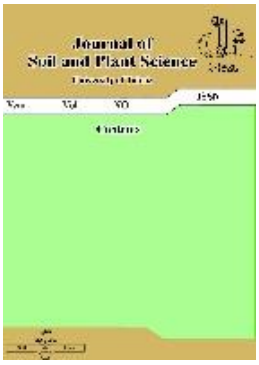
J Soil Plant Sci, 2026, 36(1): 81-103.

https://doi.org/10.22034/sps.2026.72035.1038

Journal of Soil and Plant Science

E-ISSN: 3092-6106
https://sps.tabrizu.ac.ir



Research Article

Effects of Foliar Application of Potassium silicate, Amino acid, and Zinc Nanofertilizer on Pinto Beans Yield and Concentraions of Nitrogen, Phosphorus, Potassium, and Zinc under Normal and Deficit Irrigation Conditions

Ali Akbar Asadi[1]✉, Gholamreza Shahidi[2], Gholamabbas Akbari[3], Gholamali Akbari[4], Mohammad Hadi Ghafarian Mogharab[5]

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

Received: April 19, 2026	**Revised:** May 5, 2026
Accepted: May 6, 2026	**Published:** May 6, 2026

Extended Abstract

Background and Objectives

Abiotic environmental stresses, especially drought stress, are among the most important problems in arid and semi-arid regions, affecting plant growth and yield. On the other hand, given the widespread shortage of water resources, the future of food supply for the world's growing population will be affected by the water crisis; therefore, water will play a major role in increasing agricultural production, and any method or technology, such as deficit irrigation, that increases water use efficiency will improve food security. Using agricultural methods such as applying different types of organic and mineral fertilizers can also be effective in combating drought stress. In drought conditions, the absorption of nutrients through the roots decreases under certain conditions. To solve this problem, the nutrients (micronutrients) needed by plants can be provided through foliar spraying. Although micronutrients are required in small amounts for plant growth and production, their deficiency will have adverse effects on physiological processes and plant growth and development. Although micronutrients are required in small amounts for plant growth and production, their deficiency will have adverse effects on physiological processes and plant growth and development. This study aimed to investigate the effect of foliar spraying of micronutrients on yield and the levels of nitrogen, phosphorus, potassium, and zinc in pinto bean leaves under normal and drought conditions with different nutritional treatments.

Materials and Methods

In order to investigate the effects of deficit irrigation, potassium sulfate fertilizer, and foliar application of nutritional elements on the absorption of some nutrients by leaves in beans, an experiment was conducted over two crop years in split plots based on a randomized complete block design with four replications at the Kheirabad Research Station of the Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Zanjan Province. Analysis of variance was performed in the form of a split plot design at multiple times and locations (irrigation cycles). After measuring the levels of nitrogen, phosphorus, potassium, and zinc in different experimental treatments and checking the normality of the data and homogeneity of variances, variance analysis was done based on mathematical expectation, assuming randomness of the year and constant levels of treatments. Mean comparisons were also performed using Duncan's multiple range test at a 5% probability level.

Results
The results of analysis of variance showed that there was a significant difference between the two irrigation periods for potassium concentration, nitrogen concentration, and grain yield, and the 9-day irrigation cycle caused a significant decrease in these traits. A significant difference was observed between the two fertilizer levels evaluated in terms of nitrogen, phosphorus and potassium concentration. Potassium sulfate application did not cause significant differences in grain yield, but a significant decrease in leaf nitrogen, phosphorus, and potassium concentrations was observed. On the other hand, the use of this fertilizer caused a non-significant increase in zinc concentration. Finally, significant differences were observed between foliar spray levels for all traits except potassium concentration. Potassium silicate had the greatest effect on grain yield and significantly increased it compared to amino acid and zinc nanofertilizer. Therefore, it can be concluded that foliar spraying of potassium silicate can increase resistance to drought conditions. Foliar application of zinc nanofertilizer did not have much effect on increasing grain yield. Amino acid consumption significantly increased leaf nitrogen concentration. Amino acid and zinc nanofertilizer showed the most significant increase in leaf phosphorus concentration. Potassium silicate treatment showed the lowest phosphorus concentration. The most significant difference in leaf potassium concentration was obtained by using amino acid, and finally, the highest leaf zinc concentration was observed by using zinc nano fertilizer and then amino acid.

Conclusions
Potassium silicate solution spraying increases resistance to drought conditions. Foliar application of amino acids increased leaf nitrogen and potassium concentrations. Foliar application of amino acids and zinc nanofertilizer had the greatest effect on increasing leaf phosphorus and zinc concentrations. In 9-day irrigation cycle, the use of amino acids and potassium silicate as foliar sprays can increase the concentration of potassium in the leaves, and also, also, in these conditions, the use of potassium silicate increases the concentration of zinc in the leaves. Therefore, it can be said that foliar spraying of nutritional elements can be used to eliminate the deficiency of required substances in beans under stress conditions resulting from increased irrigation intervals.
Keywords: Calcareous soil, Drought stress, Plant nutrition, Potassium sulfate, Soil moisture.

Author Contributions
Conceptualization and methodology, Asadi, A.A. & Akbari, G., Performing experiments and measurements, Shahidi, G.; formal analysis and data curation, Asadi, A.A.; writing-original draft preparation, Asadi, A.A., writing- review and editing, Asadi, A.A.; supervision, Asadi, A.A. & Akbari, G.; project administration, Asadi, A.A. & Akbari, G.; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement
Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgements
This paper is published as a part of a Ph.D. thesis supported by the Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Zanjan, Iran. The authors are thankful to the Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Zanjan, Iran.

Conflict of interest
The authors declare no conflict of interest.

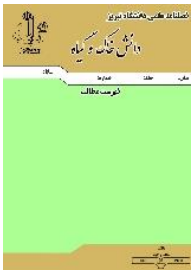
Ethical considerations
The author avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Cite this article: Asadi, A.A., Shahidi, G., Akbari, G., Akbari, G. & Ghafarian Mogharab, M.H. (2026). Effects of foliar application of potassium silicate, amino acid, and zinc nanofertilizer on pinto beans yield and concentraions of nitrogen, phosphorus, potassium, and zinc under normal and deficit irrigation conditions. *Journal of Soil and Plant Science*, 36(1), 81-103.
https://doi.org/10.22034/sps.2026.72035.1038

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

Copyright © 2026 The Authors.
Publisher: The University of Tabriz

OPEN ACCESS JOURNALS



نشریه دانش خاک و گیاه، جلد ۳۶، شماره ۱

صفحه‌های ۸۱ تا ۱۰۳، بهار ۱۴۰۵

https://doi.org/10.22034/sps.2026.72035.1038

E-ISSN: 3092-6106

https://sps.tabrizu.ac.ir

مقاله پژوهشی

تأثیر محلول‌پاشی نانوکود روی، اسید آمینه و سیلیکات پتاسیم بر عملکرد و غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم و روی لوبیا چیتی در شرایط آبیاری نرمال و کم‌آبیاری

علی اکبر اسدی[۱]✉، غلامرضا شهیدی[۲]، غلامعباس اکبری[۳]، غلامعلی اکبری[۴]، محمدهادی غفاریان مقرب[۵]

۱-نویسنده مسئول، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، زنجان، ایران. رایانامه: asadipm@gmail.com

۲-گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده فناوری کشاورزی (پردیس ابوریحان)، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: gholamrezashahidi@ut.ac.ir

۳-گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده فناوری کشاورزی (پردیس ابوریحان)، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: ghakbari@ut.ac.ir

٤-گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده فناوری کشاورزی (پردیس ابوریحان)، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه:gakbari@ut.ac.ir

٥-مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، زنجان، ایران. رایانامه: hghafarm@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۳۰	**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۵/۰۲/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۶	**تاریخ انتشار:** ۱۴۰۵/۲/۱۶

چکیده

مطالعات در مورد کاهش آب مصرفی و یافتن راه حل زراعی مناسب برای جبران کمبود آب در مزارع لوبیا (*Phaseolous vulgaris* L.) کمتر انجام شده است. این تحقیق، با هدف بررسی تأثیر محلول‌پاشی نانوکود روی، اسید آمینه و سیلیکات پتاسیم بر عملکرد و غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم و روی اندام‌های رویشی لوبیا چیتی رقم کوشا در دو شرایط نرمال (دور آبیاری ۵ روز) و کم‌آبیاری (دور آبیاری ۹ روز) انجام شد. آزمایش طی دو سال زراعی به‌صورت کرت‌های خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در ایستگاه تحقیقاتی خیرآباد مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان اجرا شد. تجزیه واریانس آزمایش به‌صورت طرح کرت‌های خرد شده در چند زمان و چند مکان انجام شد. نتایج نشان داد که بین دورهای آبیاری ۵ و ۹ روز برای غلظت پتاسیم، غلظت نیتروژن و عملکرد دانه تفاوت معنادار وجود داشت و دور آبیاری ۹ روز باعث کاهش معنادار این صفات شد. بین شاهد و دو سطح 50 kg/ha کود سولفات پتاسیم و ۲ kg/ha اسید هیومیک از نظر غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم برگ تفاوت معناداری مشاهده شد. با مصرف سولفات پتاسیم تفاوت معناداری در میزان عملکرد دانه مشاهده نشد ولی کاهش معناداری در غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم برگ وجود داشت. بین سطوح محلول‌پاشی برای تمامی صفات به‌جز غلظت پتاسیم تفاوت معنادار مشاهده شد. محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم بیشترین تأثیر را بر عملکرد دانه داشت و باعث افزایش معنادار آن در مقایسه با مصرف اسید آمینه و نانوکود روی شد. محلول‌پاشی اسید آمینه باعث افزایش غلظت نیتروژن و پتاسیم برگ‌ها شد. محلول‌پاشی اسید آمینه و نانوکود روی، بیشترین تأثیر را در افزایش غلظت فسفر و روی برگ داشتند. در شرایط دور آبیاری ۹ روز، مصرف اسید آمینه و سیلیکات پتاسیم به صورت محلول‌پاشی می‌تواند باعث افزایش غلظت پتاسیم برگ‌ها شود و در این شرایط، مصرف سیلیکات پتاسیم باعث افزایش غلظت روی برگ‌ها شد. بنابراین، برای بهبود عملکرد و تغذیه گیاه لوبیا در شرایط تنش خشکی می‌توان از محلول‌پاشی نانوکود روی، اسید آمینه و سیلیکات پتاسیم استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: تغذیه گیاه، تنش خشکی، خاک آهکی، سولفات پتاسیم، رطوبت خاک.

استناد به این مقاله: اسدی، ع.ا.، شهیدی، غ.، اکبری، غ.، اکبری، غ. و غفاریان مقرب، م.ه. (۱٤۰۵). تأثیر محلول‌پاشی نانوکود روی، اسید آمینه و سیلیکات پتاسیم بر عملکرد و غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم و روی لوبیا چیتی در شرایط آبیاری نرمال و کم‌آبیاری. *نشریه دانش خاک و گیاه*، ۳٦(۱)، ۱۰۳-۸۱.

https://doi.org/10.22034/sps.2026.72035.1038

مقدمه

حبوبات به‌عنوان دومین منبع غذایی بشر پس از غلات و عمده‌ترین منبع پروتئین گیاهی محسوب می‌شوند. در بین حبوبات از لحاظ سطح زیر کشت، مقام اول متعلق به لوبیا می‌باشد. لوبیا (*Phaseolous vulgaris* L.) گیاهی یک‌ساله از تیره بقولات، با دوشکل رشدی محدود و نامحدود می‌باشد (Bagheri *et al.*, 2014). لوبیا در پنج قاره دنیا کشت می‌شود. سطح زیر کشت جهانی آن حدود ۳۷ میلیون هکتار و متوسط عملکرد آن حدود ۷۵۵ کیلوگرم بر هکتار است. همچنین، در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ سطح زیر کشت لوبیا در ایران ۸۱۲۰۰ هکتار با میانگین عملکرد ۱۸۶۲ کیلوگرم بر هکتار بوده است (FAO, 2023). بنابر آمار ارایه شده در برنامه الگوی کشت استان زنجان در سال زراعی ۰۴-۱۴۰۳، سطح زیرگشت لوبیا ۱۴۸۰۰ هکتار، میزان تولید ۴۲۰۰۰ تن و عملکرد در واحد سطح برابر با ۲۸۳۶ کیلوگرم بر هکتار بود (Asadi *et al.*, 2026).

