



The Effect of Seed Priming and Foliar Application of Iron and Zinc Micronutrients on Growth and Yield of Lentil (*Lens culinaris* Medik) and Germination Characteristics of Produced Seeds under Dryland Conditions

Mohammad Vahdani Rashvanlou¹, Majid Jami Al-Ahmadi^{1*}, Mohammad Hassan Sayyari-Zahan¹, Hadi Shoorideh²

Received: 08 April 2025

Revised: 29 May 2025

Accepted: 02 July 2025

Available Online: 02 July 2025

Cite this article:

Vahdani Rashvanlou, M., Jami Al-Ahmadi, M., Sayyari-Zahan, M. H., & Shoorideh, H. (2025). The effect of seed priming and foliar application of iron and zinc micronutrients on growth and yield of lentil (*Lens culinaris* Medik) and germination characteristics of produced seeds under dryland conditions. *Iranian Journal of Pulses Research*, 16(2), 277-295. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.22067/ijpr.2025.92929.1110>

Introduction

One of the most important issues related to lentil (*Lens culinaris* Medik) cultivation in Iran, which is often cultivated in less fertile soils under dryland conditions, is its low and unstable yield, which can be significantly improved with appropriate management methods, including proper plant nutrition. One of the problems of soils in arid and semi-arid regions is the reduced availability of micronutrients, especially Zn and Fe, and as a result, their deficiency in plants. The lack of organic matter, high pH, and high percentage of calcium carbonate in arid and semi-arid soils cause micronutrients, especially zinc (Zn) and iron (Fe), to stabilize in these soils and quickly become unavailable to the plant. Under such conditions, applying these micronutrients as seed priming or foliar sprays (or a combination of both) will be much more efficient than applying them to the soil.

Materials and Methods

In order to evaluate the effect of seed priming and foliar application of lentil plants by Zn and Fe micronutrient, a factorial experiment was conducted based on randomized complete blocks design with three replications and two factors. The first factor was nutritional priming in six levels [nutritional priming with FeSO₄ and ZnSO₄ each at two concentrations of 50 and 100 mM, along with no prime (dry seed) and hydro prime as controls]; The second factor was foliar spraying with four levels (no foliar spraying and spraying with distilled water, FeSO₄ and ZnSO₄ at 4‰ concentration). Nutritional priming of seeds was carried out for 12 hours at a temperature of 15 °C. Foliar spraying was carried out at two times, one at the 50% flowering stage and the other at the podding stage of lentils, using zinc sulfate fertilizer containing 21% zinc and iron sulfate fertilizer containing 19% iron at a concentration of 4‰. At the end of the experiment, plants were harvested from an area equivalent to 5 square meters and yield and yield components were determined. After that, a seed sample was randomly separated and 20 seeds were placed in 9 cm diameter Petri dishes containing 5 ml of distilled water. Then, the Petri dishes were placed in a germinator at 20°C and a 12-hour light/dark cycle. Finally, the germination and seedling growth characteristics of the seeds obtained from the mother plants were examined.

Results and Discussion

Based on the analysis of variance of the measured data, the main effects of seed priming and foliar spray were significant on all measured traits; however their interaction was significant only on grain yield. Almost the highest levels of all studied traits were observed in the priming with 50 mM FeSO₄ and then ZnSO₄. However, by increasing the concentration to 100 mM, there was a reduction in all studied traits. For example, grain yield decreased by 69.16 and 72.09 percent by 100 mM FeSO₄ and ZnSO₄, respectively. Foliar application of FeSO₄ and ZnSO₄ increased the number of pods per plant by 2.51 and 1.96 times, the number of seeds per pod by 1.24 and 1.33 times, and the 100-

1- Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

2- North Khorasan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Bojnord, Iran

* Corresponding Author: mjamialahmadi@birjand.ac.ir



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

kernel weight by 47.34 and 29.98%, respectively, compared to the control (non-foliar application), indicating a greater effect of plant nutrition with iron and zinc on seed weight, while priming had a greater effect on the number of pods. Also, foliar application of micronutrients increased lentil grain yield through improving yield components, and the highest yields were obtained from a combination of priming with 50 mM FeSO₄ and/or ZnSO₄ and foliar application of these micronutrients. Priming did not affect the germination traits of the harvested seeds; nevertheless seeds from plants foliar sprayed with FeSO₄ were superior regarding germination traits and seedling vigor.

Conclusions

Overall, the results indicate that using management operations such as nutritional priming and foliar spraying with micronutrients may be a suitable solution to improve plant growth and production, as well as germination and seedling establishment of produced seeds. In this study, hydropriming did not have a significant difference with no-priming in most traits, and priming with iron- and zinc sulfates, through improving height and lateral branches, caused the most tremendous increase in the number of pods per plant among yield components, while later applying of these micronutrients through foliar spraying had the most significant effect on grain weight. Choosing the appropriate concentration of these micronutrients (50 mM) and their application at the right time had an effective role in increasing the vegetative and reproductive traits of lentil crops. In comparison, the high concentration of priming agents (100 mM) had the opposite effect on all measured traits, and therefore, care should be taken in the amount of these micronutrients.

