



Response of Yield Components and Grain Yield of Pinto Bean to Soil Application of Potassium–Humic Fertilizer and Foliar Spraying under Deficit Irrigation

Gholamreza Shahidi¹ | Gholamabbas Akbari² | Ali Akbar Asadi³ | Gholamali Akbari⁴ | Mohammad Hadi Ghafarian Mogharab⁵

1. Department of Agriculture and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: Gholamrezashahidi@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Agriculture and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: ghakbari@ut.ac.ir
3. Department of Agriculture and Plant Breeding, Zanjan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Zanjan, Iran. E-mail: asadipm@gmail.com
4. Department of Agriculture and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: gakbari@ut.ac.ir
5. Department of Agriculture and Plant Breeding, Zanjan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Zanjan, Iran. E-mail: hghafarm@modares.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 29 December 2025
Received in revised form
12 February 2025
Accepted 26 February 2026
Published online 13 April 2026

Keywords:

Amino acids
Base fertilizer
Irrigation interval
Mineral–organic compounds

ABSTRACT

Objective: This study was conducted to evaluate the effect of combined nutritional regimes, including organic and inorganic fertilizers along with precise foliar spraying applications, on yield components, grain yield, biomass, and harvest index of pinto bean under challenging water deficit stress condition.

Method: The experiment was carefully carried out over two growing seasons (2022–2023 and 2023–2024) at the Kheirabad Agricultural Research Station in Zanjan, using a split-plot experiment based on a randomized complete block design with four replications. Treatments included two levels of soil fertilization (control and combined application of 50 kg potassium sulfate + 2 kg humic acid per hectare), four levels of foliar spraying (control or water spray, nano-zinc fertilizer, amino acids, and potassium silicate), and two irrigation regimes (full irrigation at 5-day intervals and deficit irrigation at 9-day intervals).

Findings: Results clearly showed that water deficit significantly reduced reproductive components and yield. Plant density per square meter, pods per plant, grains per pod, and 100-grain weight decreased by 8.9%, 9.1%, 10.5%, and 6.1% percent, respectively, under stress condition. The highest number of grains per pod (7.92) was obtained under full irrigation combined with potassium silicate, while the lowest value (7 grains) was observed under deficit irrigation without foliar spraying, representing an 11.65% reduction. Grain yield decreased by about 29% under stress, dropping from 3038 to 2150 kg per hectare. Potassium silicate recorded the highest yield with an average of 2733 kg per hectare, about 7% higher than other foliar treatments. Regarding harvest index, full irrigation resulted in an average of 57%, whereas deficit irrigation reduced it to 48%. The highest harvest index (56%) was observed with nano-zinc fertilizer, highlighting its crucial role in the remobilization of photosynthates to reproductive organs. The highest biomass (3165.32 kg per hectare) was achieved under full irrigation with potassium silicate, which was 1.6% and 2.8% higher compared to nano-zinc and amino acid treatments, respectively. Even without basal fertilization, potassium silicate maintained a relatively high biomass level (2762.21 kg per hectare).

Conclusions: Overall, potassium silicate foliar spraying, by enhancing photosynthesis, improving cell wall stability, and reducing lipid peroxidation, was able to effectively mitigate the negative effects of drought stress and enhance yield and biomass. Furthermore, the positive role of nano-zinc fertilizer in improving harvest index was clearly confirmed. These comprehensive results can serve as a reliable basis for developing advanced nutritional strategies to increase the resilience of pinto bean under increasingly unstable climatic condition.

Cite this article: Shahidi, Gh., Akbari, Gh., Asadi, A. A., Akbari, Gh., & Ghafarian Mogharab, M. H. (2026). Response of Yield Components and Grain Yield of Pinto Bean to Soil Application of Potassium-Humic Fertilizer and Foliar Spraying under Deficit Irrigation. *Journal of Crops Improvement*, 28 (1), 75-93. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2026.409022.2971>





پاسخ اجزای عملکرد و عملکرد دانه لوبیا چیتی (*Phaseolus vulgaris* L.) به کاربرد خاکی کود پتاسیم-هیومیک و محلول پاشی برگی تحت شرایط کم آبیاری

غلامرضا شهیدی^۱ | غلامعباس اکبری^{۲*} | علی اکبر اسدی^۳ | غلامعلی اکبری^۴ | محمدهادی غفاریان مقرب^۵

۱. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده فناوری کشاورزی (پردیس ابوریحان)، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: Gholamrezashahidi@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده فناوری کشاورزی (پردیس ابوریحان)، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: ghakbari@ut.ac.ir
۳. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، زنجان، ایران. رایانامه: asadipm@gmail.com
۴. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده فناوری کشاورزی (پردیس ابوریحان)، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: gakbari@ut.ac.ir
۵. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، زنجان، ایران. رایانامه: hghafam@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

هدف: این پژوهش با هدف ارزیابی اثر رژیم‌های تغذیه‌ای ترکیبی شامل کودهای آلی و معدنی همراه با محلول پاشی برگی بر اجزای عملکرد، عملکرد دانه، زیست توده و شاخص برداشت لوبیا چیتی تحت شرایط تنش کم آبی اجرا شد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۲۴

روش پژوهش: آزمایش طی دو سال زراعی (۱۴۰۱-۱۴۰۲ و ۱۴۰۲-۱۴۰۳) در ایستگاه تحقیقات کشاورزی خیرآباد زنجان به صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با چهار تکرار انجام گرفت. تیمارها شامل دو سطح تغذیه خاکی (شاهد و مصرف هم‌زمان ۵۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم+۲ کیلوگرم هیومیک‌اسید در هکتار)، چهار سطح محلول پاشی (شاهد یا اسپری آب، نانوکود روی، اسیدآمین و سیلیکات پتاسیم) و دو سطح آبیاری (کامل با فواصل پنج روزه و تنشی با فواصل نه روزه) بودند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که تنش آبی موجب کاهش معنی‌دار اجزای زایشی و عملکرد شد، به طوری که تعداد بوته در مترمربع، غلاف در بوته، دانه در غلاف و وزن صدانه به ترتیب ۸/۹، ۹/۱، ۱۰/۵ و ۶/۱ درصد کاهش یافتند. بیشترین تعداد دانه در غلاف (۷/۹۲ عدد) در آبیاری کامل همراه با سیلیکات پتاسیم و کمترین مقدار (هفت عدد) در تیمار تنش آبی بدون محلول پاشی ثبت گردید که معادل کاهش ۱۱/۶۵ درصد بود. عملکرد دانه تحت تنش حدود ۲۹ درصد کاهش یافت (از ۳۰۳۸ به ۲۱۵۰ کیلوگرم در هکتار). سیلیکات پتاسیم با میانگین ۲۷۳۳ کیلوگرم در هکتار بالاترین عملکرد را داشت که حدود ۷ درصد بیش‌تر از سایر تیمارها بود. در مورد شاخص برداشت، آبیاری کامل میانگین ۵۷ درصد و آبیاری تنشی ۴۸ درصد را نشان داد. بیشترین شاخص برداشت (۵۶ درصد) در نانوکود روی مشاهده شد که بیانگر نقش آن در بازپخش مواد فتوسنتزی به اندام‌های زایشی است. بیشترین زیست توده (۳۱۶۵/۳۲ کیلوگرم در هکتار) در آبیاری کامل و سیلیکات پتاسیم به دست آمد که نسبت به تیمارهای نانوکود روی و اسیدآمین به ترتیب ۶/۱ و ۸/۲ درصد بیش‌تر بود. حتی بدون تغذیه پایه، سیلیکات پتاسیم موفق به حفظ زیست توده در سطح بالایی (۲۷۶۲/۲۱ کیلوگرم در هکتار) شد.

کلیدواژه‌ها:

اسیدآمین
ترکیب کودهای آلی-معدنی
رژیم‌های آبیاری
کود پایه

نتیجه گیری: به طور کلی، محلول پاشی سیلیکات پتاسیم با بهبود فتوسنتز، افزایش پایداری دیواره سلولی و کاهش پراکسیداسیون لیپیدها توانست اثرات منفی خشکی را تعدیل کرده و موجب ارتقای عملکرد و زیست توده گردد. هم‌چنین نقش مثبت نانوکود روی در بهبود شاخص برداشت تأیید شد. این نتایج می‌تواند مبنای توسعه راهبردهای تغذیه‌ای برای افزایش تاب‌آوری لوبیا چیتی در شرایط اقلیمی ناپایدار باشد.

استناد: شهیدی، غلامرضا؛ اکبری، غلامعباس؛ اسدی، علی اکبر؛ اکبری، غلامعلی و غفاریان مقرب، محمدهادی (۱۴۰۵). پاسخ اجزای عملکرد و عملکرد دانه لوبیا چیتی (*Phaseolus vulgaris* L.) به کاربرد خاکی کود پتاسیم-هیومیک و محلول پاشی برگی تحت شرایط کم آبیاری. به زراعی کشاورزی، ۲۸ (۱)، ۷۵-۹۳. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2026.409022.2971>



۱. مقدمه

لوبیا چیتی^۱ به عنوان یکی از مهم‌ترین گونه‌های زراعی خانواده حبوبات، جایگاهی کلیدی در تأمین پروتئین گیاهی در رژیم غذایی جوامع مختلف، به‌ویژه کشورهای در حال توسعه دارد (ملادنو^۲ و همکاران، ۲۰۲۳). این گیاه نه تنها منبعی غنی از پروتئین، فیبر، و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی مفید است، بلکه با برخورداری از توانایی تثبیت زیستی نیتروژن از طریق هم‌زیستی با ریزوبیومها، نقش مؤثری در ارتقای حاصلخیزی خاک و کاهش وابستگی به کودهای نیتروژنه شیمیایی دارد (پاپاتاناسیو^۳ و همکاران، ۲۰۲۲). از این رو، توسعه و بهبود تولید این گیاه نه تنها یک ضرورت غذایی بلکه راهبردی در جهت کاهش مصرف نهاده‌های پرهزینه و حفاظت از منابع طبیعی در نظام‌های کشاورزی پایدار محسوب می‌شود. در ایران، لوبیا چیتی از نظر سطح زیرکشت، میزان مصرف داخلی، و تنوع کشت در استان‌های مختلف، یکی از مهم‌ترین محصولات زراعی در گروه حبوبات به‌شمار می‌رود (جاتانا^۴ و همکاران، ۲۰۲۴). با وجود این اهمیت، پایداری عملکرد آن در معرض تهدید جدی ناشی از عوامل تنش‌زای محیطی، به‌ویژه کم‌آبی قرار دارد.

کم‌آبی، یکی از شایع‌ترین و مخرب‌ترین تنش‌های غیرزنده در اکوسیستم‌های زراعی مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران به‌شمار می‌رود که با تأثیر بر فرایندهای مختلف رشدی، متابولیسی و فیزیولوژیکی گیاه، منجر به کاهش شدید عملکرد کمی و کیفی محصولات زراعی از جمله لوبیا می‌گردد (ندیم^۵ و همکاران، ۲۰۱۹). این تنش به‌ویژه در مراحل حساس رشد زایشی، با ایجاد محدودیت در جذب آب و عناصر غذایی، کاهش فشار تورژانس سلولی، مختل ساختن فعالیت‌های فتوسنتزی و آنزیمی، کاهش تشکیل گل و غلاف و در نهایت کاهش قابل‌توجه عملکرد دانه همراه است (سلیمان^۶ و همکاران، ۲۰۲۱). کاهش فعالیت آنزیم‌های کلیدی، آسیب به ساختار کلروپلاست، افزایش تولید رادیکال‌های آزاد و گونه‌های فعال اکسیژن، کاهش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه و اختلال در تعادل یون‌ها از جمله پیامدهای فیزیولوژیکی مهم تنش خشکی هستند که باید در قالب راهبردهای مدیریتی کارآمد مورد تعدیل قرار گیرند (پاپاتاناسیو و همکاران، ۲۰۲۲). در این میان، مدیریت هوشمندانه تغذیه گیاه می‌تواند به‌عنوان ابزاری کلیدی برای بهبود توان مقاومت به خشکی، افزایش راندمان مصرف آب و ارتقای رشد و عملکرد گیاه مطرح باشد.

