



<https://doi.org/10.22067/ijpr.2026.96712.1124>

Evaluation of the Interaction between Sowing Date and Seed Treatment with Bio-Fertilizers on Root Traits and Yield of Rainfed Chickpea (*Cicer arietinum* L.) in a Two-Year Study

Yaser Azimzadeh^{1*}, Hamid Hasanian Khoshroo¹, Arash Mohammadzadeh¹,
Gholamreza Ghahramanian¹, Ramin Lotfi¹, Halimeh Razmi¹

Received: 26 November 2025

Revised: 18 January 2026

Accepted: 19 January 2026

Available Online: 19 January 2026

Cite this article:

Azimzadeh, Y., Hasanian Khoshroo, H., Mohammadzadeh, A., Ghahramanian, G., Lotfi, R., & Razmi, H. (2025). Evaluation of the interaction between sowing date and seed treatment with bio-fertilizers on root traits and yield of rainfed chickpea (*Cicer arietinum* L.) in a two-year study. *Iranian Journal of Pulses Research*, 16(2), 395-411. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.22067/ijpr.2026.96712.1124>

Introduction

Chickpea (*Cicer arietinum* L.) serves as a vital source of dietary protein and plays a crucial role in sustainable crop rotations within the Iranian agricultural system. Its productivity in dryland conditions is predominantly constrained by suboptimal sowing dates and inadequate nutrient management, leading to significant yield gaps. In recent years, bio-fertilizers have emerged as a promising ecological strategy to improve crop growth, soil health, and resource use efficiency. However, the performance of these microbial inoculants is highly context-dependent and influenced by agronomic practices, particularly sowing date. Despite this, the interactions between sowing dates and specific bio-fertilizer formulations under the variable climatic conditions of Iran's rain-fed ecosystems remain poorly understood. Therefore, this two-year field study was conducted to evaluate the efficacy of various commercial bio-fertilizers applied as seed treatments on the growth, yield, and water productivity of rain-fed chickpea, with a focus on comparing autumn and spring sowing dates.

Materials and Methods

A two-year field study (2023-2025) was conducted in Maragheh, East Azerbaijan province, using a split-plot arrangement within a randomized complete block design with three replications. The main plots were assigned to two sowing dates (autumn and spring), and the sub-plots to five seed treatments: Non-inoculated control, Probio96, Bioguard, MycoSupre Plus, and Humic acid. Following land preparation with a combined tiller, chickpea seeds (cv. Ana) were inoculated and sown at a density of 40 seeds.m⁻² on plots measuring 30×5 m in rotation with wheat, using a three-axis ASKE seeder with a 17.5-53 cm row arrangement. Weed control was performed manually. At flowering, plant density, root volume, dry root weight, root nodule weight, and plant height were measured. At physiological maturity, whole plots were hand-harvested to determine 100-seed weight, biological yield, grain yield, harvest index, and rainwater productivity.

Results and Discussion

Combined analysis of variance revealed that the main effect of sowing date was significant ($p \leq 0.01$) for all studied traits except plant establishment and 100-grain weight. Autumn sowing consistently and significantly enhanced root system development, resulting in higher root dry weight (2.97 g.plant⁻¹ in Year 1) and root nodule weight compared to spring sowing across both years. This superior root architecture under autumn sowing translated directly into improved agronomic performance, culminating in significantly higher mean grain yield (1084 kg.ha⁻¹) and rainwater productivity (2.84 kg.mm⁻¹). The main effect of year was also highly significant ($p \leq 0.01$) for key traits, reflecting the substantial impact of inter-annual environmental variability. The performance of bio-fertilizer treatments was profoundly influenced by these year-to-year fluctuations and their interactions with the sowing date. Among them, Bioguard, a consortium of *Trichoderma* and *Bacillus velezensis*, achieved the peak performance under optimal conditions (autumn sowing in the favorable Year 1), yielding the highest grain yield (1084 kg.ha⁻¹) and biological yield (2337 kg.ha⁻¹). However, its

1- Dryland Agricultural Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Maragheh, Iran

* Corresponding Author: y.azimzadeh@areeo.ac.ir



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

efficacy was highly unstable, showing the most drastic decline in the stressful Year 2 under spring sowing, where it produced the lowest yield (405 kg.ha^{-1}), even underperforming the control. This highlights its high sensitivity to environmental stress. In contrast, MycoSupre Plus, a complex formulation containing mycorrhizal fungi, *Azotobacter*, and *Pseudomonas*, demonstrated greater stability across contrasting years. While it did not reach the absolute peak yield of Bioguard in the optimal year, it provided consistent and reliable improvements in root volume, plant height, and final yield in both autumn and spring sowings, establishing it as a lower-risk option. Probio96, based on *Bacillus velezensis*, had a limited impact on root biomass but registered the highest harvest index (46.8%), indicating a superior efficiency in partitioning photosynthetic assimilates towards grain production rather than vegetative growth. Significant two-way (Year $\times$ Sowing Date, Sowing Date $\times$ Bio-fertilizer) and three-way (Year $\times$ Sowing Date $\times$ Bio-fertilizer) interactions were observed for most traits, including root volume, grain yield, and rainwater productivity. These interactions underscore the complex interplay between management practices and the environment. For instance, in spring sowing under stressful conditions, the untreated control sometimes showed better plant establishment than some bio-fertilizers, suggesting that the inoculated microbes could pose an additional osmotic stress on germinating seeds when environmental conditions were already adverse.

Conclusions

The choice of bio-fertilizer should be tailored to specific environmental conditions, including seasonal climate and sowing date. Integrating autumn sowing with bio-fertilizers that possess stable mechanisms of action, particularly MycoSupre Plus, is recommended as an effective strategy for achieving both high yield and production stability in rain-fed chickpea systems.

Keywords: Bio-fertilizer, Humic acid, Nutritional requirement



ارزیابی اثر متقابل تاریخ کاشت و بذرمال زیستی بر صفات ریشه و عملکرد نخود (*Cicer arietinum* L.) دیم در یک مطالعه دوساله

یاسر عظیم‌زاده^{۱*}، حمید حسینیان خوشرو^{۱،۲}، آرش محمدزاده^{۱،۲}، غلامرضا قهرمانیان^{۱،۲}، رامین لطفی^{۱،۲}

حلیمه رزمی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۹

چکیده

استفاده از کودهای زیستی به‌عنوان یکی از راهکاری افزایش بهره‌وری و پایداری نظام‌های کشت دیم به شمار می‌رود. با این حال، اثر متقابل این نهاده‌ها با تاریخ کاشت کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. بر این اساس، به‌منظور ارزیابی کارایی بذرمال نخود (*Cicer arietinum* L.) دیم با کودهای زیستی در دو تاریخ کاشت پاییزه و بهاره، پژوهشی به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در شهرستان مراغه در استان آذربایجان شرقی به مدت دو سال زراعی (۱۴۰۲-۱۴۰۴) اجرا شد. تاریخ کاشت در دو سطح پاییزه و بهاره در کرت‌های اصلی و بذرمال زیستی در پنج سطح شامل شاهد (بدون بذرمال) و بذرمال با کودهای پروبیو ۹۶، بایوگارد، مایکوسوپرپلاس و اسیدهیومیک زیستی در کرت‌های فرعی بودند. بعد از آماده‌سازی زمین با استفاده از خاکورز مرکب، بذر نخود رقم آنا با هر یک از کودهای مورد نظر بذرمال شد و با تراکم ۴۰ بذر در مترمربع، در کرت‌های به ابعاد ۵ × ۳۰ متر و در تناوب با گندم (*Triticum aestivum*) به‌صورت پاییزه در ۱۸ آبان و به‌صورت بهاره در ۲۶ اسفند کشت شد. در مرحله گل‌دهی، تراکم بوته در مترمربع، حجم ریشه، وزن ریشه خشک، وزن گره‌های ریشه و ارتفاع بوته اندازه‌گیری گردید. در مرحله رسیدگی و بعد از حذف اثرات حاشیه‌ای، کل کرت به‌روش دستی برداشت و وزن ۱۰۰ دانه، عملکرد زیستی، عملکرد دانه، شاخص برداشت و بهره‌وری آب باران در هر یک از کرت‌ها تعیین شد. نتایج نشان داد که تاریخ کاشت پاییزه به‌طور معنی‌داری موجب بهبود شاخص‌های رشد ریشه از جمله وزن خشک ریشه (۲/۴۸ گرم در بوته)، عملکرد دانه (۱۰۸۴ کیلوگرم در هکتار) و بهره‌وری آب باران (۲/۸۴ کیلوگرم بر میلی‌متر) در مقایسه با کشت بهاره گردید. در بین تیمارهای بذرمال، بایوگارد در شرایط محیطی مطلوب (سال اول) به بالاترین عملکرد منجر شد، اما عملکرد آن در سال دوم که با کاهش ۲۶ درصدی و توزیع نامطلوب بارندگی و افزایش تبخیر و تعرق همراه بود، به‌شدت کاهش یافت. در مقابل، مایکوسوپرپلاس با دارا بودن قارچ‌های میکوریزا، پایداری عملکرد بیشتری در هر دو سال نشان داد. تیمار پروبیو ۹۶ نیز با بالاترین شاخص برداشت (۴۶/۸ درصد)، کارآمدترین تیمار در تخصیص مواد فتوسنتزی به دانه بود. به‌طور کلی، انتخاب نوع کود زیستی باید با در نظر گرفتن شرایط محیطی از جمله اقلیم منطقه و تاریخ کاشت صورت گیرد. تلفیق کشت پاییزه با کودهای زیستی دارای سازوکار عمل پایدار (به‌ویژه مایکوسوپرپلاس) به‌عنوان یک راهبرد کارآمد برای دستیابی هم‌زمان به عملکرد مطلوب و پایداری تولید در نظام‌های کشت دیم نخود توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اسیدهیومیک، کود زیستی، نیاز غذایی

مقدمه

با توجه به چالش‌های پیچیده و بسیار جدی تغییرات اقلیمی و محدودیت‌های فزاینده منابع آب و خاک، تأمین امنیت غذایی جمعیت در حال رشد جهان به یکی از بحرانی‌ترین دغدغه‌های قرن حاضر تبدیل شده است. در پاسخ به این چالش جهانی، گذار به سمت نظام‌های کشاورزی پایدار که از یک‌سو بهره‌وری بالا را تضمین کند و از سوی دیگر، وابستگی به نهاده‌های شیمیایی را کاهش دهد، به اولویتی اجتناب‌ناپذیر بدل شده است. در این میان، حبوبات با دارا بودن قابلیت منحصربه‌فرد تثبیت زیستی نیتروژن اتمسفری، نه تنها به‌عنوان

منبع غذایی ارزشمند، بلکه به‌عنوان عاملی کلیدی در تناوب‌های زراعی و پایداری بلندمدت سیستم‌های کشاورزی ایفای نقش می‌کند (Rani et al., 2020). نخود (*Cicer arietinum* L.) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین گونه‌های این تیره، در مناطق غرب و شمال غرب ایران، عمدتاً به‌صورت دیم و در الگوی کشت پاییزه و بهاره جایگاه ویژه‌ای دارد. هرچند ایران از نظر سطح زیرکشت این گیاه، پس از کشورهای هند، پاکستان و ترکیه در رتبه چهارم جهانی قرار دارد، اما عملکرد نخود در شرایط دیم مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور، به‌دلیل مواجهه با تنش‌های محیطی متعدد از جمله خشکی و گرمای انتهای

۱- مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مراغه، ایران

*- نویسنده مسئول: y.azimzadeh@areeo.ac.ir

فصل و گرمای هم‌زمان با دوره گل‌دهی و پُر شدن دانه و همچنین چالش‌های مدیریتی، فاصله قابل توجهی با پتانسیل ژنتیکی ارقام و میانگین جهانی دارد (Sabaghpour et al., 2006).

