



The Effect of Organic Fertilizer and Beneficial Microorganisms on the Seedling Emergence and Establishment of Black Cumin

Shirin Taghizoghi¹ | Elias Soltani² | Iraj Allahdadi³ | Meisam Rezaei⁴ |
Vahid Alah Jahandideh Mahjen Abadi⁵

1. Department of Agronomy Sciences and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Pakdasht, Iran. E-mail: shirin.taghizoghi@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Agronomy Sciences and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Pakdasht, Iran. E-mail: elias.soltani@ut.ac.ir
3. Department of Agronomy Sciences and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Pakdasht, Iran. E-mail: alahdadi@ut.ac.ir
4. Soil and Water Research Institute, Karaj, Iran. E-mail: m.rezaei@areeo.ac.ir
5. Soil and Water Research Institute, Karaj, Iran. E-mail: v.jahandideh@areeo.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 4 November 2025
Received in revised form
21 April 2026
Accepted 13 September 2026
Published online 22 September 2026

Keywords:
Biopriming
Growth-Promoting Bacteria
Hydropriming
Vermicompost

ABSTRACT

Objective: This study investigated the effects of vermicompost and different application methods of beneficial microorganisms on the seedling emergence and growth of black cumin (*Nigella sativa* L.) during the 2023–2024 and 2024–2025 growing seasons in Pakdasht and Karaj, Iran, respectively. The interactive effects of these factors on seedling growth and mortality were also evaluated.

Method: The research was conducted as a factorial experiment in a randomized complete block design with two factors: vermicompost application (5 t ha⁻¹ and no application) and seed biological treatment (11 different combinations), at two separate locations with four blocks each. The microorganisms included *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus megaterium*, and mycorrhiza (a blend of *Funneliformis mosseae*, *Rhizophagus irregularis*, and *Claroideoglomus etunicatum* strains).

Results: Analysis of variance showed that vermicompost application had a significant positive effect (at the 1% level) on all measured traits in both regions. With vermicompost application in the Pakdasht and Karaj regions, respectively, the number of nodes on the main stem increased by 22% and 15%, seedling dry weight by 9% and 8%, germination percentage by 10% and 10%, germination rate by 15% and 28%, and final establishment percentage by 22% and 18%. The effect of microorganism type and application method was significant only on germination rate in both regions, and the interaction between microorganism application method and vermicompost was not significant for any trait. Thus, vermicompost application generally enhanced the positive effects of the microorganisms, whereas the different application methods did not produce significant differences in the results.

Conclusions: The application of vermicompost improved the measured traits to a desirable extent at both locations, indicating the high potential of this fertilizer for mitigating environmental stresses. Emergence percentage and rate, number of nodes on the main stem, and seedling dry weight were improved with the biological treatments. Among the biological treatments, biopriming with *Pseudomonas fluorescens* was the most effective, achieving the highest values for all growth indices in both regions. Although mycorrhizal treatments were superior to the control, they performed less well than the bacterial treatments. The results also clearly show that the efficacy of biological treatments is strongly affected by environmental conditions, and that maximizing their effectiveness requires designing the optimal combination of microorganisms and application methods according to the specific conditions of each location.

Cite this article: Taghizoghi, Sh., Soltani, E., Allahdadi, I., Rezaei, M., & Jahandideh Mahjen Abadi, V. (2026). The Effect of Organic Fertilizer and Beneficial Microorganisms on the Seedling Emergence and Establishment of Black Cumin. *Journal of Crops Improvement*, 28 (3), 355–374. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2026.405580.2961>





تأثیر کاربرد کود آلی و میکروارگانسیم‌های سودمند بر سبز شدن و استقرار سیاه‌دانه

شیرین تقی‌ذوقی^۱ | الیاس سلطانی^۲ | ایرج اله‌دادی^۳ | میثم رضائی^۴ | وحیداله جهان‌دیده مهجن‌آبادی^۵

۱. گروه علوم زراعی و اصلاح نباتات، دانشکده فناوری کشاورزی (ایوریحان)، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران. رایانامه: shirin.taghizoghi@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه علوم زراعی و اصلاح نباتات، دانشکده فناوری کشاورزی (ایوریحان)، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران. رایانامه: elias.soltani@ut.ac.ir
۳. گروه علوم زراعی و اصلاح نباتات، دانشکده فناوری کشاورزی (ایوریحان)، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران. رایانامه: alahdadi@ut.ac.ir
۴. مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور، کرج، ایران. رایانامه: m.rezaei@areeo.ac.ir
۵. مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور، کرج، ایران. رایانامه: v.jahandideh@areeo.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

هدف: این پژوهش به منظور بررسی تأثیر کود ورمی کمپوست و روش‌های مختلف کاربرد میکروارگانسیم‌های مفید بر شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه سیاه‌دانه طی دو سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ و ۱۴۰۲-۱۴۰۳ به ترتیب در دو منطقه پاکدشت و کرج انجام شد.

روش پژوهش: این پژوهش به صورت فاکتوریل در پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو فاکتور ورمی کمپوست (مصرف پنج تن در هکتار و عدم مصرف) و تیمار بیولوژیک بذر (۱۱ ترکیب مختلف) در دو مکان جداگانه و چهار بلوک انجام شد. میکروارگانسیم‌ها شامل سودوموناس فلورسنس، باسیلوس مگاتریوم و میکوریزا (تلفیقی از سویه‌های فونلیفورمیس موسه، رایزوفاکوس ایرگولاریس و کلاروتیدئوگلو موس اتونیکاتوم) بود.

یافته‌ها: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که مصرف ورمی کمپوست در هر دو منطقه تأثیر مثبت و معنی‌داری (در سطح یک درصد) بر تمامی صفات اندازه‌گیری شده داشت، به طوری که با مصرف ورمی کمپوست در منطقه پاکدشت و کرج به ترتیب، تعداد گره در ساقه اصلی ۲۲ و ۱۵ درصد، وزن خشک گیاهچه ۹ و ۸ درصد، درصد سبز شدن ۱۰ درصد، سرعت سبز شدن ۱۵ و ۲۸ درصد، درصد استقرار نهایی ۲۲ و ۱۸ درصد بهبود یافت. اثر نوع و نحوه مصرف میکروارگانسیم‌ها تنها بر سرعت سبز شدن در هر دو منطقه معنی‌دار بود، اما اثر متقابل بین روش مصرف میکروارگانسیم و ورمی کمپوست بر هیچ یک از صفات معنی‌دار نبود. این امر حاکی از آن است که مصرف ورمی کمپوست به طور کلی موجب افزایش اثرات مثبت میکروارگانسیم‌ها شد، اما روش‌های مختلف مصرف آن‌ها تفاوت معنی‌داری در نتایج ایجاد نکرد.

نتیجه‌گیری: مصرف کود ورمی کمپوست در هر دو منطقه توانست صفات اندازه‌گیری شده را تا حد مطلوبی بهبود بخشد که نشان از پتانسیل بالای این کود در کمک به تعدیل تنش‌های محیطی دارد. درصد و سرعت سبز شدن، تعداد گره در ساقه اصلی و وزن خشک گیاهچه با کاربرد تیمارهای بیولوژیک بهبود یافت. در میان تیمارهای بیولوژیک، بیوپرایمینگ با باکتری سودوموناس فلورسنس به عنوان مؤثرترین تیمار شناسایی شد که در هر دو منطقه بالاترین مقادیر را برای کلیه شاخص‌های رشدی به خود اختصاص داد. اگرچه تیمارهای مایکوریزا نسبت به شاهد برتری نشان دادند، اما نتایج ضعیف‌تری نسبت به تیمارهای باکتریایی داشتند. هم‌چنین نتایج به وضوح نشان می‌دهد که کارایی تیمارهای بیولوژیک به شدت تحت تأثیر شرایط محیطی قرار دارد و برای دستیابی به حداکثر اثربخشی، لازم است ترکیب بهینه میکروارگانسیم‌ها و روش کاربرد آن‌ها با توجه به شرایط خاص هر منطقه طراحی گردد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۳۱

کلیدواژه‌ها:

باکتری محرک رشد

بیوپرایمینگ

ورمی کمپوست

هیدروپرایمینگ

استناد: تقی‌ذوقی، شیرین؛ سلطانی، الیاس؛ اله‌دادی، ایرج؛ رضائی، میثم و جهان‌دیده مهجن‌آبادی، وحیداله (۱۴۰۵). تأثیر کاربرد کود آلی و میکروارگانسیم‌های سودمند بر سبز شدن و استقرار سیاه‌دانه. به زراعی کشاورزی، ۲۸ (۳)، ۳۷۴-۳۵۵. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2026.405580.2961>



۱. مقدمه

گیاه سیاهدانه^۱ گیاهی از تیره آلانگان^۲، یک‌ساله و بومی جنوب غرب آسیا (حرزالله^۳ و همکاران، ۲۰۱۱) یکی از گیاهان دارویی است که در بعضی از نقاط ایران به‌صورت خودرو و در دیگر مناطق به‌صورت زراعی کاشته می‌شود و مصارف گسترده‌ای در صنایع غذایی و دارویی کشور دارد. میوه این گیاه کپسول است. دانه سیاهدانه غنی از اسیدهای چرب لینولئیک، اولئیک و پالمیتیک است. سیاهدانه به‌دلیل خواص دارویی خود شناخته شده است، از جمله خواص ضد سرطانی، ضد حساسیت، ضد دیابت و ضد میکروبی. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که روغن و دانه‌های این گیاه در درمان بیماری‌هایی مانند برونشیت، دیابت، فشار خون بالا، آرتریت روماتوئید و بیماری‌های دستگاه گوارش مؤثر هستند (عطا^۴، ۲۰۰۳؛ ریاض^۵ و همکاران، ۱۹۹۶؛ رامادا^۶ و مرسل^۷، ۲۰۰۳؛ مهتا^۸ و همکاران، ۲۰۰۹ و حسین^۹ و همکاران، ۲۰۰۹). آمار دقیقی از سطح زیر کشت سیاهدانه در دسترس نیست. بررسی‌ها نشان می‌دهد، طی سال‌های اخیر بر سطح زیر کشت این گیاه رو به افزایش است و کشاورزان در بسیاری از نقاط کشور هر چند در سطوح کوچک به زراعت آن می‌پردازند. به‌عنوان مثال، طبق آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی در سال ۱۳۹۶ سطح زیر کشت، میزان تولید و عملکرد آن به‌ترتیب ۲۴/۲ هکتار، ۳۰/۷ تن و ۱/۳ تن در هکتار گزارش شد (آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۹۶).

جوانه‌زنی عبارتست از خروج ریشه‌چه از پوسته بذر و تحت تأثیر عوامل محیطی و عوامل داخلی بذر صورت می‌گیرد (تامارتاش^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۰). سبزشدن به مرحله‌ای از رشد گیاه گفته می‌شود که در آن گیاهچه از سطح خاک خارج شده و به‌طور کامل قابل مشاهده می‌گردد. این رویداد نتیجه رشد و طول‌شدن ساقه زیرین است که به گیاهچه کمک می‌کند تا نور خورشید را دریافت کند (ماریام^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۳). یکی از مشکلات اصلی در کشت اکثر گیاهان دارویی به‌ویژه بذر سیاهدانه که بذر ریزی دارند، عدم سبزشدن و در نتیجه استقرار نامناسب آن‌ها می‌باشد، چرا که سبزشدن و استقرار گیاهچه در چرخه زندگی گیاه نقش بحرانی دارد و استقرار موفق یک گیاه وابسته به سبزشدن سریع و یکنواخت بذور است (قانع و همکاران، ۱۳۹۶). زراعت در زمین‌های با حاصلخیزی کم و نیز در معرض انواع تنش‌های محیطی مانند کم آبی، شوری، دماهای بالا و پایین با مشکلات فراوانی روبه‌رو است که عمده‌ترین آن‌ها مربوط به سبزشدن و استقرار مناسب محصول در مزرعه است (محمد^{۱۲} و همکاران، ۲۰۲۴).

