نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران

(مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب)

۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

19th Iranian Soil Science Congress (Holistic and Smart soil and water management)
16-18 September, 2025, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

فرمولاسیون صنعتی کودهای زیستی فسفاته گرانوله: چالش‌ها، نوآوری‌ها و چشم‌انداز آینده

علیرضا فلاح نصرت‌آباد[۱]، بهمن خوشرو*[۱]، شکیبا رئیسی[۲] و حسینعلی علیخانی[۲]

۱- موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

۲- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

نویسنده مسئول: **E-mail:** bahmankhoshru@yahoo.com

چکیده

فسفر عنصری حیاتی برای کشاورزی است، اما فراهمی آن در خاک اغلب محدود می‌باشد. کودهای زیستی فسفاته، حاوی باکتری‌های حل‌کننده فسفات (PSB)، راهکاری پایدار ارائه می‌دهند. فرمولاسیون گرانوله این کودها به دلیل افزایش ماندگاری و سهولت کاربرد، مورد توجه است. با این حال، تولید صنعتی گرانول، به‌ویژه مراحل حرارتی، بقای PSBها را با چالش جدی مواجه می‌سازد. این مقاله مروری، ضمن بررسی چالش‌های مذکور، به نوآوری‌ها و راهکارهایی نظیر: استفاده از سویه‌های مقاوم (به‌ویژه اسپورزا)، انتخاب حامل‌های مناسب و بهینه‌سازی فرآیندهای گرانولاسیون[۱] برای حفظ زنده‌مانی و کارایی میکروارگانیسم‌ها می‌پردازد. توسعه فرمولاسیون‌های کارآمد گرانوله برای کودهای زیستی فسفاته، گامی مهم در جهت تجاری سازی و پذیرش گسترده‌تر این محصولات در کشاورزی پایدار است و تحقیقات آتی باید بر بهینه سازی این فرآیندها متمرکز شود.

کلمات کلیدی: فرمولاسیون گرانوله، باکتری‌های حل‌کننده فسفات، ماندگاری، تولید صنعتی، مواد حامل، کشاورزی پایدار.

۱ مقدمه

فسفر یکی از عناصر غذایی اصلی و محدودکننده رشد گیاه در بسیاری از خاک‌های کشاورزی جهان است. بخش عمده فسفر خاک به فرم‌های نامحلول تثبیت شده و برای گیاه غیرقابل دسترس می‌باشد (Alori et al., 2017). اتکای صرف به کودهای شیمیایی فسفاته به دلیل هزینه‌های اقتصادی، پیامدهای زیست‌محیطی (مانند اوتروفیکاسیون[۲]) و محدودیت منابع جهانی سنگ فسفات، رویکردی ناپایدار است. در این راستا، باکتری‌های حل‌کننده فسفات (PSB[۳]) به عنوان اجزای کلیدی کودهای زیستی، با افزایش فراهمی فسفر از منابع نامحلول خاک، نقش مهمی در کشاورزی پایدار ایفا می‌کنند (Rawat et al., 2021). فرمولاسیون این کودها، به‌ویژه به شکل گرانوله، مزایای قابل توجهی از جمله افزایش ماندگاری[۴] (Brar et al., 2012)، سهولت در حمل و نقل، انبارداری و کاربرد یکنواخت در مزرعه و پتانسیل آزادسازی کنترل شده میکروارگانیسم‌ها را به همراه دارد. با این وجود، چالش اصلی در تولید صنعتی کودهای زیستی گرانوله، حفظ زنده‌مانی و کارایی PSBها در طول فرآیندهای تولیدی است که اغلب شامل تنش‌های حرارتی و مکانیکی (مانند: فشار در گرانولاسیون و حرارت در خشک کردن) می‌باشد (Malusa et al., 2012). این مقاله مروری با هدف بررسی چالش‌ها و نوآوری‌های موجود در فرمولاسیون صنعتی کودهای زیستی فسفاته گرانوله و ارائه چشم‌اندازی برای تحقیقات آینده تدوین شده است.