در بسیاری از مناطق تحت کشت دیم ایران، بارش‌های نامطمئن بهار و توزیع نامناسب آن، دوره رشد بحرانی گیاه را با کمبود رطوبت مواجه می‌سازد. یکی از راهبردهای مدیریتی مؤثر برای هماهنگ‌سازی دوره رشد حساس نخود با الگوی بارش‌های فصلی و اجتناب از تنش‌های پایان فصل، انتقال تاریخ کاشت از بهار مرسوم به پاییزه است. کشت پاییزه نخود در مقایسه با کشت بهار، مراحل اولیه رشد را با دوره خنک و مرطوب‌تر پاییز و اوایل زمستان هم‌زمان می‌سازد. این هم‌زمانی، دسترسی مستقیم به بارش‌های این فصل را برای جوانه‌زنی و استقرار اولیه گیاه فراهم کرده و پیش از فرارسیدن گرما و خشکی، فرصت توسعه سیستم ریشه را به گیاه می‌دهد. در نتیجه، گیاه با ریشه‌های توسعه‌یافته‌تر، به ذخیره رطوبت عمقی خاک دسترسی داشته و می‌تواند در مواجهه با تنش‌های رطوبتی و گرمایی اواخر فصل، عملکرد بهتری داشته باشد (Valizadeh et al., 2024). در این رابطه، شواهد پژوهشی متعددی نشان می‌دهند که گیاه نخود در کشت پاییزه با بهره‌گیری از نزولات پاییزه و زمستانه، می‌تواند سیستم ریشه‌ای قوی‌تر و عمیق‌تری را ایجاد کرده و با تسریع در رشد رویشی، از اوج تنش‌های گرمایی و خشکی اواخر بهار در امان بماند (Singh et al., 2023). به‌عنوان مثال، ولی‌زاده و همکاران (Valizadeh et al., 2024) گزارش کردند که عملکرد نخود دیم و شاخص بهره‌وری آب در کاشت پاییزه بیشتر از بهار بود. باین‌حال، موفقیت این راهکار مشروط به مدیریت دقیق چالش‌های همراه آن، به‌ویژه مهار موفقیت‌آمیز علف‌های هرز و کاهش خطر سرمازدگی در مناطق با زمستان‌های بسیار سرد است.

جولنه‌زنی یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین مراحل فنولوژیک چرخه زندگی گیاه و یک فرآیند کلیدی در سبز شدن گیاهچه است. رشد گیاهچه در مرحله جوانه‌زنی متکی به مواد غذایی ذخیره‌شده در بذر است و علاوه بر مقدار ماده غذایی ذخیره‌شده، کارایی و سرعت به‌کارگیری آن در فعالیت‌های متابولیکی گیاهچه می‌تواند بر سرعت میزان رشد نهایی گیاهچه قبل از ورود به مرحله مستقل رشدی مؤثر باشد؛ لذا استفاده از روش‌هایی از جمله بذر مال برای بهبود جوانه‌زنی و استقرار مناسب گیاه در شرایط نامساعد محیطی توصیه شده است (Singh et al., 2023). بذر مال، تکنیکی است که طی آن، بذر پیش از قرار گرفتن در بستر کشت، با انواع کودهای شیمیایی، زیستی و با محرک‌های رشد آغشته می‌شود؛ به‌طوری‌که ترکیب مورد نظر

به‌صورت یک لایه بسیار نازک در سطح بذر قرار می‌گیرد. با این کار، علاوه بر اینکه به‌واسطه بروز برخی از تغییرات زیستی و فیزیولوژیک در بذر، شاخص‌های جوانه‌زنی بذر تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد، عناصر غذایی، ترکیبات محرک رشد و ریزجانداران موجود در کود، شرایط تغذیه‌ای و رشدی گیاهچه را تحت‌تأثیر قرار داده و منجر به تقویت بنیه گیاهچه و استقرار بهتر و سریع‌تر آن در خاک می‌شود (Casenave & Toselli, 2007). در این رابطه، قربانی و همکاران (Ghorbani et al., 2013) با ارزیابی برخی از خصوصیات نخود در واکنش به پیش‌تیمار بذر با اسیدهیومیک نشان دادند که بذر مال با اسیدهیومیک سبب افزایش عملکرد نخود شد. جاویدی و همکاران (Javidi et al., 2024) نیز گزارش کردند که بذر مال سویا (*Glycine max*) با اسیدهیومیک منجر به افزایش عملکرد سویا شد و کاربرد کود پایه نیتروژن، کارایی بذر مال با اسیدهیومیک را افزایش داد. همچنین مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از باکتری‌های مفید خاکزی از جمله *Bacillus velezensis* به‌عنوان بذر مال می‌تواند باعث افزایش جوانه‌زنی، رشد گیاهچه و توسعه سیستم ریشه‌ای نخود شود. این باکتری محرک رشد گیاه (PGPR¹)، از طریق سازوکارهای غیرمستقیم از جمله تولید هورمون‌های رشد (مانند اکسین)، حل کردن فسفات، تولید آنزیم‌های مفید، مقابله با بیمارگرها و تحریک سیستم ایمنی گیاه، رشد گیاه را بهبود می‌بخشد (Cheng et al., 2025). استفاده از قارچ‌های تریکودرما² به‌صورت بذر مال می‌تولند نه تنها سلامت ریشه و مقاومت گیاه در برابر بیماری‌های ریشه مانند پوسیدگی مرطوب³ را افزایش دهد، بلکه رشد و استقرار گیاهچه نخود را نیز بهبود می‌بخشد. به‌عنوان مثال، دوبی و همکاران (Dubey et al., 2012) گزارش کردند که بذر مال و کاربرد خاکی قارچ تریکودرما باعث افزایش شاخص‌های رشد و کاهش شیوع بیماری در نخود شد. علاوه بر آن، گزارش شده است که بذر مال با قارچ‌های میکوریز آربوسکولار نیز می‌تواند به افزایش جذب عناصر غذایی از جمله فسفر و توسعه سیستم ریشه‌ای نخود کمک کند (Rocha et al., 2019).

اگرچه اهمیت هر یک از عوامل تاریخ کاشت و بذر مال زیستی به‌صورت جداگانه در کشت نخود دیم مورد تأیید قرار گرفته است، اما شواهد پژوهشی کافی در مورد اثر متقابل آن‌ها بر رشد و عملکرد نخود دیم به‌ویژه در شرایط اقلیم سردسیر ایران وجود ندارد. بیشتر مطالعات پیشین به بررسی اثرات مستقل تاریخ کاشت یا انواع کودهای زیستی پرداخته‌اند. باین‌حال، وابستگی شدید فعالیت ریزجانداران موجود در کودهای زیستی به عوامل محیطی به‌ویژه دما و رطوبت خاک موجب می‌شود تا کارایی این کودها در روش بذر مال، در تاریخ‌های مختلف

1- Plant growth-promoting rhizobacteria

2- *Trichoderma* spp.

3- Wet root rot

به مدت دو سال زراعی (۱۴۰۲-۱۴۰۴) اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل دو تاریخ کاشت پاییزه و بهاره در کرت‌های اصلی و پنج سطح بذرمال شامل بدون بذرمال (شاهد) و بذرمال با کودهای پروبیو ۹۶، بایوگارد، اسیدهیومیک زیستی (هر سه تولید شرکت بایوران) و مایکوسوپریلاس (تولید شرکت زیست فناوری توران) در کرت‌های فرعی بودند. تمامی کودهای زیستی مورد استفاده از بازار تهیه و مطابق با دستورالعمل شرکت سازنده استفاده شدند. برخی از مشخصات کودهای زیستی مورد استفاده برای بذرمال در جدول ۱ ارائه شده است.

قبل از اجرای آزمایش برای اطلاع از ویژگی‌های خاک محل اجرای آزمایش، نمونه خاکی به روش مرکب از عمق ۲۵-۰ سانتی‌متری تهیه و برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با استفاده از روش‌های معمول آزمایشگاهی تعیین گردید. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک برداشت‌شده از مزرعه مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به اینکه محتوای پتاسیم قابل دسترس خاک در هر دو سال بیشتر از حد بحرانی بود، هیچ‌گونه کود پتاسیمی به خاک اضافه نشد. در مقابل، میزان فسفر قابل دسترس خاک کمتر از حد بحرانی (۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود. بر این اساس، پیش از عملیات کاشت، مقدار ۳۰ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل در هکتار مصرف شد.

کاشت و به‌ویژه تحت شرایط دیم، کاملاً متغیر باشد. به‌عنوان نمونه، در کشت پاییزه، کاهش دمای خاک می‌تواند فعالیت ریزجانداران مفید را محدود کند، درحالی‌که در کشت بهاره، گرمای خاک ممکن است به استقرار سریع‌تر آن‌ها کمک کند. این کمبود اطلاعات به‌ویژه در مواجهه با شرایط پرتنش دیم بیشتر حس می‌شود. بنابراین، بررسی اثر متقابل تاریخ کاشت و بذرمال زیستی در یک مطالعه دوساله که بتواند علاوه بر تغییرات فصلی (تاریخ کاشت)، تغییرات بین سالی را نیز پوشش دهد، برای درک واقع‌بینانه‌تر از کارایی این نهاده‌ها در سیستم‌های کشت دیم ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین، هدف از این مطالعه، ارزیابی اثر متقابل تاریخ کاشت (پاییزه و بهاره) و بذرمال با کودهای زیستی پروبیو ۹۶، بایوگارد، مایکوسوپریلاس و اسیدهیومیک زیستی بر صفات مورفولوژیک ریشه و عملکرد و اجزای عملکرد نخود دیم بود.