ایران با قرارگیری در ناحیه خشک و با متوسط بارش ۲۴۰ میلی‌متر، دارای شرایطی است که گیاهان اغلب در معرض تنش خشکی قرار می‌گیرند. وجود تنش‌های غیرزنده محیطی به‌ویژه تنش خشکی از مهم‌ترین مشکلات مناطق خشک و نیمه‌خشک است که رشد و عملکرد گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Aqcheli *et al.*, 2016). از طرف دیگر، با توجه به نقش آبیاری و کمبود گسترده منابع آب، آینده تأمین غذا برای جمعیت در حال رشد جهان متأثر از بحران آب خواهد بود (Du Toit *et al.*, 2011)؛ بنابراین، در افزایش تولید محصولات کشاورزی، آب نقش اصلی را خواهد داشت (Hanjra & Qureshi, 2010). با توجه به این شرایط هر روش و یا فناوری که باعث افزایش بهره‌وری مصرف آب شود، باعث بهبود امنیت غذایی و بقای سرزمینی خواهد شد. از این روش‌ها می‌توان به کم‌آبیاری اشاره کرد. این روش یکی از روش‌های ساده و کلیدی صرفه‌جویی در مصرف آب در کشاورزی است (Chai *et al.*, 2014). در این روش مقدار آبی که گیاه دریافت می‌کند، کمتر از مقدار لازم برای رشد پتانسیل آن است (Chai *et al.*, 2016; Howell *et al.*, 2007). اگرچه نتیجه کم‌آبیاری کاهش عملکرد در واحد سطح است، اما این روش کارایی مصرف آب و کارایی آبیاری را افزایش می‌دهد (Sobhani & Hamidi, 2014).

در شرایط خشکی و یا کمبود آب، استفاده از ارقام متحمل و روش‌های به‌زراعی می‌توانند در مقابله با تنش خشکی مؤثر باشند. به‌کارگیری انواع مختلف کودهای آلی و معدنی از جمله روش‌های به‌زراعی متداول محسوب می‌شوند. در یک بررسی، مصرف هیومیک اسید ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و غلظت فلاونوئیدها را به‌طور معنادار در گیاها مورد مطالعه افزایش دادند (Shafie et al., 2025) و از این طریق می‌تواند تحمل گیاه در برابر تنش خشکی را افزایش دهد. ریشه‌ها اولین اندامی هستند که نقش جذب عناصر غذایی را به‌عهده دارند. بااین‌حال در شرایط خاصی دسترسی عناصر غذایی در خاک محدود می‌شود و به همین دلیل استفاده مورد انتظار از کودها کاهش می‌یابد. در این شرایط، برای حل این مشکل، می‌توان عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان را به‌وسیله محلول‌پاشی برگ‌ها فراهم کرد (Altin Disli *et al.*, 1998). کوددهی برگی یا محلول‌پاشی در واقع پاشیدن محلول عناصر غذایی بر روی برگ‌ها و ساقه‌های گیاه و جذب این عناصر از این اندام‌ها است (Kuepper, 2003). کاربرد برگی عناصر غذایی می‌تواند دسترسی گیاهان به این عناصر را برای به‌دست آوردن عملکرد تضمین کند. از دید اکولوژیکی، کوددهی برگی قابل‌قبول‌تر است چون مقادیر کمتر عناصر غذایی برای مصرف سریع به‌وسیله گیاه، فراهم می‌شود (Stampar *et al.*, 1998). از مزایای محلول‌پاشی برگی می‌توان به تثبیت کم عناصر در خاک، کاهش فعالیت ریشه در طول مرحله زایشی و میوه‌دهی و غنی‌سازی محصولات کشاورزی اشاره کرد (Arena *et al.*, 2007; Bernal *et al.*,

2007). تحمل تنش‌های مختلف از طریق محلول‌پاشی عناصر غذایی کم‌مصرف افزایش می‌یابد (Ghasemian *et al.*, 2010).

تحقیقات نشان داده‌اند که راهکار بسیار مفید و کارآمد دیگر برای افزایش بهره‌وری در تولید محصولات زراعی، توسعه و ترویج مصرف عناصر غذایی کم‌مصرف است (Malakouti & Tehrani, 1999). عناصر غذایی کم‌مصرف اگرچه به مقدار کم مورد نیاز رشد و تولید گیاهان می‌باشند اما کمبود آن‌ها اثرات نامطلوب بر فرایندهای فیزیولوژیکی و رشد و نمو گیاهی خواهند داشت (Heidarian *et al.*, 2010). در شرایط کمبود آب، کاربرد و تنظیم غلظت برخی عناصر غذایی می‌تواند به‌عنوان یکراهبرد برای جلوگیری از اثرات مخرب تنش خشکی مؤثر باشد و زمینه سازگاری گیاه را فراهم آورد. تغذیه صحیح گیاه یکی از راهکارهای کاهش اثرات زیان‌بار تنش‌ها بوده و نقش فراوانی در جلوگیری از کاهش عملکرد دارد. در همین ارتباط، نقش برخی عناصر مانند سیلیسیم مورد توجه برخی متخصصان تغذیه گیاهی قرار گرفته است (Rezakhani *et al.*, 2019; Saleh *et al.*, 2015).

گنگ و چن (Gong & Chen, 2012) در مورد اثر سیلیسیم بر گندم در برابر تنش اکسیداتیو در شرایط تنش خشکی نشان دادند که استفاده از سیلیسیم، پتانسیل آب گیاهان را در مرحله پر شدن دانه افزایش می‌دهد. بر اثر کاربرد سیلیکات پتاسیم در گندم در یک خاک آهکی با بافت لوم رسی سیلتی و با مقدار سیلیسیم قابل‌جذب ۵۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم در شرایط تنش خشکی (۶۰ درصد نیاز آبی) مشاهده شد که مصرف خاکی ۲۰ کیلوگرم سیلیکات پتاسیم بر هکتار، موجب افزایش ۱۶ درصدی عملکرد دانه گندم نسبت به عدم کاربرد سیلیکات پتاسیم شد (Tehrani & Rezakhani, 2022). در تحقیقی دیگر، مشخص شد در شرایط تنش خشکی مصرف ۳۰ کیلوگرم بر هکتار سیلیکات پتاسیم، سبب افزایش عملکرد دانه گندم به مقدار ۱۴ درصد شد (Karmalacheab *et al.*, 2013). در تحقیقی دیگر با بررسی تأثیر محلول‌پاشی برگی سیلیسیم در شرایط تنش خشکی، مشخص شد که حضور سیلیسیم و به‌خصوص ذرات نانو نقش چشمگیری در بهبود عملکرد دانه گندم و توزیع مجدد مواد فتوسنتزی داشتند (Parsapour *et al.*, 2019). با بررسی تأثیر سیلیسیم بر رشد گیاه ذرت در شرایط تنش خشکی در گلخانه مشاهده شد که در شرایط تنش ملایم و شدید، مصرف سیلیسیم به‌صورت محلول‌پاشی باعث افزایش عملکرد گردید (Li *et al.*, 2007).

پتاسیم یک عنصر ضروری در گیاه برای افزایش تولید و بهبود کیفیت گیاه محسوب می‌شود. پتاسیم هم از نظر حضور در بافت‌های گیاهی و هم از نظر وظایف فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی عنصر مهمی است (Hajiboland, 2013). علاوه‌بر تحرک پتاسیم در گیاه به سمت بافت‌های مریستمی، غلظت فراوان آن در داخل گیاه این امکان را به آن می‌دهد که در فیزیولوژی گیاهی مؤثر باشد (Hajiboland, 2013). یکی از وظایف پتاسیم نقش حمایتی آن در جلوگیری از تخریب سلول در برابر گونه‌های فعال اکسیژن است. کلروپلاست‌ها در تولید و افزایش گونه‌های فعال اکسیژن در تنش‌های محیطی از جمله خشکی، یخزدگی، کمبود عناصر غذایی و شوری نقش دارند. این گونه‌های فعال اکسیژن به‌شدت سمی بوده و موجب تخریب غشاهای سلولی، کاهش میزان کلروفیل و زردی برگ‌ها می‌شوند. پتاسیم بر فعالیت آنزیم‌های جمع‌آوری کننده گونه‌های فعال اکسیژن تاثیر مثبت داشته و در نهایت سبب پایداری سلول‌های گیاه در شرایط دشوار می‌گردد (Hu & Schmidhalter, 2005).

از دیگر ترکیبات کودی می‌توان به آمینواسیدها اشاره کرد. امروزه کاربرد این ترکیبات در زراعت به‌دلیل نقش اساسی آن‌ها در حیات موجودات مورد توجه قرار گرفته است. ارزش استفاده از ترکیبات آمینواسیدی در این است که به‌دلیل غنای اسید آمینه‌ای این فراورده‌ها، سلول نیازی به بیوسنتز مجدد این ترکیبات نداشته و انرژی

مورد نیاز برای این بیوسنتز، در گیاه ذخیره می‌شود. این فراورده‌ها با تأثیر بر روند پروتئین‌سازی در سطوح ژنی و با تأثیر بر سوخت‌وساز پایه گیاهی، رشد و تکوین گیاه را منظم نموده و در مراحل مختلف رشد، کارایی و کاربرد خاص خود را با محلول‌پاشی در اختیار گیاه قرار می‌دهند. در واقع، تغذیه برگی اسیدهای آمینه آزاد می‌تواند یک منبع مهم برای سنتز پروتئین در گیاهان باشد (Raeisi *et al.*, 2014). اسیدهای آمینه به‌عنوان منبع تأمین نیتروژن، در افزایش فتوسنتز و بهبود سرعت رشد پر شدن دانه‌ها نقش مؤثری دارند که این موضوع نقش مؤثری در افزایش عملکرد دانه دارد (Haj Seyed Hadi & Rezaee Ghale, 2016; Slawik, 2005)؛ به‌علاوه اسیدهای آمینه به‌دلیل این‌که واحدهای سازنده پروتئین بوده و در سنتز آن‌ها نقش دارند، با افزایش آن‌ها میزان پروتئین نیز افزایش می‌یابد. اهمیت تغذیه برگی اسیدهای آمینه به‌عنوان یک منبع مهم در سنتز پروتئین گیاهان نیز مورد اشاره قرار گرفته است (Raeisi *et al.*, 2014).

