به‌زراعی کشاورزی

دوره ۲۲ ■ شماره ٤ ■ زمستان ۱۳۹۹

صفحه‌های ٥٦٩-٥٥٧

مقاله پژوهشی:

ارزیابی کارایی باکتری‌های محرک رشد گیاه در کاهش مصرف کود شیمیایی فسفر در گندم

حسینعلی علیخانی[۱*]، سمیه امامی[۲]، فاطمه علیخانی[۳]

۱. استاد، گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲. دانش‌آموخته دکتری، گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۱۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۲۴

چکیده

در این پژوهش پتانسیل جدایه‌های فراریشه‌ای و درون‌رست جداشده از ریشه گیاه گندم به‌منظور بررسی خصوصیات محرک رشد و اثر آن‌ها بر عملکرد گندم و کاهش مصرف کودهای شیمیایی فسفر مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا باکتری‌ها از نظر تولید هورمون ایندول استیک اسید در محیط کشت حاوی ال-تریپتوفان غربال‌گری شدند و سپس توانایی آن‌ها در انحلال فسفات‌های نامحلول معدنی و آلی ارزیابی شد. در ادامه مطالعات آزمایشگاهی، آزمایش مزرعه‌ای به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی و در سه تکرار در طی دو سال زراعی ۱۳۹٦-۱۳۹٥ و ۱۳۹۷-۱۳۹٦ اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل تیمار کود زیستی وشیمیایی فسفر بود که تیمار کود زیستی در دو سطح (زادمایه باکتری به‌همراه شاهد) و کود شیمیایی به‌عنوان فاکتور دوم از منبع سوپر فسفات تریپل در پنج سطح (۱- عدم مصرف کود شیمیایی فسفر، ۲- ۲٥ درصد توصیه کودی فسفر، ۳- ٥۰ درصد توصیه کودی فسفر، ٤- ۷٥ درصد توصیه کودی فسفر، و ٥- ۱۰۰ درصد توصیه کودی فسفر) در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که افزایش شاخص‌های رشد و عملکرد گیاه گندم در نتیجه مایه‌کوبی بذور گندم با سویه‌های محرک رشد گیاه به‌علاوه ۷٥ درصد از کود فسفر از نظر آماری برابر با تیمار ۱۰۰ درصد کود فسفر و بدون زادمایه باکتری بود. کاربرد زادمایه باکتری‌های محرک رشد (تلفیقی از جدایه فراریشه‌ای و درون‌رست) با ۷٥ درصد کود شیمیایی توانست به میزان ۷٤۷/٤ گرم بر مترمربع تولید را داشته باشد. براساس این نتایج، پیشنهاد می‌شود که زادمایه می‌تواند به‌عنوان مکمل با کودهای شیمیایی به‌منظور کاهش سطح مصرف کودهای شیمیایی استفاده شود اما نمی‌تواند جایگزینی برای کود فسفر باشد.

کلیدواژه‌ها: باکتری فراریشه و درون‌رست، عملکرد گیاه، فسفات‌های نامحلول.

Evaluation of the Efficiency of Plant Growth Promoting Bacteria in Reducing Phosphate Fertilizer Application in Wheat

Hossein Ali Alikhani[1*], Somayeh Emami[2], Fatemeh Alikhani[3]

1. Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture and Natural Resource, University of Tehran, Karaj, Iran

2. Former Ph.D. Student, Department of Soil Science, College of Agriculture and Natural Resource, University of Tehran, Karaj, Iran

3. M.Sc. Student, Department of Soil Science, College of Agriculture and Natural Resource, University of Tehran, Karaj, Iran

Received: December 8, 2019 **Accepted:** May 13, 2020

Abstract

The present study investigates the potential of rhizosphere and endophytic bacterial isolates isolated from the roots of wheat plant in terms of plant growth promoting (PGP) traits and their effect on the wheat yield and decreased phosphorus (P) fertilizer use. To this end, the isolated bacteria have been first screened for the production of indole-3-acetic acid (IAA) in the presence of tryptophan in the culture medium, and then the bacteria have been tested for their ability to dissolve inorganic and organic phosphates. In further laboratory studies, a factorial experiment has been conducted as a randomized complete block design with three replications over two-year field study (2017 and 2018). Experimental treatments include biological and chemical phosphorus fertilizer, the former with two levels (with and without bacterial inoculation) and latter (as the second factor) from triple super phosphate source with five (0%, 25%, 50%, 75%, and 100% of the full recommended fertilizer rate). Results from this experiment prove that supplementing 75% of the recommended P-fertilizer rate with bacterial isolates (co-inoculation with rhizospheric and endophytic bacteria) increases wheat growth indices and yield (747.40 g m-2), which are statistically equivalent to the full fertilizer rate without them. Based on these results, it is suggested that biofertilizer can be used as a fertilizer supplement to reduce the level of fertilizer use but cannot be a substitute for phosphorus fertilizer.

Keywords: Phosphate solubilization, plant yield, rhizospheric and endophytic bacteria.

* نویسنده مسئول

Email: halikhan@ut.ac.ir

۱. مقدمه

با افزایش روزافزون جمعیت جهانی، افزایش شاخص‌های رشد و عملکرد گیاه گندم به‌عنوان یک گیاه راهبردی در جهت نیل به امنیت غذایی یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیشِ رو، امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. پیشرفت‌های اخیر اگرچه توانسته است انسان را در تأمین غذای مورد نیازش یاری دهد، اما مطالعه و تلاش در جهت افزایش بهره‌وری و تولید غذای سالم، ضرورت نیاز به انقلابی با تأکید بر رعایت اصول زیست‌محیطی و حفظ پایدار منابع را ملموس‌تر می‌نماید (Khan *et al*., 2007). انقلاب سبز که با معرفی و عرضه کودهای شیمیایی شکل گرفت، در طول سالیان گذشته افزایش موضعی تولید محصولات کشاورزی را از طریق افزایش شاخص‌های رشد و عملکرد محصول را در پی داشت ولی برای محیط زیست و منابع محدود آب و خاک نیز مخاطراتی را به‌دنبال داشته است، لذا ادامه روش‌های سنتی، حفظ امنیت غذایی و افزایش بهره‌وری منابع پایه را محدود ساخته است. بدین جهت پژوهش‌گران را بر آن داشته تا نگرش ویژه‌ای در جهت افزایش کمی و کیفی محصولات کشاورزی با تأکید بر حفاظت از منابع تجدیدناپذیر محیط و به‌طور خاص خاک و آب داشته باشند و با پایه‌ریزی کشاورزی پایدار مبنی بر استفاده از پتانسیل‌های ذاتی و بالقوه زیست‌بوم خاک از روش‌هایی استفاده نمایند که با طبیعت سازگار بوده و با یک گام به جلو، افزایش عملکرد را به‌عنوان امری مهم در دستور کار و مطالعات خود قرار دهند. در این رهگذر، روی‌آوردن به کودهای زیستی با منشأ ریز موجودات مفید خاکزی به جای کودهای شیمیایی، جایگزینی مناسب به‌نظر می‌رسد. در نیم قرن گذشته بیش‌ترین توجه به باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن معطوف بوده است، ولی در دو دهه اخیر استفاده از باکتری‌های مفید دیگر از جمله باکتری‌های محرک رشد گیاه برای رفع نیازهای تغذیه‌ای و احیای فلور طبیعی خاک تحت عنوان مهندسی ریزوسفر نیز مورد علاقه پژوهش‌گران این رشته بوده است. باکتری‌های محرک رشد با دو روش "مستقیم" و "غیرمستقیم" موجب حفظ سلامت محیط زیست و افزایش کمی و کیفی محصولات کشاورزی می‌گردند. افزایش عملکرد از طریق افزایش زیست‌فراهمی عناصر غذایی (نیتروژن، فسفر، آهن، مس، روی و ... در نتیجه تولید سیدروفور، انحلال فسفات‌های نامحلول آلی و معدنی)، تولید فاکتورهای رشد و تولید هورمون‌های محرک رشد گیاهان به‌ویژه ایندول استیک اسید (IAA) می‌باشد که موجب افزایش شاخص‌های رشد و عملکرد محصول می‌شوند. هم‌چنین حفظ سلامت محیط زیست و گیاه از جمله توانمندی‌های این باکتری‌ها می‌باشد (Chen *et al*., 2006).