مواد و روش‌ها

به‌منظور ارزیابی اثر متقابل تاریخ کاشت و بذرمال با کودهای زیستی بر صفات مورفولوژیک ریشه، عملکرد دانه و اجزای عملکرد نخود دیم، آزمایشی به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در شهرستان مراغه در استان آذربایجان شرقی

جدول ۱- مشخصات کودهای مورد استفاده برای بذرمال در این پژوهش

Table 1- Characteristics of the fertilizers used for seed coating in this study

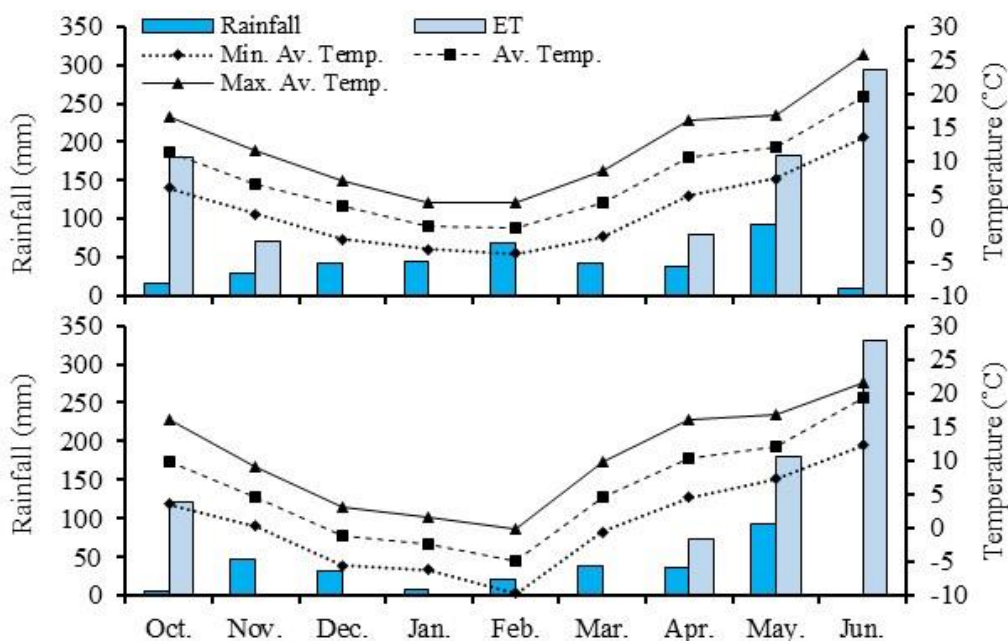
کود Fertilizer	اسیدیته pH (1:10)	قابلیت هدایت الکتریکی EC (1:10) (dS.m ⁻¹)	ریزجانداران Microorganisms	جمعیت Papulation (CFU.g ⁻¹)	سایر ترکیبات Other components
پروبیو ۹۶ Probio96	3.15	2	<i>Bacillus velezensis</i>	10 ⁸	-
بایوگارد Bioguard	4.3	6.3	<i>Trichoderma harzianum</i> <i>Bacillus velezensis</i>	10 ⁶ 10 ⁷	اسیدهیومیک (۵٪) Humic acid (5%)
مایکوسوپریلاس Mycosuper plus	-	-	<i>Arbuscular mycorrhiza</i> species, <i>Trichoderma</i> , <i>Azotobacter</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i>		عصاره جلبک دریایی، اسیدهیومیک، اسیدفلوئیک Seaweed extract, humic acid, fulvic acid
اسیدهیومیک Humic acid	7.2	8	<i>Bacillus velezensis</i>	2×10 ⁶	اسیدهیومیک (۶۰٪)، اسیدفلوئیک (۱٪)، پتاسیم محلول (۸٪)، سدیم محلول (۳/۸٪) Humic acid (60%), fulvic acid (1%), soluble potassium (8%), soluble sodium (3.8%)

بارندگی نیز دچار تغییرات شدیدی شد؛ به‌طوری‌که مهرماه با کاهش ۶۴ درصدی و بهمن‌ماه با کاهش ۷۰ درصدی بارش مواجه شدند و بارندگی خرداد ماه به صفر رسید. از سوی دیگر، اگرچه تبخیر و تعرق در ماه‌های سرد سال ناچیز بود، اما در خرداد ماه به ۳۳۱ میلی‌متر رسید که افزایش ۱۳ درصدی نسبت به سال قبل را نشان داد.

داده‌های هواشناسی منطقه مراغه در شکل ۱ ارائه شده است. با توجه به این داده‌ها، سال دوم نسبت به سال اول آزمایش سردتر و خشک‌تر بود. مجموع بارندگی سال دوم نسبت به سال اول حدود ۲۶ درصد کاهش داشت و این کاهش عمدتاً در خرداد و سه ماه زمستان رخ داد. علاوه بر کاهش کمی بارش، در سال دوم، الگوی توزیع ماهانه

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد مطالعه
Table 2- Some physical and chemical properties of the studied farm soils

سال Year	بافت Texture	اسیدیته pH	فسفر قابل دسترس Available P	پتاسیم قابل دسترس Available K	مواد خنثی‌شونده Total neutralizing value	ماده آلی Organic matter	قابلیت هدایت الکتریکی EC _e (dS.m ⁻¹)
			(mg.kg ⁻¹)		(%)		
2023-2024	لوم رسی Clay loam	7.81	4.4	305	9	1.03	0.721
2024-2025	لوم رسی Clay loam	7.73	4.1	336	8	1.03	0.815



شکل ۱- میانگین دما و بارندگی شهرستان مراغه در دو سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۴ (بالا) و ۱۴۰۴-۱۴۰۳ (پایین)

Figure 1- Average temperature and precipitation of Maragheh in two years 2023-2024 (up) and 2024-2025 (bottom)

بذر به‌عنوان کود آغازگر مصرف شد. در طول دوره داشت، تمامی مراقبت‌های زراعی لازم از جمله وجین دستی علف‌های هرز انجام گردید. در مرحله گل‌دهی، بعد از حذف اثرات حاشیه‌ای، تراکم بوته در مترمربع تعیین و تعداد ۱۰ بوته تصادفی از هر کرت به‌طور کامل و همراه با توده خاک اطراف ریشه (به قطر تقریبی ۲۰ سانتی‌متر و عمق ۳۰ سانتی‌متر) از خاک خارج شدند. پس از شست‌وشو، گره‌های ریشه به‌آرامی جدا و مجموع وزن تر آن‌ها برای ۱۰ بوته ثبت گردید.

بعد از آماده‌سازی زمین به‌روش کم‌خاک‌ورزی (خاک‌ورز مرکب)، بذر نخود رقم لانا بعد از بذر مال یا کودهای مورد نظر، با تراکم ۴۰ بذر در مترمربع به‌صورت پاییزه در ۱۸ آبان ماه و به‌صورت بهاره در ۲۶ اسفند توسط کارنده آسکه سه‌محوره ۱۱ ردیفه با آرایش کشت ۵۳-۱۷/۵ سانتی‌متر در تناوب با گندم کشت شد. ابعاد هر یک از کرت‌ها ۵ × ۳۰ متر بود. هم‌زمان با کاشت، مقدار ۴۵ کیلوگرم اوره بر هکتار توسط کارنده و به‌صورت جای‌گذاری در پنج الی شش سانتی‌متری زیر

اقلیمی خاص هر سال قرار گرفته و ثابت نیست. اثر متقابل دوگانه تاریخ کاشت $\times$ بذرمال بر صفات استقرار بوته، حجم ریشه، ارتفاع بوته، عملکرد دلنه و بهره‌وری آب باران در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. این یافته‌ها حاکی از آن است که کارایی هر یک از تیمارهای بذرمال در بهبود این صفات، به زمان کاشت (پاییزه یا بهاره) وابسته بود. همچنین اثر متقابل سال $\times$ بذرمال بر حجم ریشه، عملکرد زیستی، عملکرد دانه و بهره‌وری آب باران معنی‌دار بود که بر تغییرپذیری پاسخ گیاه به کودهای زیستی در سال‌های مختلف دلالت دارد. معنی‌داری اثر متقابل سه‌گانه سال $\times$ تاریخ کاشت $\times$ بذرمال بر عملکرد زیستی، عملکرد دانه و بهره‌وری آب باران، پیچیدگی روابط بین عوامل مورد مطالعه و حساسیت این شاخص‌ها به عوامل مورد بررسی را نشان می‌دهد.

اثر مدیریت کاشت بر استقرار و رشد رویشی گیاه

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین وزن خشک ریشه مربوط به تیمارهای مایکوسوپرایلاس (۲/۴۸ گرم در بوته) و بایوگارد (۲/۳۹ گرم در بوته) بود که در یک گروه آماری قرار گرفتند و به‌طور معنی‌داری برتر از تیمارهای پروبیو۹۶ (۲/۰۲ گرم در بوته)، اسیدهیومیک (۱/۹۷ گرم در بوته) و شاهد (۱/۹۹ گرم در بوته) بودند (شکل ۲). این برتری را می‌توان به اثر هم‌افزایی ترکیبات پیچیده موجود در این دو کود زیستی نسبت داد. باکتری‌های سودمند مایکوسوپرایلاس (ملند *Azotobacter* و *Pseudomonas*) و محرک‌های رشد طبیعی (مانند عصاره جلبک دریایی)، به یک محرک قوی برای توسعه زیست‌توده ریشه تبدیل شده است. علاوه بر آن، این کود با دارا بودن قارچ‌های میکوریزا، شبکه هیفی گسترده‌ای ایجاد می‌کند که حجم خاک در دسترس ریشه را به‌طور مؤثری افزایش داده و جذب آب و عناصر کم‌تحرک مانند فسفر را به‌ویژه در خاک‌های آهکی بهبود می‌بخشد. این یافته‌ها با نتایج کوزولینو و همکاران (Cozzolino et al., 2021) همسو است که نشان دادند، میکروب‌های محرک رشد گیاه (PGPM) به‌تنهایی یا در ترکیب با اسیدهای هیومیک و قارچ‌های میکوریزا، رشد گیاه و جذب عناصر غذایی را بهبود می‌بخشند. به‌طور مشابه، عملکرد مطلوب تیمار بایوگارد احتمالاً ناشی از همکاری قارچ تریکودرما (که از طریق رقابت با بیمارگرها و ایجاد رابطه همزیستی، سلامت ریشه را تضمین می‌کند) و باکتری *Bacillus velezensis* است که در کنار اسیدهیومیک، یک سیستم یکپارچه دفاعی-تغذیه‌ای را برای گیاه فراهم می‌کند. این نتایج با مطالعات پیشین هم‌خوانی دارد که نشان دادند، ترکیب باکتری‌های

