزارش‌هایی وجود دارد که نشان می‌دهد بیوچار می‌تواند جامعه زیستی خاک را تغییر دهد (لهمان، ۲۰۰۷). اگر بخواهیم بیوچار را در مقیاس بزرگ برای ذخیره‌سازی کربن تهیه کنیم، می‌توانیم از آن به عنوان حامل ریزجانداران محرک رشد گیاه (PGPR) برای انتقال آنها به زمین‌های کشاورزی استفاده کنیم. به همین دلیل، بیوچار به عنوان یک ماده حامل مناسب، جایگزین حامل‌های کمیاب، گران‌قیمت، غیرقابل تجدید و تشدیدکننده گازهای گلخانه‌ای است (هیل و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین، بیوچار دارای سطح ویژه داخلی زیاد با فضای منافذ ۲ تا ۲۰ میکرومتری است که محیطی محافظت شده برای رشد میکروب‌ها فراهم می‌کند. فرآیند تولید، آن را به یک محیط پیش‌استریلیزه تبدیل می‌کند که می‌تواند

[۱۹] Ectomycorhizae

[۲۰] Phosphate-solubilizing fungi

[۲۱] Biochar

مواد مغذی و عوامل رشد را جذب کند (بنگاش و همکاران، ۲۰۲۱).

تحقیقات گلاسر (۲۰۰۷) نشان داده است که استفاده از بیوچار در تهیه مایه‌تلقیح‌های باکتریایی منجر به افزایش عملکرد و تولید گیاهان ماش می‌شود. در یک مطالعه اخیر در مورد کودهای زیستی مبتنی بر حامل بیوچار از دو منبع مجزا (پوست نارگیل و چوب آکاسیا) برای باکتری *آزوسپیریلوم لیپوفروم* استفاده شد و عملکرد آن با لینگیت مقایسه گردید. میانگین جمعیت باکتری حامل از منبع پوست نارگیل در ۱۸۰ روز پس از تلقیح 10^{7} CFU g^{-1} بود. شاخص سرعت جوانه زنی ماش نیز در بیوچار مبتنی بر نارگیل[۲۲] بالا بود. ماندگاری *آزوسپیریلوم لیپوفروم* نیز در مدت ۶ ماه ذخیره‌سازی در مقایسه با بیوچار چوب آکاسیا و لینگیت افزایش یافته بود.

آلژینات[۲۳]

آلژینات یک پلیمر طبیعی موجود است که به عنوان ماده‌ای برای کودهای زیستی محصور در پلیمر انتخاب می‌شود و در حال حاضر مورد کاربرد و استفاده قرار می‌گیرد. این ماده به مقدار کافی از جلبک‌های دریایی و نیز چندین باکتری به دست می‌آید (یابور و همکاران، ۲۰۰۷). فرمولاسیون‌های مبتنی بر آلژینات، ماندگاری تلقیح‌های میکروبی را افزایش می‌دهند و در در دماهای بالا (تا دمای ۴۰ درجه سلسیوس) نیز از میزان بالای جمعیت میکروبی حمایت می‌کنند. چندین مایه تلقیح مبتنی بر آلژینات برای موجودات مختلف و مطالعات آن‌ها برای اهداف کشاورزی انجام شده است. نتایج نشان داده‌اند که کودهای زیستی محصور در پلیمر، نسبت به سایر فرمولاسیون‌ها برتری دارند، مانند کودهای پلیمری AMF، اکتومیکوریزا و بسیاری از باکتری‌های حل‌کننده فسفات (سیف و همکاران، ۲۰۲۱؛ بهل و همکاران، ۲۰۲۴). PGPMها (ریزجانداران محرک رشد گیاه) می‌توانند برای مدت زمان بسیار طولانی درون ماده پلیمری آلژینات زنده بمانند. دانه‌های آلژینات به دلیل فعالیت کمتر آب نسبت به سایر مواد پلیمری برتر هستند، زیرا میکروب‌های هدف در فعالیت متابولیکی پایین باقی می‌مانند و سپس زمانی که رطوبت موجود است، که معمولاً همزمان با جوانه‌زنی بذر است، به خاک آزاد می‌شوند (کاماس و همکاران، ۲۰۲۳). تلقیح میدانی کودهای زیستی مبتنی بر آلژینات نشان می‌دهد که در مقایسه با دیگر کودهای مبتنی بر حامل، میزان ماندگاری قابل قبول و بالایی از ریزجانداران دارد (فاسوسی و همکاران، ۲۰۲۱). در یک مطالعه برای کلونیزه کردن ریشه از طریق میکروب‌های مفید هدف که با تکنیک کپسوله کردن با ماده پلیمری تهیه شده بودند نسبت به تلقیح مستقیم همان میکروب برای محصول گندم نتایج بسیار کارآمدی بدست آمده است (جان و همکاران، ۲۰۱۱).

کودهای زیستی مبتنی بر آلژینات ویژگی‌های منحصربه‌فردی دارند که آن‌ها را به یک انتخاب برتر برای تلقیح گیاهان تبدیل کرده است. این محصولات به راحتی قابل استفاده هستند و به دلیل یکنواختی و قابل تجزیه بودن، از لحاظ محیطی بسیار مطلوب هستند. ماهیت غیرسمی، توانایی نگهداری جمعیت بالای باکتری‌ها و آزادسازی کُند و مداوم آن‌ها و عدم ایجاد آلودگی زیست‌محیطی از دیگر ویژگی‌های مهم آن‌ها به شمار می‌رود (اسکوبیتز و همکاران، ۲۰۱۱). علاوه بر این، ویژگی‌های زیستی آلژینات وابسته به ویژگی‌های شیمیایی آن بوده و باعث می‌شود که اندازه منافذ و سرعت آزادسازی آن به راحتی قابل کنترل باشد (سای و همکاران، ۲۰۲۴). با دانه‌هایی که بدون تأثیر منفی بر جمعیت باکتری‌ها، در اندازه میکرو قابل تهیه هستند، می‌توان برنامه‌ریزی دقیقی برای استفاده از آن‌ها داشت. تلقیح میکروب‌های هدف از طریق دانه‌ها در گیاهان باعث افزایش بهره‌وری و عملکرد گیاهان می‌شود (لای و همکاران، ۲۰۲۴).

فرمولاسیون‌های مبتنی بر آلژینات دارای مزایای چشمگیری مانند سهولت در تولید و استفاده، ایجاد محیط مطلوب برای رشد و بقای باکتری‌ها در شرایط مختلف

[۲۲] Coconut-based biochar

[۲۳] Alginate

محیطی، حفظ طولانی‌مدت جمعیت میکروبی و یکنواختی در کیفیت دانه‌ها هستند. این فرمولاسیون‌ها به عنوان یک پوشش موقت در برابر شرایط استرسی محیطی عمل کرده و میکروب‌ها را به طور مداوم و به کندی آزاد می‌کنند تا ریشه‌های گیاهان را کلونیزه کنند. با این حال برخی محدودیت‌هایی نیز مانند هزینه بالاتر مواد پلیمری نسبت به حامل‌های جامد دیگر، کاهش ماندگاری میکروب هدف به دلیل کمبود اکسیژن یا تأثیرات منفی ترکیبات میکروبی تولید شده نیز ممکن است وجود داشته باشد که می‌تواند موجب کاهش عملکرد این کودهای زیستی شود (اپاداری و همکاران، ۲۰۱۷).

حامل‌های معدنی

پرلیت

پرلیت یک ماده معدنی آتشفشانی است که پس از حرارت دادن و انبساط، به یک ماده سبک و متخلخل تبدیل می‌شود. این ویژگی‌ها باعث شده است که پرلیت به عنوان حامل در فرمولاسیون کودهای زیستی مورد استفاده قرار گیرد (کائور و کائور، ۲۰۲۳). پرلیت به علت ویژگی‌های منحصر به فرد خود، کاربردهای متنوعی در کشاورزی و باغبانی دارد. این ماده دارای مزایای متعددی است. اول) وزن سبک: پرلیت پس از انبساط، بسیار سبک شده که حمل و نقل و استفاده آن را آسان می‌کند. این خاصیت به ویژه در زمان حمل و نقل به زمین‌های کشاورزی با دسترسی دشوار بسیار کاربردی است. دوم) تهویه مناسب: ساختار متخلخل پرلیت باعث تهویه مناسب خاک و ریشه گیاهان می‌شود. این امر برای رشد بهینه ریشه‌ها و جلوگیری از تراکم خاک بسیار مهم است. سوم) قابلیت نگهداری آب: پرلیت می‌تواند مقدار زیادی آب را جذب و نگهداری کند که به حفظ رطوبت خاک کمک می‌کند. این ویژگی به ویژه در مناطق خشک و کم‌آب بسیار اهمیت دارد (پراسانا و همکاران، ۲۰۲۰).

از دیگر مزایای پرلیت، خنثی بودن آن است؛ پرلیت به دلیل فرآیند حرارتی که طی می‌کند، عاری از آلودگی‌های میکروبی و بیماری‌زا است. این خاصیت باعث می‌شود که پرلیت به عنوان یک محیط غیر سمی و مناسب برای رشد گیاهان استفاده شود. همچنین، پایداری شیمیایی پرلیت بسیار بالا است و با مواد مغذی و کودها واکنش نمی‌دهد. این ویژگی اطمینان می‌دهد که مواد مغذی به صورت مؤثر به گیاهان منتقل می‌شوند. قابلیت ترکیب با مواد دیگر نیز از مزایای مهم پرلیت است که به راحتی با سایر مواد مغذی و زیستی ترکیب می‌شود. در نهایت، کاهش تراکم خاک از دیگر مزایای استفاده از پرلیت است که جریان هوا و آب را در خاک بهبود می‌بخشد. این امر به جلوگیری از پوسیدگی ریشه‌ها کمک می‌کند و رشد سالم گیاهان را تضمین می‌کند (پراسانا و همکاران، ۲۰۲۰؛ مفتاح کدمیری و همکاران، ۲۰۲۱؛ کائور و کائور، ۲۰۲۳).

با وجود مزایای متعدد، پرلیت دارای معایبی نیز هست. هزینه تولید، فرآیند حرارت دادن و انبساط پرلیت هزینه‌بر است. این هزینه‌ها ممکن است باعث افزایش قیمت نهایی محصول شود، که برای کشاورزان و تولیدکنندگان می‌تواند یک عامل محدودکننده باشد. همچنین، احتمال خرد شدن پرلیت به دلیل ساختار شکننده آن ممکن است در طی حمل و نقل یا استفاده خرد شود. این مشکل می تواند به کاهش کارایی پرلیت و نیاز به تعویض مکرر منجر شود. یکی دیگر از معایب پرلیت، عدم تامین مواد مغذی است؛ پرلیت خود به تنهایی مواد مغذی برای گیاهان فراهم نمی‌کند و باید به همراه کودهای دیگر استفاده شود. بنابراین، برای دستیابی به بهترین نتایج، باید از ترکیب پرلیت با کودهای مناسب استفاده کرد. استخراج پرلیت از معادن نیز ممکن است تأثیرات زیست‌محیطی داشته باشد. فعالیت‌های معدنی می‌تواند به تخریب زمین‌های طبیعی و از دست رفتن زیستگاه‌های حیوانی منجر شود. در نهایت، استفاده از پرلیت نیاز به مدیریت دقیق دارد تا از تجمع بیش از حد آب یا تهویه نامناسب جلوگیری شود. این مدیریت دقیق نیازمند دانش و تجربه است که ممکن است در دسترس همه کشاورزان نباشد (گوپی و همکاران، ۲۰۲۰).

لیگنیت

لیگنیت که معمولاً به عنوان "زغال‌سنگ قهوه‌ای[۲۴]" شناخته می‌شود، نوعی زغال‌سنگ است که در بخش کشاورزی به ویژه در تولید کودهای زیستی اهمیت زیادی دارد. این سنگ رسوبی-آلی که مرحله‌ای میانی بین پیت و زغال‌سنگ قیری[۲۵] است، غنی از مواد هومیک بوده و به همین دلیل منبعی ارزشمند برای بهبود سلامت و باروری خاک به شمار می‌آید (استلا و سیواپاکتیولان، ۲۰۰۹). یکی از دلایل اصلی که لیگنیت در کودهای زیستی کاربرد دارد، ساختار متخلخل و ظرفیت تبادل کاتیونی بالای آن است. این ویژگی منحصر به فرد به لیگنیت اجازه می‌دهد تا به عنوان یک حامل مؤثر مواد مغذی عمل کند. لیگنیت می‌تواند مواد مغذی ضروری مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم را جذب و نگهداری کرده و به تدریج آن‌ها را در طول زمان آزاد کند. این مکانیزم آزادسازی تدریجی اطمینان می‌دهد که گیاهان به طور مداوم مواد مغذی مورد نیاز خود را دریافت کنند که برای رشد و توسعه آن‌ها بسیار حیاتی است. برخلاف کودهای شیمیایی که می‌توانند منجر به آبشویی مواد مغذی و آلودگی محیط‌زیست شوند، کودهای مبتنی بر لیگنیت جایگزینی پایدارتر و دوستدار محیط‌زیست ارائه می‌دهند (کولکارنی و همکاران، ۲۰۱۸). علاوه بر تحویل مواد مغذی و حمایت میکروبی، لیگنیت به عنوان یک اصلاح‌کننده عالی خاک عمل می‌کند. اضافه کردن لیگنیت به خاک می‌تواند به طور قابل توجهی ساختار خاک را بهبود بخشد و آن را نرم‌تر و راحت‌تر برای کار کردن کند. بهبود ساختار خاک تهویه و نفوذ ریشه را افزایش می‌دهد که برای رشد قوی گیاهان ضروری است. لیگنیت همچنین ظرفیت نگهداری آب در خاک را افزایش می‌دهد و از خشک شدن گیاهان در دوره‌های خشک جلوگیری می‌کند. این ویژگی به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که کمبود آب یک چالش رایج است، بسیار مفید است (تریپاتی و همکاران، ۲۰۲۳). لیگنیت همچنین به تشکیل هوموس که یک جزء آلی پایدار خاک است، کمک می‌کند. هوموس برای حفظ سلامت خاک بسیار مهم است زیرا ساختار خاک را بهبود می‌بخشد، دسترسی به مواد مغذی را افزایش می‌دهد و ظرفیت نگهداری آب را افزایش می‌دهد. حضور هوموس در خاک توسعه بهتر ریشه را ترویج می‌دهد که به نوبه خود منجر به گیاهان سالم‌تر و مقاوم‌تر می‌شود (تریپاتی و همکاران، ۲۰۲۳). از دیگر مزایای قابل توجه استفاده از لیگنیت در کودهای زیستی، هزینه پایین و دسترسی گسترده آن است. رسوبات لیگنیت در مناطق مختلف جهان یافت می‌شوند و آن را به منابعی قابل دسترس برای بسیاری از کشاورزان تبدیل می‌کنند. مقرون به صرفه بودن آن نسبت به کودهای شیمیایی، به ویژه برای کشاورزان کوچک‌مقیاس و با منابع محدود، گزینه‌ی جذابی ارائه می‌دهد. استفاده از لیگنیت همچنین می‌تواند وابستگی به کودهای شیمیایی را کاهش دهد که اغلب با اثرات منفی زیست‌محیطی مانند تخریب خاک، آلودگی آب و انتشار گازهای گلخانه‌ای همراه است (چاکرابرورتی و اختر، ۲۰۲۱).