روی یکی از عناصر کم‌مصرف ضروری برای گیاهان است که در ساختار و فعالیت بیش از ۳۰۰ آنزیم دخالت دارد و در فرایندهایی همچون فتوسنتز، سنتز پروتئین، تقسیم سلولی، تنظیم بیان ژن، تثبیت نیتروژن و مقاومت به تنش‌های محیطی نقشی اساسی ایفا می‌کند (Munir *et al.*, 2025). کمبود روی یکی از مشکلات شایع در خاک‌های آهکی و قلیایی ایران و بسیاری از مناطق خشک جهان است، زیرا در این خاک‌ها روی به‌سرعت به ترکیبات نامحلول تبدیل شده و از دسترس گیاه خارج می‌شود (Salah *et al.*, 2021). استفاده از کودهای معمولی مانند سولفات روی، به دلیل سرعت بالای تثبیت در خاک و شست‌وشوی آن در آبیاری، اغلب نمی‌تواند پاسخگوی نیاز واقعی گیاه باشد. این محدودیت‌ها موجب شده است که استفاده از نانوکودهای مبتنی بر اکسید روی (ZnO-NPs) به عنوان راهکاری نوین برای افزایش کارایی مصرف این عنصر و بهبود عملکرد گیاهان مطرح شود (Yusefi-Tanha *et al.*, 2021). نانوذرات اکسید روی به دلیل اندازه بسیار کوچک (معمولاً کمتر از ۱۰۰ نانومتر) و سطح ویژه زیاد، قابلیت نفوذ و جذب بالایی دارند. اندازه کوچک ذرات باعث افزایش تماس با سطح سلول‌های گیاهی شده و امکان جذب از طریق کوتیکول، روزنه‌ها و ریشه را فراهم می‌کند. همچنین، به دلیل ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاص مانند بار سطحی مناسب و پایداری در محیط‌های آبی، این نانوذرات می‌توانند به‌صورت کنترل‌شده در بافت گیاه آزاد شوند و به تدریج یون‌های Zn^{2+} را برای جذب سلول‌های گیاهی فراهم کنند. در نتیجه، برخلاف ترکیبات معمولی روی که اغلب با شتاب تثبیت می‌شوند، نانوکود روی قادر است روی را در دسترس گیاه نگه دارد و از افت سریع غلظت آن در خاک یا برگ جلوگیری کند (Rizwan *et al.*, 2017). از دلایل پائین بودن روی قابل‌جذب در خاک‌های زراعی می‌توان به آهکی بودن خاک، pH بالای خاک، بی‌کربناتی بودن آب آبیاری، میزان ماده آلی کم و مصرف بیش از نیاز کودهای فسفاتی اشاره نمود (Khoshgoftarmanesh & Arabzadeghan, 2007). افزایش میزان عملکرد دانه لوبیا با کاربرد برگی روی در پژوهش‌های متعددی گزارش شده است (Kordi *et al.*, 2016; Saeedi-Abu Ishaqi and Yadavi, 2015; Tolay & Gulmezoglu, 2004).

ازآنجا که مطالعات در زمینه کاهش آب مصرفی و یافتن راه حل مناسب برای جبران آن در مزارعی که با مشکل کم‌آبی مواجه هستند، موردتوجه اندکی قرار گرفته است و علیرغم اهمیت و گستردگی کشت لوبیاچیتی در استان زنجان و نیز سرمایه‌گذاری فراوان برای توسعه روش آبیاری قطره‌ای نواری برای این محصول، تا کنون پژوهشی برای مقایسه میزان کم‌آبیاری با استفاده از نوارهای تیپ و بررسی اثر کم‌آبیاری به این روش انجام نشده است. لذا، هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر محلول‌پاشی عناصر غذایی کم‌مصرف بر عملکرد و میزان نیتروژن، فسفات، پتاسیم و روی موجود در اندام‌های رویشی گیاه لوبیا بود.

مواد و روش‌ها

برای بررسی اثرات کم‌آبیاری، کود سولفات پتاسیم و محلول‌پاشی عناصر غذایی بر عملکرد و برخی خصوصیات فیزیولوژیکی لوبیاچیتی *Phaseolous vulgaris* L رقم کوشا، در سال‌های زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ و ۱۴۰۳-۱۴۰۲ آزمایشی به‌صورت کرت‌های خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در ایستگاه تحقیقاتی خیرآباد مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان اجرا شد. البته لازم به ذکر است که پس از جمع‌آوری اطلاعات تجزیه واریانس طرح به‌صورت طرح کرت‌های خرد شده در چند زمان و چند مکان (دور آبیاری) انجام شد.

برای آماده‌سازی زمین، پس از شخم زمین با گاوآهن برگردان‌دار در بهار، سایر عملیات تهیه بستر کشت شامل دیسک، تسطیح و ایجاد فارو به روش معمول انجام شد. کودهای نیتروژن و فسفر از منابع اوره و سوپرفسفات تریپل به میزان ۱۵۰ کیلوگرم بر هکتار به خاک اضافه شد (۵۰ درصد کود نیتروژن در هنگام کاشت و بقیه آن به‌صورت کود سرک در مرحله قبل از گل‌دهی همراه با آب آبیاری و سوپرفسفات تریپل طی عملیات تهیه بستر کشت تا عمق ۳۰ سانتی‌متری با خاک مخلوط شد). در هر سال زراعی، دو آزمایش مجزا، یکی با دور آبیاری ۵ روز و دیگری با دور آبیاری ۹ روز انجام شد. در هر آزمایش، فاکتور اصلی شامل دو سطح (استفاده از کود سولفات پتاسیم به میزان ۵۰ کیلوگرم بر هکتار به همراه اسید هیومیک به میزان ۲ کیلوگرم بر هکتار و شاهد) و فاکتور فرعی شامل ٤ سطح محلول‌پاشی (شاهد یا محلول‌پاشی با آب)، نانوکود روی، اسید آمینه و سیلیکات پتاسیم هر سه به میزان ۲ در هزار) بودند. اعمال تیمار کود سولفات پتاسیم و اسید هیومیک همراه با آب آبیاری در مرحله قبل از گلدهی (حدوداً ۱۰ روز) و اعمال تیمار محلول‌پاشی در دو مرحله قبل از گلدهی و مرحله غلاف‌بندی بود. محلول‌پاشی بوته‌ها در تیمارهای مورد نظر در ساعات پایانی روز انجام شد. هر کرت آزمایشی شامل ٤ خط ٤ متری بود که در آن، فاصله ردیف‌های کشت و فاصله بین بوته‌ها روی خطوط کشت به‌ترتیب ۵۰ و ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. بذور رقم کوشا ضدعفونی شده با قارچ‌کش کاربندازیم در عمق پنج تا شش سانتی‌متری خاک در اوایل خرداد هر سال به‌صورت دستی کشت و آبیاری شد. آبیاری مزرعه به روش قطره‌ای با نوار تیپ بود. مبارزه با علف‌های هرز به‌صورت وجین دستی در دو یا سه مرحله انجام شد. در جدول ۱ آمار هواشناسی دو سال زراعی و در جدول ۲ برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش آورده شده است.

برای اندازه‌گیری غلظت عناصر نیتروژن، پتاسیم، فسفر و روی، برگ‌های میانی گیاهان تیمارهای مختلف آزمایش، برداشت شده و به‌طور کامل با آب دیونیزه شسته شدند. سپس نمونه‌های گیاهی در آون با دمای ٦٥ درجه سلسیوس به مدت ٤٨ ساعت خشک گردیدند. غلظت عنصر روی در نمونه‌های تهیه‌شده با دستگاه جذب اتمی (GBC-Avanta, Australia) اندازه‌گیری شد (Zahedi *et al*., 2019; Marschner, 2012). غلظت پتاسیم به‌وسیله دستگاه فلیم‌فتومتر تعیین گردید (Page *et al*., 1982; Marschner, 2012). مقدار فسفر با دستگاه اسپکترفتومتر به شیوه آمونیوم فسفومولیبدات اندازه‌گیری شد (Page *et al*., 1982). برای اندازه‌گیری نیتروژن نیز از روش کجلدال (Page *et al*., 1982; Marschner, 2012) استفاده گردید و در نهایت غلظت مواد معدنی به‌صورت درصدی از جرم خشک برگ بیان گردید. با رسیدن بوته‌های لوبیا کرت‌های آزمایشی برداشت و به‌طور کامل هوا خشک گردید. پس از جداسازی دانه‌ها عملکرد دانه اندازه‌گیری شد.

قبل از تجزیه واریانس، ابتدا نرمال بودن توزیع داده‌ها تائید گردید. همگنی واریانس‌ها با استفاده از آزمون‌های بارتلت و $F_{max\ Hartley}$ مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه واریانس با فرض تصادفی بودن سال و ثابت بودن سطوح تیمارها بر مبنای امید ریاضی انجام گرفت. مقایسه میانگین‌ها نیز به‌وسیله آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. با توجه به معنادار بودن برخی از اثرات متقابل دوگانه تیمارهای مورد بررسی، تجزیه واریانس‌های جداگانه بین سطوح یک فاکتور در هر سطح فاکتور دیگر انجام شد و در ادامه مقایسه میانگین‌های جداگانه انجام گردید و به‌صورت نمودار نشان داده شد. داده‌های حاصل به‌وسیله نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۱) تجزیه آماری گردید.

جدول ۱-آمار هواشناسی ایستگاه خیرآباد در طی دو سال زراعی.

Table 1- Meteorological statistics of Khairabad station during two crop years

ماه Month	سال زراعی Cropping Season	کمینه دما Minimum temperature	بیشینه دما Maximum temperature	میانگین دما Mean temlerature	میزان بارش Perecipitation	کمینه رطوبت نسبی Minimum relative humidity	بیشینه رطوبت نسبی Maximum relative humidity	بیشینه سرعت باد Maximum wind speed
June	2022-2023	10.7	31.0	20.9	0.6	22.6	80.4	8.0
	2023-2024	10.2	28.5	19.4	1.6	24.2	70.0	12.4
July	2023-2024	15.0	33.0	24.0	0.1	23.5	64.1	12.4
	2023-2024	14.2	28.6	21.3	0.0	28.8	59.0	13.4
Agust	2022-2023	15.7	35.2	25.4	0.4	18.2	56.0	12.6
	2023-2024	15.2	31.4	23.3	0.1	30.4	67.5	11.4
September	2023-2024	11.5	32.0	21.8	0.0	22.3	69.3	8.9
	2023-2024	10.5	29.4	19.9	0.0	21.7	63.1	11.6

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه.

Table 2 - Physical and chemical properties of the field soil

TNV %	روی قابل‌جذب Zn. Av (mg/kg)	آهن قابل‌جذب Fe. Av (mg/kg)	رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	شن Sand (%)	پتاسیم قابل‌جذب K. Av (mg/kg)	فسفر قابل‌جذب P. Av (mg/kg)	نیتروژن کل Total N (%)	کربن آلی OC (%)	واکنش گل اشباع pH	هدایت الکتریکی EC10 (dS/m)
21	5.24	11.46	24	40	38	568	20.60	0.07	0.88	7.20	0.77
25	5-10	10-15				250-300	13-18				حد بحرانی

نتایج و بحث

با استفاده از واریانس خطاهای آزمایشی محاسبه‌شده برای صفات مختلف در دورهای آبیاری ۵ و ۹ روز، در دو سال مورد بررسی، یکنواختی واریانس خطای آزمایشی ارزیابی گردید. بهتر است از چند آزمون برای تست غیریکنواختی واریانس‌ها استفاده کرد و در صورت معنادار نبودن حتی یکی از روش‌ها نتیجه‌گیری شود که واریانس‌های اشتباه‌های درون‌تیماری یکنواخت می‌باشند (Valizadeh & Moghadam, 2010). به‌غیراز غلظت

نیتروژن برای باقی صفات، تست بارتلت غیر معنادار بود. البته برای غلظت نیتروژن نیز در سطح احتمال ۷ درصد غیرمعنادار بود. $F_{max\ Hartley}$ نیز به‌جز برای غلظت روی برای بقیه صفات معنادار گردید. بنابراین، داده‌های مربوط به دو دور آبیاری در دو سال مورد بررسی برای صفات مورد مطالعه یکنواخت ارزیابی گردیدند (جدول ۳).

جدول ۳- واریانس خطاهای آزمایشی در دورهای مختلف آبیاری در دو سال زراعی و آزمون‌های F max هارتلی و بارتلت برای ارزیابی یکنواختی واریانس‌ها.

Table 3- Variance of experimental errors in different irrigation cycle in two crop years and F_{max} Hartley and Bartlett's tests to evaluate the uniformity of variances.

