Vol 28, No. 2, Summer 2026

University of Tehran Press

Journal of Crops Improvement

Online ISSN: 2345-6957

Homepage: https://jci.ut.ac.ir/

Effect of biological and chemical nitrogen sources on growth, yield, and grain protein of different lentil cultivars under rainfed conditions

Abbas Soleymanifard[1]✉ | **Mohammad Haghanini**[2]

1. Corresponding Author, Crop and Horticultural Science Research Department, Ilam Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ilam, Iran. E-mail: a.soleimanifard@areeo.ac.ir
2. Crop and Horticultural Science Research Department, Ilam Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ilam, Iran. E-mai: m.haghaninia@areeo.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 18 December 2025
Received in revised form
8 May 2026
Accepted 26 May 2026
Published online 22 June 2026

Keywords:
Azospirillum
Azotobacter
Harvest index
Lentils
Root volume

ABSTRACT

Objective: This research aimed to investigate the effect of different nitrogen sources on the yield and morphophysiological traits of four lentil cultivars under rainfed conditions.

Methods: The field experiment was conducted during the 2020–2021 cropping season at the Chardavol Agricultural Research Station, Ilam, Iran. A factorial experiment was arranged in a randomized complete block design (RCBD) with three replications. The first factor comprised four autumn-sown lentil cultivars: Kimia, Gachsaran, Bilesavar, and a local landrace. The second factor included five nitrogen treatments: (1) control (no nitrogen), (2) inoculation with *Azospirillum*, (3) inoculation with *Azotobacter*, (4) combined inoculation with both bacteria, and (5) application of chemical nitrogen fertilizer. Measured physiological traits included total chlorophyll content, relative water content (RWC), and root growth. Agronomic traits comprised plant height, number of branches per plant, number of pods and seeds per plant, grain yield, biomass, harvest index (HI), and seed protein content. Standard protocols were used for all measurements, and data were analyzed using ANOVA; treatment means were compared using Duncan's test at the 5% significance level.

Results: The highest values for chlorophyll a and b, relative leaf water content, root growth, plant height, branching, number of pods and grains per plant, grain yield, biomass, harvest index, and seed protein percentage were observed in the chemical nitrogen fertilizer treatment using the Kimia cultivar. However, for many of these traits, inoculation with *Azospirillum* produced results closely comparable or equal to those of chemical fertilizer. Notably, in the Kimia cultivar, inoculation with *Azospirillum* showed no significant difference from the chemical fertilizer treatment in terms of root structure, vegetative growth, physiological capacity, and yield components.

Conclusions: This study highlights the effectiveness of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR), particularly *Azospirillum*, as a sustainable alternative to chemical nitrogen fertilizers in rainfed lentil production. The combination of the Kimia cultivar with *Azospirillum* inoculation emerged as the most promising strategy for improving physiological efficiency, maximizing grain yield, and enhancing seed protein content. Adoption of such biofertilization approaches can play a crucial role in sustainable crop production, especially in arid and semi-arid regions facing water limitations and fertilizer constraints.

Cite this article: Soleymanifard, A., & Haghanini, M. (2026). Effect of biological and chemical nitrogen sources on growth, yield, and grain protein of different lentil cultivars under rainfed conditions. *Journal of Crops Improvement*, 28 (2), 241-264. DOI: https://doi.org/10.22059/jci.2026.408357.2970

© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/jci.2026.408357.2970

دوره بیست و هشتم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۵

انتشارات دانشگاه تهران

به زراعی کشاورزی

شاپا الکترونیکی: ۶۹۵۷-۲۳۴۵

Homepage: https://jci.ut.ac.ir/

تأثیر منابع زیستی و شیمیایی نیتروژن بر رشد، عملکرد و پروتئین دانه ارقام مختلف عدس در شرایط دیم

عباس سلیمانی‌فرد[۱]✉ | محمد حقانی‌نیا[۲]

۱. نویسنده مسئول، بخش علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایلام، ایران. رایانامه: a.soleimanifard@areeo.ac.ir

۲. بخش علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایلام، ایران. رایانامه: m.haghaninia@areeo.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۵
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

کلیدواژه‌ها:
ازتوباکتر
آزوسپیریلیوم
حجم ریشه
شاخص برداشت
عدس

چکیده

هدف: با توجه به اهمیت کاهش مصرف کودهای شیمیایی نیتروژن، این پژوهش به بررسی تأثیر منابع مختلف نیتروژن شامل اثر باکتری‌های آزسپیریلیوم، ازتوباکتر و کود شیمیایی نیتروژن بر صفات زراعی، فیزیولوژیک و عملکرد ارقام عدس پاییزه تحت شرایط دیم پرداخته است.

روش پژوهش: آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار، طی سال زراعی ۱۴۰۰–۱۳۹۹ در ایستگاه تحقیقاتی چرداول اجرا شد. فاکتورهای موردبررسی شامل چهار رقم عدس (کیمیا، گچساران، بیله‌سوار و توده محلی) و پنج سطح تغذیه‌ای شامل شاهد، تلقیح با آزوسپیریلیوم، ازتوباکتر، ترکیب هردو باکتری و مصرف کود شیمیایی نیتروژن بود. صفات موردمطالعه در این آزمایش شامل حجم ریشه، وزن خشک ریشه، ارتفاع بوته، تعداد شاخه اولیه، کلروفیل a و b، محتوای نسبی آب برگ، اجزای عملکرد، عملکرد دانه، عملکرد زیستی، شاخص برداشت و پروتئین دانه بود.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که بیش‌ترین غلظت کلروفیل کلروفیل a و b، محتوای نسبی آب برگ، رشد ریشه، ارتفاع بوته، شاخه‌دهی، تعداد دانه، عملکرد دانه، زیست‌توده، شاخص برداشت و درصد پروتئین دانه در تیمار کود شیمیایی نیتروژن و در رقم کیمیا مشاهده شد. با این‌حال، در بسیاری از این صفات، تلقیح با باکتری آزوسپیریلیوم نتایج بسیار نزدیک یا برابری با کود شیمیایی داشت. از سوی دیگر، تلقیح با باکتری آزوسپیریلیوم در رقم کیمیا در صفاتی مانند ارتفاع بوته، تعداد غلاف در بوته، وزن صددانه و عملکرد زیستی تفاوت معنی‌داری از نظر آماری با تیمار کود شیمیایی نیتروژن نداشت.

نتیجه‌گیری: این پژوهش نشان می‌دهد، اگرچه کود شیمیایی نیتروژن در افزایش صفات مورفولوژیک و عملکردی نسبت به سایر منابع مؤثرتر بود، اما بر اثربخشی آزوسپیریلوم، به‌عنوان جایگزینی پایدار برای کود شیمیایی نیتروژن در تولید عدس دیم نیز تأکید می‌کند. تلفیق رقم کیمیا با تلقیح آزوسپیریلوم به‌عنوان امیدوارکننده‌ترین ترکیب برای بهبود صفات اجزای عملکرد، به حداکثررساندن عملکرد دانه و افزایش محتوای پروتئین در دانه‌ها شناخته شد. اتخاذ چنین استراتژی‌های کوددهی زیستی می‌تواند نقش مهمی در تولید پایدار عدس، به‌ویژه در مناطق دیم که با محدودیت‌های آب و کود مواجه هستند، ایفا کند.

استناد: سلیمانی‌فرد، علی و حقانی‌نیا، محمد (۱۴۰۵). تأثیر منابع زیستی و شیمیایی نیتروژن بر رشد، عملکرد و پروتئین دانه ارقام مختلف عدس در شرایط دیم. *به‌زراعی کشاورزی*، ۲۸ (۲)، ۲۴۱-۲۶۴. DOI: https://doi.org/10.22059/jci.2026.408357.2970

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

CC BY NC

۱. مقدمه

عدس[1] به‌عنوان یکی از مهم‌ترین حبوبات در سطح جهان، از جایگاه ویژه‌ای در تغذیه انسان، به‌ویژه تأمین پروتئین گیاهی برخوردار است (کانکیا[2] و همکاران، ۲۰۲۵). این گیاه علاوه بر دارابودن مقادیر بالای پروتئین، فیبر و عناصر معدنی ضروری، قادر به تثبیت زیستی نیتروژن از طریق هم‌زیستی با باکتری‌های ریزوسفری است (اردمسی[3]، ۲۰۲۰). فرایندی که ضمن بهبود حاصلخیزی خاک، پایداری زیست‌محیطی و بهره‌وری بلندمدت سامانه‌های کشاورزی را نیز تضمین می‌کند (چکری[4] و همکاران، ۲۰۲۰). با این‌حال، متوسط عملکرد عدس در مزارع دیم در ایران به‌مراتب پایین‌تر از ظرفیت بالقوه آن بوده و نوسانات سالانه تولید، ناشی از تنش‌های محیطی، کیفیت پایین تغذیه گیاه و محدودیت‌های اقلیمی، چالش‌های اساسی برای پایداری تولید محسوب می‌شوند (محمدی[5] و همکاران، ۲۰۲۳). در این راستا، تنش خشکی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل محدودکننده در زراعت دیم، عملکرد گیاهان از جمله عدس را از طریق کاهش جوانه‌زنی، رشد رویشی، جذب عناصر غذایی، به‌ویژه نیتروژن و فسفر و اختلال در فعالیت‌های فیزیولوژیکی کاهش می‌دهد (لالای[6] و همکاران، ۲۰۲۴؛ شارما[7] و همکاران، ۲۰۲۳). هم‌چنین، مشخص شده است که تنش خشکی باعث کاهش شاخص‌های فتوسنتزی، محتوای کلروفیل، محتوای نسبی آب برگ و افزایش مالون‌دی‌آلدهید در عدس شده که در نهایت منجر به کاهش عملکرد می‌گردد (محمدی و همکاران، ۲۰۲۳؛ کانیکا و همکاران، ۲۰۲۴). در این شرایط، کودهای شیمیایی اگرچه می‌توانند بخشی از نیاز گیاه را تأمین کنند، اما استفاده از آن‌ها در سامانه‌های دیم، به‌دلیل راندمان پایین، افزایش هزینه‌ها، کاهش رطوبت خاک، و آسیب‌های زیست‌محیطی، همواره با محدودیت مواجه است (سدری[8] و همکاران، ۲۰۲۲). از این‌رو، توسعه و بهره‌گیری از جایگزین‌های زیستی کارآمد و سازگار با اصول کشاورزی پایدار، نظیر باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR)[9]، به‌عنوان راه‌کاری نوین در مدیریت تغذیه‌ای موردتوجه پژوهش‌گران قرار گرفته است (مورتینهو[10] و همکاران، ۲۰۲۲).

باکتری‌های محرک رشد گیاه گروهی از میکروارگانیسم‌های مفید خاک‌زی هستند که در ناحیه ریزوسفر مستقر شده و از طریق برهم‌کنش با ریشه گیاهان، فرایندهای فیزیولوژیکی و رشدی آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند (داس[11] و همکاران، ۲۰۲۳). این باکتری‌ها قادرند از طریق مکانیسم‌هایی همچون تثبیت نیتروژن اتمسفری، تولید فیتوهورمون‌هایی نظیر اکسین، جیبرلین و سیتوکینین، افزایش قابلیت دسترسی به فسفر و آهن از طریق تولید سیدروفورها و القای مقاومت سیستمیک در گیاه، بهبود رشد و عملکرد گیاه را در شرایط تنش‌زا تسهیل کنند (منصور[12] و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه بر این، اثرات سودمند این ریزجانداران در برهم‌کنش پیچیده میان فعالیت‌های بیوشیمیایی آن‌ها و پاسخ‌های فیزیولوژیک گیاه میزبان ریشه دارد (مرادی[13] و همکاران، ۲۰۲۵). در سطح بیوشیمیایی، این باکتری‌ها از طریق سنتز آنزیم‌های کلیدی نظیر نیتروژناز، فراهمی عناصر درشت‌مغذی (تثبیت نیتروژن) را افزایش داده و با ترشح متابولیت‌هایی مانند

1. *Lens Culinaris Medik*
2. Kankia
3. Erdemci
4. Choukri
5. Mohammadi
6. Lalay
7. Sharma
8. Sedri
9. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria
10. Mortinho
11. Das
12. Mansour
13. Moradi

اسیدهای آلی، عناصر تثبیت‌شده در خاک (مانند فسفر) را قابل‌دسترس می‌سازند (شارما [۱] و همکاران، ۲۰۲۳). این فعالیت‌های بیوشیمیایی، به‌نوبه خود، پاسخ‌های فیزیولوژیک مشخصی را در گیاه القا می‌کند (شیوهاره [۲] و همکاران، ۲۰۲۴). به‌عنوان مثال، تولید فیتوهورمون ایندول-۳-استیک اسید به‌طور مستقیم فرایندهای مرتبط با رشد نظیر تقسیم و طویل‌شدن سلول‌های ریشه را تنظیم کرده و در نهایت به بهبود معماری سیستم ریشه و افزایش ظرفیت جذب آب و عناصر غذایی منجر می‌شود (اردمسی [۳]، ۲۰۲۰).

با وجود نقش باکتری‌های محرک رشد در بهبود عملکرد گیاهان، پاسخ گیاهان به این عوامل زیستی تا حد زیادی به رقم آن‌ها وابسته است (لالای [۶] و همکاران، ۲۰۲۴). علاوه بر این، انتخاب رقم مناسب یکی از ارکان اصلی در به‌نژادی و مدیریت زراعی در شرایط دیم به‌شمار می‌رود، چراکه ارقام مختلف عدس از نظر ویژگی‌هایی مانند توسعه ریشه، کارایی مصرف آب و عناصر غذایی، فتوسنتز و تحمل به تنش‌های غیرزیستی تفاوت‌های قابل‌توجهی دارند (نگت [۴] و همکاران، ۲۰۲۲؛ فتحی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۳). از این‌رو، بررسی هم‌زمان چند رقم در کنار تیمارهای شیمیایی و زیستی، نه‌تنها امکان شناسایی ارقام برتر از نظر عملکرد و سازگاری را فراهم می‌سازد، بلکه زمینه را برای تحلیل دقیق‌تر برهم‌کنش‌های رقم و باکتری‌های محرک رشد در شرایط تنش‌زای دیم نیز مهیا می‌کند (لالای [۶] و همکاران، ۲۰۲۴). بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر منابع مختلف نیتروژن بر عملکرد و صفات مورفو-فیزیولوژیک چهار رقم عدس در شرایط دیم اجرا شد.