Keywords: FeSO₄, Micronutrients, Nutritional priming, ZnSO₄



اثر پرایمینگ بذر و محلول‌پاشی عناصر آهن و روی بر رشد و عملکرد عدس (*Lens culinaris Medik*) و ویژگی‌های جوانه‌زنی بذور تولیدی در شرایط دیم

محمد وحدانی رشوانلویی^۱، مجید جامی‌الاحمدی^{۱*}، محمد حسن سیاری زهان^۱، هادی شوریده^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۱

چکیده

یکی از مشکلات خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، کاهش فراهمی عناصر ریزمغذی به‌خصوص روی و آهن است که سبب بروز کمبود آن‌ها در گیاهان می‌شود. به‌منظور ارزیابی اثر پرایمینگ بذر و محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی آهن و روی بر گیاه عدس (*Lens culinaris Medik*)، آزمایشی فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار و دو عامل در شرایط دیم در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ در شهرستان بجنورد انجام شد. عامل اول پرایمینگ تغذیه‌ای در شش سطح (بدون پرایم (بذور خشک)، عدم پرایمینگ تغذیه‌ای (هیدروپرایم) و پرایمینگ تغذیه‌ای با سولفات آهن و سولفات روی هر کدام در دو غلظت ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار) و عامل دوم محلول‌پاشی در چهار سطح (عدم محلول‌پاشی و محلول‌پاشی با آب تصفیه‌شده، سولفات آهن چهار در هزار و سولفات روی چهار در هزار) بود. تقریباً بالاترین میزان همه صفات مورد بررسی در تیمار پرایمینگ با ۵۰ میلی‌مولار سولفات آهن و سپس سولفات روی مشاهده شد. کاربرد غلظت بالاتر از هر دو ماده پرایمینگ موجب کاهش در تمام صفات مورد بررسی شد، به‌نحوی که با افزایش کاربرد سولفات آهن و سولفات روی از ۵۰ به ۱۰۰ میلی‌مولار، عملکرد دانه به‌ترتیب ۶۹/۱۶ و ۷۲/۰۹ درصد کاهش یافت. محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی از طریق بهبود اجزای عملکرد سبب افزایش عملکرد دانه عدس گردید، درحالی که پرایمینگ تأثیری بر صفات جوانه‌زنی بذور حاصل نداشت، بذور حاصل از گیاهان محلول‌پاشی‌شده با سولفات آهن از لحاظ ویژگی‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه برتری داشتند. نتایج نشان داد که کاربرد ۵۰ میلی‌مولار هر یک عناصر ریزمغذی روی یا آهن به‌صورت پرایمینگ بذر به همراه محلول‌پاشی این دو عنصر می‌تواند یک راهکار مدیریتی کارآمد در تولید عدس تحت شرایط دیم باشد.

واژه‌های کلیدی: پرایمینگ تغذیه‌ای، سولفات آهن، سولفات روی، عناصر ریزمغذی

مقدمه

عدس (*Lens culinaris Medik*) از جمله مهم‌ترین حبوبات سرمدوست محسوب می‌شود که به‌دلیل ارزش غذایی بالای خود (پروتئین بالا، اسیدهای آمینه ضروری، فولات، فیبر و مواد معدنی به‌ویژه آهن) یک غذای کاربردی محسوب شده و پروتئین گیاهی با کیفیتی را برای مردم کشورهای کم‌درآمد فراهم می‌کنند (Alexander et al., 2024). از جمله مهم‌ترین مسائل مربوط به زراعت عدس در ایران که اغلب در خاک‌های نه‌چندان حاصلخیز و به‌صورت دیم کشت می‌شود، پایین بودن و عدم ثبات عملکرد این محصول است (Hagigati Maleki et al., 2014) که با شیوه مناسب مدیریتی از جمله تغذیه مناسب گیاه می‌توان عملکرد محصول را تا حد زیادی افزایش داد.

گیاهان برای دستیابی به رشد مطلوب خود به چندین عنصر غذایی نیاز دارند که در این بین عموماً توجه کمتری به عناصر کم‌مصرف می‌شود، این در حالی است که کمبود ریزمغذی‌ها در اغلب گیاهان، گسترش جهانی دارد. از مهم‌ترین این عناصر غذایی کم‌مصرف می‌توان به روی و آهن اشاره کرد (Farooq et al., 2012). عنصر روی (Zn) از جمله عناصر ضروری و کم‌مصرف برای گیاهان است (Rudani et al., 2018) که کمبود آن در گیاهان زراعی، به‌ویژه در خاک‌های آهکی بسیار شایع بوده و می‌تواند رشد و عملکرد گیاهان زراعی را محدود کند. در این خاک‌ها، روی اغلب توسط کلسیم کربنات‌ها جذب شده یا رسوب داده می‌شود (Martínez-Ríos et al., 2024). عنصر روی در تشکیل اکسین دخالت نموده و بدین صورت رشد گیاه را تنظیم می‌کند (Rudani et al., 2018). به‌علاوه روی در ساختمان و فعالیت بسیاری از آنزیم‌های دخیل در سنتز