سپس، طول ریشه اصلی و ریشه‌های جانبی در حالت کشیده به‌وسیله خط‌کش میلی‌متری اندازه‌گیری شد. حجم ریشه به‌روش جابه‌جایی آب در استوانه مدرج تعیین گردید. در نهایت، نمونه‌های ریشه به مدت ۴۸ ساعت در داخل آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شده و وزن خشک ریشه اندازه‌گیری شد. پس از رسیدگی کامل و بعد از حذف اثرات حاشیه‌ای، برداشت هر کرت به‌صورت دستی انجام و عملکرد زیستی و عملکرد دانه با توزین تعیین گردید. شاخص برداشت از نسبت عملکرد دانه به عملکرد زیستی و بهره‌وری آب باران از تقسیم عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) بر مجموع بارندگی فصل رشد (میلی‌متر) به دست آمد. تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS ویرایش ۹/۴ و مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار محافظت‌شده (PLSD) در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. پیش از تجزیه مرکب داده‌ها، مفروضات نرمال بودن توزیع باقی‌مانده‌ها به‌وسیله آزمون شاپیرو-ویلک^۱ و همگنی واریانس خط‌ها بین سال‌ها از طریق آزمون بارتلت^۲ مورد بررسی قرار گرفت و برقراری آن‌ها تأیید شد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثر اصلی تاریخ کاشت بر تمامی صفات مورد مطالعه به‌جز استقرار بوته (تراکم بوته در واحد سطح) (جدول ۳) و وزن ۱۰۰ دانه (جدول ۴) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود که به‌دلیل اثر تاریخ کاشت بر فیزیولوژی رشد، توسعه سیستم ریشه و در نهایت عملکرد گیاه است. اثر اصلی سال نیز بر صفات مهمی مانند وزن خشک ریشه، حجم ریشه، عملکرد زیستی، عملکرد دانه، شاخص برداشت و بهره‌وری آب باران در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود که به‌علت تفاوت قابل توجه شرایط محیطی در دو سال اجرای آزمایش می‌باشد. اثر اصلی تیمارهای بذرمال زیستی بر استقرار بوته، وزن خشک ریشه، حجم ریشه، ارتفاع بوته، عملکرد زیستی و شاخص برداشت معنی‌دار بود. باین‌حال، اثر این تیمارها بر عملکرد دانه و وزن ۱۰۰ دانه معنی‌دار نبود که نشان می‌دهد، افزایش عملکرد زیستی لزوماً به انتقال بیشتر مواد فتوسنتزی به دانه (عملکرد دانه) منجر نشده است.

اثر متقابل سال $\times$ تاریخ کاشت نیز بر بسیاری از صفات مورد مطالعه از جمله وزن گره ریشه، وزن خشک ریشه، حجم ریشه، ارتفاع بوته، عملکرد زیستی، عملکرد دانه و بهره‌وری آب باران در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. این تعامل معنی‌دار نشان می‌دهد که پاسخ گیاه به تاریخ کاشت (پاییزه یا بهاره) به‌شدت تحت تأثیر شرایط

1- Shapiro-Wilk

2- Bartlett

تیمارهای پروبیو۹۶، اسیدهیومیک و شاهد حاکی از آن است که کاربرد این مواد به صورت تنها و بدون وجود سازوکارهای هم‌افزایی در فرمولاسیون‌های ترکیبی، تأثیر محسوسی بر افزایش وزن ریشه نداشت (شکل ۲). در این رابطه، زنگ و همکاران (Zeng et al., 2025) گزارش کردند که اگرچه کاربرد تکی ریزجانداران موجب بهبود رشد ریشه گیاه توتون (*Nicotiana tabacum*) شد، اما بیشترین مقادیر وزن خشک ریشه در تیمارهای ترکیبی به دست آمد. آنان مشاهده کردند که تیمار ترکیبی قارچ میکوریزا و باکتری *Pseudomonas* بیشترین تأثیر را در افزایش وزن خشک ریشه نشان داد که برهم‌کنش‌های هم‌افزایی بین ریزجانداران مختلف در دستیابی به حداکثر پتانسیل محرک رشد را تأیید می‌کند.

محرک رشد، قارچ‌های میکوریزا و عوامل کنترل بیولوژیک مانند گونه‌های تریکودرما، یک راهبرد جامع برای تأمین بسته کاملی از مزایا در اختیار گیاه قرار می‌دهد که شامل افزایش زیست‌توده گیاهی، مقاومت به تنش‌های غیرزیستی، کنترل بیولوژیک بیمارگرهای گیاهی و جذب بهتر عناصر غذایی می‌شود (Santoyo et al., 2021). به عنوان مثال، در یک مطالعه، تیمار بذری ترکیبی حاوی باکتری *P. fluorescens* و قارچ‌های تریکودرما و میکوریزا موجب بهبود رشد گیاهی و کاهش بیماری پوسیدگی ریشه کتان (*Gossypium herbaceum*) در شرایط مزرعه‌ای شد (Sain et al., 2023) که اثربخشی رویکرد ترکیبی را در مدیریت یکپارچه تأمین سلامت و بهبود رشد گیاه تأیید می‌کند. در مقابل، عملکرد مشابه و پایین‌تر

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب (میانگین مربعات) اثر تاریخ کاشت و بذرمال‌های مختلف بر استقرار و ارتفاع بوته و ویژگی‌های ریشه نخود
دیم در طی دو سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۴ و ۱۴۰۳-۱۴۰۴

Table 3- Combined analysis of variance (mean of squares) of the effect of sowing date and different seed treatments on plant establishment and height, and root traits of rainfed chickpea in two years 2023-2024 and 2024-2025

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	استقرار بوته Plant establishment	وزن گره ریشه Root nodule weight	وزن خشک ریشه Root dry weight	حجم ریشه Root volume	ارتفاع بوته Plant height
سال Year (Y)	1	46.82	0.22	10.91**	4.94**	0.02
بلوک (سال) Block (Year)	4	15.73	0.15	0.04	0.93	4.63
تاریخ کاشت Sowing date (A)	1	22.82	4.56**	13.53**	44.41**	98.82**
تاریخ کاشت × سال Y × A	1	6.02	0.55*	0.58*	2.55**	79.35**
تاریخ کاشت × بلوک (سال) A × Block (Year)	4	21.57	0.10	0.07	0.06	5.73
بذرمال Seed treatments (B)	4	293.52**	0.19	0.72**	1.65**	27.65**
سال × بذرمال Y × B	4	20.48	0.06	0.23	1.17**	6.27
تاریخ کاشت × بذرمال A × B	4	167.40**	0.10	0.12	0.37**	37.32**
سال × تاریخ کاشت × بذرمال Y × A × B	4	7.93	0.09	0.01	0.19**	11.77
خطا Error	32	8.61	0.10	0.11	0.01	5.67
ضریب تغییرات C.V (%)		13.87	13.48	15.14	2.84	5.48

* و **: به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد می‌باشد.

* and **: indicate significance at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

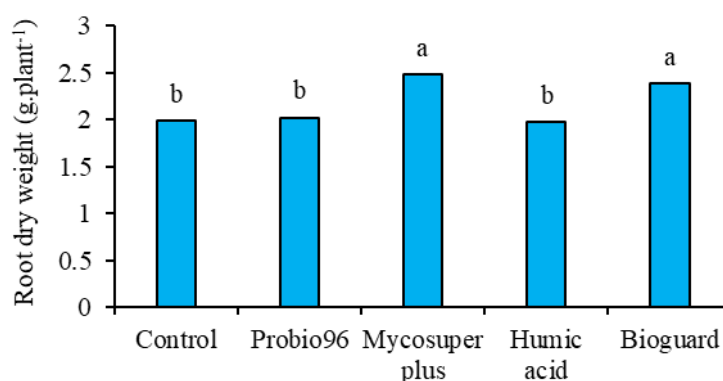
جدول ۴- تجربه واریانس مرکب (میانگین مربعات) اثر تاریخ کاشت و بذرمال‌های مختلف بر عملکرد و اجزای عملکرد نخود دیم در طی دو سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ و ۱۴۰۳-۱۴۰۴

Table 4- Combined analysis of variance (mean of squares) of the effect of sowing date and different seed treatments on yield and yield components of rainfed chickpea in 2023-2024 and 2024-2025

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	عملکرد زیستی Biological yield	عملکرد دانه Grain yield	شاخص برداشت Harvest index	وزن ۱۰۰ دانه 100-seed weight	بهره‌وری آب باران Rainwater use efficiency
سال Year (Y)	1	4420563.27**	1209272.07**	126.15**	2.82	1.24**
بلوک (سال) Block (Year)	4	33114.22	12109.87	6.98	3.07	0.08
تاریخ کاشت Sowing date (A)	1	2326176.60**	277168.07**	132.02**	4.82	2.06**
تاریخ کاشت × سال Y × A	1	791661.07**	170666.67**	2.82	0.42	1.06**
تاریخ کاشت × بلوک (سال) A × Block (Year)	4	20137.58	5249.67	30.42	1.07	0.04
بذرمال Seed treatments (B)	4	65881.28*	4153.81	46.36**	1.39	0.04
سال × بذرمال Y × B	4	96091.39**	19915.61**	2.78	0.19	0.19**
تاریخ کاشت × بذرمال A × B	4	26735.06	18497.11**	16.89	0.86	0.13**
سال × تاریخ کاشت × بذرمال Y × A × B	4	84836.11**	22751.71**	5.61	0.13	0.16**
خطا Error	32	17825.17	3455.81	11.60	1.88	0.03
ضریب تغییرات C.V (%)		9.44	9.39	7.70	3.99	9.00

* و **: به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد می باشد.