استفاده از هیومیک‌اسید به‌عنوان ترکیب آلی فعال، موجب بهبود ساختار خاک، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، تحریک توسعه ریشه و رشد میکروارگانیسم‌های مفید ریزوسفری شده و به‌طور غیرمستقیم تحمل به خشکی را در گیاه افزایش می‌دهد. این ترکیب هم‌چنین توانایی بهبود جذب عناصر غذایی و افزایش توان آنتی‌اکسیدانی گیاه را دارد و از این طریق می‌تواند بر حفظ تعادل فیزیولوژیکی در شرایط تنش اثرگذار باشد (ژی^۷ و همکاران، ۲۰۲۱). در کنار آن، پتاسیم که به‌عنوان یک عنصر ضروری برای فعال‌سازی آنزیم‌ها، تنظیم فشار اسمزی، باز و بسته‌شدن روزنه‌ها و انتقال ترکیبات فتوسنتزی شناخته می‌شود، در شرایط تنش آبی نقشی اساسی در حفظ تعادل آبی و کارکرد فیزیولوژیک گیاه ایفا می‌کند (فزون و همکاران، ۱۴۰۴). استفاده از فرم‌های کم‌خطر و سازگار با محیط، مانند سولفات پتاسیم، به‌جای کلرید پتاسیم، به‌ویژه در کشت گیاهان حساس به شوری مانند لوبیا چیتی، اهمیت بالایی دارد، چرا که ضمن تأمین پتاسیم، خطر افزایش شوری خاک و سمیت کلر را به حداقل می‌رساند (شکری^۸ و همکاران، ۲۰۲۲). استفاده هدفمند از

1. *Phaseolus vulgaris L.*

2. Mladenov

3. Papanthasiou

4. Jatana

5. Nadeem

6. Seleiman

7. Zhi

8. Shokri

این کود می‌تواند از طریق بهبود اسمز سلولی، کاهش نشت یونی و افزایش راندمان فتوسنتزی، به افزایش تحمل گیاه به کم‌آبی منجر شود (ملادنو و همکاران، ۲۰۲۳).

علاوه بر مدیریت تغذیه خاکی، استفاده از فناوری‌های نوین تغذیه گیاه به‌ویژه نانوفناوری، در سال‌های اخیر به‌عنوان رویکردی مؤثر در کاهش اثرات تنش‌های غیرزیستی از جمله کم‌آبی موردتوجه قرار گرفته است. نانوذرات به‌دلیل اندازه بسیار کوچک، سطح ویژه بالا و واکنش‌پذیری بیشتر، می‌توانند کارایی جذب و انتقال عناصر غذایی را در گیاه بهبود بخشند و موجب افزایش دسترسی زیستی عناصر در شرایط محدودیت رطوبتی شوند. مطالعات نشان داده‌اند که کاربرد نانوکودها می‌تواند با بهبود کارایی مصرف عناصر غذایی، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تنظیم بهتر تعادل اسمزی، نقش مهمی در افزایش تحمل گیاهان به تنش خشکی ایفا کند (باقری و همکاران، ۱۴۰۱). در این میان، نانوکودهای حاوی روی به‌عنوان یکی از پرکاربردترین اشکال نانومغذی‌ها شناخته می‌شوند. عنصر روی نقش کلیدی در فعالیت بسیاری از آنزیم‌ها، سنتز پروتئین، پایداری غشاهای سلولی و تنظیم بیان ژن‌های مرتبط با تنش دارد. فرم نانویی این عنصر با فراهمی زیستی بیشتر و رهایش تدریجی، می‌تواند اثربخشی تغذیه‌ای بالاتری نسبت به اشکال معمول داشته باشد و از این طریق به بهبود رشد و تحمل تنش خشکی در گیاهان کمک کند (توی ونگ^۱ و همکاران، ۲۰۲۱). در کنار نانوکودها، محلول‌پاشی اسیدهای آمینه نیز به‌عنوان یک راهبرد مکمل تغذیه‌ای در شرایط تنش مطرح است. اسیدهای آمینه نه تنها واحدهای سازنده پروتئین‌ها هستند، بلکه در تنظیم اسمزی، خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن و حفظ فعالیت فتوسنتزی در شرایط تنش نقش دارند. گزارش‌ها نشان داده‌اند که کاربرد برگی اسیدهای آمینه می‌تواند موجب بهبود وضعیت آنتی‌اکسیدانی، افزایش کلروفیل و کاهش آسیب اکسیداتیو ناشی از خشکی شود (ژی و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین، سیلیکات‌پتاسیم به‌عنوان منبع تأمین‌کننده هم‌زمان پتاسیم و سیلیس، می‌تواند از طریق افزایش استحکام دیواره سلولی، بهبود تنظیم روزه‌ای و کاهش اتلاف آب از سطح برگ، نقش مهمی در افزایش کارایی مصرف آب و تحمل تنش کم‌آبی ایفا کند. سیلیس با تقویت ساختار بافت‌های گیاهی و بهبود سیستم دفاعی، حساسیت گیاه به تنش‌های محیطی را کاهش می‌دهد (راد^۲ و همکاران، ۲۰۲۴). در مجموع به‌نظر می‌رسد، به‌کارگیری هم‌زمان این ترکیبات در قالب یک مدیریت تغذیه‌ای تلفیقی می‌تواند از طریق بهبود وضعیت تغذیه‌ای، تقویت سامانه‌های دفاعی و افزایش کارایی فیزیولوژیک، به کاهش اثرات منفی تنش کم‌آبی بر رشد و عملکرد لوبیا چیتی کمک کند. با این حال، پاسخ گیاه به این تیمارها به‌شدت وابسته به شرایط محیطی، شدت تنش و زمان و نحوه کاربرد نهاده‌هاست. از این‌رو، ارزیابی میدانی این ترکیبات در شرایط واقعی زراعی برای ارائه توصیه‌های کاربردی ضروری به‌نظر می‌رسد.

۲. پیشینه پژوهش

۲.۱. پیشینه نظری

لوبیا چیتی یکی از گونه‌های مهم خانواده حبوبات است که به‌عنوان منبع پروتئینی ارزان و مفید در بسیاری از مناطق جهان، به‌ویژه کشورهای در حال توسعه، شناخته می‌شود. علاوه بر ارزش غذایی، این گیاه نقش مهمی در بهبود کیفیت خاک از طریق فرایند تثبیت نیتروژن دارد که به کاهش مصرف کودهای شیمیایی و حفاظت از محیط زیست کمک می‌کند (ملادنو و همکاران، ۲۰۲۳). با وجود مزایای متعدد، رشد و تولید لوبیا چیتی تحت تأثیر عوامل محیطی متعددی قرار دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به تنش‌های آبی اشاره کرد. کمبود آب یکی از اصلی‌ترین محدودیت‌های

1. Tuiwong
2. Rad

کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که عملکرد محصولات زراعی را به شدت کاهش می‌دهد و با تأثیر بر سازوکارهای فیزیولوژیکی گیاه، چالش‌های جدی را برای کشاورزان ایجاد می‌کند.

مطالعات نشان داده‌اند که در شرایط کم‌آبی، فعالیت‌های متابولیکی گیاه دچار اختلال می‌شود، به گونه‌ای که کاهش جذب آب و اختلال در تعادل یونی موجب محدود شدن رشد سلولی و کاهش نرخ فتوسنتز می‌گردد. همچنین، فشار اکسیداتیو ناشی از افزایش گونه‌های فعال اکسیژن سبب آسیب به ساختار غشایی و افزایش پراکسیداسیون لیپیدها می‌شود (دوجموویک^۱ و همکاران، ۲۰۲۳). گیاهان برای مقابله با این شرایط، سازوکارهایی مانند افزایش تولید مواد اسمولیت سازگار، تقویت سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی و تنظیم فرایندهای متابولیکی را فعال می‌کنند که می‌تواند تا حدی اثرات زیان‌بار خشکی را کاهش دهد. از دیدگاه مدیریت کشاورزی، استفاده هدفمند از کودهای آلی و معدنی، به‌ویژه در شرایط استرس، می‌تواند به بهبود عملکرد گیاه کمک کند (ال‌هاواری^۲ و همکاران، ۲۰۲۳).

در خاک‌های آهکی با pH نسبتاً بالا، فراهمی زیستی روی محدود است و در شرایط خشکی جذب آن از طریق ریشه کاهش می‌یابد. روی در فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، سنتز پروتئین، پایداری غشاها و تنظیم بیان ژن‌های مرتبط با تنش نقش دارد (توی ونگ و همکاران، ۲۰۲۱). استفاده از فرم نانویی این عنصر به دلیل فراهمی زیستی بیشتر و جذب سریع‌تر از طریق برگ، می‌تواند به تقویت سامانه‌های دفاعی گیاه و کاهش خسارت تنش خشکی کمک کند. اسیدهای آمینه به‌منظور بهبود تنظیم اسمزی، انتقال مواد پرورده و افزایش سنتز ترکیبات متابولیکی (ژی و همکاران، ۲۰۲۱) و سیلیکات‌پتاسیم به‌عنوان عاملی مؤثر در افزایش استحکام دیواره سلولی، کاهش تعرق و افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش‌های اسمزی و اکسیداتیو (راد و همکاران، ۲۰۲۴)، حائز اهمیت هستند.

هیومیک‌اسید به‌عنوان یک محرک طبیعی رشد، با بهبود ساختار خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و تحریک فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید، شرایط مساعدتری برای توسعه ریشه و جذب مواد مغذی فراهم می‌آورد. در زمینه عناصر معدنی، پتاسیم نقش کلیدی در تنظیم فشار اسمزی، کنترل تعرق و فعالیت آنزیم‌ها ایفا می‌کند. بنابراین، استفاده از کودهایی مانند سولفات پتاسیم که عاری از یون‌های کلر است، به‌ویژه برای گیاهان حساس به شوری اهمیت دارد و می‌تواند مقاومت به خشکی را افزایش دهد (احمد^۳ و همکاران، ۲۰۲۳).