تنوع لیگنیت فراتر از استفاده مستقیم آن به عنوان اصلاح‌کننده خاک است. لیگنیت می‌تواند در اشکال و کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد، از جمله تولید بیوچار، افزودنی‌های کمپوست و فرمولاسیون کودهای گرانوله. در تولید بیوچار، لیگنیت کربنیزه می‌شود تا شکلی پایدار از کربن ایجاد کند که می‌تواند به خاک اضافه شود تا خواص آن را بهبود بخشد. به عنوان افزودنی کمپوست، لیگنیت فرآیند کمپوست‌سازی را با تسریع تجزیه مواد آلی و غنی‌سازی کمپوست حاصل با مواد هومیک بهبود می‌بخشد. کودهای گرانوله لیگنیت گزینه‌ای راحت و آسان برای استفاده برای کشاورزان ارائه می‌دهند و توزیع یکنواخت و تامین مستمر مواد مغذی را تضمین می‌کنند (تانک و همکارام، ۲۰۱۷؛ مایکوس و همکاران، ۲۰۱۹).

[۲۴] Brown coal

[۲۵] Bituminous coal

تالک[۲۶]

تالک یک ماده معدنی سیلیکاتی است که حاوی منیزیم هیدراته است. این ماده که به شکل پودر بچه (نرم‌ترین ماده ساخته شده) مورد استفاده قرار می‌گیرد به عنوان یک محیط ذخیره‌سازی مناسب می‌باشد. تالک به طور معمول به عنوان حامل برای قارچ *Trichoderma viride* (یک عامل کنترل بیولوژیکی) استفاده می‌شود (نوینزکاک و فلیپون، ۲۰۲۰؛ سیف و همکاران، ۲۰۲۱). در یک مطالعه، کنسرسیوم PGPR (به صورت جداگانه یا در ترکیب با فرمولاسیون‌های مبتنی بر تالک) برای مدیریت بیماری بلایت[۲۷] برنج و بهبود عملکرد دانه به کار رفت. نتایج نشان داد که تلقیح PGPR شامل *Burkholderia cepacia* و *Bacillus atrophaeus* در فرمولاسیون مبتنی بر تالک، رشد *Fusarium oxysporum gladioli* را در گلایل مهار کردند. بطوریکه عملکرد گلایل در گلخانه به دلیل عدم وجود پوسیدگی ناشی از بیماری[۲۸] و کمترین مقدار پژمردگی عروقی تا ۱۵۰٪ افزایش یافت (شانموگام و همکاران، ۲۰۱۱).

ورمی‌کولیت[۲۹]

ورمیکولیت یک ماده مؤثر در کودهای زیستی و مایه تلقیح‌ها است و به عنوان جایگزینی برای پیت در تولید کودهای زیستی باکتریای استفاده می‌شود. این ماده یک سیلیکات آلومینیوم هیدراته است که شامل آلیاژ منیزیم می‌باشد و در دماهای بالای ۷۰۰–۱۰۰۰ درجه سلسیوس بصورت ورقه ورقه در می‌آید. ورمیکولیت می‌تواند بدون نیاز به تخمیر که هزینه‌بر و نیاز به تجهیزات اختصاصی دارد، برای تلقیح باکتری‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد که این امر آن را برای بسیاری از فرمولاسیون‌ها مطلوب می‌سازد (گراهام ویس و همکاران، ۱۹۸۷).

ورمیکولیت به عنوان یک حامل برای مایه تلقیح باکتری‌ها مزایای متعددی دارد. این ماده غیر آلی است و می‌تواند به وسیله فرآیندهای استریل‌سازی معمولی (اتوکلاو کردن)، بدون تولید ترکیبات سمی یا ایجاد تغییرات ساختاری، استریل شود. فرآیند منبسط شدن[۳۰] ورمیکولیت، سطح آلودگی را کاهش می‌دهد و با ساختار چندلایه خود، هوادهی مناسب و محل افزایش تعداد میکروب‌ها را فراهم می‌کند. ورمیکولیت همچنین مقاوم به فشار است، به عنوان یک ماده محرک رشد گیاه عمل می‌کند و با اندازه ذرات ۴۵–۸۰ میلی‌متر، ظرفیت نگهداری آب بالایی دارد و به کود اجازه می‌دهد به درستی روی سطح بذر قرار گیرد. علاوه بر این، این ماده اقتصادی و به راحتی در دسترس است (هیل و همکاران، ۲۰۱۵؛ پراسانا و همکاران، ۲۰۲۰).

حامل‌های مایع

حامل‌های مبتنی بر آب[۳۱]

حامل‌های مبتنی بر آب از جمله رایج‌ترین نوع حامل‌ها در کودهای زیستی مایع هستند که به دلیل سادگی و کارایی‌شان مورد استفاده قرار می‌گیرند. آب مقطر به دلیل خلوص بالا و عدم وجود آلودگی‌های شیمیایی که ممکن است به ریزجانداران آسیب برساند یا با فعالیت آن‌ها تداخل ایجاد کند، ترجیح داده می‌شود. استفاده از آب استریل یک گام فراتر بوده و اطمینان می‌دهد که هیچ ریزجاندار دیگری به کود زیستی وارد نمی‌شود و بدین ترتیب خلوص و اثربخشی ریزجانداران مورد نظر حفظ می‌شود. علاوه بر این، آب غنی شده با مواد مغذی می‌تواند به ایجاد محیطی حمایتی برای رشد و پایداری ریزجانداران در طی ذخیره‌سازی کمک کند. این غنی‌سازی معمولاً شامل افزودن مواد مغذی ضروری مانند نیتروژن، فسفر و مواد معدنی کمیاب است که ریزجانداران برای حفظ زنده‌مانی و فعالیت

---

[۲۶] Talc
[۲۷] Rice sheath blight
[۲۸] Corm rot
[۲۹] Vermiculite
[۳۰] Expandation
[۳۱] Water-based carriers

خود در طولانی مدت به آن نیاز دارند (ککمک، ۲۰۱۹؛ ریچا، ۲۰۲۳).

حامل‌های مبتنی بر روغن[۳۲]

حامل‌های مبتنی بر روغن مزایای خاصی در زمینه چسبندگی و حفاظت از ریزجانداران ارائه می‌دهند. روغن‌های گیاهی مانند روغن سویا و روغن نارگیل به دلیل توانایی‌شان در افزایش چسبندگی کود زیستی به بذرها یا سطح گیاهان بسیار مفید هستند و کمک می‌کنند تا تلقیح و کلونیزاسیون موفقیت‌آمیز بوده و بهتر صورت گیرد. این روغن‌ها همچنین زیست تخریب‌پذیر و دوستدار محیط زیست هستند. روغن‌های معدنی به دلیل خاصیت خنثی و پایداری‌شان انتخاب می‌شوند. این روغن‌ها با دیگر اجزای کود واکنش نمی‌دهند و لایه‌ای محافظ فراهم می‌کنند که می‌تواند ریزجانداران را از استرس‌های محیطی مانند خشکی و تابش فرابنفش محافظت کرده و بدین ترتیب زنده‌مانی و اثربخشی آن‌ها را افزایش دهند (ریچا، ۲۰۲۳).

حامل‌های پلیمری

حامل‌های پلیمری راه‌حل‌های نوآورانه‌ای هستند که محیطی مرطوب و محافظ برای ریزجانداران فراهم می کنند. هیدروژل‌ها در این زمینه بسیار مؤثر هستند؛ آن‌ها می توانند مقادیر زیادی آب را جذب و نگه‌داری کنند و محیطی مرطوب ایجاد کنند که از زندگی میکروبی پشتیبانی می‌کند. این نگه‌داری رطوبت برای حفظ فعالیت میکروبی و طولانی تر کردن عمر مفید کود زیستی حیاتی است (سومان و همکاران، ۲۰۱۶). این مواد زیست‌سازگار هستند و می توانند تعلیق‌های پایداری ایجاد کنند که ریزجانداران را از استرس‌های فیزیکی و شیمیایی محافظت کنند.

حامل‌های مصنوعی[۳۳]

حامل‌های مصنوعی نقش مهمی در کودهای زیستی ایفا می کنند و مزایای مختلفی را ارائه می دهند که باعث افزایش پایداری، کارایی و انتقال تلقیح های میکروبی می شود. این حامل‌ها که معمولاً از فرآیندهای صنعتی به دست می‌آیند، به گونه‌ای مهندسی شده‌اند که شرایط بهینه را برای بقا و فعالیت ریزجانداران مفید فراهم کنند. انواع مختلفی از حامل‌های مصنوعی در کودهای زیستی استفاده می شود که هر کدام خواص و کاربردهای منحصر به فردی دارند (مجید و همکاران، ۲۰۱۵).

پلی آکریل آمید[۳۴]

پلی آکریل آمید (PAM) یک پلیمر محلول در آب است که هیدروژل‌هایی را تشکیل می‌دهد که قادر به نگهداری مقادیر زیادی آب هستند و محیط مرطوبی را فراهم می‌کند که از حیات میکروبی پشتیبانی می‌کند. این ویژگی باعث می‌شود PAM برای محصور کردن ریزجانداران، حفظ حیات آنها در طول ذخیره‌سازی و کاربرد و کمک به رهاسازی کنترل‌شده آنها در خاک ایده‌آل باشد (لودهی و همکاران، ۲۰۲۳).

---

[۳۲] Oil-based carriers

[۳۳] Syntetic carriers

[۳۴] Polyacrylamide

پلی وینیل الکل[۳۵]

پلی وینیل الکل (PVA)، یکی دیگر از پلیمرهای مصنوعی، به دلیل خواص عالی تشکیل فیلم، چسبندگی و امولسیون کنندگی شناخته شده است. PVA زیست‌تخریب پذیر بوده و برای ایجاد پوشش‌های محافظ برای بذرها یا به عنوان یک جزء در فرمولاسیون هیدروژل استفاده می شود، که منجربه رهاسازی آهسته تلقیح‌های میکروبی و محافظت از آنها در برابر تنش‌های محیطی می‌گردد (پووانتو و همکاران، ۲۰۱۹).

پلی اتیلن گلیکول[۳۶]

پلی اتیلن گلیکول (PEG) یک پلیمر همه کاره با خواصی مانند حلالیت در آب، غیر سمی بودن و توانایی تشکیل هیدروژل است. PEG به ایجاد یک محیط پایدار و مرطوب برای میکروب‌ها کمک می‌کند و در تکنیک‌های کپسوله‌سازی برای تشکیل ماتریس‌های محافظ در اطراف ریزجانداران، افزایش پایداری و رهاسازی کنترل‌شده آن‌ها استفاده می‌شود. همچنین در پوشش بذر و اصلاح خاک استفاده می شود (ساهو و براهماپراکاش، ۲۰۱۶).

سیلیکا ژل[۳۷]

سیلیکا ژل که شکل متخلخل و دانه‌ای از دی اکسید سیلیکون می‌باشد، ظرفیت جذب رطوبت بالایی دارد و محیط آزادسازی خشک اما کنترل شده‌ای را برای ریزجانداران هدف فراهم می‌کند. ژل سیلیکا به ویژه در کودهای زیستی مفید است که نیاز به آزادسازی کنترل شده و پایداری طولانی مدت دارند و از سلول های میکروبی در برابر از دست دادن رطوبت و خشک شدن محافظت می‌کند (چوئن و همکاران، ۲۰۲۱).

پلی یورتان[۳۸]

پلی یورتان (PU) یک پلیمر انعطاف‌پذیر و بادوام است که می‌تواند به گونه‌ای مهندسی شود که دارای خواص مختلفی مانند آب‌گریزی یا آب دوستی باشد و پوشش‌های محافظ قوی را تشکیل دهد. PU در فناوری‌های پوشش برای محافظت از ریزجانداران در برابر تنش‌های مکانیکی و محیطی و در فرمولاسیون کودهای زیستی گرانوله آهسته رهش استفاده می‌شود (مجید و همکاران، ۲۰۱۵).

استفاده از حامل‌های مصنوعی فواید متعددی برای کودهای زیستی به همراه دارد. آنها به گونه‌ای مهندسی شده‌اند که شرایط محیطی بهینه را برای بقای میکروبی فراهم کنند و به طور قابل توجهی عمر مفید کودهای زیستی را افزایش دهند. این حامل‌ها را می‌توان به گونه‌ای طراحی کرد که ریزجانداران را به تدریج آزاد کند و منجر به عرضه پایدار و بلندمدت میکروب‌های مفید به گیاهان شود. آنها همچنین از تلقیح‌های میکروبی در برابر شرایط نامطلوب محیطی مانند خشک شدن، اشعه ماوراء بنفش و نوسانات دما محافظت می‌کنند. علاوه بر این، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی حامل‌های مصنوعی را می‌توان دقیقاً کنترل کرد و برای برآوردن نیازهای خاص تنظیم کرد و حداکثر سازگاری را با انواع مختلف ریزجانداران و گیاهان تضمین کرد. حامل‌های مصنوعی همچنین چسبندگی کودهای زیستی را به بذرها، ریشه‌های گیاه یا ذرات خاک افزایش می‌دهند و از تلقیح مؤثرتر و کلونسازی توسط میکروب‌های مفید اطمینان می‌دهند. با وجود این مزایا، استفاده از حامل‌های مصنوعی خالی از چالش نیست. نگرانی‌هایی در مورد پایداری زیست‌محیطی و زیست تخریب‌پذیری آنها وجود دارد، زیرا مواد مصنوعی می‌توانند به آلودگی طولانی مدت کمک کنند. از طرفی تولید و فرآوری حامل‌های مصنوعی می‌تواند پرهزینه باشد و به طور بالقوه هزینه کلی محصولات کود زیستی را افزایش

---

[۳۵] Polyvinyl Alcohol
[۳۶] Polyethylene Glycol
[۳۷] Silica Gel
[۳۸] Polyurethane

دهد. علاوه بر این، ممکن است مشکلات سازگاری بین حامل‌های مصنوعی و ریزجانداران خاص یا گونه‌های گیاهی وجود داشته باشد که نیاز به آزمایش کامل و بهینه سازی فرمولاسیون دارد. استفاده از مواد مصنوعی در کشاورزی نیز مشمول بررسی نظارتی است و اطمینان از انطباق با قوانین کشاورزی و زیست‌محیطی می تواند چالش برانگیز باشد (ساهو و براهماپراکش، ۲۰۱۵؛ چوئن و همکاران، ۲۰۲۱).

پیشرفت‌های اخیر در فناوری در تلاشند تا برخی از این چالش‌ها را برطرف کنند. ترکیب نانومواد در حامل‌های مصنوعی برای افزایش انتقال و اثربخشی تلقیح‌های میکروبی، با نانوذرات که پایداری و فراهمی زیستی کودهای زیستی را بهبود می‌بخشد، در حال بررسی است. پلیمرهای هوشمندی که به محرک‌های محیطی مانند دما یا pH پاسخ می‌دهند، در حال توسعه هستند تا ریزجانداران را به شیوه‌ای کنترل‌شده بر اساس محرک‌های خاص آزاد کنند و دقت در تحویل میکروبی را افزایش دهند. همچنین پیشرفت‌ها در علم پلیمر منجر به توسعه حامل‌های مصنوعی شده است که هم موثر و هم زیست تخریب‌پذیر هستند و نگرانی‌های زیست‌محیطی مرتبط با مواد مصنوعی سنتی را برطرف می‌کنند (رای و همکاران، ۲۰۲۳؛ کائور و همکاران، ۲۰۲۴).

مواد چسبنده[۳۹]

مواد چسبنده، که به عنوان عوامل چسباننده نیز شناخته می‌شوند، نقش مهمی در کارایی کودهای زیستی دارند. آنها عمدتاً با تقویت چسبندگی تلقیحات میکروبی به بذرها، ذرات خاک یا سطوح گیاه عمل می‌کنند و ریزجانداران مفید را در تماس نزدیک با ریشه‌های گیاه نگه می‌دارند. این نزدیکی برای اینکه ریزجانداران به طور مؤثری رشد گیاه را تقویت کرده و جذب مواد مغذی را تسهیل کنند، ضروری است (پریادارشینی و همکاران، ۲۰۲۲). علاوه بر این، عوامل چسباننده به توزیع یکنواخت کود زیستی کمک می‌کنند و مشکلاتی مانند تشکیل گرد و غبار و از دست رفتن در حین استفاده را کاهش می‌دهند. آنها همچنین یک مانع محافظ برای ریزجانداران فراهم می‌کنند و آنها را از عوامل استرس‌زای محیطی مانند خشکی و تابش فرابنفش (UV) محافظت می‌کنند (رانی و همکاران، ۲۰۲۳). این مواد با بهبود پایداری و اثربخشی کودهای زیستی، نقش حیاتی در افزایش پایداری و بهره‌وری شیوه‌های کشاورزی ایفا می‌کنند.