* and **: indicate significance at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively



شکل ۲- اثر بذرمال‌های مورد مطالعه بر وزن خشک ریشه

Figure 2- Effect of the studied seed treatments on root dry weight

تشکیل گره‌های ریشه را می‌توان به توسعه بهتر سیستم ریشه و فراهم بودن شرایط محیطی مطلوب‌تر (دما و رطوبت) برای فعالیت باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن در این تاریخ کاشت نسبت داد. باین‌وجود، یک اثر متقابل قوی بین سال و تاریخ کاشت نیز مشاهده

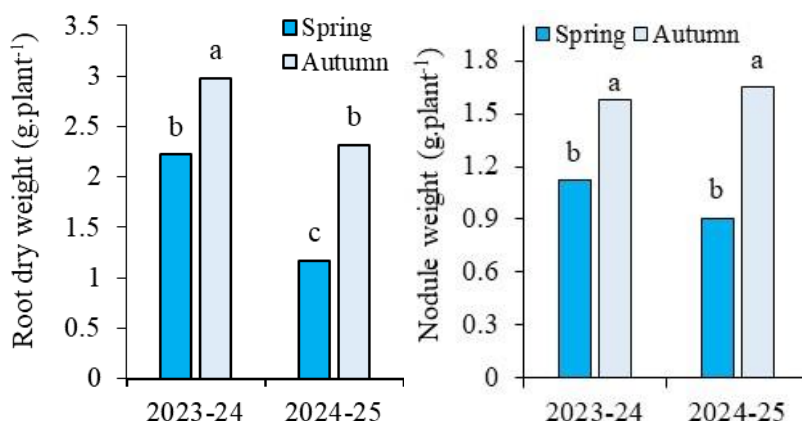
تاریخ کاشت به‌عنوان یک عامل اصلی، تأثیر چشمگیری بر رشد ریشه داشت، به‌طوری‌که کشت پاییزه به‌طور میانگین در هر دو سال، برتری معنی‌داری را نسبت به کشت بهاره در صفات وزن خشک ریشه و وزن گره‌های ریشه نشان داد (شکل ۳). برتری کشت پاییزه در

شد. بیشترین وزن خشک ریشه (۲/۹۷ گرم در بوته) مربوط به کشت پاییزه در سال اول (۱۴۰۳-۱۴۰۲) بود که به‌طور معنی‌داری بیشتر از کشت پاییزه در سال دوم (۲/۳۲ گرم در بوته) و به‌مراتب بیشتر از کشت بهاره در هر دو سال (۲/۲۲ و ۱/۱۷ گرم در بوته به‌ترتیب برای سال اول و دوم) بود. این روند در مورد وزن گره‌های ریشه نیز تکرار شد، به‌طوری‌که کشت پاییزه در هر دو سال با مقادیر ۱/۶۵ و ۱/۵۸ گرم در بوته در گروه برتر قرار گرفت؛ درحالی‌که کشت بهاره در دو سال با مقادیر ۱/۲۲ و ۰/۹۱ گرم در بوته در رده‌های پایین‌تر جای گرفتند. این الگوی تغییرات نشان می‌دهد که کشت پاییزه با ایجاد دوره رشد طولانی‌تر و استفاده کارآمدتر از رطوبت زمستانه، پتانسیل توسعه سیستم ریشه و تشکیل گره‌های تثبیت‌کننده نیتروژن را به‌طور پایدارتری افزایش داد. وانگ و همکاران (Wang et al., 2024) با بیان اینکه سیستم ریشه به‌عنوان اندام اصلی زمستان‌گذرانی گیاه شناخته می‌شود، تأکید کردند که هرچه کاشت زودتر انجام شود، سیستم ریشه گیاه قطورتر شده و مواد مغذی بیشتری جذب و ذخیره می‌کند و این ذخایر ریشه‌ای می‌تواند عملکرد را در مراحل بعدی رشد افزایش دهد. کاهش مقادیر در سال دوم را می‌توان عمدتاً به شرایط پرتنش از جمله کاهش بارش و افزایش دما در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۴ نسبت داد. بااین‌حال، حتی تحت این شرایط تنش نیز کشت پاییزه همچنان برتری خود را نسبت به کشت بهاره حفظ کرد که حاکی از سازگاری بالاتر و مقاومت بهتر این نظام کشت به تنش‌های محیطی در منطقه مورد مطالعه است.

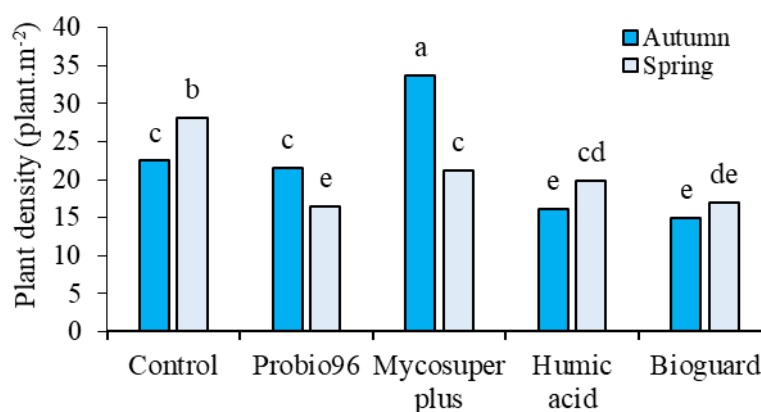
در تاریخ کاشت بهاره، بیشترین تراکم بوته (۲۸ بوته در مترمربع) به‌طور غیرمنتظره‌ای متعلق به شاهد بود که از نظر آماری برتر از تیمارهای پروبیو ۹۶ و بایوگارد (با ۱۷ بوته در مترمربع) بود (شکل ۴). این نتایج را می‌توان با دو سازوکار تفسیر کرد: اولاً، در شرایط تنش‌زای کشت بهاره (دوره رشد کوتاه‌تر و تنش گرمایی آخر فصل)، جمعیت‌های میکروبی بومی خاک ممکن است سازگاری اکولوژیک بهتری داشته باشند (Prudent et al., 2020). دوماً و شاید مهم‌تر، ترکیبات همراه و مواد شیمیایی موجود در فرمولاسیون برخی از بذرمال‌ها (مانند نمک‌های محلول، مواد نگهدارنده یا غلظت‌های بالای اسیدهای آلی) می‌توانند به‌طور بالقوه و به‌صورت موضعی یک ریزمحیط^۱ دارای تنش اسمزی یا حتی سمیت خفیف در اطراف دانه در

حال جوله‌زنی ایجاد کنند (Afzal et al., 2020). این وضعیت در شرایطی که گیاهچه در تلاش برای استقرار تحت تنش‌های رطوبتی و دمایی است، می‌تواند به یک عامل محدودکننده اضافی تبدیل شده و به‌طور مستقیم درصد جوانه‌زنی و استقرار اولیه را کاهش دهد. در این رابطه، محمد و همکاران (Muhammad et al., 2024) به این نتیجه رسیدند که تعامل‌های گیاه-خاک-ریزجاندار تحت تنش‌های محیطی بازآرایی می‌شوند؛ میکروبیوم بومی که پیش‌تر با شرایط محلی تطابق یافته بود، می‌تواند عملکرد گیاه را در مواجهه با تنش حفظ کند یا سریع‌تر بازسازی نماید. بنابراین، وقتی دوره رشد، کوتاه و دمای خاک بالا است، تلقیح‌های خارجی که برای شرایط متفاوت فرموله شده‌اند، ممکن است که نتوانند هم‌زمان با نیازهای فیزیولوژیک گیاه جوان هماهنگ شده و در نتیجه نمونه شاهد (بومی) تراکم بالاتری نشان دهد. در مقابل، در تاریخ کاشت پاییزه که شرایط محیطی برای جوانه‌زنی و استقرار اولیه ملایم‌تر است، این اثرات منفی بالقوه خنثی شده و مزایای واقعی ریزجانداران برجسته می‌شود. در این شرایط، تیمار مایکوسوپرپلاس با ۳۴ بوته در مترمربع به‌طور معنی‌داری برتر از شاهد (۲۳ بوته در مترمربع) بود که نشان می‌دهد، قارچ‌های میکوریزا توانسته‌اند در غیاب تنش‌های شدید، رابطه همزیستی مؤثری برقرار کنند. نتایج تحقیقات متعدد نشان می‌دهند که فعال‌سازی روابط میکوریزا در شرایط محیطی ملایم‌تر (دما و رطوبت مناسب برای جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاه) منجر به توسعه شبکه‌های هیفی گسترده و افزایش جذب آب و عناصر کم‌تحرک مانند فسفر می‌شود؛ این مزیت در مرحله استقرار اولیه موجب افزایش تراکم بوته و رشد ریشه می‌شود (Wahab et al., 2023). عملکرد ضعیف تیمارهای اسیدهیومیک و بایوگارد در کشت پاییزه نیز می‌تواند علاوه بر مسائلی سازگاری میکروبی، تا حدی به حساسیت بیشتر فرمولاسیون آن‌ها به شرایط خاص محیطی مرتبط باشد. نتایج بررسی‌ها نشان داده‌اند که نه تنها خود ریزجانداز موجود در کود زیستی، بلکه حامل‌ها و روش تحویل (مانند ریزکپسوله‌سازی^۲، نوع ماده چسباننده^۳ و غلظت مواد آلی و معدنی) نیز اثربخشی کود زیستی را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند؛ به‌طوری‌که برخی از فرمولاسیون‌ها ممکن است در شرایط مرطوب و خنک بهتر عمل کنند و در برخی از شرایط ناکارآمد یا حتی مضر واقع شوند (Javed et al., 2022).

1- Microenvironment
2- Microencapsulation
3- Binder



شکل ۳- اثر متقابل سال و تاریخ کاشت بر وزن گره‌ها و وزن خشک ریشه
Figure 3- Interaction effect of year and sowing date on nodule weight and root dry weight



شکل ۴- اثر متقابل بذرمال و تاریخ کاشت بر تراکم بوته
Figure 4- Interaction effect of seed treatment and sowing date on plant density

هم‌افزایی میکوریزا با سایر عوامل سودبخش مانند باکتری‌های محرک رشد یا قارچ‌های تریکودرما وقتی به‌طور هم‌زمان حضور دارند، منجر به بهبود ویژگی‌های مورفولوژیک ریشه از جمله حجم و طول ریشه می‌شود؛ این هم‌افزایی در شرایط محیطی مساعد (دما و رطوبت مناسب در مرحله استقرار) بیشینه و آشکار است (Li et al., 2025).