سال Year	دور آبیاری Irrigation Cycle	غلظت نیتروژن (N)	غلظت فسفر (P)	غلظت پتاسیم (K)	غلظت روی (Zn)	عملکرد دانه Grain yield
2022-2023	دور آبیاری ۵ روز 5-DIC	0.0423	0.00157	0.01967	166.55	30489.3
	دور آبیاری ۹ روز 9-DIC	0.01524	0.00122	0.00835	202.965	25798.8
2023-2024	دور آبیاری ۵ روز 5-DIC	0.02012	0.00104	0.0101	185.61	45899.4
	دور آبیاری ۹ روز 9-DIC	0.01143	0.00046	0.00534	135.86	79981.78
Bartlet test		7.309*	3.64	4.06	6.52	7.14
$F_{max\ Hartley}$		3.7**	3.41**	3.68**	1.49	3.1*

5-DIC: دور آبیاری ۵ روز، 9-DIC: دور آبیاری ۹ روز

5-DIC: 5-day irrigation cycle, 9-DIC: 9-day irrigation cycle

** و *: به‌ترتیب معنادار در سطح احتمال یک درصد و پنج درصد

** and *: significant at the level of 1% and 5%, respectively

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بین دورهای آبیاری ۵ و ۹ روز برای غلظت پتاسیم و عملکرد دانه در سطح احتمال ۱ درصد و در غلظت نیتروژن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنادار وجود داشت. بین سال‌های مورد مطالعه از نظر غلظت پتاسیم و عملکرد دانه تفاوت معناداری وجود داشت (جدول ٤). همچنین، بین دو سطح کودی مورد ارزیابی از نظر غلظت نیتروژن، غلظت فسفر و غلظت پتاسیم تفاوت معناداری مشاهده شد. در نهایت بین سطوح محلول‌پاشی برای تمامی صفات به‌جز غلظت پتاسیم در سطح احتمال ۱ درصد تفاوت معنادار مشاهده شد. در صفت غلظت نیتروژن اثر متقابل دوگانه محلول‌پاشی × دور آبیاری، در صفت غلظت پتاسیم اثر متقابل دوگانه محلول‌پاشی × دور آبیاری و در صفت غلظت روی اثرات متقابل دوگانه کود × دور آبیاری، محلول‌پاشی × کود و محلول‌پاشی × دور آبیاری در سطح یک درصد معنادار شدند. اثرات متقابل دوگانه محلول‌پاشی × سال برای عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنادار بود که نشان‌دهنده واکنش متفاوت سطوح محلول‌پاشی مورد بررسی در سال‌های آزمایش بود که با توجه به شرایط مختلف اقلیمی (از قبیل میزان بارش، پراکندگی بارش، دمای هوا و ...) در دو سال مورد نظر منطقی به نظر می‌رسد؛ بنابراین، به نتایج حاصل از اثرات متقابل کود و محلول‌پاشی در سال اشاره نشده است.

جدول ۴- تجزیه واریانس پارامترهای مورد مطالعه در تیمارهای دور آبیاری، کود و محلول‌پاشی.

Table 4- Analysis of variance of the studied parameters under irrigation, fertilizer and foliar spray treatments

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات (Mean square) غلظت نیتروژن N	غلظت فسفر P	غلظت پتاسیم K	غلظت روی Zn	عملکرد دانه Grain yield
دور آبیاری Irrigation cycle	1	0.4616*	0.00056	0.3826**	679.24	25069177.7**
سال Year	1	0.2628	0.0058	0.2497**	343.64	1629650.2*
سال × دور آبیاری Irrigation cycle×Year	1	0.0164	0.00065	0.00012	0.01926	23793.2
خطای a= بلوک (سال × دور آبیاری) Error a=Block (Irrigation cycle×Year)	12	0.0972	0.0045	0.002263	345.59	197721.9
کود Fertilizer	1	0.5385**	0.0317**	0.2141*	920.65	5473
کود × دور آبیاری Irrigation cycle× Fertilizer	1	0.008	0.0043	0.0015	4107.38**	2257.1
کود × سال Year×Fertilizer	1	0.0044	0.00074	0.0046	42.81	56769.5
دور آبیاری × کود × سال Year× Fertilizer× Irrigation cycle	1	0.00024	0.00013	0.0141	18.67	21.8
خطای b= بلوک در کود (سال × دور آبیاری) Error b=Block×Fertilizer (Irrigation cycle×Year)	12	0.0504	0.0017	0.01558	242.98	123029.1
محلول‌پاشی Foliar spraying	3	0.1426**	0.0048**	0.025	24894.08**	276315.6**
محلول‌پاشی × کود Fertilizer×Foliar spraying	3	0.0162	0.0021	0.023	1430.76**	75595.04
محلول‌پاشی × سال Year×Foliar spraying	3	0.0127	0.00012	0.0014	141.35	237675.6**
محلول‌پاشی × دور آبیاری Irrigatin cycle×Foliar spraying	3	0.0946**	0.0017	0.0719**	1158.22**	71009.2
محلول‌پاشی × دور آبیاری × سال Year×Irrigatin cycle×Foliar spraying	3	0.002	0.00076	0.0041	15.19	23228.98
محلول‌پاشی × کود × سال Year×Fertilizer×Foliar spraying	3	0.0065	0.00036	0.0077	50.07	49730.3
محلول‌پاشی × کود × دور آبیاری Irrigatin cycle×Fertilizer×Foliar spraying	3	0.0411	0.001	0.0351**	4722.9**	115203.8
محلول‌پاشی × کود × دور آبیاری × سال Year×Irrigatin cycle×Fertilizer×Foliar spraying	3	0.0037	0.00003	0.0084	26.69	14611.11
خطای c=بلوک در محلول‌پاشی در کود (سال × دور آبیاری) Error c=Block×Fertilizer×Fertilizer (Irrigation cycle×Year)	71	0.0219	0.00107	0.0104	172.99	45754.4
ضریب تغییرات٪ CV%		4.77	11.53	9.16	23.18	8.25

** و *: به‌ترتیب معنادار در سطح احتمال یک و پنج درصد

** and *: Significant at the level of 1% and 5%, respectively

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که دور آبیاری ۹ روز باعث کاهش معنادار غلظت‌های نیتروژن، پتاسیم و عملکرد دانه و کاهش غیرمعنادار غلظت فسفر و روی شده است (جدول ۵). مصرف سولفات پتاسیم به همراه اسید هیومیک تفاوت چندانی در میزان عملکرد دانه نداشت ولی کاهش معناداری در غلظت‌های نیتروژن، فسفر و پتاسیم برگ نشان داد. از طرف دیگر، مصرف این کود باعث افزایش غیرمعنادار در غلظت روی شد. Motalebifard et al. (2013) گزارش دادند که تعداد غده و عملکرد غده سیب زمینی با اعمال تنش کمبود آب در خاک به‌طور معنادار کاهش یافتند. Najafi et al. (2020) گزارش کردند که کم‌آبی در خاک سبب کاهش غلظت فسفر گیاه یونجه شد. Toufighi et al. (2025) گزارش دادند که عملکرد دانه و عملکرد زیست‌توده ذرت با اعمال تنش کمبود آب در خاک به‌طور معنادار کاهش یافتند.

در مورد تجمع پتاسیم در هنگام تنش اسمزی، نتایج زیادی گزارش شده است (Kidambi *et al.*, 1990; Shabala *et al.*, 2000). این کاتیون در تنظیم فشار اسمزی و کنترل روزنه‌ای نیز نقش مهمی را ایفا می‌کند (Hamidi and safarinejad, 2003). کودهای پتاسیمی به‌ویژه سولفات پتاسیم نقش مهم‌تری از طریق تنظیم روزنه‌ها و تعادل یونی در درون سیستم گیاهی در کاهش تنش‌های کم‌آبی ایفا می‌کنند؛ بنابراین، مصرف کودها بایستی متعادل و بهینه باشد و به مصرف کودهای پتاسیمی توجه ویژه مبذول گردد (Molodi, 2005). گیاهان با ذخیره مطلوب پتاسیم، آب کمتری از دست می‌دهند، زیرا پتاسیم پتانسیل اسمزی را افزایش داده و نقش مثبتی در بستن روزنه‌ها دارد (Sarmadnia and Kouchaki, 1995). میزان مناسب کود سولفات پتاسیم در خاک سبب تسهیل تعدیل اسمزی در خاک می‌شود که درنتیجه فشار اسمزی در برگ‌ها باقی می‌ماند و به این طریق توانایی گیاه در مقابله با تنش خشکی افزایش می‌یابد. پتاسیم نقش مهمی در کاهش اثرات تنش‌های حاصل از کم‌آبی در گیاه ایفا می‌کند، لذا لازم است در مصرف نهاده‌های پتاسیمی توجهی ویژه گردد (Molodi, 2015). با توجه به نتایج دیگر محققان به نظر می‌رسد که تأثیر نداشتن میزان سولفات پتاسیم بر میزان عملکرد می‌تواند به‌دلیل میزان اندک کود مصرفی سولفات پتاسیم باشد. به‌عبارت‌دیگر میزان مورد نیاز گیاه به پتاسیم جهت مقاومت به شرایط دور آبیاری ۹ روز بسیار بیشتر از ۵۰ کیلوگرم بر هکتار به‌صورت کاربرد در کود آبیاری باشد.

محلول‌پاشی عناصر غذایی بر روی صفات مورد بررسی نشان داد که سیلیکات پتاسیم بیشترین تأثیر را بر روی عملکرد دانه داشته است و باعث افزایش معنادار آن در مقایسه با مصرف اسید آمینه و نانوکود روی شده است؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم می‌تواند باعث افزایش مقاومت در شرایط خشکی باشد. پارساپور و همکاران (Parsapour *et al.*, 2019) با بررسی تأثیر محلول‌پاشی برگی سیلیسیم در شرایط تنش خشکی، نشان دادند که حضور سیلیسیم و به‌خصوص ذرات نانو نقش چشم‌گیری در بهبود عملکرد دانه گندم و همچنین، توزیع مجدد مواد فتوسنتزی داشت. لی و همکاران (Li *et al.*, 2007) اثر سیلیسیم را بر رشد گیاه ذرت در شرایط خشکی در گلخانه مورد مطالعه قرار داده و گزارش کردند در شرایط تنش ملایم و شدید، مصرف سیلیسیم باعث افزایش عملکرد می‌شود. این نتایج با نتایج حاصل از این تحقیق مطابقت دارد. سیلیسیم به جهت تأثیر مستقیمی که بر بهبود وضعیت جذب و انتقال آب در آوندها دارد، موجب افزایش کارایی مصرف آب خواهد شد (Ma & Yamaji, 2006).

سیلیسیم کارایی مصرف آب را افزایش می‌دهد به‌طوری‌که این عنصر در دیواره‌های سلولی اپیدرم در هر دو سطح برگ تجمع می‌یابد. درنتیجه تلف شدن آب از کوتیکول کاهش می‌یابد. همچنین، هنگامی‌که تعرق زیاد است

از فروریختن آوندها جلوگیری می‌نماید. علاوه‌بر این، سیلیسیم شدت تعرق گیاه را نیز کاهش می‌دهد. یکی از علت‌های کاهش بازده مصرف آب تلفات آب از طریق روزنه‌های باز برای گیاهانی است که از اتمسفر اطراف CO_2 جذب می‌کنند. سیلیسیم از طریق افزایش هدایت CO_2، (Shen *et al.*, 2010) و صرفه‌جویی در تلفات آب با تغییر در پاسخ روزنه‌ای و جبران آب از دست رفته از برگ‌ها با تسهیل جذب و انتقال آب بر این معضل غلبه می‌کند (Hattori *et al.*, 2007). سیلیسیم با جلوگیری از تلفات آب در اطراف روزنه و اصلاح خواص فیزیکی دیواره سلول‌های نگهبان بر هدایت روزنه‌ای اثر می‌گذارد (Ueno & Agarie, 2005). همچنین، ماهیت آب‌دوستی سیلیسیم می‌تواند به حفظ آب در برگ‌ها کمک کند (Romero-aranda *et al.*, 2006) و از سوی دیگر به شکل یک مانع، از دست دادن آب از طریق کوتیکول را به‌وسیله کریستال‌های ذخیره شده در سلول‌های اپیدرمی کاهش دهد (Trenholm *et al.*, 2004). رسوب سیلیسیم در ریشه‌ها، برگ‌ها و ساقه‌ها موجب استحکام دیواره سلولی و کاهش تعرق کوتیکولی می‌شود، بنابراین، مقاومت به تنش خشکی را افزایش می‌دهد (Ma and Yamaji, 2006)؛ بنابراین، اثرات مفید سیلیسیم با تنزل بیش از حد آب به‌وسیله تعرق (Savant *et al.*, 1999) یا با رسوب کریستال‌های سیلیکات در زیر سلول‌های اپیدرمی برگ‌ها و ساقه‌ها (Trenholm *et al.*, 2004) ارتباط دارد که می‌تواند تلفات آب از طریق کوتیکول را کاهش دهد.