۲. پیشینهٔ پژوهش

شواهد علمی نشان می‌دهند که واکنش گیاه به عوامل زیستی نظیر باکتری‌های محرک رشد تحت تأثیر رقم است (والنته [۵] و همکاران، ۲۰۲۰)، به‌گونه‌ای‌که برخی ارقام با افزایش رشد، تثبیت نیتروژن و مقاومت بهتر به تنش پاسخ مثبت‌تری به تلقیح باکتریایی نشان می‌دهند (نواز [۶] و همکاران، ۲۰۲۰). در راستای یافتن راه‌کارهایی برای مدیریت تنش خشکی در کشاورزی، کاربرد کودهای زیستی نتایج امیدوارکننده‌ای را نشان داده است. به‌عنوان مثال، پژوهشی بر روی لوبیا چشم‌بلبلی [۷] نشان داد درحالی‌که افزایش فواصل آبیاری به تنهایی می‌تواند عملکرد دانه را تا ۲۸ درصد کاهش دهد، استفاده از کود زیستی بارور-۲ نه‌تنها این خسارت را جبران می‌کند، بلکه در یک رژیم آبیاری بهینه (نُه روزه)، می‌تواند ضمن حفظ ۹۰ درصد از حداکثر عملکرد، مصرف آب را نیز ۳۰ درصد کاهش دهد (محمدکریمی و همکاران، ۱۴۰۴). این یافته، پتانسیل بالای سیستم‌های تولید مبتنی بر نهاده‌های زیستی را در دست‌یابی هم‌زمان به اهداف بهره‌وری آب و پایداری تولید برجسته می‌سازد. علاوه بر این، نقش باکتری‌های محرک رشد گیاه در تعدیل اثرات منفی تنش خشکی در حبوبات به خوبی اثبات شده است. برای نمونه، پژوهش‌ها بر روی گیاه عدس نشان داده که تلقیح با این میکروارگانیسم‌ها در شرایط کم‌آبی، نه‌تنها عملکرد و اجزای آن (تعداد غلاف و وزن دانه) را بهبود می‌بخشد، بلکه با افزایش جذب عناصر غذایی، سنتز کلروفیل و حفظ محتوای نسبی آب، بنیه فیزیولوژیکی گیاه برای مقابله با تنش را نیز تقویت می‌کند (ظفرالحی [۸] و همکاران، ۲۰۲۱). هم‌چنین، محمدی و همکاران (۱۳۹۷) با بررسی واکنش عملکرد و صفات

3. Sharma
2 Shivhare
5. Erdemci
6. Nget
7. Valente
8. Nawaz
7. *Vigna unguiculata* L.
8. Zafar ul Hey

فیزیولوژیک عدس به کودهای شیمیایی و زیستی در شرایط متفاوت رطوبتی گزارش کردند که بیش‌ترین میزان عملکرد دانه عدس (۱۴۰۴ کیلوگرم در هکتار) از تیمار برهم‌کنش آبیاری معمول و کود تلفیقی تولید شد و استفاده از کود تلفیقی (۵۰ درصد کود شیمیایی فسفری+ کود زیستی) در تنش خشکی شدید عملکرد دانه بیش‌تری را نسبت به سایر تیمارهای کودی تولید نمود. هم‌چنین، گرگری و همکاران (۱۴۰۴) به بررسی تأثیر کاربرد کودهای شیمیایی و کودهای زیستی فسفاته (بارور-۲) و نیتراژین بر عملکرد عدس در شرایط دیم پرداختند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که کاربرد هم‌زمان این دو کود زیستی دارای اثر هم‌افزایی بر افزایش تعداد غلاف در بوته بود که این تأثیر از کاربرد مجزای هر یک بارزتر بود. نکته برجسته در این پژوهش، دست‌یابی به بالاترین عملکرد دانه و زیستی در تیمار تلفیقی کودهای زیستی به‌همراه تنها ۳۵ درصد از کود شیمیایی توصیه‌شده بود که عملکرد را در مقایسه با سایر سطوح کودی تا ۵۷ درصد افزایش داد. قابل‌توجه است که افزایش دوز کود شیمیایی فراتر از این سطح، منجر به کاهش عملکرد گردید. بر این اساس، پژوهش‌گران نتیجه گرفتند که مطلوب‌ترین استراتژی تغذیه‌ای برای تولید عدس در شرایط دیم، کاربرد تلفیقی نهاده‌های زیستی با دوز کاهش‌یافته کود شیمیایی است که ضمن بهبود تولید، مصرف کودهای شیمیایی را به شکل معنی‌داری کاهش داده و با اهداف کشاورزی پایدار همسو می‌باشد. صید مرادی و مظفری (۱۳۹۹) نیز گزارش نمودند کاربرد باکتری‌های محرک رشد به‌ویژه مصرف هم‌زمان ازتوباکتر، آزوسپیریلیوم و سودموناس باعث افزایش معنی‌دار عملکرد دانه و پروتئین دانه عدس در مقایسه با تیمار شاهد شد. علاوه بر این، طباطبایی و همکاران (۱۴۰۰) با بررسی اثرات ریزوباکتری‌های تحریک‌کننده رشد و کود نیتروژن بر شاخص‌های رشدی لوبیا[1] در شرایط تنش‌کمبود آب، بیان کردند کودهای نیتروکسین و بیوفسفر افزایش معنی‌داری بر عملکرد دانه لوبیا داشتند و این صفت را به‌ترتیب ۹۲ و ۵۴ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش دادند. در پژوهشی دیگر، رشیدی‌پور و همکاران (۱۴۰۲) واکنش عملکرد و اجزای عملکرد نخود[2] به کودهای زیستی و شیمیایی تحت شرایط تنش آبی را ارزیابی کردند و اظهار داشتند اگرچه تنش آبی عملکرد دانه نخود را در همه تیمارها کاهش داد، اما این کاهش در تیمارهای مختلف متفاوت بود، به‌طوری‌که کم‌ترین کاهش عملکرد در تیمار کود زیستی به میزان ۲۷ درصد مشاهده شد. هم‌چنین، نباتی[3] و همکاران (۲۰۲۵) نیز با بررسی باکتری‌های محرک رشد گیاه در محیط‌های نیمه‌خشک بر روی گیاه نخود گزارش کردند، کودهای زیستی محتوای نیتروژن و فسفر در دانه را در مقایسه با تیمار شاهد بهبود بخشید و باعث افزایش تعداد غلاف در بوته، وزن صددانه، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه شد. علاوه بر این، صباغ‌پور و همکاران (۱۳۹۸) در بررسی تأثیر منابع کودی مختلف بر ارقام عدس مشاهده کردند که بیش‌ترین عملکرد دانه مربوط به تیمار مصرف کود زیستی (ریزوچک) و کم‌ترین آن مربوط به تیمار شاهد (عدم مصرف کود) بود. افزون بر این، کاربرد کود ریزوچک به‌ترتیب موجب افزایش ۲۹، ۱۶ و ۴۹ درصدی زیست‌توده، ارتفاع بوته و عملکرد دانه نسبت به تیمار شاهد شد. در بین ارقام موردبررسی نیز رقم بیله‌سوار عملکرد بالاتری نسبت به عدس رقم محلی تولید کرد.

۳. روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش به‌منظور بررسی اثر باکتری‌های محرک رشد گیاه و کود شیمیایی نیتروژن بر عملکرد ارقام عدس پاییزه تحت شرایط دیم، در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در ایستگاه تحقیقاتی شهرستان سرابله از توابع استان ایلام اجرا شد. شهرستان سرابله در شمال‌شرقی استان ایلام، بین طول‌های جغرافیایی ۴۷ درجه و ۷ دقیقه و ۱۶ ثانیه تا ۴۸ درجه و ۴

1. *Phaseolus vulgaris* L.
2. *Cicer arietinum* L.
3. Nabati

دقیقه و ۹ ثانیه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳۳ دقیقه و ۵۸ ثانیه تا ۳۳ درجه و ۱۲ دقیقه و ۸ ثانیه شمالی قرار دارد. برای بررسی ویژگی‌های اقلیمی محل اجرای آزمایش، میانگین ماهانه دما، بارندگی و رطوبت نسبی در طول فصل رشد در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مقادیر ماهانه دما، بارش و رطوبت در ایستگاه تحقیقاتی سرابله در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹

ماه	میانگین دمای حداقل (درجه سانتی‌گراد)	میانگین دمای حداکثر (درجه سانتی‌گراد)	بارندگی (میلی‌متر)	میانگین رطوبت نسبی (درصد)
آذر	۵/۷	۱۷/۲	۱۱۰/۶	۷۰
دی	۱/۳	۱۶/۶	۴/۲	۵۱
بهمن	۳/۷	۱۸/۲	۱۱۲/۴	۵۸
اسفند	۵/۳	۱۹/۷	۲۹/۱	۵۶
فروردین	۱۰/۴	۲۸/۱	۶/۳	۳۶
اردیبهشت	۱۸/۳	۳۷/۲	۱/۱	۲۳

به‌منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه، پیش از کشت از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری انجام شد و تجزیه‌های مربوطه مطابق با روش‌های استاندارد صورت گرفت (جدول ۲). نتایج حاصل نشان داد که خاک مزرعه دارای بافت لومی‌رسی است. براساس نتایج آزمون خاک محل آزمایش و دستورالعمل فنی مؤسسه دیم، مقدار ۲۰ تا ۳۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار (معادل ۴۳ تا ۶۵ کیلوگرم اوره در هکتار) به‌صورت استارتر توصیه می‌شود و برای اجتناب از افزایش رشد علف‌های هرز مصرف کود نیتروژن برای عدس دیم توصیه نمی‌شود. حد بحرانی فسفر قابل‌جذب خاک برای عدس در شرایط اقلیمی معتدل سرد حدود ۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک تعیین شده است و چون میزان فسفر قابل جذب خاک ۹/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم در خاک محل آزمایش بود، از کود شیمیایی فسفر استفاده نشد. توصیه کودی پتاسیم نیز همانند فسفر براساس نتایج آزمون خاک محل آزمایش و با درنظرگرفتن حد بحرانی پتاسیم قابل‌جذب خاک انجام می شود.

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

عمق خاک	اسیدیته	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	کربن آلی (درصد)	نیتروژن (درصد)	فسفر قابل جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	پتاسیم قابل جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم)
۰-۳۰ سانتی‌متر	۷/۳۴	۰/۳۲	۰/۹۶	۰/۰۹	۹/۱	۱۸۵

این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتور اول شامل چهار رقم کیمیا، بیله‌سوار، گچساران و توده محلی (شاهد) بود، فاکتور دوم شامل پنج سطح تیمار تغذیه‌ای شامل ۱- شاهد (بدون تلقیح و بدون مصرف کود نیتروژنه)، ۲- تلقیح با باکتری آزوسپیریلیوم، ۳- تلقیح با باکتری ازتوباکتر، ۴- تلقیح هم‌زمان دو باکتری مذکور و ۵- مصرف کود شیمیایی نیتروژن بود. پیش از کاشت، عملیات آماده‌سازی زمین شامل شخم عمیق، دیسک‌زنی، تسطیح و ایجاد بستر مناسب انجام شد. هر کرت آزمایشی شامل شش خط کاشت به طول چهار متر و فاصله ردیف‌های ۲۰ سانتی‌متر با تراکم ۲۰۰ بوته در مترمربع در نظر گرفته شد. کشت به‌صورت دستی در تاریخ ۱۱ آذرماه سال ۱۳۹۹ انجام شد. علاوه بر این، باکتری‌های محرک رشد مورداستفاده در این پژوهش شامل ازتوباکتر *کروکوکوم* و *آزوسپیریلوم لیپوفروم* بود که به‌صورت پودر جداگانه از بخش تحقیقات بیولوژی خاک مؤسسه تحقیقات آب و خاک کشور تهیه گردید. برای تلقیح بذرها

میزان هفت میلی‌لیتر مایه تلقیح که هر میلی‌لیتر آن دارای 10^8 عدد باکتری زنده و فعال بود، با آب شکر به غلظت ۲۰ درصد مرطوب و به نسبت ۲ کیلوگرم ماده تلقیح در ۱۰۰ کیلوگرم بذر با بذرها آغشته و استفاده شد. بذور تیمارشده خشک شده و پس از توزین، در اوایل آذرماه کشت شدند. هم‌چنین، در تیمار مصرف کود شیمیایی نیتروژن، تمامی مقدار ۲۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار (معادل ۴۳ کیلوگرم اوره در هکتار) به‌صورت استارتر در زمان کاشت استفاده شد و برای اجتناب از افزایش رشد علف‌های هرز در عدس دیم کود نیتروژن به‌صورت سرک در سایر مراحل رشد استفاده نشد.

کشت عدس در شرایط دیم صورت گرفت و تنها به نزولات آسمانی اکتفا گردید. مبارزه با علف‌های هرز نیز به‌صورت وجین دستی و بدون استفاده از علف‌کش انجام شد. هم‌چنین، برای برداشت در هر کرت با حذف دو خط کناری و ۲۵ سانتی‌متر از ابتدا و انتهای هر کرت از چهار خط وسط در اواخر اردیبهشت‌ماه انجام شد.

در مرحله گل‌دهی، به‌منظور سنجش صفات مورفولوژیک و ریشه، ۱۰ بوته سالم از خطوط میانی هر کرت به‌صورت تصادفی انتخاب و برداشت گردید. ارتفاع بوته از سطح خاک تا نوک گیاه با خط‌کش اندازه‌گیری شد. تعداد شاخه‌های فرعی به‌صورت دستی شمارش شد. برای اندازه‌گیری حجم ریشه از یک استوانه مدرج که تا حجم خاصی درون آن آب وجود داشت، استفاده شد و تغییر حجم آب بعد از قرارگرفتن ریشه گیاه درون استوانه مدرج به‌عنوان حجم ریشه در نظر گرفته شد. پس از آن، ریشه‌ها به‌مدت ۷۲ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک و وزن خشک آن‌ها اندازه‌گیری گردید (اخوان و همکاران، ۱۳۹۱).

مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ (کلروفیل a و b) از برگ‌های تازه قسمت میانی گیاه اندازه‌گیری شد. برای این منظور، ۰/۱ گرم از بافت برگ به‌دقت وزن و در ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد هموژنیزه گردید. سپس نمونه‌ها به‌مدت ۲۴ ساعت در تاریکی و دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. سپس میکروتیوب‌ها در دستگاه سانتریفیوژ به‌مدت ۱۰ دقیقه و با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه قرار داده شدند. در نهایت به‌وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر (UV-1800 Shimadzu, Japan) مقادیر جذب در طول موج ۶۶۳ نانومتر برای کلروفیل a و ۶۴۷ نانومتر برای کلروفیل b قرائت شد. مقادیر کلروفیل a و b برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر نمونه گیاهی محاسبه شدند (لیختنتالر[1] و ولبورن[2]، ۱۹۸۳).