عوامل چسبنده معمولاً با مواد مبتنی بر پیت ترکیب می‌شوند که قابلیت کود زیستی را برای بدست آوردن پوشش حداکثری بر روی بذر را افزایش دهند. برخی از مواد چسبنده شامل پلی‌ساکاریدهایی مانند کربوکسی‌متیل‌سلولز یا صمغ، نمک‌های کازئینی و مشتقات پلی‌الکلی هستند (پریادارشینی و همکاران، ۲۰۲۲). آنها باید غیر سمی، کاربرد راحت و چسبندگی مناسبی را نشان دهند و بقای میکروب‌ها روی بذر را افزایش دهند. در مورد باکتری‌ها، عوامل چسبنده برای محافظت باکتری‌ها انتخاب شده‌اند، اما مکانیسمی که باعث افزایش عمر میکروب‌ها می‌شود هنوز واضح نیست. تنها نقطه ضعف استفاده از این عوامل، تعامل بلندمدت باکتری‌ها با بذرها به دلیل افزایش چسبندگی است (هرمان و لسور، ۲۰۱۳).

استفاده از عوامل چسبنده در کودهای زیستی برای تقویت اتصال ریزجانداران مفید به بذرها یا ذرات خاک ضروری است و در نتیجه تلقیح و کارایی بهتر را تضمین می‌کند. به طور معمول، بسته به نوع عامل چسباننده و کارایی اتصال آن، درصد برچسب مورد استفاده در کودهای زیستی از ۱٪ تا ۱۰٪ از کل فرمولاسیون متغیر است، اما معمولاً غلظت کمتر از ۵٪ کافی است تا چسبندگی خوبی بدون ایجاد اثرات منفی فراهم شود (بارتی و همکاران، ۲۰۱۷). برای استفاده مستقیم در خاک، معمولاً محلول کود زیستی را با آب مخلوط کرده و به زمین اعمال می‌کنند. غلظت‌ها متفاوت است، اما یک روش رایج استفاده از ۱ تا ۲ لیتر محلول کود زیستی برای هر هکتار است که

[۳۹] Stickers

با مقدار کافی آب مخلوط می‌شود تا به طور یکنواخت در سطح زمین پخش شود. برای مواد مختلف نیز نسبت‌های متفاوتی وجود دارد. مثلاً برای تلقیح بذرهای لگوم‌ها با مایه‌های ریزوبیوم، معمولاً ۲۰۰ تا ۲۵۰ گرم مایه برای هر ۱۰ کیلوگرم بذر مخلوط می‌شود و محلول چسباننده ۱ تا ۲ درصد برای مرطوب کردن بذرها قبل از اعمال مایه استفاده می‌شود (سیف و همکاران، ۲۰۲۱). در مورد تلقیح بذرهای غلات با مایه‌های آزوسپیریلوم، معمولاً ۲۰۰ گرم مایه برای هر ۱۰ کیلوگرم بذر مخلوط می‌شود و از محلول چسباننده ۱-۲ درصد برای مرطوب کردن بذرها استفاده می‌شود. در مورد باکتری های حل کننده فسفات (PSB[۴۰]) برای محصولات مختلف ممکن است از پلی وینیل الکل (PVA) یا نشاسته به عنوان چسباننده به نسبت ۳ تا ۵ درصد وزن بذر استفاده کنند (جیس وال و همکاران، ۲۰۲۲). برای دریافت بهترین نتیجه، دستورالعمل‌های خاص تولیدکننده را دنبال کنید و اطمینان حاصل کنید که مخلوط به خوبی تهیه شده و به طور یکنواخت روی بذرها پوشانده شده است. پس از مخلوط‌سازی، بذرها را در یک محل سایه دار به مدت کوتاهی خشک کنید تا آماده کاشت شوند. برای قارچ‌های میکوریزا که برای کاربرد خاک در نظر گرفته شده‌اند، می‌توان از چسباننده‌هایی مانند ژلاتین یا آلژینات به نسبت ۵ تا ۱۰ درصد از کل فرمولاسیون استفاده کرد (که نسبت اختلاط به روش‌های کاربرد خاک بستگی دارد) (نوسینوویچ، ۲۰۱۰). در نتیجه، استفاده از چسباننده‌ها در فرمولاسیون کودهای زیستی برای تلقیح موثر بسیار مهم است و درصد و نسبت آنها باید بر اساس نوع کود زیستی، محصول هدف و شیوه های کشاورزی خاص بهینه شود (راکشیت و همکاران، ۲۰۲۱).

افزودنی‌ها[۴۱]

فرمولاسیون مایه‌تلقیح میکروبی، علاوه بر سویه میکروبی، حامل و مواد چسبنده؛ شامل برخی مواد افزودنی نیز می‌باشد. این مواد شامل عناصر مغذی ماکرو و میکرو، هورمون‌ها، منبع کربن یا برخی منابع معدنی دیگر و گاهی هم قارچ‌کش‌ها است (برهماپراکاش و همکاران، ۲۰۲۰). هدف اصلی از افزودنی‌ها فراهم کردن یک محیط مغذی و محافظتی است. این مواد کیفیت و عملکرد مایه‌تلقیح نهایی را بهبود می‌دهند، زیرا چسبندگی به بذر افزایش می‌یابد، محصول پایدار می‌شود، سموم بذر غیرفعال می‌شوند، ماندگاری سویه‌های هدف تحت شرایط محیطی تنشی بهبود می‌یابد و حتی زمان ذخیره‌سازی نیز بهبود پیدا می‌کند (ساهو و همکاران، ۲۰۱۶). افزودنی‌ها ارتباط قوی با میزان ماندگاری سلولی دارند. برای مثال ماده‌ای مانند گلیسرول به عنوان افزودنی، به‌واسطه نگهداری میزان معنی‌داری از رطوبت، سلول‌ها را از خشکی محافظت می‌کنند. برای بهبود عملکرد سویه، نیاز به برخی افزودنی‌ها وجود دارد ولی ماهیت شیمیایی افزودنی باید از تجزیه و تحلیل سریع آن جلوگیری کند. در این ارتباط موادی مانند زانتان، آلژینات سدیم، شیر خشک و غیره مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و با نتایج متغیر گزارش شده‌اند (سورندرا گوپال و بابی، ۲۰۱۶).

انتخاب افزودنی‌ها به توانایی آن‌ها در محافظت از سلول‌های میکروبی در دمای بالا و خشکی در طول ذخیره‌سازی و نیز بر روی سطح بذر بستگی دارد. به طور کلی پلیمرهایی با وزن مولکولی بالا و حلالیت خوب در آب که ماهیت غیرسمی دارند افزودنی‌های خوبی محسوب می‌شوند. افزودنی‌های رایج شامل ساکارز، گلیسرول، سدیم آلژینات، کربوکسی‌متیل سلولز، پلی‌وینیل الکل، ترهالوز، پلی‌اتیلن گلیکول، صمغ عربی، پلی‌وینیل پیرولیدون[۴۲]، Fe-EDTA و آرد نشاسته می‌باشند (دیکر و همکاران، ۲۰۰۴). ساکارز هنگامی که به فرمول مایع اضافه می‌شود، بقای میکروب‌ها به ویژه باکتری‌های حل‌کننده فسفات و ریزوبیوم‌ها را بهبود می‌بخشد، (لی و همکاران، ۲۰۲۳). گلیسرول نیز حاوی مقدار قابل توجهی مایع است و سرعت

[۴۰] Phosphate-solubilizing bacteria

[۴۱] Additives

[۴۲] Polyvinylpyrrolidone

خشک شدن تلقیح را کاهش می‌دهد تا از کم‌آبی سلول محافظت کند (سریرم و همکاران، ۲۰۱۱). در یک مطالعه اضافه کردن گلیسرول برای تهیه یک مایه‌تلقیح گزارش شده است که در آن از باکتری *Pseudomonas fluorescens* استفاده شده و زنده‌مانی و فعالیت متابولیکی میکروب را تا ۶ ماه در زمان ذخیره‌سازی حفظ می‌کند (توریان و همکاران، ۲۰۱۰). پلی‌وینیل پیرولیدون نیز به عنوان یک ماده چسبنده در چندین فرمولاسیون، به ویژه برای *Bradyrhizobium japonicum* استفاده می‌شود که آنرا در برابر خشکی محافظت کرده و از ترشحات بذر که برای ریزوبیوم‌ها مضر هستند جلوگیری می‌کند (سینگلتون و همکاران، ۲۰۰۲). کربوکسی‌متیل سلولز نیز یک افزودنی قابل دسترس است و به طور معمول استفاده می‌شود. به دلیل ماهیت پلیمری نیمه‌مصنوعی آن، کیفیت ثابتی در مقایسه با سایر افزودنی‌ها نشان می‌دهد. علاوه بر این در غلظت بسیار پایین استفاده می‌شود که استفاده از آن را اقتصادی می‌کند (جها و صراف، ۲۰۱۲).

صمغ عربی نیز یک ترکیب پیچیده از پلی‌ساکاریدها و گلیکوپروتئین‌ها می‌باشد که به عنوان یکی دیگر از افزودنی‌های رایج بشمار می‌رود. به دلیل استخراج آن از اقاقیا، به آن صمغ اقاقیا نیز گفته می‌شود. مطالعات مختلف استفاده از آن را در بسیاری از فرمولاسیون‌های کودهای زیستی به عنوان یک عامل چسبنده به ویژه برای باکتری‌ها گزارش کرده‌اند (رز و همکاران، ۲۰۱۱). این ماده زمانی که در کودهای زیستی مایع استفاده می‌شود، بقاء باکتری‌ها را بهبود می‌بخشد و آن‌ها را در برابر کم‌آبی محافظت می‌کند (وانی و همکاران، ۲۰۰۷). ماهیت افزودنی‌ها و غلظت‌های آن‌ها از عوامل اصلی هستند که بر کیفیت نهایی کودهای زیستی تأثیر می‌گذارند. بنابراین، مقدار و نوع افزودنی‌ها هنگام تهیه مایه‌تلقیح بسیار مهم است (کک مکف ۲۰۱۹).

انواع کودهای زیستی

در تولید کودهای زیستی، از انواع مختلفی از فرمولاسیون‌ها استفاده می‌شود که هر کدام ویژگی‌ها و کاربردهای منحصر به فردی دارند. فرمولاسیون‌های پودری به دلیل پایداری در طول زمان و راحتی در حمل و نقل، برای توزیع مواد مغذی در زمان‌های مختلف در خاک مناسب هستند. فرمولاسیون مایع، که شامل محلول‌های حاوی مواد مغذی است، برای کاربردهایی که نیاز به تغذیه فوری گیاهان دارند، مناسب می‌باشد. فرمولاسیون گرانولار با ساختار گرانولی منظم، توزیع و استفاده آسان‌تری را فراهم می‌کند. فرمولاسیون محصور در پلیمر یا تثبیت سلولی[۴۳]، برای حفظ و آزادسازی کنترل‌شده مواد مغذی و ریزجانداران مناسب است. فرمولاسیون ژل با استفاده از پلیمرهای ژل‌کننده، مواد مغذی را در ساختار ژلی ثابت نگه می‌دارد. در نهایت، فرمولاسیون بستر سیال خشک‌شده[۴۴] با استفاده از محلول‌های خشک‌شده، برای کاربردهایی که نیاز به حمل و نقل آسان دارند، مناسب می‌باشد (هریج و همکاران ۲۰۰۸؛ مالوسا و همکاران ۲۰۱۲).. هر یک از این فرمولاسیون‌ها ویژگی‌ها و مزایا و معایب خود را دارند که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود (جدول ۳).

کودهای زیستی پودری

کودهای زیستی پودری یک دسته مهم از انواع کودهای زیستی جامد هستند که برای بهبود حاصلخیزی خاک و افزایش رشد گیاه از طریق معرفی ریزجانداران و مواد مغذی مفید طراحی شده‌اند. این کودهای زیستی با مخلوط کردن کشت‌های میکروبی با حامل‌های جامد مختلف مانند پیت، کمپوست، بیوچار، لیگنیت، تالک، ورمیکولیت و غیره که هرکدام دارای ویژگی‌های مختلف بوده و محیطی پایدار برای ریزجانداران فراهم کرده و از آنها در برابر تنش‌های محیطی محافظت می‌کنند و زنده‌مانی آنها را تا زمان کاربرد تضمین می‌کنند. کودهای زیستی

[۴۳] Cell Immobilization

[۴۴] Fluid Bed-Dried Formulation

پودری نقش اساسی در رویکردهای کشاورزی مدرن با هدف افزایش بهره‌وری و پایداری خاک دارند. از جمله مزایای اصلی کودهای زیستی پودری، ذخیره و حمل و نقل آسان به دلیل فرم سبک و پایدار آن است. آنها معمولاً در مقایسه با کودهای زیستی مایع ماندگاری طولانی تری دارند، به شرط اینکه در شرایط خنک و خشک نگهداری شوند. علاوه بر این، روش‌های کاربرد کودهای زیستی پودری، مانند تیمار بذر، ادغام خاک و غوطه‌وری ریشه، ساده هستند و می‌توانند به طور یکپارچه در شیوه‌های کشاورزی موجود ادغام شوند (سیف و همکاران، ۲۰۲۱).

با این حال، چندین معایب نیز وجود دارد که باید در نظر گرفت. یکی از اشکالات قابل توجه، پتانسیل توزیع نابرابر ریزجانداران در هنگام اعمال بر روی خاک است که می‌تواند منجر به نتایج ناسازگار در عملکرد محصول شود. زنده ماندن ریزجانداران در کودهای زیستی پودری در صورت عدم نگهداری مناسب می‌تواند به خطر بیفتد، زیرا قرار گرفتن در معرض گرما و رطوبت (زیاد یا کم) می‌تواند اثربخشی آنها را کاهش دهد. علاوه بر این، اثربخشی این نوع کودهای زیستی می‌تواند تحت تأثیر شرایط خاک، مانند pH و محتوای مواد آلی باشد، که ممکن است نیاز به اقدامات مدیریت خاک بیشتری داشته باشد. همچنین نیاز به آموزش گسترده کشاورزان و کنترل کیفیت برای اطمینان از استفاده صحیح و حداکثر فواید کودهای زیستی پودری وجود دارد. علی‌رغم این چالش‌ها، مزایای بالقوه کودهای زیستی پودری در ترویج کشاورزی پایدار، آنها را به گزینه‌ای ارزشمند تبدیل می‌کند که ارزش توجه دارد (کومار و همکاران، ۲۰۲۴).

کودهای زیستی مایع

مایه‌تلقیح‌های مایع عمدتاً از کشت‌های آبی (مبتنی بر آب)، مشتقات بر پایه پلیمر، روغن‌های معدنی، روغن در آب یا روغن‌های آلی تهیه می‌شوند. این‌ها مایه‌تلقیح‌های بهبودیافته‌ای هستند که در آنها تکنیک‌های بدون فرمولاسیون[۴۵] اعمال شده است. در واقع آنها همان کشت‌های میکروبی هستند که با موادی اصلاح کننده ای برای افزایش چسبندگی، پایداری و قابلیت پراکندگی مخلوط شده اند (باشان و همکاران، ۲۰۱۴). مایه‌تلقیح‌های مایع به دلیل استفاده و کاربرد راحت آنها در هر دو حالت بذرمال و خاکی مورد توجه قرار گرفته‌اند. پیت تاکنون محبوب‌ترین حامل مورد استفاده بوده است؛ اما به دلیل کمبود آن و کاهش دسترسی به آن، دانشمندان به دنبال یافتن جایگزین مناسب برای آن، به فرم مایع هستند. کاربرد این نوع مایه‌تلقیح‌ها با ماشین‌آلات کاشت جدید کاملاً سازگار بوده و به راحتی بر روی بذرها قابل استفاده می‌باشند (سیف و همکاران، ۲۰۲۱).