کاهش عملکرد گیاهان زراعی از اثرات منفی کمبود روی قابل دسترس در خاک می‌باشد. افزایش غلظت روی دانه در پی محلول‌پاشی روی در لوبیا به‌وسیله پژوهشگران متعددی گزارش شده است (Kavian-Athar & Aboutalebian, 2020; Kordi *et al.*, 2016; Saeedi-Abu Ishaqi and Yadavi, 2015; Kazemi-Poshtmasari *et al.*, 2006; Pahlavan, 2006) کاهش عملکرد گیاه لوبیا درنتیجه عدم کاربرد روی به‌وسیله پژوهشگران متعددی گزارش شده است (Kavian-Athar & Aboutalebian, 2020; Jamshidi *et al.*, 2016; Kordi *et al.*, 2016). برای تأمین روی مورد نیاز گیاه از روش‌هایی مانند پیش‌تیمار کردن بذور، مصرف خاکی، محلول‌پاشی برگی و ترکیب روش‌های یاد شده استفاده می‌گردد. درحالی‌که کاربرد برگی روی، به‌دلیل مصرف کمتر و جذب سریع‌تر به‌وسیله برگ موردتوجه قرار گرفته است (Alloway, 2003). بااین‌حال نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که مصرف برگی نانوکود روی تأثیر چندانی در افزایش عملکرد دانه نداشته است و بهتر است که از روش‌های دیگر مصرف این نوع کود استفاده گردد.

محلول‌پاشی اسید آمینه باعث افزایش معنادار غلظت نیتروژن برگ شد (جدول ۵). در مرحله بعد نانوکود روی قرار داشت که با تیمار شاهد و سیلیکات پتاسیم تفاوت معناداری نداشت. اعمال تیمار اسید آمینه و نانوکود روی دارای بیشترین تأثیر معنادار در غلظت فسفر برگ بودند و اعمال تیمار سیلیکات پتاسیم کمترین میزان غلظت فسفر را نشان داد. در غلظت پتاسیم برگ، بیشترین تفاوت معنادار غلظت، با استفاده از مصرف اسید آمینه به‌دست آمد که با هر سه سطح دیگر مورد بررسی تفاوت معناداری نشان داد. بیشترین غلظت روی برگ، با استفاده از نانوکود روی و سپس مصرف اسید آمینه مشاهده شد که تفاوت معناداری با سطح شاهد و سیلیکات پتاسیم نشان می‌دادند. به کار بردن اسیدهای آمینه به‌صورت محلول‌پاشی بستگی به نیاز گیاه در مراحل اصلی و حساس رشد دارد (Stijn *et al.*, 2007). از مزایای مهم اسیدهای آمینه می‌توان به مواردی مانند مقاومت به تنش‌ها، تأثیر بر فتوسنتز، تأثیر روی فعالیت روزنه‌های گیاهی، اثر کلاتی و تنظیم فعالیت برخی فیتوهورمون‌ها اشاره کرد. تنش‌ها از قبیل دمای بالا، رطوبت کم، آفات، یخ‌زدگی و سرما اثر منفی روی متابولیسم گیاهی دارند و موجب کاهش کمیت و کیفیت محصولات گیاهی می‌شوند. همچنین، به کار بردن اسیدهای آمینه مفید قبل، در طول و بعد از تنش موجب کاهش اثر تنش می‌شوند (Ashraf & Foolad, 2011).

جدول ۵- مقایسه میانگین‌های سطوح تیماری از نظر صفات مورد بررسی.

Table 5- Comparison of average treatment levels in studied traits.

دور آبیاری Irrigation cycle	غلظت نیتروژن N (%)	غلظت فسفر P (%)	غلظت پتاسیم K (%)	غلظت روی Zn (mg/kg)	عملکرد دانه Grain yield (kg/ha)
دور آبیاری ۵ روز 5-DIC	3.1667 a	0.286	1.201 a	59.03	3038.02 a
دور آبیاری ۹ روز 9-DIC	3.0389 b	0.281	1.087 b	54.41	2150.9 b

کود Fertilizer	غلظت نیتروژن N (%)	غلظت فسفر P (%)	غلظت پتاسیم K (%)	غلظت روی Zn (mg/kg)	عملکرد دانه Grain yield (kg/ha)
سولفات پتاسیم Potassium sulfat	3.0383 b	0.268 b	1.113 b	59.51	2592.02
شاهد Control	3.1647 a	0.299 a	1.173 a	54.01	2589.13

محلول‌پاشی Foliar spraying	غلظت نیتروژن N(%)	غلظت فسفر P(%)	غلظت پتاسیم K(%)	غلظت روی Zn (mg/kg)	عملکرد دانه Grain yield (kg/ha)
شاهد Control	3.0559 b	0.282 ab	1.131 b	34.62 c	2547.94 b
نانوکود روی Nano-zinc fertilizer	3.1078 b	0.286 a	1.136 b	91.39 a	2533.31 b
اسید آمینه Amino acid	3.2055 a	0.299 a	1.191 a	67.74 b	2546.03 b
سیلیکات پتاسیم Potassium silicate	3.0419 b	0.267 b	1.118 b	33.54 c	2733.56 a

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک براساس آزمون دانکن در سطح پنج درصد تفاوت معناداری ندارند.

In each column, the numbers with common letters do not have a significant difference at the 5% level based on Duncan test.

گیاهان می‌توانند اسیدهای آمینه را از طریق روزنه جذب کنند. جذب اسیدهای آمینه در گیاهان به دمای محیط نیز وابسته است. محلول‌پاشی اسید آمینه روی گیاه موجب فراهم شدن شرایط بهتر برای سنتز پروتئین (افزایش غلظت نیتروژن) می‌شود (Stijn *et al.*, 2007). اسیدهای آمینه با تأثیر بر افزایش مقاومت به تنش‌های محیطی، افزایش غلظت کلروفیل و درنتیجه تأثیر بر فتوسنتز، بر رشد و عملکرد گیاهان مؤثر واقع می‌شوند (Faten *et al.*, 2010). در طی فعالیت تنظیم اسمزی، پتانسیل اسمزی بافت‌های در شرایط تنش در اثر انباشت برخی مواد اسمزی در سلول‌ها کاهش می‌یابد و بنابراین، فشار آماس سلول‌ها در حد مطلوب نگهداری می‌شود. مواد اسمزی به‌طور عمده شامل برخی از عناصر مانند پتاسیم، سدیم و کلسیم و برخی متابولیت‌ها نظیر قندها، مونوساکاریدها، اسیدهای آمینه و اسیدهای آلی می‌باشند (Ghorbanali & niakan, 2005) که در این بین نقش اسیدهای آمینه به‌ویژه پرولین حائز اهمیت است (Manivanian *et al.*, 2007). همان‌طور که گفته شد تجمع پرولین در سلول رابطه مستقیم و مثبت برای القای تحمل در برابر تنش کمبود آب دارد و در شرایط تنش ارقام متحمل، میزان پرولین بیشتری را در

سلول برای مقاومت به شرایط تنش تولید می‌کنند (Sakamato, 2002). همچنین، آسپارتیک اسید، گلوتامیک اسید و والین نقش بارزی در تنظیم فعالیت تنظیم اسمزی دارند (Hamilton, 2001).

گیاهان کربوهیدرات‌ها را از طریق فتوسنتز تولید می‌کنند. کاهش فتوسنتز و در مقابل افزایش تنفس سبب گرسنگی در گیاه می‌شود، درنتیجه گیاه به سمت مرگ پیش می‌رود. کلروفیل‌ها مسئول جذب نور خورشید هستند. گلایسین و اسید گلوتامیک موجب افزایش میزان کلروفیل و میزان جذب نور در گیاه می‌شوند (Tony & Norio, 2012). روزنه‌ها ساختارهای سلولی هستند که تعادل آبی را در داخل گیاه حفظ می‌کنند. باز بودن روزنه‌ها به‌وسیله عوامل بیرونی (نور، رطوبت و دما) و درونی (تجمع اسیدهای آمینه و اسید آبسزیک) کنترل می‌شوند. اسیدهای آمینه (به‌ویژه اسید گلوتامیک) سبب باز شدن روزنه و ورود بیشتر CO_2 و درنتیجه افزایش میزان فتوسنتز می‌شود (Forde & Lea, 2007). اسیدهای آمینه اثر کلاتی روی مواد تغذیه‌ای گیاهی دارند و وقتی با همدیگر به کار برده می‌شوند موجب افزایش جذب آن‌ها می‌شوند. گلایسین و اسید گلوتامیک دو اسید آمینه شناخته شده و مفید در تشکیل کلات‌ها هستند (Ashraf & Foolad, 2011). اسیدهای آمینه محرک و فعال‌کننده فیتوهورمون‌ها و مواد مؤثر در رشد هستند (Gross, 1991). تریپتوفان سبب سنتز اکسین و آرژنین سنتز هورمون‌های وابسته به تولید دانه و میوه را تحریک می‌کند (Faten *et al.*, 2010).

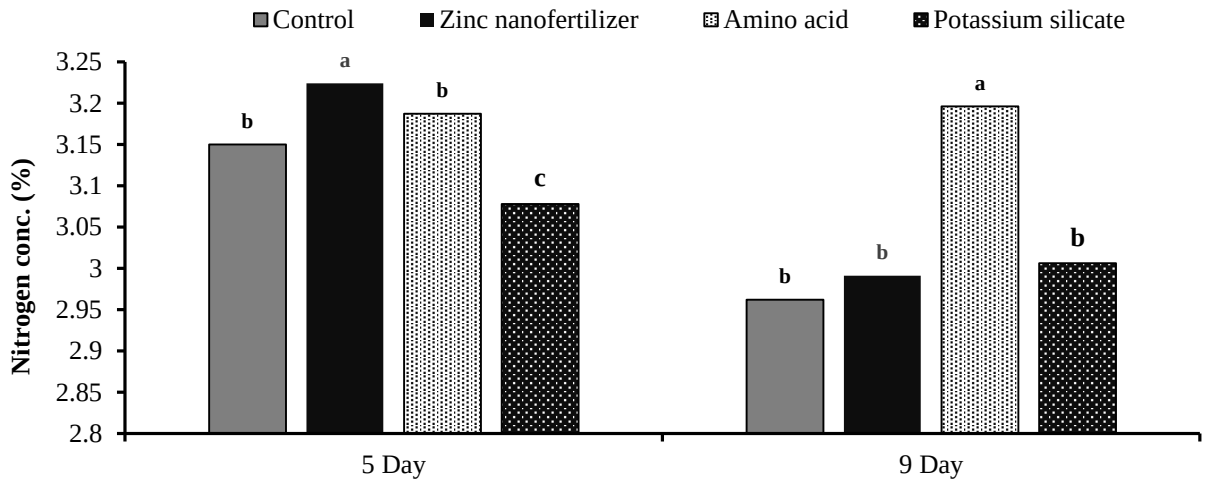
با توجه به معنادار بودن اثر متقابل محلول‌پاشی × دور آبیاری در صفت غلظت نیتروژن و تجزیه شکست اثر متقابل، مشاهده شد که بین سطوح محلول‌پاشی در هر دو دور آبیاری، تفاوت معنادار وجود دارد (جدول ٦). اثر متقابل از نوع تغییر در ترتیب بود. مقایسه میانگین‌ها مشخص کرد که در دور آبیاری ۵ روز، مصرف نانوکود روی، بیشترین غلظت نیتروژن برگی را نشان داد (تفاوت معنادار) و در ادامه مصرف اسید آمینه قرار داشت. درحالی‌که در دور آبیاری ۹ روز، بیشترین غلظت نیتروژن در مصرف اسید آمینه مشاهده شد که با سطوح دیگر محلول‌پاشی تفاوت معناداری داشت. بین سه سطح دیگر تفاوت معناداری وجود نداشت با این حال مصرف سیلیکات پتاسیم و نانوکود روی نیز باعث افزایش غیر معنادار غلظت نیتروژن برگی شده بودند (شکل ۱). این نتایج نشان می‌دهد که در شرایط تنش مصرف اسید آمینه می‌تواند باعث افزایش سطح نیتروژن برگی (ماده مورد نیاز جهت سنتز پروتئین) شود.