۱- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان شمالی، بجنورد، ایران

(*- نویسنده مسئول: mjamialahmadi@birjand.ac.ir)

(Kordi et al., 2016) است. در عدس نیز دیده شده است که محلول‌پاشی عنصر روی سبب افزایش عملکرد دانه و زیست‌توده و نیز اجزای عملکرد گردید (Dhaliwal et al., 2021). به‌طور مشابه، واکنش مثبت گیاهانی همچون ذرت (*Zea mays* L.) (Amanullah et al., 2012)، لوبیاچیتی (*Phaseolus vulgaris*) (Iranshahi et al., 2014) و لوبیاسبز (*Phaseolus vulgaris*) (Borowski & Michalek, 2011) به محلول‌پاشی این عناصر مشاهده شده است. گزارش شده است که در سویا، کاربرد آهن به‌صورت محلول‌پاشی نسبت به مصرف آن به‌صورت جامد سبب بهبود گل‌دهی، افزایش ارتفاع، عملکرد و اجزای عملکرد در سویا شده است (Sadiqpoor et al., 2025)

گزارش شده است که محلول‌پاشی آهن سبب بهبود عملکرد و اجزای عملکرد و پروتئین دانه عدس می‌شود (Mehraban, 2017). با توجه به اثرات سودمند این دو عنصر، دور از انتظار نخواهد بود که کاربرد ترکیبی آهن و روی اثر بیش‌تری را نسبت به مصرف جداگانه آن‌ها به همراه داشته باشد، همان‌طور که در بادام‌زمینی (*Arachis hypogaea* L.) (Abdel-Motagally et al., 2016) و گندم (*Triticum aestivum* L.) (Shoormij et al., 2022) تأیید شده است. در گیاه زیره (*Cuminum cyminum* L.) نیز گزارش شده است که محلول‌پاشی توأم سولفات آهن و سولفات روی (۵/۰ درصد) سبب افزایش معنی‌دار عملکرد بیولوژیک نسبت به شاهد بدون محلول‌پاشی شد (Sayyari Zahan et al., 2024). بنابراین با توجه به اینکه نیاز عدس به آهن و روی معمولاً بیشتر از سایر بقولات است (Ray et al., 2014)، واکنش بهتر آن به کاربرد توأم این دو ریزمغذی دور از انتظار نخواهد بود، به‌ویژه اینکه آهن و روی بر جذب یکدیگر و سایر عناصر ریزمغذی در گیاهان زراعی مؤثرند (Fageria, 2016)

پرایمینگ با مواد مغذی، روش سودمند و مقرون‌به‌صرفه برای تأمین عناصر غذایی مورد نیاز گیاه است، زیرا در این روش به عناصر غذایی بسیار کمی نیاز است (Moradi & Siosemardeh, 2023). پرایمینگ با عناصر ریزمغذی همچون آهن و روی می‌تواند منجر به بهبود سبز شدن و استقرار گیاهچه، افزایش عملکرد و غلظت عناصر ریزمغذی در دانه شود (Farooq et al., 2012). اثرات مثبت پرایمینگ تغذیه‌ای با روی در بهبود جوانه‌زنی، رشد و عملکرد در گندم دیم (Moradi & Siosemardeh, 2023) و لوبیاقرمز (Tahmasebi et al., 2017) نشان داده شده است. پرایمینگ بذور عدس با محلول سولفات روی نیز اثرات مثبتی بر ویژگی‌های جوانه‌زنی و افزایش عملکرد و اجزای عملکرد عدس داشته است (Aboutalebian & Mohagheghi, 2015). اثرات مشابهی در پرایمینگ بذر با آهن در بارهنگ (*Plantago major*) (Badiri, 2013) نیز دیده شده است. هرچند گزارش‌هایی در خصوص اثرات منفی پرایمینگ با غلظت‌های

اکسین، کلروفیل، DNA و RNA و نیز در متابولیسم کربوهیدرات‌ها، روغن‌ها و پروتئین‌ها نقش دارد (Adhikari et al., 2016; Rengel et al., 2023). روی همچنین نقش مهمی در متابولیسم کربن (Tsonev & Lidon, 2012)، عمل گرده‌افشانی، لقاح و جوله‌زنی (Cakmak, 2008)، متابولیسم اسیدنوکلئیک گیاه (Umair Hassan et al., 2020) فتوسنتز، طولی شدن سلول، حفظ ساختمان و کارکرد غشاء سلولی (Potarzycki & Grzebisz, 2009) و مقاومت گیاهان به تنش‌ها (Umair Hassan et al., 2020) نقش دارد. ثابت شده است که کاربرد روی در بهبود عملکرد و کیفیت محصول نیز مفید است (Chattha et al., 2017; Hassan et al., 2019)، درحالی‌که کمبود آن باعث کاهش عملکرد و بدتر شدن کیفیت محصول می‌شود (Mousavi et al., 2007)