همچنین، محلول‌پاشی برگی به‌عنوان روشی مکمل در تغذیه گیاهان در شرایط محدودیت رطوبت خاک، مزایای قابل توجهی دارد. نانوکودهای روی با فراهم کردن عناصر به‌صورت تدریجی و مؤثر، موجب افزایش فعالیت آنزیم‌ها و استحکام غشاهای سلولی می‌شوند. اسیدهای آمینه نیز با نقش در سنتز پروتئین‌ها و ارتقای واکنش‌های دفاعی گیاه، به افزایش مقاومت به تنش کمک می‌کنند (باقری و همکاران، ۱۴۰۱). از سوی دیگر، سیلیکات‌پتاسیم با تقویت ساختار دیواره سلولی و کاهش تبخیر آب، به حفظ سلامت گیاه در شرایط کم‌آبی کمک شایانی می‌نماید. پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که ترکیب این مواد می‌تواند در بهبود شرایط فیزیولوژیکی و افزایش عملکرد محصول تحت تنش آبی مؤثر باشد. با توجه به پیچیدگی تعامل بین گیاه، محیط و تیمارهای تغذیه‌ای، انجام آزمایش‌های میدانی در شرایط طبیعی با هدف ارزیابی عملکرد این ترکیبات در بهبود مقاومت به خشکی ضروری است. هدف این پژوهش، بررسی اثرات ترکیبی کودهای آلی و معدنی و محلول‌پاشی‌های مختلف بر رشد، ویژگی‌های بیوشیمیایی و عملکرد لوبیا چیتی در شرایط تنش کم‌آبی است تا بتوان راه‌کارهای مدیریتی عملی و بهینه برای کشاورزان ارائه نمود و ضمن افزایش بهره‌وری، پایداری کشاورزی را ارتقا داد.

۲.۲. پیشینه تجربی

در مطالعه ال‌بلتاجی^۱ و همکاران (۲۰۲۳)، محلول‌پاشی برگی هیومات پتاسیم^۲ به غلظت ۰/۳ گرم در لیتر باعث افزایش معنی‌دار معنی‌دار شاخص سطح برگ، کلروفیل و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شد و در نهایت عملکرد دانه را تا ۱۵ درصد افزایش داد. در مطالعه حافظ^۳ و همکاران (۲۰۲۱)، محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم به غلظت ۲ میلی‌مول بر لیتر (معادل حدود ۲/۴ گرم در لیتر سیلیکات پتاسیم) منجر به افزایش ۲۰ درصدی تعداد غلاف در بوته، ۱۸ درصدی وزن صددانه و بهبود تعادل یون‌های K^+ و Na^+ در برگ‌ها شد. همچنین فعالیت آنزیم‌های خاک (آلدولاز و دهیدروژناز) تا ۲۵ درصد افزایش یافت.

در پژوهشی، اثر محلول‌پاشی برگی سلنیوم و گوگرد و برهم‌کنش آن‌ها بر رشد، عملکرد و کیفیت تغذیه‌ای لوبیا قرمز بررسی شد. در این مطالعه از سلنات سدیم، نانوذرات سلنیوم پوشش‌دهنده با صمغ عربی و سولفات سدیم در غلظت‌های مختلف و همچنین ترکیب سولفات سدیم با سلنیوم و نانوسلنیوم استفاده گردید. نتایج نشان داد که کاربرد برگی سلنیوم، نانوسلنیوم و سولفات سدیم تا غلظت‌های متوسط، موجب بهبود معنی‌دار شاخص‌های رشد رویشی از جمله طول ریشه و ساقه، وزن تر و خشک گیاه، تعداد برگ و سطح فتوسنتزی شد. همچنین افزایش قابل‌توجهی در محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، وزن صددانه، کربوهیدرات کل، پروتئین خام و عناصر معدنی مشاهده گردید. برهم‌کنش سولفات سدیم با سلنیوم یا نانوسلنیوم، به‌ویژه در غلظت‌های پایین تا متوسط، بیش‌ترین تأثیر را بر بهبود رشد رویشی، عملکرد دانه، محتوای کلروفیل و ارتقای ارزش غذایی بذر لوبیا قرمز نشان داد. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش بیانگر نقش مثبت سلنیوم، به‌ویژه به‌صورت نانوذره و در تعامل با گوگرد، در بهبود رشد، عملکرد و کیفیت تغذیه‌ای لوبیا قرمز است (عبدالحماد^۴ و همکاران، ۲۰۲۳).

در پژوهشی دیگری، اثر محلول‌پاشی برگی سیلیکات پتاسیم در غلظت‌های مختلف و سطوح متفاوت تنش خشکی بر صفات فیزیولوژیک، زراعی و کیفی گیاه کاملینا مورد بررسی قرار گرفت. تیمارها شامل چهار غلظت سیلیکات پتاسیم (صفر، ۱، ۲ و ۳ گرم در لیتر) و سه رژیم آبیاری (آبیاری مطلوب، قطع آبیاری از مرحله تشکیل خورجینک و قطع آبیاری از مرحله گل‌دهی) بودند. نتایج نشان داد که محدودیت آبیاری باعث کاهش معنی‌دار صفات فیزیولوژیک (محتوای نسبی آب برگ، مقاومت روزه‌ای، دمای سایه‌انداز و کلروفیل کل) و صفات زراعی (تعداد خورجینک در بوته، تعداد دانه در خورجینک، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و کارایی مصرف آب) و همچنین درصد روغن شد. با این حال، محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم توانست اثرات منفی تنش خشکی را به‌طور قابل‌توجهی تعدیل کند. بیش‌ترین عملکرد دانه، کارایی مصرف آب و درصد روغن به‌ترتیب با مصرف ۲ گرم در لیتر سیلیکات پتاسیم تحت شرایط آبیاری مطلوب حاصل شد (راد^۵ و همکاران، ۲۰۲۰). در زمینه هیومیک‌اسید، حداد و همکاران^۶ (۲۰۲۲) محلول‌پاشی یک درصد حجمی-وزنی (۱۰ گرم در لیتر) را در دو مرحله انجام دادند؛ اولین نوبت ۱۵ روز پیش از گلدهی و نوبت دوم ۱۰ روز بعد از آن. هر نوبت با مصرف ۴۰۰ لیتر محلول در هکتار، به‌صورت اسپری روی برگ‌ها پاشیده شد. این تیمار موجب افزایش ۲۵ درصدی شاخص سطح برگ، ۲۲ درصدی شدت فتوسنتز و کاهش ۱۵ درصدی هدایت روزه‌ای در ذرت تحت تنش آبی گردید. در پژوهشی، اثر محلول‌پاشی برگی نانوذرات اکسید روی در دو غلظت ۲۵ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر تحت شرایط بدون تنش و تنش خشکی بررسی شد. نتایج نشان داد که تنش خشکی با القای تنش اکسیداتیو موجب کاهش رشد و زیست‌توده گیاه

1. El-Beltagi
2. Potassium Humate
3. Hafez
4. Abouelhamd
5. Rad
6. Haddad

گردید، درحالی که کاربرد نانوذرات اکسید روی، به ویژه در غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر، با بهبود شاخص های رشدی و فتوسنتزی، افزایش فعالیت سامانه های آنتی اکسیدانی و تجمع ترکیبات تنظیم کننده اسمزی، اثرات منفی تنش خشکی را به طور معنی داری کاهش داد. به طور کلی، محلول پاشی برگی نانوذرات اکسید روی در هر دو سطح تنش، به عنوان تیماری مؤثر در افزایش تحمل گیاه به تنش خشکی معرفی شد. (غنی^۱ و همکاران، ۲۰۲۲).

۳. روش شناسی پژوهش

۳.۱. زمان اجرا و طرح آزمایش

پژوهش حاضر به منظور بررسی تأثیر تغذیه ترکیبات آلی و معدنی بر اجزای عملکرد و عملکرد دانه لوبیا چیتی تحت شرایط تنش کم آبی در دو سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ و ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی ایستگاه خیرآباد استان زنجان انجام گرفت. تاریخ کاشت در سال اول و دوم به ترتیب ۱۵ اردیبهشت ماه ۱۴۰۱ و ۲۰ اردیبهشت ماه ۱۴۰۲ و تاریخ برداشت به ترتیب ۲۰ مرداد ماه ۱۴۰۱ و ۲۵ مرداد ماه ۱۴۰۲ بود. این ایستگاه در ۲۵ کیلومتری شرق زنجان و در موقعیت جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۱ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۴۷ دقیقه طول شرقی، با ارتفاع ۱۷۷۰ متر از سطح دریا واقع شده و اقلیم منطقه سرد و خشک براساس طبقه بندی آمبرژه است. میانگین بلندمدت بارندگی سالیانه در این منطقه ۲۸۵ میلی متر و متوسط تعداد روزهای یخبندان حدود ۱۴۲ روز گزارش شده است. آزمایش به صورت کرت های خرد شده در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با چهار تکرار اجرا شد. عامل اصلی آزمایش شامل دو سطح دور آبیاری بود که در کرت های اصلی قرار گرفت؛ آبیاری کامل با فواصل پنج روزه و آبیاری تنشی با فواصل نه روزه.

۳.۲. نحوه اعمال تیمارهای آزمایشی

اعمال تیمارهای آبیاری از مرحله فنولوژیک ۷۴ (ظهور سومین برگ حقیقی) آغاز و تا پایان دوره رشد ادامه یافت. آبیاری ها با استفاده از سیستم آبیاری قطره ای انجام شد که شامل تیپ ۱۶ میلی متری، فشارشکن و کنتور حجمی مستقل برای هر کرت اصلی بود تا کنترل دقیق حجم آب مصرفی امکان پذیر شود. براساس قرائت کنتورهای حجمی، مجموع آب مصرفی در طول فصل رشد به ترتیب حدود ۷۰۰۰ مترمکعب در هکتار در تیمار آبیاری کامل و ۴۰۰۰ مترمکعب در هکتار در تیمار تنش کم آبی برآورد شد. پیش از کاشت، نمونه برداری خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی متر انجام و ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت، pH، هدایت الکتریکی، ماده آلی، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل جذب اندازه گیری شد (جدول ۱). براساس تفسیر نتایج آزمون خاک و دستورالعمل های توصیه کودی برای حیوانات در مناطق نیمه خشک، فسفر در محدوده متوسط و پتاسیم در محدوده نسبتاً کافی ارزیابی شد. با توجه به پایین بودن ماده آلی خاک، کاربرد منبع آلی به منظور بهبود ساختمان خاک، افزایش ظرفیت نگهداشت آب و ارتقای کارایی جذب عناصر غذایی ضروری تشخیص داده شد؛ از این رو، ۲ کیلوگرم در هکتار هیومیک اسید به عنوان تیمار تغذیه خاکی در نظر گرفته شد.

اگرچه سطح پتاسیم خاک در محدوده نسبتاً کافی قرار داشت، مصرف ۵۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم با هدف اصلاح کمبود خاک انجام نشد، بلکه به منظور بررسی نقش فیزیولوژیک پتاسیم در بهبود تحمل گیاه به تنش کم آبی مورد استفاده قرار گرفت. پتاسیم در تنظیم فشار اسمزی سلول، کنترل فعالیت روزنه ها، فعال سازی آنزیم ها و حفظ تعادل

آب نقش اساسی دارد و در شرایط تنش خشکی، نیاز گیاه به این عنصر افزایش می‌یابد. هم‌چنین کاهش رطوبت خاک می‌تواند تحرک و دسترسی ریشه به پتاسیم را محدود کند، بنابراین تأمین تکمیلی آن به‌عنوان یک تیمار تغذیه‌ای برای ارزیابی اثرات آن بر کارایی مصرف آب و پاسخ گیاه به تنش کم‌آبی انجام شد. کود سولفات پتاسیم پیش از کاشت، هم‌زمان با آخرین دیسک، به‌صورت یکنواخت در سطح کرت‌های مربوطه پخش و تا عمق حدود ۱۵ سانتی‌متر با خاک مخلوط شد. هیومیک‌اسید نیز در دو نوبت (مرحله ۴-۶ برگ و آغاز گلدهی) به‌صورت محلول در آب آبیاری از طریق سیستم آبیاری قطره‌ای به خاک اعمال شد.