هدف اصلی در تکنولوژی بذر^{۱۳} بهبود کارکرد بذر در شرایط مختلف است. روش‌های مختلفی برای اطمینان از کارکرد بالای بذر مورد استفاده قرار می‌گیرند که عبارتند از آبیگری بذر^{۱۴}، تیمارهای بیولوژیک بذر^{۱۵} و پوشش‌دادن بذر^{۱۶}. هدف از آبیگری، افزایش درصد و سرعت جوانه‌زنی، گسترش دامنه دمایی جوانه‌زنی و افزایش یکنواختی استقرار بوته‌ها است.

1. *Nigella sativa* L.

2. Ranunculaceae

3. Harzallah

4. Atta

5. Riaz

6. Ramadan

7. Mörsel

8. Mehta

9. Hussain

10. Tamartash

11. Mariyam

12. Muhammad

13. Seed enhancements

14. Seed hydration

15. Biological seed treatments

16. Seed coating

روش معمول برای آبیگری توسعه یافته است که شامل پیش‌خیساندن^۱ و پرایمینگ^۲ می‌باشند (مکدونالد^۳، ۲۰۰۰). از جمله مهم‌ترین تیمارهای افزایش‌دهنده قدرت جوانه‌زنی بذرها، پرایمینگ است.

پرایمینگ فناوری است که به‌واسطه آن بذرها پیش از قرارگرفتن در بستر کشت از لحاظ فیزیولوژیکی و بیولوژیکی، آمادگی جوانه‌زنی را به‌دست می‌آورند. این امر سبب تغییرات زیستی و فیزیولوژیکی زیادی در بذرها و همچنین گیاه حاصل از آن می‌گردد، به‌طوری‌که نتیجه آن جوانه‌زنی بهتر و استقرار مناسب گیاهچه است (اشرف^۴ و فولاد^۵، ۲۰۰۵). در پرایمینگ بذر از روش‌های مختلفی نظیر هیدروپرایمینگ، اسموپرایمینگ، پرایمینگ شیمیایی، پرایمینگ هورمونی و بیوپرایمینگ استفاده می‌شود (جیشا^۶ و همکاران، ۲۰۱۳؛ زولفیکار^۷، ۲۰۲۱).

بیوپرایمینگ به‌عنوان ساده‌ترین، مقرون‌به‌صرفه‌ترین و سازگارترین روش استفاده از میکروارگانیسم‌های مفید در اکوسیستم کشاورزی شناخته شده است. بنابراین، بیوپرایمینگ در احیای سلامت خاک، بهبود تغذیه گیاه و حفظ کیفیت محصول نقش مهمی دارد (سرکار^۸ و همکاران، ۲۰۲۱). در سال‌های اخیر، استفاده از قارچ‌ها و باکتری‌های افزایش‌دهنده رشد گیاه در تقویت زیستی بذر، به‌عنوان یکی از مؤثرترین روش‌های پرایمینگ بذر شناخته شده است. این روش به‌طور فزاینده‌ای جایگزین تیمارهای شیمیایی می‌شود، زیرا علاوه بر کارآمدی، به حفظ محیط‌زیست نیز کمک می‌کند (باشان^۹ و همکاران، ۲۰۰۴). در این روش به‌جای تیمار شیمیایی بذر، از ریزجانداران مفید مانند قارچ‌ها و باکتری‌های محرک رشد گیاهی استفاده می‌گردد که می‌توانند سازگاری و پایداری گیاهان را افزایش دهند (چاکرابورتی^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۲؛ میترا^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۱؛ بنت^{۱۲} و وایپز^{۱۳}، ۲۰۰۸). بیوپرایمینگ به‌عنوان یکی از روش‌های پرایمینگ با ادغام دو جنبه زیستی (تلقیح بذر با موجودات زنده مفید) و فیزیولوژیکی (آب‌نوشی بذر) باعث بهبود کیفیت بذر می‌شود (چاکرابورتی و همکاران، ۲۰۲۲). استفاده صحیح از میکروارگانیسم‌های مفید در بذر یا خاک برای اثربخشی و عملکرد بهتر آن‌ها ضروری است. روش‌های مختلفی مانند کاربرد در خاک، تلقیح با بذر، محلول‌پاشی و پوشش بذر نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین بنابر پژوهش‌های انجام‌شده کاربرد توأم ورمی‌کمپوست و میکروارگانیسم‌ها اثر سینرژیستیک قابل‌توجهی بر جمعیت و فعالیت آن‌ها در خاک دارد (گوسوامی^{۱۴} و همکاران، ۲۰۲۱).

سازگاری میکروارگانیسم‌ها برای رشد در محیط‌های مختلف، پژوهش‌گران را بر آن داشته است تا مداخله میکروبی را در فرایندهای کشاورزی معرفی کنند. بیوپرایمینگ این پتانسیل را دارد که بسیاری از اهداف سیستم تولید مدرن را با استفاده از میکروارگانیسم‌های مفید به روشی سازگار با محیط زیست برآورده کند. این روش نقش مهمی در افزایش کارایی مصرف مواد مغذی محصولات دارد (سرکار و همکاران، ۲۰۲۱). در گیاهان دارویی، به‌دلیل اهمیت حفظ کیفیت محصول، استفاده از کودهای شیمیایی محدود است. بنابراین، لازم است که عناصر غذایی موردنیاز گیاه از طریق کودهای

1. Prehydration
2. Priming
3. McDonald
4. Ashraf
5. Foolad
6. Jisha
7. Zulfikar
8. Sarkar
9. Bashan
10. Chakraborti
11. Mitra
12. Bennett
13. Whipps
14. Goswami

زیستی و آلی تأمین شود. با توجه به اهمیت روزافزون استفاده از کودهای زیستی برای دستیابی کشاورزی پایدار، این پرسش مطرح بود که آیا استفاده از ورمی‌کمپوست و نوع و نحوه مصرف میکروارگانیسم‌های مفید می‌تواند در بهبود سبزشدن و رشد اولیه گیاهچه سیاه‌دانه مؤثر باشد؟ بنابراین هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر کاربرد کود ورمی‌کمپوست و میکروارگانیسم‌های مفید بر بهبود سبزشدن و رشد گیاه سیاه‌دانه بود.

۲. پیشینه پژوهش

باکتری سودوموناس از طریق تولید سیدروفورها موجب بهبود جذب عناصر غذایی، با سنتز هورمون‌های رشد گیاهی نظیر اکسین و جیبرلین سبب تحریک تقسیم سلولی و با تولید آنزیم ACC دآمیناز^۱ باعث افزایش مقاومت به تنش‌های محیطی می‌شود (وهاب^۲ و همکاران، ۲۰۲۴). در پژوهش‌های متعدد به اثرات مثبت استفاده از باکتری باسیلوس اشاره شده است. این باکتری بیش‌تر از طریق تولید آنتی‌بیوتیک‌های طبیعی و ترکیبات ضد قارچی، پاتوژن‌های خاک‌زی را مهار کرده و با ایجاد بیوفیلم‌های محافظتی در ناحیه ریزوسفر از ریشه در برابر عوامل بیماری‌زا محافظت می‌نماید (فیرا^۳ و همکاران، ۲۰۱۸؛ میلجاکوویک^۴ و همکاران، ۲۰۲۰).

میکروارگانیسم‌های محرک رشد گیاه می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی بر فیزیولوژی گیاه تأثیر بگذارند. به‌عنوان مثال، قارچ‌های مایکوریزا با گسترش شبکه‌های هیفی خود در خاک، سطح جذب ریشه را به میزان قابل‌توجهی افزایش داده و دسترسی گیاه به آب و مواد مغذی، به‌ویژه فسفر و نیتروژن را بهبود می‌بخشند (ژو^۵ و همکاران، ۲۰۲۲). شبکه‌های هیفی خارج ریشه‌ای قارچ‌های مایکوریزا می‌توانند حجم‌های خاک فراتر از ناحیه ریشه را کاوش کرده و به مواد مغذی دسترسی پیدا کنند که در غیر این صورت برای گیاه قابل‌دسترس نیستند (چن^۶ و همکاران، ۲۰۱۸). از سوی دیگر، باکتری‌های سودمند با تولید هورمون‌هایی مانند اکسین و جیبرلین، رشد ریشه و ساقه را تحریک کرده و کارایی استفاده از آب و مواد معدنی را افزایش می‌دهند (علی^۷ و همکاران، ۲۰۲۲). این باکتری‌ها همچنین از طریق تولید سیدروفور، جذب آهن را بهبود بخشیده و با تولید آنزیم‌هایی مانند ACC دآمیناز، مقاومت گیاه در برابر تنش‌های محیطی را افزایش می‌دهند (د‌آندرد^۸ و همکاران، ۲۰۲۳).

نتایج برخی پژوهش‌ها نشان داده است که ترکیبات آلی موجود در ورمی‌کمپوست نه‌تنها به‌عنوان منبع کربن و انرژی برای باکتری‌ها عمل می‌کند، بلکه با ایجاد شرایط مطلوب فیزیوشیمیایی در خاک، بقای میکروارگانیسم‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین، ورمی‌کمپوست با بهبود ساختار خاک و افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت، محیط پایدارتری برای رشد و تکثیر میکروارگانیسم‌ها فراهم می‌کند (منظور^۹ و همکاران، ۲۰۲۴؛ زندنادی^{۱۰} و بساتو^{۱۱}، ۲۰۱۲).