کمبود آهن قابل استفاده گیاه و کلروز آهن یکی دیگر از مشکلات اغلب خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران است (Jokar et al., 2015). آهن در ساخت کلروفیل و اجزای انتقال الکترون در فتوسنتز (مانند فریدوکسین) نقش حیاتی دارد و می‌تواند سبب افزایش میزان کلروفیل و فعالیت فتوسنتزی شود (Nam et al., 2021; Rengel et al., 2023). آهن همچنین کوفاکتور بیش از ۱۴۰ آنزیم گیاه است و همچنین در تنظیم بسیاری از فرآیندهای گیاه از جمله تنفس، فتوسنتز، احیای نیتрат‌ها و سولفات‌ها، تثبیت نیتروژن و ساخت پروتئین‌ها دخالت دارد (Rengel et al., 2023). ازاین‌رو، کمبود آهن می‌تواند ویژگی‌های رشدی، عملکرد و کیفیت گیاهان زراعی را به‌میزان قابل توجهی کاهش دهد. کاهش عملکردی تا ۲۵ درصد به‌دلیل کمبود آهن در گیاهان زراعی مانند بقولات (سویا (*Glycine max* L.) و ماش (*Vigna radiata* L.)) گزارش شده است (Mehrotra et al., 2022). دستیابی به دانش میزان و شیوه مناسب مصرف کودهای مؤثر در رشدونمو گیاهان زراعی، فرصت‌های جدیدی را برای افزایش کارایی مصرف کودها و بهبود رشد و عملکرد گیاهان زراعی به وجود می‌آورد. در مجموع، ریزمغذی‌ها را می‌توان در کشاورزی از سه طریق کاربرد در خاک، محلول‌پاشی اندام‌های هوایی و پیش‌تیمار بذر در اختیار گیاه قرار داد (Choukri et al., 2022). در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌دلیل کمبود مواد آلی، بالا بودن pH و درصد بالای کلسیم کربنات، عناصر ریزمغذی به‌خصوص روی، آهن و منگنز در خاک تثبیت شده و در شرایط عادی برای گیاهان در دسترس نیستند (Shakeri & Safari, 2019; Shakeri & Azadi, 2022). در چنین شرایطی، تغذیه برگی این عناصر کارآمدتر از مصرف خاکی خواهد بود (Yaseen et al., 2013).

گزارش‌های متعددی حاکی از تأثیرات مثبت محلول‌پاشی روی بر رشد و عملکرد گیاهان زراعی مانند پنبه (*Gossypium hirsutum* L.) (Yaseen et al., 2013) و لوبیا (*Phaseolus vulgaris*)

به منظور کاهش درصد خطا، زمین مورد نظر جهت کاشت در سال قبل به صورت آیش قرار داده شد. عملیات آماده سازی بستر بذر مطابق با عرف محل در اوایل اسفندماه انجام و قبل از کاشت، سه نمونه خاک جداگانه از قسمت های مختلف مزرعه از عمق صفر تا ۳۰ سانتی متری برداشت و پس از ترکیب و گرفتن یک نمونه فرعی، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن تعیین گردید (جدول ۱).

درصد جوانه زنی بذر محلی که به صورت دیم کاشت می شدند با آزمون استاندارد جوانه زنی تعیین شد (حدود ۷۰٪) و در محاسبه میزان بذر لازم لحاظ گردید. پیش از کاشت، پرایمینگ بذر با سولفات آهن و روی براساس مقادیر مورد نظر صورت گرفت. برای این کار، بذر به طور مستقیم در محلول آبی هواهی شده حاوی غلظت های مختلف سولفات آهن و یا روی (مطابق سطوح تعیین شده) در دمای ۱۵ درجه سانتی گراد پرایم شدند. نسبت وزن بذر به حجم محلول یک به پنج (گرم در میلی لیتر) در نظر گرفته شد (Haider et al., 2020). پس از ۱۲ ساعت پرایمینگ، بذر ها از محلول غذایی خارج شده و پس از شست و شوی کامل با آب مقطر، برای خشک شدن در دمای اتاق قرار داده شدند (Moaaz et al., 2020). با توجه به نتایج تجزیه خاک (جدول ۱)، کود مصرفی برای هر کرت بر مبنای ۷۵ کیلوگرم در هکتار پتاسیم سولفات و ۷۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل محاسبه و برای هر کرت پیش از کاشت بذر استفاده و با خاک مخلوط گردید. همچنین مقدار ۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره دیرتر و هم زمان با عملیات تنک به خاک داده شد. عملیات کاشت با تراکم ۲۵۰ بوته در مترمربع، پس از آماده سازی بستر بذر در نیمه دوم اسفند به صورت خطی و در عمق سه سانتی متری خاک صورت گرفت. هر کرت شامل هفت ردیف کاشت به طول شش متر و فاصله بین خطوط ۲۰ سانتی متر منظور گردید و فاصله بین کرت ها یک متر و بین بلوک ها دو متر در نظر گرفته شد. کاشت به صورت دیم بوده و در طول انجام آزمایش هیچ گونه آبیاری صورت نگرفت.