جدول ۱. مشخصات خاک محل آزمایش

| عمق نمونه (سانتی‌متر) | اسیدیته | هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) | پتاسیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | فسفر (میلی‌گرم بر کیلوگرم) | نیترژن کربن آلی | شن (درصد) | سیلت (درصد) | رس (درصد) | بافت خاک |
|-----------------------|---------|-----------------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------|-----------|-------------|-----------|----------|
| ۰-۳۰ | ۷/۲ | ۰/۷۷ | ۱۶۸ | ۳۰/۶ | ۰/۰۷ | ۱/۳۳ | ۲۶ | ۳۱ | سیلی لوم |

عامل تغذیه خاکی شامل دو سطح بود که در کرت‌های اصلی همراه با تیمار آبیاری اعمال شد؛ ۱- شاهد بدون مصرف کود پایه و ۲- مصرف هم‌زمان ۵۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم و ۲ کیلوگرم در هکتار هیومیک‌اسید. کودها در فاز رشد رویشی و حدود ۱۵ روز پیش از گل‌دهی، به‌صورت نواری در عمق تقریبی ۵ سانتی‌متری خاک و در مجاورت منطقه گسترش ریشه اعمال شدند. مصرف کودها هم‌زمان با اولین آبیاری اختصاصی هر کرت انجام گرفت تا جذب مؤثر عناصر غذایی تسهیل شود. انتخاب سولفات پتاسیم به‌دلیل شوری کم‌تر نسبت به کلرید پتاسیم صورت گرفت تا از بروز اثرات منفی اسمزی بر جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاه جلوگیری شود (احمد و همکاران، ۲۰۲۳). هیومیک‌اسید نیز با هدف بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، تحریک فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید و ارتقای تحمل گیاه به تنش کم‌آبی مورد استفاده قرار گرفت. عامل فرعی آزمایش شامل چهار سطح محلول‌پاشی برگ بود که در کرت‌های فرعی اعمال شد؛ ۱- شاهد (محلول‌پاشی با آب مقطر)، ۲- نانوکود روی، ۳- اسید آمینه و ۴- سیلیکات پتاسیم. لازم به ذکر است که تیمار محلول‌پاشی نانوکود روی در پژوهش حاضر به‌منظور بررسی نقش روی در بهبود پاسخ گیاه به تنش کم‌آبی در نظر گرفته شد. هم‌چنین تمامی محلول‌ها با غلظت ۲ در هزار در آب مقطر تهیه و با استفاده از سمپاش دستی مجهز به نازل مخروطی و فشار یکنواخت اعمال شدند. محلول‌پاشی‌ها در دو نوبت انجام گرفت؛ نوبت اول ۱۰ روز پیش از گل‌دهی و نوبت دوم در ابتدای مرحله غلاف‌بندی. حجم محلول مصرفی در هر کرت به‌گونه‌ای تنظیم شد که سطح برگ‌ها به‌طور کامل و یکنواخت پوشش داده شود و از چکیدن محلول جلوگیری گردد.

۳.۳. صفات اندازه‌گیری شده

۳.۳.۱. اجزای عملکرد و عملکرد

برای تعیین تعداد بوته در مترمربع، در مرحله استقرار کامل بوته‌ها، تعداد بوته‌های موجود در یک مترمربع از سطح خالص هر کرت شمارش و ثبت شد. در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک، به‌منظور اندازه‌گیری تعداد غلاف در بوته، ۱۰ بوته به‌طور تصادفی از ناحیه خالص هر کرت انتخاب و تعداد کل غلاف‌های تشکیل‌شده روی هر بوته شمارش و میانگین‌گیری شد. سپس برای تعیین تعداد دانه در غلاف، از بوته‌های نمونه‌برداری‌شده، ۲۰ غلاف سالم و کاملاً رشدیافته به‌صورت تصادفی برداشت گردید؛ پس از بازکردن غلاف‌ها، تعداد دانه‌های هر غلاف شمارش و میانگین آن محاسبه شد. به‌منظور اندازه‌گیری وزن صدانه، پس از خرمن‌کوبی و تمیزکردن بذرها، از هر کرت نمونه‌ای از دانه‌ها برداشته شد و تعداد ۱۰۰ دانه

به صورت تصادفی انتخاب گردید. وزن آن‌ها با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری و پس از تعدیل به رطوبت استاندارد ۱۴ درصد گزارش شد. تمامی نمونه‌برداری‌ها از سطح خالص هر کرت انجام شد تا اثر بوته‌های حاشیه حذف گردد. در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک، برداشت از سطح خالص ۵ مترمربعی هر کرت انجام شد. پس از خرمن‌کوبی، وزن دانه‌ها اندازه‌گیری و عملکرد دانه براساس رطوبت استاندارد ۱۴ درصد تصحیح و به صورت کیلوگرم در هکتار گزارش گردید.

۲.۳.۳. عملکرد بیولوژیک (زیست‌توده)

کل اندام هوایی گیاهان برداشت‌شده از سطح خالص هر کرت بلافاصله پس از برداشت توزین شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند تا به وزن ثابت برسند. عملکرد بیولوژیک براساس وزن ماده خشک و به صورت کیلوگرم در هکتار محاسبه شد.

۳.۳.۳. شاخص برداشت

شاخص برداشت از نسبت عملکرد دانه به عملکرد بیولوژیک طبق رابطه زیر محاسبه گردید. در انتها داده‌های حاصل از آزمایش نیز با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹/۱) مورد تجزیه واریانس قرار گرفته و میانگین‌ها به وسیله آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD)^۱ در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شدند. برای رسم شکل‌ها از نرم‌افزار اکسل^۲ (نسخه ۲۰۱۳) استفاده گردید.

۴. یافته‌های پژوهش

۴.۱. اجزای عملکرد

۴.۱.۱. تعداد بوته در مترمربع

بررسی نتایج اجزای عملکرد نشان داد که تعداد بوته در مترمربع در سطح احتمال ۱ درصد تحت تأثیر دور آبیاری قرار گرفتند. همچنین اثر سال نیز بر تعداد بوته در مترمربع در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود. افزون بر این، محلول‌پاشی نیز اثر معنی‌داری وزن صددانه (در سطح ۵ درصد) داشت (جدول ۲). با افزایش فاصله آبیاری از پنج به نه روز، کاهش معنی‌داری در تمامی اجزای عملکرد مشاهده شد. تعداد بوته در مترمربع از ۳۰/۸۲ به ۲۷/۸۱ بوته کاهش یافت (جدول ۳)، که بیانگر کاهشی معادل ۹/۸ درصد بود.

۴.۱.۲. تعداد غلاف در بوته

اثر محلول‌پاشی بر تعداد غلاف در بوته در سال‌های مختلف در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود، که نشان‌دهنده تفاوت پاسخ لوبیا چیتی به انواع محلول‌پاشی تحت شرایط آزمایش است. بررسی مقادیر میانگین نشان داد که تیمار سیلیکات‌پتاسیم در هر دو سال بیش‌ترین تعداد غلاف را تولید کرد، به طوری که در سال اول میانگین آن ۸/۱۳ غلاف بود که نسبت به تیمار شاهد (۶/۴۷) افزایش ۲۵/۷ درصدی را نشان داد. این یافته بیانگر نقش کلیدی سیلیکات‌پتاسیم در تحریک فرایندهای زیستی و افزایش ظرفیت تشکیل غلاف است. تیمارهای نانوکود روی و اسیدآمینه نیز نسبت به شاهد افزایش قابل توجهی داشتند؛ در سال اول میانگین تعداد غلاف در این تیمارها به ترتیب ۷/۰۸ و ۷/۲۲ بود، که افزایش ۹/۳ و ۱۱/۶ درصدی نسبت به شاهد نشان

1. Least Significant Difference

2. Excel

می‌دهد. این نتایج حاکی از اثر مثبت تغذیه برگی حاوی ریزمغذی‌ها و اسیدآمین‌ها بر فرایند تشکیل غلاف است، هرچند میزان اثر آن‌ها کم‌تر از سیلیکات‌پتاسیم بود. در سال دوم، تفاوت‌ها فاحش‌تر بود و اثر سال برجسته شد؛ تیمار سیلیکات‌پتاسیم میانگین ۷/۸۵ غلاف داشت که نسبت به شاهد (۶/۰۵) افزایش ۲۹/۸ درصدی نشان داد. تیمار نانوکود روی و اسیدآمین‌ها نیز به ترتیب با ۶/۴۵ و ۷/۰۵ غلاف، افزایش ۶/۶ و ۱۶/۵ درصدی نسبت به شاهد داشتند (شکل ۱)، که اختلافات قابل توجهی با سال اول دارند و نشان‌دهنده حساسیت پاسخ گیاه به شرایط محیطی و اقلیمی است. این نتایج تأکید می‌کند که تغذیه برگی، به‌ویژه با ترکیبات حاوی سیلیکات، می‌تواند پتانسیل تولید غلاف را به شکل قابل توجهی افزایش دهد و اثر تیمارهای دیگر، اگرچه مثبت، نسبت به سیلیکات‌پتاسیم کم‌تر و متغیر بین سال‌هاست.

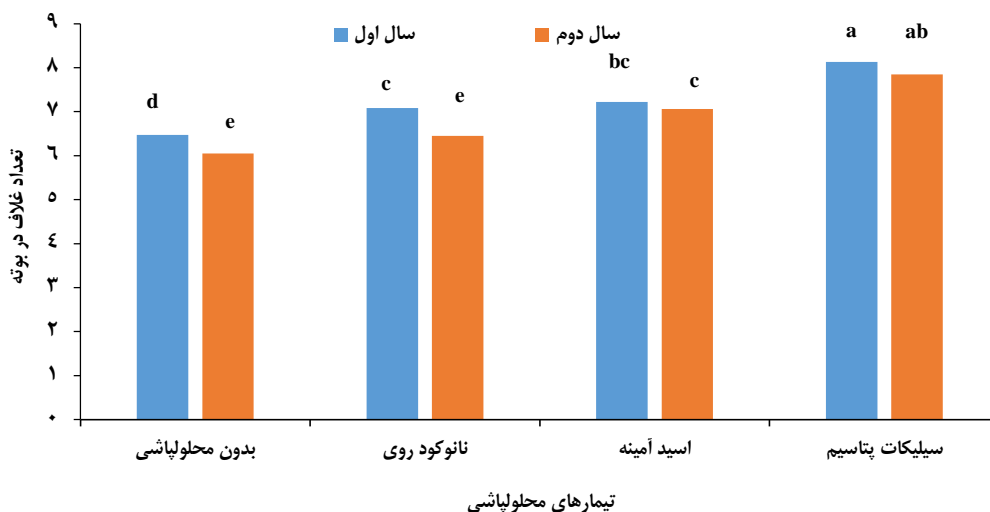
جدول ۲. تجزیه واریانس اجزای عملکرد، عملکرد، شاخص برداشت و زیست‌توده لوبیا چیتی تحت تاثیر رژیم‌های آبیاری، کوددهی و محلول‌پاشی