یکی از مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر در تولید و عملکرد بالا برای تولید محصول گندم، مصرف کودهای فسفرِ است. بدون افزودن کود فسفرِ عملکرد ارقام موجود به‌شدت محدود می‌شود. برآورد شده که در دو سوم خاک‌های کشت‌شده جهان، قابلیت دسترسی فسفر توسط ریشه گیاهان با مشکل مواجه است (Syers *et al*., 2008). استفاده از باکتری‌های حل‌کننده فسفات‌های نامحلول روشی زیستی و دوستدار محیط زیست برای تأمین نیاز گیاه به این عنصر می‌باشد. انحلال فسفات‌های نامحلول معدنی به‌عنوان یک نتیجه از عملکرد اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم است که توسط باکتری‌های مختلف خاکزی تولید می‌شوند (Zaidi *et al*., 2009). در مقابل، انحلال فسفات‌های نامحلول آلی از طریق سنتز انواع مختلف فسفاتازها صورت می‌گیرد که هیدرولیز فسفریک استرها را تسریع می‌کنند (Glick, 2012). در کنار انحلال فسفات‌های نامحلول و فراهمی فسفر برای گیاه، باکتری‌های حل‌کننده فسفات می‌توانند رشد گیاهان

را از طریق تولید هورمون‌های محرک رشد مانند اکسین، افزایش فراهمی عناصر میکرو مانند آهن و روی و هم‌چنین سنتز مواد محرک رشد انجام دهند (Mittal *et al.*, 2008). Ribeiro *et al.* (2018) گزارش کردند که سویه‌های درون‌رست *Bacillus* موجب افزایش زیست‌توده ساقه در حدود ۵۵ درصد و محتوای نیتروژن، فسفر و پتاسیم به‌ترتیب ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد، در مقایسه با تیمار شاهد شدند. این گونه‌ها در فراریشه گیاهان مورد آزمایش احتمالاً گلوکونیک اسید را تولید می‌کنند و در نتیجه نقش مهمی در انحلال فسفر تثبیت‌شده توسط ذرات خاک دارند و به این ترتیب گیاه می‌تواند از این فسفر آزادشده (محلول) استفاده کند. بر این اساس در این پژوهش سعی شد تا توانایی باکتری‌های محرک رشد گیاه در افزایش عملکرد گیاه گندم به‌عنوان یک گیاه راهبردی در شرایط کمبود فسفر خاک و کاهش سطح مصرف کود شیمیایی فسفر موردبررسی قرار گیرد.

۲. مواد و روش‌ها

۲. ۱. جدایه‌های باکتری

در این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر باکتری‌های محرک رشد بر ویژگی‌های رشدی و محتوای فسفر گیاه گندم از دو جدایه فراریشه‌ای (R185) و درون‌رست (E240) استفاده شد. جدایه‌های فراریشه‌ای R185 و درون‌رست E240 به‌ترتیب از فراریشه و ریشه گیاه گندم جدا شده و با ۹۸ و ۹۸/۷ درصد تشابه با *Pseudomonas* sp. JHEE_s و *Pseudomonas mosselii* مرتبط بودند. توالی‌های نوکلئوتیدی تعیین‌شده برای جدایه‌های R185 و E240 در این مطالعه به پایگاه اطلاعاتی بانک ژن فرستاده شده و به‌ترتیب با شماره‌های دسترسی MF579599 و MF579598 ثبت شده بود (Emami *et al.*, 2018).

۲. ۲. بررسی خصوصیات محرک رشدی جدایه‌ها

اندازه‌گیری کمی تولید ایندول استیک اسید (اکسین) به‌روش بریک در محیط کشت مایع رنگی در نتیجه استفاده از محلول سالکوفسکی با دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل UnicoTM 1100, USA) انجام گرفت (Bric *et al.*, 1991). برای انجام این آزمون درون هر ظرف ارلن مقدار ۲۰ میلی‌لیتر محیط کشت مایع حاوی یک میلی‌گرم بر میلی‌لیتر ال تریپتوفان ریخته شد و پس از استریل، محتوی هر ارلن با یکی از جدایه‌های موردنظر تلقیح گردید. ارلن‌های مذکور با ورقه آلومینیومی پوشانده شدند و به‌مدت ۷۲ ساعت برای باکتری‌های تند رشد و تا ۱۲۰ ساعت (برای انواع کندرشد) در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد روی به‌هم‌زن دورانی با سرعت چرخش ۱۲۰ دور در دقیقه هوادهی شدند. پس از گذشت این مدت سوسپانسیون‌های مذکور سانتریفیوژ گردیدند. سپس محلول رویی با معرف سالکوسکی به نسبت ۱:۱ با هم مخلوط گردید محلول حاضر به‌مدت ۲۰ دقیقه در دمای اتاق نگهداری و سپس با استفاده از اسپکتروفتومتر میزان جذب نور در طول موج ۵۳۰ نانومتر قرائت شد. مقدار تولید اکسین توسط هر جدایه از مقایسه جذب نور آن با منحنی استاندارد تهیه‌شده با غلظت‌های صفر تا ۱۰۰ میکروگرم بر میلی‌لیتر محاسبه گردید.

به‌منظور بررسی توان جدایه‌ها در انحلال فسفات‌های معدنی نامحلول، از محیط کشت اسپربر استفاده گردید (Sperber, 1958). ابتدا باکتری‌ها به‌مدت ٤٨ ساعت در محیط Nutrient Broth کشت داده شدند. برای تشخیص نیمه‌کمی توان حل فسفات، هفت میکرولیتر از سوسپانسیون تازه باکتری با روش قطره گذاری برروی پلیت‌های حاوی محیط جامد اسپربر (شامل ۱۰ گرم در لیتر گلوکز، ۰/۵ گرم در لیتر عصاره مخمر، ۰/۳۲ گرم در لیتر سولفات منیزیم، ۰/۱٤گرم در لیتر کلسیم کلرید، ۲/۵

گرم در لیتر تری کلسیم فسفات، ۱۰۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر و pH= ۷/۲) کشت داده شد. پلیت‌های تلقیح‌شده در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. ظهور هاله شفاف در پیرامون کلونی باکتری به‌عنوان نشانه حل فسفات در نظر گرفته شد. قطر کلونی رشدیافته و نیز قطر هاله شفاف حاصل از انحلال فسفات که در اطراف هر کلنی تشکیل شده بود به دقت اندازه‌گیری شدند. برای ارزیابی انحلال فسفات نسبت متوسط قطر هاله به قطر کلونی بعد از ۲٤، ٤۸، ۷۲ و ۹٦ ساعت محاسبه گردید. توانایی تولید سیدروفور توسط جدایه‌ها به‌صورت نیمه‌کمی با کشت در محیط کروم آزرول- اس CAS-Agar صورت گرفت (Schwyn & Neiland, 1987).