بالای این عناصر نیز وجود دارد که احتمالاً به دلیل سمیت ناشی از غلظت های بالا است (Hoseinpour Askarian et al., 2019).

از آنجاکه روی و آهن جزء عناصر ریزمغذی ضروری در رشد و نمو گیاهان محسوب می شوند، کاربرد کارآمد آن ها می تواند اثرات مثبتی بر گیاهان به ویژه در خاک های ایران داشته باشد. با این وجود اطلاعات محدودی در مورد اثرات کاربرد هم زمان پرایمینگ بذر و محلول پاشی با عناصر آهن و روی بر رشد و عملکرد و خصوصیات بذر تولیدی عدس در شرایط دیم وجود دارد. مطالعه حاضر به منظور ارزیابی اثر تأمین عناصر روی و آهن از طریق پرایمینگ بذر و محلول پاشی بر رشد و عملکرد عدس و ویژگی های بذر تولیدی آن در شرایط دیم انجام شد، با این هدف که اطلاعات و داده های حاصل از آن بتواند برای مدیریت عناصر ریزمغذی در جهت بهبود عملکرد گیاه عدس در شرایط دیم مفید باشد.

مواد و روش ها

محل اجرای آزمایش، مزارع دیم روستای رشوانلو در ۱۰ کیلومتری شهرستان بجنورد با عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲۸ دقیقه و طول جغرافیایی ۵۷ درجه و ۲۰ دقیقه و ارتفاع از سطح دریا ۱۰۷۰ متر و با متوسط بارندگی سالیانه ۲۷۲ میلی متر بود. آزمایش در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار و دو عامل انجام شد. عامل اول پرایمینگ تغذیه ای در شش سطح (بدون پرایم (بذر خشک)، عدم پرایمینگ تغذیه ای (هیدروپرایم) و پرایمینگ تغذیه ای با سولفات آهن و یا سولفات روی در دو غلظت ۵۰ و ۱۰۰ میلی مولار) و عامل دوم محلول پاشی در چهار سطح (عدم محلول پاشی و محلول پاشی با آب تصفیه شده، سولفات آهن چهار در هزار یا سولفات روی چهار در هزار) بودند. (Mehraban, 2017)

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی قطعه خاک مورد استفاده برای آزمایش مزرعه ای

Table 1- Physicochemical properties of the soil of experimental site used for the field experiment

بافت	شن	سیلت	رس	pH	هدایت الکتریکی	درصد اشباع	مواد خنثی شونده
Texture	Sand	Silt	Clay		EC	SP	TNV
		(%)			(دسی زیمنس بر متر) (dS.m ⁻¹)		(%)
Loam	28	43	23	7.67	1.78	40.43	28.10
ماده آلی	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	آهن	روی	مس	منگنز
Organic C	N	P	K	Fe	Zn	Cu	Mn
					(پی پی ام) (ppm)		
0.309	0.039	4.45	215	1.98	0.23	0.69	5.45

EC: electrical conductivity; SP: saturation percentafe; TNV: total neutralizing value

استفاده از خط کش اندازه‌گیری گردید و براساس داده‌های حاصل، شاخص طولی بنیه بذر محاسبه شد (Abdul-Baki & Anderson, 1973) و در نهایت وزن خشک گیاهچه‌ها پس از قرارگیری در آون ۷۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲ ساعت به دست آمد.

محاسبات آماری با استفاده از ماکروی DSAASTAT Ver.1.101 در محیط Excel و رسم نمودارها نیز توسط نرم‌افزار Excel انجام گردید. میانگین صفات مورد مطالعه نیز با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار LSD محافظت‌شده در سطح پنج درصد با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت.

نتایج و بحث

بر مبنای تجزیه واریانس داده‌ها، اثرات اصلی پرایمینگ بذر و محلول‌پاشی بر کلیه صفات اندازه‌گیری‌شده معنی‌دار شدند، اما اثر متقابل پرایمینگ و محلول‌پاشی تنها بر عملکرد دانه معنی‌دار شد (جدول ۲).