---

[1] Granulation
[2] Eutrophication
[3] Phosphate solubilization bacteria
[4] Shelf-life

۲ انتخاب سویه‌های میکروبی مناسب برای فرمولاسیون گرانوله فسفاته

انتخاب سویه میکروبی مناسب، اولین و یکی از مهم‌ترین گام‌ها در تولید یک کود زیستی فسفاته گرانوله کارآمد است. جنس‌های متعددی از باکتری‌ها توانایی انحلال فسفات را دارند (Khan et al., 2014)، اما برای فرمولاسیون صنعتی، به‌ویژه فرم گرانوله که با تنش‌های فرآیندی همراه است، سویه‌هایی با ویژگی‌های خاص مورد نیاز هستند. در این میان، باکتری‌های مولد اندوسپور، به‌ویژه از جنس‌های *Bacillus* (Saeid et al., 2018) و *Paenibacillus* (Padda et al., 2017)، به دلیل مقاومت ذاتی و بالای اسپورهایشان به حرارت (Huo et al., 2012)، خشکی و سایر تنش‌های فیزیکی و شیمیایی، گزینه‌های بسیار مطلوبی محسوب می شوند. اسپورها می‌توانند شرایط سخت گرانولاسیون را تحمل کرده و پس از کاربرد در خاک و قرار گرفتن در شرایط مساعد، جوانه‌زنی کرده و فعالیت خود را از سر بگیرند (Chang & Yang, 2009). علاوه بر توانایی تشکیل اسپور، معیارهای کلیدی دیگر برای انتخاب سویه مناسب PSB برای فرمولاسیون گرانوله شامل موارد زیر است: (الف) توانایی بالای انحلال انواع مختلف فسفات‌های نامحلول معدنی و آلی (Mosela et al., 2022)؛ (ب) مقاومت به تنش‌های محیطی رایج در خاک (مانند: خشکی (Figueiredo et al., 2008)، شوری وحضور فلزات سنگین) و همچنین مقاومت به تنش‌های خاص ناشی از فرآیند تولید؛ (ج) توانایی بقا، رقابت مؤثر با میکروفلور[5] بومی خاک و کلونیزاسیون[6] موفق ریزوسفر گیاه میزبان (Choudhary & Johri, 2009)؛ و (د) سازگاری با مواد حامل و افزودنی‌های مورد استفاده در فرمولاسیون گرانوله بدون کاهش قابل توجه در زنده‌مانی یا فعالیت (Schisler et al., 2004).

۳ اصول و روش‌های کلیدی در گرانولاسیون کودهای زیستی

گرانولاسیون فرآیندی است که در آن ذرات ریز پودری به توده‌های بزرگتر و متراکم‌تری به نام گرانول تبدیل می‌شوند. روش های مختلفی برای گرانولاسیون کود های زیستی وجود دارد (Malusa et al., 2012). در گرانولاسیون مرطوب[7]، میکروارگانیسم‌ها با ماده حامل و یک مایع چسباننده مخلوط شده و گرانول‌های مرطوب تشکیل می شوند؛ مرحله بحرانی در این روش، خشک‌کردن گرانول‌ها با هوای گرم است که می‌تواند زنده‌مانی سلول‌های رویشی PSB را کاهش دهد (Chang & Yang, 2009). گرانولاسیون خشک[8]، مانند روش فشردن[9]، بدون نیاز به حرارت بالا انجام می‌شود، اما فشار مکانیکی آن می‌تواند مضر باشد (Malusa et al. 2012). روش‌های نوین‌تری مانند اکستروژن[10] و پوشش‌دهی بستر سیال[11] نیز پتانسیل اعمال تنش کمتر به میکروارگانیسم‌ها را دارند (Nakkeeran et al., 2021). پارامترهای بحرانی فرآیند گرانولاسیون مؤثر بر زنده‌مانی PSBها شامل دما، رطوبت، فشار، زمان فرآیند، اندازه ذرات و حضور مواد محافظت‌کننده می‌باشند.