جدول ۶- تجزیه واریانس شکست اثرات متقابل دوگانه معنادار شده پارامترهای مورد بررسی.

Table 6: Analysis of variance of the significant duplicate interaction effects of the studied parameters.

محلول‌پاشی × کود (غلظت روی) Fertilizer×Foliar spraying (Zn mg/kg)			کود × دور آبیاری (غلظت روی) Irrigation cycle× Fertilizer (Zn mg/kg)		
میانگین مربعات Mean square	درجه آزادی Df	کود Fertilizer	میانگین مربعات Mean square	درجه آزادی Df	دور آبیاری Irrigation cycle
18197**	3	سولفات پتاسیم Potassium sulfat	561.7	1	دور آبیاری ۵ روز 5-DIC
8166**	3	شاهد Control	4520.5**	1	دور آبیاری ۹ روز 9-DIC

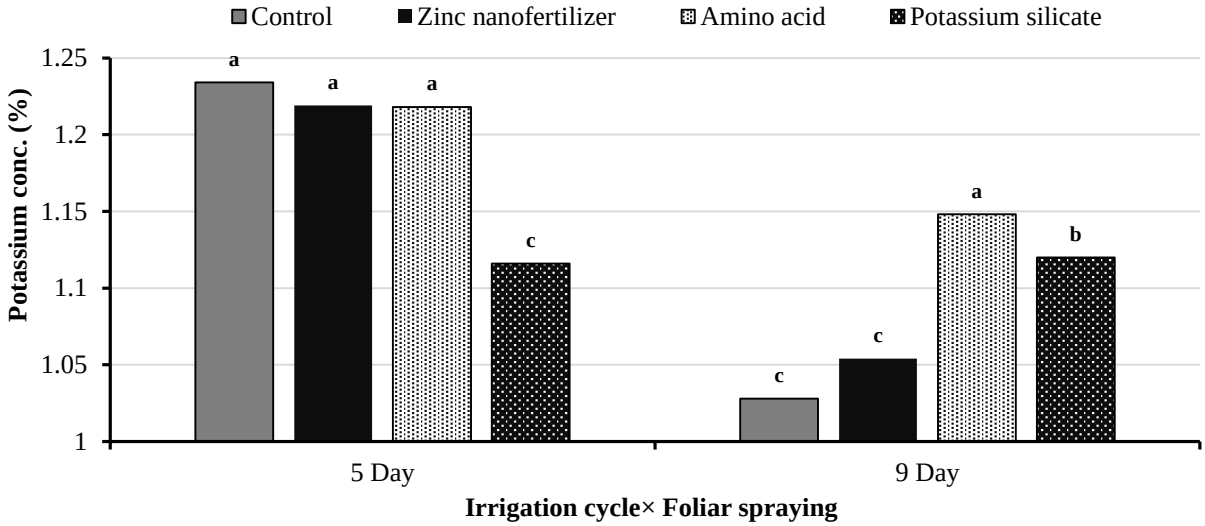
محلول‌پاشی × دور آبیاری (غلظت روی) Fertilizer×Foliar spraying (Zn mg/kg)	محلول‌پاشی× دور آبیاری (غلظت پتاسیم) Fertilizer×Foliar spraying (K%)	محلول‌پاشی × دور آبیاری (غلظت نیتروژن) Irrigation cycle× Foliar spraying (N%)		
میانگین مربعات Mean square	میانگین مربعات Mean square	میانگین مربعات Mean square	درجه آزادی Df	دور آبیاری Irrigation cycle
10102**	0.047**	0.062*	3	دور آبیاری ۵ روز 5-DIC
16054**	0.051**	0.181**	3	دور آبیاری ۹ روز 9-DIC



شکل ۱- اثر متقابل محلول‌پاشی × دور آبیاری برای غلظت نیتروژن اندام‌های رویشی لوبیا چیتی. مقایسه میانگین‌ها برای هر زمان جداگانه انجام شده است.

Figure 1- Interaction effect of foliar spray × irrigation cycle for nitrogen concentration.

با توجه به معنادار بودن اثر متقابل محلول‌پاشی × دور آبیاری در صفت غلظت پتاسیم و تجزیه شکست اثر متقابل، مشاهده شد که بین سطوح محلول‌پاشی در هر دو دور آبیاری، تفاوت معنادار وجود دارد (جدول ٦). اثر متقابل از نوع تغییر در ترتیب بود. مقایسه میانگین‌ها مشخص کرد که در دور آبیاری ۵ روز، مصرف مواد تغذیه‌ای به‌صورت محلول‌پاشی باعث کاهش غلظت پتاسیم برگی شده است و بیشترین کاهش معنادار در سطح سیلیکات پتاسیم مشاهده شد و بین دو سطح تغذیه‌ای دیگر با سطح شاهد علیرغم کاهش غلظت تفاوت معناداری وجود نداشت. در دور آبیاری ۹ روز، روند تغییرات متفاوت بود و بیشترین غلظت پتاسیم در مصرف اسید آمینه مشاهده شد که با سطوح دیگر محلول‌پاشی تفاوت معناداری داشت. در مرحله بعد نیز سطح سیلیکات پتاسیم قرار داشت. بین دو سطح دیگر تفاوت معناداری وجود نداشت (شکل ۲). این نتایج نشان می‌دهد که در شرایط تنش مصرف اسید آمینه و سیلیکات پتاسیم به‌صورت محلول‌پاشی می‌تواند باعث افزایش غلظت پتاسیم برگی شود.

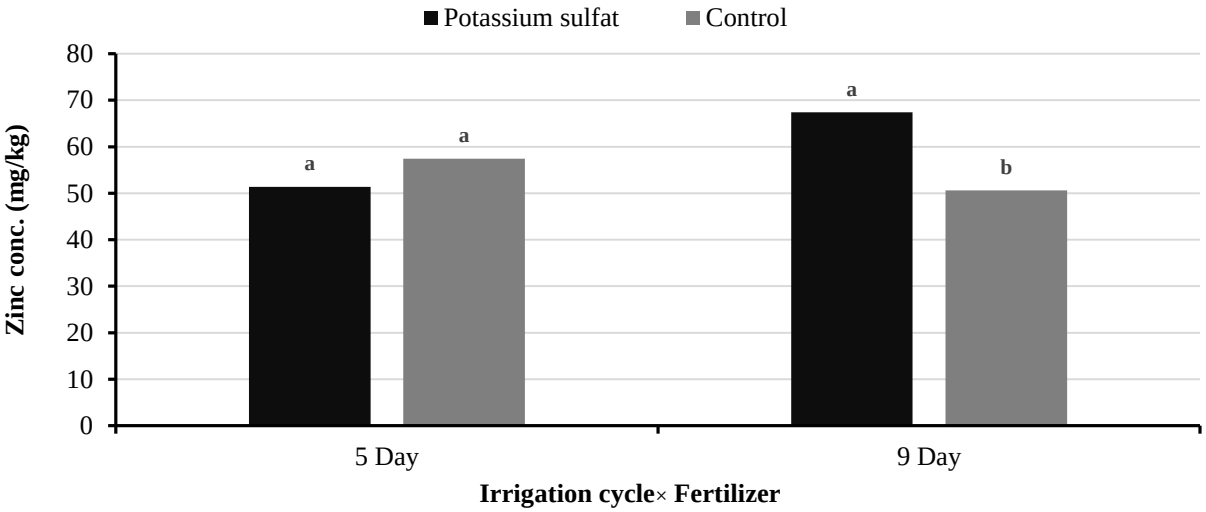


شکل ۲- اثر متقابل محلول‌پاشی × دور آبیاری برای غلظت پتاسیم اندام‌های رویشی لوبیا چیتی. مقایسه میانگین‌ها برای هر زمان جداگانه انجام شده است.

Figure 2- Interaction effect of foliar spray × irrigation cycle for the potassium concentration trait.

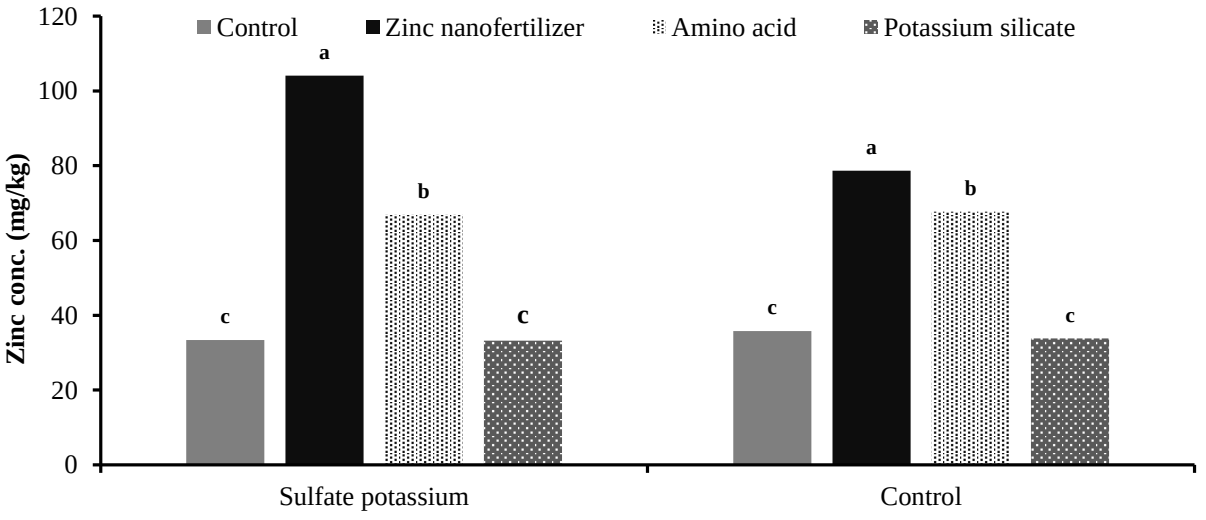
در مورد غلظت روی، هر سه اثر متقابل کود × دور آبیاری، محلول‌پاشی × دور آبیاری و کود × دور آبیاری معنادار شدند. در مورد اثر متقابل کود × دور آبیاری، اثر متقابل از نوع تغییر در ترتیب بوده تجزیه واریانس‌های جداگانه نشان دادند که در دور آبیاری ۹ روز بین دو سطح کود (شاهد و سیلیکات پتاسیم) تفاوت معنادار در سطح ۵ درصد وجود دارد (جدول ٦) و مصرف سیلیکات پتاسیم باعث افزایش غلظت روی برگ‌ها شده است (شکل ۳). در مورد اثر متقابل محلول‌پاشی × کود، تجزیه‌های جداگانه نشان داد که در هر دو سطح کود، بین سطوح محلول‌پاشی تفاوت معنادار وجود دارد. اثر متقابل از نوع تغییر در مقدار بوده و در هر دو سطح بیشترین میزان غلظت روی در مصرف نانوکود روی و پس از آن در مصرف اسید آمینه مشاهده شد (شکل ٤). در مورد اثر متقابل محلول‌پاشی × دور آبیاری نیز تجزیه‌های جداگانه نشان داد که بین سطوح محلول‌پاشی در هر دو دور آبیاری تفاوت معنادار در سطح یک درصد وجود دارد. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که اثر متقابل از نوع تغییر در مقدار بوده و در هر دو سطح آبیاری بیشترین میزان غلظت روی مربوط به مصرف نانوکود روی و اسید آمینه می‌باشد (شکل ۵)؛ بنابراین،

می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که مصرف نانوکود روی و اسید آمینه در هر شرایط آبیاری و مصرف و یا عدم مصرف کود سولفات پتاسیم باعث افزایش غلظت روی برگ‌ها خواهد شد.