ارتفاع و تعداد شاخه فرعی

بیشترین ارتفاع بوته و تعداد شاخه فرعی تحت تأثیر پرایمینگ بذور با غلظت ۵۰ میلی‌مولار سولفات آهن به دست آمد که نسبت به شاهد بدون پرایم به ترتیب ۱۵/۴۹ و ۶۰/۷۱ درصد بیشتر بودند، هرچند ارتفاع بوته از نظر آماری با غلظت ۵۰ میلی‌مولار سولفات روی و هیدروپرایم اختلاف معنی‌داری نداشت. با افزایش غلظت سولفات آهن و روی از ۵۰ به ۱۰۰ میلی‌مولار، ارتفاع بوته به ترتیب ۱۸/۶۰ و ۲۰/۹۴ درصد و تعداد شاخه فرعی به ترتیب ۴۰/۷۴ و ۲۶/۴۱ درصد کاهش نشان دادند. از نظر تعداد شاخه، پرایمینگ روی برتری چندانی نسبت به هیدروپرایم نداشت (جدول ۳).

بیشترین ارتفاع بوته در بین سطوح تیمار محلول‌پاشی، به ترتیب با کاربرد سولفات آهن و سولفات روی حاصل شد که به ترتیب افزایش ۴۲/۹۹ و ۳۵/۱۹ درصدی نسبت به شاهد بدون محلول‌پاشی نشان داد (جدول ۳). محلول‌پاشی آهن و روی همچنین تعداد شاخه فرعی را به ترتیب ۸۸/۲۴ و ۵۷/۸۴ درصد نسبت به شاهد افزایش دادند که نشانگر برتری واضح سولفات آهن است. چنین تأثیر مثبت محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی بر رشد گیاه و ارتفاع بوته (Shabanzadeh & Galavi, 2011; Kamaraki & Galavi, 2012; Ghaffari Malayeri et al., 2012) ناشی از نقش‌های خاص این عناصر در گیاه می‌باشد. برای مثال، عنصر روی از طریق تأثیرگذاری بر تولید هورمون اکسین، تقسیم و طویل شدن سلولی می‌تواند باعث افزایش رشد رویشی، شاخه‌بندی و ارتفاع بوته شود (Rengel et al., 2023). وجود آهن در ساختار کلروفیل و تأثیر آن بر افزایش فعالیت فتوسنتزی و کارایی جذب نیتروژن (Rengel et al.,

محلول‌پاشی در دو نوبت یکی در مرحله ۵۰ درصد گل‌دهی و دیگری در مرحله نیام‌دهی عدس با استفاده از سم‌پاش پشتی بعد از کالیبره کردن با فشار یک اتمسفر انجام شد (Mehraban, 2017). جهت محلول‌پاشی روی از کود سولفات روی محتوی ۲۱ درصد روی و کود سولفات آهن محتوی ۱۹ درصد آهن شرکت مرک آلمان با غلظت چهار در هزار استفاده گردید.

یک ماه پس از سبز شدن گیاهچه‌های عدس، به منظور دستیابی به فراوانی مورد نظر، بوته‌های اضافی حذف شدند. در طول فصل رشد، چهار مرتبه عملیات وجین دستی در کرت‌ها جهت مبارزه با علف‌های هرز صورت گرفت. در پایان فصل و پیش از برداشت، صفات ارتفاع گیاه و تعداد شاخه‌های فرعی در بوته در سه ردیف وسطی و روی سه بوته متوالی از ردیف اول، چهار بوته متوالی از ردیف دوم و سه بوته متوالی از ردیف سوم اندازه‌گیری شدند و میانگین آن‌ها به عنوان ارتفاع ساقه عدس منظور گردید. سپس تعداد ۱۰ بوته به طور تصادفی انتخاب و پس از شمارش تعداد غلاف و محاسبه میانگین آن در هر بوته، تعداد دانه در آن‌ها شمارش شد و متوسط تعداد دانه در غلاف به دست آمد. جهت اندازه‌گیری وزن ۱۰۰ دانه در هر تیمار تعداد سه تکرار ۱۰۰ تایی بذر عدس شمارش و توزین شد و میانگین آن‌ها ثبت گردید.

در نهایت، پس از حذف حاشیه، بوته‌های موجود در سطحی معادل پنج مترمربع از بخش مرکزی هر کرت برداشت شدند. بوته‌های برداشت‌شده به مدت سه روز جهت خشک شدن در معرض آفتاب قرار گرفتند و پس از محاسبه عملکرد بیولوژیک (هواخشک) (Ahmad et al., 2025)، تفکیک دانه‌ها از کاه و کلش به صورت دستی انجام شد. دانه‌های جداشده جهت تثبیت وزن به مدت ۷۲ ساعت در آون با دمای ۶۸ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و سپس توزین و عملکرد دانه برحسب کیلوگرم در هکتار محاسبه گردید. شاخص برداشت با تقسیم عملکرد دانه به بیولوژیک به دست آمد.