---

[5] Microflora
[6] Colonization
[7] Wet granulation
[8] Dry granulation
[9] Compaction
[10] Extrusion
[11] Fluidized bed coating

۴ نقش مواد حامل[12] و افزودنی‌ها[13] در کیفیت کود گرانوله

انتخاب ماده حامل منا سب و ا ستفاده از افزودنی‌های کارآمد، نقش بسیار مهمی در موفقیت فرمولا سیون گرانوله دارد (Yardin et al., 2000). مواد حامل آلی (پیت، کمپوست) و معدنی (خاک رس ورمیکولیت) مزایا و معایب خاص خود را دارند (Santos et al., 2017). مواد حامل پلیمری (آلژینات[14]، کیتوسان[15]) پتانسیل بالایی در میکروانکپسولاسیون[16] و حفاظت از PSBها دارند (Arora et al., 2020).

افزودنی‌ها نیز نقش کلیدی در بهبود کیفیت و پایداری گرانول و زنده‌مانی PSBها ایفا می‌کنند. چسبانندهها[17] برای استحکام گرانول استفاده می‌شوند (جدول ۱). مواد محافظت‌کننده[18] نظیر قندها و پلی‌الکل‌ها می‌توانند با تثبیت ساختار سلولی، به حفظ زنده‌مانی میکروب‌ها در طول فرآیند گرانولاسیون و انبارداری کمک کنند (Mugnier & Jung, 1985). افزودن منابع غذایی آهسته‌رهش نیز می‌تواند رشد اولیه PSBها را پس از جوانه‌زنی در خاک حمایت نماید.

جدول ۱ - نقش کلیدی مواد حامل و افزودنی‌ها در فرمولاسیون کودهای زیستی فسفاته گرانوله

دسته‌بندی کلی	نوع ماده	نقش در کود گرانوله	مزیت اصلی	محدودیت اصلی	مرجع
مواد حامل	آلی (پیت، کمپوست)	فراهم‌کننده محیط مغذی و محافظ برای میکروب‌ها.	سازگاری خوب، زیست‌تخریب‌پذیر.	کیفیت متغیر، احتمال آلودگی.	Nakkeeran et al. (2021)
	معدنی (خاک رس ورمیکولیت)	محافظت فیزیکی، کمک به گرانولاسیون، بهبود تهویه/نگهداری آب.	در دسترس بودن، پایداری فیزیکی.	محتوای مغذی پایین، تراکم بالا (خاک رس).	Yardin et al. (2000)
	پلیمری (آلژینات)	انکپسولاسیون و محافظت از میکروب‌ها، آزادسازی کنترل‌شده.	زیست‌تخریب‌پذیر، فرآیند ملایم.	هزینه بالاتر.	Arora et al. (2020)
افزودنی‌ها	چسباننده‌ها (ملاس، نشاسته)	افزایش استحکام و یکپارچگی گرانول.	ضروری برای دوام گرانول.	انتخاب نادرست ممکن است بر زنده‌مانی میکروب تأثیر بگذارد.	Nakkeeran et al. (2021)
	مواد محافظت‌کننده (قندها، پلی‌الکل‌ها)	محافظت از میکروب‌ها در برابر تنش‌های خشکی و حرارت.	افزایش قابل توجه زنده‌مانی و عمر انبارداری.	هزینه، تأثیر بر خواص گرانول.	Brar et al. (2012)
	منابع غذایی (عصاره مخمر)	فراهم کردن مواد مغذی اولیه برای فعالیت میکروب‌ها در خاک.	کمک به استقرار اولیه.	سازگاری با میکروب مهم است.	Santos et al. (2017)
	بافرهای pH، بهبود دهنده‌ها و غیره	حفظ pH مطلوب، بهبود جریان‌پذیری.	افزایش پایداری و تسهیل کاربرد.	باید خنثی و غیرسمی باشند.	Malusa et al. (2012)