| منابع تغییرات | درجه آزادی | تعداد بوته در مترمربع | تعداد غلاف در بوته | تعداد دانه در غلاف | وزن صدانه | عملکرد دانه | شاخص برداشت | زیست‌توده |
|-------------------------------------|------------|-----------------------|--------------------|--------------------|-----------|---------------|-------------|---------------|
| دور آبیاری | ۱ | ۳۳۹/۷۱** | ۱۶/۲۳** | ۳۳/۰۳** | ۱۳/۶۱* | ۲۵۰۶۹۱۷۷/۷۱** | ۰/۲۷** | ۲۲۱۰۹۲۱۶/۴۸** |
| سال | ۱ | ۷۲/۸۳* | ۱۲/۳۸** | ۰/۸۸ns | ۵/۳۶ns | ۱۶۲۹۶۵۰/۲۳** | ۰/۰۵** | ۵۳۴۸۸۰/۲۶ns |
| سال × دور آبیاری | ۱ | ۳/۹۹ns | ۰/۲۱ns | ۰/۳۶ns | ۰/۶۵ns | ۲۳۷۹۳/۲۱ns | ۰/۰۰۰۱ns | ۲۱۴۷۵/۹۸ns |
| خطای a | ۱۲ | ۱۲/۴۳ | ۰/۵۷ | ۱/۱۱ | ۱/۷۱ | ۱۹۷۷/۲۶ | ۰/۰۰۷ | ۵۷۰۹۲/۱۱ |
| کود | ۱ | ۰/۳۵ns | ۰/۰۷ns | ۰/۲۷ns | ۸/۰۷ns | ۵۴۷۳/۰۶ns | ۰/۰۰۰۱ns | ۳۱۷۶۴۷/۵۶ns |
| کود × دور آبیاری | ۱ | ۵/۵۲ns | ۰/۰۷ns | ۱/۳۷ns | ۱/۴۲ns | ۲۲۵۷/۱۸ns | ۰/۰۰۱ns | ۹۶۹۲۴۲/۱۷ns |
| کود × سال | ۱ | ۰/۹۷ns | ۰/۰۷ns | ۰/۰۲ns | ۰/۳۱ns | ۵۶۷۶۹/۵۳ns | ۰/۰۰۰۱ns | ۱۰۵۶۳۴/۲۹ns |
| کود × سال × دور آبیاری | ۱۲ | ۱/۷۸ns | ۰/۱۹ns | ۰/۰۳ns | ۰/۰۱ns | ۲۱۰/۸۰ns | ۰/۰۰۰۱ns | ۲۱۱۱۱/۳۰ns |
| خطای b | ۱۲ | ۴/۱۶ | ۰/۲۳ | ۰/۳۹ | ۲/۴۱ | ۱۲۳۰۲۹/۱۰ | ۰/۰۰۳ | ۲۶۶۱۰۶/۱۷ |
| محلول‌پاشی | ۳ | ۱/۵۱ns | ۰/۴۱ns | ۲/۵۱** | ۷/۰۲* | ۲۷۶۳۱۵/۶۴* | ۰/۰۱۳** | ۲۲۵۷۰۲۱/۸۱** |
| محلول‌پاشی × کود | ۳ | ۱/۵۲ns | ۰/۳۲ns | ۰/۲۷ns | ۲/۸۸ns | ۷۵۵۹/۲۴ns | ۰/۰۰۰۱ns | ۴۹۲۴۳۹/۹۲** |
| محلول‌پاشی × سال | ۳ | ۰/۵۱ns | ۰/۷۱* | ۰/۲۷ns | ۰/۹۷ns | ۲۳۷۶۱۵/۹۸ns | ۰/۰۰۰۹ns | ۲۱۹۸۶/۴۰ns |
| محلول‌پاشی × دور آبیاری | ۳ | ۲/۲۷ns | ۰/۵۱ns | ۰/۷۴* | ۲/۵۴ns | ۷۱۰۰۹/۲۱ns | ۰/۰۰۰۱ns | ۸۶۴۲۶۹/۳۳** |
| محلول‌پاشی × دور آبیاری × سال | ۳ | ۱/۳۲ns | ۰/۳۰ns | ۰/۱۷ns | ۰/۳۴ns | ۲۳۲۲۸/۴۸ns | ۰/۰۰۰۱ns | ۳۱۴۱/۳۲ns |
| محلول‌پاشی × کود × سال | ۳ | ۱/۵۰ns | ۰/۱۲ns | ۰/۰۸ns | ۱/۰۴ns | ۴۹۷۳۰/۴۳ns | ۰/۰۰۰۱ns | ۱۱۳۰/۶۵ns |
| محلول‌پاشی × کود × دور آبیاری | ۳ | ۰/۵۴ns | ۰/۱۷ns | ۰/۴۷ns | ۱/۱۳ns | ۱۱۵۲۰۳/۴۳ns | ۰/۰۰۰۱ns | ۳۵۸۶۶/۷۲ns |
| محلول‌پاشی × کود × دور آبیاری × سال | ۳ | ۴/۶۰ns | ۴۰/۰۲ns | ۰/۰۳ns | ۰/۳۶** | ۱۴۶۱۱/۹۲ns | ۰/۰۰۰۱ns | ۱۰۷۹۶/۴۴ns |
| خطای کل | ۷۱ | ۴/۰۸ | ۰/۲۴ | ۰/۲ | ۱/۸۵ | ۴۵۷۴۰/۹۳ | ۰/۰۰۳ | ۱۲۷۳۹۳/۲۸ |
| ضریب تغییرات (درصد) | | ۶/۸۸ | ۶/۵۱ | ۷/۸۷ | ۳/۳۹ | ۸/۷۲ | ۱۰/۵۱ | ۷/۳۶ |

ns و ** و ***: به ترتیب نمایانگر معنی‌داری در سطح ۵، ۱ درصد و عدم معنی‌داری می‌باشند

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر آبیاری و محلول‌پاشی بر اجزای عملکرد، عملکرد، شاخص برداشت و زیست‌توده لوبیا

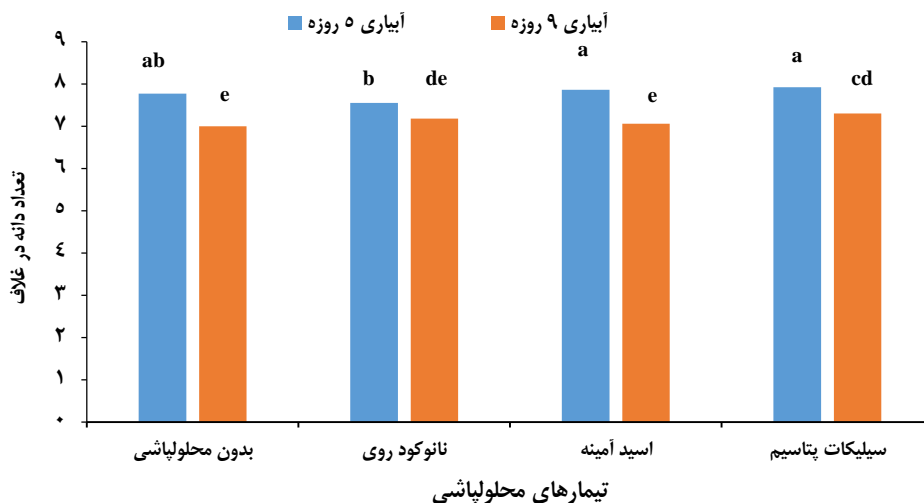
| تیمار | تعداد بوته در مترمربع | وزن صدانه (گرم) | عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) | شاخص برداشت (درصد) |
|-------------------|-----------------------|-----------------|--------------------------------|--------------------|
| دور آبیاری ۵ روزه | ۳۰/۸۲a | ۴۲/۹۱a | ۳۰۲۸/۰۲a | ۰/۵۷a |
| دور آبیاری ۹ روزه | ۲۷/۸۱b | ۴۲/۳۴b | ۲۱۵۰/۹۰b | ۰/۴۷b |
| LSD | ۲/۶۲۲۸ | ۱/۰۹۲۵ | ۲۶۷/۷۹ | ۰/۰۲۶۷ |
| شاهد | ۲۹/۲۵a | ۴۲/۹۹a | ۲۵۴۷/۹۴b | ۰/۵۲b |
| نانو کود روی | ۲۹/۶۵a | ۴۲/۹۵a | ۲۵۳۳/۳۱b | ۰/۵۶a |
| اسید آمینه | ۲۹/۰۳a | ۴۲/۲۰b | ۲۵۴۶۰/۰۳b | ۰/۵۰b |
| سیلیکات‌پتاسیم | ۲۹/۲۸a | ۴۲/۱۳b | ۲۷۳۳۵۶/۵۶b | ۰/۵۳ab |
| LSD | ۱/۳۱۴۹ | ۰/۸۶۹۲ | ۱۵۳/۸۴ | ۰/۰۳۷۹ |



شکل ۱. مقایسه میانگین اثر برهم کنش محلول پاشی در سال بر تعداد غلاف در بوته لوبیا چیتی (میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می‌باشند براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند).

۳.۱.۴. تعداد دانه در غلاف

بررسی اثر متقابل دور آبیاری و محلول‌پاشی تعداد دانه در غلاف نیز نشان داد که بیش‌ترین تعداد دانه (۷/۹۲ عدد) در تیمار آبیاری منظم (هر پنج روز یک‌بار) همراه با محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم به‌دست آمد. این مقدار از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با تیمار اسید آمینه در همان شرایط آبیاری (۷/۸۶ عدد) نداشت. در مقابل، کم‌ترین تعداد دانه در غلاف (۷ عدد) مربوط به تیمار تنش آبی بدون محلول‌پاشی بود که در مقایسه با تیمار سیلیکات‌پتاسیم تحت آبیاری کامل، کاهش قابل‌توجهی معادل ۱۱/۶۵ درصد را نشان داد (شکل ۲). این اختلاف گویای نقش کلیدی تغذیه برگ، به‌ویژه ترکیبات حاوی سیلیکات، در حفظ توان زایشی گیاه و افزایش پتانسیل تولید دانه در شرایط بهینه رطوبتی است.



شکل ۲. مقایسه میانگین اثر برهم کنش آبیاری در محلول‌پاشی بر تعداد دانه در غلاف لوبیا چیتی (میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می‌باشند براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند).

۴.۱.۴. وزن صدانه

وزن صدانه در سطح احتمال ۵ درصد تحت تأثیر دور آبیاری و محلول‌پاشی قرار گرفت با افزایش فاصله آبیاری از پنج به نه روز، وزن صدانه کاهش ملایم ۱/۶ درصدی داشت و از ۴۲/۹۱ گرم به ۴۲/۲۴ گرم رسید که نشان‌دهنده تأثیر جزئی تنش آبی بر فرایند پرشدن دانه بود. مقایسه تیمارهای محلول‌پاشی نشان داد که بیش‌ترین وزن صدانه به‌صورت مشترک در تیمارهای شاهد (۴۲/۹۹ گرم) و نانوکود روی (۴۲/۹۵ گرم) ثبت شد. تیمارهای اسید آمینه و سیلیکات‌پتاسیم به‌ترتیب با میانگین‌های ۴۲۰/۲۰ و ۴۲/۱۳ گرم، کاهش نسبت به نانوکود روی نشان دادند و در گروه آماری دوم قرار گرفتند (جدول ۳). این یافته‌ها نشان می‌دهد، درحالی‌که سیلیکات‌پتاسیم اثر بیش‌تری بر تشکیل غلاف داشته، تأثیر آن بر افزایش اندازه یا وزن دانه نسبت به تیمارهای دیگر کم‌تر بوده است.