در انتهای آزمایش، به منظور تعیین خصوصیات جوانه‌زنی بذور تولیدشده در آزمون جوانه‌زنی استاندارد، از هر کرت به صورت تصادفی یک نمونه بذر جدا شد. پس از ضدعفونی با استفاده از محلول سدیم هیپوکلریت یک درصد، تعداد ۲۰ عدد بذر درون پتری‌دیش‌هایی با قطر نه سانتی‌متر محتوی پنج میلی‌لیتر آب مقطر قرار گرفتند و پس از بستن درب پتری‌دیش‌ها با پارافilm، به ژرمیناتوری با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و تناوب نوری ۱۲ ساعت (روشنایی و تاریکی) منتقل شدند. ارزیابی بذورهای جوانه‌زده هر ۲۴ ساعت یک‌بار به مدت ۱۰ روز صورت گرفت. بذوری که ریشه‌چه آن‌ها به اندازه دو میلی‌متر و بیشتر از بذر خارج شده بود به عنوان بذور جوانه‌زده مدنظر قرار گرفت (Soltani et al., 2006). در نهایت، درصد جوانه‌زنی و سرعت جوانه‌زنی (Maguire, 1962) محاسبه شد. در ادامه، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه با

۱۰۰ میلی مولار سولفات آهن دیده شد (جدول ۳). در بین اجزای عملکرد، تنها تعداد غلاف در بوته تفاوت معنی داری بین سطوح هیدروپرایم و عدم پرایم نشان داد و تعداد دانه در غلاف و وزن ۱۰۰ دانه گیاهان حاصل از بذر هیدروپرایم شده با بذر بدون پرایم تفاوت معنی داری نداشتند (جدول ۳)، بیشترین تأثیر پرایمینگ تغذیه ای بذر بر صفت تعداد غلاف در بوته مشاهده شد که احتمالاً متأثر از تعداد شاخه بیشتر است. تعداد غلاف در بوته در غلظت ۵۰ میلی مولار سولفات روی و سولفات آهن به ترتیب افزایش ۳۴ و ۵۶ درصدی نسبت به بذر پرایم نشده نشان داد. این افزایش برای تعداد دانه در غلاف به ترتیب ۲۰/۶ و ۱۲/۵ درصد و برای وزن دانه به ترتیب ۷ و ۱۹ درصد بود (جدول ۳).

پرایمینگ بذر، رشد ریشه را بهبود بخشیده و در نتیجه جذب عناصر غذایی و آب را افزایش می دهد و منجر به بهبود رشد گیاه و افزایش عملکرد می شود (Rehman et al., 2021). در عدس دیده شده است که کمبود روی باعث کاهش اندازه بساک ها، ظرفیت تولید گرده و اندازه و قوه نامیه دانه های گرده و منجر به کاهش تشکیل دانه ها و قوه نامیه آن ها نیز می شود (Pandey et al., 2006) که دلیل آن تا حدی ناشی از اثر این عنصر بر فرایند رشد زایشی و افزایش تولید کربوهیدرات و پروتئین است (Rengel et al., 2023) که با نتایج حاصل از تحقیق حاضر همبستگی دارد. از سوی دیگر، افزایش فعالیت مخزن در گیاهان پرایم شده نسبت به گیاهان بدون پرایم نیز یکی دیگر از عوامل بهبود عملکرد و وزن هزار دانه است (Aboutalebian & Mohagheghi, 2015).

(2023) نیز عاملی جهت بهبود رشد گیاه و در نهایت افزایش ارتفاع است (Heidarzade et al., 2016). افزایش غلظت آهن همچنین موجب افزایش سنتز کارتنوئیدها می شود که نقش حفاظتی برای گیاه در برابر رادیکال های آزاد اکسیژن داشته و مانع تخریب کلروفیل می شود (Roosta & Jafari, 2017). بر طبق نتایج کوشکی و همکاران (Kooshki et al., 2014)، به نظر می رسد که محلول پاشی روی می تواند سبب افزایش نسبی تعداد شاخه های فرعی گیاه شود و از این رو به ویژه در شرایط تنک بودن مزرعه، می تواند تأثیرات مثبتی بر روی عملکرد به جا بگذارد.

اجزای عملکرد (تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف و وزن دانه)

تعداد غلاف، تعداد دانه در غلاف و وزن دانه تحت تأثیر معنی دار اثرات اصلی پرایمینگ بذر و محلول پاشی قرار گرفتند، در حالی که اثر متقابل این تیمارها بر هیچ یک از این صفات معنی دار نشد (جدول ۲). بیشترین تعداد غلاف در بوته و نیز وزن ۱۰۰ دانه با اختلاف قابل توجهی با سایر تیمارها، در شرایط پرایم بذر با غلظت ۵۰ میلی مولار سولفات آهن حاصل شد. بالاترین تعداد دانه در غلاف به ترتیب با کاربرد ۵۰ میلی مولار سولفات روی و سولفات آهن به دست آمد (جدول ۳). افزایش غلظت هر دو ماده پرایمینگ از ۵۰ به ۱۰۰ میلی مولار، کاهش این اجزای عملکرد را در پی داشت، به نحوی که برخلاف روند مقادیر حداکثر، کمترین میزان تعداد غلاف در بوته و وزن ۱۰۰ دانه در پرایمینگ با غلظت ۱۰۰ میلی مولار سولفات روی و کمترین میزان تعداد دانه در غلاف در پرایم با غلظت