[12] Carriers
[13] Additives

[16] Microencapsulation
[17] Binders
[18] Protectants

۵ چالش‌های عمده در تولید صنعتی و راهکارهای نوآورانه

حفظ جمعیت بالا و فعال PSBها در محصول نهایی و در طول دوره انبارداری، چالش اصلی تولید صنعتی کودهای گرانوله ا ست. تنش‌های حرارتی و مکانیکی در طول گرانولا سیون می‌تواند زنده‌مانی PSBها را کاهش دهد. راهکارهای نوآورانه شامل: (الف) استفاده از اندوسپورهای باکتریایی (*Bacillus spp.*) به دلیل مقاومت بالای آن‌ها در برابر تنش‌های محیطی (Schisler et al., 2004)؛ (ب) میکروانکپسولا سیون PSBها قبل از گرانولا سیون (Nakkeeran et al., 2021)؛ (ج) بهینه سازی پارامترهای فرآیند گرانولاسیون برای کاهش تنش؛ و (د) انتخاب و مهندسی سویه‌های مقاوم به تنش است. ماندگاری محصول نیز تحت تأثیر عواملی همچون: رطوبت، دما، نور و اکسیژن است که با بسته‌بندی مناسب و افزودنی‌های پایدارکننده بهبود می‌یابد (Brar et al., 2012). کنترل کیفیت و ا ستاندارد سازی برای ت ضمین کیفیت و جلب اعتماد م صرف‌کنندگان ضروری است.

۶ ارزیابی کارایی و چشم‌انداز آینده کودهای زیستی فسفاته گرانوله

ارزیابی کارایی کودهای زیستی فسفاته گرانوله شامل بررسی کیفیت فیزیکی گرانول‌ها (مانند سختی و دوام) (Souza et al., 2015) و همچنین سنجش زنده‌مانی و فعالیت انحلال فسفات باکتری‌های حل‌کننده فسفات (PSB) در محصول نهایی و پس از آزادسازی در خاک است (Qiu et al., 2021). برای تأیید اثربخشی بلندمدت این کودها، انجام مطالعات دقیق گلخانه‌ای و به‌ویژه آزمایش‌های مزرعه‌ای تکرارپذیر در شرایط مختلف خاک و اقلیم همچنین مقایسه با تیمارهای شاهد، ضروری است (Adesemoye et al., 2009).

چشم‌انداز آینده در این حوزه شامل توسعه فرمولاسیون‌های هوشمند با قابلیت آزادسازی کنترل‌شده میکروارگانیسم‌ها، به منظور افزایش کارایی مصرف کود و کاهش اثرات زیست‌محیطی، می‌باشد (Aloo et al., 2022). همچنین، استفاده از کنسرسیوم‌های میکروبی[19] شامل چندین سویه PSB با مکانیسم‌های مکمل یا ترکیبی از PSBها با سایر میکروارگانیسم‌های مفید خاک (مانند باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن[20] یا قارچ‌های میکوریزی[21])، پتانسیل بالایی برای ایجاد اثرات هم‌افزایی و افزایش کارایی در شرایط متنوع مزرعه‌ای دارد (Vassilev et al., 2006).

نتیجه‌گیری

فرمولا سیون صنعتی کودهای زیستی فسفاته به فرم گرانوله، علی‌رغم مزایای قابل توجه از نظر ماندگاری، حمل‌ونقل و کاربرد، با چالش‌های مهمی به‌ویژه در زمینه حفظ زنده‌مانی و کارایی باکتری‌های حل‌کننده فسفات (PSB) در طول فرآیندهای تولیدی با تنش حرارتی و مکانیکی مواجه است. این مقاله مروری با بررسی این چالش‌ها، به اهمیت انتخاب سویه‌های میکروبی مقاوم (به‌خصوص PSBهای مولد اسپور)، نقش حیاتی مواد حامل و افزودنی‌های مناسب و همچنین نوآوری‌ها در روش‌های گرانولا سیون و راهکارهای افزایش پایداری میکروبی پرداخت. نتایج نشان می‌دهد که با وجود این چالش‌ها، پیشرفت‌های قابل توجهی در جهت تولید کودهای زیستی فسفاته گرانوله با کیفیت و کارایی بالا صورت گرفته است. با این حال، همچنان نیاز به