مایه‌تلقیح‌های مایع به دلیل سهولت در استفاده، امکان افزودن مواد مغذی و محافظت بیشتر در برابر تنش‌های محیطی و کارایی بالاتر نسبت به کودهای زیستی پودری، متمایز شده‌اند. این مواد افزودنی و محافظ‌ها، تشکیل سلول، اسپور یا کیست را تحریک می‌کنند که در نهایت باعث بهبود عملکرد مایه‌تلقیح می‌شود. با این وجود معایبی نیز وجود دارد برای مثال عمر مفید محدود، نیاز به شرایط نگهداری در دمای پایین و هزینه تولید بالا که استفاده از آنها را تنها به کشورهای توسعه‌یافته محدود می‌کند. همچنین این نوع مایه‌تلقیح‌ها برای باکتری‌هایی مانند *Azospirillum* که ماندگاری ضعیفی دارند، کارایی مناسبی ندارند (باشان و همکاران، ۲۰۱۴).

مایه‌تلقیح مایع عمدتاً از طریق یک فرآیند تخمیر ساده تولید می‌شود که در آن مایع تخمیر شده به صورت استریل بسته‌بندی و بدون از دست دادن قابلیت زیستی ذخیره و نگهداری می‌شود. این روش از نظر اقتصادی بسیار مقرون به صرفه است زیرا نیاز به فرآیند استریلیزاسیون مواد حامل (همانند حالت جامد) ندارد (جنین و همکاران.، ۲۰۰۸). کودهای زیستی مایع معمولا عاری از آلودگی تهیه می‌گردد زیرا در فرآیند تولید آن از استریلیزاسیون کامل استفاده می شود. معمولاً به اشتباه تصور می‌شود که مایه

[۴۵] No formulation

تلقیح مایع یک کشت مایع حاوی مواد جامد است که توسط یک فرمانتور آماده‌سازی شده است. در حالی که این مایه تلقیح، محیطی است که علاوه بر اجزای محیط کشت (مانند نیتروژن، کربن و غیره)، شامل برخی منابع افزودنی‌ها و منابع ویتامینی است که به رشد میکروبی و محافظت‌های سلولی مختلف کمک می‌کند (دی، ۲۰۲۱).

افزودنی‌ها ویژگی‌هایی دارند که چسبندگی بهتر به بذر، محافظت از تنش اسمزی، افزایش پایداری محصول، افزایش بقاء میکروب هدف و غیرفعال‌سازی سموم پوششی بذر را فراهم می‌کنند (آلوزی و همکاران، ۲۰۲۲). وقتی مایه تلقیح آماده می‌شود، در مایعی مانند آب یا روغن آلی حل می‌شود. سپس با اسپری کردن بر روی بذرها یا غوطه‌ور کردن آنها برای مدتی، بر روی آن‌ها اعمال می‌شود. پس از خشک شدن، بذرها کاشته می‌شوند. در این روش تلفات مایه تلقیح بسیار کم است. با توجه به اینکه گیاهان لگوم در خاکی با دمای نزدیک به ۴۰ درجه سلسیوس کاشته می‌شوند، دمای بالا بقاء ریزوبیوم‌ها را که توانایی تثبیت نیتروژن دارد، کاهش می‌دهد لذا مواد افزودنی در کود، از دمای بالا و خشکی محافظت می‌کنند. کشت‌های مایع که حاوی محافظ‌های سلولی هستند، تعداد زیاد باکتری‌ها را حفظ می‌کنند و تشکیل کیست‌ها و اسپورها را که مقاوم به شرایط نامطلوب هستند، افزایش می‌دهند و بقاء ریزجانداران را بهبود می‌بخشند (ساهو و برهماپراکاش، ۲۰۱۶).

کودهای زیستی گرانوله

برای کاهش اثرات نامطلوب مایه‌تلقیح‌های پودری، فرمولاسیون جدیدی به نام کودهای زیستی گرانوله مورد توجه قرار گرفته است. برای تهیه گرانول‌ها، از مواد اولیه‌ای مانند بلغور پیت، دانه‌های سیلیکا، مهره (تیله)های کوچک یا مواد کلسیتی استفاده شده و سپس این گرانول‌ها با ریزجانداران هدف مخلوط می‌شوند. هرچند اندازه گرانول‌ها متفاوت است، اما کیفیت محصول نهایی و جمعیت ریزجانداران در کشت اولیه (مادر) تأثیر مستقیمی بر کیفیت گرانول‌های نهایی دارد (سیف و همکاران، ۲۰۲۱). درک اثرات متقابل بین دو نوع کود زیستی جامد و گرانول برای مایه‌تلقیح‌ها ساده نیست و عوامل مختلفی ممکن است بر عملکرد و کارایی آنها تاثیر بگذارد. این پیچیدگی ممکن است به دلیل تفاوت‌های ساختاری، فیزیکی و شیمیایی بین پیت و گرانول باشد که می‌تواند بر نحوه رشد و بقای ریزجانداران در این دو محیط تاثیر بگذارد (هرمان و لسور، ۲۰۱۳). گرانول‌ها به دلیل گرد و خاک کمتر و سادگی استفاده، بسیار کاربردی‌تر از پیت هستند. برخی مطالعات نشان داده‌اند که عملکرد کودهای گرانوله باکتری‌های ریزوبیومی در تثبیت نیتروژن یا تشکیل گره‌های ریشه به اندازه کودهای زیستی مبتنی بر پیت کارآمد نیست (آتینو و همکاران، ۲۰۱۲). در حالی که چندین آزمایش نشان داده‌اند که کودهای گرانولی در زمینه‌های تثبیت نیتروژن، زیتوده، اندازه گره، وزن گره و جذب نیتروژن، نسبت به هر دو حالت جامد و مایع برتری دارند. به ویژه اینکه استفاده از کودهای زیستی گرانوله در شرایط استرس خاکی مانند مناطق سرد، مرطوب، شرایط کاملا اسیدی و خشک عملکرد بهتری نشان داده است (هریج، ۲۰۰۸). از سوی دیگر، این فرمولاسیون‌ها دارای برخی معایب هستند از جمله چگالی بیشتر که حمل و نقل آنها را به مزارع دشوار می‌کند. همچنین هزینه ذخیره‌سازی و مساحت مورد نیاز برای تولید آنها بسیار بالاتر است (کلیتون و همکاران، ۲۰۰۴).

کودهای زیستی محصور در پلیمر (تثبیت سلول‌ها)

دانشمندان برای چندین دهه در حال کار بر روی توسعه فرمولاسیون‌های جدیدی بوده‌اند که حداکثر اثرات سودمند و حداقل اثرات زیان‌آور را داشته باشند. اخیراً با توسعه فرمولاسیون جدیدی به نام تثبیت یا غیرمتحرک‌سازی سلولی، پیشرفتی حاصل شده است که شامل اشکال مختلف به دام انداختن یا اتصال سلول‌ها به یک ماتریس می‌باشد. این اشکال ممکن است شامل جذب

بر روی سطوح، پیوند عرضی[۴۶] سلول‌ها، لخته‌سازی[۴۷]، پیوند کووالانسی با ماده حامل و کپسوله کردن[۴۸] سلول‌ها در ژل پلیمری می‌باشند (رانی و همکاران، ۲۰۲۳).

کپسوله کردن یا انکپسولاسیون امیدوارکننده‌ترین تکنیک فرمولاسیون است که حامل‌های مفیدی برای ریزجانداران ایجاد می‌کند و مزایای قابل توجهی نسبت به سایر مواد حامل دارد. فرآیند کپسوله کردن، یک محیط تغذیه‌ای-محافظتی برای سلول‌های زنده در برابر استرس‌های محیطی مانند حلال‌های آلی، سموم، دما و انواع استرس‌های مکانیکی و همچنین شکارچیان فراهم می‌کند. چنین فرمولاسیون‌هایی هنگامی که به خاک اضافه می‌شوند، توسط میکروب‌های موجود در خاک به آرامی تجزیه می‌شوند و سلول‌های هدف به مقدار زیاد، معمولاً همزمان با جوانه‌زنی بذر آزاد می‌شوند. باکتری‌ها، قارچ‌ها و قطعات کوچک هیف قابل کپسوله کردن می‌باشند. این فناوری یک روش بسیار مفید برای تهیه فرمولاسیون‌های تک‌سویه یا مخلوط مانند تلقیح‌های مبتنی بر ریزوبیوم‌ها-AMF میباشد. رایج‌ترین نوع مواد مورد استفاده برای کپسوله کردن، پلیمرهایی هستند که ممکن است از منابع مختلف تهیه شوند (دلاگنز و سیرا گارسیا، ۲۰۲۳).

پیشرفت‌های حاصل در تکنولوژی تلقیح منجر به ظهور فرمولاسیون‌های محصور در پلیمر شده است. در این روش پس از فرآیند تکثیر انبوه، سلول‌ها با نوع خاصی از پلیمر مخلوط شده و سپس در یک محلول شیمیایی به حالت جامد تبدیل می شوند. نتیجه این فرآیند، دانه‌های یکنواختی است که حاوی سلول‌های زنده درون خود هستند. این دانه‌ها در ماتریس پلیمری قرار می‌گیرند که باعث رشد بیشتر شده و سپس خشک می‌شوند. دانه‌ها زمانی که به خاک اضافه می‌شوند معمولاً توسط ریزجانداران موجود در خاک تجزیه می‌شوند. مواد پلیمری که به طور معمول استفاده می‌شوند ممکن است مانند پلی‌ساکاریدها و مواد پروتئینی، طبیعی و یا مانند پلی‌اکریل‌آمید و پلی‌اورتان، یا هموپلیمرها، هتروپلیمرها یا کوپلیمرها مصنوعی باشند. یک مطالعه تخمین زده است که حدود ۱۳۵۰ ترکیب وجود دارد که می‌توانند به عنوان ماده پلیمری محصورکننده انتخاب شوند، که این انتخاب بستگی به ترکیب شیمیایی، وزن مولکولی و توانایی نسبی آن‌ها در تعامل با سایر اجزای مورد استفاده دارد. از میان مواد پلیمری که به طور معمول استفاده می‌شوند، دانه‌های آلژینات و پلی‌اکریل‌آمید رایج هستند، اما به دلیل نیاز به احتیاطات بیشتر در هنگام کار با پلی‌اکریل‌آمید، آلژینات ترجیح داده می‌شود.

کودهای زیستی ژله‌ای (ژل مانند)

فرمولاسیون ژل به عنوان یک روش پیشرفته و موثر در تولید کودهای زیستی، امکاناتی را برای حفظ و انتقال بهینه مواد مغذی و ریزجانداران مفید فراهم می‌کند. در این روش، از پلیمرهای مانند آگار، ژلاتین، آلژینات، CMC و پلی‌آکریل‌آمید به عنوان ماتریس ژل استفاده می‌شود که در حضور آب، به ساختاری ژلی مناسب برای نگهداری و رهایی کنترل‌شده مواد مغذی و ریزجانداران منجر می‌شود. از ویژگی‌های بارز فرمولاسیون ژل می‌توان به پایداری بالا، رهاسازی کنترل‌شده مواد، و سهولت استفاده اشاره کرد. این روش اجازه می‌دهد تا مواد مغذی به طور مداوم و به نحو متناسبی به خاک و گیاهان منتقل شوند، که این امر به بهبود کارایی و تولیدات محصولات کشاورزی کمک می‌کند (زاید، ۲۰۱۶؛ سیف و همکاران، ۲۰۲۱). با این وجود، فرمولاسیون ژل نیز با چالش‌های خود روبه‌رو است. از جمله این چالش‌ها می‌توان به هزینه بالاتر تولید نسبت به روش‌های دیگر مانند فرمولاسیون‌های پودری یا مایع، و پایداری کمتر در مواجهه با شرایط محیطی خاص اشاره کرد. همچنین، تعاملات ممکن با محیط خاک و ریزجانداران آن می‌تواند بر روی کارایی فرمولاسیون ژل تأثیر داشته باشد. برای مثال، در برخی شرایط، ممکن است ساختار ژل مورد استفاده تغییر کند و بر عملکرد مواد مغذی

[۴۶] Cross-linking
[۴۷] Flocculation
[۴۸] Encapsulation

و ریزجانداران اثرات جانبی داشته باشد. از طرفی، قابلیت انطباق ژل با شرایط محیطی متفاوت نیز می‌تواند به عنوان یک نقطه قوت مدنظر قرار گیرد که به تناسب خاصی از کشت و کار کمک کند و در نتیجه باعث بهره‌وری بیشتر در استفاده از کودهای زیستی شود (مالوسا و همکاران، ۲۰۱۲).

بستر سیال خشک شده

خشک‌کردن بستر سیال یک تکنیک کلیدی در تولید کودهای زیستی است که پایداری، طول عمر و سهولت در حمل و نقل فرمولاسیون‌های میکروبی را بهبود می‌بخشد (ساهو و همکاران، ۲۰۱۸). این روش ذرات جامد را در جریان هوای گرم معلق می‌کند و انتقال حرارت و جرم را به شکل موثری برای خشک‌کردن یکنواخت تسهیل می‌کند. فرآیند با آماده‌سازی یک فرمولاسیون میکروبی آغاز می‌شود که شامل کشت ریزجانداران مفید و مخلوط کردن آنها با یک ماده حامل مناسب مانند پیت یا ورمیکولیت است. این مخلوط سپس به خشک‌کن بستر سیال وارد شده و توسط هوای گرم، سیال می‌شود و دما به دقت کنترل می‌شود تا از آسیب دیدن ریزجانداران جلوگیری شود (ساهو و برهماپراکاش، ۲۰۱۶). فرآیند خشک‌کردن شامل مراحل مختلفی مانند خشک‌کردن اولیه، خشک کردن با سرعت ثابت و خشک کردن با سرعت کاهشی است که اطمینان از حذف کامل رطوبت را فراهم می‌کند. پس از خشک کردن، محصول خنک، تخلیه شده و ممکن است قبل از اینکه در ظروف ضد رطوبت بسته‌بندی شود به صورت گرانول یا پودری فرآوری شود. خشک‌کردن بستر سیال نسبت به روش‌های دیگر، خشک‌کردن یکنواخت، کارایی و بقای بهتر ریزجانداران را ارائه می‌دهد و آن را برای تولید در مقیاس بزرگ مناسب می‌سازد. این روش برای تولید کودهای زیستی مختلفی مانند ریزوبیوم برای تثبیت نیتروژن، حل‌کننده‌های فسفات و کودهای زیستی مایکوریزا که همه باعث افزایش حاصلخیزی خاک و رشد گیاه می‌شوند، استفاده می‌شود (لاوانیا و همکاران، ۲۰۱۶؛ ساهو و همکاران، ۲۰۱۸). کنترل مناسب پارامترهای خشک‌کردن برای حفظ بقای ریزجانداران مفید و کارکرد آنها بسیار حائز اهمیت است (لاوانیا و همکاران، ۲۰۱۶).