جهت تعیین محتوای نسبی آب، از برگ‌های کاملاً توسعه‌یافته بوته‌های میانی هر کرت استفاده شد. پس از برداشت، نمونه‌ها به‌سرعت به آزمایشگاه منتقل و وزن تازه آن‌ها (FW)[3] ثبت گردید. سپس برگ‌ها به‌مدت ۲۴ ساعت در بشر محتوی آب مقطر در دمای اتاق و در تاریکی کامل جهت رسیدن به وزن اشباع (TW)[4] قرار داده شدند. پس از این مدت، برگ‌ها با دستمال خشک شده و وزن اشباع ثبت شد. سپس نمونه‌ها در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۷۲ ساعت خشک و وزن خشک آن‌ها (DW)[5] تعیین گردید (بارس[6] و ودرلی[7]، ۱۹۶۲). محتوای نسبی آب برگ (RWC) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$RWC\ (\%) = \frac{FW-DW}{TW-DW} \times 100$$ رابطه ۱)

در پایان فصل رشد، عملکرد دانه با برداشت کامل دو خط میانی هر کرت خرمن کوبی و توزین دانه‌ها پس از خشک‌کردن در سایه و رسیدن به رطوبت استاندارد اندازه‌گیری شد و به واحد کیلوگرم در هکتار تبدیل گردید. تعداد غلاف در هر بوته و تعداد

1. Lichtenthaler
2. Wellburn
3. Fresh Weight
4. Turgid Weight
5. Dry Weight
6. Barrs
7. Weatherley

دانه در هر غلاف با شمارش مستقیم بر روی ۱۰ بوته تصادفی تعیین شد. برای محاسبه تعداد دانه در غلاف تعداد دانه هر بوته شمارش شده و تقسیم بر تعداد غلاف در هر بوته گردید. وزن صددانه نیز با میانگین‌گیری از چهار نمونه ۲۵۰ دانه‌ای پس از خشک‌کردن دانه‌ها به‌دست آمد. عملکرد زیستی از جمع وزن خشک اندام‌های هوایی (شامل ساقه، برگ و دانه) برای هر کرت محاسبه شد. هم‌چنین شاخص برداشت از نسبت عملکرد اقتصادی (دانه) به عملکرد زیستی ضرب‌در ۱۰۰ محاسبه گردید. علاوه بر این، میزان پروتئین دانه از طریق اندازه‌گیری درصد نیتروژن دانه به‌روش کجلدال و ضرب‌کردن آن در عدد ثابت ۶/۲۵ به‌دست آمد (انجمن رسمی شیمیدانان تحلیلی[1]، ۱۹۹۰).

تجزیه واریانس داده‌های حاصل از آزمایش، با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹/۱) انجام و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت. شکل‌ها نیز با استفاده از نرم‌افزار اکسل ترسیم شدند.

۴. یافته‌های پژوهش

۴. ۱. صفات مورفولوژیک ریشه

بررسی آماری داده‌ها نشان داد حجم ریشه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر رقم و منبع نیتروژن در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت، اما اثرات متقابل آن‌ها معنی‌دار نبود (جدول ۳). وزن خشک ریشه نیز علاوه بر اثرات مستقل رقم و منبع نیتروژن، تحت تأثیر تعامل معنی‌دار این دو در سطح احتمال یک درصد واقع شد (جدول ۳). در بین ارقام، بیش‌ترین حجم ریشه مربوط به رقم کیمیا با میانگین ۵/۵۲ سانتی‌متر مکعب بود و رقم محلی کم‌ترین حجم ریشه را با ۴/۶۴ سانتی‌متر مکعب نشان داد (جدول ۴). رقم کیمیا در مقایسه با ارقام گچساران، بیله‌سوار و محلی به‌ترتیب ۹/۵، ۱۳/۳ و ۲۳/۸ درصد افزایش حجم ریشه را نشان داد (جدول ۴). از نظر منابع نیتروژن، کود شیمیایی بالاترین حجم ریشه را با ۶/۷۲ سانتی‌مترمکعب ایجاد کرد. استفاده از کودهای زیستی نیز رشد قابل‌توجهی در حجم ریشه به‌همراه داشت، به‌طوری‌که آزوسپیریلیوم، ازتوباکتر و ترکیب آن‌ها به‌ترتیب منجر به افزایش حجم ریشه به میزان ۱۸۰/۹، ۱۷۷/۶ و ۱۶۳/۳ درصد نسبت به عدم مصرف کود شدند (جدول ۴).

جدول ۳. تجزیه واریانس میانگین مربعات صفات مورفولوژی و فیزیولوژی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات						
		حجم ریشه	وزن خشک ریشه	ارتفاع بوته	تعداد شاخه اولیه	کلروفیل *a*	کلروفیل *b*	محتوای آب نسبی برگ
تکرار	۲	۴/۰۸ns	۴/۷۵*	۲۶۹/۴۳ns	۷/۱۴ns	۰/۵۹ns	۰/۶۴ns	۳۹۷/۳۱ns
ارقام	۳	۲/۰۸**	۹/۶۱**	۱۲۹/۲۹**	۸/۶۹**	۰/۶۸**	۰/۵۷**	۲۷۶/۴۱**
منبع نیتروژن	۴	۵۹/۷۹**	۵۳/۶۲**	۳۷۴/۵۲**	۲۴/۹۳**	۳/۸۱**	۱/۹۳**	۲۸۸۵/۱**
ارقام×منبع نیتروژن	۱۲	۰/۲۴ns	۰/۷۱**	۱۴/۲۵**	۱/۲۳ns	۰/۰۳**	۰/۰۴**	۱۷/۶۶ns
خطا	۳۸	۰/۱۲	۰/۲۰	۳/۹۱	۱/۲۸	۰/۰۰۵	۰/۰۰۴	۹/۹۶
ضریب تغییرات (درصد)		۷/۱۲	۷/۵۸	۱۱/۸۵	۲۱/۰۸	۴/۲۷	۵/۹۹	۵/۷۲

*، ** و ns: به‌ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و ns بدون اختلاف معنی‌دار.

جدول ٤. مقایسه میانگین تأثیر منابع زیستی و شیمیایی نیتروژن بر صفات مورفولوژی و فیزیولوژی در ارقام عدس

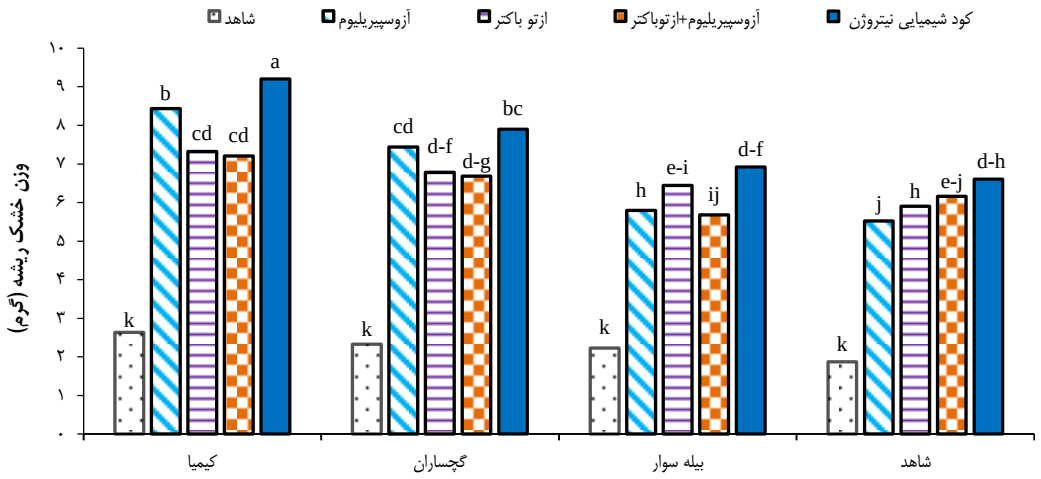
تیمارها	حجم ریشه (سانتی‌متر مکعب)	تعداد شاخه اولیه	محتوای آب نسبی برگ (درصد)

1. The Association of Official Analytical Chemists (AOAC)

ارقام			
کیمیا	۵/۵۲a	۶a	۶۰/۴۰a
گچساران	۵/۰۴b	۴/۸۳b	۵۶/۳۳b
بیله‌سوار	۴/۸۷bc	۴/۵۸b	۵۳/۸۰c
شاهد محلی	۴/۴۶c	۴/۲۴b	۵۰/۲۰d
منبع نیتروژن			
عدم مصرف کود (شاهد)	۲/۱۰d	۲/۵۵c	۲۷/۸۳d
آزوسپیریلیوم	۵/۹۰b	۵/۶۸ab	۶۲/۴۱b
ازتوباکتر	۵/۸۳b	۵/۲۴b	۶۱/۱۶bc
آزسپیریلیوم+ازتوباکتر	۵/۵۳c	۴/۷۵b	۵۸/۶۶c
کود شیمیایی نیتروژن	۶/۷۲a	۶/۳۴a	۶۵/۸۳a

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند، براساس آزمون دانکن تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

در مورد وزن خشک ریشه، کاربرد کود شیمیایی در رقم کیمیا بیش‌ترین وزن خشک ریشه را با ۹/۲ گرم ثبت کرد، درحالی‌که رقم محلی در تیمار عدم مصرف کود با ثبت ۱/۸۷ گرم کم‌ترین مقدار را نشان داد (شکل ۱). هم‌چنین، کاربرد کود شیمیایی در رقم کیمیا نسبت به تیمار عدم مصرف کود در رقم محلی، توانست وزن خشک ریشه را ۳۹۱/۸ درصد افزایش دهد. از سوی دیگر، کودهای زیستی نیز اثرات مثبتی بر وزن خشک ریشه داشتند. استفاده از ازوسپیریلیوم، ازتوباکتر و ترکیب آن‌ها در رقم کیمیا به‌ترتیب باعث افزایش وزن خشک ریشه به میزان ۳۵۰/۷، ۲۹۱/۴ و ۲۸۵/۱ درصد نسبت به تیمار عدم مصرف کود در رقم محلی شدند (شکل ۱).

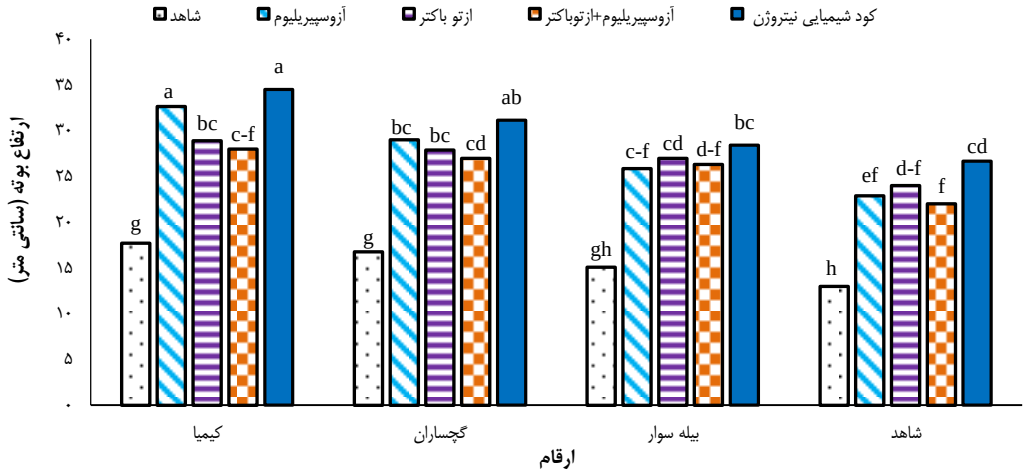


شکل ۱. اثر برهم‌کنش رقم و منبع نیتروژن بر وزن خشک ریشه عدس

۴. ۲. صفات رویشی

تجزیه واریانس نشان داد که ارتفاع بوته به‌طور معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر رقم، منبع نیتروژن و اثر متقابل این دو عامل قرار گرفت. هم‌چنین، تعداد شاخه‌های اولیه تنها از اثر اصلی رقم و منبع نیتروژن در سطح احتمال یک درصد تأثیر پذیرفت (جدول ۳). بیش‌ترین ارتفاع بوته در رقم کیمیا و تحت تأثیر تیمار کود شیمیایی نیتروژن به میزان ۳۴/۵ سانتی‌متر مشاهده شد (شکل ۲). با این‌حال، تیمار ازتوباکتر نیز در همین رقم با ارتفاع ۳۲/۶ سانتی‌متر ارتفاع بسیار نزدیکی به کود شیمیایی نیتروژن داشت و تفاوت آماری معنی‌داری بین آن‌ها مشاهده نشد. کم‌ترین ارتفاع بوته با

میانگین ۱۳ سانتی‌متر به توده محلی و در غیاب منبع نیتروژن اختصاص داشت (شکل ۲). مصرف کود شیمیایی نیتروژن در رقم کیمیا موجب افزایش ۱۶۵/۳ درصدی ارتفاع بوته نسبت به تیمار عدم مصرف کود در توده محلی گردید. افزون بر این، استفاده از باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن نیز به شکل قابل‌توجهی در افزایش ارتفاع بوته مؤثر بودند. کاربرد آزوسپیریلیوم، ازتوباکتر و تلفیق آن‌ها در رقم کیمیا به‌ترتیب باعث افزایش ۱۵۱/۲، ۱۲۲/۳ و ۱۱۵/۴ درصدی در ارتفاع بوته نسبت به عدم مصرف کود در توده محلی شدند (شکل ۲). علاوه بر این، در خصوص صفت تعداد شاخه‌های اولیه فرعی، رقم کیمیا با میانگین ۶ شاخه بیش‌ترین شاخه‌زایی را نشان داد. کم‌ترین مقدار هم با ۴/۲ شاخه در توده محلی ثبت گردید (جدول ۴). هم‌چنین، در بین منابع کودی نیتروژن نیز مصرف کود شیمیایی با میانگین ۶/۳ شاخه بیش‌ترین تأثیر را در افزایش شاخه‌زایی داشت. با این‌حال، نتایج نشان داد که کاربرد آزوسپیریلیوم نیز با میانگین ۵/۶۸ تعدا شاخه اولیه فرعی از نظر آماری با مصرف کود شیمیایی نیتروژن تفاوت معنی‌داری نداشته است (جدول ۴). علاوه بر این، تیمارهای زیستی ازوسپیریلیوم، ازتوباکتر و تلفیق آن‌ها در مقایسه با عدم مصرف کود به‌ترتیب موجب افزایش ۱۲۲/۷، ۱۰۵/۴ و ۸۶/۲ درصدی در تعداد شاخه‌های فرعی شدند (جدول ۴).