پژوهش‌گران معتقدند که مواد زیست‌فعال موجود در ورمی‌کمپوست مانند هورمون‌های رشد گیاهی و ویتامین‌ها ممکن است با تحریک متابولیسم باکتریایی، تولید موادی مانند اگزوپولی‌ساکاریدها^{۱۲} را افزایش داده و مقاومت باکتری‌ها را در برابر

1. ACC deaminase

2. Wahab

3. Fira

4. Miljaković

5. Zhu

6. Chen

7. Ali

8. De Andrade

9. Manzoor

10. Zandonadi

11. Busato

12. Exopolysaccharide

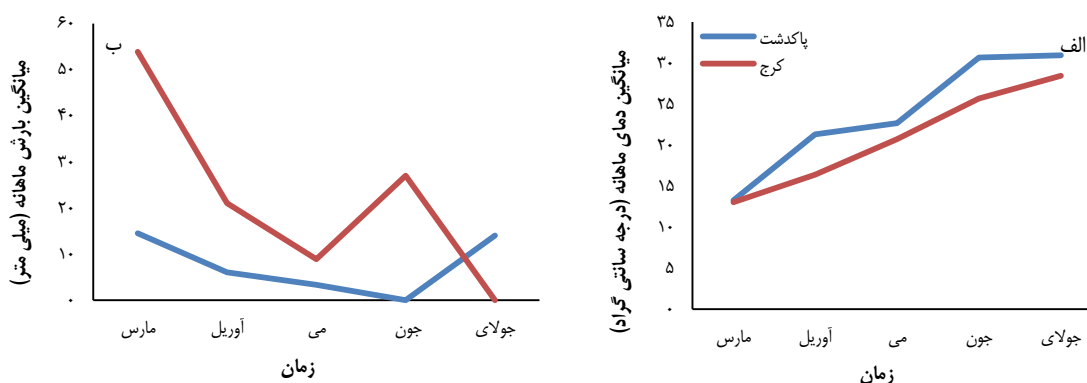
شرایط نامساعد محیطی بهبود بخشند. این اثرات ترکیبی نه‌تنها باعث افزایش کمی جمعیت میکروبی می‌شود، بلکه فعالیت زیستی آن‌ها را نیز تقویت می‌کند (وَنگ^۱ و همکاران، ۲۰۲۰؛ رامادان^۲ و همکاران، ۲۰۲۳). به‌طوری‌که در تیمارهای همراه با ورمی‌کمپوست، فعالیت آنزیمی و تولید متابولیت‌های مؤثر در رشد گیاه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. این یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از ورمی‌کمپوست می‌تواند به‌عنوان یک راه‌کار مدیریتی مؤثر برای افزایش پایداری و کارایی میکروارگانیسم‌های مفید در خاک مورد استفاده قرار گیرد و اثرات مثبت آن‌ها بر رشد و عملکرد گیاهان زراعی را تقویت کند.

۳. روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش در دو سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ و ۱۴۰۲-۱۴۰۳ به‌ترتیب در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه تهران-دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان واقع در شهرستان پاکدشت، جنوب‌شرقی استان تهران (سال اول) و مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور واقع در محمدشهر کرج (سال دوم) اجرا شد. از لحاظ جغرافیایی پاکدشت در عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۰۲۷ متری از سطح دریا واقع شده است. از نظر اقلیم، منطقه پاکدشت جزو مناطق خشک محسوب شده و بارندگی‌ها بیش‌تر در دو فصل پاییز و زمستان صورت می‌گیرد و در این منطقه درجه حرارت متوسط سالیانه ۱۹/۴ درجه سانتی‌گراد و بارندگی سالانه ۸۶/۵ میلی‌متر می‌باشد. محمد شهر در عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۹ دقیقه شمالی و ۵۰ درجه و ۵۹ دقیقه شرقی و در ارتفاع ۱۱۰۰ متری از سطح دریا قرار دارد. از نظر اقلیم محمد شهر با آب‌وهوای نیمه‌خشک با میانگین دمای سالانه ۱۶/۸۰ درجه سانتی‌گراد و بارندگی ۲۰۲ میلی‌متر در سال در جنوب رشته کوه البرز واقع شده است. اطلاعات خاک‌شناسی دو منطقه پاکدشت و کرج در جدول (۱) ارائه شده است. اطلاعات میانگین بارش و دمای ماهانه در دو منطقه ارائه شده است (شکل ۱).

جدول ۱. اطلاعات خاک‌شناسی دو منطقه پاکدشت و کرج

عمق (سانتی‌متر)	N (درصد)	P (پی‌پی‌ام)	K (پی‌پی‌ام)	رس (درصد)	سیلت (درصد)	شن (درصد)	EC (دسی‌زیمنس بر متر)	pH
۳۰-۰	۰/۰۵	۱۰/۴	۲۸۹/۲۳	۱۸	۵۰	۳۲	۴/۳	۷/۲۰
۱۵-۰	۰/۰۷	۱۱/۲	۲۴۰	۲۶	۵۴	۲۰	۱/۳۴	۷/۹



شکل ۱. میانگین دمای ماهانه (الف) و میانگین بارش ماهانه (ب) در دو منطقه پاکدشت و کرج

1. Wong
2. Ramadan

آزمایش مزرعه‌ای به صورت فاکتوریل در پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو فاکتور مصرف ورمی کمپوست (پنج تن در هکتار) و عدم مصرف ورمی کمپوست انجام شد. تیمار بیولوژیک بذر (۱۱ ترکیب مختلف ذکر شده در جدول ۲) در دو مکان جداگانه و چهار بلوک انجام شد. میکروارگانیسم‌ها شامل سودوموناس فلورسنس، باسیلوس مگاتریوم و میکوریزا (تلفیقی از سویه‌های فونلیفورمیس موسه^۱، رایزوفآگوس ایرگولاریس^۲ و کلاروئیدئوگلووموس اتونیکاتوم^۳) بود. بذر سیاه‌دانه توده سمیرم از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه شد. اندازه هر کرت دو متر در دو متر و فاصله کرت‌ها در هر تکرار و فاصله تکرارها با هم ۰/۵ متر بود. کشت به صورت ردیفی انجام شد و فاصله ردیف‌های کاشت از هم ۲۵ سانتی‌متر و فاصله بذور روی ردیف یک و ۰/۵ تا دو سانتی‌متر و تراکم حدود ۲۵۰ بوته در مترمربع بود. میکروارگانیسم‌های مورد استفاده از کلکسیون میکروبی مؤسسه تحقیقات خاک و آب تهیه شد.

۳.۱. آماده‌سازی تیمارهای بذری

۳.۱.۱. تهیه سوسپانسیون باکتریایی برای آماده‌سازی تیمارهای بذر

جهت تهیه سوسپانسیون باکتریایی، یک لوپ از باکتری رشد یافته در محیط کشت جامد با رعایت کامل شرایط استریل به ارلن ۲۵۰ میلی‌لیتری حاوی محیط کشت نوترینت براس^۴ منتقل و مدت ۴۸-۲۴ ساعت بر روی شیکر انکوباتور در دمای ۲۸-۳۰ درجه سانتی‌گراد و با سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه هوادهی و خوابانده شد. پس از رشد کافی باکتری‌ها درون محیط کشت، جمعیت آن‌ها به روش شمارش کلونی و سری رقت تعیین و در حدود ۱۰^۸ واحد تشکیل دهنده کلونی بر میلی‌لیتر^۵ محیط کشت تنظیم شد. سپس ماده چسباننده کربوکسی متیل سلولز^۶ (CMC) به مایه تلقیح به گونه‌ای اضافه شد که غلظت آن در محیط ۰/۱ درصد بود. این ماده با افزایش ویسکوزیته محیط آبی، حرکت باکتری‌ها را کند کرده و از ته‌نشینی و تجمع آن‌ها در سوسپانسیون جلوگیری می‌کند. این امر باعث پایداری یکنواخت سوسپانسیون باکتریایی در طول فرایند پوشش‌دهی بذر می‌شود و توزیع باکتری‌ها روی سطح بذر را یکنواخت‌تر می‌کند. همچنین یک پلیمر فوق جاذب آب است. وقتی بذر پوشش‌دار شده با CMC در خاک قرار می‌گیرد، این لایه رطوبت اطراف بذر را جذب و حفظ می‌کند، یک ریز محیط مرطوب و پایدار در اطراف بذر ایجاد می‌کند. ابتدا بذور سیاه‌دانه را با هیپوکلریت سدیم ۱ درصد به مدت ۳۰ ثانیه استریل کرده و سپس چندین مرتبه با آب مقطر استریل شست‌وشو شد.

به منظور بیوپرایمینگ، بذور در سوسپانسیون باکتریایی، در ابتدا ۲/۵ میلی‌لیتر مایه تلقیح باکتری با جمعیت ۱۰^۸ واحد تشکیل دهنده کلونی بر میلی‌لیتر در ۶۰ میلی‌لیتر آب ریخته شده و سپس ۵۰ گرم از بذور استریل شده به مدت سه ساعت در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) در سوسپانسیون غوطه‌ور شد. بذور در مکان مناسب تمیزی دور از نور مستقیم خورشید و در محیط خشک و خنک نگهداری شده تا خشک شدند. در این روش ۵۰ میلی‌لیتر مایه تلقیح با جمعیت ۱۰^۸ واحد تشکیل دهنده کلونی بر میلی‌لیتر به ازای یک کیلوگرم بذر مصرف شد.

جهت بذرمال کردن باکتری‌ها نخست ۵۰ گرم بذر در داخل ظرف مناسب تمیزی ریخته شد. سپس ۲/۵ میلی‌لیتر مایه تلقیح باکتری به آن اضافه و برای چند دقیقه محتویات ظرف به خوبی تکان داده شد تا از آغشته شدن همه بذرها به مایه تلقیح اطمینان حاصل شد. بذرها در مکان مناسب تمیزی دور از نور مستقیم خورشید و ترجیحاً در محیط خشک و خنک

1. *Funneliformis mosseae*
2. *Rhizopagus irregularis*
3. *Claroideoglomus etunicatum*
4. Nutrient Broth
5. cfu/ml
6. Carboxymethyl cellulose

نگهداری شده تا خشک شدند. مقدار مایه تلقیح مورد استفاده حدود ۵۰ میلی‌لیتر مایه تلقیح با جمعیت 10^8 واحد تشکیل‌دهنده کلونی بر میلی‌لیتر به‌ازای یک کیلوگرم بذر بود، به‌گونه‌ای که بذور فقط مرطوب شده و از خیس و چسبیده شدن بذور اجتناب گردید. در روش خیساندن خاک^۱، در هر کرت ۰/۴ میلی‌لیتر مایه تلقیح باکتری با جمعیت 10^8 واحد تشکیل‌دهنده کلونی بر میلی‌لیتر با ۰/۵ لیتر آب مخلوط شد و در دو نوبت (اولین آبیاری بعد از کشت بذر و قبل از گلدهی) استفاده گردید. در این روش یک لیتر مایه تلقیح باکتری با جمعیت 10^8 واحد تشکیل‌دهنده کلونی بر میلی‌لیتر در هکتار مصرف شد (اسدی رحمانی و همکاران، ۱۴۰۱).

۲.۱.۳. تهیه سوسپانسیون مایکوریزایی برای آماده‌سازی تیمارهای بذر

برای تهیه سوسپانسیون مایکوریزا، ۲/۵ گرم مایه تلقیح پودری (با جمعیت ۳۰۰ پروپاگول در هر گرم) در ۶۰ میلی‌لیتر آب حاوی کربوکسی متیل سلولز (CMC) ۰/۱ درصد اضافه نموده و به‌خوبی به‌هم زده شد. به‌منظور بیوپرایمینگ، میزان ۵۰ گرم بذر سیاه‌دانه استریل شده به‌مدت سه ساعت در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) در سوسپانسیون مایکوریزایی قرار داده شد. بذور پس از خروج از سوسپانسیون، در مکان مناسب تمیزی دور از نور مسقیم خورشید، در محیطی خشک و خنک نگهداری شده تا خشک شدند. در این روش ۵۰ گرم مایه تلقیح پودری با جمعیت 10^8 cfu/ml به‌ازای یک کیلوگرم بذر مصرف شد.