جدول ۳ - برخی از مزایا و چالش‌های انواع مختلف فرمولاسیون کودهای زیستی

نوع کود زیستی	مزایا	چالش‌ها	منابع
پودری	قابلیت انبارداری طولانی مدت	نیاز به تجهیزات خاص برای کاربرد	(سیف و همکاران، ۲۰۲۱؛ کومار و همکاران، ۲۰۲۴)
	قابلیت حل شدن سریع در آب	احتمال گردوغبار زیاد و مشکلات تنفسی	
	سهولت حمل و نقل	مشکلات در یکنواختی توزیع در سطح خاک	
	هزینه تولید پایین	احتمال کلوخه شدن در شرایط رطوبت بالا	
مایع	قابلیت جذب سریع توسط گیاه	نیاز به مخازن و تجهیزات خاص برای نگهداری و حمل و نقل	(باشان و همکاران، ۲۰۱۴؛ باشان و همکاران، ۲۰۱۴؛ دی، ۲۰۲۱)
	سهولت کاربرد و توزیع یکنواخت	احتمال نشت و آلودگی محیط زیست	
	امکان ترکیب با سایر مواد مغذی و شیمیایی	هزینه بیشتر نسبت به فرمولاسیون‌های جامد	
	توانایی کنترل دقیق‌تر میزان مصرف	حساسیت به شرایط دما و نور	
گرانولی	قابلیت انبارداری طولانی مدت	حلالیت محدود در آب	(هرمان و لسور، ۲۰۱۳؛ آتینو و همکاران، ۲۰۱۲)
	انتشار تدریجی مواد مغذی	احتمال تخریب گرانول‌ها در شرایط نامناسب	
	کمتر از پودرها به ذرات گرد و غبار حساس	چالش‌های کنترل کار با توجه به اندازه و وزن ذرات	
	سهولت حمل و نقل	هزینه تولید بالا	
محصور در پلیمر	رهاسازی تدریجی و کنترل شده مواد مغذی	نیاز به فناوری پیچیده برای تولید	(رانی و همکاران، ۲۰۲۳؛ دلاگنز و سیرا گارسیا، ۲۰۲۳)
	کاهش خطر سمیت و آلودگی محیط زیست	محدودیت در انتخاب مواد اولیه	
	بهبود پایداری در برابر شرایط محیطی	هزینه تولید بالا	
	افزایش کارایی و اثرگذاری	نیاز به مدیریت دقیق در مصرف	
ژل	قابلیت جذب و نگهداری آب بالا	نیاز به شرایط خاص برای نگهداری و حمل و نقل	(زاید، ۲۰۱۶؛ مالوسا و همکاران، ۲۰۱۲)
	انتشار تدریجی مواد مغذی	هزینه تولید بالا	
	سهولت کاربرد و توزیع یکنواخت	احتمال تخریب در شرایط دما و رطوبت نامناسب	
	کاهش نیاز به آبیاری متداول	ممکن است برای برخی محصولات مناسب نباشد	
بستر سیال خشک شده	پایداری و انبارداری طولانی مدت	سرمایه‌گذاری اولیه بالا برای تجهیزات	

قابلیت حل شدن سریع در آب	پیچیدگی در بهینه‌سازی فرآیند	(ساهو و همکاران، ۲۰۱۸؛ لاوانیا و همکاران، ۲۰۱۶)
سهولت حمل و نقل	مشکلات رهایش ضعیف در برخی موارد	
	مشکلات انحلال در برخی موارد	

فرآیند استریل‌سازی

استریل‌سازی حامل یک مرحله بسیار مهم در فرآیند تولید کودهای زیستی است که تضمین می‌کند ماده حامل برای انتقال میکروب‌های مفید از آلودگی‌ها پاک باشد. این فرآیند کمک می‌کند تا کیفیت و کارایی محصول نهایی حفظ شود. مواد حامل گاهی استریل می‌شوند و گاهی نیازی به استریل‌سازی ندارند، اما بهتر است که آن‌ها را استریل کرد. این امر زمانی اهمیت پیدا می‌کند که رشد اکثر باکتری‌ها در حامل اتفاق بیفتد. در صورتی که تعداد این باکتری‌های ناخواسته بیشتر از باکتری‌های مورد نظر باشد، در نهایت تعداد ریزجانداران ناخواسته نسبت به سویه هدف بیشتر خواهد شد. بنابراین کاهش تعداد باکتری‌های ناخواسته امری ضروری است. هر دو نوع حامل استریل و غیر استریل می‌توانند برای تلقیح میکروب‌های هدف و تولید مایه‌تلقیح مورد استفاده قرار بگیرند. بدون شک یک حامل استریل، مزایای بیشتری نسبت به حالت غیر استریل آن دارد (باشان و همکاران، ۲۰۱۴). با این وجود محصولات استریل دارای معایب دیگری از جمله هزینه بالا، نیاز به نیروی کار اضافی و فرآیندهای ضدعفونی در حین بسته‌بندی هستند. مایه‌تلقیح‌ها به دو شکل بذرمال و استفاده مستقیم در خاک کاربرد دارند. فرمولاسیون پودری برای تیمار بذر و فرمولاسیون گرانول برای استفاده مستقیم در خاک، مناسب هستند (دنتون و همکاران، ۲۰۱۸). تولید فرمولاسیون‌های مناسب و با کیفیت بالا معمولاً دارای برخی معایب از جمله هزینه بالا، نیاز به نیروی کار زیاد و روش‌های هزینه‌بر هستند. امروزه توسعه مایه‌تلقیح‌ها شامل استراتژی‌های خلاقانه‌ای است که هدف آنها افزایش عملکرد مایه‌تلقیح، افزایش عمر مفید و توسعه نسل جدیدی از فرمولاسیون‌ها است. بهترین جایگزین‌ها برای فرمولاسیون‌های پودری، فرمولاسیون‌های مبتنی بر مایعات و آلژینات‌ها هستند (مارتینز-کانو و همکاران، ۲۰۲۲).

حامل‌های جامد ممکن است نیاز به تغییر داشته باشند، زیرا در حال حاضر مشتریان به سایر فرمولاسیون‌ها علاقه‌مند هستند.

فرآیند استریل‌سازی حامل شامل مراحل مختلفی است: اولین مرحله شامل انتخاب یک ماده حامل مناسب است که می‌تواند شامل پیت، لیگنیت، ورمیکولیت یا سایر مواد آلی و معدنی باشد. ماده انتخاب‌شده باید با سویه میکروبی سازگار باشد و رشد آن را مهار نکند. در مرحله بعد ماده حامل انتخاب شده با آسیاب و الک کردن به اندازه ذرات مطلوب تبدیل می‌شود. این مرحله تضمین می‌کند که ماده یکنواخت است و به راحتی می‌تواند استریل شود. قبل از استریل‌سازی، ممکن است حامل تحت فرآیندهای پیش‌تیمار مانند شستشو و خشک کردن قرار گیرد تا آلودگی های فیزیکی حذف شده و بار میکروبی کاهش یابد. در مراحل بعدی باتوجه به ماهیت کار، چندین روش برای استریل‌سازی حامل به کار گرفته می‌شود که شامل: الف- اتوکلاو کردن: این روش رایج است که در آن ماده حامل تحت بخار با فشار بالا در دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس (۲۵۰ درجه فارنهایت) برای حدود ۱۵-۳۰ دقیقه قرار می‌گیرد. این روش به طور مؤثر تمام ریزجانداران از جمله اسپورها را از بین می‌برد. ب- پرتودهی گاما: این روش شامل قرار دادن حامل در معرض پرتوهای گاما است که به عمق ماده نفوذ کرده و ریزجانداران را نابود می‌کند. این روش به‌ویژه برای تولید در مقیاس بزرگ مفید است. ج- استریل‌سازی با حرارت خشک: ماده حامل در معرض حرارت خشک با دمای بین ۱۶۰-۱۷۰ درجه سلسیوس (۳۲۰-۳۳۸ درجه فارنهایت) برای ۲-۳ ساعت قرار می‌گیرد. این روش مؤثر است اما ممکن است خواص فیزیکی برخی حامل‌ها را تغییر دهد. د- استریل‌سازی شیمیایی: مواد شیمیایی مانند اکسید اتیلن یا فرمالدئید می‌توانند برای استریل‌سازی حامل استفاده شوند. با این حال، این روش نیاز به کار دقیق و

تهویه کامل برای حذف مواد شیمیایی باقی‌مانده دارد (عبدالفتاح و همکاران، ۲۰۱۳؛ الو و همکاران، ۲۰۲۲؛ کائور و کائور، ۲۰۲۳).

استرلیزاسیون کامل و استرلیزاسیون جزئی دو رویکرد مختلف برای از بین بردن ریزجانداران در فرایندهای صنعتی و پزشکی هستند. تفاوت‌های اصلی بین این دو روش به میزان و نوع ریزجانداران که باید از بین بروند و نیز به کاربردهای خاص هر روش برمی‌گردد. در استرلیزاسیون کامل از بین بردن تمامی ریزجانداران زنده از یک سطح، محیط یا ماده انجام می‌پذیرد و هیچ گونه ریزجاندار زنده‌ای باقی نمی‌ماند. این روش‌ها شامل حرارت مرطوب (اتوکلاو)، حرارت خشک، مواد شیمیایی قوی، تابش و فیلتراسیون می‌باشند. استرلیزاسیون کامل تضمین کاملی برای حذف همه ریزجانداران ارائه می‌دهد و برای کاربردهای پزشکی و آزمایشگاهی مناسب است، اما نیاز به تجهیزات و زمان بیشتری دارد و ممکن است به مواد حساس آسیب برساند. در مقابل، استرلیزاسیون جزئی به معنای کاهش تعداد ریزجانداران تا حد ایمن است و تمامی ریزجانداران را از بین نمی‌برد. روش‌های استرلیزاسیون جزئی شامل پاستوریزاسیون، استفاده از مواد ضدعفونی کننده ملایم و فیلتراسیون با منافذ بزرگتر می‌باشند. این روش‌ها سریع‌تر و ارزان‌تر هستند و برای کاربردهایی که نیاز به استرلیزاسیون کامل ندارند، مانند تولید مواد غذایی، مناسب‌اند. با توجه به نیاز و شرایط خاص هر کاربرد، یکی از این دو روش انتخاب می‌شود تا خطر آلودگی کاهش یابد و ایمنی و کیفیت محصول نهایی تضمین شود (سیلیندر و اوذر، ۲۰۰۹).

پس از استریل‌سازی، ماده حامل باید با تکنیک‌های استریل، فرآوری و آماده‌سازی شود تا از آلودگی مجدد جلوگیری شود. این شامل استفاده از ظروف استریل، ابزارهای استریل و حفظ محیط ضدعفونی شده است. در مرحله بعد، حامل با سویه‌های میکروبی مطلوب تلقیح می‌شود. این فرآیند نیز تحت شرایط استریل انجام می‌شود تا اطمینان حاصل شود که فقط میکروب‌های مفید معرفی می‌شوند. اقدامات کنترل کیفیت برای تأیید اثربخشی فرآیند استریل‌سازی ضروری است (وانگ و همکاران، ۲۰۱۵). نمونه‌هایی از حامل استریل شده برای وجود آلودگی‌ها بررسی می‌شوند. علاوه بر این، زنده‌مانی و تراکم جمعیت میکروب‌های تلقیح شده نیز پایش می‌شود (بارتی و سوریاوانشی، ۲۰۲۱). حامل تلقیح شده سپس در ظروف استریل بسته‌بندی می‌شود تا از آلودگی در طول نگهداری و حمل و نقل جلوگیری شود. شرایط مناسب نگهداری، مانند کنترل دما و رطوبت، برای اطمینان از طول عمر و کارایی کود زیستی اعمال می‌شود.

بسته‌بندی

بسته‌بندی کودهای زیستی نقش اساسی در تضمین کیفیت و کارایی آنها در طول چرخه عمر آنها ایفا می‌کند. یک بسته‌بندی مناسب از کودهای زیستی در برابر عوامل محیطی مانند رطوبت، دمای شدید و تابش UV محافظت می‌کند که می‌تواند محتویات میکروبی را تخریب کرده و کارایی را کاهش دهد. با حفظ شرایط بهینه، بسته‌بندی عمر مفید کودهای زیستی را افزایش داده، قابلیت زیستی میکروب‌ها را حفظ کرده و از آلودگی جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، بسته‌بندی‌هایی که برای راحتی حمل و استفاده طراحی شده‌اند، تجربه کاربری را بهبود می‌بخشند و استفاده مداوم و مؤثر در مزرعه را ترویج می‌کنند. مواد سبک و بادوام نیز به کارایی هزینه در تولید و حمل و نقل کمک کرده و گزینه‌های بسته‌بندی عمده می‌توانند هزینه‌های واحد را کاهش دهند (ساکپیرم و همکاران، ۲۰۲۱).

ماهیت ماده مورد استفاده برای بسته‌بندی یک مایه‌تلقیح بسیار مهم و تاثیرگذار بر کیفیت آن است. بسته باید تبادل رطوبت را مهار کند اما اجازه تبادل اکسیژن را بدهد. یک محصول استریل باید در هنگام بسته‌بندی مواد انتخاب شود. تعدادی از مواد برای اتوکلاو مناسب‌تر هستند اما حساس به تشعشع هستند و ممکن است توسط تشعشع آسیب ببینند. لذا انتخاب مواد بسته‌بندی نیز یک مرحله

حیاتی در فرآیند است (سیف و همکاران، ۲۰۲۱). فراتر از حفاظت و راحتی، بسته‌بندی نیز نقش مهمی در برندینگ، انطباق با مقررات و پایداری دارد. بسته‌بندی با کیفیت و دارای برچسب‌های واضح اعتماد مصرف‌کننده را جلب کرده و اطلاعات ضروری مانند دستورالعمل‌های استفاده و هشدارهای ایمنی را ارائه می‌دهد. مواد بسته‌بندی سازگار با محیط زیست، مانند گزینه‌های قابل تجزیه یا بازیافت، با کشاورزی پایدار و کودهای زیستی همخوانی داشته و برای مصرف‌کنندگان دوستدار محیط زیست جذاب است. طراحی کارآمد بسته‌بندی ضایعات را به حداقل رسانده و فضای ذخیره‌سازی را بهینه می‌کند، اطمینان حاصل می‌کند که محصول سالم و مؤثر تا زمان رسیدن به مصرف‌کننده نهایی باقی می‌ماند. در کل، توجه دقیق به بسته‌بندی برای حفظ یکپارچگی، کیفیت و بازارپذیری کودهای زیستی ضروری است (ساکپیرم و همکاران، ۲۰۲۱؛ ساهو و همکاران، ۲۰۲۱).

اولین کود زیستی (مایه تلقیح ریزوبیوم) در بطری‌های شیشه‌ای آماده شد، زیرا این بطری‌ها به دلیل مقاومت بیشتر در مقابل اتوکلاو شدن، بسته‌شدن محکم و امکان مشاهده محصول توسط خریدار، مناسب بودند (کاتروکس و همکاران، ۲۰۰۱؛ الساخاوی و همکاران، ۲۰۲۱). بعد از آن، قوطی‌های فلزی جایگزین بطری‌های شیشه‌ای شدند، اما نتوانستند به اندازه بطری‌های شیشه‌ای رایج شوند. در حال حاضر، بسته‌های پلاستیکی برای تولید انبوه کودهای زیستی استفاده می‌شوند. استفاده از بسته‌های پلاستیکی به دلایلی همچون سهولت در کنترل و حمل، تبادل گازی بالا، انتقال نسبتاً کم رطوبت و بسته شدن محکم بر اثر حرارت مورد توجه قرار گرفته است. در انتخاب بسته‌های پلی‌اتیلنی باید عواملی نظیر تأثیر تابش اشعه گاما، وجود هوای محبوس شده و ظرفیت تبادل گازی، محتوای رطوبت و تحمل نسبت به اتوکلاو مد نظر قرار گیرد. این بسته‌ها باید ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مناسبی داشته باشند تا به عنوان حامل‌های مؤثر عمل کنند (آرپیتا و برهماپراکاش، ۲۰۱۶؛ سیف و همکاران، ۲۰۲۱).