۲. ۳. مطالعات مزرعه‌ای

در ادامه آزمایش‌های آزمایشگاهی، آزمایش مزرعه‌ای در طی دو سال زراعی ۱۳۹٦-۱۳۹۵ و ۱۳۹۷-۱۳۹٦ در مزرعه آموزشی و پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در کرج به‌اجرا گذاشته شد. نتایج بررسی‌های انجام‌شده روی نمونه خاک تهیه‌شده از محل اجرای آزمایش در جدول (۱) و اطلاعات اقلیمی آن در جدول (۲) ارائه شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود خاک مذکور دارای بافت لومی شنی، pH نسبتاً زیاد، و بدون مشکل شوری است. هم‌چنین مقدار فسفر قابل جذب آن کم‌تر از سطح بحرانی برای بسیاری از گیاهان زراعی از جمله گندم بود (Khavazi *et al.*, 2014).

طرح به‌صورت فاکتوریل با دو فاکتور (باکتری و سطوح کودی) و در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی و در سه تکرار و به‌مدت دو سال در شرایط آبیاری متداول (۷۰ میلی‌لیتر تبخیر تجمعی از تشتک تبخیر کلاس A) به‌اجرا درآمد. تیمارهای آزمایش شامل تیمار میکروبی و کود فسفری بود که تیمار کود میکروبی در دو سطح و شامل تیمار باکتریایی (تلفیقی از جدایه فراریشه‌ای و درون‌رست) و تیمار شاهد بود. کود شیمیایی به‌عنوان فاکتور دوم از منبع سوپر فسفات تریپل در پنج سطح شامل ۱- بدون مصرف کود شیمیایی فسفر، ۲- ۲۵ درصد توصیه کودی فسفر، ۳- ۵۰ درصد توصیه کودی فسفر، ٤- ۷۵ درصد توصیه کودی فسفر و ۵- ۱۰۰ درصد توصیه کودی فسفر (۲۲۰ کیلوگرم در هکتار) در نظر گرفته شدند.

جدول ۱. نتایج تجزیه شیمیایی و فیزیکی خاک محل انجام آزمایش

سال	بافت	EC (dS/m)	pH	ماده آلی (درصد)	نیتروژن کل (درصد)	فسفر	پتاسیم	روی	آهن	مس	منگنز
						(mg/kg)					
۹٦-۹۵	لومی شنی	۰/۷۷	۷/۸	۰/۹	۰/۰۲۹	۸/۳	۳۷۵	۰/۷٦	۳/۸	۰/۹٤	۷/٦
۹۷-۹٦	لومی شنی	۰/۸٦	۸	۱/۰۱	۰/۰۳۳	۹/۲	۳٤۹	۰/٦۳	۳/۹	۰/٦۳	۵/٤

جدول ۲. اطلاعات اقلیمی محل اجرای آزمایش طی دو سال زراعی (۱۳۹٦ـ۱۳۹۵ و ۱۳۹۷ـ ۱۳۹٦)

		دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر
میانگین بارندگی (میلی‌متر)	سال ۱۳۹٦-۱۳۹۵	۵/۲	۳۷	٤۱/۹	۲۰/۲	۳۳/۳	۵۳/٤	۰/۰
	سال ۱۳۹۷-۱۳۹٦	۲٤/۷	۳۷/۹	۳۳/٤	۳۷/٦	٤۰/۱	۰/۰	۰/۰
میانگین دمای‌هوا (C°)	سال ۱۳۹٦-۱۳۹۵	۳/۵	٤/٤	۲/۷	۷/۱	۱۲/۳	۱۸/۹	۲۳/۸
	سال ۱۳۹۷-۱۳۹٦	٤/۳	۱۰/۰	۱٤/۵	۱٦/۲	۲۲/٦	۲۹/۱	۲۹/٦

هر کرت آزمایشی شامل چهار ردیف با فواصل ۲۰ سانتی‌متری و طول چهار متر و فاصله هر تکرار دو متر در نظر گرفته شد. تاریخ کاشت ۲۰ اسفندماه هر سال بود. قبل از کاشت، بذور گندم رقم روشن که از بانک ژن گروه زراعت و اصلاح نباتات پردیس کشاورزی دانشگاه تهران تهیه شده بودند آغشته به زادمایه میکروبی شد. جهت آماده‌سازی زادمایه، جدایه‌های باکتری از استوک برداشته و روی محیط کشت Nutrient Agar رشد داده و جوان شدند. کلونی‌های مجزا هر سویه در محیط Nutrient Broth مایه‌کوبی و روی به‌هم‌زن دورانی با سرعت چرخش ۱۲۰ دور در دقیقه هوادهی و به‌مدت ٤٨ ساعت در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد گرماگذاری شدند. جمعیت سلولی به 5×10^{8}CFU/ml تنظیم شد. به‌منظور آماده‌سازی زادمایه مخلوط، دو جدایه به‌طور مساوی از نظر حجمی به‌منظور ایجاد یک سوسپانسیون شامل سلول‌های از هر کدام از جدایه‌ها با یکدیگر مخلوط شدند. بذور مایه‌زنی‌شده در دو طرف پشته به‌صورت دستی در عمق ٤-٥ سانتی‌متری کاشته شدند (با تراکم ٤٠٠ بذر در مترمربع)؛ همراه با کاشت تیمارهای کود فسفری نیز به‌صورت نواری اعمال شد. براساس توصیه متداول کودی برای مزرعه آزمایشی کود اوره ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار در مراحل پنجه‌زنی و ساقه‌رفتن به‌صورت سرک به زمین داده شد. به‌منظور اندازه‌گیری عملکرد دانه، پس از رسیدگی فیزیولوژیک دانه‌ها در سطح یک مترمربع از واحدهای آزمایشی پس از حذف اثرات حاشیه‌ای، بوته‌ها برداشت و پس از اندازه‌گیری عملکرد بیولوژیک سنبله کلیه بوته‌ها در سطح مذکور کوبیده شده و دانه‌های به‌دست‌آمده با ترازوی دقیق توزین و به‌صورت عملکرد دانه در واحد سطح (گرم در مترمربع) ثبت شدند. تاریخ برداشت ۲۰ تیرماه هر سال بود. پس از برداشت محصول، اندام هوایی به سه بخش برگ، ساقه و دانه تقسیم شد و میزان فسفر در نمونه‌های گیاهی به‌روش زرد (مولیبدووانادات) و با استفاده از اسپکتروفتومتر (مدل UnicoTM 1100, USA) اندازه‌گیری شد (Westerman, 1991).

۲. ٤. آنالیز آماری

نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های مربوط به آزمون مزرعه‌ای با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (9.3) (نسخه ۹/۱)، آنالیز شد. جهت جمع‌بندی نتایج مربوط به مقایسه تیمارها در دو سال نیاز به تجزیه واریانس مرکب بود تا از این طریق بتوان علاوه بر مقایسه تیمارها، از اثر متقابل تیمار× سال آگاهی یافت. لذا پس از آزمون بارتلت و مشخص‌شدن یکنواختی واریانس‌های آزمایشی اقدام به تجزیه واریانس مرکب شد. مقایسه میانگین تیمارها و گروه‌بندی آن‌ها به‌روش آزمون Tukey در سطح پنج درصد انجام گرفت.