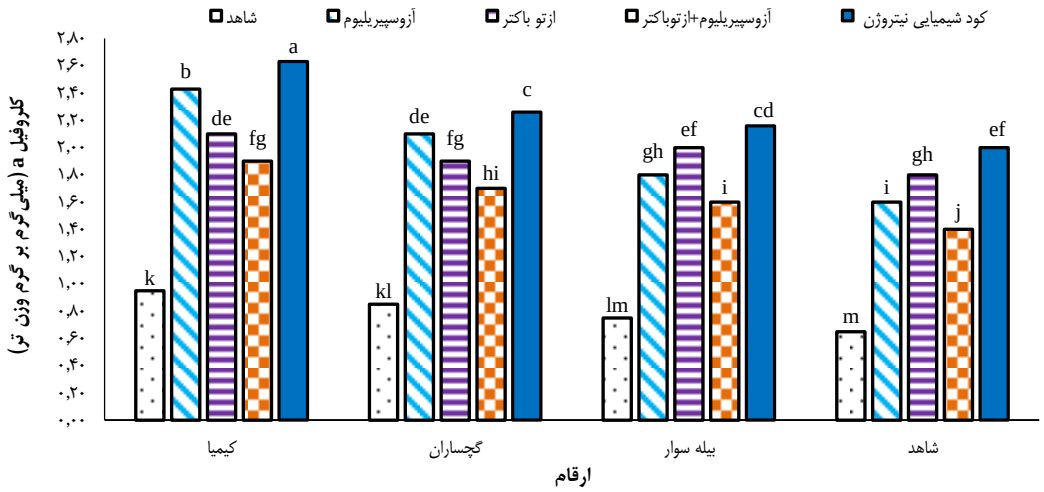


شکل ۲. اثر برهم‌کنش رقم و منبع نیتروژن بر ارتفاع بوته عدس

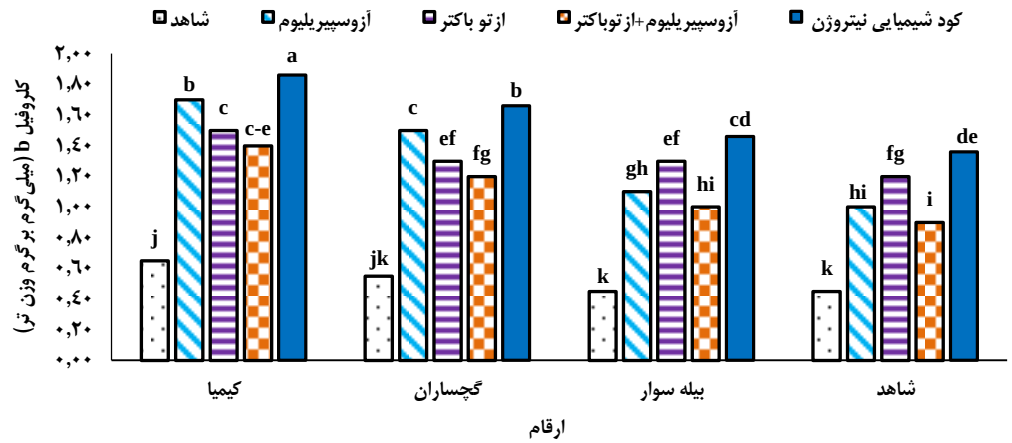
۴. ۳. صفات فیزیولوژیکی

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که محتوای آب نسبی برگ به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر رقم و منبع نیتروژن قرار گرفت (جدول ۳)، درحالی‌که غلظت کلروفیل‌های a و b افزون بر عوامل اصلی، از اثر متقابل رقم و منبع نیتروژن نیز به‌طور معنی‌داری تأثیر پذیرفتند (جدول ۳). نتایج نشان داد، رقم کیمیا با مقدار ۶۰/۴ درصد بالاترین محتوای آب نسبی برگ را داشت، درحالی‌که توده محلی با ۵۰/۲ درصد کم‌ترین مقدار را نشان داد (جدول ۴). افزایش محتوای آب نسبی برگ در رقم کیمیا نسبت به توده محلی، رقم گچساران و بیله‌سوار به‌ترتیب معادل ۲۰/۳، ۷/۲ و ۱۲/۴ درصد برآورد گردید (جدول ۴). علاوه بر این، بیش‌ترین مقدار محتوای نسبی آب برگ در تیمار کود شیمیایی نیتروژن به‌دست آمد که موجب افزایش ۱۳۶/۷ درصدی محتوای آب نسبی یرگ در مقایسه با عدم مصرف کود شد (جدول ۴). اما جالب توجه آن‌که تیمارهای زیستی نیز با افزایش‌های چشم‌گیر این شاخص را بهبود دادند، به‌طوری‌که کاربرد آزوسپیریلیوم موجب افزایش ۱۲۴/۴ درصدی، ازتوباکتر ۱۱۹/۹ درصدی و کاربرد هم‌زمان آن‌ها ۱۱۱/۲ درصدی نسبت به تیمار شاهد (بدون

منبع نیتروژن) شدند (جدول ۴). علاوه بر این، بیش‌ترین مقدار کلروفیل a و b به‌ترتیب برابر با ۲/۶ و ۱/۸ میلی‌گرم در گرم وزن‌تر در رقم کیمیا و کاربرد کود شیمیایی نیتروژن اختصاص داشت و کم‌ترین آن‌ها در توده محلی بدون استفاده از منبع نیتروژن به ثبت رسید (شکل‌های ۳ و ۴). کاربرد کود شیمیایی نیتروژن در رقم کیمیا در مقایسه با تیمار شاهد در توده محلی به‌ترتیب موجب افزایش ۳۰۴/۶ و ۳۱۴/۵ درصدی در غلظت کلروفیل a و b گردید (شکل‌های ۳ و ۴). با این‌حال، استفاده از باکتری آزوسپیریلیوم در رقم کیمیا، غلظت کلروفیل a را تا ۲۷۳/۸ درصد و کلروفیل b را تا ۲۷۷/۶ درصد نسبت به توده محلی بدون مصرف نیتروژن افزایش داد. تیمار ازتوباکتر نیز با افزایش‌های معادل ۲۲۲/۹ درصد در کلروفیل a و ۲۳۳/۴ درصد در کلروفیل b همراه بود. تیمار تلفیقی هم با افزایش ۱۹۲/۳ و ۲۱۱/۲ درصدی در این دو رنگیزه نسبت به عدم مصرف کود در رقم محلی همراه شد (شکل‌های ۳ و ۴).



شکل ۳. اثر برهم‌کنش رقم و منبع نیتروژن بر محتوای کلروفیل *a* عدس



شکل ٤. اثر برهم‌کنش رقم و منبع نیتروژن بر محتوای کلروفیل b عدس

۴. ۴. اجزای عملکرد

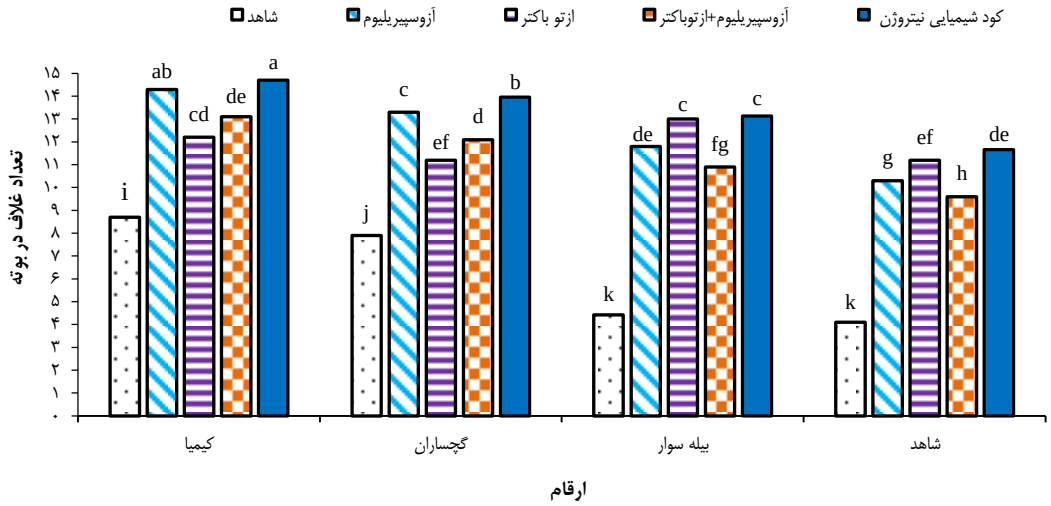
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که صفت تعداد غلاف در بوته به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر رقم، منبع نیتروژن و اثر

متقابل آن‌ها قرار گرفت (جدول ۵). هم‌چنین، صفات تعداد دانه در غلاف و وزن صددانه تنها از اثرات اصلی رقم و منبع نیتروژن در سطح احتمال یک درصد تأثیر پذیرفتند (جدول ۵). رقم کیمیا در شرایط استفاده از کود شیمیایی بیش‌ترین تعداد غلاف در بوته را با مقدار ۱۴/۷ عدد به خود اختصاص داد که با تیمار آزوسپیریلیوم در رقم کیمیا که منجر به تولید ۱۴/۳ غلاف شد تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۵). هم‌چنین، مصرف کود شیمیایی نیتروژن و تلقیح با آزوسپیریلیوم در رقم کیمیا به‌ترتیب موجب افزایش ۲۵۸/۵ و ۲۴۸/۷ درصدی تعداد غلاف در بوته نسبت به رقم محلی بدون کاربرد کود شد. هم‌چنین، کاربرد ازتوباکتر و ترکیب ازتوباکتر با آزوسپیریلیوم در رقم کیمیا موجب افزایش قابل‌توجه تعداد غلاف‌ها به‌ترتیب تا ۱۹۷/۵ و ۲۱۹/۶ درصد نسبت به توده محلی بدون مصرف کود گردید (شکل ۵).

جدول ۵. تجزیه واریانس میانگین مربعات صفات اجزای عملکرد، عملکرد دانه، بهره‌وری زراعی و پروتئین دانه در ارقام عدس

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات						
		تعداد غلاف در بوته	تعداد دانه در غلاف	وزن صددانه	عملکرد دانه	عملکرد بیولوژیک	شاخص برداشت	پروتئین دانه
تکرار	۲	۱۶/۵۰ns	۵/۶۰*	۰/۰۲ns	۴۶۶۱۲۶ns	۷۸۲۲۳۵ns	۳۵۵/۵ns	۴/۱۲ns
ارقام	۳	۲۸/۹۰**	۰/۵۳**	۵/۹۵**	۲۴۳۸۸۰**	۸۱۸۷۷۵**	۳۱/۵۷**	۵/۴۸**
منبع نیتروژن	۴	۹۲/۵۱**	۲/۷۸**	۳/۳۵**	۴۰۷۷۵۵**	۸۷۱۶۷۷**	۱۹۸/۶**	۸۶/۸۲**
ارقام× منبع نیتروژن	۱۲	۲/۷۸ **	۰/۰۳ns	۰/۳۱ns	۱۶۳۵۳ ns	۶۵۸۷۹*	۶/۵۶ns	۰/۳۸ns
خطا	۳۸	۰/۱۳	۰/۰۱	۰/۲۶	۱۰۷۸۸	۲۷۵۳۶	۵/۱۱	۰/۳۶
ضریب تغییرات (درصد)	–	۱۲/۱۷	۹/۵۸	۱۱/۰۳	۱۹/۰۸	۱۷/۲۴	۱۲/۹۹	۷/۵۲

*، ** و ns: به‌ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و ns بدون اختلاف معنی‌دار.



شکل ۵. اثر برهم‌کنش رقم و منبع نیتروژن بر تعداد غلاف در بوته

در بررسی تعداد دانه در غلاف، رقم کیمیا با میانگین ۲/۰۲ دانه بالاترین مقدار را در بین ارقام داشت و نسبت به ارقام گچساران، بیله‌سوار و توده محلی به‌ترتیب حدود ۹/۱، ۱۷/۴ و ۲۷/۸ درصد برتری نشان داد (جدول ۶). تیمار کود شیمیایی نیتروژن در این صفت نیز مؤثرتر از بقیه تیمارها بود و بیش‌ترین مقدار را با میانگین ۲/۳ دانه تولید کرد. بااین‌حال، باکتری آزوسپیریلیوم نیز موجب افزایش ۹۹/۱ درصد، ازتوباکتر ۹۸/۸ درصد و کاربرد ترکیبی دو باکتری نیز

موجب افزایش ۷۰/۱ درصدی تعداد دانه در غلاف نسبت به عدم مصرف کود شد (جدول ۶). در بین ارقام موردبررسی، بیش‌ترین وزن صددانه از رقم بیله‌سوار با میانگین ۵/۱۸ گرم و کم‌ترین از توده محلی با میانگین ۳/۷۹ گرم به‌دست آمد. هم‌چنین، نتایج نشان داد که در بین منابع کودی، مصرف کود شیمیایی نیتروژن و تلقیح آزوسپیریلیوم+ ازتوباکتر بیش‌ترین و تیمار عدم مصرف کود کم‌ترین وزن صددانه را داشتند. کاربرد کود شیمیایی نیتروژن موجب افزایش ۲۷ درصدی و تلقیح آزوسپیریلیوم+ ازتوباکتر باعث بهبود ۲۳ درصدی وزن صددانه نسبت به تیمار بدون کاربرد کود شد (جدول ۶).

۴. ۵. عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد عملکرد دانه تحت تأثیر رقم و منبع نیتروژن در سطح معنی‌داری یک درصد قرار گرفت (جدول ۵). رقم کیمیا با ثبت میانگین ۱۰۰۹ کیلوگرم در هکتار، بالاترین مقدار را نشان داد و نسبت به ارقام گچساران، بیله‌سوار و رقم محلی به‌ترتیب با ۱۹/۵، ۲۶/۶ و ۴۳/۱ درصد افزایش عملکرد همراه بود (جدول ۶). از میان منابع نیتروژن، کود شیمیایی نیتروژن بیش‌ترین میانگین را با تولید ۱۰۲۹ کیلوگرم در هکتار خود اختصاص داد. باکتری‌های زیستی نیز تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد دانه عدس داشتند. در این راستا، تیمار با ازوسپیریلیوم ۷۰/۸ درصد، ازتوباکتر ۶۳/۴ درصد و ترکیب این دو باکتری تا ۶۱/۸ درصد نسبت به عدم مصرف کود عملکرد دانه را افزایش دادند (جدول ۶).