جهت بذر مال کردن بذور، در مرحله نخست ۵۰ گرم بذر استریل را در ظرف مناسب تمیزی ریخته و با ۲ میلی‌لیتر CMC ۰/۱ درصد آغشته نموده و به‌خوبی به‌هم زده شد، سپس ۲/۵ گرم مایه تلقیح پودری با جمعیت ۳۰۰ پروپاگول در هر گرم بذر اضافه و کاملاً با هم مخلوط نموده، به‌گونه‌ای که تمامی بذرها با یک لایه یکنواخت از مایه تلقیح پوشانده شد. در پایان پس از خشک شدن رطوبت سطحی بذرها، در ظرف مناسب تمیزی ریخته و در ظرف خشک و خنک، نسبت به کاشت آن‌ها اقدام شد. در این روش ۵۰ گرم کود زیستی میکوریزا با جمعیت ۳۰۰ پروپاگول در هر گرم به‌ازای یک کیلوگرم بذر مصرف شد. برای مصرف خاکی میکوریزا پس از ایجاد ردیف‌های کشت، ۱۰۰ کیلوگرم قارچ میکوریزا با جمعیت ۱۰۰ پروپاگول در هر گرم در هر هکتار در کف جوی‌های ایجاد شده همانند کودهای شیمیایی به زیر بستر بذر اضافه و با خاک پوشانده شد (اسدی رحمانی و همکاران، ۱۴۰۱).

۲.۳. هیدروپرایمینگ بذور

برای تیمار پرایمینگ از روش هیدروپرایمینگ (پرایمینگ بذر با استفاده از آب) پیشنهاد شده توسط توسلی^۲ و کاسینو^۳ (۲۰۰۳) استفاده شد (توسلی و کاسناوا، ۲۰۰۳).

در این آزمایش هیچ‌گونه کود شیمیایی استفاده نشد. پس از کشت در مزرعه، آبیاری با استفاده از نوار تیپ پلاکدار با فاصله درپیر ۱۰ سانتی‌متر انجام شد و برای کنترل علف‌های هرز چند نوبت وجین انجام شد. کد تیمارها که نشان‌دهنده نوع میکروارگانیزم و نحوه مصرف آن‌هاست، در جدول (۲) نشان داده شده است.

1. Soil drenching
2. Toselli
3. Casenave

جدول ۲. کد تیمارها، نوع میکروارگانیسم‌ها و نحوه مصرف آن‌ها

کد تیمار	میکروارگانیسم و روش کاربرد
PseBio	سودوموناس-بیوپرایمینگ
PseSoil	سودوموناس-خاک مصرف
PseSeed	سودوموناس-بذر مال
BacBio	باسیلوس-بیوپرایمینگ
BacSoil	باسیلوس-خاک مصرف
BacSeed	باسیلوس-بذر مال
MycBio	مایکوریزا-بیوپرایمینگ
MycSoil	مایکوریزا-خاک مصرف
MycSeed	مایکوریزا-بذر مال
Hyd	هیدروپرایمینگ
C	شاهد (بذر بدون تیمار)

۳.۳. بررسی صفات مورفوفیزیولوژیک گیاهچه

درصد سبزشدن در مزرعه به‌صورت هفتگی طی دو ماه ثبت گردید. در نهایت سرعت سبزشدن و استقرار گیاهچه در مزرعه براساس آن داده‌ها محاسبه شد. پس از دو ماه سه گیاهچه از هر کرت به‌صورت تصادفی برداشت و نمونه‌ها به آزمایشگاه انتقال داده شد و ارتفاع گیاهچه، تعداد گره در ساقه اصلی اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها را در پاکت قرار داده و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار داده و پس از توزین پاکت‌های حاوی نمونه، با کسر وزن پاکت‌ها، میزان وزن خشک گیاهچه به‌دست آمد.

برای آنالیز داده‌ها از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۴)، رسم شکل‌ها از نرم‌افزار اکسل^۱ (نسخه ۲۰۱۹) و برای محاسبه درصد و سرعت سبزشدن در مزرعه از برنامه Germin^{V3} استفاده شد. که این برنامه زمان رسیدن به درصد‌های مختلف سبزشدن، از جمله زمان رسیدن به ۱۰ درصد سبزشدن (t_{10}) را از طریق درون‌یابی خطی^۲ محاسبه کرده و سپس سرعت سبزشدن را با استفاده از معکوس آن تعیین می‌کند (وندلوک^۳ همکاران، ۲۰۲۴). برای تجزیه همبستگی از نرم‌افزار R-Studio استفاده شد. نتایج آزمون بارتلت، ناهمسانی واریانس معنی‌داری را در داده‌های دو مکان مورد مطالعه نشان داد، به همین دلیل داده‌های هر مکان جداگانه آنالیز شدند. مقایسه میانگین به‌صورت LSD^۴ در سطح احتمال ۵ درصد صورت گرفت.

۴. یافته‌های پژوهش

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر ورمی‌کمپوست در هر دو منطقه بر درصد و سرعت سبزشدن سیاه‌دانه در مزرعه، تعداد گره روی ساقه اصلی، وزن خشک گیاهچه و استقرار گیاهچه معنی‌دار بود. اثر نحوه مصرف میکروارگانیسم‌ها در پاکدشت بر سرعت سبزشدن در کرج فقط بر سرعت سبزشدن در مزرعه معنی‌دار بود، اما اثر متقابل آن‌ها در هر دو منطقه بر هیچ صفتی معنی‌دار نبود (جدول ۳).

وجود تفاوت‌های معنی‌دار بین اثرات تیمارهای مختلف بیولوژیک بذر بر درصد و سرعت سبزشدن، استقرار گیاهچه، تعداد گره در ساقه اصلی و وزن خشک گیاهچه سیاه‌دانه با تیمار هیدروپرایمینگ و شاهد در شکل (۲) نشان داده شده است. روند تغییرات حداکثر سبزشدن در مزرعه در تیمارهای مختلف در پاکدشت نشان داد که تیمارهای بیولوژیک موجب

1. Excel

2. Linear interpolation

3. Vandelook

4. Least Significant Difference

افزایش حدود ۱۵ درصدی حداکثر سبزشدن در مزرعه نسبت به تیمار شاهد شدند. بررسی این روند در کرج نیز نشان داد که تیمارهای بیوپرایمینگ درصد سبزشدن در مزرعه نسبت به تیمار شاهد را حدود ۱۶ درصد افزایش داد.

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات موردبررسی در سیاه‌دانه تحت تیمارهای بیولوژیک بذر و مصرف ورمی کمپوست در دو منطقه

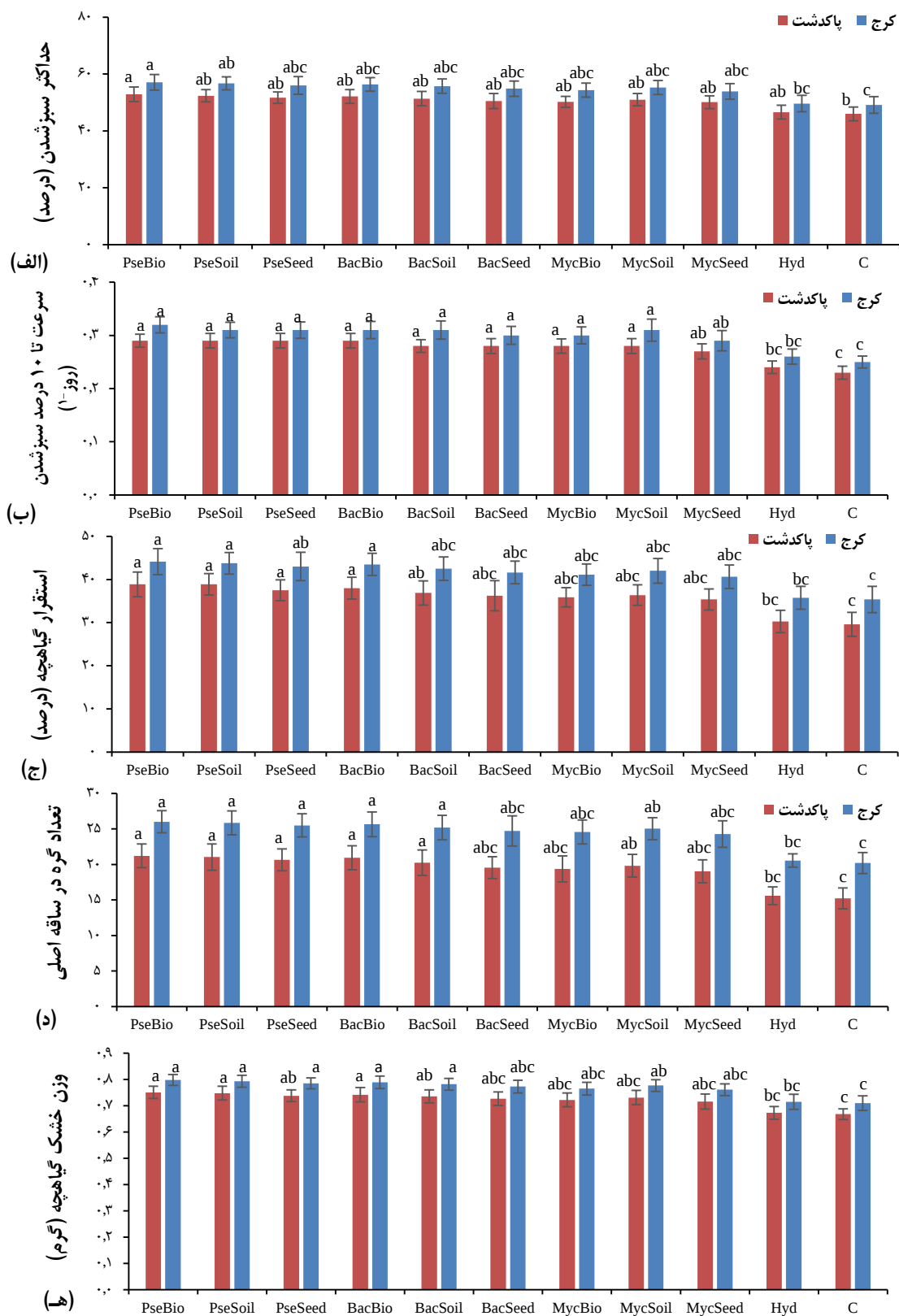
پاکدشت و کرج					
منابع تغییر	درجه آزادی	درصد سبزشدن	سرعت تا ۱۰ درصد سبزشدن	تعداد گره در ساقه اصلی	وزن خشک گیاهچه
استقرار گیاهچه					
پاکدشت					
بلوک	۳	۲۹ _{ns}	۰/۰۰۳ _{ns}	۳۱/۱۲ _{ns}	۰/۰۰۵ _{ns}
ورمی کمپوست	۱	۴۷۲/۹۱**	۰/۰۳۱**	۳۸۴/۸۱**	۰/۰۷**
نوع و نحوه مصرف میکروارگانیزم	۱۰	۳۹/۸۶ _{ns}	۰/۰۰۲*	۳۱/۶۳ _{ns}	۰/۰۰۶ _{ns}
اثر متقابل	۱۰	۵/۵۸ _{ns}	۰/۰۰۰۴ _{ns}	۳/۷۶ _{ns}	۰/۰۰۱ _{ns}
خطا	۶۳	۴۳/۵۵	۰/۰۰۱	۲۰/۲۵	۰/۰۰۵
CV		۱۳/۰۸	۱۲/۲۲	۲۳/۰۳	۹/۴۳
کرج					
بلوک	۳	۵۵/۵۹ _{ns}	۰/۰۰۰۷ _{ns}	۷/۵۹ _{ns}	۰/۰۰۴ _{ns}
ورمی کمپوست	۱	۶۳۸/۲۸**	۰/۰۴**	۴۰۲/۲۳**	۰/۰۷**
نوع و نحوه مصرف میکروارگانیزم	۱۰	۵۸/۴۳ _{ns}	۰/۰۰۴*	۳۱/۴۲ _{ns}	۰/۰۰۷ _{ns}
اثر متقابل	۱۰	۸/۴۱ _{ns}	۰/۰۰۰۷ _{ns}	۶/۳۹ _{ns}	۰/۰۰۱ _{ns}
خطا	۶۳	۵۵/۴۴	۰/۰۰۲	۲۲/۴۵	۰/۰۰۴
ضریب تغییرات (درصد)		۱۳/۶۷	۱۳/۸۵	۱۹/۸۷	۸/۱۹

ns، * و ** به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد و غیرمعنی‌دار.