۳. نتایج و بحث

۳. ۱. خصوصیات محرک رشدی جدایه‌ها

جدایه‌های فراریشه‌ای R185 و درون‌رست E240 به‌ترتیب با تولید ۲۹۹/۲ و ۳۳۰/۱ میکروگرم بر میلی‌لیتر فسفر و هم‌چنین تولید ۱۹/۲ و ۲۲ میکروگرم بر میلی‌لیتر هورمون IAA به‌عنوان جدایه‌هایی با توان انحلال فسفات‌های نامحلول و مولد IAA بودند. هم‌چنین رشد جدایه‌ها موجب کاهش معنی‌دار pH در محیط مایع اسپربر شد. pH نهایی محیط در انتهای آزمایش از ۷/۲ به ٤/۲، برای جدایه E240، کاهش یافت. به‌طوری که در جدول (۳) دیده می‌شود رابطه معکوسی بین مقدار فسفر آزادشده و pH محیط کشت وجود دارد. این مسأله نشان می‌دهد که کاهش pH می‌تواند مکانیسم این جدایه‌ها در انحلال فسفات‌های نامحلول معدنی باشد.

۳. ۲. نتایج تجزیه واریانس

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد باکتری‌های محرک رشد تأثیر معنی‌داری بر شاخص‌های رشدی، درصد فسفر گیاه و خصوصیات خاک فراریشه داشت (جدول ٤). بهگونه‌ای‌که صفات عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، درصد فسفر در برگ و دانه را در سطح یک درصد تحت تأثیر قرار داد. هم‌چنین کاربرد کود فسفری تأثیر معنی‌داری بر کلیه صفات موردمطالعه در سطح یک درصد داشت. اثر متقابل باکتری و کود برای صفات فسفر برگ و دانه و عملکرد دانه در سطح یک درصد و برای فسفر ساقه در سطح پنج درصد معنی‌دار بود.

جدول ۳. مقایسه خصوصیات جدایه فراریشه‌ای و درون‌رست انتخاب‌شده در شرایط آزمایشگاه

عامل	درجه آزادی	IAA ($\mu g\ mL^{-1}$)	شاخص حلالیت فسفات نامحلول معدنی	شاخص حلالیت فسفات نامحلول آلی	تولید سیدروفور	انحلال فسفات نامحلول ($\mu g\ mL^{-1}$)	pH
میانگین مربعات تیمار	۱	۱۱/۷۸**	۱/٤**	۰/۰۰۷ns	۰/۰۰۲ns	۱۳۸۰/۲**	۰/۱۳۵*
میانگین مربعات خطا	٤	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۱۲	۰/۰۰۷	۵/۳	۰/۰۱
ضریب تغییرات (٪)	–	۰/٦	۳/۹٦	۲/۸	٤/٤	۰/۷	۲/۲۹
R 185	–	۱۹/۲±۰/۱b	٤/۰±۰/۲b	۳/۸±۰/۱a	۱/۸±۰/۱ab	۲۹۹±۲b	٤/۵±۰/۱a
E 240	–	۲۲/۰±۰/۳a	۵/۰±۰/۲a	۳/۷±۰/۱a	۱/۸±۰/۱a	۳۳۰±۳a	٤/۲±۰/۱b

ns، * و ** به‌ترتیب نمایانگر عدم معنی‌داری و تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد می‌باشد. هم‌چنین حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار آماری ($P<۰/۰۵$) می‌باشند.

جدول ٤. تجزیه واریانس مرکب صفات مورد بررسی گندم تحت تأثیر کاربرد کود شیمیایی و کود زیستی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		عملکرد دانه	عملکرد بیولوژیک	فسفر برگ	فسفر ساقه	فسفر دانه
سال	۱	۱٦۳۵/۹٤۹**	۱٦۳۲/۸۱۷**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰۰۱ns	۰/۰۰۰۰۱**
تکرار (سال)	٤	۱۸۳/۹۹٤ns	٦۸/۷٦۷ns	۰/۰۰۰۰۲ns	۰/۰۰۰۰۱ns	۰/۰۰۰۰۱ns
عامل باکتری	۱	۳۱۳٤۱/۰۵۵**	۲۵۲۵۹۰/۸۱۷**	۰/۰۰٦**	۰/۰۰۰۰۱**	۰/۰۱۹**
باکتری× سال	۱	۱۰/٦٦۸ns	۱۸/۱۵۰ns	۰/۰۰۰۰٦ns	۰/۰۰۰۰۱ns	۰/۰۰۰۰۰۲ns
عامل کودی	٤	۵۰۵۸۳/۱۹٤**	۲۳٤۷۲/۲۰۸**	۰/۰۱۲**	۰/۰۰۱**	۰/۰۵۲**
عامل کودی× سال	٤	٦۱/٤۱۹ns	۵۳/۰۲۵ns	۰/۰۰۰۰۰۱*	۰/۰۰۰۰۰۱ns	۰/۰۰۰۰۱ns
عامل باکتری× عامل کودی	٤	۱۹٦٤/۷۱۲**	۱۷۲/۸۵۸ns	۰/۰۰۰۰٤**	۰/۰۰۰۰۰۵*	۰/۰۰۱**
عامل باکتری× عامل کودی× سال	٤	٦۲/۹٤۰ns	۳٤/۷۷۵ns	۰/۰۰۰۰۳ns	۰/۰۰۰۰۱ns	۰/۰۰۰۰۱ns
خطا	۳٦	۱۷۸/۲٦۹	۹۷/۳۹٦	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۲
ضریب تغییرات (٪)		٦/۹۸	۱۲/۵٤	۸/۳٤	۱۱/۱۰	٦/۵۱

ns، * و ** به‌ترتیب نمایانگر عدم معنی‌داری و تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد می‌باشد.