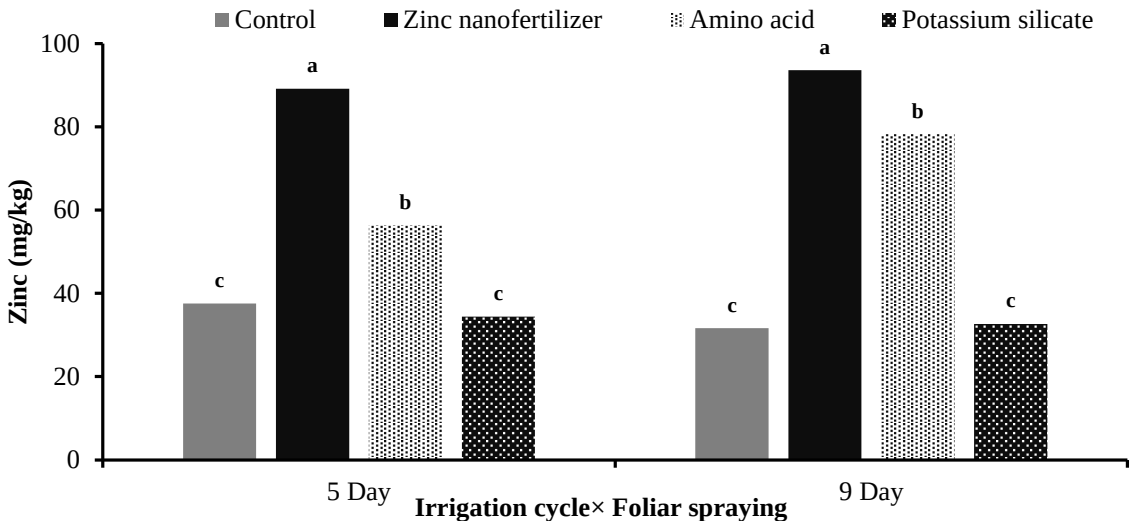
شکل ۳- اثر متقابل کود × دور آبیاری برای غلظت روی اندام‌های رویشی لوبیا چیتی. مقایسه میانگین‌ها برای هر زمان جداگانه انجام شده است.

Figure 3- Interaction effect of fertilizer × irrigation cycle for the zinc concentration trait.



شکل ۴- اثر متقابل کود × محلول پاشی برای غلظت روی اندام‌های رویشی لوبیا چیتی. مقایسه میانگین‌ها برای هر زمان جداگانه انجام شده است.

Figure 4- Interaction effect of fertilizer × foliar spray for the zinc concentration trait.



شکل ۵- اثر متقابل دور آبیاری × محلول پاشی برای غلظت روی اندام‌های رویشی لوبیا چیتی. مقایسه میانگین‌ها برای هر زمان جداگانه انجام شده است.

Figure 5- Interaction effect of irrigation cycle × foliar spray for the zinc concentration trait.

نتیجه‌گیری

کشت لوبیا در کشور به‌عنوان یک زراعت تابستانه تابع محدودیت‌های مختلف اقلیمی و اکولوژیکی بوده به‌طوری‌که تولید این محصول با حداقل مصرف نهاده‌هایی چون آب می‌تواند ارزش اقتصادی این محصول را در مقایسه با سایر محصولات تابستانه حفظ نماید. با توجه به نتایج این بررسی می‌توان دریافت که دور آبیاری ۹ روز باعث کاهش معنادار غلظت‌های نیتروژن برگ، پتاسیم برگ و عملکرد دانه و کاهش غیر معنادار غلظت فسفر و روی می‌شود. مصرف سولفات پتاسیم به همراه اسید هیومیک تفاوت چندانی در میزان عملکرد دانه نداشت. محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم باعث افزایش معنادار عملکرد دانه شد؛ بنابراین، می‌توان محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم را جهت افزایش مقاومت در شرایط خشکی پیشنهاد نمود. محلول‌پاشی اسید آمینه باعث افزایش غلظت نیتروژن و پتاسیم برگی شد. محلول‌پاشی اسید آمینه و نانوکود روی بیشترین تأثیر را در افزایش غلظت فسفر برگ داشتند و درنهایت محلول‌پاشی نانوکود روی و اسید آمینه بیشترین تأثیر را در افزایش غلظت روی برگ داشتند. در شرایط دور آبیاری ۹ روز مصرف اسید آمینه و سیلیکات پتاسیم به‌صورت محلول‌پاشی می‌تواند باعث افزایش غلظت پتاسیم و روی برگ شود. با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق می‌توان دریافت که محلول‌پاشی عناصر غذایی جهت رفع کمبود مواد مورد نیاز لوبیا در شرایط تنش حاصل از افزایش دور آبیاری روش مناسبی است.

شفاف‌سازی استفاده از هوش مصنوعی

در مراحل مختلف این پژوهش اعم از ایده‌پردازی، طراحی، جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها، نگارش متن و ویرایش یا ترجمه از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نشده است.

منابع مورد استفاده

References

Aqcheli, S., Rahemi-Karizaki, A., Gholamalipour Alamdari, A., & Gholizadeh, A. (2016). The effect of drought stress on some morphological characteristics in cereal grains under greenhouse conditions. *The Second National Congress on the Development of Agricultural Sciences and Natural Resources*. Farhangian University, Gorgan, Iran 1-7.

Altin Disli, A., Irget, M.E., Kalkan, H., Kara, S., & Oktay, M. (1998). Effect of foliar applied KNO_3 on yield, quality and leaf nutrients of Carignane and Colombard wine grapes. In: Anac, D., & P. Martin- Preveleds (Eds), *Improved Crop Quality by Nutrient Management*. Pp: 103-106.

Alloway, B.J. (2003). Zinc in soil and crop nutrition. *International zinc association*, Pp: 114.

Arena, E., Campisi, S., Fallico, B., & Maccarone, E. (2007). Distribution of fatty acids and phytosterols as a criterion to discriminate geographic origin of pistachio seeds. *Food Chemistry*, 104, 403-408, https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.09.029

Asadi, A.A., Heydari, F. & Niazi, Z. (2026). Report on monitoring the implementation of the national cultivation model program for agricultural products in Zanjan province in the crop year 2024-2025. Economic Affairs Office of the Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran.

Ashraf, M., & Foolad, M.R. (2011). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance, *Environmental and Experimental Botany*, 59, 206-216, https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.12.006

Bagheri, M., Javanmardi, S.H., Alizadeh, A., & Kamelmanesh, M.M. (2014). The effect of drought stress on grain yield and some physiological characteristics of different red bean genotypes, *Scientific Journal of Plant Ecophysiology*, 6(18): 8-11 (in Persian with English abstract)

Banks, L.W. (2004). Effect of timing of foliar zinc fertilizer on yield component of soybeans. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 22(116), 226-231, https://doi.org/10.1071/EA9820226

Bernal. M., Cases. R., Picorel. R., & Yruela, I. (2007). Foliar and root Cu supply affect differently Fe and Zn uptake and photosynthetic activity in soybean plants. *Environmental and Experimental Botany*, 60: 145-150, https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2006.09.005

Chai, Q., Gan, Y., Turner, N.C., Zhang, R.Z., Yang, C., Niu, Y., & Siddique, K.H. (2014). Water-saving innovations in Chinese agriculture. *Advances in Agronomy*, 126, 149-201, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800132-5.00002-X

Chai, Q., Gan, Y., Zhao, C., Xu, H.L., Waskom, R.M., Niu, Y., & Siddique, K.H. (2016). Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress, A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1): 3, https://doi.org/10.1007/s13593-015-0338-6

Du Toit, D.C., Ramonyai, M.L. & Ntushelo, V. (2011). *Food security by directorate economic services*. Production Economics Unit. Department of Agriculture, Forestry and Fisheries, South Africa. Available online at: http:// nda.agric. za/docs/GenReports/FoodSecurity.pdf

Fanaei, H., Throat, R.A.M., Enough, M., Ghanbari, A., & Sherry Rad, H. (2010). Effect of drought stress and different amounts of potassium on the accumulation of osmolytes and chlorophyll in two canola and mustard species. *Journal of Agricultural Science and Technology, Water and Soil Sciences*, 15, 141 -157, (in Persian with English abstract), DOR: 20.1001.1.24763594.1390.15.57.20.2.

FAOSTAT. (2023). *FAOSTAT*. Food and Agricultural Organization of the United Nations. Available at https:// www.fao.org/faostat/en/#data/QCL

Faten, S., Abd El-Aal, A.M., Shaheen, A.A., & Asmaa, R.M. (2010). Effect of foliar application of urea and amino acids mixtures as antioxidants on growth, yield and characteristics of squash, *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 6(5), 583-588, URL=https://api.semanticscholar.org

Forde, B.G. & Lea, P.J. (2007). Glutamate in plants: metabolism, regulation, and signalling, *Journal of experimental botany*, 58(9), 2339-2358, https://doi.org/10.1093/jxb/erm121

Ghasemian, V., Ghalavand, A., Soroosh zadeh, A., & Pirzad, A. (2010). The effect of iron, zinc and manganese on quality and quantity of soybean seed, *Journal of Phytology*, 2, 73-79 (in Persian with English abstract).

Ghorbanali, M., & Niakan, M. (2005). The effect of drought stress on soluble sugar, total protein, proline, phenolic compound, chlorophyll concentration and rate reductase activity in soybean (*Glycine max* L. cv. Gorgan 3). *Materials and Energy*, 18(56), 537-550, (in Persian with English abstract). http://jsci.khu.ac.ir/article-1-1177-fa.html

Gong, H., & Chen, K. (2012). The regulatory role of silicon on water relations, photosynthetic gas exchange, and carboxylation activities of wheat leaves in field drought conditions, *Acta Physiologiae Plantarum*, 34, 1589-1594, https://doi.org/10.1007/s11738-012-0954-6

Gross, J. (1991). *Pigments in Vegetables*. Van Nostrand Reinhold, New York, 351 p.

Hajiboland, R. (2013). Investigating the effect of silicon on the growth and tolerance of stresses in tobacco plants. Master's thesis. Tabriz University, Iran.

Haj Seyed Hadi, M.R., & Rezaee Ghale, H. (2016). Effects of vermicompost and foliar application of amino acids and urea on quantitative and qualitative yield of chamomile (*Matricaria chamomilla* L.), *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 31(6), 1057-1070, (in Persian with English abstract), https://doi.org/10.22092/ijmapr.2016.105894

Hamidi, H., & Safarnejad, A. (2003). Evaluation of morphological and biochemical characteristics of self-regenerating alfalfa against osmotic stress, *Research and Construction*, 18, 81-83, (in Persian with English abstract).

Hamilton, E. (2001). Mitochondrial adaptation to NACL. Complex I protective by antioxidants and small heat shock protein whereas complex Ibis protected by proline and betaaine, *Plant physiology*, 126, 1266-1274, https://doi.org/10.1104/pp.126.3.1266

Hanjra, M.A., & Qureshi, M.E. (2010). Global water crisis and future food security in an era of climate change, *Food Policy*, 35(5), 365-377, https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.05.006

Hattori, T., Sonobe, K., Inanaga, S., An, P., Tsuji, W., Araki, H., Eneji, A.E., & Morita, S. (2007). Short term stomatal responses to light intensity changes and osmotic stress in sorghum seedlings raised with and without silicon, *Environmental and Experimental Botany*, 60, 177-182, https://hdl.handle.net/10217/208252

Heidarian, A.R., Kord, H., Mostafavi, K., Lak, A.P., & Amini Mashhadi, F. (2010). Investigating Fe and Zn foliar application on yield and its components of soybean (*Glycine max* (L) Merr.) at different growth stages, *Journal of Agricultural Biotechnology and Sustainable Development*, 3(9), 189-197, https://doi.org/10.5897/JABSD.9000024

Howell, T.A., Tolk, J.A., Evett, S.R., Copeland, K.S., Dusek, D.A., & Clemmens, A.J. (2007). Evapotranspiration of deficit irrigated sorghum and winter wheat. I*n Proceedings of the USCID Fourth International Conference on Irrigation and Drainage. The Role of Irrigation and Drainage in a Sustainable Future, Sacramento*, CA, USA.