[19] Microbial consortia
[20] Nitrogen fixation bacteria
[21] Mycorrhizal fungi

تحقیقات بیشتر برای بهینه سازی فرآیندها، یافتن حامل‌ها و افزودنی‌های جدید و مؤثرتر، درک بهتر تعاملات میکروب-حامل-خاک-گیاه و انجام ارزیابی‌های مزرعه‌ای جامع و طولانی‌مدت برای دستیابی به محصولات کاملاً قابل اعتماد و مورد پذیرش گسترده در کشاورزی پایدار احساس می شود. توسعه موفقیت‌آمیز فرمولاسیون‌های گرانوله کارآمد، گامی اساسی در جهت تحقق پتانسیل کامل کودهای زیستی فسفاته برای بهبود امنیت غذایی و سلامت محیط زیست خواهد بود.

منابع

Adesemoye AO, Torbert HA, Kloepper JW. 2009. Plant-growth-promoting rhizobacteria allow for reduced application rates of chemical fertilizers. Microb Ecol. 58(4):921-929. https://doi.org/10.1007/s00248-009-9531-y

Alori ET, Glick BR, Babalola OO. 2017. Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. Front Microbiol. 8:971. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971

Aloo BN, Tripathi V, Makumba BA, Mbega ER. 2022. Plant growth-promoting rhizobacterial biofertilizers for crop production: The past, present, and future. Front Plant Sci. 13:1002448. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1002448

Arora NK, Fatima T, Mishra I, Verma S, Verma R, Mishra J. 2020. Microbe-Based Nanostrategies for Sustainable Agroecosystems. In: Kumar V, Kumar M, Sharma S, Prasad R (Eds.), Agriculturally Important Mesophiles and Psychrophiles. Springer, Singapore. pp. 231-258. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5221-7_10 .

Brar SK, Sarma SJ, Chaabouni E. 2012. Shelf-life of biofertilizers: an accord between formulations and genetics. J Fertil Pestic. 3(4):e109. https://doi.org/10.4172/2155-6202.1000e109

Chang CH, Yang SS. 2009. Thermo-tolerant phosphate-solubilizing microbes for multi-functional biofertilizer preparation. Bioresour Technol. 100(4):1648-1658. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.09.009

Choudhary, D. K., & Johri, B. N. (2009). Interactions of Bacillus spp. and plants–with special reference to induced systemic resistance (ISR). Microbiological research, 164(5), 493-513.

Figueiredo MVB, Burity HA, Martínez CR, Chanway CP. 2008. Alleviation of drought stress in the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) by co-inoculation with *Rhizobium tropici* and *Paenibacillus polymyxa*. Appl Soil Ecol. 40(1):182-188. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.04.005

Huo ZH, Li R, Yang XM, Wei Z, Shen QR. 2012. Comparison of the spores of *Paenibacillus polymyxa* prepared at different temperatures. Biotechnol Lett. 34(5):925-933. https://doi.org/10.1007/s10529-012-0853-3

Khan MS, Zaidi A, Ahmad E. 2014. Mechanism of phosphate solubilization and physiological functions of phosphate-solubilizing microorganisms. In: Khan MS, Zaidi A, Musarrat J (Eds.), Phosphate Solubilizing Microorganisms: Principles and Application of Microphos Technology. Springer, Cham. pp. 31–62. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08216-5_2

Malusa E, Sas-Paszt L, Ciesielska J. 2012. Technologies for Beneficial Microorganisms Inocula Used as Biofertilizers. Scientific World Journal. 2012:491206. https://doi.org/10.1100/2012/491206