۳. ۳. عملکرد دانه

جدول (۵) مقایسه میانگین اثرات متقابل کاربرد زادمایه و سطوح مختلف کود فسفر را نشان می‌دهد. بر این اساس، کاربرد زادمایه و سطوح کود فسفر (۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد) نسبت به شاهد سبب افزایش معنی‌داری در عملکرد دانه شده است که نشان می‌دهد فسفر نقش کلیدی و مهم در عملکرد گیاه گندم دارد و بدون وجود فسفر عملکرد گیاه کاهش پیدا می‌کند. همان‌گونه‌که مشاهده می‌شود تیمارهای دارای ۱۰۰ و ۷۵ درصد نیاز کودی به‌همراه زادمایه باکتری و هم‌چنین تیمار شاهد مثبت (تیمار ۱۰۰ درصد نیاز کودی بدون زادمایه باکتری) دارای بیش‌ترین عملکرد دانه بوده‌اند و اختلاف معنی‌داری بین آن‌ها مشاهده نمی‌شود. به‌گونه‌ای‌که مقایسه میانگین‌ها نشان می‌دهد افزایش عملکرد دانه در تیمار ۷۵ درصد نیاز کودی به‌همراه زادمایه باکتری از نظر آماری برابر با افزایش عملکرد دانه در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز کودی بدون زادمایه باکتری می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که جدایه‌های فراریشه‌ای و درون‌درست توانسته‌اند میزان مصرف کود فسفر را تا ۲۵ درصد در عملکردی برابر عملکرد تیمار ۱۰۰ درصد کود فسفر کاهش دهند. تیمارهای ۵۰ درصد نیاز کودی به‌همراه زادمایه باکتری و تیمار ۷۵ درصد نیاز کودی بدون زادمایه باکتری در مقام‌های بعدی قرار دارند. تیمار شاهد منفی (فاقد کود فسفر و زادمایه باکتری) دارای حداقل عملکرد دانه می‌باشند و عملکرد دانه در این تیمار به‌طور معنی‌داری کمتر از تیمارهای دیگر می‌باشد. نتایج نشان دادند به‌جای استفاده از کود شیمیایی می‌توان با استفاده بهینه از کودهای زیستی و کاهش مصرف ۲۵ درصد کودهای شیمیایی فسفر مانند سوپرفسفات تریپل، عملکرد را تا ۹/۳ درصد افزایش داد. نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که عملکرد دانه در سال دوم آزمایش نسبت به سال اول از میانگین بیش‌تری برخوردار بود (جدول ٦). این اختلاف می‌تواند ناشی از تأثیر عوامل مختلف محیطی از جمله دما باشد (میانگین دمای ماهانه در سال اول آزمایش کم‌تر از میانگین دمای ماهانه در سال دوم آزمایش بود) (جدول ۲). به‌نظر می‌رسد باکتری‌های محرک رشد با توسعه ریشه در فراریشه و انحلال فسفات نامحلول، امکان دریافت فسفر را برای گیاه به میزان بیش‌تری فراهم کرده و نقش مؤثری در افزایش عملکرد گندم داشته است (Rana *et al.*, 2015). افزایش عملکرد دانه تحت تأثیر کودهای زیستی حل‌کننده فسفات نامحلول و مولد هورمون IAA ممکن است به‌دلیل افزایش فعالیت متابولیکی کودهای زیستی که باعث افزایش سرعت فتوسنتز خالص می‌شود و هم‌چنین تولید هورمون‌های محرک رشد توسط باکتری‌ها باشد که در نهایت موجب افزایش عملکرد می‌شود. به‌واسطه نقش مثبت باکتری‌های موجود در کودهای زیستی در تولید و تنظیم هورمون‌های محرک رشد گیاه، سطح و عمق ریشه گسترش یافته و جذب آب و عناصر غذایی افزایش می‌یابد که سبب بهبود رشد و افزایش فتوسنتز و تولید مواد پرورده می‌شود (Belimov *et al.*, 2015) و به همین دلیل کاربرد زادمایه تلفیقی باکتری‌های محرک رشد با ۷۵ درصد کود شیمیایی توانست به میزان ۷٤۷/٤ گرم بر مترمربع تولید داشته باشد که از نظر آماری برابر با میزان تولید در تیمار ۱۰۰ درصد کود شیمیایی فسفر و بدون زادمایه باکتری‌های محرک رشد بود. Naeem *et al.* (2018) گزارش کردند که استفاده از دو باکتری محرک رشد گیاه به‌صورت تلفیقی *Bacillus* sp. strain 6 + *Pseudomonas* sp. strain 6K عملکرد دو رقم گندم را ۳۵/۵ تا ۳۸/۹ درصد افزایش داد. به‌نظر این ویژگی متأثر از نوع گیاه و رقم آن و هم‌چنین سویه‌های استفاده شده در آزمایش‌های مختلف بوده و ویژگی‌های محرک رشد مانند تولید هورمون‌های مختلف شاید در بهبود این پارامتر مؤثر بوده‌اند.

جدول ۵. بررسی اثرات متقابل کودهای شیمیایی و زیستی بر عملکرد و میزان فسفر در بافت‌های مختلف گندم

تیمار	عملکرد دانه (g/m^2)	فسفر برگ (%)	فسفر ساقه (%)	فسفر دانه (%)
B0+F0	۵۷۸/۸f	۰/۰۶۰۰۰d	۰/۰۱۵۰۰d	۰/۱۹۸۳e
B0+F1	۶۰۲/۷e	۰/۰۷۸۳۳c	۰/۰۲۰۰۰cd	۰/۲۲۵۰d
B0+F2	۶۳۳/۸d	۰/۱۰۱۷b	۰/۰۲۱۶۷cd	۰/۲۸۶۷c
B0+F3	۶۸۳/۵b	۰/۱۱۳۳b	۰/۰۳۱۶۷bc	۰/۳۳۵۰b
B0+F4	۷۵۵/۲a	۰/۱۴۸۳a	۰/۰۴۰۰۰ab	۰/۳۷۰۰a
B1+F0	۶۱۳/۸de	۰/۰۸۰۰۰c	۰/۰۲۰۰۰cd	۰/۲۳۰۰d
B1+F1	۶۵۶/۸c	۰/۱۰۳۳b	۰/۰۲۰۰۰cd	۰/۲۸۶۷c
B1+F2	۷۰۲/۹b	۰/۱۱۵۰b	۰/۰۳۰۰۰bcd	۰/۳۳۵۰b
B1+F3	۷۴۷/۴a	۰/۱۴۸۳a	۰/۰۴۰۰۰ab	۰/۳۶۸۳a
B1+F4	۷۶۱/۵a	۰/۱۵۳۳a	۰/۰۴۶۶۷a	۰/۳۷۵۰a

اعدادی که در هر ستون دارای یک حرف مشترک کوچک هستند، از لحاظ آماری در سطح پنج درصد معنی‌دار نمی‌باشند. B0 : بدون مایه‌کوبی، B1: مایه‌کوبی با زادمایه میکروبی، F0: تیمار سطح کودی صفر، F1: تیمار ۲۵ درصد نیاز کودی فسفر، F2: تیمار ۵۰ درصد نیاز کودی فسفر، F3: تیمار ۷۵ درصد نیاز کودی فسفر و F4: تیمار ۱۰۰ نیاز کودی فسفر.

جدول ۶. بررسی اثر سال بر عملکرد دانه و میزان فسفر در بافت‌های مختلف گندم

عامل	عملکرد دانه (g/m^2)	عملکرد بیولوژیک (g/m^2)	فسفر برگ (%)	فسفر دانه (%)
سال اول	۶۶۸/۴b	۱۸۳۷/۲b	۰/۱۰۸b	۰/۲۹۹b
سال دوم	۶۷۸/۸a	۱۸۴۷/۶a	۰/۱۱۲a	۰/۳۰۳a

* اعداد هر ستون با حروف کوچک متفاوت دارای اختلاف معنی‌دار آماری در سطح پنج درصد می‌باشند.