جدول ٦. تأثیر منابع نیتروژن بر اجزای عملکرد، عملکرد دانه، بهره‌وری زراعی و پروتئین دانه در ارقام عدس

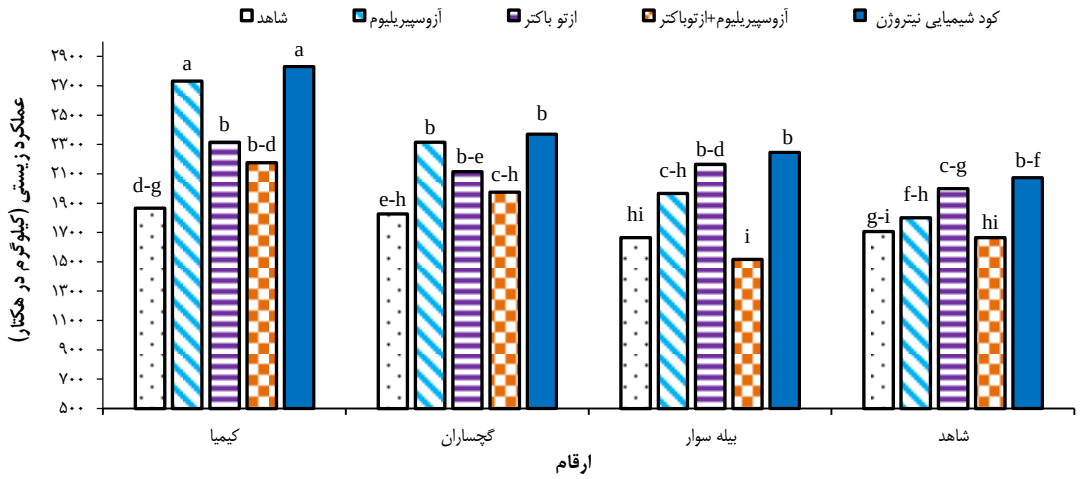
تیمارها	تعداد دانه در غلاف	وزن صددانه (گرم)	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	شاخص برداشت (درصد)	پروتئین دانه (درصد)
ارقام					
کیمیا	۲/۰۲a	۵/۰۷ab	۱۰۰۹a	۴۱/۵۴a	۲۱/۴c
گچساران	۱/۸۵b	۴/۷۴b	۸۴۴b	۳۹/۹۰b	۲۱/۵c
بیله‌سوار	۱/۷۲c	۵/۱۸a	۸۹۷b	۴۰/۴۲c	۲۲/۰۴b
توده محلی	۱/۵۸d	۳/۷۹c	۷۰۵c	۳۷/۹۹b	۲۲/۹۰a
منبع نیتروژن					
عدم مصرف کود (شاهد)	۱/۰۱d	۳/۸۳c	۵۴۸d	۳۲/۷۶b	۱۷/۵۲d
آزوسپیریلیوم	۱/۹۹b	۴/۷۴b	۹۳۶b	۴۱/۸۲a	۲۳/۴۹b
ازتوباکتر	۱/۹۸b	۴/۶۸b	۸۹۵b	۴۱/۴۰a	۲۳/۲۸b
آزسپیریلیوم+ ازتوباکتر	۱/۷۰c	۵/۰۳ab	۷۸۷c	۴۰/۹۰a	۲۳/۵۸c
کود شیمیایی نیتروژن	۷/۶۶a	۵/۲۰a	۱۰۲۹a	۴۲/۷۸a	۲۴/۲۲a

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند، براساس آزمون دانکن تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

۴. ۶. عملکرد زیستی و شاخص برداشت

نتایج تجزیه واریانس نشان داد عملکرد زیستی تحت تأثیر رقم، منبع نیتروژن و تعامل آن‌ها در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۵). شاخص برداشت تحت تأثیر اثرات اصلی رقم و منبع نیتروژن در سطح احتمال یک درصد واقع شد (جدول ۵). علاوه بر این، بالاترین عملکرد زیستی متعلق به تیمار کود شیمیایی نیتروژن در رقم کیمیا با میانگین ۲۸۳۰ کیلوگرم در هکتار بود که در مقایسه با عدم مصرف کود در توده محلی حدود ۶۵/۸ درصد عملکرد زیستی را افزایش داد (شکل ۶). هم‌چنین، تلقیح با باکتری آزوسپیریلیوم در رقم کیمیا با میانگین ۲۷۳۳ کیلوگرم در هکتار از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با کود شیمیایی نیتروژن نداشت. هم‌چنین، عدم مصرف کود در توده محلی کم‌ترین عملکرد زیستی را با ۱۷۰۶ کیلوگرم به ثبت رساند (شکل ۶). علاوه بر این، شاخص برداشت نیز بیش‌ترین مقدار را در رقم کیمیا داشت و به میانگین ۴۱/۴ درصد

رسید، اگرچه اختلاف آماری بین این رقم با گچساران و بیله‌سوار معنی‌دار نبود، اما در مقایسه با رقم محلی که کم‌ترین شاخص برداشت را داشت، بهبود ۹/۱ درصدی را به ثبت رساند (جدول ۶). بررسی منابع نیتروژن نیز حاکی از آن بود که کود شیمیایی نیتروژن با میانگین ۴۲/۸ درصد بیش‌ترین شاخص برداشت را ایجاد کرد و در مقایسه با عدم مصرف کود منجر به افزایش ۳۰/۷ درصدی شد (جدول ۶). نکته مهم تأثیر قابل‌توجه و سازنده باکتری‌های زیستی بود به‌طوری‌که ازوسپیریلیوم، ازتوباکتر و ترکیب آن‌ها به‌ترتیب باعث افزایش شاخص برداشت به میزان ۲۷/۶، ۲۶/۳ و ۲۴/۸ درصد نسبت به عدم استفاده از کود شدند (جدول ۶).



شکل ٦. اثر برهم‌کنش رقم و منبع نیتروژن بر عملکرد زیستی

۴. ۷. محتوای پروتئین دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که درصد پروتئین دانه به‌طور معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر اثرات اصلی رقم و منبع نیتروژن قرار گرفت (جدول ۵). در بین ارقام موردبررسی، رقم کیمیا با میانگین ۲۱/۴ درصد کم‌ترین میزان پروتئین را دارا بود، هرچند این مقدار از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با رقم گچساران با میانگین ۲۱/۵ درصد نداشت (جدول ۶). رقم محلی با میانگین ۲۲/۹ درصد بیش‌ترین مقدار این صفت را نشان داد. در میان منابع نیتروژن نیز استفاده از کود شیمیایی بیش‌ترین تأثیر را بر افزایش محتوای پروتئین داشت و میانگین این صفت را به ۲۴/۲ درصد رساند، درحالی‌که کم‌ترین مقدار در تیمار شاهد با میانگین ۱۷/۵ درصد مشاهده شد. هم‌چنین، استفاده از کود شیمیایی نیتروژن منجر به افزایش ۳۸/۲ درصدی پروتئین دانه نسبت به عدم مصرف کود گردید (جدول ۶).

۴. ۸. همبستگی بین صفات

براساس جدول همبستگی بین صفات (جدول ۷)، صفت عملکرد بیولوژیک دارای بیش‌ترین همبستگی مثبت و معنی‌دار (۰/۹۲**) با عملکرد دانه می‌باشد و در بین اجزای عملکرد عدس، تعداد غلاف در بوته بیش‌ترین همبستگی مثبت و معنی‌دار (۰/۷۹**) را با عملکرد دانه داشت. درحالی‌که وزن صددانه دارای همبستگی مثبت ولی کمی (۰/۴۴*) با عملکرد دانه بود. در بین صفات مورفولوژیکی صفت ارتفاع بوته دارای بیش‌ترین همبستگی مثبت و معنی‌دار (۰/۶۸**) با عملکرد

دانه بود، اما صفت تعداد شاخه اولیه در بوته در سطح احتمال پنج درصد با عملکرد دانه دارای همبستگی مثبت بود. در بین صفات فیزیولوژیکی با افزایش محتوای نسبی آب برگ، صفات تعداد غلاف در بوته، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک در سطح احتمال یک درصد افزایش نشان داده است. هم‌چنین محتوای نسبی آب برگ با حجم ریشه (۰/۷۴**) و وزن خشک ریشه (۰/۷۱**) دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بود. شاخص برداشت با عملکرد دانه همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد داشت، درحالی‌که شاخص برداشت با عملکرد بیولوژیک دارای همبستگی ضعیف و غیر معنی‌داری (۰/۱۸) بود. درصد پروتئین دانه با هیچ‌کدام از صفات موردبررسی در این آزمایش دارای همبستگی معنی‌داری نبود.

جدول ۷. ضرایب همبستگی صفات موردمطالعه در ارقام عدس تحت تأثیر منابع مختلف نیتروژن

صفات	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱٤
۱. حجم ریشه	۱													
۲. وزن خشک ریشه	۰/۷۷**	۱												
۳. ارتفاع بوته	۰/۴۴	۰/۵۴*	۱											
۴. تعداد شاخه اولیه	۰/۳۲	۰/۲۸	۰/۸۶**	۱										
۵. کلروفیل a	۰/۱۷	۰/۲۵	۰/۱۹	۰/۲۸	۱									
۶. کلروفیل b	۰/۰۷	۰/۱۱	۰/۱۸	۰/۲۷	۰/۸۳**	۱								
۷. محتوای نسبی آب برگ	۰/۷۴**	۰/۷۱**	۰/۵۱*	۰/۳۲**	۰/۴۸*	۰/۵۱*	۱							
۸. تعداد غلاف در بوته	۰/۶۱**	۰/۶۲**	۰/۴۹*	۰/۶۲**	۰/۵۵*	۰/۵۸*	۰/۷۲**	۱						
۹. تعداد دانه در غلاف	۰/۳۹	۰/۴۰	۰/۴۹*	۰/۳۶	۰/۵۰*	۰/۵۲*	۰/۴۳*	۰/۴۲*	۱					
۱۰. وزن صددانه	۰/۵۴*	۰/۵۸*	۰/۷۳**	۰/۲۷	۰/۳۲	۰/۳۰	۰/۴۱	۰/۱۶	۰/۱۳	۱				
۱۱. عملکرد دانه	۰/۴۴*	۰/۴۹*	۰/۶۸**	۰/۵۶*	۰/۳۴	۰/۴۱	۰/۷۸**	۰/۷۹**	۰/۵۴*	۰/۴۴*	۱			
۱۲. عملکرد بیولوژیک	۰/۴۶*	۰/۴۴*	۰/۷۳**	۰/۶۴**	۰/۲۱	۰/۲۸	۰/۷۹**	۰/۷۲**	۰/۴۳	۰/۴۵*	۰/۹۲**	۱		
۱۳. شاخص برداشت	۰/۴۱*	۰/۳۸	۰/۲۱	۰/۴۲*	۰/۲۵	۰/۲۴	۰/۵۴*	۰/۵۷*	۰/۴۴*	۰/۲۷	۰/۴۵*	۰/۱۸	۱	
۱۴. پروتئین دانه	۰/۳۶	۰/۳۲	۰/۲۱	۰/۳۷	۰/۲۲	۰/۲۵	۰/۴۱	۰/۳۷	۰/۳۶	۰/۱۰	۰/۳۱	۰/۳۸	۰/۱۹	۱

* و **: به‌ترتیب، معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

۵. بحث

بیش‌ترین حجم و و وزن خشک ریشه در رقم کیمیا ثبت شد. این افزایش می‌تواند ناشی از تفاوت ژنوتیپی این رقم باشد که منجر به توسعه بهتر سیستم ریشه‌ای و افزایش ظرفیت جذب آب و مواد مغذی می‌شود (شیرویی، ۱۳۹۸). این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های پیشین که گزارش کردند ارقام مقاوم‌تر عدس دارای ریشه‌های بزرگ‌تر و عملکرد بهتر در جذب عناصر غذایی هستند، هم‌راستاست (چکری و همکاران، ۲۰۲۰). علاوه بر این، استفاده از کود شیمیایی نیتروژن باعث افزایش قابل‌توجه حجم و وزن خشک ریشه گردید که علت آن ممکن است تأمین سریع و مستقیم نیتروژن در دسترس گیاه باشد. نیتروژن یکی از عناصر کلیدی در سنتز پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و کلروفیل است که افزایش رشد ریشه و عملکرد کلی گیاه را تسهیل می‌کند (نگت و همکاران، ۲۰۲۲). به‌علاوه، نیتروژن کافی موجب افزایش تقسیم و طول سلولی در ریشه و تحریک توسعه سیستم ریشه‌ای می‌شود (مرادقلی[1] و همکارن، ۲۰۲۲) که می‌تواند بهبود حجم و و وزن خشک ریشه را به‌همراه داشته باشد. هم‌چنین، کودهای زیستی مانند ازوسپیریلیوم و ازتوباکتر نیز نقش مهمی در افزایش رشد ریشه ایفا کردند که این افزایش می‌تواند به‌دلیل توانایی این میکروارگانیسم‌ها در تثبیت نیتروژن جو و تبدیل آن به

1. Moradgholi

فرم‌های قابل‌جذب توسط گیاه باشد (داس[1] و همکاران، ۲۰۲۳). این باکتری‌ها با تولید هورمون‌هایی مانند اکسین و جیبرلین باعث تحریک رشد ریشه و افزایش توسعه آن می‌شوند (آسفار[2] و همکاران، ۲۰۲۱). در نهایت، نتایج این پژوهش نشان‌دهنده اهمیت انتخاب رقم مناسب و بهره‌گیری از منابع نیتروژن مؤثر، به‌ویژه باکتری‌های محرک رشد، برای بهبود توسعه سیستم ریشه‌ای است. علاوه بر این، به‌نظر می‌رسد کودهای زیستی یک ریز–محیط غنی در اطراف ریشه ایجاد کردند که رقم کیمیا به‌دلیل برتری ژنتیکی خود، توانسته از این ریز–محیط مطلوب بهره‌برداری بسیار مؤثرتری نماید. بنابراین، تفاوت مشاهده‌شده رقم محلی با رقم کیمیا بیش از آن‌که ناشی از شرایط محیطی آزمایش باشد، می‌تواند ریشه در توانایی ژنتیکی متفاوت دو رقم در پاسخ به یک محیط بهبودیافته باشد.