Mosela M, Andrade G, Massucato LR. 2022. *Bacillus velezensis* strain Ag75 as a new multifunctional agent for biocontrol, phosphate solubilization and growth promotion in maize and soybean crops. Sci Rep. 12:15284. https://doi.org/10.1038/s41598-022-19515-8

Mugnier J, Jung G. 1985. Survival of bacteria and fungi in relation to water activity and the solvent properties of water in biopolymer. Appl Environ Microbiol. 50(1):108-114. https://doi.org/10.1128/aem.50.1.108-114.1985

Nakkeeran S, Kumar MS, Arul J. 2021. Formulation of Biofertilizers and Biopesticides. In: Singh HB, Vaishnav A (Eds.), Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity. Springer, New Delhi. pp. 225-252. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2644-4_10 .

Padda, K. P., Puri, A., & Chanway, C. P. (2017). Paenibacillus polymyxa: a prominent biofertilizer and biocontrol agent for sustainable agriculture. Agriculturally Important Microbes for Sustainable Agriculture: Volume 2: Applications in Crop Production and Protection, 165-191.

Rawat, P., Das, S., Shankhdhar, D., & Shankhdhar, S. C. (2021). Phosphate-solubilizing microorganisms: mechanism and their role in phosphate solubilization and uptake. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 21(1), 49-68.

Saeid, A., Prochownik, E., & Dobrowolska-Iwanek, J. (2018). Phosphorus solubilization by Bacillus species. Molecules, 23(11), 2897.

Santos MS, Nisti CC, Celligoi MAPC. 2017. Production of biofertilizers with bacteria and fungi. In: Maheshwari DK (Ed.), Biofertilizers for Sustainable Agriculture and Environment. Springer, Cham. pp. 351-377. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66097-4_14

Schisler DA, Slininger PJ, Behle RW, Jackson MA. 2004. Formulation of *Bacillus* spp. for biological control of plant diseases. Phytopathology. 94(11):1267-1271. https://doi.org/10.1094/PHYTO.2004.94.11.1267

Souza RD, Ambrosini A, Passaglia LM. 2015. Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. Genet Mol Biol. 38(4):401-419. https://doi.org/10.1590/S1415-475738420150053

Vassilev N, Vassileva M, Nikolaeva I. 2006. Simultaneous P-solubilizing and biocontrol activity of microorganisms: Potentials and future trends. Appl Microbiol Biotechnol. 71(2):137-144. https://doi.org/10.1007/s00253-006-0371-8

Yardin MR, Deaker RJ, Morris SC, Kennedy IR. 2000. Development of high quality carrier materials for field delivery of key microorganisms used as bio-fertilisers and bio-pesticides. Radiat Phys Chem. 57(3-6):565-569. https://doi.org/10.1016/S0969-806X(99)00439-6

Industrial Formulation of Granulated Phosphate Biofertilizers: Challenges, Innovations, and Future Prospects

Alireza Fallah Nosratabad[1], Bahman Khoshru[1*], Shakiba Reisi[2], and Hosseinali Alikhani[2]

1-Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

2-Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran.

*Corresponding author: E-mail: bahmankhoshru@yahoo.com

Abstract

Phosphorus is a vital nutrient for agriculture, yet its availability in soil is often limited. Phosphate biofertilizers, containing phosphate-solubilizing bacteria (PSB), offer a sustainable solution. Granulated formulations of these biofertilizers are favored for their enhanced shelf-life and ease of application. However, industrial granulation processes, particularly thermal stages, pose significant challenges to PSB viability. This review examines these challenges and explores innovations and strategies to overcome them, such as the use of stress-tolerant strains (especially spore-formers), selection of appropriate carrier materials, and optimization of granulation processes to maintain microbial efficacy. The development of efficient granulated formulations for phosphate biofertilizers is a critical step towards their commercialization and wider adoption in sustainable agriculture, with future research needing to focus on process optimization and field performance.

Keywords: Granulated formulation, Phosphate-solubilizing bacteria, Shelf-life, Industrial production, Carrier materials, Sustainable agriculture.