مقایسه ویژگی‌های سه نوع پلیمر مورد استفاده در بسته‌بندی کودهای زیستی شامل پلی‌اتیلن کم‌چگال (LDPE[۴۹])، پلی‌اتیلن پرچگال (HDPE[۵۰]) و پلی‌پروپیلن نشان می‌دهد که پلی‌اتیلن کم‌چگال دارای وزن مولکولی بین ۱۵۰۰ تا ۷۰۰۰، ضخامت بین ۰/۰۳۸ تا ۰/۰۸ میلی‌متر و ظاهر نیمه‌شفاف است. این پلیمر نقطه ذوب ۸۹ تا ۹۰ درجه سلسیوس دارد و در فرآیند اتوکلاو پذیری ضعیف عمل می‌کند، اما ثبات خوبی در مقابل تابش دارد. نفوذپذیری آن برای گازهای CO_2، N2 و O_2 به ترتیب ۲۸، ۷/۵ و ۲/۵ است و ویژگی تبادل گازی خوبی دارد. پلی‌اتیلن پرچگال با وزن مولکولی بین ۲۵۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰، ضخامت ۰/۸ تا ۰/۱ میلی‌متر و ظاهر نیمه‌شفاف تا تیره، نقطه ذوب ۱۰۵ تا ۱۲۰ درجه سلسیوس دارد و اتوکلاو پذیری آن متوسط است. این پلیمر نیز در مقابل تابش ثبات خوبی دارد و نفوذپذیری آن برای گازهای CO_2، N_2 و O_2 به ترتیب ۶/۵، ۱/۶ و ۰/۵ است که ویژگی تبادل گازی متوسطی را نشان می‌دهد. پلی‌پروپیلن با ضخامت ۰/۰۵ تا ۰/۰۹میلی‌متر و ظاهر شفاف، نقطه ذوب ۱۲۰ تا ۱۳۰ درجه سلسیوس دارد و در فرآیند اتوکلاو پذیری خوب عمل می‌کند. این پلیمر در مقابل تابش نسبتا خوب است و نفوذپذیری آن برای گازهای CO_2، N_2 و O_2 به ترتیب ۶، ۲ و ۰/۴ است که مانند HDPE ویژگی تبادل گازی متوسطی دارد. با توجه به این ویژگی‌ها، هر یک از این پلیمرها می‌توانند در کاربردهای مختلف بسته به نیازهای خاص مورد استفاده قرار گیرند (صالیح و همکاران، ۲۰۱۳؛ مک آینیس، ۲۰۲۳).

نتیجه‌گیری

مروری بر پیشرفت‌ها و چالش‌های موجود در فرمولاسیون مایه تلقیح‌های میکروبی نشان می‌دهد که این حوزه از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا تأثیر مستقیم بر کارایی و پایداری این محصولات دارد. انتخاب و

[۴۹] Low-Density Polyethylene

[۵۰] High-Density Polyethylene

بهینه‌سازی سویه‌های میکروبی، به همراه استفاده از حامل‌های مناسب، نقش اساسی در بهبود عملکرد مایه تلقیح‌ها ایفا می‌کند. فرمولاسیون‌های مختلف، از جمله جامد (پودری و گرانوله)، مایع و محصورسازی میکروب در ماتریکس‌های پلیمری یا ژل و بستر سیال خشک شده هر کدام دارای مزایا و معایب خاص خود هستند که باید بر اساس نیاز و شرایط محیطی انتخاب شوند.

برای دستیابی به نتایج مطلوب، پژوهش‌های بیشتری در زمینه بهینه‌سازی فرمولاسیون‌ها و فهم بهتر از تعاملات بین میکروب‌ها و محیط زیست ضروری است. این تلاش‌ها می‌تواند به توسعه محصولات با کارایی بالاتر، کاهش هزینه‌ها و افزایش پایداری زیست‌محیطی منجر شود. در نهایت، ارتقاء کیفیت و کارایی مایه تلقیح‌های میکروبی می‌تواند به بهبود سلامت خاک و افزایش بهره‌وری محصولات کشاورزی کمک شایانی کند، که این خود به تأمین سلامت خاک و پایداری کشاورزی کمک خواهد کرد.

اعلام تعارض منافع

این مقاله مستخرج از طرح تحقیقاتی پسادکترا به شماره ۴۰۱۵۷۷۲ می‌باشد که توسط بنیاد ملی علم ایران (صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF))، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری و همچنین وزارت جهاد کشاورزی (سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی) تامین مالی و حمایت شده است و در آن هیچ یک از پژوهشگران تعارض منافع ندارند.

فهرست منابع

۱. اخگر، ع.ر.، صادقی گوغری، م.، عباس زاده دهجی، پ.، صابری ریسه، ر. ۱۴۰۰. توانایی باکتری های سودوموناس فلوروسنت در افزایش زیست فراهمی فسفر خاک و بررسی چند فرمولاسیون از جدایه‌های برتر. زیست شناسی خاک، جلد ۹، شماره ۲: ۱۲۲-۱۰۷.

۲. آرمنده، م.، محمودی، ن.، فلاح نصرت‌آباد، ع.ر. ۱۳۹۷. جداسازی و شناسایی باکتری‌های حل‌کننده فسفات از مزارع پرورش ماهیان گرمابی به‌عنوان کاندیدای کود زیستی فسفره. نشریه علمی‌پژوهشی فیزیولوژی و بیوتکنولوژی آبزیان، ۶(۴): ۱۲۱-۱۴۰.

۳. اسدی رحمانی، ه.، خاوازی، ک.، اصغرزاده، ا.، رجالی، ف.، افشاری، میترا. ۱۳۹۱. کودهای زیستی در ایران: فرصتها و چالشها ، مجله پژوهشهای خاک، ۲۶ (۱): ۸۷-۷۸.

۴. اصغرزاده، ا.، ثقفی، ک.، فتاحی فر، ا.، جناقی، م.، علیزاده، ن. ۱۴۰۲. تأثیر باکتری‌های محرک رشد بر رشد هیف‌های قارچ دکمه‌ای و کنترل عوامل بیماری‌زا در شرایط آزمایشگاهی. زیست شناسی خاک، جلد ۱۱، شماره ۲: ۱۵۴-۱۳۹.

۵. امامی، ن.، حسنی، ا.، واعظی، ع.ر.، بابااکبری ساری، م. ۱۴۰۰. بررسی تأثیر کشت چمن و کودهای زیستی بر برخی ویژگی‌های کیفی خاک. زیست شناسی خاک، جلد ۹، شماره ۱: ۷۱-۶۱.

۶. خاوازی، ک و ملکوتی م ج. ۱۳۸۱. ضرورت تولید صنعتی کودهای بیولوژیک در کشور، مجموعه مقالات. ناشر: آموزش کشاورزی وابسته به معاونت آموزشی وترویج کشاورزی (آموزش کشاورزی وابسته به دفتر خدمات تکنولوژی آموزشی وزارت جهاد کشاورزی)

۷. خسروی، ه. ۱۴۰۲. تأثیر مایه‌زنی باکتری‌های محرک رشد گیاه بر شاخص‌های رشد گندم در شرایط آبیاری با آب شور. زیست شناسی خاک، جلد ۱۱، شماره ۱: ۳۱-۱۷.

۸. خوشرو، ب.، ساریخانی م ر. ۱۳۹۷. جداسازی و شناسایی باکتری‌های حل‌کننده فسفات مقاوم به دما برای استفاده در کود میکروبی فسفاته. مجله آب و خاک. جلد ۳۲، شماره ۱، ۱۶۷- ۱۵۵.

۹. خوشرو، ب.، ساریخانی، م.ر.، ریحانی‌تبار، ع.، اوستان، ش. و ملبوبی، م.ع. ۱۴۰۱. ارزیابی توان جدایه‌های ریزوسفری در انحلال Zn کم‌محول در شرایط درون‌شیشه‌ای و بررسی توانایی آنها در تأمین Zn گیاه ذرت، دانش کشاورزی وتولید پایدار، ۳۲ (۳): ۱۸۳-۱۹۹.

۱۰. ساریخانی، م. ر.، علی‌اصغرزاد، ن و خوشرو، ب. ۱۳۹۶. بررسی اثربخشی باکتریهای حل‌کننده فسفات در قالب کود میکروبی فسفاته بر گیاه ذرت. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. جلد ۴۹، شماره ۱، ۸۱-۷۱.

۱۱. شریعتی، ش.، علیخانی، ح و پوربابائی، ا.ع. ۱۳۹۲. بررسی پتانسیل کاربرد نانو ذره نانوپروسیل-۱ (lus-1) به عنوان حامل باکتری حل کننده فسفات در فرایند تولید زادمایه نانوبیولوژیک ." مجله زیست شناسی خاک، ۱(۲): ۹۲-۸۳.

۱۲. شریعتی، ش.، علیخانی، ح و شریعتی، ش. ۱۳۹۸. استفاده از زادمایه‌های باکتری سودوموناس فلور سنس محرک رشد گیاه در افزایش شاخص‌های رشد گیاه گندم. مجله تحقیقات کاربردی خاک، ۷ (۱): ۱۷۶-۱۶۵.

۱۳. علیخانی، ح.، شریعتی ش، اعتصامی ح و فلاح نصرت‌آباد، ع. ۱۴۰۱ .ازتوباکتر به عنوان کود زیستی محرک رشد گیاه برنج". مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۳): ۶۳۳-۶۶۱.

۱۴. فلاح نصرت آباد، ع.ر. ۱۴۰۱. بررسی روش‌های انحلال فسفات‌های نامحلول توسط ریزجانداران حل‌کننده فسفات. زیست شناسی خاک، جلد ۱۰، شماره ۱: ۱۱۰-۹۳.

۱۵. فلاح نصرت آباد، ع.، آرمنده، م. ۱۴۰۰. نقش ریزجانداران حل‌کننده فسفات در مدیریت فسفر در کشاورزی، موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، انتشارات موسسه تحقیقات خاک و آب کشور.

۱۶. فلاح نصرت آباد، ع.، آفتاب‌طلب، ا و شریعتی، ش. ۱۳۹۹. بهبود خصوصیات فیزیکو شیمیایی خاک شور آهکی با استفاده تلفیقی از کود نانوبیولوژیک و کود دامی و اثربخشی بر عملکرد گیاه ذرت". مجله تحقیقات غلات، ۱۰ (۳): ۲۷۱-۲۵۹.

۱۷. مشیری، ف.، صفرپورحقیقی، ش.، بصیرت، م.، طهرانی، م.م.، هادی اسدی رحمانی، ه.، رجالی ف.، بلالی م. ر.، بازرگان ک. ، ۱۴۰۲. گزارش فنی برآورد کود مورد نیاز محصولات زراعی و باغی برای سال‌های زراعی ۱۳۹۹ - ۱۴۰۲، انتشارات موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، کرج ایران.

18. Abd El-Fattah, D.A., Eweda, W.E., Zayed, M.S. and Hassanein, M.K., 2013. Effect of carrier materials, sterilization method, and storage temperature on survival and biological activities of Azotobacter chroococcum inoculant. *Annals of Agricultural Sciences*, *58*(2), pp.111-118.

19. Ahemad, M. and Khan, M.S., 2012. Effect of fungicides on plant growth promoting activities of phosphate solubilizing Pseudomonas putida isolated from mustard (Brassica compestris) rhizosphere. *Chemosphere*, *86*(9), pp.945-950.

20. Aksani, D., Ginting, R.C.B. and Purwani, J., 2021, February. The assay of carrier material and bacteria isolate formula as a biofertilizer on soybean

in Inceptisols from West Java. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 648, No. 1, p. 012193). IOP Publishing.

21. Akter, T., Shah, S.T., Al Mamun, M.A., Bari, M.L., Begum, S., Rahman, N. and Miah, M.I., 2023. Costeffective formulation of bio-fertilizer using agricultural residues as carriers and determination of shelflife of bio-fertilizer inoculants. *Dhaka University Journal of Biological Sciences*, *32*(2), pp.189-199.
22. Ali, S.M., Hamza, M.A., Amin, G., Fayez, M., El-Tahan, M., Monib, M. and Hegazi, N.A., 2005. Production of biofertilizers using baker's yeast effluent and their application to wheat and barley grown in north Sinai deserts: (Produktion von Biodüngern unter Verwendung von Backhefeabwasser und ihre Anwendung zu Weizen-und Gerstenanbau im Norden der Sinai-Wüste). *Archives of Agronomy and Soil Science*, *51*(6), pp.589-604.
23. Alley, M.M. and B. Vanlauwe, *The role of fertilizers in integraded plant nutrient management*. : Citeseer, 2009.
24. Allouzi, M.M.A., Allouzi, S.M.A., Keng, Z.X., Supramaniam, C.V., Singh, A. and Chong, S., 2022. Liquid biofertilizers as a sustainable solution for agriculture. *Heliyon*, *8*(12).
25. Aloo, B.N., Mbega, E.R., Makumba, B.A. and Tumuhairwe, J.B., 2022. Effects of carrier materials and storage temperatures on the viability and stability of three biofertilizer inoculants obtained from potato (Solanum tuberosum L.) rhizosphere. *Agriculture*, *12*(2), p.140.
26. Arora, N.K., Khare, E. and Maheshwari, D.K., 2011. Plant growth promoting rhizobacteria: constraints in bioformulation, commercialization, and future strategies. *Plant growth and health promoting bacteria*, pp.97-116.
27. Arpitha, P.S. and Brahmaprakash, G.P., 2016. Evaluation of different packaging materials for microbial inoculants. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, *10*(2), pp.1131-1135.
28. Atieno, M., Herrmann, L., Okalebo, R. and Lesueur, D., 2012. Efficiency of different formulations of Bradyrhizobium japonicum and effect of co-inoculation of Bacillus subtilis with two different strains of Bradyrhizobium japonicum. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *28*, pp.2541-2550.
29. Bangash, N., Mahmood, S., Akhtar, S., Hayat, M.T., Gulzar, S. and Khalid, A., 2021. Formulation of biofertilizer for improving growth and yield of wheat in rain dependent farming system. *Environmental Technology & Innovation*, *24*, p.101806.
30. Bashan, Y., de-Bashan, L.E., Prabhu, S.R. and Hernandez, J.P., 2014. Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: formulations and practical perspectives (1998–2013). *Plant and soil*, *378*, pp.1-33.
31. Bashan, Y., Hernandez, J.P., Leyva, L.A. and Bacilio, M., 2002. Alginate microbeads as inoculant carriers for plant growth-promoting bacteria. *Biology and Fertility of Soils*, *35*, pp.359-368.
32. Bazilah, A.B.I., Sariah, M., Abidin, M.A.Z. and Yasmeen, S., 2011. Influence of carrier materials and storage temperature on survivability of Rhizobial inoculants. *Asian J Plant Sci*, *10*, pp.331-337.
33. Behl, K., Jaiswal, P. and Pabbi, S., 2024. Recent Advances in Microbial and Nano-Formulations for Effective Delivery and Agriculture Sustainability. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, p.103180.
34. Bharti, N. and Suryavanshi, M., 2021. Quality control and regulations of biofertilizers: Current scenario and future prospects. In *Biofertilizers* (pp. 133-141). Woodhead Publishing.