روند تغییرات سرعت تا ۱۰ درصد سبزشدن در هر دو منطقه مبین افزایش معنی‌دار سرعت تا ۱۰ درصد جوانه‌زنی در تمامی تیمارهای بیولوژیک نسبت به شاهد بود؛ به‌عنوان مثال در پاکدشت همه تیمارهای بیولوژیک موجب افزایش حدود ۲۵ درصدی این صفت نسبت به شاهد شدند. در کرج نیز این تیمارها سرعت تا ۱۰ درصد جوانه‌زنی را به میزان حدود ۲۷ درصد نسبت به شاهد افزایش دادند (شکل ۲).

بررسی روند تغییرات استقرار گیاهچه در منطقه پاکدشت نشان داد که تیمارهای باکتریایی به‌طور معنی‌داری موجب افزایش حدود ۲۸ درصدی این صفت نسبت به شاهد شدند. این بررسی در کرج مبین افزایش معنی‌دار این صفت در تیمارهای باکتریایی به میزان حدود ۲۴ درصد نسبت به شاهد بود. اکثر تیمارهای بیولوژیک در هر دو منطقه موجب افزایش معنی‌دار تعداد گره در ساقه اصلی نسبت به تیمار شاهد شدند. روند تغییرات وزن خشک گیاهچه در تیمارهای مختلف نشان داد که در هر دو منطقه تیمارهای سودوموناس و باسیلوس بیوپرایمینگ و خاک مصرف موجب افزایش معنی‌دار این صفت نسبت به شاهد شد (شکل ۲).

در میان تیمارهای مختلف، تیمار بیوپرایمینگ با سودوموناس به‌عنوان مؤثرترین تیمار شناسایی گردید. این تیمار در هر دو منطقه بالاترین مقادیر را برای کلیه شاخص‌های اندازه‌گیری‌شده به خود اختصاص داد. تیمارهای سودوموناس خاک مصرف و باسیلوس بیوپرایمینگ نیز نتایج مشابه با تیمار برتر نشان دادند. این یافته نشان‌دهنده اثربخشی قابل‌توجه این دو روش در بهبود شاخص‌های مورد مطالعه است. تیمارهای مربوط به مایکوریزا اگرچه نسبت به تیمار شاهد برتری نشان دادند، اما نسبت به تیمارهای باکتریایی نتایج ضعیف‌تری داشتند. علاوه بر این، تفاوت در روش‌های کاربرد نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی تیمارها داشته است. در بین روش‌های کاربرد مایکوریزا، روش خاک مصرف نسبت به سایر روش‌ها نتایج بهتری نشان داد.



شکل ۲. تأثیر نوع و نحوه مصرف میکروارگانیسم (کد تیمارها در جدول (۲) نشان داده شده است) بر حداکثر سبزشدن (الف)، سرعت سبزشدن (ب)، درصد استقرار گیاهچه (ج)، تعداد گره در ساقه اصلی (د) و وزن خشک گیاهچه (ه) در دو منطقه پاکدشت و کرج.

تیمار هیدروپرایمینگ به‌تنهایی با وجود برتری نسبت به تیمار شاهد، به‌طور واضحی نتایج ضعیف‌تری نسبت به تیمارهای میکروبی نشان داد. این موضوع اهمیت استفاده توأم از تکنیک پرایمینگ و میکروارگانیزم‌های مفید را برجسته می‌سازد. تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری پایین‌ترین مقادیر را در تمامی شاخص‌های اندازه‌گیری شده نشان داد که این امر ضرورت به‌کارگیری روش‌های پرایمینگ و میکروارگانیزم‌ها را در بهبود شاخص‌های رشد و استقرار سیاه‌دانه تأیید می‌کند.

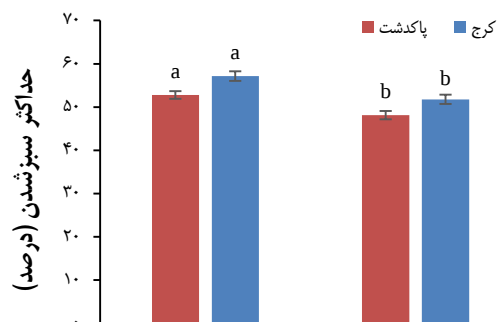
براساس نتایج به‌دست‌آمده، منطقه کرج به‌طور ثابت برتری قابل‌ملاحظه‌ای را در کلیه صفات اندازه‌گیری شده نسبت به منطقه پاکدشت نشان داد. این برتری در بالاترین مقادیر ثبت‌شده برای درصد سبزشدن ($57/13$)، تعداد گره ($26/01$)، وزن خشک گیاهچه ($0/798$ گرم) و سرعت سبزشدن ($0/32$ بر روز) مشهود بود. علاوه بر این بالاترین درصد استقرار گیاهچه ($44/13$) نیز در این منطقه مشاهده شد.

نتایج این پژوهش به‌وضوح نشان‌دهنده تأثیر مثبت و معنی‌دار مصرف کود ورمی‌کمپوست بر بهبود شاخص‌های رشد و استقرار گیاه دارویی سیاه‌دانه در شرایط دو منطقه اکولوژیک متفاوت است. براساس یافته‌های به‌دست‌آمده، مصرف کود ورمی‌کمپوست در تمامی پارامترهای موردبررسی نسبت به عدم مصرف کود برتری قابل‌توجهی از خود نشان داد. در منطقه پاکدشت، تعداد گره در ساقه اصلی 22 درصد، وزن خشک گیاهچه 9 درصد، درصد سبزشدن 10 درصد، سرعت سبزشدن 15 درصد و درصد استقرار نهایی از 22 درصد با مصرف ورمی‌کمپوست بهبود یافت. در منطقه کرج نیز روند مشابهی مشاهده شد، به‌طوری‌که تعداد گره در ساقه اصلی 15 درصد، وزن خشک گیاهچه 8 درصد، درصد سبزشدن 10 درصد، سرعت سبزشدن از 28 درصد و درصد استقرار نهایی 18 درصد افزایش یافت. این بهبود هم‌زمان در کلیه شاخص‌های موردبررسی نشان‌دهنده تأثیر جامع شرایط مصرف کود ورمی‌کمپوست بر مراحل مختلف رشد گیاه از جوانه‌زنی تا استقرار کامل است. همچنین، منطقه کرج به‌طور ثابت برتری قابل‌ملاحظه‌ای را در کلیه صفات اندازه‌گیری شده نسبت به منطقه پاکدشت نشان داد. این برتری در بالاترین مقادیر ثبت‌شده برای درصد سبزشدن ($57/27$)، تعداد گره ($26/02$)، وزن خشک گیاهچه ($0/80$ گرم) و سرعت سبزشدن ($0/32$ بر روز) و بالاترین درصد استقرار گیاهچه ($44/66$) مشهود بود (شکل ۳).

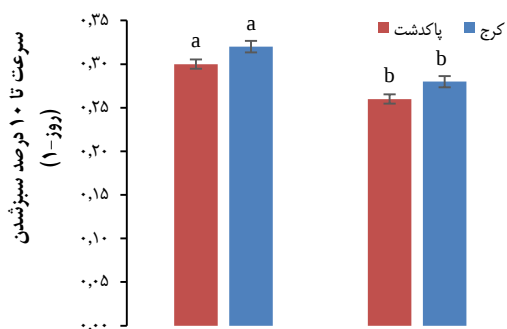
با توجه به شکل (۴) بین درصد سبزشدن در مزرعه و سرعت سبزشدن، درصد استقرار گیاهچه و تعداد گره در ساقه اصلی در هر دو منطقه و بین این صفت و وزن خشک گیاهچه در پاکدشت ارتباط مثبت و معنی‌داری وجود دارد. به‌طوری‌که با افزایش هر واحد درصد سبزشدن در مزرعه به‌ترتیب سرعت سبزشدن در مزرعه، درصد استقرار گیاهچه و تعداد گره در ساقه اصلی در پاکدشت $0/27$ (روز⁻¹)، $0/96$ (درصد) و $0/29$ افزایش و در کرج $0/37$ (روز⁻¹)، $0/98$ (درصد)، و $0/25$ و وزن خشک گیاهچه $0/46$ (گرم) افزایش یافت.

بین سرعت سبزشدن و درصد استقرار گیاهچه، تعداد گره در ساقه اصلی و وزن خشک گیاهچه در هر دو منطقه ارتباط مثبت و معنی‌داری وجود دارد. به‌طوری‌که با افزایش هر واحد سرعت سبزشدن در مزرعه به‌ترتیب درصد استقرار گیاهچه، تعداد گره در ساقه اصلی و وزن خشک گیاهچه در پاکدشت $0/36$ (درصد)، $0/52$ و $0/5$ (گرم) افزایش و در کرج $0/44$ (درصد)، $0/43$ و $0/34$ (گرم) افزایش یافت. بین درصد استقرار گیاهچه با تعداد گره در ساقه اصلی در هر دو منطقه و با وزن خشک گیاهچه در کرج ارتباط مثبت و معنی‌داری وجود داشت. همچنین بین تعداد گره در ساقه اصلی و وزن خشک گیاهچه هم ارتباط مثبت و معنی‌داری در هر دو منطقه وجود داشت به‌طوری‌که با افزایش تعداد گره در ساقه اصلی، وزن خشک گیاهچه به‌ترتیب در پاکدشت و کرج $0/32$ و $0/27$ گرم افزایش یافت. همچنین در کل بین درصد مرگ‌ومیر گیاهچه در مزرعه با درصد استقرار گیاهچه، ارتفاع گیاهچه، تعداد گره در ساقه اصلی و وزن خشک گیاهچه ارتباط منفی و معنی‌دار وجود داشت. به این ترتیب که با افزایش هر واحد مرگ‌ومیر گیاهچه در مزرعه، استقرار گیاهچه به‌ترتیب در پاکدشت $0/93$ و در کرج $0/89$ درصد کاهش یافت. همبستگی بین درصد مرگ‌ومیر گیاهچه و ارتفاع

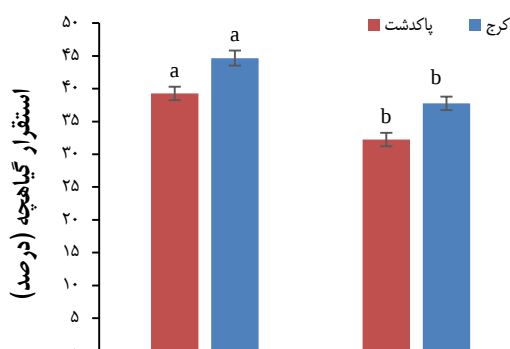
گیاچه در داده‌های کلی منفی و معنی‌دار ($-0/29$) بود. در پاکدشت این رابطه منفی و معنی‌دار ($-0/24$) و در کرج این رابطه غیرمعنی‌دار ($-0/02$) بود (شکل ۴).