نتایج به‌دست‌آمده اهمیت کاربرد باکتری‌های محرک رشد را در بهبود رشد رویشی نمایان ساخت. داده‌ها نشان می‌دهد که اگرچه کود شیمیایی نیتروژن بیش‌ترین تأثیر را بر رشد رویشی داشته است، اما عملکرد بسیار قابل‌توجه کودهای زیستی، به‌ویژه در رقم کیمیا، تأکیدی بر قابلیت آن‌ها در افزایش رشد گیاه از طریق مکانیسم‌هایی نظیر تولید هورمون‌های رشد گیاهی، افزایش جذب عناصر غذایی و تحریک رشد سلولی می‌باشد (شارما و همکاران، ۲۰۲۳؛ داسیلواویانا[3] و همکاران، ۲۰۲۰). از سوی دیگر، کودهای زیستی به‌ویژه ازتوباکتر و ازوسپیریلیوم با توان تثبیت نیتروژن، تولید فیتوهورمون‌هایی نظیر اکسین و جیبرلین، بهبود جذب عناصر غذایی و تحریک شاخه‌زایی، نقش مؤثری در بهبود رشد رویشی ایفا کردند (تسهگایه[4]، ۲۰۲۲). هم‌چنین، برتری کود شیمیایی در برخی تیمارها، با وجود کارایی بالای کودهای زیستی، می‌تواند ناشی از فراهمی سریع‌تر و بیش‌تر نیتروژن معدنی باشد (سدری و همکاران، ۲۰۲۲). با این وجود، این برتری را باید در چارچوب چالش‌های فعلی کشاورزی پایدار تفسیر نمود. امروزه به‌طور گسترده به اثبات رسیده است که استفاده بلندمدت و نامتعادل از کودهای شیمیایی، پیامدهای زیست‌محیطی مخربی نظیر تخریب ساختمان خاک، کاهش تنوع زیستی میکروارگانیسم‌های مفید، آلودگی منابع آبی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را به‌همراه دارد. در مقابل، کودهای زیستی از طریق ارتقای پایداری زیستی خاک و ایجاد تعادل تغذیه‌ای می‌توانند به‌عنوان گزینه‌ای پایدار و مؤثر در سیستم‌های کشاورزی مدرن مطرح شوند (اصغر[5] و همکاران، ۲۰۲۳). همسو با یافته‌های حاضر، صباغ‌پور و همکاران (۱۳۹۸) با ارزیابی منابع مختلف کودی بر گیاه عدس گزارش کردند که ارتفاع گیاه و شاخه‌های فرعی در پاسخ به کاربرد باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن بهبود یافت. در مطالعه دیگر، پژوهش‌گران با بررسی اثرات کودهای شیمیایی و باکتری‌های محرک رشد بر گیاه سیاه‌دانه[6] اظهار داشتند که ارتفاع گیاه، تعداد کپسول و شاخه‌های فرعی در پاسخ به کاربرد باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن افزایش پیدا کرد (مرادزاده[7] و همکاران، ۲۰۲۱). در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که تلفیق رقم‌های پُربازده با منابع نیتروژن زیستی، ضمن کاهش مصرف کودهای شیمیایی، می‌تواند موجب ارتقای صفات رویشی گردد.

برتری رقم کیمیا در صفات محتوای نسبی آب برگ و مقدار کلروفیل a و b می‌تواند بیانگر ظرفیت ژنتیکی مطلوب این رقم در بهره‌برداری مؤثر از منابع نیتروژن و کارایی بیش‌تر در استفاده از عناصر غذایی باشد. این رقم از طریق جذب مؤثرتر نیتروژن، محتوای نسبی آب برگ و میزان کلروفیل را در سطوح بالاتری حفظ نمود که از شاخص‌های کلیدی

1. Das
2. Aasfar
3. da Silva Viana
4. Tsegaye
5. Asghar
6. *Nigella sativa* L.
7. Moradzadeh

تحمل به تنش‌های محیطی محسوب می‌شود. نتایج مطالعه‌ای بر روی باقلا[1] نیز از این دیدگاه حمایت می‌کند، به‌طوری‌که کاربرد باکتری‌های محرک رشد گیاهی با ارقام مقاوم، موجب بهبود رنگدانه‌های فتوسنتزی، شاخص‌های فیزیولوژیکی و بهره‌وری آب شده و به‌عنوان راهبردی مؤثر برای بهبود عملکرد و افزایش تحمل گیاه به خشکی پیشنهاد شده است (منصور[2] و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه بر این، باکتری‌های ازتوباکتر و آزوسپیریلیوم، تا حد زیادی روندی مشابه یا نزدیک به نیتروژن شیمیایی در ارتقای شاخص‌های فیزیولوژیک موردبررسی در گیاه عدس را داشته است. این امر بیانگر توانایی این تیمارها در حفظ آب و تعادل اسمزی سلول‌ها است که این موضوع به‌طور مستقیم بر حفظ ساختار کلروپلاست‌ها و سنتز رنگیزه‌های فتوسنتزی اثرگذار بوده و در نهایت منجر به افزایش غلظت کلروفیل گردیده است (شارما و همکاران، ۲۰۲۳). هم‌چنین، کاربرد باکتری‌های آزوسپیریلیوم و ازتوباکتر با تثبیت زیستی نیتروژن و تحریک توسعه سیستم ریشه‌ای، جذب آب و مواد غذایی را افزایش داده و از طریق بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه در حفظ پایداری ساختارهای فتوسنتزی نقش مؤثری ایفا کردند (لالای و همکاران، ۲۰۲۴؛ مورتینهو و همکاران، ۲۰۲۲). هم‌راستا با یافته-های حاضر، پژوهش‌گران گزارش کردند کاربرد باکتری‌های محرک رشد گیاهی در عدس تحت تنش خشکی، از طریق کاهش شاخص‌های استرس اکسیداتیو از جمله پرولین و مالون‌دی‌آلدهید، بهبود محتوای نسبی آب برگ و تعدیل اثرات منفی ناشی از کمبود آب، موجب ارتقای تحمل گیاه به خشکی شدند (کانکیا، اعتصامی و علیخانی، ۲۰۲۵).

رقم کیمیا در تیمارهای مصرف کود شیمیایی نیتروژن و تلقیح با آزوسپیریلیوم بیش‌ترین تعداد غلاف در بوته را تولید کردند. این مشاهده بیانگر این مطلب است که کارایی این باکتری در ارتقای این صفت تقریباً معادل کود شیمیایی نیتروژن بوده است. هم‌چنین این نتایج تأییدی بر توانایی بالای باکتری‌های آزوسپیریلیوم در بهبود تعداد غلاف در بوته و انتقال مؤثرتر ترکیبات فتوسنتزی به اندام‌های زایشی گیاه می‌باشد. افزون بر این، بهبود تعداد غلاف در بوته در این تیمارها احتمالاً حاصل تحریک رشد رویشی، توسعه شاخه‌های فرعی و افزایش توان فتوسنتزی ناشی از کاربرد کود شیمیایی نیتروژن و آزوسپیریلیوم باشد که با گزارش مرادقلی و سدری نیز هم‌راستاست (مرادقلی و همکاران، ۲۰۲۲). مکانیسم عمل ریزجانداران محرک رشد گیاه، به‌ویژه ازتوباکتر و آزوسپیریلیوم، شامل شبکه‌ای پیچیده از تعاملات بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی است که منجر به بهبود کارایی جذب منابع در گیاه می‌شود. باکتری‌های ازتوباکتر با بهره‌گیری از کمپلکس آنزیمی نیتروژناز، طی فرایندی بیوشیمیایی، نیتروژن مولکولی جو را به آمونیاک تبدیل می‌کنند که به‌طور مستقیم قابل‌جذب توسط گیاه است (نباتی و همکاران، ۲۰۲۵). علاوه بر این، در این پژوهش، رقم کیمیا علاوه بر تعداد غلاف در بوته بالا، بالاترین تعداد دانه در غلاف را نیز به خود اختصاص داد که نشان می‌دهد در کنار نقش عوامل مدیریتی، تفاوت بین ارقام نیز در تعیین سطوح این صفات مؤثر بود. به‌نظر می‌رسد رقم کیمیا با دارابودن توان فتوسنتزی بیش‌تر، رشد ریشه‌ای قوی‌تر، توانسته است پاسخ بهتری به تیمارهای باکتریایی آزوسپیریلیوم و کود شیمیایی نیتروژن نشان دهد و صفات زایشی آن نیز در بهره‌گیری از مزایای تلقیح زیستی مؤثرتر عمل کرده‌اند (شیرویی و همکاران، ۱۳۹۸). گزارش‌های مشابه نیز توسط سایر پژوهش‌گران ارائه شده‌اند که همگی بر نقش مؤثر باکتری‌های محرک رشد در بهبود هم‌زمان اجزای عملکرد، به‌ویژه در ارقام پرپتانسیل تأکید دارند (نگت و همکاران، ۲۰۲۴). براساس نتایج موجود، عدم اختلاف معنی دار تلقیح بذر با کودهای زیستی و تیمار کود شیمیایی نیتروژن بر روی صفت وزن هزاردانه بیانگر آن است که تلقیح بذر با کودهای زیستی موجب بهبود رشد ریشه، افزایش محتوای نسبی آب برگ و فتوسنتز می‌شود که در نهایت به تولید دانه‌های درشت‌تر با وزن هزاردانه بیش‌تر می‌انجامد. بالابودن وزن صددانه در رقم کیمیا با وجود این‌که

1 . *Vicia faba*
2. Mansour

نسبت به ارقام بیله‌سوار و کیمیا تعداد دانه در غلاف کم‌تری را داشت، بیانگر این است هنگامی که تعداد غلاف در بوته کاهش یابد، هر مخزن (دانه) سهم بیش‌تری از مواد فتوسنتزی خواهد داشت. بنابراین دانه‌های بزرگ‌تری تولید می‌شوند. نتایج پژوهش قاسمی و همکاران بر روی نخود (۱۴۰۱) نیز نشان داد بین تعداد دانه در غلاف و وزن صددانه همبستگی منفی وجود دارد.

نتایج این پژوهش گواه روشنی بر اهمیت و کارایی باکتری‌های محرک رشد و رقم کیمیا در افزایش عملکرد دانه، زیستی و بهره‌وری محصول است. رقم کیمیا یک رقم اصلاح‌شده است که طی فرایندهای به‌نژادی، احتمالاً برای صفاتی نظیر پتانسیل عملکرد بالا، کارایی بیش‌تر در مصرف عناصر غذایی و پاسخ‌دهی مثبت به نهاده‌ها انتخاب شده است. این ژنوتیپ‌ها دارای ساختار ژنتیکی‌ای هستند که به آن‌ها اجازه می‌دهد در صورت فراهم‌بودن منابع کافی (مانند نیتروژن و هورمون‌های رشد فراهم‌شده توسط باکتری‌ها)، این منابع را به‌طور مؤثرتری به بیوماس و عملکرد دانه تبدیل کنند. علاوه بر این، باکتری‌های محرک رشد با تثبیت نیتروژن اتمسفری و انحلال ترکیبات نامحلول فسفات، میزان دسترسی گیاه به این دو عنصر غذایی حیاتی را به‌طور مستقیم افزایش می‌دهند. در نتیجه، برهم‌کنش میان بهبود ساختار ریشه و افزایش تغذیه، رشد کلی گیاه و عملکرد را به شکل معنی‌داری تقویت می‌کند (لالای و همکاران، ۲۰۲۴). از سوی دیگر، کود شیمیایی نیتروژن به‌دلیل تأمین سریع و قابل‌دسترس نیتروژن، افزایش قابل‌توجهی در عملکرد دانه و شاخص برداشت ایجاد کرد که اهمیت نقش نیتروژن در بهبود رشد و تولید محصول را برجسته می‌سازد (مرادزاده و همکاران، ۲۰۲۱). با این‌حال، استفاده از باکتری‌های محرک رشد آزوسپیریلیوم عملکرد زیستی، دانه و بهره‌وری محصول را تا سطحی نزدیک به کود شیمیایی نیتروژن افزایش داد که می‌توان آن را به توانایی این باکتری در تثبیت بیولوژیکی نیتروژن، ترشح هورمون‌های محرک رشد، بهبود رشد ریشه و افزایش سطح جذب عناصر غذایی نسبت داد (آسفار و همکاران، ۲۰۲۱). هم‌چنین، افزایش مشاهده‌شده در عملکرد نهایی دانه، حاصل بهبود تجمعی و هم‌افزای اجزای تشکیل‌دهنده آن است. باکتری‌های محرک رشد گیاه، از طریق یک مکانیسم دوگانه عمل می‌کنند؛ از یک‌سو، با بهبود وضعیت هورمونی (تولید فیتوهورمون‌هایی نظیر اکسین) و تغذیه‌ای گیاه (افزایش فراهمی نیتروژن و سایر عناصر)، ظرفیت تولید[1] را از طریق افزایش تعداد غلاف در بوته و جلوگیری از سقط گل‌ها و غلاف‌های اولیه، ارتقا می‌بخشند. این امر منجر به افزایش تعداد دانه در غلاف و در نهایت تثبیت تعداد دانه بیش‌تری در هر بوته می‌شود (شیوهاره و همکاران، ۲۰۲۴). از سوی دیگر، با تداوم فعالیت فتوسنتزی در طول دوره پرشدن دانه که از طریق به تأخیر انداختن پیری برگ‌ها (ناشی از تأمین پایدار نیتروژن) حاصل می‌شود، فرایند تخصیص مواد پرورده به دانه‌ها[2] بهبود یافته و به انباشت بیش‌تر مواد خشک در هر دانه و افزایش معنی‌دار وزن هزاردانه منجر می‌گردد (موحدی[3] و همکاران، ۲۰۲۵). بنابراین، تیمارهای زیستی با اثرات مثبت بر هر سه جزء اصلی عملکرد، پتانسیل ژنتیکی رقم را برای تولید دانه به بهترین شکل ممکن به فعلیت می‌رسانند (مرادقلی و همکارن، ۲۰۲۲). نتایج حاضر با یافته‌های سایر پژوهش‌گران که به تأثیر مثبت باکتری‌های محرک رشد در بهبود عملکرد گیاه از طریق مکانیسم‌های تغذیه‌ای، هورمونی و فیزیولوژیکی اشاره کرده‌اند، همسو است (داسیلوا ویانا[4] و همکاران، ۲۰۲۰). علاوه براین، برتری رقم کیمیا در عملکرد و شاخص برداشت را می‌توان ناشی از تفاوت‌های ژنوتیپی و ویژگی‌های فیزیولوژیکی این رقم دانست که موجب افزایش توانایی جذب و استفاده مؤثرتر از منابع غذایی و سازگاری بهتر آن با شرایط محیطی شده است (فتحی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۳). یافته‌های مشابه در مطالعات پیشین نیز مؤید این نکته است که ارقام اصلاح‌شده معمولاً عملکرد بالاتری نسبت به ارقام بومی دارند (برجاس و همکاران، ۱۴۰۱).