۴.۲. عملکرد دانه

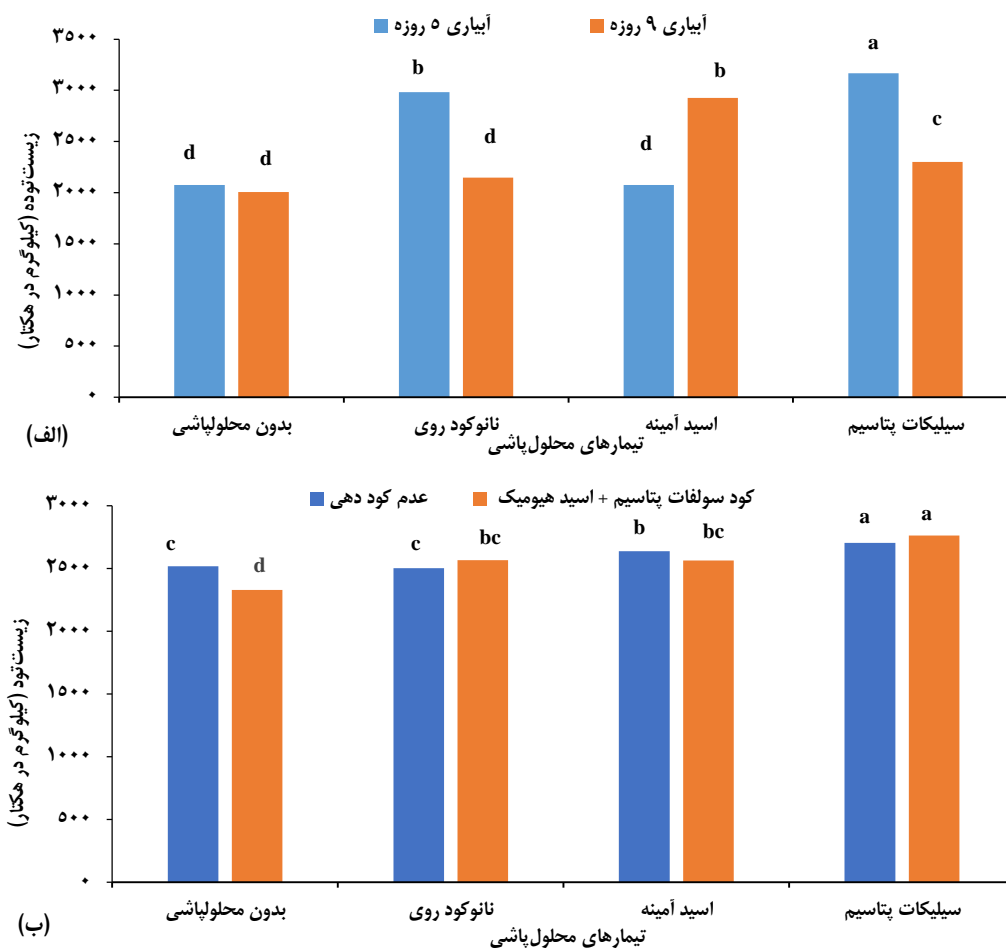
نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر دور آبیاری، محلول‌پاشی و برهم‌کنش محلول‌پاشی در سال در سطح احتمال ۱ درصد بر عملکرد دانه لوبیا معنی‌دار شد (جدول ۲). به‌طوری‌که با افزایش فاصله آبیاری از پنج روز به نه روز، عملکرد دانه لوبیا با کاهش حدود ۲۹ درصدی مواجه شد و از ۳۰۳۸/۰۲ کیلوگرم در هکتار به ۲۱۵۰/۹۰ کیلوگرم در هکتار رسید (جدول ۳). این کاهش چشم‌گیر و معنی‌دار در عملکرد دانه لوبیا نشان‌دهنده حساسیت بالای این گیاه به محدودیت آب در مراحل بحرانی رشد است که بیانگر نیاز این گیاه به تأمین منظم آب برای حفظ فرایندهای فیزیولوژیکی مؤثر در تشکیل و توسعه دانه می‌باشد. تفاوت معنی‌دار اثر سال در هر سال زراعی باشد که بر شدت تنش آبی و واکنش گیاه تأثیرگذار است (احمد و همکاران، ۲۰۲۳). در میان تیمارهای محلول‌پاشی، سیلیکات‌پتاسیم با ثبت عملکرد ۲۷۳۳ کیلوگرم در هکتار، بالاترین مقدار را به خود اختصاص داد و به‌طور میانگین حدود ۷ درصد افزایش نسبت به سایر تیمارها شامل شاهد (۲۵۴۷ کیلوگرم)، نانوکود روی (۲۵۳۳ کیلوگرم) و اسیدآمینه (۲۵۴۶ کیلوگرم) نشان داد (جدول ۳). این تفاوت عملکرد بیانگر برتری نسبی سیلیکات‌پتاسیم در بهبود عملکرد دانه تحت شرایط اعمال شده در این مطالعه است.

۴.۳. شاخص برداشت و زیست‌توده

نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که دو عامل دور آبیاری و محلول‌پاشی، تأثیر معنی‌داری (در سطح احتمال ۱ درصد) بر شاخص برداشت لوبیا چیتی داشتند. در شرایط آبیاری منظم (هر پنج روز یک‌بار)، شاخص برداشت به‌طور میانگین ۵۷ درصد به‌دست آمد، درحالی‌که افزایش فاصله بین دو آبیاری به نه روز موجب کاهش این شاخص به ۴۸ درصد شد. به‌عبارتی، محدودیت آبیاری منجر به افت ۱۵/۸ درصدی در شاخص برداشت گردید (جدول ۳). این کاهش، احتمالاً ناشی از کاهش نسبت عملکرد دانه به زیست‌توده کل در شرایط محدودیت آبی بوده است. بررسی تأثیر محلول‌پاشی نشان داد که تیمار نانوکود روی با ثبت شاخص برداشت ۵۶ درصد، بالاترین کارایی را در تبدیل زیست‌توده به دانه نشان داد. این مقدار در مقایسه با تیمارهای سیلیکات‌پتاسیم (۵۳/۵۱ درصد)، شاهد (۵۲/۵۹ درصد) و اسید آمینه (۵۰/۹۴ درصد)، به‌ترتیب حدود ۴/۶، ۶/۴ و ۹ درصد افزایش نشان داد (جدول ۳). این برتری عملکردی بیانگر نقش مؤثر عنصر روی در بهبود تخصیص مجدد مواد فتوسنتزی به اندام‌های زایشی و افزایش سهم عملکرد دانه از کل ماده خشک تولیدی گیاه می‌باشد.

تجزیه واریانس داده‌های زیست‌توده نشان داد که اثر برهم‌کنش‌های کوددهی × محلول‌پاشی و دور آبیاری × محلول‌پاشی در سطح احتمال ۱ درصد بر این صفت معنی‌دار بوده است (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین دور آبیاری ×

محلول پاشی نشان داد که بیشترین میزان زیست‌توده (۳۱۶۵/۳۲ کیلوگرم در هکتار) در شرایط آبیاری پنج روزه همراه با محلول پاشی سیلیکات‌پتاسیم حاصل شد. این تیمار نسبت به تیمارهای نانوکود روی در آبیاری پنج روزه (۲۹۸۱/۶۱ کیلوگرم در هکتار) و تیمار اسیدآمینه در آبیاری نه روزه (۲۹۲۵/۲۵ کیلوگرم در هکتار)، به ترتیب ۶/۱ و ۸/۲ درصد افزایش زیست‌توده را نشان داد. کمترین میزان زیست‌توده نیز به تیمار تنش خشکی (آبیاری نه روزه) بدون محلول پاشی اختصاص داشت که کاهش قابل توجهی در تولید ماده خشک نسبت به سایر تیمارها نشان داد (شکل ۳-الف). بررسی اثر متقابل بین کود پایه و محلول پاشی نیز بیانگر آن بود که در غیاب تغذیه پایه و بدون محلول پاشی، کمترین مقدار زیست‌توده به دست آمد که این امر اهمیت تغذیه تلفیقی در بهبود رشد و عملکرد گیاه را برجسته می‌کند. در مقابل، محلول پاشی سیلیکات‌پتاسیم در هر دو سطح تغذیه پایه، اثر مثبتی بر افزایش زیست‌توده داشت، به طوری که حتی در شرایط بدون مصرف کود پایه، این ترکیب توانست تولید زیست‌توده را به حدود ۲۷۶۲/۲۱ کیلوگرم در هکتار برساند، در حالی که در شرایط مصرف کود پایه نیز میزان زیست‌توده به ۲۷۴۰/۳۶ کیلوگرم در هکتار رسید (شکل ۳-ب). این یافته نشان می‌دهد که سیلیکات‌پتاسیم، به واسطه نقش در تقویت ساختار گیاه، بهبود کارایی مصرف آب، کاهش اثرات تنش اکسیداتیو و افزایش بازدهی فتوسنتز، به‌تنهایی نیز ظرفیت بالایی در حفظ و ارتقای رشد رویشی گیاه در شرایط کم‌آبی دارد.



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش آبیاری در محلول پاشی (الف) و کود دهی در محلول پاشی (ب) بر زیست‌توده لوبیا چیتی (میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می‌باشند براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند).

۵. بحث

براساس نتایج حاصل از این پژوهش، اجزای عملکرد لوبیا چیتی به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر افزایش فاصله آبیاری قرار گرفتند، به‌گونه‌ای که محدودیت در تأمین آب منجر به تضعیف هم‌زمان اجزای پایه‌ای و زایشی عملکرد شد. کاهش تعداد بوته در واحد سطح نشان می‌دهد که تنش کم‌آبی نه‌تنها بر مراحل زایشی، بلکه بر استقرار و بقای گیاهان نیز اثرگذار بوده است می‌یابد (سودک^۱ و همکاران، ۲۰۲۴). این واکنش می‌تواند بیانگر حساسیت مراحل اولیه رشد به وضعیت رطوبتی خاک باشد که در نهایت، ظرفیت بالقوه تولید غلاف و دانه را در واحد سطح محدود می‌کند. کاهش تعداد غلاف در بوته و تعداد دانه در غلاف در شرایط تنش آبی بیانگر آن است که فرایندهای زایشی لوبیا چیتی به‌ویژه در مراحل گل‌دهی و پس از آن، نسبت به محدودیت آب حساس هستند (غنی و همکاران، ۲۰۲۲). نتایج نشان داد که افزایش فاصله آبیاری با کاهش توان گیاه در حفظ گل‌ها و غلاف‌های تشکیل‌شده همراه بوده است، پدیده‌ای که می‌تواند ناشی از محدودشدن فتوسنتز، کاهش انتقال مواد فتوسنتزی به اندام‌های زایشی و افزایش ریزش اندام‌های نابالغ باشد. این الگو بیانگر آن است که در شرایط کم‌آبی، حتی در صورت آغاز موفق فرایند گل‌دهی، تداوم و تکامل ساختارهای زایشی با محدودیت مواجه می‌شود (اسلام^۲ و همکاران، ۲۰۲۴). نتایج پژوهش حاضر، هم‌چنین نشان داد که تیمارهای محلول‌پاشی برگی توانستند برخی از اجزای عملکرد را نسبت به تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش دهند، اگرچه شدت و نوع اثر آن‌ها بر اجزای مختلف عملکرد یکسان نبود. در این میان، محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم بیش‌ترین نقش را در حفظ تعداد غلاف در بوته نشان داد. این نتیجه حاکی از آن است که این ترکیب توانسته است پایداری فرایندهای زایشی را در شرایط محدودیت آب افزایش دهد. از منظر فیزیولوژیک، چنین پاسخی می‌تواند ناشی از نقش سیلیکات‌پتاسیم در بهبود وضعیت آبی گیاه، کاهش تنش اسمزی و افزایش مقاومت ساختاری اندام‌های زایشی باشد که در نهایت به کاهش ریزش گل و غلاف منجر شده است (پادل^۳ و همکاران، ۲۰۲۳).