۳. ۴. عملکرد بیولوژیک

تولید ماده خشک یکی از فاکتورهای مهم و تأثیرگذار بر عملکرد می‌باشد. این صفت نشان‌دهنده پتانسیل گیاه در جذب انرژی نورانی و تبدیل آن به انرژی شیمیایی می‌باشد. تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر کود فسفر و زادمایه باکتری‌های محرک رشد بر میزان عملکرد بیولوژیک در مرحله رسیدگی معنی‌دار بود (جدول ۴)، اما اثر متقابل این دو فاکتور بر میزان عملکرد بیولوژیک در این مرحله تفاوت معنی‌داری نداشت. جدول (۷) مقایسه میانگین اثرات ساده تیمارهای مختلف کاربرد زادمایه محرک رشد گیاه و سطوح کودی فسفر را نشان می‌دهد. در ارتباط با مصرف کود شیمیایی فسفر مقایسه میانگین نشان داد که تأمین نیاز گیاه به‌طور کامل از منبع سوپرفسفات تریپل نسبت به شاهد شش درصد عملکرد بیولوژیک را افزایش می‌دهد. Jat *et al.* (2018) گزارش کردند که کاربرد فسفر تا ۴۰ کیلوگرم در هکتار در خاکی با میزان فسفر اولیه ۱۴/۲ کیلوگرم در هکتار به‌صورت معنی‌داری عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک را افزایش داد (به‌طور میانگین ۳۰/۶ درصد نسبت به شاهد)، هم‌چنین افزایش عملکرد حاصل از کاربرد فسفر در مقدار بیش‌تر از ۴۰ کیلوگرم در هکتار معنی‌دار نبود. کاربرد زادمایه جدایه‌های باکتریایی فراریشه‌ای و درون‌رست نسبت به شاهد ۷/۳ درصد عملکرد بیولوژیک را افزایش داد؛ که نشان می‌دهد جدایه‌های باکتریایی نقش کلیدی و مهم در رشد گیاه گندم دارد.

جدول ۷. بررسی اثرات ساده کودهای شیمیایی و زیستی بر عملکرد بیولوژیک گندم

عملکرد بیولوژیک (g/m^2)						
سطوح کود زیستی		سطوح کود شیمیایی				
B0	B1	F0	F1	F2	F3	F4
۱۷۷۷/۵۳۳b	۱۹۰۷/۳۰۰a	۱۷۹۰/۷۵۰e	۱۸۰۹/۵۰۰d	۱۸٤۰/٤۱۷c	۱۸۷۳/۰۸۳b	۱۸۹۸/۳۳۳a

B0: بدون مایه‌کوبی، B1: مایه‌کوبی با زادمایه میکروبی، F0: تیمار سطح کودی صفر، F1: تیمار ۲۵ درصد نیاز کودی فسفر، F2: تیمار ۵۰ درصد نیاز کودی فسفر، F3: تیمار ۷۵ درصد نیاز کودی فسفر و F4: تیمار ۱۰۰ نیاز کودی فسفر.

همان‌گونه‌که مشاهده می‌شود تیماری که با زادمایه باکتری‌های فراریشه‌ای و درون‌رست مولد هورمون IAA مایه‌کوبی شده دارای بیش‌ترین عملکرد بیولوژیک بود (جدول ۷). Afzal *et al.* (2005) در بررسی دو سویه باکتری *Pseudomonas* و *Bacillus* به‌عنوان حل‌کنندگان فسفات مشاهده نمودند که عملکرد بیولوژیک گیاه گندم در تیمار مایه‌کوبی‌شده هر چند روند افزایشی داشت، اما با نمونه شاهد از نظر آماری تفاوتی نشان نداد. Hameeda *et al.* (2008) بعد از جداسازی بیش از ۲۰۰ باکتری حل‌کننده فسفات، پنج سویه برتر را که علاوه بر توان انحلال فسفات دارای سایر ویژگی‌های محرک رشدی بودند را در یک آزمایش روی رشد گیاه ذرت بررسی کرده و افزایش ٤۰–۲۰ درصدی زیست‌توده گیاهی را گزارش کردند. آن‌ها اثر باکتری‌های محرک رشد را در آزمایش گلخانه‌ای و مزرعه‌ای موردبررسی قرار دادند و افزایش معنی‌دار برخی از پارامترهای اندازه‌گیری‌شده مانند زیست‌توده خشک گیاهی، طول ساقه و وزن دانه (عملکرد) را در حضور *Pseudomonas* sp. و *Serratia marcescens* مشاهده نمود Sial *et al.* (2018) گزارش کردند که کاربرد ۷۵ کیلوگرم در هکتار P_2O_5 بیش‌ترین رشد و عملکرد را در گندم ایجاد می‌کند. هم‌چنین استفاده از باکتری‌های حل‌کننده فسفات بر عملکرد گندم و خصوصیات رشدی آن تأثیر گذاشت و نتایج آنها مشابه با کاربرد ۲۵ کیلوگرم در هکتار P_2O_5 بود.

۳. ۵. فسفر برگ

نتایج تجزیه واریانس نشان داد عامل کود فسفری، عامل باکتری و نیز اثرات متقابل آن‌ها در سطح یک درصد بر درصد فسفر برگ معنی‌دار بوده است (جدول ٤). جدول (۵) مقایسه میانگین اثرات متقابل تیمار زادمایه باکتریایی محرک رشد گیاه و سطوح کودی فسفر را نشان می‌دهد. بر این اساس، کاربرد توأم جدایه‌های باکتریایی و سطوح کودی فسفر (۲۵، ۵۰ ، ۷۵ و ۱۰۰ درصد) نسبت به شاهد سبب افزایش معنی‌داری در مقدار فسفر برگ شده است. همان‌گونهکه مشاهده می‌شود تیمارهای دارای ۱۰۰ و ۷۵ درصد نیاز کودی به‌همراه زادمایه باکتری و هم‌چنین تیمار شاهد مثبت (تیمار ۱۰۰ درصد نیاز کودی بدون زادمایه باکتری) دارای بیش‌ترین مقدار فسفر برگ بوده‌اند و اختلاف معنی‌داری بین آن‌ها مشاهده نمی‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که جدایه‌های محرک رشد توانسته است میزان مصرف کود فسفر را تا ۲۵ درصد کاهش دهند. تیمار شاهد منفی (فاقد کود فسفر و زادمایه باکتری) دارای حداقل مقدار فسفر برگ (۰/۰٦ درصد) می‌باشد و مقدار فسفر گیاه در این تیمار به‌طور معنی‌داری کمتر از تیمارهای دیگر می‌باشد.

۳. ٦. فسفر ساقه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد عامل کود فسفری و عامل باکتری در سطح یک درصد و نیز اثرات متقابل آن‌ها در

سطح پنج درصد بر درصد فسفر ساقه معنی‌دار بوده است (جدول ٤). کاربرد زادمایه موجب افزایش ۱۹ درصدی در میزان فسفر در ساقه گیاه گندم شد، به‌گونه‌ایکه مقایسه میانگین‌ها نشان می‌دهد مقدار فسفر در ساقه در تیمار ۷۵ درصد نیاز کودی به‌همراه زادمایه باکتری از نظر آماری با مقدار فسفر در ساقه در تیمار شاهد مثبت اختلاف معنی‌داری ندارد. این موضوع نشان می‌دهد که جدایه‌های محرک رشد توانسته‌اند میزان مصرف کود فسفر را تا ۲۵ درصد کاهش دهند. تیمارهای بدون کود فسفره با و بدون زادمایه باکتری و تیمار ۲۵ درصد نیاز کودی فسفر بدون زادمایه باکتری دارای حداقل مقدار فسفر در ساقه می‌باشند و مقدار فسفر گیاه در این تیمارها به‌طور معنی‌داری کمتر از تیمارهای دیگر می‌باشد.