1. Sink Capacity
2. Sink Strength
3. Movahedi
4. Da Silva viana

تیمارهای آزوسپیریلیوم، ازتوباکتر و تیمار تلفیقی آن‌ها محتوای پروتئین را نسبت به شاهد افزایش دادند. هرچند اختلاف آماری بین تیمارهای زیستی و کود شیمیایی همچنان معنی‌دار باقی ماند، اما نتایج به‌دست‌آمده مؤید پتانسیل بالای کاربرد باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن در بهبود کیفیت تغذیه‌ای محصول و کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی است (تسهگایه، ۲۰۲۲). این باکتری‌ها با توانایی تثبیت زیستی نیتروژن، تولید ترکیبات شبه‌هورمونی (نظیر اکسین، جیبرلین و سایتوکنین)، تسهیل جذب عناصر غذایی و بهبود توسعه ریشه، موجب افزایش فراهمی نیتروژن برای گیاه و در نهایت ارتقای سنتز پروتئین می‌شوند (اصغر و همکاران، ۲۰۲۰). علاوه بر این، این میکروارگانیسم‌ها با تعدیل مسیرهای متابولیکی، فعالیت آنزیم‌های کلیدی در گیاه، از جمله نیترات ردوکتاز، را ارتقا می‌دهند (مورتینهو و همکاران، ۲۰۲۲). نیترات ردوکتاز به‌عنوان آنزیم محدودکننده در مسیر کاهش نیترات به نیتریت، نقش تعیین‌کننده‌ای در سنتز اسیدهای آمینه و پروتئین‌های دانه ایفا می‌کند، به‌طوری‌که افزایش فعالیت این آنزیم در حضور باکتری‌های مذکور، منجر به تسریع فرایند بیوسنتز پروتئین می‌گردد. در کنار این اثرات، ازوسپیریلیوم با تولید تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی نظیر اکسین‌ها (به‌ویژه IAA)، موجب افزایش توسعه تارهای کشنده و گسترش سیستم ریشه‌ای می‌شود (فرچیچی [1] و همکاران، ۲۰۲۵). این تغییرات ساختاری در ریشه، در کنار اصلاح پروفایل‌های بیوشیمیایی سلولی (مانند افزایش غلظت اسمولیت‌ها و تعدیل آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان)، ظرفیت گیاه را برای جذب آب و عناصر غذایی در شرایط تنش خشکی (دیم) به‌طور چشم‌گیری بهبود می‌بخشند (کانکیا و همکاران، ۲۰۲۵). تلقیح با باکتری‌های محرک رشد گیاه از طریق افزایش فراهمی نیتروژن معدنی در ریزوسفر، نه تنها منجر به افزایش تجمع پروتئین کل می‌شود، بلکه بستری بهینه برای بیوسنتز پروتئین‌های ذخیره‌ای فراهم می‌آورد (الو [2] و همکاران، ۲۰۲۵). با افزایش فعالیت آنزیم‌های دخیل در متابولیسم نیتروژن، نظیر نیترات ردوکتاز، مسیرهای بیوسنتزی آمینواسیدها با شدت بیش‌تری فعال شده و تعادل مطلوب‌تری میان آمینواسیدهای ضروری و پروتئین‌های ساختاری ایجاد می‌گردد (داتا [3] و همکاران، ۲۰۲۵). این فرایند، در نهایت منجر به بهبود پروفایل اسیدهای آمینه و افزایش ارزش تغذیه‌ای پروتئین دانه در گیاهان تلقیح‌شده نسبت به گیاهان شاهد می‌گردد. این یافته‌ها با نتایج گزارش‌شده توسط سایر پژوهش‌گران که تأثیر مثبت باکتری‌های محرک رشد بر بهبود کیفیت دانه در عدس را تأیید کرده‌اند، هم‌راستا می‌باشد (اردمسی و همکاران، ۲۰۲۰). علاوه بر این، عملکرد برتر رقم کیمیا از نظر این صفت، احتمالاً ناشی از توانایی ذاتی این رقم در جذب و بهره‌وری مؤثرتر از نیتروژن و نیز فعالیت آنزیم‌های دخیل در سنتز پروتئین، نظیر نیترات ردوکتاز و گلوتامین سنتتاز می‌باشد (فتحی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۳). این یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از رقم مناسب با مدیریت بهینه منابع نیتروژن، به‌ویژه با بهره‌گیری از نهاده‌های زیستی، راه‌کار مؤثری در ارتقای کیفیت تغذیه‌ای و پایداری تولید در سامانه‌های کشاورزی است.

نتایج همبستگی بین صفات مؤید این نکته است که با فزایش میزان صفت عملکرد بیولوژیک، صفت عملکرد دانه دچار افزایش می‌شود که این نتیجه کاملاً طبیعی و قابل‌انتظار می‌باشد. هرچه صفت عملکرد بیولوژیک بیش‌تر شود، گیاه سوخت‌وساز بیش‌تری می‌تواند انجام دهد و ارسال آسیمیلات‌ها به دانه افزایش می‌یابد و لذا، عملکرد دانه افزایش می‌یابد در پژوهشی که کاکایی (۱۴۰۳) بر روی گیاه عدس انجام داد، نیز گزارش کرد صفت عملکرد بیولوژیک دارای همبستگی مثبت و بسیار معنی‌داری با عملکرد دانه است. عزیزی‌زاده و همکاران (۱۴۰۱) گزارش کردند در حبوبات به‌ویژه عدس همبستگی بین صفت عملکرد دانه با صفت وزن صددانه رابطه مثبت اما کم می‌باشد، چراکه عدس در زمره گیاهان دارای رشد نامحدود قرار دارد. در بین اجزای عملکرد تعداد غلاف در بوته مهم‌ترین جزء عملکرد دانه در عدس می‌باشد که با

1. Ferchichi
2. Aloo
3. Dutta

نتایج این آزمایش همخوانی دارد. هر چقدر گیاه عدس بتواند از منابع نیتروژن بیش‌تر استفاده کند و رشد رویشی (ارتفاع بوته و تعداد شاخه فرعی در بوته) را افزایش دهد، در نتیجه شرایط برای تشکیل تعداد غلاف در بوته را مهیا کرده است. با افزایش وزن خشک ریشه و حجم ریشه توان جذب آب در گیاه عدس در شرایط دیم بهتر شده و در نتیجه محتوای نسبی آب برگ بهبود یافته و لذا رشد رویشی افزایش می‌یابد. هم‌چنین پژوهش‌های گذشته نشان داده که تراکم ریشه بیش‌ترین تأثیر بر میزان عملکرد در شرایط دیم دارد. زیرا در شرایطی که آب تنها در اعماق پایین ذخیره شده است وجود ریشه در این نواحی می‌تواند رشد گیاه را تضمین کند (ناصری و همکاران، ۱۳۹۸).

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که در میان ارقام، رقم کیمیا و در میان منابع نیتروژن، کود شیمیایی نیتروژن موجب بهبود صفات مورفولوژیک شد. این امر همراه با افزایش محتوای نسبی آب برگ و غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی، درنهایت منجر به ارتقای درصد پروتئین دانه، عملکرد زیستی، عملکرد دانه و شاخص برداشت گردید. نکته قابل‌توجه این است که اگرچه کود شیمیایی نیتروژن در افزایش صفات مورفولوژیک و عملکردی نسبت به سایر منابع مؤثرتر بود، باکتری‌های محرک رشد گیاه به‌ویژه آزوسپیریلیوم نیز نقش برجسته‌ای ایفا کردند، به‌طوری‌که در بسیاری از صفات توانستند عملکردی نزدیک به کود شیمیایی نیتروژن از خود نشان دهند. این یافته‌ها بیانگر ظرفیت بالای باکتری‌ها محرک رشد به‌عنوان مکمل‌های مؤثر یا جایگزین‌های پایدار کودهای شیمیایی نیتروژن است که ضمن کاهش مصرف کودهای شیمیایی، می‌توانند عملکرد گیاه را حفظ یا بهبود بخشند. با این‌حال، توسعه دامنه پژوهش به منظور ارزیابی کنسرسیوم‌های میکروبی با کارکردهای متنوع (نظیر حل‌کننده‌های فسفات و پتاسیم) و ارزیابی تأثیرات بلندمدت آن‌ها بر پویایی جمعیت میکروبی و شاخص‌های بیولوژیک سلامت خاک، به‌منظور درک پایداری اکوسیستم زراعی، توصیه می‌گردد. از سوی دیگر، نظر به پاسخ متمایز ژنوتیپ کیمیا، تمرکز بر تبیین مکانیسم‌های ژنتیکی–فیزیولوژیک که زمینه‌ساز برهم‌کنش موفق گیاه–میکروارگانیسم می‌باشد، امری ضروری است. هم‌چنین، انجام آزمایش‌های چندساله و چندمکانه برای ارزیابی پایداری عملکرد این تیمارها لازم است.

۷. تشکر و قدردانی

از ریاست محترم دانشگاه پیام نور استان ایلام به‌خاطر حمایت مالی از اجرای پژوهش حاضر، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

اخوان، سحر؛ شعبانپور، محمود و اصفهانی، مسعود (۱۳۹۱). اثر تراکم و بافت خاک بر رشد ریشه و اندام‌های هوایی گندم. *آب و خاک*، *۲۶*(۳)، ۷۳۵-۷۲۷.

امیدی‌گرگری، وحید؛ دباغ محمدی نسب، عادل و امینی، روح اله (۱۴۰۴). تأثیر کودهای زیستی فسفاته و نیتراژین بر عملکرد و اجزای عملکرد عدس (*Lens culinaris*) تحت شرایط دیم. *دانش کشاورزی و تولید پایدار*، *۳۵*(۳)، ۱۵۱-۱۳۹.

برجاس، مسعود؛ مهراوران، لیلا؛ اله‌دو، مریم و گنجعلی، صالحه (۱۴۰۱). اثر کاربرد سالیسیلیک‌اسید تحت تنش خشکی بر صفات مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی دو رقم ماش در سیستان. *تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک*، ۴(۱)، ۱۷۱-۱۵۳.

رشیدی‌پور، آیدا؛ براتی، وحید و بیژن زاده، احسان (۱۴۰۲). واکنش عملکرد و اجزای عملکرد نخود در کشت مخلوط با تریتیکاله به کودهای زیستی و شیمیایی تحت شرایط تنش آبی. *پژوهش‌های حبوبات ایران*، ۱۴(۱)، ۱۳۲-۱۱۲.

شیرویی، حمزه؛ براری، مهرشاد؛ حاتمی، علی و مهرابی، علی اشرف (۱۳۹۸). اثر آبیاری تکمیلی و تراکم بوته بر بعضی صفات مورفولوژیکی ارقام عدس. تنش‌های محیطی در علوم زراعی، ۱۲(۴)، ۱۱۲۷-۱۱۱۷.

صباغ‌پور، سیدحسین؛ شهبازی، حجت‌اله و رضا خانلو، رضا (۱۳۹۸). تأثیر مصرف کودهای بیولوژیک و شیمیایی نیتروژنه بر عملکرد و اجزای عملکرد در ارقام عدس. *پژوهش‌های حبوبات ایران*، ۱۰(۱)، ۵۱-۴۰.

صیدمرادی، علیرضا و مظفری، افشین (۱۳۹۹). بررسی تأثیر پرایمینگ بذر با تلقیح زیستی ریزوبیوم و باکتری‌های محرک رشد گیاه بر کلروفیل، عناصر غذایی و عملکرد دانه عدس در شرایط دیم. *اکوفیزیولوژی گیاهی*، ۱۲(۲)، ۲۷۰-۲۵۸.

طباطبایی، سیده سمیرا؛ جهان، محسن و حاج‌محمدنیا قالیباف، کمال (۱۴۰۰). اثرات ریزوباکتری‌های تحریک‌کننده رشد و کود نیتروژن بر شاخص‌های رشدی لوبیا در شرایط تنش‌کمبود آب. *پژوهش‌های حبوبات ایران*، ۱۲(۲)، ۱۶۴-۱۵۱.

عزیزی‌زاده، زینب، طهماسبی، زهرا و میرزایی، امیر (۱۴۰۱). تنوع ژنتیکی عملکرد و اجزای عملکرد برخی ژنوتیپ‌های عدس (*Lens culinaris* Medikus.) با استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره. *پژوهش‌های حبوبات ایران*، ۱۳(۱)، ۷۳-۸۶.

فتحی‌زاده، نسیم؛ هوشمندکوچی، سعداله؛ محمدی، شهرام و پزشک‌پور، پیام (۱۴۰۳). ارزیابی برخی ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک و تحمل به خشکی انتهای فصل رشد برخی ژنوتیپ‌های عدس. *تنش‌های محیطی در علوم زراعی، ۱۷(۱)*، ۱۳۹-۱۲۱.

قاسمی، فاطمه؛ ویسانی، وریا؛ دیانت، مرجان و مرادی، محمود (۱۴۰۱). تأثیر تراکم کاشت در افزایش قدرت رقابتی ارقام نخود در مقابل علف‌های هرز. *به‌زراعی کشاورزی*، ۲۴(۳)، ۸۵۳-۸۴۱.

کاکایی، مهدی (۱۴۰۳). تأثیر تراکم کاشت و آبیاری تکمیلی بر صفات زراعی عدس (*Lens culinaris* Medik.) در شرایط دیم. *پژوهش‌های حبوبات ایران*، ۱۵ (۲)، ۱۳۹-۱۲۹.

محمدکریمی، بتول؛ علیزاده، یاسر؛ ناصری، رحیم و دارابی، فرشته (۱۴۰۴). بررسی فواصل آبیاری و استفاده از کودهای زیستی و شیمیایی بر عملکرد، اجزای عملکرد و برخی صفات روزنه‌ای لوبیا. *پژوهش‌های حبوبات ایران، ۱۶(۲)*، ۳۳۰-۳۱۵.

محمدی، مراد؛ قانع، محمدرضا؛ مجنون‌حسینی، ناصر و مقدم، حسین (۱۳۹۷). واکنش عملکرد و صفات فیزیولوژیک عدس به کودهای شیمیایی فسفری و زیستی در شرایط متفاوت رطوبتی. *بوم‌شناسی کشاورزی*، ۱۱(۴)، ۱۱۲۰-۱۱۰۷.