Hu, Y., & Schmidhalter, U. (2005). Drought and salinity: A comparison of their effects on mineral nutrition of plants, *Journal Plant Nutrition Soil Science*, 168(4), 541-549, https://doi.org/10.1002/jpln.200420516

Jamshidi, M., Danesh-Shahraki, A.R., & Hashemi-Jazi, S.M. (2016). Effect of foliar application of Manganese and Zinc on grain yield and yield components of red bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in drought conditions, *Iranian Journal of Pulses Research*, 7(2), 164-174, (in Persian with English abstract), https://doi.org/10.22067/IJPR.V7I2.45921.

Karmalachaeb, A., Qarineh, M.H., Bakhshandeh, A., Moradi-Telawat, M.R., & Fathi, Q. (2013). Effect of silicon application on physiological characteristics and growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought stress condition, *Journal of Agricultural Ecology*, 5(4), 433-442. (in Persian with English abstract), https://doi.org/ 10.22067/jag.v5i4.33000

Kavian–Athar, N. & Aboutalebian, M.A. (2020). Quantitative and qualitative reaction of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) to phosphorous and zinc sulfate application method under different rates of nitrogen starter fertilizer, *Iranian Journal of Field Crop Science*, 51(3), 17-32. (in Persian with English abstract), https://doi.org/10.22059/IJFCS.2019.249549.654430

Kazemi-Poshtmasari, H., Bahmanyar, M.A., Pirdashti, H., & Ahmadi-Shad, M.A. (2008). Effects of Zn rates and application forms on protein and some micronutrients accumulation in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.), *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 11, 1042-1046, https://doi.org/10.3923/pjbs.2008.1042.1046

Kidambi, S., Matches, P.A.G., & Bolger, T.P. (1990). Mineral concentration in alfalfa and sainfoin as influenced by soil moisture level, *Agronomy Journal*, 82, 229-239.

Khoshgoftarmanesh, A.H., & Arabzadeghan, H. (2007). *Evaluation of plant nutritional status and optimal fertilizer management*. Isfahan: Isfahan University of Technology Publications.

Kochaki, A., & Sarmadnia, M. (1999). *Crop Physiology*. Publications University of Mashhad. 411 p.

Kordi, S., Mirsafari, M., Tahmasebi, Z., Shahkarami, G., Gerami, L., Taghizadeh, A.A., & Ghanbari, F. (2016). Effect of foliar application of Zinc on yield, grain and straw protein of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under water deficit stress in Ilam weather conditions, *Agronomy Journal (Pajouhesh and Sazandegi*), 111, 115-124. (in Persian with English abstract), https://doi.org/10.22092/ AJ.2016.111881.

Kuepper, G. (2003). *Foliar fertilization*. ATTRA. Available online: www.attra.ncat.org.

Li, Q.F., Ma. C.C., & Shang, Q.L. (2007). Effects of silicon on photosynthesis and antioxidative enzymes of maize under drought stress, *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao*, 18(3), 531-536, PMID: 17552188

Ma, J. & Yamaji, N. (2006). Silicon uptake and accumulation in higher plants, *Trends in Plant Science*, 11, 392-397, https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007

Malakouti, M.J., & Tehrani, M.M. (1999). The role of micronutrients in increasing yield and improving the quality of agricultural products. Tarbiat Modares University Publications (in Persian).

Manivanian, P., Abdul Jaleel, C., Sankar, B., Kishorekumar, A., Somasundaram, R., Lakshmanan, G.M.A., & Panneerselvam, R. (2007). Growth, biochemical modifications and proline metabolism in (*Heliathus annuus* L.) as induced by drough stress. *Colloids and Surfaces*, 59, 141-149, https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2007.05.002

Marschner, P. (2012). Marschner's mineral nutrition of higher plants (3rd ed.). Academic Press.

Molodi, S.H. (2015). Water and manure optimization. *Journal of Engineering, Information and Culture*, 2, 41- 48.

Molodi, S.H. (2005). Water and optimization of fertilizer consumption, scientific, engineering, *information and cultural quarterly magazine*, 2, 47-48.

Motalebifard, R., Najafi N., Oustan S., Nyshabouri M.R., & Valizadeh M. (2013). The combined effects of phosphorus and zinc on evapotranspiration, leaf water potential, water use efficiency and tuber attributes of potato under water deficit conditions. *Scientia Horticulturae*, 162, 31–38. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.07.043

Munir, M., Hussain, M., & Ahmad, M. (2025). Interactive effects of nano-fertilizers on growth and productivity of cluster bean under drought stress. *Heliyon*, 11(2), e25052

Najafi N., Mahmoudi Sh., Neyshabouri M., & Reyhanitabar A. (2020). Effects of soil moisture and sewage sludge on water use efficiency and concentrations of some elements in alfalfa. *Iranian Journal of Soil Research*, 34(1), 61–80. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22092/ijsr.2020.122141

Page, A.L., Miller, R.H., & Keeney, D.R. (1982). Methods of soil analysis, Part 2: Chemical and microbiological properties. ASA and SSSA.

Pahlavan, M.R. (2006). The study of effects of Zn, Fe and Mn on quantity and quality of grain wheat. In: *Proceeding of 18th World Congress of Soil Science*, Philadelphia, Pennsylvania, USA.

Parsapour, O., Bakhshandeh, A., Qorineh, M.H., Feizi, H., & Moradi-Tilawan, M.R. (2019). The effect of foliar spraying of nano and non-nano silica on yield and redistribution of wheat dry matter under drought stress conditions, *Environmental Stresses in Agricultural Sciences*, 12(2), 377-388. (in Persian with English abstract), https://doi.org/10.22077/escs.2019.1191.1244

Raeisi, M., Farahani, L., & Palashi, M. (2014). Changes of qualitative and quantitative properties of radish (*Raphanus sativus* L.) under foliar spraying through amino acid, *International Journal of Biosciences*, 4(1), 463-468. https://doi.org/ 10.12692/ijb/4.1.463-468

Rezakhani, L., Motesharezadeh, B., Tehrani, M.M., Etesami, H., & Mirseyed Hosseini, H. (2019). Phosphate–solubilizing bacteria and silicon synergistically augment phosphorus (P) uptake by wheat (*Triticum aestivum* L.) plant fertilized with soluble or insoluble P source. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 173, 504-513, https://doi.org/ 10.1016/j.ecoenv.2019.02.060

Rizwan, M., Ali, S., Abbas, T., Zia-ur-Rehman, M., & Rehman, A. (2015). Potassium and zinc nutrition improve drought tolerance in plants: Mechanisms and applications. *Plant Physiology and Biochemistry*, 97, 184–195.

Romero-Aranda, R., Jurado, O., & Cuartero, J. (2006) Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status, *Journal of Plant Physiology*, 163, 847-855, https://doi.org/ 10.1016/j.jplph.2005.05.010

Saeedi-Abu Ishaqi R., & Yadavi, A. (2015). Effects of irrigation levels and foliar application with iron and zinc on quantitative and qualitative traits of red bean (*Phaseolous vulgaris* L.), *Iranian Journal of Pulses Research*, 6(1), 54-65. (in Persian with English abstract), https://doi.org/10.22067/IJPR.V1394I1.49008.

Sakamoto, A. (2002). The role of glycine betaine in the protection of plants from stress: clues from transgenic plants. *Plant cell and environment*, 25, 163-171, https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00790.x

Salah, N., Alshahrie, A., Aljohani, H., Althobaiti, H., & Alharbi, F. (2021). Effects of ZnO nanoparticles on the growth and physiology of *Phaseolus vulgaris* under drought stress. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 16, 100582.

Saleh, J., Najafi, N., & Ostan, S. (2015). The effect of silicon consumption on growth, chemical composition and some physiological characteristics of rice (*Oryza sativa* L.) under saline conditions, *Journal of Agricultural Sciences, Technologies and Natural Resources*, 72, 229-240, https://doi.org/10.1007/s12633-018-0057-0

Sarmadnia, G., & Kouchaki, A. (1995). Physiological aspects of dryland agriculture. Mashhad University Jihad Publications. 400 pages.

Savant, N.K., Snyder, G.H., & Datnoff, L.E. (1999). Silicon management and sustainable rice production. In: advances in agronomy. V. 58. D. L. Sparks ed. Academic press, San Diego. Ca., Pp: 151-199, https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60255-2

Slawik, M. (2005). Production of Norway spruce seedlings on substrate mixes using growth stimulants, *Journal of Forest Science*, 51(1), 15-23, https://doi.org/ 10.17221/4540-JFS

Shabala, S., Babourina, O., & Newrnan, L. (2000). Ion-specific mechanisms of osmo- regulation in bean mesophyll cells, *Journal of Experimental Botany*, 51, 1243-1253. https://doi.org/10.1093/jexbot/51.348.1243

Shafie, M., Hassani, A., Nourzadeh Hadad, M., & Amanifar, S. (2025). Enhancement of bioactive compounds concentration in opuntia cactus using humic acid, seaweed extract, and mycorrhizal fungi. *Journal of Soil and Plant Science*, 35(2), 115–130. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22034/sps.2025.68460.1015

Shen, X., Zhoua, Y., Duana, L., Li, Z., Eneji, A.E., & Li, J. (2010). Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation, *Journal of Plant Physiology*, 167, 1248-1252, https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.04.011

Sobhani, A. & Hamidi, H. (2014). Evaluation of yield and growth indix of potato under water deficit. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 12(2), 283-295. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/gsc.v12i2.20883

Stijn, S., Jos, V., & Roseline, R. (2007). Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signling. FEMS Microbiol Rev. 1-24, https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2007.00072.x

Stampar, F., Hudina, M., Dolenc, K., & Usenik, V. (1998). *Influence of foliar fertilization on yield quantity and quality of apple* (Malus domestica borkh.), In: Anac, D., & P. Martin- Prevel (Eds.). *Improved Crop quality by nutrient management*. Pp: 91-94, https://doi.org/10.1007/978-0-585-37449-9-21

Tehrani, M.M., & Rezakhani, L. (2022). Investigation of the effect of silicon on wheat yield and fertilizer and water efficiency under drought stress conditions. Final report. Soil and Water Research Institute. Karaj. Iran.

Tony, H.H., & Norio, M. (2012). Glyine betaine: an effective protectant against abiotic stress in plants. *CE press*, 3, 17-23, https://doi.org/ 10.1016/j.tplants.2008.06.007

Tolay, I., & Gulmezoglu, N. (2004). Effect of manganese and Zinc foliar application on common bean, *Plant Soil Environment*, 42, 314-322.

Toufighi, M., Rahimi, A., Hosseini, S.A. & Eshraghi-Nejad, M. (2025). Effects of irrigation regimes and nitrogen levels on morphophysiological traits and yield of hybrid maize in a sandy loam soil. *Journal of Soil and Plant Science*, 35(3), 19–38. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22034/sps.2025.69016.1020

Trenholm, L.E., Datnoff. L.E., & Nagara, R.T. (2004). Influence of silicon on drought and shade tolerance of Augustine grass, *Hort Technology*, 14, 487-490, https://doi.org/10.21273/HORTTECH.14.4.0487

Ueno, O., & Agarie, S. (2005). Silica deposition in cell walls of the stomatal apparatus of rice leaves, *Plant Production Science*, 8, 71-73, https://doi.org/10.1626/pps.8.71

Vlizadeh, M. & Moghadam, M. (2010). *Experimental Designs in Agriculture*. Fourth Edition, Privar Publishers, Iran.

Yusefi-Tanha, E., Fallah, S., Rostamnejadi, A., Pokhrel, L. R., & Tajdar-Oranj, B. (2020). Foliar application of zinc oxide nanoparticles enhances yield and grain quality of wheat under water deficit conditions. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122899. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122899

Zahedi, S. M., Ghaderi, N., & Karimi, M. (2019). Physiological responses of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) to micronutrient foliar application under drought stress. *Scientia Horticulturae*, 246, 464–472.