۳. ۷. فسفر دانه

عامل کود فسفری، عامل باکتری و نیز اثرات متقابل آن در سطح یک درصد بر میزان فسفر دانه در مرحله رسیدگی اثر معنی‌داری داشت. بر این اساس، کاربرد فسفر به‌همراه مایه‌کوبی با زادمایه باکتریایی نسبت به کاربرد فسفر به تنهایی سبب افزایش معنی‌داری در مقدار فسفر دانه گیاه شده است که نشان می‌دهد فسفر نقش کلیدی و مهم در دانه گیاه گندم دارد و بدون وجود فسفر عملکرد گیاه کاهش پیدا می‌کند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تیمارهای دارای ۱۰۰ و ۷۵ درصد نیاز کودی به‌همراه زادمایه باکتری و هم‌چنین تیمار شاهد مثبت (تیمار ۱۰۰ درصد نیاز کودی بدون زادمایه باکتری) به‌ترتیب با ۰/۳۷۵، ۰/۳٦۸ و ۰/۳۷ درصد فسفر دارای بیش‌ترین مقدار بوده‌اند هرچند اختلاف معنی‌داری بین آن‌ها مشاهده نمی‌شود. به‌طوری که مقایسه میانگین‌ها نشان می‌دهد همانند درصد فسفر در برگ و ساقه، مقدار فسفر در تیمار ۷۵ درصد نیاز کودی به‌همراه زادمایه باکتری از نظر آماری برابر با مقدار فسفر در تیمار شاهد مثبت می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که جدایه‌های محرک رشد توانسته‌اند میزان مصرف کود فسفر را تا ۲۵ درصد کاهش دهند. تیمار شاهد منفی دارای حداقل مقدار فسفر در دانه گندم (۰/۱۹۸ درصد) می‌باشد و مقدار فسفر در دانه گیاه در این تیمار به‌طور معنی‌داری کمتر از برخی تیمارهای دیگر می‌باشد.

مطالعات نشان می‌دهد که قابلیت جذب فسفر خاک برای گیاه به فاکتورهای فیزیکی خاک (بافت، رطوبت، دما، تهویه و فشردگی)، فاکتورهای شیمیایی خاک (pH، مینرالوژی، مواد آلی و برهمکنش با دیگر عناصر غذایی)، فاکتورهای زیستی خاک (ترشحات ریشه گیاهان و ریزسازواره‌های خاک)، فاکتورهای گیاهی (واریته و سن گیاه، توسعه و پخشیدگی ریشه گیاه) و کود فسفر (مقدار، روش کاربرد، قابلیت انحلال در آب، فرمول شیمیایی و شکل فیزیکی کود) بستگی دارد (Canarini *et al*., 2019). بنابراین قابلیت دسترسی فسفر خاک به برآیند فاکتورهای اشاره‌شده بستگی دارد که پیچیدگی خاصی به چرخه فسفر داده است. به همین دلیل تخمین قابلیت دسترسی فسفر خاک و جذب آن به‌وسیله گیاه با درنظرگرفتن تعداد محدودی از فاکتورهای اشاره‌شده احتمالاً اشتباه خواهد بود. از طرفی رشدونمو گیاهان به فاکتورهای خیلی زیادی بستگی دارد که یکی از آن‌ها تأمین عناصر غذایی ضروری است و این در حالی است که فسفر تنها یکی از ۱۷ عنصر ضروری برای رشد و نمو گیاهان می‌باشد. بنابراین گاهی با افزایش مقدار کود سوپر فسفات تریپل مصرف‌شده (البته تا یک حدی) تفاوت معنی‌داری از نظر برخی از صفات رشد و نموی ایجاد نمی‌شود (Jeshni *et al*., 2017). در شرایط کمبود فسفر، تیمار باکتریایی نسبت به شاهد (بدون مایه‌کوبی باکتری) فسفر گیاه را افزایش داد. پژوهش‌ها نیز تأییدکننده این موضوع می‌باشد که باکتری‌های محرک رشد گیاه با ترشح ترکیبات کمپلکس‌کننده یا حل‌کننده مانند اسیدهای آلی (Sharma *et al*., 2013)، اسیدهای غیر آلی (Stamford

et al., 2003)، کیلیت‌کردن (Rashid *et al*., 2004) و ترشح فسفاتازهای برون سلولی برای معدنی‌کردن فسفات‌های آلی (Gyaneshwar *et al*., 2002) فسفر قابل جذب خاک را افزایش می‌دهند. البته همیشه و در همه شرایط باکتری‌های محرک رشد باعث بهبود رشد و نمو گیاهان نمی‌شود و گاهی ممکن است شاهد اثرات غیرمعنی‌دار یا حتی کاهشی بر رشد و نمو گیاهان باشیم (Delfim *et al*., 2018). به‌نظر می‌رسد این موضوع به تفاوت‌های ژنتیکی و کارکردی ریزسازواره‌های مختلف بر می‌گردد و با تغییر شرایط زیستی و غیرزیستی محیط اطراف این ریزسازواره‌ها ممکن است رفتارهای متفاوتی از خود نشان دهند. در کل استفاده زادمایه تلفیقی باکتری فراریشه‌ای R185 و باکتری درون‌رست E240 همراه با ۷۵ درصد نیاز کود فسفری برای استفاده در شرایط مزرعه مناسب به‌نظر می‌رسد.

٤. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از اثر زادمایه میکروبی برتر و کود فسفری برای دست‌یابی به حداکثر رشد و عملکرد گیاه گندم طی دو سال کشت متوالی در مزرعه تحقیقاتی نشان داد که افزایش عملکرد گیاه گندم ناشی از تیمار زادمایه باکتری به‌علاوه ۷۵ درصد نیاز کود فسفری از نظر آماری برابر با افزایش شاخص‌ها در تیماری با ۱۰۰ درصد نیاز کودی و بدون زادمایه باکتری است. درصد فسفر بافت‌های گیاه از نظر آماری برای تیمار ۱۰۰ درصد کودهی فسفره بدون زادمایه و تیمار ۷۵ درصد کود همراه با زادمایه باکتری اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشت. نتایج حاصل از ارزیابی کاهش مقادیر مختلف کودی در طی دو سال کشت نشان داد که ۷۵ درصد کود فسفره، کم‌ترین مقدار کودی بود که می‌تواند همراه با زادمایه، رشدی برابر ۱۰۰ درصد کود فسفره و بدون استفاده از زادمایه باکتری ایجاد کند. وقتی ۵۰ درصد کود فسفره یا کم‌تر همراه با زادمایه باکتری اضافه شد، رشد کم‌تری از گیاه گندم یا رشد ناپایداری در مقایسه با تیمار شاهد مثبت (۱۰۰ درصد نیاز کودی و بدون زادمایه باکتری) مشاهده شد. براساس این نتایج، پیشنهاد می‌شود این زادمایه می‌تواند به‌عنوان مکمل با کودهای شیمیایی به‌منظور کاهش سطح مصرف کودهای شیمیایی استفاده شود اما نمی‌تواند جایگزینی برای کود فسفر باشد. بنابراین، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، باکتری‌های محرک رشد فراریشه‌ای R185 و درون‌رست E240 کاندیداهای مناسبی برای توسعه رشد ریشه، جذب بیش‌تر فسفر و در نتیجه افزایش عملکرد گندم هستند و می‌توانند به‌عنوان زادمایه‌هایی برای بهبود سلامت و عملکرد گندم استفاده شوند.

٥. تشکر و قدردانی

از حمایت مالی دانشگاه تهران در انجام این تحقیق، تشکر و قدردانی می‌گردد.