مرادی، زمان؛ سعیدی، محسن؛ شریفی، روح الله و مندنی، فرزاد (۱۴۰۴). اثر تلقیح بذر با سویه های مختلف باکتری محرک رشد گیاه بر کمیت و کیفیت عملکرد عدس (*Lens culinaris* L.) در شرایط دیم. *دانش کشاورزی و تولید پایدار*، ۳۵(۲)، ۴۱-۲۳.

ناصری، رحیم؛ سلیمانی‌فرد، عباس؛ میرزایی، امیر؛ دارابی، فرشته و فتحی، امین (۱۳۹۸). تأثیر ریزوباکترهای محرک رشد بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، خصوصیات فیزیولوژیکی و رشد ریشه چهار رقم نخود (*Cicer arietinum* L.) در شرایط دیم استان ایلام. پژوهش‌های حبوبات ایران، ۱۰ (۲)، ۷۶-۶۲.

References

Aasfar, A., Bargaz, A., Yaakoubi, K., Hilali, A., Bennis, I., Zeroual, Y., & Meftah Kadmiri, I. (2021). Nitrogen fixing Azotobacter species as potential soil biological enhancers for crop nutrition and yield stability. *Frontiers in Microbiology*, *12*, 1-19.

Akhavan, S., Shabanpour, M., & Esfahani, M. (2012). Soil Compaction and texture effects on the growth of roots and shoots of wheat. *Water and Soil*, *26*(3), 727-735. (In Persian).

Aloo, B.N., Were, O.J., & Vishal, T. (2025). Potential Mitigation of Drought and Heat Stress in Common Food Crops Using Indigenous Rhizobacterial Populations. In: Dubey, R., Shubha, K., Rakshit, A., Kumar, S., Das, A. (eds) Drought and Heat Stress in Agriculture. Springer, Singapore.

AOAC. (1990). Official methods of analyses. Association of Official Analytical Chemists: Washington, DC.

Asghar, I., Ahmed, M., Farooq, M.A., Ishtiaq, M., Arshad, M., Akram, M., Umair, A., Alrefaei, A.F., Jat Baloch, M.Y., & Naeem, A. (2023). Characterizing indigenous plant growth promoting bacteria and their synergistic effects with organic and chemical fertilizers on wheat (*Triticum aestivum*). *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1232271.

Azizizadeh, Z., Tahmasebi, Z., & Mirzaei, A. (2022). Genetic diversity of yield and yield components in few lentil (Lens culinaris Medikus (genotypes using multivariate statistical methods. *Iranian Journal Pulses Research*, *13*(1), 73-86. (In Persian).

Barjas, M., Mehravaran, L., Allahdou, M., & Ganjali, S. (2022). Effects of application of salicylic acid under the drought stress on morphophisiological and biochemical traits of two varieties of mung bean. *Crop Science Research in Arid Regions*, *4*(1), 153-171. (In Persian).

Barrs, H. D., & Weatherley, P. E. (1962). A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. *Australian Journal of Biological Sciences*, *15*(3), 413-428.

Choukri, H., Hejjaoui, K., El-Baouchi, A., El Haddad, N., Smouni, A., Maalouf, F., Thavarajah, D., & Kumar, S. (2020). Heat and drought stress impact on phenology, grain yield, and nutritional quality of lentil (*Lens culinaris Medikus*). *Frontiers in Nutrition*, *7*, 596307.

Da Silva Viana, R., de Almeida Moreira, B. R., Lisboa, L. A. M., Junior, R. S., Nogueira, T. A. R., De Figueiredo, P. A. M., Filho, M. C. M. T., & Ramos, S. B. (2019). Morphological Changes in Sugarcane Crop Induced by the Plant Growth-Promoting Bacterium *Azospirillum* brasilense. *Sugar Tech*, *22*(2), 241-249.

Das, T., Sen, A., & Mahapatra, S. (2023). Characterization of plant growth-promoting bacteria isolated from rhizosphere of lentil (*Lens culinaris* L.) grown in two different soil orders of eastern India. *Brazilian Journal of Microbiology, 54*(4), 3101-3111.

Dutta, A., Das, J., Bhowmik, P., Patel, M., & Padhan, B. (2025). Recent Advancements in Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) Induced Seed Germination and Seedling Growth and Its Implementation in Soil-Less Leguminous Microgreen Farming. In: Mathur, P., Gupta, A. (eds) Recent Trends and Applications of Leguminous Microgreens as Functional Foods. Springer, Cham.

Erdemci, I. (2020). Effect of Pseudomonas fluorescent rhizobacteria on growth and seed quality in lentil (*Lens culinaris Medik*.). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *51*(14), 1852-1858.

Fathizadeh, N., Houshmand, S., Mohamadi, S., & Pezeshkpour, P. (2024). Assessment of some morphophysiological traits and drought tolerance at the end of the growing season of a number lentil genotypes. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, *17*(1), 121-139. (In Persian).

Ferchichi, N., Toukabri, W., & Barbouchi, M. (2025). Inoculation with *Pseudomonas Thivervalensis* and *Variovorax Paradoxus* Enhances Yield and Grain Quality and Alters Rhizosphere Microbiota in Cereal–Legume Intercropping System. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 25*, 5157-5172.

Ghasemi, F., Weisany, W., Diyanat, M., & Moradi, M. (2022). Effect of Planting Density on Increasing the Competitive Ability of Chickpea (*Cicer arietinum* L.) Cultivars against Weeds. *Journal of Crops Improvement*, *24*(3), 841-853. (In Persian).

Kakaei, M. (2024). The Effect of Planting Density and Supplementary Irrigation on the Agricultural Traits of Lentil (*Lens culinaris* Medik.) in Dry Conditions. *Iranian Journal Pulses Research*, *15*(2), 129-139. (In Persian).

Kankia, K., Etesami, H., & Alikhani, H. A. (2025). Synergistic enhancement of water deficit resilience in lentil (*Lens culinaris*) through silicon application and non-rhizobial bacterial co-inoculation. *Plant and Soil*, *27*(1), 1-27.

Lalay, G., Ullah, A., Iqbal, N., Raza, A., Asghar, M.A., & Ullah, S. (2024). The alleviation of drought-induced damage to growth and physio-biochemical parameters of *Brassica napus* L. genotypes using an integrated approach of biochar amendment and PGPR application. *Environment, Development and Sustainability*, *26*(2), 3457-3480.

Lichtenthaler, H.K., & Wellburn, A.R. (1983). Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transa*, *11*(5), 591-592.

Mansour, E., Mahgoub, H.A., Mahgoub, S.A., El-Sobky, E.S.E., Abdul-Hamid, M.I., Kamara, M.M., AbuQamar, S.F., El-Tarabily, K.A., & Desoky, E.S.M. (2021). Enhancement of drought tolerance in diverse *Vicia faba* cultivars by inoculation with plant growth-promoting rhizobacteria under newly reclaimed soil conditions. *Scientific Reports*, *11*(1), 24142.

Mohammad Karimi, B., Alizadeh, Y., Naseri, R., & Darabi, F. (2025). Investigating the Effect of Irrigation Intervals and the Use of Biological and Chemical Fertilizers on the Yield, Yield Components and some stomatal traits of cowpea (*Vigna unguiculata* L.). *Iranian Journal Pulses Research*, *16*(2), 315-330. (In Persian).

Mohammadi, H., Ezati, P., Hazrati, S., & Ghorbanpour, M. (2023). Exogenously applied 5-aminolevulinic acid modulates growth, yield, and physiological parameters in lentil (*Lens culinaris* Medik.) under rain-fed and supplemental irrigation conditions. *Scientific Reports*, *13*(1), 21312.

mohammadi, M., ghane, M. R., Majnoun Hoseini, N., & moghaddam, H. (2018). Response of Lentil (*Lens culinaris* L.) Yield and Physiological Traits to Chemical and Bio-phosphorus Fertilizers under Different Irrigation Regimes. *Journal of Agroecology*, *10*(4), 1107-1120. (In Persian).

Moradgholi, A., Mobasser, H., Ganjali, H., Fanaie, H., & Mehraban, A. (2022). WUE, protein and grain yield of wheat under the interaction of biological and chemical fertilizers and different moisture regimes. *Cereal Research Communications*, *50*(1), 147-155.

Moradi, Z., Saeidi, M., Sharifi, R., & Mondani, F. (2025). The Impact of Seed Inoculation with Different Strains of Plant Growth-Promoting Bacteria on the Quantity and Quality of *Lens culinaris* L. Yield in Rainfed Condition. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *35*(2), 23-41. (In Persian).

Moradzadeh, S., Moghaddam, S.S., Rahimi, A., Pourakbar, L., & Sayyed, R.Z. (2021). Combined bio-chemical fertilizers ameliorate agro-biochemical attributes of black cumin (*Nigella sativa* L.). *Scientific Reports*, *11*(1), 1-16.

Mortinho, E.S., Jalal, A., da Silva Oliveira, C.E., Fernandes, G.C., Pereira, N.C.M., Rosa, P.A.L., do Nascimento, V., de Sá, M.E., & Teixeira Filho, M.C.M. (2022). Co-inoculations with plant growth-promoting bacteria in the common bean to increase efficiency of NPK fertilization. *Agronomy*, *12*(6), 1325.

Movahedi, M., Gholami, A., & Omran, V.G. (2025). Mitigating Drought Stress in Lentil (*Lens culinaris* Medik.) Grown under Dryland Conditions Using *Pseudomonas fluorescens* Inoculation and Spermidine Foliar Application. *International Journal of Plant Production*, *19*, 825-846.

Nabati, J., Nezami, A., Yousefi, A., Oskoueian, E., Oskoueian, A.,& Ahmadi-Lahijani, M. J. (2025). Biofertilizers containing plant growth promoting rhizobacteria enhance nutrient uptake and improve the growth and yield of chickpea plants in an arid environment. *Scientific Reports*, 15.

Naseri, R., Soleymani Fard, A., Mirzaei, A., Darabi, F. and Fathi, A. (2020). The effect of Plant Growth Promoting Rhizohacteria on activities of antioxidative enzymes, physiological characteristics and root growth of four chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars under dry land conditions of Ilam privince. *Iranian Journal Pulses Research*, *10*(2), 62-76.

Nawaz, A., Shahbaz, M., Asadullah, Imran, A., Marghoob, M. U., Imtiaz, M., & Mubeen, F. (2020). Potential of salt tolerant PGPR in growth and yield augmentation of wheat (*Triticum aestivum* L.) under saline conditions. *Frontiers in Microbiology*, *11*, 2019.

Nget, R., Aguilar, E. A., Cruz, P. C. S., Reaño, C. E., Sanchez, P. B., Reyes, M. R., & Prasad, P. V. (2022). Responses of soybean genotypes to different nitrogen and phosphorus sources: Impacts on yield components, seed yield, and seed protein. *Plants*, *11*(3), 298.

Omidi Gargari, V., Dabbagh Mohammadi Nasab, A., & Amini, R. (2025). The effect of Phosphate and Nitragin biofertilizers on Yield and Yield Components of rain-fed lentil (*Lens culinaris* Medik.). *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *35*(3), 139-151. (In Persian).

Rashidipour, I., Barati, V., & Bijanzadeh, E. (2023). Reaction of chickpea grain yield and its components in triticale-chickpea intercropping to chemical and bio fertilizers under water stress conditions. *Iranian Journal Pulses Research*, *14*(1), 112-132. (In Persian).

Sabaghpour, S. H., Shahbazi, H., & Rezakhanlou, R. (2019). The effect of using biological and chemical nitrogen fertilizers on yield and yield components in lentil cultivars. *Iranian Journal Pulses Research*, *10*(1), 40-51. (In Persian).

Sedri, M. H., Niedbała, G., Roohi, E., Niazian, M., Szulc, P., Rahmani, H. A., & Feiziasl, V. (2022). Comparative analysis of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and chemical fertilizers on quantitative and qualitative characteristics of rainfed wheat. *Agronomy*, *12*(7), 1524.

Seyyed-Moradi, A., & Mozaffari A. (2020). Investigation on the effect of seed priming with rhizobium bioinoculant and plant growth promoting rhizobacteria on chlorophyll, nutrients and grain yield in lentil under rainfed condition. *Journal of Plant Ecophysiology*, *12*(2), 258-270. (In Persian).

Sharma, A., Vaishnav, A., Jamali, H., Keswani, C., Srivastava, A.K., Kaushik, R., Gupta, S., & Bansal, Y.K., 2023. Unraveling the plant growth-promoting mechanisms of *Stenotrophomonas* sp. CV83 for drought stress tolerance and growth enhancement in chickpea. *Journal of Plant Growth Regulation*, *42*(10), 6760-6775.

Shirui, H., Barary, M., Hatami, A., & Mehrabi, A. A. (2019). Effect of supplemental irrigation and plant density on Some Traits of Morphological of lentil (*Lens culinaris* Medik.) genotypes. Environmental Stresses in Crop Sciences, *12*(4), 1117-1128. (In Persian).

Shivhare, R., Semwal, P., & Mishra, S.K. (2024). *Pseudomonas putida* Facilitates Pearl Millet Growth in Cold Environments and Alleviates Drought Stress by Modulating Phytohormone, Antioxidant, and Secondary Metabolite Pathways. *Journal of Plant Growth Regulation, 43*, 4199-4218.

Tabatabaei, S. S., Jahan, M., & Hajmohammadnia Ghalibaf, K. (2021). The effects of growth promoting rhizobacteria and nitrogen fertilizer on growth indices of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under water shortage stress conditions. *Iranian Journal Pulses Research*, *12*(2), 151-164. (In Persian).

Tsegaye, Z. (2022). The effects of plant growth-promoting bacteria (pgpr) and chemical fertilizer inoculation on growth, yield, and grain nutrient uptake of two teff varieties under field. *International Journal of Agricultural and Natural Sciences*, *15*(1).

Valente, J., Gerin, F., Le Gouis, J., Moënne-Loccoz, Y., & Prigent-Combaret, C. (2020). Ancient wheat varieties have a higher ability to interact with plant growth-promoting rhizobacteria. *Plant, Cell & Environment*, *43*(1), 246-260.

Zafar-ul-Hye, M., Akbar, M.N., Iftikhar, Y., Abbas, M., Zahid, A., Fahad, S., Datta, R., Ali, M., Elgorban, A.M., Ansari, M.J., & Danish, S. (2021). Rhizobacteria inoculation and caffeic acid alleviated drought stress in lentil plants. *Sustainability*, *13*(17), 9603.