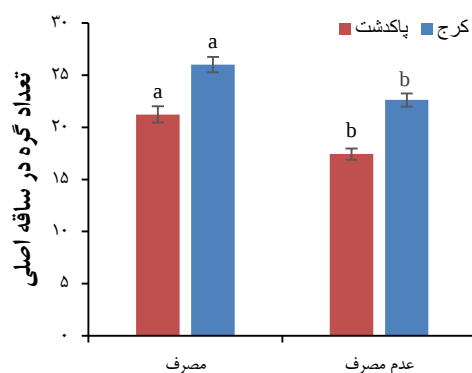
(الف)



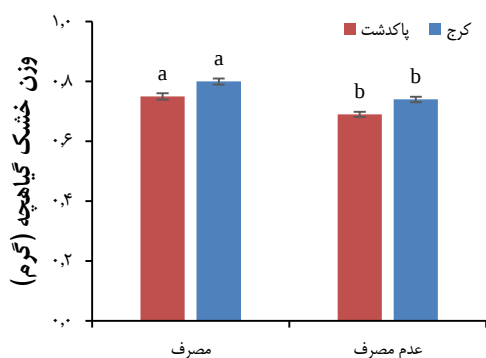
(ب)



(ج)



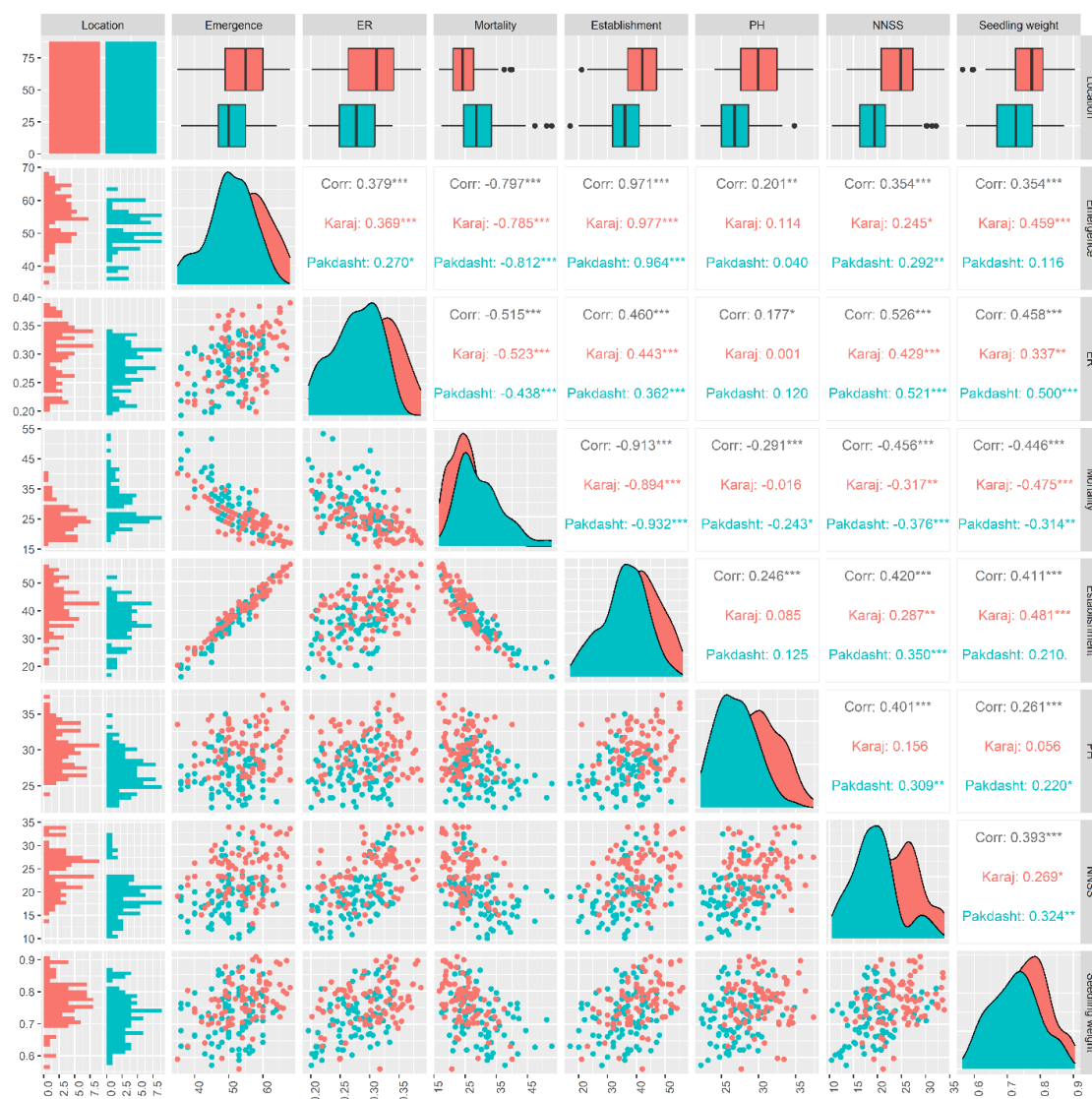
(د)



(ه)

ورمی کمپوست

شکل ۳. حداکثر درصد سبزشدن (الف)، سرعت سبزشدن (ب)، درصد استقرار (ج)، تعداد گره در ساقه اصلی (د) و وزن خشک گیاهچه (ه) در شرایط مصرف و عدم مصرف ورمی کمپوست در دو منطقه پاکدشت و کرج.



شکل ۴. آنالیز همبستگی صفات مرتبط با استقرار و رشد اولیه گیاهچه در دو محیط متفاوت پاکدشت و کرج

۵. بحث

تفاوت‌های مشاهده‌شده در پاسخ تیمارهای مختلف در دو منطقه پاکدشت و کرج را باید در چارچوب شرایط اکولوژیک و اقلیمی متمایز این دو منطقه تحلیل نمود (میانگین بارش در پاکدشت و کرج به‌ترتیب ۷/۵۷ و ۲۷/۷۰ میلی‌متر و میانگین دما در پاکدشت و کرج به‌ترتیب ۲۳/۷۸ و ۱۶/۷۱ درجه سانتی‌گراد طی دوره کشت). منطقه کرج با دارابودن آب‌وهوای نیمه‌خشک مدیترانه‌ای محیط مساعدی برای فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید و رشد بهینه گیاه سیاه‌دانه فراهم می‌کند. در چنین شرایطی، تیمارهای بیولوژیک به‌ویژه تیمارهای مبتنی بر سودوموناس و باسیلوس توانستند حداکثر کارایی خود را در بهبود شاخص‌های رشدی نشان دهند. در مقابل، منطقه پاکدشت با آب‌وهوای گرم و خشک بیابانی چالش‌های محیطی قابل‌توجهی برای رشد گیاه و فعالیت میکروارگانیسم‌ها ایجاد می‌کند. شدت تابش خورشیدی بالا (حدود ۳۰۰ روز آفتابی در سال)، وزش بادهای خشک و تبخیر و تعرق بالقوه زیاد در این منطقه، تنش‌های مضاعفی بر سیستم گیاه وارد می‌نماید. اگرچه

در منطقه پاکدشت تیمارهای بیولوژیک همچنان برتری خود را نسبت به شاهد حفظ کردند، اما میزان اثرگذاری آن‌ها در مقایسه با منطقه کرج کاهش یافت. تفاوت در پاسخ مایکوریزا در دو منطقه نیز قابل تأمل است. در منطقه کرج با شرایط مساعدتر، مایکوریزا می‌تواند ارتباط سیمبیوتیک مؤثری با گیاه برقرار کند، اما در منطقه پاکدشت، تنش‌های محیطی ممکن است موجب کاهش نفوذ میسلیوم‌ها به ریشه و محدودیت در انتقال مواد غذایی شود. این امر نه تنها بر اهمیت انتخاب گونه میکروبی مناسب، بلکه روش کاربرد بهینه آن‌ها برای هر گیاه خاص تأکید می‌کند.

مصرف کود ورمی کمپوست در هر دو منطقه توانست صفات اندازه‌گیری شده را تا حد مطلوبی بهبود بخشد که نشان از پتانسیل بالای این کود در کمک به تعدیل تنش‌های محیطی دارد. ورمی کمپوست به عنوان یک کود آلی، نقش مؤثری در افزایش دسترسی گیاه به عناصر غذایی و تحریک رشد ایفا می‌کند (منظور و همکاران، ۲۰۲۴). درصد و سرعت سبزشدن، تعداد گره در ساقه اصلی و وزن خشک گیاهچه با کاربرد تیمارهای بیولوژیک بهبود یافت. در میان تیمارهای بیولوژیک، بیوپرایمینگ با باکتری سودوموناس فلورسنس به عنوان مؤثرترین تیمار شناسایی شد که در هر دو منطقه بالاترین مقادیر را برای کلیه شاخص‌های رشدی به خود اختصاص داد. تیمارهای سودوموناس خاک مصرف و باسیلوس بیوپرایمینگ در رده بعدی قرار گرفتند. اگرچه تیمارهای مایکوریزا نسبت به شاهد برتری نشان دادند، اما نتایج ضعیف‌تری نسبت به تیمارهای باکتریایی داشتند.

بنابر پژوهش‌های انجام شده کارایی بالای باکتری سودوموناس را می‌توان به توانایی آن در تولید محرک‌های رشد، تسهیل جذب عناصر غذایی و القای مقاومت به تنش‌های محیطی در این گیاهان نسبت داد. آن‌ها در مراحل مختلف چرخه زندگی گیاه با تنظیم دقیق هورمون‌ها، تأمین تغذیه و کاهش تنش شانس موفقیت گیاه را به حداکثر می‌رسانند (چاکرابورتی و همکاران، ۲۰۲۲). قارچ مایکوریزا برای استقرار ارتباط سیمبیوتیک^۱ به زمان نیاز دارد، چرا که قارچ‌های مایکوریزا برای تشکیل میسلیوم و اتصال کامل به سیستم ریشه نیازمند دوره زمانی طولانی‌تری هستند (پپ^۲ و همکاران، ۲۰۱۸). سرعت بیش‌تر در استقرار و فعالیت باکتری‌ها در مراحل اولیه رشد گیاه می‌تواند از عوامل کلیدی برتری آن‌ها در مقایسه با قارچ‌ها باشد (سانتویو^۳ و همکاران، ۲۰۲۱؛ برار و همکاران ۲۰۲۴).