در مقابل، در سال دوم (۱۴۰۳-۱۴۰۴) که با تنش خشکی و دمای بالاتر همراه بود، این برتری کاملاً از بین رفت و حتی در برخی از تیمارها حجم ریشه به کمتر از سطح شاهد نیز رسید. به‌ویژه، کمترین حجم ریشه در این مطالعه (۴/۲ سانتی‌مترمکعب) به‌طور مشترک در تیمارهای پروبیو۹۶ و اسیدهیومیک تحت کشت بهاره در سال دوم ثبت شد. این افت شدید عملکرد، حساسیت باکتری‌های محرک رشد (مانند آنچه در پروبیو۹۶ وجود دارد) و همچنین ناکارآمدی مواد آلی مانند اسیدهیومیک را در شرایط تنش شدید محیطی و در یک تاریخ کاشت نامساعد (بهاره) به‌وضوح نشان می‌دهد. جالب اینکه در سال پرتنش (سال دوم)، گیاهان شاهد (بدون بذرمال) در برخی از

براساس نتایج، یک اثر متقابل سه‌گانه پیچیده و معنی‌دار بین سال، تاریخ کاشت و بذرمال بر حجم ریشه مشاهده شد (شکل ۵) که نشان‌دهنده وابستگی شدید عملکرد ریزجانداران به شرایط محیطی است. در سال اول با شرایط نسبتاً مطلوب (۱۴۰۲-۱۴۰۳)، بیشترین حجم ریشه (۵/۶ سانتی‌مترمکعب) به‌طور مشترک در تیمارهای بایوگارد و مایکوسوپرپلاس تحت کشت پاییزه مشاهده شد. این موضوع نشان می‌دهد که در نبود تنش‌های شدید، ترکیبات میکروبی پیچیده اعم از تعامل باکتری-قارچ در بایوگارد و قارچ‌های میکوریز در مایکوسوپرپلاس می‌توانند با ایجاد هم‌افزایی، بیشترین سود را برای توسعه سیستم ریشه داشته باشند (Begum et al., 2019). چاندراسکاران (Chandrasekaran, 2022) گزارش کرد که پاسخ ریشه به تلقیح‌های میکروبی بسیار وابسته به شرایط محیطی است؛ به‌طور خاص، شدت تنش خشکی یا دما، فصل رشد و شرایط خاک می‌توانند جهت و اندازه اثر تلقیح‌ها (مثبت، خنثی یا حتی منفی) را تعیین کنند. علاوه بر آن، تحقیقات تجربی نشان داده‌اند که رفتار

فیتوهورمون‌های محرک رشد و مواد هیومیک با بهبود شرایط فیزیکوشیمیایی ریزوسفر، در مجموع بستری برای رشد طولی مطلوب فراهم کرده‌اند. در مقابل، در تاریخ کاشت بهاره، هیچ‌یک از تیمارهای بذرمال نتوانستند برتری معنی‌داری نسبت به شاهد در زمینه ارتفاع بوته ایجاد کنند که مجدداً بر وابستگی شدید کارایی این نهاده‌ها به شرایط محیطی مربوط می‌شود. این یافته‌ها با گزارش‌های پیشین هم‌خوانی دارد که بیان کرده‌اند، واکنش گیاهان لگوم به کودهای زیستی به عوامل متعددی از جمله شرایط اقلیمی، ترکیب و سازگاری ریزجاندارها و خصوصیات خاک وابسته است (Begum et al., 2019; Fan et al., 2017).

الگوی نهایی عملکرد دانه به‌طور کامل، منطق بیولوژیک مشاهده‌شده در مراحل رشد اولیه و رویشی را تأیید کرد و نقش حیاتی هماهنگی بین مدیریت، محیط و نهاده را در دستیابی به پتانسیل عملکرد نشان داد. یک همبستگی قوی بین عملکرد زیستی و عملکرد دانه مشاهده شد که حاکی از تخصیص کارآمد مواد فتوسنتزی به دلته در تیمارهای برتر است. نقطه اوج این هم‌افزایی در کشت پاییزه سال اول (۱۴۰۳) و در تیمار بایوگارد مشاهده شد که با بیشترین عملکرد دانه (۱۰۸۴ کیلوگرم در هکتار) (شکل ۸) و عملکرد زیستی (۲۳۳۷ کیلوگرم در هکتار) (شکل ۹) همراه بود. این نتیجه، پیامد مستقیم توسعه مطلوب سیستم ریشه است که در بخش‌های قبل برای این تیمار گزارش شد. شمیسی و همکاران (Shomeisi et al., 2023) در پژوهشی نشان دادند که تلقیح بذر کینوا با قارچ تریکودرما^۱ و باکتری *Bacillus subtilis* می‌تولند عملکرد دلته را به ترتیب حدود ۲۷ و ۱۹ درصد افزایش دهد. در مقابل، کمترین عملکردها (۴۰۵ کیلوگرم در دلته و ۹۴۱ کیلوگرم در زیست‌توده) نیز متعلق به تیمار بایوگارد بود، اما این بار در کشت بهاره سال دوم (۱۴۰۴). این تضاد قابل توجه، حساسیت زیاد و وابستگی شدید برخی از کودهای زیستی به شرایط محیطی را نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که در شرایط مطلوب، عملکرد مطلوبی نیز دارند، اما در شرایط تنش، می‌توانند حتی از تیمار شاهد نیز عملکرد ضعیف‌تری داشته باشند. نیتو-جاکوبو و همکاران (Nieto-Jacobo et al., 2017) بیان کردند که شرایط محیطی از جمله تنش می‌تواند با تحت تأثیر قرار دادن ترشح ترکیبات فعال مانند هورمون‌ها، شبه‌هورمون‌ها و آنزیم‌ها، در ریزجاندارانی مانند تریکودرما منجر به ایجاد اثرهای متفاوت بر رشد و عملکرد گیاه شود. در مقابل، تیمارهایی مانند مایکوسوپرپلاس و در حدی پروبیو۹۶، اگرچه در شرایط ایده‌آل به اوج عملکرد بایوگارد نرسیدند، اما در شرایط مختلف، پایداری عملکرد بسیار بیشتری از خود نشان دادند. این پایداری

موارد سازگاری بهتری از خود نشان دادند. مطالعات نشان می‌دهند که مزایای تلقیح AMF و بعضی از باکتری‌های محرک رشد در مواجهه با خشکی شدید کاهش می‌یابد و در سطوح بالا یا طولانی‌مدت تنش، پاسخ گیاهان به تلقیح‌ها ناپایدار می‌شود و در برخی شرایط، پاسخ‌ها نه تنها کاهش می‌یابند، بلکه می‌توانند به سطوحی پایین‌تر از شاهد نیز برسند؛ چرا که عملکرد ریزجانداران و هم‌چنین ظرفیت فتوسنتزی گیاه محدود می‌شود و هم‌افزایی‌های مفید پیشین از بین می‌رود (Chandrasekaran, 2022). این پدیده را می‌توان در چارچوب تئوری هزینه-فایده^۱ در روابط هم‌زیستی تبیین کرد. براساس این تئوری، گیاه میزبان در ازای خدمات دریافت‌شده از ریزجانداران (مانند جذب آب و مواد غذایی)، بخشی از کربن و انرژی فتوسنتزی خود را به آن‌ها اختصاص می‌دهد (Bennett & Groten, 2022). در شرایط تنش شدید (مانند سال دوم) که هم‌فعالیت ریزجانداران و هم فتوسنتز گیاه به‌طور هم‌زمان محدود می‌شود، هزینه حمایت و نگهداری جمعیت میکروبی ارائه‌شده ممکن است بر فایده حاصل از آن پیشی بگیرد. در چنین شرایطی، گیاهان شاهد که پرداخت این هزینه اضافی در این شرایط به ضررشان تمام می‌شود، می‌توانند منابع انرژی محدود خود را به‌طور کامل بر سازوکارهای ذاتی تحمل تنش متمرکز کنند که این امر می‌تولند به‌طور موقت به برتری ظاهری آن‌ها بینجامد. بنابراین، کارایی بذرمال‌های زیستی همیشگی و ثابت نبوده، بلکه کاملاً وابسته به شرایط است.

پاسخ اجزای عملکرد و عملکرد دلته به تیمارهای مورد مطالعه

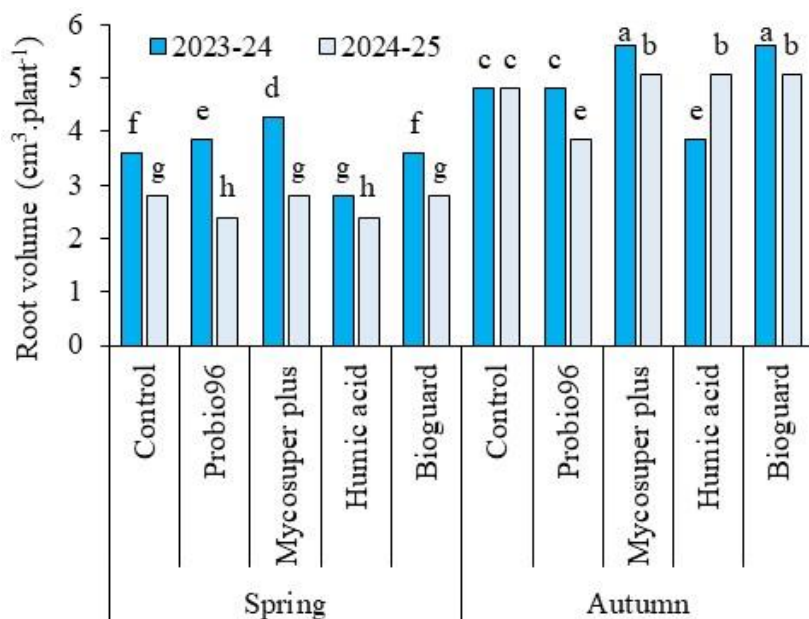
به‌طور کلی، در هر دو سال، کشت پاییزه نسبت به کشت بهاره بوته‌های بلندتری ایجاد کرد و بیشترین میانگین ارتفاع بوته (۴۵/۹ سانتی‌متر) در سال دوم مشاهده شد (شکل ۶). این برتری احتمالاً ناشی از دوره رشد طولانی‌تر و توسعه بهتر سیستم ریشه در این تاریخ کاشت است که در بخش قبل به‌طور مفصل بیان شد و با یافته‌های بگوم و همکاران (Begum et al., 2019) نیز همسو است. با این حال، در تاریخ کاشت پاییزه، تیمار مایکوسوپرپلاس با رسیدن به میانگین ارتفاع ۴۹ سانتی‌متر، به‌طور معنی‌داری از تمامی تیمارها از جمله شاهد (۴۲ سانتی‌متر) پیشی گرفت (شکل ۷). این نتیجه، همسو با برتری این تیمار در صفات ریشه و تراکم بوته در کشت پاییزه است و می‌توان آن را به اثر هم‌افزایی بین اجزای تشکیل‌دهنده آن نسبت داد؛ به این صورت که قارچ‌های میکوریزا و تریکودرما با بهبود جذب آب و عناصر غذایی در خاک‌های سرد کشت پاییزه، باکتری‌های سودمند با تولید

1- Cost-Benefit

2- *Trichoderma asperelloides*

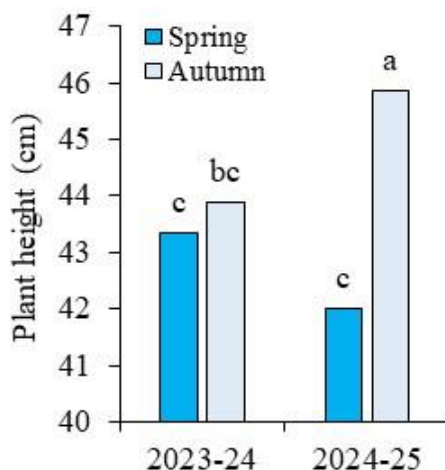
ریسک و تضمین عملکرد پایدار و قابل اطمینان در شرایط غیرقابل پیش‌بینی اقلیمی باشد، مایکوسوپرپلاس به‌عنوان یک راهکار مدیریتی باثبات‌تر و کم‌خطرتر برای ایجاد یک سیستم ریشه‌ای گسترده‌تر قابل توصیه است.