در مقابل، وزن صددانه الگوی پاسخ متفاوتی نسبت به تعداد غلاف و دانه نشان داد. نتایج حاکی از آن است که تیمارهایی که در حفظ یا افزایش تعداد غلاف موفق‌تر بودند، لزوماً بیش‌ترین وزن دانه را تولید نکردند. این موضوع نشان می‌دهد که فرایندهای مؤثر بر پرشدن دانه تا حدی مستقل از فرایندهای تشکیل غلاف و تعیین تعداد دانه عمل می‌کنند (موسوی^۴ و همکاران، ۲۰۲۴). وزن دانه بیش‌تر تحت تأثیر توان فتوسنتزی، مدت‌زمان پرشدن دانه و کارایی انتقال مواد فتوسنتزی قرار دارد و بنابراین ممکن است به ترکیبات تغذیه‌ای واکنش متفاوتی نسبت به سایر اجزای عملکرد نشان دهد (گائو^۵ و همکاران، ۲۰۲۲). از طرفی پاسخ اجزای عملکرد به تغذیه برگی به‌شدت وابسته به وضعیت رطوبتی خاک است. در شرایط آبیاری مناسب، کاربرد برخی ترکیبات برگی توانست ظرفیت زایشی گیاه را به‌طور مؤثرتری افزایش دهد، درحالی‌که در شرایط تنش شدید و عدم استفاده از تغذیه برگی، افت اجزای عملکرد تشدید شد. این نتیجه نشان می‌دهد که تغذیه برگی، به‌ویژه با ترکیباتی مانند سیلیکات‌پتاسیم، می‌تواند در کنار مدیریت آبیاری، به‌عنوان راه‌کاری مکمل برای حفظ اجزای عملکرد در لوبیا چیتی مطرح شود، اما به‌تنهایی قادر به جبران کامل اثرات منفی تنش کم‌آبی نخواهد بود (سان^۶ و همکاران، ۲۰۲۴). در مجموع، نتایج اجزای عملکرد در این پژوهش نشان می‌دهد که تنش کم‌آبی از طریق اثرگذاری هم‌زمان بر استقرار بوته، تشکیل غلاف، تعداد دانه و پرشدن دانه، ساختار عملکرد لوبیا چیتی را تضعیف می‌کند.

1. Soudek

2. Islam

3. Poudel

4. Mousavi

5. Guo

6. Sun

در عین حال، کاربرد هدفمند ترکیبات تغذیه‌ای برگی، به‌ویژه سیلیکات‌پتاسیم، می‌تواند برخی از این اجزا را در برابر افت ناشی از محدودیت آب مقاوم‌تر سازد (شیوایا^۱ و همکاران، ۲۰۲۴) و بدین ترتیب نقش تعدیل‌کننده‌ای در کاهش اثرات تنش ایفا کند.

نتایج این پژوهش نشان داد که عملکرد دانه لوبیا چیتی تحت تأثیر عوامل سال، دور آبیاری و محلول‌پاشی به‌طور معنی‌دار تغییر کرد و اثر برهم‌کنش محلول‌پاشی در سال نیز مشاهده شد. اثر معنی‌دار سال بر عملکرد دانه نشان می‌دهد که تفاوت‌های محیطی سال‌های زراعی، از جمله تغییرات دما، میزان بارندگی و شدت تابش نور، در شکل‌گیری پاسخ عملکردی گیاه نقش تعیین‌کننده‌ای داشته است (الاکیا^۲ و همکاران، ۲۰۲۵). این یافته اهمیت لحاظ شرایط محیطی هر سال را در تحلیل داده‌ها و تفسیر اثر تیمارها برجسته می‌سازد و نشان می‌دهد که پاسخ لوبیا به تنش کم‌آبی و تغذیه برگی در سال‌های مختلف می‌تواند متفاوت باشد. افزایش فاصله آبیاری موجب کاهش چشم‌گیر عملکرد دانه شد که بیانگر حساسیت لوبیا چیتی به محدودیت آب در مراحل بحرانی رشد است. این کاهش عملکرد نشان می‌دهد که محدودیت آبیاری اثر مستقیمی بر فرایندهای فیزیولوژیکی مؤثر در تشکیل و توسعه دانه دارد و تأمین منظم آب برای حفظ ظرفیت فتوسنتزی و انتقال مواد پرورده به اندام‌های زایشی ضروری است (الهربی^۳ و همکاران، ۲۰۲۴). کاهش عملکرد در این شرایط بیانگر تضعیف هم‌زمان مراحل رشد زایشی و پرشدن دانه است که هماهنگی بین تشکیل غلاف، تولید دانه و پرشدن آن‌ها را محدود می‌کند. تحلیل اثر محلول‌پاشی بر عملکرد دانه نشان داد که ترکیبات برگی توانسته‌اند اثرات نامطلوب محدودیت آب را تعدیل کنند. در میان تیمارهای محلول‌پاشی، سیلیکات‌پتاسیم بیش‌ترین تأثیر مثبت را بر عملکرد نشان داد و نسبت به سایر تیمارها عملکرد بهتری حفظ کرد. این یافته نشان می‌دهد که سیلیکات‌پتاسیم می‌تواند فرایندهای فیزیولوژیکی مرتبط با انتقال مواد فتوسنتزی و پرشدن دانه را تقویت کند و سهم بیش‌تری از منابع انرژی و کربوهیدرات‌ها را به اندام‌های زایشی هدایت نماید (عبدالحماد و همکاران، ۲۰۲۳). سایر ترکیبات محلول‌پاشی نیز اثر مثبت داشتند، اما شدت این اثر در مقایسه با سیلیکات‌پتاسیم کم‌تر بود، که نشان‌دهنده تفاوت اثرگذاری ترکیبات مختلف بر عملکرد دانه تحت شرایط این مطالعه است.

معنی‌دار شدن اثر محلول‌پاشی و سال نیز نشان داد که پاسخ گیاه به تغذیه برگی تحت تأثیر شرایط محیطی سال زراعی قرار دارد و اثر ترکیبات برگی نمی‌تواند مستقل از عوامل محیطی در نظر گرفته شود. این یافته اهمیت هماهنگی مدیریت تغذیه‌ای و شرایط اقلیمی سال زراعی را برای دستیابی به پایداری عملکرد دانه تأکید می‌کند (حداد و همکاران، ۲۰۲۲). در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که تنش کم‌آبی عامل اصلی محدودکننده عملکرد دانه لوبیا چیتی بوده و افزایش فاصله آبیاری موجب کاهش معنی‌دار عملکرد شده است. در عین حال، کاربرد تغذیه برگی، به‌ویژه سیلیکات‌پتاسیم، توانسته است اثرات منفی تنش را تعدیل کرده و عملکرد دانه را در سطح بالاتری نسبت به تیمار شاهد حفظ کند. این نتایج اهمیت مدیریت هم‌زمان آبیاری و تغذیه برگی را در حفظ عملکرد لوبیا چیتی در شرایط محدودیت آب برجسته می‌سازد.

نتایج نشان داد که شاخص برداشت لوبیا چیتی تحت تأثیر معنی‌دار دور آبیاری و محلول‌پاشی قرار گرفت. افزایش فاصله آبیاری از پنج به نه روز موجب کاهش شاخص برداشت شد که بیانگر محدود شدن نسبت عملکرد دانه به زیست‌توده کل گیاه تحت شرایط تنش کم‌آبی است. این یافته نشان می‌دهد که دسترسی منظم به آب برای حفظ نسبت بهینه عملکرد دانه از کل زیست‌توده ضروری بوده و تنش آبی می‌تواند به‌طور مستقیم بر کارایی تولید دانه از کل ماده

خشک تولیدی تأثیر منفی بگذارد (پاپاتاناسیو و همکاران، ۲۰۲۲). اثر محلول‌پاشی نشان داد که تیمار نانوکود روی بیش‌ترین تأثیر مثبت را بر شاخص برداشت داشته و توانسته است سهم عملکرد دانه از کل ماده خشک تولیدی را افزایش دهد. سایر تیمارها شامل سیلیکات‌پتاسیم، اسید آمینه و شاهد نیز اثر مثبت داشتند، اما شدت اثر آن‌ها نسبت به نانوکود روی کم‌تر بود. این یافته‌ها بیانگر نقش مؤثر عنصر روی در بهبود تخصیص مجدد مواد فتوسنتزی به اندام‌های زایشی و افزایش کارایی فتوسنتزی در شرایط محدودیت آب است (سلیمان و همکاران، ۲۰۲۱). در خصوص زیست‌توده، بیش‌ترین مقدار زیست‌توده در شرایط آبیاری منظم همراه با محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم حاصل شد. این تیمار نشان‌دهنده اثر هم‌زمان آبیاری منظم و تغذیه برگی بر رشد رویشی و تولید ماده خشک است و به‌وضوح نشان می‌دهد که سیلیکات‌پتاسیم می‌تواند با تقویت ساختار گیاه و افزایش بازدهی فتوسنتز، ظرفیت بالایی در ارتقای رشد رویشی داشته باشد (فزونی و همکاران، ۱۴۰۴). در مقابل، کم‌ترین زیست‌توده در تیمار تنش خشکی بدون محلول‌پاشی مشاهده شد که اهمیت تأمین آب و مدیریت تغذیه را در حفظ رشد رویشی گیاه برجسته می‌سازد.

بررسی اثر متقابل کود پایه و محلول‌پاشی نشان داد که حتی در غیاب کود پایه، محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم توانسته است میزان زیست‌توده را تا سطح قابل‌توجهی افزایش دهد، درحالی‌که مصرف هم‌زمان کود پایه و محلول‌پاشی بیش‌ترین اثر تقویتی بر تولید زیست‌توده داشت. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که تغذیه تلفیقی و مکمل می‌تواند رشد رویشی را بهینه کرده و امکان انتقال منابع فتوسنتزی به اندام‌های زایشی را افزایش دهد. افزون بر این، بررسی تیمارها نشان داد که اثر محلول‌پاشی بر شاخص برداشت نیز با شرایط آبیاری تعامل دارد (شکری و همکاران، ۲۰۲۱)، به‌طوری‌که نانوکود روی در شرایط محدودیت آبی توانست بیش‌ترین شاخص برداشت را حفظ کند و اثر سایر تیمارها در شرایط آبیاری نامنظم کم‌تر محسوس بود. این الگو نشان می‌دهد که اثر تغذیه برگی بر تبدیل زیست‌توده به دانه به‌شدت به وضعیت آب خاک و شرایط تنش بستگی دارد.