35. Bharti, N., Sharma, S.K., Saini, S., Verma, A., Nimonkar, Y. and Prakash, O., 2017. Microbial plant probiotics: problems in application and formulation. Probiotics and plant health, pp.317-335.
36. Brahmaprakash, G.P., Sahu, P.K., Lavanya, G., Gupta, A., Nair, S.S. and Gangaraddi, V., 2020. Role of additives in improving efficiency of bioformulation for plant growth and development. In *Frontiers in soil and environmental microbiology* (pp. 1-10). CRC Press.
37. Çakmakçı, R., 2019. A review of biological fertilizers current use, new approaches, and future perspectives. *International Journal of Innovative Studies in Sciences and Engineering Technology*, *5*(7), 83-92.
38. Catroux, G., Hartmann, A. and Revellin, C., 2001. Trends in rhizobial inoculant production and use. *Plant and soil*, *230*(1), pp.21-30.
39. Chakraborty, T. and Akhtar, N., 2021. Biofertilizers: Characteristic features and applications. *Biofertilizers: Study and Impact*, pp.429-489.
40. Chandran, M., Manisha, A. and Subashini, A., 2014. Production of phosphate biofertilizer using lignocellulosic waste as carrier material. *Asian Journal of Chemistry*, *26*(7), p.2065.
41. Chaudhary, T., Dixit, M., Gera, R., Shukla, A.K., Prakash, A., Gupta, G. and Shukla, P., 2020. Techniques for improving formulations of bioinoculants. *3 Biotech*, *10*, pp.1-9.
42. Chromkaew, Y., Kaeomuangmoon, T., Mawan, N., Mukjang, N. and Khongdee, N., 2023. Is coconut coir dust an efficient biofertilizer carrier for promoting coffee seedling growth and nutrient uptake?. *PeerJ*, *11*, p.e15530.
43. Chuen, N.L., Ghazali, M.S.M., Hassim, M.F.N., Bhat, R. and Ahmad, A., 2021. Agro-waste-derived silica nanoparticles (Si-NPs) as biofertilizer. In *Valorization of agri-food wastes and by-products* (pp. 881-897). Academic Press.
44. Clayton, G.W., Rice, W.A., Lupwayi, N.Z., Johnston, A.M., Lafond, G.P., Grant, C.A. and Walley, F., 2004. Inoculant formulation and fertilizer nitrogen effects on field pea: Nodulation, N2 fixation and nitrogen partitioning. *Canadian Journal of Plant Science*, *84*(1), pp.79-88.
45. Deaker, R., Roughley, R.J. and Kennedy, I.R., 2004. Legume seed inoculation technology—a review. *Soil biology and biochemistry*, *36*(8), pp.1275-1288.
46. Delangiz, N., Khoshru, B., Asgari Lajayer, B., Ghorbanpour, M. and Kazemalilou, S., 2020. Molecular mechanisms of heavy metal tolerance in plants. *Cellular and Molecular Phytotoxicity of Heavy Metals*, pp.125-136.
47. Dellagnezze, B.M. and Sierra-Garcia, I.N., 2023. Immobilization of microbial inoculants for improving soil nutrient bioavailability. In *Microbial Inoculants* (pp. 161-181). Academic Press.
48. Denton, M., Farquharson, E., Ryder, M., Rathjen, J. and Ballard, R., 2018. Best options for optimal performance from rhizobial inoculants. *GRDC update, Adelaide*.
49. Dey, A., 2021. Liquid biofertilizers and their applications: An overview. *Environmental and Agricultural Microbiology: Applications for Sustainability*, pp.275-292.
50. Dineshkumar, R., Kumaravel, R., Gopalsamy, J., Sikder, M.N.A. and Sampathkumar, P., 2018. Microalgae as bio-fertilizers for rice growth and seed yield productivity. *Waste and biomass valorization*, *9*, pp.793-800.
51. Dini, I.R. and Wulandari, M., 2022, June. Application of Bacillus cereus Biofertilizer Formulation of Soybean (Glycine max L. Merril) Growth and Yield Support Sustainable Agriculture on Peatlands. In *IOP Conference*

Series: Earth and Environmental Science (Vol. 977, No. 1, p. 012022). IOP Publishing.

52. Edgerton, M.D.J.P.p., *Increasing crop productivity to meet global needs for feed, food, and fuel*. 149(1): p. 7–13, 2009.
53. Egamberdieva, D., Kucharova, Z., Davranov, K., Berg, G., Makarova, N., Azarova, T., Chebotar, V., Tikhonovich, I., Kamilova, F., Validov, S.Z. and Lugtenberg, B., 2011. Bacteria able to control foot and root rot and to promote growth of cucumber in salinated soils. *Biology and fertility of soils*, *47*, pp.197-205.
54. Egamberdiyeva, D., 2007. The growth and nutrient uptake of maize inoculated with plant growth promoting bacteria affected by different soil types. *Applied Soil Ecology*, *36*, pp.184-189.
55. Elmerich, C. and Newton, W.E. eds., 2007. *Associative and endophytic nitrogen-fixing bacteria and cyanobacterial associations* (Vol. 5). Dordrecht: Springer.
56. Elsakhawy, T., Ghazi, A. and Abdel-Rahman, M.A., 2021. Developing liquid rhizobium inoculants with enhanced long-term survival, storage stability, and plant growth promotion using ectoine additive. *Current Microbiology*, *78*, pp.282-291.
57. Fages, J., 1990. An optimized process for manufacturing an Azospirillum inoculant for crops. *Applied microbiology and biotechnology*, *32*, pp.473-478.
58. Fasusi, O.A., Cruz, C. and Babalola, O.O., 2021. Agricultural Sustainability: Microbial Biofertilizers in Rhizosphere Management. Agriculture 2021, 11, 163.
59. Freyer, B., Ellssel, P., Nyakanda, F. and Saussure, S., 2024. Exploring the off-farm production, marketing and use of organic and biofertilisers in Africa: A scoping study. Report to the European Commission. DeSIRA-LIFT European Union.
60. Glaser, B., 2007. Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *362*(1478), pp.187-196.
61. Goenadi, D.H., Mustafa, A.B. and Santi, L.P., 2018, August. Bio-organo-chemical fertilizers: a new prospecting technology for improving fertilizer use efficiency (FUE). In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 183, No. 1, p. 012011). IOP Publishing.
62. Gopi, G.K., Meenakumari, K.S., Anith, K.N., Nysanth, N.S. and Subha, P., 2020. Application of liquid formulation of a mixture of plant growth promoting rhizobacteria helps reduce the use of chemical fertilizers in Amaranthus (Amaranthus tricolor L.). *Rhizosphere*, *15*, p.100212.
63. Graham-Weiss, L., Bennett, M.L. and Paau, A.S., 1987. Production of bacterial inoculants by direct fermentation on nutrient-supplemented vermiculite. *Applied and environmental microbiology*, *53*(9), pp.2138-2141.
64. Hale, L., Luth, M. and Crowley, D., 2015. Biochar characteristics relate to its utility as an alternative soil inoculum carrier to peat and vermiculite. *Soil Biology and Biochemistry*, *81*, pp.228-235.
65. Hale, L., Luth, M., Kenney, R. and Crowley, D., 2014. Evaluation of pinewood biochar as a carrier of bacterial strain Enterobacter cloacae UW5 for soil inoculation. *Applied Soil Ecology*, *84*, pp.192-199.
66. Hamed, R., Jodeh, S. and Alkowni, R., 2024. Nano bio fertilizer capsules for sustainable agriculture. *Scientific Reports*, *14*(1), 13646.

67. Hassan, T.U. and Bano, A., 2016. Biofertilizer: a novel formulation for improving wheat growth, physiology and yield. Pak. J. Bot, 48(6), pp.2233-2241.
68. He, D. and Wan, W., 2021. Phosphate-solubilizing bacterium Acinetobacter pittii gp-1 affects rhizosphere bacterial community to alleviate soil phosphorus limitation for growth of soybean (Glycine max). *Frontiers in Microbiology*, *12*, p.737116. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.737116.
69. 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*, pp.68-75.
70. Hegde, S.V. and Brahmaprakash, G.P., 1992. A dry granular inoculant of Rhizobium for soil application. *Plant and Soil*, *144*, pp.309-311.
71. Hernández-Álvarez, C., Peimbert, M., Rodríguez-Martin, P., Trejo-Aguilar, D. and Alcaraz, L.D., 2023. A study of microbial diversity in a biofertilizer consortium. *Plos one*, *18*(8), p.e0286285.
72. Herridge, D.F., 2008. Inoculation technology for legumes. In *Nitrogen-fixing leguminous symbioses* (pp. 77-115). Dordrecht: Springer Netherlands.
73. Herrmann, L. and Lesueur, D., 2013. Challenges of formulation and quality of biofertilizers for successful inoculation. *Applied microbiology and biotechnology*, *97*(20), pp.8859-8873.
74. Hoe, T.K., Sarmidi, M.R., Alwee, S.S.R.S. and Zakaria, Z.A., 2016. Recycling of oil palm empty fruit bunch as potential carrier for biofertilizer formulation. *Jurnal Teknologi*, *78*(2).
75. Jain, D., Sharma, J., Kaur, G., Bhojiya, A.A., Chauhan, S., Sharma, V., Suman, A., Mohanty, S.R. and Maharjan, E., 2021. Phenetic and molecular diversity of nitrogen fixating plant growth promoting Azotobacter isolated from semiarid regions of India. *BioMed Research International*, *2021*(1), p.6686283.
76. Jaiswal, A., Koli, D.K., Pabbi, S., Priya, H., Kumar, A., Mishra, R., Koli, G.K. and Dhaked, B.S., 2022. Effect of protective polymers and storage temperatures on shelf life of cyanobacterial liquid formulation. *Indian Journal of Ecology*, *49*(4), pp.1517-1525.
77. Jannin, V., Musakhanian, J. and Marchaud, D., 2008. Approaches for the development of solid and semi-solid lipid-based formulations. *Advanced drug delivery reviews*, *60*(6), pp.734-746.
78. Jha, C.K. and Saraf, M., 2012. Evaluation of multispecies plant-growth-promoting consortia for the growth promotion of Jatropha curcas L. *Journal of plant growth regulation*, *31*, pp.588-598.
79. John, R.P., Tyagi, R.D., Brar, S.K., Surampalli, R.Y. and Prévost, D., 2011. Bio-encapsulation of microbial cells for targeted agricultural delivery. Critical reviews in biotechnology, 31(3), pp.211-226.
80. Joshi, A., Kumar, S. and Kumar, V., 2021. A brief description on biofertilizers. *ACADEMICIA: An International Multidisciplinary Research Journal*, *11*(10), pp.90-96.
81. Joshi, S.K. and Gauraha, A.K., 2022. Global biofertilizer market: Emerging trends and opportunities. Trends of applied microbiology for sustainable economy, pp.689-697.
82. Kamath, A., Shukla, A., Saiyed, T., Bhatt, S., Rathod, H., Makwana, V., Soni, D., Banerjee, S. and Patel, D., 2023. Bioinoculants: the agrarian avengers. *Symbiosis*, *91*(1), pp.151-166.
83. Kaur, H., Athwal, S. and Garg, K., 2024. Futuristic Approaches in Biofertilizer Industry: Challenges, Opportunities, and Future Directions.

Metabolomics, Proteomics and Gene Editing Approaches in Biofertilizer Industry: Volume II, pp.15-33.

84. Kaur, R. and Kaur, S., 2023. Carrier-Based Biofertilizers. In *Metabolomics, Proteomes and Gene Editing Approaches in Biofertilizer Industry* (pp. 57-75). Singapore: Springer Nature Singapore.
85. Khan, M., 2023. *Formulation of Carrier-based Biofertilizer for Improvement of Growth and Physiology of Zea mays L* (Doctoral dissertation, Quaid I Azam university Islamabad).
86. Khan, S.T., 2022. Consortia-based microbial inoculants for sustaining agricultural activities. *Applied Soil Ecology*, *176*, p.104503.
87. Khoshru, B., Mitra, D., Joshi, K., Adhikari, P., Rion, S., Fadiji, A., Alizadeh, M., Priyadarshini, A., Senapati, A., Reza, M. and Panneerselvam, P., 2023. Decrypting the multi-functional biological activators and inducers of defense responses against biotic stresses in plants. Helidon 9 (3), 1145-1168.
88. Khoshru, B., Mitra, D., Mahakur, B., Sarikhani, M.R., Mondal, R., Verma, D. and Pant, K., 2020. Role of soil rhizobacteria in utilization of an indispensable micronutrient zinc for plant growth promotion. *J. Crit. Rev*, *21*, pp.4644-4654.
89. 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.
90. Kim, H.L., Weon, H.Y., Sohn, B.K., Choi, Y.H. and Kwack, Y.B., 2009. Microbial Community Changes in the Soil of Plastic Film House as Affected by Anaerobic Fermentation of Rice Bran or Wheat Bran. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, *42*(5), pp.341-347.
91. Kour, D., Rana, K.L., Yadav, A.N., Yadav, N., Kumar, M., Kumar, V., Vyas, P., Dhaliwal, H.S. and Saxena, A.K., 2020. Microbial biofertilizers: Bioresources and eco-friendly technologies for agricultural and environmental sustainability. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *23*, p.101487.
92. Kulkarni, K., Bhogale, G.M. and Nalawade, R., 2018. Adsorptive removal of fluoride from water samples using Azospirillum biofertilizer and lignite. *Korean Journal of Chemical Engineering*, *35*, pp.153-163.
93. Kumar, A., Saharan, B.S., Parshad, J., Gera, R., Choudhary, J. and Yadav, R., 2024. Revolutionizing Indian agriculture: the imperative of advanced biofertilizer technologies for sustainability. *Discover Agriculture*, *2*(1), p.24. https://doi.org/10.1007/s44279-024-00037-y.
94. Kumar, D., Kumar, R., Sakshi, Deepshikha and Kumar, A., 2024. Commercialization and Market Perspectives of Biofertilizers Through Advanced Approaches. In *Metabolomics, Proteomics and Gene Editing Approaches in Biofertilizer Industry: Volume II* (pp. 339-357). Singapore: Springer Nature Singapore.
95. Kumari, S. and Rani, N., 2024. Novel cereal bran based low-cost liquid medium for enhanced growth, multifunctional traits and shelf life of consortium biofertilizer containing Azotobacter chroococcum, Bacillus subtilis and Pseudomonas sp. *Journal of Microbiological Methods*, p.106952.
96. Kumawat, K.C., Singh, I., Nagpal, S., Sharma, P., Gupta, R.K. and Sirari, A., 2022. Co-inoculation of indigenous Pseudomonas oryzihabitans and Bradyrhizobium sp. modulates the growth, symbiotic efficacy, nutrient acquisition, and grain yield of soybean. *Pedosphere*, *32*(3), pp.438-451. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60085-1.

97. Lai, J., Azad, A.K., Sulaiman, W.M.A.W., Kumarasamy, V., Subramaniyan, V. and Alshehade, S.A., 2024. Alginate-based encapsulation fabrication technique for drug delivery: an updated review of particle type, formulation technique, pharmaceutical ingredient, and targeted delivery system. Pharmaceutics, 16(3), p.370.
98. Lavanya, G., Sahu, P.K. and Brahmaprakash, G.P., 2016. Survival and effectiveness of fluid bed dried formulation of microbial consortium on cowpea (Vigna unguiculata L.). *Environment and Ecology*, *34*(4D), pp.2440-2444.
99. Li, J., Wang, H., Wang, L., Yu, D. and Zhang, X., 2023. Stabilization effects of saccharides in protein formulations: A review of sucrose, trehalose, cyclodextrins and dextrans. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, p.106625.
100. Lodhi, R.S., Das, S. and Das, P., 2023. Recent Advances in Polymer Hydrogels for Agricultural Applications. *Novel Polymeric Materials for Environmental Applications*, pp.109-177.
101. Lu, S., Orr, J.F. and Buchanan, F.J., 2003. The influence of inert packaging on the shelf ageing of gamma-irradiation sterilised ultra-high molecular weight polyethylene. *Biomaterials*, *24*(1), pp.139-145.
102. Mahapatra, D.M., Satapathy, K.C. and Panda, B., 2022. Biofertilizers and nanofertilizers for sustainable agriculture: Phycoprospects and challenges. *Science of the total environment*, *803*, p.149990.
103. Majeed, Z., Ramli, N.K., Mansor, N. and Man, Z., 2015. A comprehensive review on biodegradable polymers and their blends used in controlled-release fertilizer processes. *Reviews in Chemical Engineering*, *31*(1), pp.69-95.
104. Malusá, E., Sas-Paszt, L. and Ciesielska, J.J.T.S.W.J., 2012. Technologies for beneficial microorganisms inocula used as biofertilizers. *The scientific world journal*, *2012*(1), p.491206.
105. 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.
106. 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.
107. McInnis, E., 2023. Exploring plastic waste identification and sorting through NIR spectroscopy and automated colour sorting.
108. Meftah Kadmiri, I., El Mernissi, N., Azaroual, S.E., Mekhzoum, M.E.M., Qaiss, A.E.K. and Bouhfid, R., 2021. Bioformulation of microbial fertilizer based on clay and alginate encapsulation. *Current microbiology*, *78*(1), pp.86-94.
109. Mikos-Szymańska, M., Schab, S., Rusek, P., Borowik, K., Bogusz, P. and Wyzińska, M., 2019. Preliminary study of a method for obtaining Brown coal and biochar based granular compound fertilizer. *Waste and Biomass Valorization*, *10*, pp.3673-3685.
110. Mishra, B.K. and Dadhich, S.K., 2010. Methodology of nitrogen biofertilizer production. *J. Adv. Dev. Res*, *1*(1), pp.3-6.
111. Mitra, D., Adhikari, P., Djebaili, R., Thathola, P., Joshi, K., Pellegrini, M., Adeyemi, N.O., Khoshru, B., Kaur, K., Priyadarshini, A. and Senapati, A., 2023. Biosynthesis and characterization of nanoparticles, its advantages, various aspects and risk assessment to maintain the sustainable

agriculture: Emerging technology in modern era science. *Plant Physiology and Biochemistry*, *196*, pp.103-120.