روش بیوپرایمینگ به دلیل ایجاد تماس مستقیم میکروارگانیزم با بذر، امکان استقرار سریع‌تر کلونی‌های باکتریایی در ناحیه ریزوسفر را فراهم می‌کند (چاکرابورتی و همکاران، ۲۰۲۲؛ محمود^۴ و همکاران، ۲۰۱۶)، درحالی‌که روش خاک مصرف نیاز به زمان بیش‌تری برای استقرار و کلونی‌زایی دارد. روش بذر مال نیز با وجود سادگی اجرا، ممکن است به دلیل شست‌وشوی باکتری از سطح بذر در طی آبیاری اولیه، کارایی کم‌تری داشته باشد (میترا و همکاران، ۲۰۲۱؛ فیودور^۵ و همکاران، ۲۰۲۳). استفاده از تیمارهای زیستی نه تنها تراکم باکتری‌های مفید را در ریزوسفر افزایش می‌دهد، بلکه تنوع و پایداری جمعیت میکروبی را نیز بهبود بخشیده و در نهایت منجر به افزایش مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی و بهبود عملکرد و رشد گیاه می‌شود (خسروی^۶ و همکاران، ۲۰۲۴).

تفاوت در پاسخ گیاهان به میکروارگانیزم‌های مختلف می‌تواند ناشی از تنوع در مکانیزم‌های مولکولی القاشده توسط هر میکروارگانیزم باشد که شامل تغییرات در بیان ژن‌های مرتبط با متابولیسم ثانویه، سیستم‌های دفاعی و مسیرهای سیگنالینگ هورمونی است. همچنین تعامل معنی‌دار بین تیمارها و منطقه نشان‌دهنده تأثیر شرایط محیطی بر کارایی

1. Symbiotic

2. Pepe

3. Santoyo

4. Mahmood

5. Fiodor

6. Khosravi

تیمارهای بیولوژیک است، به‌طوری‌که عواملی مانند دما، رطوبت خاک و ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی خاک می‌توانند بر بقاء، فعالیت و استقرار میکروارگانیسم‌ها تأثیر بگذارند (پاتل^۱ و همکاران، ۲۰۲۱).

تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی خاک نیز از عوامل کلیدی در تبیین اختلاف عملکرد تیمارهاست. خاک‌های با درصد ماده آلی و ظرفیت نگهداری آب بالا، بستر مناسبی برای توسعه سیستم ریشه‌ای و فعالیت میکروارگانیسم‌ها فراهم می‌کند. درحالی‌که خاک‌های با ماده آلی کم‌تر از یک درصد، ظرفیت نگهداری آب پایین محدودیت‌های قابل‌توجهی برای رشد گیاه و فعالیت میکروارگانیسم‌ها ایجاد می‌نمایند (ودر^۲ و همکاران، ۲۰۲۲). نوع خاک در بقاء و استقرار باکتری‌های محرک رشد گیاه نقش تعیین‌کننده دارند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک عامل اصلی در تعیین موفقیت کاربرد این باکتری‌ها به‌عنوان کودهای زیستی است (ادلک^۳ و همکاران، ۲۰۲۱).

از علل کاهش عملکرد در گیاهانی که تحت تأثیر تنش خشکی قرار می‌گیرند، کاهش فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، بیوماس و رشد گیاه می‌شود (جلیل^۴ و همکاران، ۲۰۰۹). تنش خشکی از طریق تأثیر روی عوامل مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی، باعث تغییر در پراکنش طبیعی گیاهان در سراسر دنیا می‌شود. تنش خشکی ناشی از کمبود آب، موجب تخریب غشای سلولی، کاهش پروتئین‌ها، افزایش پرولین، تخریب آنزیم‌ها، تولید مواد سمی، افزایش هورمون آبسزیک‌اسید و کاهش تحریک‌کننده‌های رشدی، آسیب به پلاستیدها و رنگیزه‌های برگ و به‌دنبال آن کاهش فعالیت‌های فتوسنتزی و در نتیجه کاهش رشد ریشه و اندام‌های هوایی می‌شود (چالکر^۵ و اسکات^۶، ۲۰۰۲). تنش، سیگنال‌هایی را فعال می‌کند که به هسته سلول رسیده و باعث کاهش رونویسی ژن‌های سنتزکننده هورمون‌های رشد (مانند جیبرلین و اکسین) و همچنین ژن‌های آنزیم‌های کلیدی متابولیک می‌شوند (وانی^۷ و همکاران، ۲۰۱۶).

تنش شوری و کمبود رطوبت موجب می‌شود که مکانیسم‌های تطابقی میکروارگانیسم‌ها تحت فشار قرار گیرد. در چنین شرایطی، تولید اکسین و جیبرلین توسط سودوموناس کاهش یافته و کارایی آنزیم ACC دآمیناز در کاهش تنش اتیلن محدود می‌شود (ما^۸ و همکاران، ۲۰۲۰). از سوی دیگر، تشکیل بیوفیلم توسط باسیلوس در شرایط خشکی و شوری با مشکل مواجه شده و توانایی آن در مهار پاتوژن‌ها کاهش می‌یابد (لی^۹ و همکاران، ۲۰۲۴؛ شاریپوا^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۳).

این یافته‌ها از دیدگاه کشاورزی پایدار حائز اهمیت فراوان است چرا که نشان می‌دهد مصرف کود ورمی‌کمپوست و کاربرد میکروارگانیسم‌های مفید به‌عنوان یک نهاده طبیعی و سازگار با محیط‌زیست می‌تواند ضمن بهبود عملکرد و کیفیت محصول، وابستگی به کودهای شیمیایی را کاهش داده و به حفظ تعادل اکوسیستم‌های زراعی کمک کند.

بررسی کلی همبستگی بین صفات حاکی از وجود الگوهای همبستگی معنی‌دار بین صفات کلیدی رشد و استقرار گیاهچه است. به‌طور کلی، رابطه مثبت بین سرعت سبز شدن و درصد سبز مشاهده می‌شود. به‌عبارت دیگر، گیاهانی که با سرعت بیش‌تری سبز می‌شوند، در نهایت درصد سبز شدن بالاتری نیز دارند (وجشچوسکی^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۶). این الگو در هر دو منطقه به‌صورت جداگانه نیز تأیید می‌شود که حاکی از پایداری این رابطه در شرایط محیطی متفاوت است. در

1. Patel
2. Védère
3. Adeleke
4. Jaleel
5. Chalker
6. Scott
7. Wani
8. Ma
9. Li
10. Sharipova
11. Wojciechowski

مقابل، قوی‌ترین همبستگی منفی کلی بین درصد مرگ‌ومیر و درصد استقرار گیاهچه به‌وضوح نشان می‌دهد که با افزایش تلفات گیاهچه، درصد نهایی استقرار کاهش می‌یابد (وجشچوسکی و همکاران، ۲۰۲۶). این الگو در هر دو منطقه پررنگ بود. در مجموع، نتایج به وضوح نشان می‌دهند که اگرچه برخی روابط کلیدی مانند ارتباط سرعت سبزشدن با درصد سبزشدن در مزرعه و درصد مرگ‌ومیر گیاهچه با درصد استقرار گیاهچه در هر دو منطقه پایدار و قوی هستند، اما شدت و معنی‌داری بسیاری از روابط دیگر به شدت تحت تأثیر شرایط خاص محیطی منطقه قرار می‌گیرد.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مصرف کود ورمی‌کمپوست در هر دو منطقه توانست صفات اندازه‌گیری‌شده را تا حد مطلوبی بهبود بخشد که نشان از پتانسیل بالای این کود در کمک به تعدیل تنش‌های محیطی دارد. علاوه بر آن درصد و سرعت سبزشدن، تعداد گره در ساقه اصلی و وزن خشک گیاهچه با کاربرد تیمارهای بیولوژیک بهبود یافت. در میان تیمارهای بیولوژیک، بیوپرایمینگ با باکتری سودوموناس فلورسنس به‌عنوان مؤثرترین تیمار شناسایی شد که در هر دو منطقه بالاترین مقادیر را برای کلیه شاخص‌های رشدی به خود اختصاص داد. تیمارهای سودوموناس خاک مصرف و باسیلوس بیوپرایمینگ در رده بعدی قرار گرفتند. اگرچه تیمارهای مایکوریزا نسبت به شاهد برتری نشان دادند، اما نتایج ضعیف‌تری نسبت به تیمارهای باکتریایی داشتند. در بین تیمارهای بذری مورد استفاده و با توجه به این که در اکثر صفات اختلاف معنی‌داری به خصوص بین تیمارهای باکتریایی وجود نداشت، تیمارهای باکتریایی بیوپرایمینگ (سودوموناس-بیوپرایمینگ و باسیلوس-بیوپرایمینگ) با توجه به مزیت اقتصادی و سهولت اجرا به‌عنوان تیمارهای برتر قابل توصیه هستند.

کارایی تیمارهای بیولوژیک به‌شدت تحت تأثیر شرایط محیطی قرار دارد و نمی‌توان بدون در نظر گرفتن ویژگی‌های اکولوژیک هر منطقه، نسخه واحدی برای تمامی مناطق تجویز نمود. برای دستیابی به حداکثر اثربخشی، لازم است ترکیب بهینه میکروارگانیزم‌ها و روش کاربرد آن‌ها با توجه به شرایط خاص هر منطقه طراحی و اجرا گردد. انجام پژوهش‌های بیش‌تر برای بررسی سازوکارهای دقیق اثر شرایط مصرف کود ورمی‌کمپوست و تیمارهای بیولوژیک بذری در سطح مولکولی و همچنین بررسی تأثیر ترکیبی آن با سایر نهادهای زیستی پیشنهاد می‌گردد.

۷. تشکر و قدردانی

از حمایت‌های دانشگاه تهران و مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور در راستای پیشبرد این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

- آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۹۶.
- اسدی رحمانی، هادی؛ جهان‌نیده مهجن آبادی، وحیداله؛ رجالی، فرهاد و خسروی، هوشنگ (۱۴۰۱). کودهای زیستی: سازوکارها و روش‌های مصرف. تهران: مؤسسه تحقیقات خاک و آب. ۲۰۹.
- قانع، حسین؛ امیرشکاری، حسین و ناجی، امیر محمد (۱۳۹۶). اثر پرایمینگ و تاریخ کاشت بر صفات عملکردی و فیزیولوژیکی دو توده زیره سبز. به‌زراعی کشاورزی، ۱۹(۳)، ۵۶۱-۵۷۵.