٦. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

٧. منابع

Afzal, A., Ashraf, M., Asad, S. A., & Farooq, M. (2005). Effect of phosphate solubilizing microorganisms on phosphorus uptake, yield and yield traits of wheat (*Triticum aestivum* L.) in rainfed area. *International Journal of Agriculture and Biology*, *7*(2), 207-209.

Belimov, A., Dodd, I., Safronova, V., Shaposhnikov, A., Azarova, T., Makarova, N., & Tikhonovich, I. (2015). Rhizobacteria that produce auxins and contain 1-amino-cyclopropane-1-carboxylic acid deaminase decrease amino acid concentrations in the rhizosphere and improve growth and yield of well watered and water limited potato (*Solanum tuberosum*). *Annals of Applied Biology*, *167*(1), 11-25. https://doi.org/10.1111/aab.12203|

Bric, J. M., Bostock, R. M., & Silverstone, S. E. (1991). Rapid in situ assay for indoleacetic acid production by bacteria immobilized on a nitrocellulose membrane. *Applied and Environmental Microbiology*, *57*(2), 535-538.

Canarini, A., Kaiser, C., Merchant, A., Richter, A., & Wanek, W. (2019). Root exudation of primary metabolites: mechanisms and their roles in plant responses to environmental stimuli. *Frontiers in Plant Science*, 10. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00157

Chen, Y.P., Rekha, P.D., Arunshen, A.B., Lai, W.A., & Young, C.C. (2006). Phosphate solubilising bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilising abilities. *Applied Soil Ecology*, *34*, 33-41. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.12.002

Delfim, J., Schoebitz, M., Paulino, L., Hirzel, J., & Zagal, E. (2018). Phosphorus availability in wheat, in volcanic soils inoculated with phosphate-solubilizing *Bacillus thuringiensis*. *Sustainability*, *10*(1), 144. https://doi.org/10.3390/su10010144

Emami, S., Alikhani, H. A., Pourbabaei, A. A., Etesami, H., Motashare Zadeh, B., & Sarmadian, F. (2018). Improved growth and nutrient acquisition of wheat genotypes in phosphorus deficient soils by plant growth-promoting rhizospheric and endophytic bacteria. *Soil Science and Plant Nutrition*, *64*(6), 719-727. https://doi.org/10.1080/00380768.2018.1510284

Glick, B.R. (2012). Plant Growth-Promoting Bacteria: Mechanisms and Applications. Hindawi Publishing Corporation, Scientifica. https://doi.org/10.6064/2012/963401

Gyaneshwar, P., Kumar, G. N., Parekh, L., & Poole, P. (2002). Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants. *Plant and Soil*, *245*(1), 83-93. https://doi.org/10.1023/A:1020663916259

Hameeda, B., Harini, G., Rupela, O., Wani, S., & Reddy, G. (2008). Growth promotion of maize by phosphate-solubilizing bacteria isolated from composts and macrofauna. *Microbiological Research*, *163*(2), 234-242. https://doi.org/10.1016/j.micres.2006.05.009

Jat, R. C., Sharma, Y., Jakhar, R., & Sharma, R. (2018). Effect of phosphorus, zinc and iron on Physico-chemical properties of soils and yield of wheat in loamy sand soils. *International Journal of Chemical Studies*, *6*(2), 1377-1380.

Jeshni, M. G., Mousavinik, M., Khammari, I., & Rahimi, M. (2017). The changes of yield and essential oil components of German Chamomile (*Matricaria recutita* L.) under application of phosphorus and zinc fertilizers and drought stress conditions. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *16*(1), 60-65. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2015.02.003

Khan, M.S., Zaidi, A., & Wani, P.A. (2007). Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture-a review. *Agronomy for Sustainable Development*, *27*, 29-43. https://doi.org/10.1051/agro:2006011

Khavazi, K., Davatgar, N., Moshiri, F., Balali, M.R., Bazargan, K., Tehranchi, M.M. *et al*. (2014). Soil Fertility and Plant Nutrition Program. *Soil and Water Research Institute*, 282.

Mittal, V., Singh, O., Nayyar, H., Kaur, J., & Tewari, R. (2008). Stimulatory effect of phosphate-solubilizing fungal strains (*Aspergillus awamori* and *Penicillium citrinum*) on the yield of chickpea (*Cicer arietinum* L. cv. GPF2). *Soil Biology and Biochemistry*, *40*, 718-727. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.10.008

Naeem, M., Aslam, Z., Khaliq, A., Ahmed, J. N., Nawaz, A., & Hussain, M. (2018). Plant growth promoting rhizobacteria reduce aphid population and enhance the productivity of bread wheat. *Brazilian Journal of Microbiology*, *49*, 9-14. https://doi.org/10.1016/j.bjm.2017.10.005

Rana, A., Kabi, S. R., Verma, S., Adak, A., Pal, M., Shivay, Y. S., & Nain, L. (2015). Prospecting plant growth promoting bacteria and cyanobacteria as options for enrichment of macro-and micronutrients in grains in rice–wheat cropping sequence. *Cogent Food & Agriculture*, *1*(1), 1037379. https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1037379

Rashid, M., Khalil, S., Ayub, N., Alam, S., & Latif, F. (2004). Organic acids production and phosphate solubilization by phosphate solubilizing microorganisms (PSM) under in vitro conditions. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, *7*(2), 187-196. http://dx.doi.org/10.3923/pjbs.2004.187.196

Ribeiro, V.P., Marriel, I.E., Sousa, S.M.d., Lana, U.G.d.P., Mattos, B.B., Oliveira, C.A.d., & Gomes, E.A. (2018). Endophytic *Bacillus* strains enhance pearl millet growth and nutrient uptake under low-P. *Brazilian Journal of Microbiology*, 49, 40-46. https://doi.org/10.1016/j.bjm.2018.06.005

Schwyn, B., & Neilands, J. (1987). Universal chemical assay for the detection and determination of siderophores. *Analytical Biochemistry*, *160*(1), 47-56. https://doi.org/10.1016/0003-2697(87)90612-9

Sharma, S. B., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H., & Gobi, T. A. (2013). Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. Springer Plus, *2*(1), 587. https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587

Sial, N. A., Abro, S. A., Abbas, M., Irfan, M., & Depar, N. (2018). Growth and Yield of Wheat as affected by Phosphate Solubilizing Bacteria and Phosphate Fertilizer. *Pakistan Journal of Biotechnology*, *15*(2), 475-479.

Sperber, J. I. (1958). The incidence of apatite-solubilizing organisms in the rhizosphere and soil. *Australian Journal of Agricultural Research, 9*(6), 778-781. https://doi.org/10.1071/AR9580778

Stamford, N. P., Santos, P. R. d., Moura, A. M. M. F. d., & Freitas, A. D. S. d. (2003). Biofertilzers with natural phosphate, sulphur and Acidithiobacillus in a soil with low available-P. *Scientia Agricola, 60*(4), 767-773. https://doi.org/10.1590/S0103-90162003000400024

Syers, J., Johnston, A., & Curtin, D. (2008). Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin*, 18(108).

Westerman, R. L. (1991). Soil testing and plant analysis. In: LWW. Soil Science Society of America book series.

Zaidi, A., Khan, M.S., Ahemad, M., Oves, M., & Wani, P.A. (2009). Recent advances in plant growth promotion by phosphate solubilizing microbes. In: Khan, M.S. *et al*., (eds) Microbial Strategies for Crop Improvement. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 23-50.