به‌ویژه برای مایکوسوپرپلاس، احتمالاً ناشی از ماهیت رابطه همزیستی قارچ میکوریزا با گیاه است که در برابر نوسانات محیطی مقاومت بیشتری دارد. در نتیجه، می‌توان چنین استنباط کرد که اگر هدف، دستیابی به حداکثر عملکرد مطلق در یک سال نرمال است، بایوگارد می‌تواند در کشت پاییزه گزینه بهتری باشد. اما اگر هدف کاهش



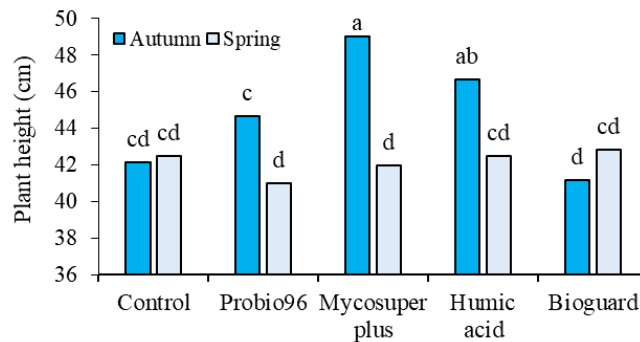
شکل ۵- اثر متقابل سال، تاریخ کاشت و بذرمال بر حجم ریشه

Figure 5- Interaction effect of year, sowing date and seed treatment on root volume



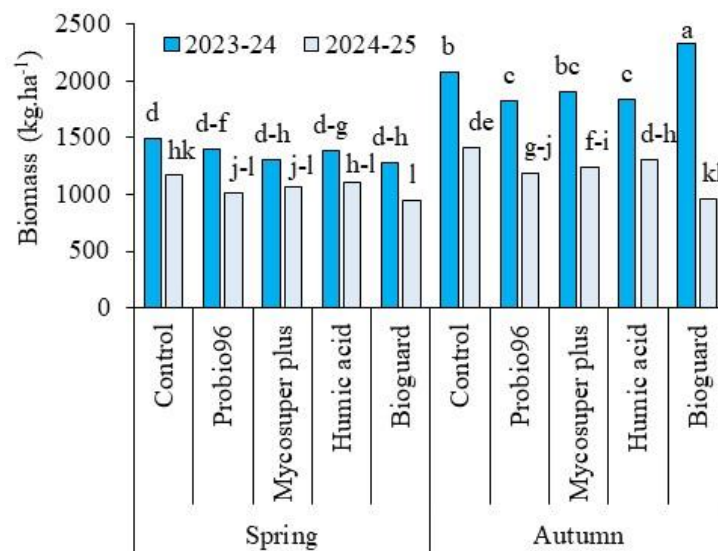
شکل ۶- اثر متقابل سال و تاریخ کاشت بر ارتفاع بوته

Figure 6- Interaction effect of year and sowing date on plant height



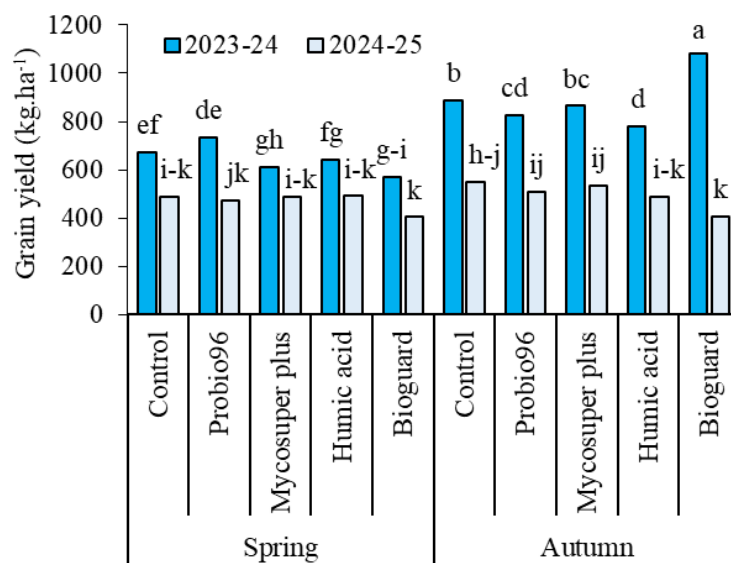
شکل ۷- اثر متقابل بذرمال و تاریخ کاشت بر ارتفاع بوته

Figure 7- Interaction effect of seed treatment and sowing date on plant height



شکل ۸- اثر متقابل سال، تاریخ کاشت و بذرمال بر عملکرد زیستی

Figure 8- Interaction effect of year, sowing date, and seed treatment on biomass



شکل ۹- اثر متقابل سال، تاریخ کاشت و بذرمال بر عملکرد دانه

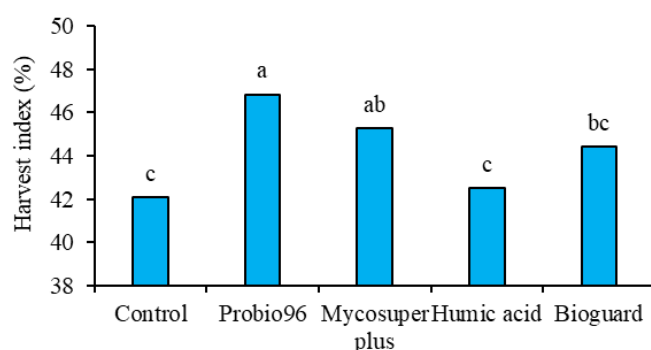
Figure 9- Interaction effect of year, sowing date and seed treatment on grain yield

کارایی مصرف منابع و پایداری سیستم

بررسی مقایسه میانگین شاخص برداشت نشان داد که تیمار پروبیو ۹۶ با وجود اینکه تأثیر محدودی بر افزایش زیست‌توده ریشه داشت (بخش‌های قبل)، توانست به‌طور معنی‌داری بالاترین شاخص برداشت (۴۶/۸ درصد) را به خود اختصاص دهد (شکل ۱۰). این یافته‌ها نشان می‌دهد که احتمالاً باکتری *Bacillus velezensis* موجود در این بذرمال، فیزیولوژی گیاه را به‌گونه‌ای تنظیم کرده که تخصیص مواد فتوسنتزی به‌طور کارآمدتری به سمت تولید دانه (بخش اقتصادی) سوق یابد. این امر احتمالاً از طریق تولید هورمون‌های خاص (مانند سیتوکینین) یا بهبود جذب عناصر کم‌مصرف که نقش مهمی در فرآیند پُر شدن دانه دارند، محقق شده است. در مقابل، اگرچه تیمار بایوگارد در تولید زیست‌توده کل (عملکرد زیستی) و توسعه ریشه برتر بود، اما شاخص برداشت پایین‌تر آن (۴۴/۴ درصد) حاکی از آن است که این تیمار، سهم بیشتری از کربن را به توسعه اندام‌های رویشی و ریشه اختصاص داده و در نتیجه، کارایی تبدیل آن به دانه نسبت به پروبیو ۹۶

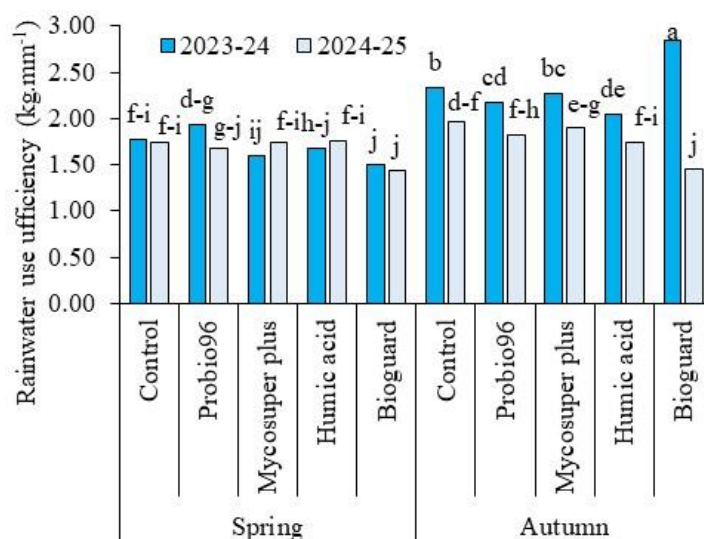
کمتر بود. عملکرد قوی تیمار مایکوسوپرپلاس (۴۵/۳ درصد) نیز به نقش قارچ میکوریزا در تأمین پایدار آب و فسفر به‌عنوان دو عامل تعیین‌کننده در فرآیند پُر شدن دانه مرتبط است.

بیشترین بهره‌وری (۲/۸۴ کیلوگرم بر میلی‌متر) در اوج هم‌افزایی بین کشت پاییزه، سال مطلوب (۱۴۰۳) و تیمار بایوگارد حاصل شد (شکل ۱۱) که نقطه عطف کارایی تبدیل یک منبع محدود و حیاتی (آب باران) به محصول است. بااین‌حال، عملکرد خوب تیمارهای شاهد و مایکوسوپرپلاس در همین شرایط نشان می‌دهد که در یک سال خوب و با تاریخ کاشت مناسب، حتی سیستم‌های کم‌داخلت (شاهد) یا باثبات (مایکوسوپرپلاس) نیز می‌توانند بهره‌وری بالایی داشته باشند. این در حالی است که عملکرد ضعیف و ناپایدار بایوگارد در سال پرتنش (۱۴۰۴)، همان‌طور که در بخش‌های قبل اشاره شد، در بهره‌وری آب آن نیز منعکس گردید و این تیمار در شرایط تنش نتوانست از آب موجود به بهره‌وری مناسبی برسد.