112. Moradi, S., Khoshru, B., Mitra, D., Mahakur, B., Das Mohapatra, P.K., Asgari Lajayer, B. and Ghorbanpour, M., 2021. Transcriptomics analyses and the relationship between plant and plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR). *Omics science for rhizosphere biology*, pp.89-111.
113. Nagendra Prasad, M.N., Sanjay, K.R., Shravya Khatokar, M., Vismaya, M.N. and Nanjunda Swamy, S., 2011. Health benefits of rice bran-a review. *J Nutr Food Sci*, *1*(3), pp.1-7.
114. Nehra, V. and Choudhary, M., 2015. A review on plant growth promoting rhizobacteria acting as bioinoculants and their biological approach towards the production of sustainable agriculture. *Journal of Applied and Natural Science*, *7*(1), pp.540-556.
115. Novinscak, A. and Filion, M., 2020. Long term comparison of talc-and peat-based phytobeneficial Pseudomonas fluorescens and Pseudomonas synxantha bioformulations for promoting plant growth. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *4*, p.602911.
116. Nussinovitch, A. and Nussinovitch, A., 2010. Beads and special applications of polymers for agricultural uses. *Polymer macro-and micro-gel beads: fundamentals and applications*, pp.231-253.
117. Odoh, C.K., Sam, K., Zabbey, N., Eze, C.N., Nwankwegu, A.S., Laku, C. and Dumpe, B.B., 2020. Microbial consortium as biofertilizers for crops growing under the extreme habitats. *Plant microbiomes for sustainable agriculture*, pp.381-424.
118. Pallavi, Chandra, D. and Sharma, A.K., 2017. Commercial microbial products: exploiting beneficial plant-microbe interaction. *Plant-Microbe Interactions in Agro-Ecological Perspectives: Volume 2: Microbial Interactions and Agro-Ecological Impacts*, pp.607-626.
119. PAYGOND, S.Y., UMASHANKAR, N., RAGHU, H., NAIK, L.K., BENHERLAL, P., SULTHANA, J.A., KUMAR, N.L. and SEENAPPA, C., 2024. Assessing the Impact of Corn-Rind-Carrier Based Biofertilizer on the Growth and Yield of Capsicum (Capsicum annuum L.). *Mysore Journal of Agricultural Sciences*, *58*(1).
120. Prasanna, R., Gupta, H., Yadav, V.K., Gupta, K., Buddhadeo, R., Gogoi, R., Bharti, A., Mahawar, H. and Nain, L., 2020. Prospecting the promise of cyanobacterial formulations developed using soil-less substrates as carriers. *Environmental technology & innovation*, *18*, p.100652.
121. Prasanna, R., Gupta, H., Yadav, V.K., Gupta, K., Buddhadeo, R., Gogoi, R., Bharti, A., Mahawar, H. and Nain, L., 2020. Prospecting the promise of cyanobacterial formulations developed using soil-less substrates as carriers. *Environmental Technology & Innovation*, *18*, p.100652.
122. Priyadharshini, C., Gnanachitra, M., Balachandar, D. and Jayanthi, D., 2022. Assessment of shelf-life and efficacy of the seed-coating delivery system of biofertilizers in maize. *International Journal of Plant & Soil Science*, *34*(22), pp.548-558.
123. Pub Med, 2024. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/?term=biofertilizer&filter=years.2009-2024
124. Puwanto, Samosir, F.A., Yuwariah, Y., Sumadi and Simarmata, T., 2019. Viability of Pseudomonas plecoglossicida and Rhizobium sp. LM-5 as liquid bacterial fertilizers in various formulated carriers. *Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR): Prospects for Sustainable Agriculture*, pp.185-193.
125. Qi XiLiang, Q.X., Su XiaoFeng, S.X., Guo HuiMing, G.H., Qi JunCang, Q.J. and Cheng HongMei, C.H., 2016. VdThit, a thiamine transport

protein, is required for pathogenicity of the vascular pathogen Verticillium dahliae.

126. Quynh, T.M., Thuy, N.T.T., An, T.X., Thom, N.T., Binh, N.V., Diep, T.B., Ha, N.T. and Luong, L.T.M., 2019. A beads-based biofertilizer containing Bacillus megaterium for cabbage. *Vietnam Journal of Science, Technology and Engineering*, *61*(4), pp.53-57.

127. Rai, P. and Nayak, S., 2021. Development of a biofertilizer for viticulture. *Agricultural Research Journal*, *58*(1).

128. 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.

129. Rakshit, A., Meena, V.S., Parihar, M., Singh, H.B. and Singh, A.K. eds., 2021. *Biofertilizers: Volume 1: Advances in Bio-inoculants*. Woodhead Publishing.

130. Rani, P., Rajput, S., Thakur, B. and Kaur, S., 2023. Immobilization and Co-mobilization: An Unexploited Biotechnological Tool for Enhancing Efficiency of Biofertilizers. In *Metabolomics, Proteomes and Gene Editing Approaches in Biofertilizer Industry* (pp. 219-236). Singapore: Springer Nature Singapore.

131. Rani, P., Rajput, S., Thakur, B. and Kaur, S., 2023. Immobilization and Co-mobilization: An Unexploited Biotechnological Tool for Enhancing Efficiency of Biofertilizers. In *Metabolomics, Proteomes and Gene Editing Approaches in Biofertilizer Industry* (pp. 219-236). Singapore: Springer Nature Singapore.

132. Rawat, P., Sharma, A., Shankhdhar, D. and Shankhdhar, S.C., 2022. Improvement of phosphorus uptake, phosphorus use efficiency, and grain yield of upland rice (Oryza sativa L.) in response to phosphate-solubilizing bacteria blended with phosphorus fertilizer. *Pedosphere*, *32*(5), pp.752-763. (https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.06.005).

133. Rekha, P.D., Lai, W.A., Arun, A.B. and Young, C.C., 2007. Effect of free and encapsulated Pseudomonas putida CC-FR2-4 and Bacillus subtilis CC-pg104 on plant growth under gnotobiotic conditions. *Bioresource technology*, *98*(2), pp.447-451.

134. Richa, 2023. Liquid Bio-Fertilizers: Prospects and Challenges. *Metabolomics, Proteomes and Gene Editing Approaches in Biofertilizer Industry*, pp.77-99.

135. Rieley, J. and Page, S., 2016. Tropical peatland of the world. *Tropical peatland ecosystems*, pp.3-32.

136. Rose, M.T., Deaker, R., Potard, S., Tran, C.K.T., Vu, N.T. and Kennedy, I.R., 2011. The survival of plant growth promoting microorganisms in peat inoculant as measured by selective plate counting and enzyme-linked immunoassay. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *27*, pp.1649-1659.

137. Sahu, P.K. and Brahmaprakash, G.P., 2016. Formulations of biofertilizers–approaches and advances. *Microbial inoculants in sustainable agricultural productivity: Vol. 2: Functional Applications*, pp.179-198.

138. Sahu, P.K., Gupta, A., Singh, M., Mehrotra, P. and Brahmaprakash, G.P., 2018. Bioformulation and fluid bed drying: A new approach towards an improved biofertilizer formulation. *Eco-friendly agro-biological techniques for enhancing crop productivity*, pp.47-62.

139. Saif, S., Abid, Z., Ashiq, M.F., Altaf, M. and Ashraf, R.S., 2021. Biofertilizer formulations. *Biofertilizers: Study and Impact*, pp.211-256.

140. Sakpirom, J., Nunkaew, T., Khan, E. and Kantachote, D., 2021. Optimization of carriers and packaging for effective biofertilizers to enhance Oryza sativa L. growth in paddy soil. *Rhizosphere*, *19*, p.100383.
141. Salih, S.E., Hamood, A.F. and Abd Alsalam, A.H., 2013. Comparison of the characteristics of LDPE: PP and HDPE: PP polymer blends. *Modern Applied Science*, *7*(3), p.33.
142. Schoebitz, M., López, M.D. and Roldán, A., 2013. Bioencapsulation of microbial inoculants for better soil–plant fertilization. A review. Agronomy for sustainable development, 33, pp.751-765.
143. Schoebitz, M., Simonin, H. and Poncelet, D., 2012. Starch filler and osmoprotectants improve the survival of rhizobacteria in dried alginate beads. *Journal of microencapsulation*, *29*(6), pp.532-538.
144. Seenivasagan, R. and Babalola, O.O., 2021. Utilization of microbial consortia as biofertilizers and biopesticides for the production of feasible agricultural product. *Biology*, *10*(11), p.1111.
145. Shanmugam, V., Kanoujia, N., Singh, M., Singh, S. and Prasad, R., 2011. Biocontrol of vascular wilt and corm rot of gladiolus caused by Fusarium oxysporum f. sp. gladioli using plant growth promoting rhizobacterial mixture. *Crop protection*, *30*(7), pp.807-813.
146. Sharma, P., Bano, A., Singh, S.P. and Tong, Y.W., 2023. Microbial inoculants: Recent progress in formulations and methods of application. Microbial Inoculants, pp.1-28.
147. Silindir, M. and Özer, A.Y., 2009. Sterilization methods and the comparison of E-beam sterilization with gamma radiation sterilization. *Fabad Journal of Pharmaceutical Sciences*, *34*(1), p.43.
148. Singh, S.K., Bhople, N.D., Tomar, A., Savita, S. and Rana, M., 2018. Progress and potential of biofertilization in contemporary production practices of sustainable agriculture.
149. Singleton, P., Keyser, H. and Sande, E., 2002. Development and evaluation of liquid inoculants. *Inoculants and nitrogen fixation of legumes in Vietnam*, *109*, pp.52-66.
150. Sivaram, A.K., Abinandan, S., Chen, C., Venkateswartlu, K. and Megharaj, M., 2023. Microbial inoculant carriers: Soil health improvement and moisture retention in sustainable agriculture. *Advances in Agronomy*, *180*, pp.35-91.
151. Spadari, C.D.C., Lopes, L.B. and Ishida, K., 2017. Potential use of alginate-based carriers as antifungal delivery system. Frontiers in microbiology, 8, p.241872.
152. Sriram, S., Roopa, K.P. and Savitha, M.J., 2011. Extended shelf-life of liquid fermentation derived talc formulations of Trichoderma harzianum with the addition of glycerol in the production medium. *Crop protection*, *30*(10), pp.1334-1339.
153. Stella, D. and Sivasakthivelan, P., 2009. Effect of different organic amendments addition into Azospirillum bioinoculant with lignite as carrier material. *Bot. Res. Intl*, *2*(4), pp.229-232.
154. Stevenson, L.E.O., Phillips, F., O'sullivan, K. and Walton, J., 2012. Wheat bran: its composition and benefits to health, a European perspective. *International journal of food sciences and nutrition*, *63*(8), pp.1001-1013.
155. Subramanyam, B., Shankarappa, T.H. and Prasad, B.D.N., 2019. Effect of alginate based microbial consortial formulation on growth of corn. *Indian Journal of Ecology*, *46*(Special Issue 7), pp.96-100.
156. Suman, A., Verma, P., Yadav, A.N., Srinivasamurthy, R., Singh, A. and Prasanna, R., 2016. Development of hydrogel based bio-inoculant formulations and their impact on plant biometric parameters of wheat (Triticum aestivum L.). *Int J Curr Microbiol Appl Sci*, *5*(3), pp.890-901.

157. Surendra Gopal, K. and Baby, A., 2016. Enhanced shelf life of Azospirillum and PSB through addition of chemical additives in liquid formulations. *Int J Sci Environ Technol*, *5*(4), pp.2023-2029.
158. Tang, Y., Wang, X., Yang, Y., Gao, B., Wan, Y., Li, Y.C. and Cheng, D., 2017. Activated-lignite-based super large granular slow-release fertilizers improve apple tree growth: synthesis, characterizations, and laboratory and field evaluations. *Journal of agricultural and food chemistry*, *65*(29), pp.5879-5889.
159. Taurian, T., Anzuay, M.S., Angelini, J.G., Tonelli, M.L., Ludueña, L., Pena, D., Ibáñez, F. and Fabra, A., 2010. Phosphate-solubilizing peanut associated bacteria: screening for plant growth-promoting activities. *Plant and soil*, *329*, pp.421-431.
160. Tittabutr, P., Payakapong, W., Teaumroong, N., Singleton, P.W. and Boonkerd, N., 2007. Growth, survival and field performance of bradyrhizobial liquid inoculant formulations with polymeric additives. *Science Asia*, *33*(1), pp.69-77.
161. Tripathi, S., Tiwari, T. and Sachan, R., 2023. Soil Conditioners: Substances That Enhance the Physical Properties of Soil. 19-29.
162. Van Dyke, M.I. and Prosser, J.I., 2000. Enhanced survival of Pseudomonas fluorescens in soil following establishment of inoculum in a sterile soil carrier. *Soil Biology and Biochemistry*, *32*(10), pp.1377-1382.
163. Vassilev, N., Vassileva, M., Martos, V., Garcia del Moral, L.F., Kowalska, J., Tylkowski, B. and Malusá, E., 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.
164. Wang, H.Y., Shen, L.I.U., Zhai, L.M., Zhang, J.Z., Ren, T.Z., Fan, B.Q. and Liu, H.B., 2015. Preparation and utilization of phosphate biofertilizers using agricultural waste. *Journal of Integrative Agriculture*, *14*(1), pp.158-167.
165. Wani, P.A., Khan, M.S. and Zaidi, A., 2007. Effect of metal tolerant plant growth promoting Bradyrhizobium sp.(vigna) on growth, symbiosis, seed yield and metal uptake by greengram plants. *Chemosphere*, *70*(1), pp.36-45.
166. Xie, F., Gao, C. and Avérous, L., 2024. Alginate-based materials: Enhancing properties through multiphase formulation design and processing innovation. Materials Science and Engineering: R: Reports, 159, p.100799.
167. Yabur, R., Bashan, Y. and Hernández-Carmona, G., 2007. Alginate from the macroalgae Sargassum sinicola as a novel source for microbial immobilization material in wastewater treatment and plant growth promotion. *Journal of Applied Phycology*, *19*, pp.43-53.
168. Yao, L., Wu, Z., Zheng, Y., Kaleem, I. and Li, C., 2010. Growth promotion and protection against salt stress by Pseudomonas putida Rs-198 on cotton. *European Journal of Soil Biology*, *46*(1), pp.49-54.
169. Zayed, M.S., 2016. Advances in formulation development technologies. *Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity: Vol. 2: Functional Applications*, pp.219-237.