References

- Adeleke, B.S., Babalola, O.O., & Glick, B.R. (2021). Plant growth-promoting root-colonizing bacterial endophytes. *Rhizosphere*, 20, 100433.
- Ali, S., Moon, Y.S., Hamayun, M., Khan, M.A., Bibi, K., & Lee, I.J. (2022). Pragmatic role of microbial plant biostimulants in abiotic stress relief in crop plants. *Journal of Plant Interactions*, 17(1), 705-718.
- Asadi-rahmani, H., Jahandideh-mahjen-abadi, V. A., Rejali, F., & Khosravi, H. (2022). *Biofertilizers: Mechanisms and Methods of Application*, Tehran, Soil and Water Research Institute. (In Persian).
- Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2005). Pre-sowing seed treatment A shotgun approach to improve germination, plant growth, and crop yield under saline and non-saline conditions. *Advances in Agronomy*, 88, 223-271.
- Atta, M. B. (2003). Some characteristics of nigella (*Nigella sativa* L.) seed cultivated in Egypt and its lipid profile. *Food Chemistry*, 83(1), 63-68.
- Bashan, Y., Holguin, G., & De-Bashan, L. E. (2004). Azospirillum-plant relationships: physiological, molecular, agricultural, and environmental advances. *Canadian Journal of Microbiology*, 50(8), 521-577.
- Bennett, A. J., & Whipps, J. M. (2008). Dual application of beneficial micro-organisms to seed during drum priming. *Applied Soil Ecology*, 38(1), 83-89.
- Brar, B., Bala, K., Saharan, B. S., Sadh, P. K., & Duhan, J. S. (2024). Bio-boosting agriculture: Harnessing the potential of fungi-bacteria-plant synergies for crop improvement. *Discover Plants*, 1(1), 21.
- Chakraborti, S., Bera, K., Sadhukhan, S., & Dutta, P. (2022). Bio-priming of seeds: Plant stress management and its underlying cellular, biochemical and molecular mechanisms. *Plant Stress*, 3, 100052.
- Chalker-Scott, L. (2002). Do anthocyanins function as osmoregulators in leaf tissues? *Advances in Botanical Research*, 37, 104-129.
- Chen, A., Gu, M., Wang, S., Chen, J., & Xu, G. (2018). February. Transport properties and regulatory roles of nitrogen in arbuscular mycorrhizal symbiosis. In *Seminars in Cell & Developmental Biology*, (74), 80-88. Academic Press.
- de Andrade, L.A., Santos, C.H.B., Frezarin, E.T., Sales, L.R., & Rigobelo, E.C. (2023). Plant growth-promoting rhizobacteria for sustainable agricultural production. *Microorganisms*, 11(4), 1088.
- Fiodor, A., Ajjiah, N., Dziewit, L., & Pranaw, K. (2023). Biopriming of seed with plant growth-promoting bacteria for improved germination and seedling growth. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1142966.
- Fira, D., Dimkić, I., Berić, T., Lozo, J., & Stanković, S. (2018). Biological control of plant pathogens by *Bacillus* species. *Journal of Biotechnology*, 285, 44-55.
- Goswami, L., Gorai, P. S., & Mandal, N. C. (2021). Microbial fortification during vermicomposting: A brief review. *Recent Advancement in Microbial Biotechnology*, 99-122.
- Ghane, H. Amirshakari, H., & Naji, A. M. (2017). The effects of planting date and seed priming on yield and physiological traits of two cumin ecotypes. *Journal of Agricultural Crops Production*, 19(3), 561-575. (In Persian).
- Harzallah, H. J., Kouidhi, B., Flamini, G., Bakhrouf, A., & Mahjoub, T. (2011). Chemical composition, antimicrobial potential against cariogenic bacteria and cytotoxic activity of Tunisian *Nigella sativa* essential oil and thymoquinone. *Food Chemistry*, 129(4), 1469-1474.
- Hussain, J., Khan, A. L., Rehman, N., Hamayun, M., Shinwari, Z. K., Ullah, W., & Lee, I. J. (2009). Assessment of herbal products and their composite medicinal plants through proximate and micronutrients analyses. *Journal of Medicinal Plants Research*, 3(12), 1072-1077.
- Jaleel, C.A., Manivannan, P.A.R.A.M.A.S.I.V.A.M., Wahid, A., Farooq, M., Al-Juburi, H.J., Somasundaram, R.A.M.A.M.U.R.T.H.Y., & Panneerselvam, R. (2009). Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. *International Journal of Agriculture and Biology*, 11(1), pp.100-105.
- Jisha, K. C., Vijayakumari, K., & Puthur, J. T. (2013). Seed priming for abiotic stress tolerance: an overview. *Acta Physiologiae Plantarum*, 35(5), 1381-1396.
- Khosravi, H., Khoshru, B., Nosratabad, A.F., & Mitra, D. (2024). Exploring the landscape of biofertilizers containing plant growth-promoting rhizobacteria in Iran: Progress and research prospects. *Current Research in Microbial Sciences*, 7, 100268.
- Li, Y., Narayanan, M., Shi, X., Chen, X., Li, Z., & Ma, Y. (2024). Biofilms formation in plant growth-promoting bacteria for alleviating agro-environmental stress. *Science of the Total Environment*, 907, 167774.

- Ma, Y., Dias, M. C., & Freitas, H. (2020). Drought and salinity stress responses and microbe-induced tolerance in plants. *Frontiers in Plant Science*, 11, 591911.
- Mahmood, A., Turgay, O. C., Farooq, M., & Hayat, R. (2016). Seed biopriming with plant growth promoting rhizobacteria: a review. *FEMS Microbiology Ecology*, 92(8), fiw112.
- Manzoor, A., Naveed, M. S., Ali, R. M. A., Naseer, M. A., Ul-Hussan, M., Saqib, M., Hussain, S., & Farooq, M. (2024). Vermicompost: A potential organic fertilizer for sustainable vegetable cultivation. *Scientia Horticulturae*, 336, 113443.
- Mariyam, S., Bhardwaj, R., Khan, N.A., Sahi, S.V., & Seth, C.S. (2023). Review on nitric oxide at the forefront of rapid systemic signaling in mitigation of salinity stress in plants: Crosstalk with calcium and hydrogen peroxide. *Plant Science*, 336, 111835.
- McDonald, M.B. (2000). Seed priming. In: Black, M., and Bewley, J.D. (Eds). *Seed Technology and its Biological Basis*. Sheffield, EN: *Academic Press*, 287-325.
- Mehta, B. K., Pandit, V., & Gupta, M. (2009). New principles from seeds of *Nigella sativa*. *Natural Product Research*, 23(2), 138-148.
- Miljaković, D., Marinković, J., & Balešević-Tubić, S. (2020). The significance of *Bacillus* spp. in disease suppression and growth promotion of field and vegetable crops. *Microorganisms*, 8(7), 1037.
- Mitra, D., Mondal, R., Khoshru, B., Shadangi, S., Mohapatra, P. K. D., & Panneerselvam, P. (2021). Rhizobacteria mediated seed bio-priming triggers the resistance and plant growth for sustainable crop production. *Current Research in Microbial Sciences*, 2, 100071.
- Muhammad, M., Waheed, A., Wahab, A., Majeed, M., Nazim, M., Liu, Y. H., Li, L., & Li, W. J. (2024). Soil salinity and drought tolerance: An evaluation of plant growth, productivity, microbial diversity, and amelioration strategies. *Plant Stress*, 11, 100319.
- Patel, K. F., Fansler, S. J., Campbell, T. P., Bond-Lamberty, B., Smith, A. P., Roy-Chowdhury, T., McCue, L. A., Varga, T., & Bailey, V. L. (2021). Soil texture and environmental conditions influence the biogeochemical responses of soils to drought and flooding. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 127.
- Pepe, A., Giovannetti, M., & Sbrana, C. (2018). Lifespan and functionality of mycorrhizal fungal mycelium are uncoupled from host plant lifespan. *Scientific Reports*, 8(1), 10235.
- Ramadan, M. F., & Mörsel, J. T. (2003). Analysis of glycolipids from black cumin (*Nigella sativa* L.), coriander (*Coriandrum sativum* L.) and niger (*Guizotia abyssinica* Cass.) oilseeds. *Food Chemistry*, 80(2), 197-204.
- Rehman, S. U., De Castro, F., Aprile, A., Benedetti, M., & Fanizzi, F. P. (2023). Vermicompost: Enhancing plant growth and combating abiotic and biotic stress. *Agronomy*, 13(4), 1134.
- Riaz, M., Syed, M., & Chaudhary, F. M. (1996). Chemistry of the medicinal plants of the genus *Nigella*. *Hamdard Medicus*, 39(3), 40-45.
- Santoyo, G., Gamalero, E., & Glick, B. R. (2021). Mycorrhizal-bacterial amelioration of plant abiotic and biotic stress. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 672881.
- Sarkar, D., Rakshit, A., Al-Turki, A., Sayyed, R. Z., & Datta, R. (2021). Connecting Bio-Priming Approach with Integrated Nutrient Management for Improved Nutrient Use Efficiency in Crop Species. *Agriculture*, 11(4), 372.
- Sarkar, D., Sankar, A., Siva Devika, O., Singh, S., Parihar, M., Rakshit, A., Sayyed, R. Z., Gafur, A., Ansari, M. J., Danish, S., Fahad, S., & Datta, R. (2021). Optimizing nutrient use efficiency, productivity, energetics, and economics of red cabbage following mineral fertilization and biopriming with compatible rhizosphere microbes. *Scientific Reports*, 11, 15680.
- Shah, S., & Kasturi, S. R. (2003). Study on antioxidant and antimicrobial properties of black cumin (*Nigella sativa* L.). *Journal of Food Science and Technology*, 40(1), 70-73.
- Sharipova, M., Rudakova, N., Mardanova, A., Evtugyn, V., Akosah, Y., Danilova, I., & Suleimanova, A. (2023). Biofilm formation by mutant strains of bacilli under different stress conditions. *Microorganisms*, 11(6), 1486.
- Tamartash, R., Shokrian, F., & Kargar, M. (2010). Effects of salinity and drought stress on *Trifolium alexanderium* L. seed germination properties. *Journal of Rangeland Science*, 4(2), 288-297.
- Toselli, M. E., & Casenave, E. C. (2003). Water content and the effectiveness of hydro and osmotic priming of cotton seeds. *Seed Science and Technology*, 31(3), 727-735.

- Vandelook, F., Van de Vyver, A., & Soltani, E. (2024). Intra-specific variation in relative embryo length and germination of wild *Daucus carota* across climate gradients in North America and Europe. *Seed Science Research*, 34(4), 207-217.
- Védère, C., Lebrun, M., Honvault, N., Aubertin, M. L., Girardin, C., Garnier, P., Dignac, M. F., Houben, D., & Rumpel, C. (2022). How does soil water status influence the fate of soil organic matter? A review of processes across scales. *Earth-Science Reviews*, 234, 104214.
- Wahab, A., Bibi, H., Batool, F., Muhammad, M., Ullah, S., Zaman, W., & Abdi, G. (2024). Plant growth-promoting rhizobacteria biochemical pathways and their environmental impact: a review of sustainable farming practices. *Plant Growth Regulation*, 104(2), 637-662.
- Wani, S.H., Kumar, V., Shriram, V., & Sah, S.K. (2016). Phytohormones and their metabolic engineering for abiotic stress tolerance in crop plants. *Crop Journal*, 4(3), 162-176.
- Wojciechowski, A., Seassau, C., Alletto, L., & Lamichhane, J.R. (2026). Seedling emergence vigor, establishment success, and biomass yield stability of cover crop mixtures compared to pure stands. *Field Crops Research*, 335, 110165.
- Wong, W. S., Zhong, H. T., Cross, A. T., & Yong, J. W. H. (2020). Plant biostimulants in vermicomposts: Characteristics and plausible mechanisms. *The Chemical Biology of Plant Biostimulants*, 155-180.
- Zandonadi, D. B., & Busato, J. G. (2012). Vermicompost humic substances: technology for converting pollution into plant growth regulators. *International Journal of Environmental Science and Engineering Research*, 3(2), 73-84.
- Zhu, B., Gao, T., Zhang, D., Ding, K., Li, C., & Ma, F. (2022). Functions of arbuscular mycorrhizal fungi in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, 303, 111219.
- Zulfiqar, F. (2021). Effect of seed priming on horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, 286, 110197.