شکل ۱۰- اثر بذرمال‌های مورد مطالعه بر شاخص برداشت

Figure 10- Effect of the studied seed treatments on harvest index



شکل ۱۱- اثر متقابل سال، تاریخ کاشت و بذرمال بر بهره‌وری آب باران

Figure 11- Interaction effect of year, sowing date, and seed treatment on rainwater use efficiency

نتیجه‌گیری

کشت پاییزه به‌عنوان یک راهبرد مدیریتی پایه، با فراهم آوردن دوره رشد طولانی‌تر، توسعه مطلوب‌تر سیستم ریشه و استفاده کارآمد از نزولات آسمانی، برتری خود را در تمامی مراحل رشد نسبت به کشت بهار اثبات نمود. در این میان، عملکرد کودهای زیستی کاملاً وابسته به شرایط محیطی بود، به‌طوری‌که نخود تیمارشده با بایوگارد در شرایط مساعد (سال اول) در کشت پاییزه به اوج عملکرد رسید، اما در سال پرتنش، بیشترین حساسیت و کاهش عملکرد را نشان داد. در مقابل، تیمار مایکوسوپرپلاس با ایجاد تعادل بین عملکرد و پایداری و تیمار پروبیو ۹۶ با بیشترین کارایی در تخصیص ماده خشک به دانه (شاخص برداشت)، به‌عنوان گزینه‌های مطمئن‌تر و کم‌خطرتر برای شرایط غیرقابل پیش‌بینی اقلیمی شناخته شدند. بنابراین، بر مبنای این

یافته‌ها، تلفیق کشت پاییزه با کودهای زیستی دارای سازوکار عمل پایدار (مانند مایکوسوپرپلاس) به‌عنوان یک راهکار عملی و مطمئن برای افزایش بهره‌وری و تضمین تولید پایدار نخود دیم در شرایط مشابه منطقه مورد مطالعه توصیه می‌گردد.

سپاسگزاری

این مقاله از نتایج پروژه تحقیقاتی با کد مصوب «۱۵-۱۵-۴۷-۰۵۷۰-۰۲۰۸» استخراج شده که با همکاری شرکت مکانیزاسیون کشاورزی برکت سبز مراغه (به‌صورت سفارشی) در مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور اجرا شده است و نویسندگان صمیمانه از حمایت‌های مالی و فنی این مؤسسه و شرکت قدردانی می‌نمایند.

References

- Afzal, I., Javed, T., Amirkhani, M., & Taylor, A. G. (2020). Modern seed technology: Seed coating delivery systems for enhancing seed and crop performance. *Agriculture*, 10(11), 526. <https://doi.org/10.3390/agriculture10110526>
- Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., & Zhang, L. (2019). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: Implications in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1068. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068>
- Bennett, A. E., & Groten, K. (2022). The costs and benefits of plant–arbuscular mycorrhizal fungal interactions. *Annual Review of Plant Biology*, 73(1), 649-672. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102820-124504>
- Casenave, E. C., & Toselli, M. E. (2007). Hydropriming as a pre-treatment for cotton germination under thermal and water stress conditions. *Seed Science and Technology*, 35(1), 88-98. <https://doi.org/10.15258/sst.2007.35.1.08>
- Chandrasekaran, M. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi mediated enhanced biomass, root morphological traits and nutrient uptake under drought stress: a meta-analysis. *Journal of Fungi*, 8(7), 660. <https://doi.org/10.3390/jof8070660>
- Cheng, Y., Jiang, X., He, X., Wu, Z., Lv, Q., Zhao, S., Jia, B., Cao, Y., Liu, J., Luan, H., & Liu, J. (2025). *Bacillus velezensis* 20507 promotes symbiosis between *Bradyrhizobium japonicum* USDA110 and soybean by secreting flavonoids. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1572568. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1572568>
- Cozzolino, V., Monda, H., Savy, D., Di Meo, V., Vinci, G., & Smalla, K. (2021). Cooperation among phosphate-solubilizing bacteria, humic acids and arbuscular mycorrhizal fungi induces soil microbiome shifts and enhances plant nutrient uptake. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8(1), 31. <https://doi.org/10.1186/s40538-021-00230-x>
- Dubey, S. C., Tripathi, A., & Singh, B. (2012). Combination of soil application and seed treatment formulations of *Trichoderma* species for integrated management of wet root rot caused by *Rhizoctonia solani* in chickpea (*Cicer arietinum*). *Indian Journal of Agriculture Science*, 82(4), 357-364. <https://doi.org/10.56093/ijas.v82i4.16649>
- Fan, B., Blom, J., Klenk, H. P., & Borriss, R. (2017). *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus velezensis*, and *Bacillus siamensis* form an “operational group *B. amyloliquefaciens*” within the *B. subtilis* species complex. *Frontiers in Microbiology*, 8, 22. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00022>
- Ghorbani, A., Jalilian, J., & Amirnia, R. (2013). The Effects of seed priming and superabsorbent on some quantity and quality characteristics of Kaboli chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Research in Field Crop Journal*, 1(1), 44-53. (In Persian)
- Javed, T., Afzal, I., Shabbir, R., Ikram, K., Zaheer, M. S., Faheem, M., Amirkhani, M., Taylor, A. G. & Iqbal, J. (2022). Seed coating technology: An innovative and sustainable approach for improving seed quality and crop performance. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 21(8), 536-545. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2022.03.003>

- Javidi, S., Azizi, M., & Yaghoobi, S. R. (2024). Evaluating the efficacy of biological and organic fertilizers in increasing soybean yield. *Karafan Journal*, 20(4), 391-406. (In Persian)
- Li, J., Zhou, L., Chen, G., Yao, M., Liu, Z., Li, X., Xiang, D., Wang, K., Jiang, S., & Chen, X. (2025). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance drought resistance and alter microbial communities in maize rhizosphere soil. *Environmental Technology & Innovation*, 37, 103947. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103947>
- Muhammad, A., Kong, X., Zheng, S., Bai, N., Li, L., Khan, M. H. U., Gao, N., & Zhang, Z. (2024). Exploring plant-microbe interactions in adapting to abiotic stress under climate change: A review. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1482739. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1482739>
- Nieto-Jacobo, M. F., Steyaert, J. M., Salazar-Badillo, F. B., Nguyen, D. V., Rostás, M., Braithwaite, M., & Mendoza-Mendoza, A. (2017). Environmental growth conditions of *Trichoderma* spp. affects indole acetic acid derivatives, volatile organic compounds, and plant growth promotion. *Frontiers in Plant Science*, 8, 102. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00102>
- Prudent, M., Dequiedt, S., Sorin, C., Girodet, S., Nowak, V., Duc, G., Wolde, G., Tena, W., & Tamiru, T., & Maron, P. A. (2020). The diversity of soil microbial communities matters when legumes face drought. *Plant, Cell & Environment*, 43(4), 1023-1035. <https://doi.org/10.1111/pce.13712>
- Rani, A., Devi, P., Jha, U. C., Sharma, K. D., Siddique, K. H., & Nayyar, H. (2020). Developing climate-resilient chickpea involving physiological and molecular approaches with a focus on temperature and drought stresses. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1759. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01759>
- Rocha, I., Duarte, I., Ma, Y., Souza-Alonso, P., Látr, A., Vosátka, M., Buttrós, V. H., Pasqual, M., Dória, J., & Oliveira, R. S. (2019). Seed coating with arbuscular mycorrhizal fungi for improved field production of chickpea. *Agronomy*, 9(8), 471. <https://doi.org/10.3390/agronomy9080471>
- Sabaghpour, H., Mahmoudi, A. A., Saeed, A., Kamel, M., & Malthora, R. S. (2006). Study on chickpea drought tolerance lines under dryland condition of Iran. *Indian Journal of Crop Science*, 1, 70-73.
- Sain, S. K., Dewasi, H., & Singh, A. (2023). Combined application of effective *Trichoderma*, *Pseudomonas* and *Arbuscular mycorrhiza* spp. reduced soil-borne diseases and boosted growth in cotton. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 33(1), 94. <https://doi.org/10.1186/s41938-023-00739-3>
- Santoyo, G., Guzmán-Guzmán, P., Parra-Cota, F. I., Santos-Villalobos, S. D. L., Orozco-Mosqueda, M. D. C., & Glick, B. R. (2021). Plant growth stimulation by microbial consortia. *Agronomy*, 11(2), 219. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020219>
- Shomeisi, A., Khodaei Joghani, A., Lotfi Jalal- Abadi, A., & Gharineh, M. H. (2023). Assessing yield response of quinoa to sugarcane residue compost and *Trichoderma asperelloides* fungi and *Bacillus subtilis* bacteria inoculation. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 32(4), 83-97. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/saps.2022.48683.2760>
- Singh, P., Vaishnav, A., Liu, H., Xiong, C., Singh, H. B., & Singh, B. K. (2023). Seed biopriming for sustainable agriculture and ecosystem restoration. *Microbial Biotechnology*, 16, 2212-2222. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14322>
- Valizadeh, S., Pouryousef Miandoab, M., & Alizadeh, K. (2024). The effect of three autumns, dormant and spring seeding dates on chickpea grain yield and weed interference under West Azerbaijan dryland conditions. *Iranian Dryland Agronomy Journal*, 12(2), 235-248. (In Persian).
- Wahab, A., Muhammad, M., Munir, A., Abdi, G., Zaman, W., Ayaz, A., Ahmed, J., Kara, N., & Reddy, S. P. (2023). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in regulating growth, enhancing productivity, and potentially influencing ecosystems under abiotic and biotic stresses. *Plants*, 12(17), 3102.
- Wang, Y., Xie, J., Sun, Z., Wang, Q., & Yu, L. (2024). Effects of sowing dates and phosphorus application on seed yield and yield components of alfalfa. *Legume Research: An International Journal*, 47(9), 152-164. <https://doi.org/10.18805/LRF-810>
- Zeng, W., Xiang, D., Li, X., Gao, Q., Chen, Y., Wang, K., Liu, X., Chang, L., Zhou, Y., & Xiang, H. (2025). Effects of combined inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting rhizosphere bacteria on seedling growth and rhizosphere microecology. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1475485. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1475485>