در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهد که محدودیت آبیاری اثر منفی بر شاخص برداشت و زیست‌توده دارد، اما تغذیه برگی، به‌ویژه سیلیکات‌پتاسیم و نانوکود روی، می‌تواند این اثرات منفی را تعدیل کرده و هم رشد رویشی و هم بهره‌وری دانه را بهبود بخشد. این نتایج بر اهمیت مدیریت هم‌زمان آبیاری و تغذیه برگی برای افزایش پایداری عملکرد و تولید زیست‌توده در شرایط کم‌آبی تأکید دارد و نشان می‌دهد که انتخاب ترکیب مناسب محلول‌پاشی می‌تواند نقش کلیدی در بهینه‌سازی عملکرد لوبیا چیتی ایفا کند.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که اعمال رژیم آبیاری منظم و تغذیه ترکیبی خاکی و برگی نقش مؤثری در بهبود اجزای عملکرد، عملکرد دانه، زیست‌توده و شاخص برداشت در گیاه لوبیا چیتی تحت شرایط کم‌آبی ایفا می‌کند. افزایش فاصله آبیاری موجب کاهش معنی‌دار در اغلب صفات رشدی و زایشی از جمله تعداد بوته در واحد سطح، تعداد غلاف، تعداد دانه در غلاف و وزن صددانه شد و درنهایت عملکرد دانه به‌طور چشم‌گیری کاهش یافت. در این شرایط، تیمارهای محلول‌پاشی به‌ویژه سیلیکات‌پتاسیم توانستند بخشی از آثار منفی تنش خشکی را جبران کرده و از طریق حفظ ساختار سلولی، تحریک اندام‌های زایشی و بهبود فرایندهای فیزیولوژیکی مرتبط با فتوسنتز و پرشدن دانه، عملکرد گیاه را بهبود بخشند. هم‌چنین، سیلیکات‌پتاسیم بیش‌ترین تأثیر را در افزایش تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف و زیست‌توده گیاهی داشت، درحالی‌که نانوکود روی با ارتقای شاخص برداشت، توان بالاتری در تخصیص مؤثر ماده خشک به دانه از خود نشان داد. ترکیب تغذیه پایه با محلول‌پاشی نیز موجب بهبود بیش‌تر زیست‌توده شد که بیانگر اهمیت رویکردهای

تغذیه تلفیقی در بهینه‌سازی رشد گیاه در شرایط تنش‌زا است. بر این اساس، استفاده از سیلیکات‌پتاسیم به‌عنوان یک ترکیب مؤثر در تحریک فرایندهای زایشی و حفظ پایداری عملکرد در دوره‌های کم‌آبی توصیه می‌شود. همچنین، کاربرد نانوکود روی با توجه به نقش آن در بهبود کارایی برداشت و تخصیص مجدد مواد فتوسنتزی، می‌تواند به‌عنوان مکملی کارآمد در نظام‌های مدیریتی مبتنی بر بهره‌وری بیش‌تر از منابع محدود آب مورد استفاده قرار گیرد. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدیریت بهینه عناصر معدنی و آلی همراه با انتخاب مناسب رژیم آبیاری، می‌تواند در راستای افزایش تاب‌آوری گیاهان دانه‌ای نظیر لوبیا چیتی نسبت به تنش خشکی و دستیابی به عملکرد پایدار، راهبردی مؤثر و کاربردی محسوب شود.

۷. تشکر و قدردانی

از همکاری صمیمانه و حمایت ارزشمند مرکز آزمایشگاه دانشکده فناوری کشاورزی (پردیس ابوریحان) دانشگاه تهران، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

باقری، حمیدرضا؛ مقدم، علیرضا؛ دانائی، الهام و عبدوسی، وحید (۱۴۰۱). اثر محلول‌پاشی نانوکلات‌های آهن، پتاسیم، کلسیم و منگنز بر برخی خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی و عناصر غذایی گیاه نعنای فلفلی (*Mentha piperita*). *فیزیولوژی محیطی گیاهی*، ۲۹(۵)، ۱-۱۳.

فزونی، علی‌اصغر؛ عندلیبی، بابک؛ چائی‌چی، مهرداد و نصیری، سجاد (۱۴۰۴). تعدیل اثرات کم‌آبی در سیب‌زمینی با محلول‌پاشی سیلیکات‌پتاسیم: بررسی فیزیولوژیکی و عملکردی سه رقم جدید. *به‌زرایی کشاورزی*، ۲۷(۴)، ۶۹۵-۷

References

- Abouelhamd, N., Gharib, F.A.E.L., & Amin, A.A. (2023). Impact of foliar spray with Se, nano-Se and sodium sulfate on growth, yield and metabolic activities of red kidney bean. *International Journal of Scientific Reports*, 13, 17102.
- Ahmed, G. O., Halshoy, H. S., Mahmood, C. H., & Hama, J. R. (2024). Titanium nanoparticle and humic acid applications improve seed germination, growth development, and phytochemical contents of lettuce (*Lactuca sativa*) plants. *BioNanoScience*, 14(5), 4930-4941.
- Alharbi, K., Alnusairi, G. S., Alnusaire, T. S., Alghanem, S. M., Alsudays, I. M., Alaklabi, A., & Soliman, M. H. (2024). Potassium silica nanostructure improved growth and nutrient uptake of sorghum plants subjected to drought stress. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1425834.
- Bagheri, H., Moghadam, A., Danaei, E. & Abdousi, V (2022). The effect of foliar application of nanochelates of iron, potassium, calcium and manganese on some morphophysiological characteristics and nutrients of peppermint (*Mentha piperita*). *Plant Environmental Physiology*, 29(5), 1-13. (In Persian).
- Dujmović, M., Opačić, N., Radman, S., Fabek Uher, S., Voća, S., & Šic Žlabur, J. (2023). Accumulation of Stinging Nettle Bioactive Compounds as a Response to Controlled Drought Stress. *Agriculture*, 13(7), 1358.
- Elakiya, A., Jerlin, R., Sundaralingam, K., Gnanachitra, M., Maruthasalam, S., & Sathyamoorthy, P. (2025). Exploring Crop Stress Alleviation: A Potassium Silicate Perspective. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-19.

- El-Beltagi, H. S., Al-Otaibi, H. H., Parmar, A., Ramadan, K. M. A., Lobato, A. K. d. S., & El-Mogy, M. M. (2023). Application of potassium humate and salicylic acid to mitigate salinity stress of common bean. *Life*, 13 (2), 448.
- El-Hawary, M. M., Hashem, O. S. M., & Hasanuzzaman, M. (2023). Seed Priming and Foliar Application with Ascorbic Acid and Salicylic Acid Mitigate Salt Stress in Wheat. *Agronomy*, 13(2), 493.
- Fozouni, A., Andalibi, B., Chaichi, M., & Nasiri, S. (2026). Mitigating the effects of water deficit in potato by foliar application of potassium silicate: physiological and functional assessment of three new cultivars. *Journal of Crops Improvement*, 27 (4), 695-714. (In Persian).
- Ghani, M.I., Saleem, S., Rather, S., Rehmani, M., Alamri, S., Rajput, V., Kalaji, M., Saleem, N., Sial, T., & Liu M. (2022). Foliar application of zinc oxide nanoparticles: An effective strategy to mitigate drought stress in cucumber seedling by modulating antioxidant defense system and osmolytes accumulation. *Chemosphere*, 289, 133202.
- Guo, S., Guo, E., Zhang, Z., Dong, M., Wang, X., Fu, Z., & Yang, X. (2022). Impacts of mean climate and extreme climate indices on soybean yield and yield components in Northeast China. *Science of The Total Environment*, 838, 156284.
- Haddad, M. A., Bahrami, H., & Gholami, M. (2022). Exogenous application of humic acid improves photosynthetic capacity and growth of maize under limited irrigation regimes. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42, 1482-1493.
- Hafez, E. M., Osman, H. S., El-Razek, U. A. A., Elbagory, M., Omara, A. E.-D., Eid, M. A., & Gowayed, S. M. (2021). Foliar-Applied Potassium Silicate Coupled with Plant Growth-Promoting Rhizobacteria Improves Growth, Physiology, Nutrient Uptake and Productivity of Faba Bean (*Vicia faba* L.) Irrigated with Saline Water in Salt-Affected Soil. *Plants*, 10(5), 894.
- Islam, M. R., Sarker, U., Azam, M. G., Hossain, J., Alam, M. A., Ullah, R., & Islam, M. S. (2024). Potassium augments growth, yield, nutrient content, and drought tolerance in mung bean (*Vigna radiata* L. Wilczek.). *Scientific Reports*, 14(1), 9378.
- Jatana, B. S., Grover, S., Ram, H., & Baath, G. S. (2024). Seed Priming: Molecular and Physiological Mechanisms Underlying Biotic and Abiotic Stress Tolerance. *Agronomy*, 14(12), 2901.
- Kusvuran, S., & Dasgan, H. Y. (2019). Effects of drought stress on physiological and biochemical changes in *Phaseolus vulgaris* L. *Agricultural Water Management*, 186, 28-42.
- Mladenov, P., Aziz, S., Topalova, E., Renaut, J., Planchon, S., Raina, A., & Tomlekova, N. (2023). Physiological responses of common bean genotypes to drought stress. *Agronomy*, 13(4), 1022.
- Mousavi, S. M., Sedaghat, A., & Esmaeili, M. (2024). Zinc in plants: biochemical functions and dependent signaling. In *Metals and metalloids in plant signaling* (pp. 241-263). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Nadeem, M., Li, J., Yahya, M., Sher, A., Ma, C., Wang, X., & Qiu, L. (2019). Research Progress and Perspective on Drought Stress in Legumes: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(10), 2541.
- Papathanasiou, F., Ninou, E., Mylonas, I., Baxevanos, D., Papadopoulou, F., Avdikos, I., Sistanis, I., Koskosidis, A., Vlachostergios, D. N., Stefanou, S., Tigka, E., & Kargiotidou, A. (2022). The Evaluation of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Genotypes under Water Stress Based on Physiological and Agronomic Parameters. *Plants*, 11(18), 2432.
- Poudel, S., Vennam, R. R., Shrestha, A., Reddy, K. R., Wijewardane, N. K., Reddy, K. N., & Bheemanahalli, R. (2023). Resilience of soybean cultivars to drought stress during flowering and early-seed setting stages. *Scientific Reports*, 13(1), 1277.
- Rad, A.H.S., Malmir, M., & Eyni-Nargeseh, H. (2024). Potassium Silicate Positively Affects Oil Content, Physiologic, and Agronomic Traits of *Camelina sativa* L. Under Optimal Water Supply and Drought Stress Conditions. *Silicon*, 16, 1071-1082.
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., & Battaglia, M. L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10(2), 259.
- Shivappa, R., B, J., MS, B., U, K., M, A., Pati, P., & Govindharaj, G. P. P. (2024). Dual role of potassium silicate and salicylic acid: Plant growth promotor and plant immunity booster against bakanae disease of rice. *Silicon*, 16(3), 1173-1182.

- Shokri Fomeshkenari, M., Ghasemi, K., & Emadi, S. M. (2022). Effect of Various Concentrations of Potassium Silicate on Biomass, Yield and Silicon Distribution in Tomato Plants. *Journal of Vegetables Sciences*, 6(12), 33-46.
- Soudek, P., Langhansová, L., Dvořáková, M., Revutska, A., Petrová, Š, Hirnerová, A., & Soukupová, M. (2024). The impact of the application of compochar on soil moisture, stress, yield and nutritional properties of legumes under drought stress. *Science of the Total Environment*, 914, 169914.
- Sun, W., Shahrajabian, M. H., Kuang, Y., & Wang, N. (2024). Amino acids biostimulants and protein hydrolysates in agricultural sciences. *Plants*, 13(2), 210.
- Tuiwong, P., Lordkaew, S., Veeradittakit, J., Jamjod, S., & Prom-u-thai, C. (2022). Seed Priming and Foliar Application with Nitrogen and Zinc Improve Seedling Growth, Yield, and Zinc Accumulation in Rice. *Agriculture*, 12(2), 144.
- Zhi, Y., Li, X., Wang, X., Jia, M., & Wang, Z. (2024). Photosynthesis promotion mechanisms of artificial humic acid depend on plant types: A hydroponic study on C3 and C4 plants. *Science of the Total Environment*, 917, 170404.