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس صفات مورد اندازه گیری عدس تحت تأثیر تیمارهای پرایمینگ و محلول پاشی سولفات روی و آهن
Table 2- Results of analysis of variance of measured traits of lentil plants as affected by seed priming and foliar spraying by zinc and iron sulfate

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات Mean of squares				
		ارتفاع بوته Plant height	تعداد شاخه فرعی Axillary branches no.	تعداد غلاف در بوته Pods.plant ⁻¹	تعداد غلاف در مترمربع Pods.m ⁻²	تعداد دانه در غلاف Seeds.pod ⁻¹
بلوک Replication	2	46.13 ^{ns}	58.38 ^{**}	571.79 ^{**}	13917724.75 ^{**}	0.02 ^{ns}
پرایمینگ Priming (P)	5	94.70 ^{**}	39.21 ^{**}	1209.19 ^{**}	83712883.86 [*]	0.55 ^{**}
محلول پاشی Foliar spray (F)	3	326.52 ^{**}	85.19 ^{**}	3465.16 ^{**}	206960346.8 ^{**}	0.52 ^{**}
پرایمینگ × محلول پاشی P × F	15	15.63 ^{ns}	7.28 ^{ns}	57.50 ^{ns}	3346385.53 ^{ns}	0.06 ^{ns}
خطا Error	46	16.24	5.05	31.01	17073736.53	0.09
ضریب تغییرات CV%		15	27.76	14.97	16.75	15.59

ادامه جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس صفات مورد اندازه‌گیری عدس تحت تأثیر تیمارهای پرایمینگ و محلول‌پاشی سولفات روی و آهن
Table 2- Results of analysis of variance of measured traits of lentil plants as affected by seed priming and foliar spraying by zinc and iron sulfate, continued

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات Mean of squares			
		وزن ۱۰۰ دانه 100-seeds Weight	عملکرد دانه Seed yield	عملکرد بیولوژیک Biological yield	شاخص برداشت Harvest index
بلوک Replication	2	0.03 ^{ns}	571129.82 ^{ns}	173671.42 ^{ns}	114.63 ^{ns}
پرایمینگ Priming (P)	5	0.47 ^{**}	14082965.63 ^{**}	83985973.03 ^{**}	327.10 ^{**}
محلول‌پاشی Foliar spray (F)	3	1.29 ^{**}	25619516.7 ^{**}	109655305.9 ^{**}	664.33 ^{**}
پرایمینگ × محلول‌پاشی P × F	15	0.07 ^{ns}	1548149.20 ^{**}	2628728.29 ^{**}	77.77 ^{ns}
خطا Error	46	0.05	249894.38	555489.83	61.86
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)		14.26	24.39	11.97	25.83

^{ns}, * و **: به ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار و معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد می‌باشند.

ns, *, and **: indicate no significant difference and significant difference at the 5 and 1 percent probability levels, respectively.

درصدی تعداد دانه در غلاف و ۴۷/۳۴ و ۲۹/۹۸ درصدی وزن ۱۰۰ دانه نسبت به شاهد بدون محلول‌پاشی شد. در کل به نظر می‌رسد که هم محلول‌پاشی گیاه با آهن و روی (جدول ۴) و هم پرایمینگ (جدول ۳) بیشترین اثر را به ترتیب بر تعداد غلاف در بوته و وزن دانه گذاشتند. یکی از عوامل اصلی مؤثر بر عملکرد حبوبات، تعداد غلاف در گیاه است و در گیاه نخود (*Cicer arietinum* L.) گزارش شده است که محلول‌پاشی روی و آهن تأثیر قابل توجهی بر تعداد غلاف‌های تولیدشده توسط گیاه داشتند (Usman et al., 2023). افزایش تعداد دانه در اثر محلول‌پاشی با آهن و روی احتمالاً ناشی از بهبود گرده‌افشانی و افزایش توان تولید و اختصاص مواد فتوسنتزی کافی برای حفظ و در ادامه رشد اجزای عملکرد است (Rengel et al., 2023)؛ در پژوهش‌های دیگر نیز مشاهده شده است که تعداد دانه گیاهان زراعی تحت تأثیر محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی قرارگرفته و به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش نشان داد (Shabanzadeh & Galavi, 2011; Ghaffari Malayeri et al., 2012). افزایش وزن هزار دانه از طریق مصرف عناصر ریزمغذی نیز در گیاهان زراعی متعددی همچون سویا (Heidarian et al., 2011)، گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) (Kamaraki & Galavi, 2012) و ذرت (Ghaffari Malayeri et al., 2012) گزارش شده است.

افزایش غلظت پرایم سولفات آهن و روی از سطح ۵۰ به سطح ۱۰۰ میلی‌مولار به ترتیب موجب کاهش ۲۵/۲۲ و ۲۱/۶۷ درصدی در وزن ۱۰۰ دانه گردید (جدول ۳). در تحقیق دیگر، کاربرد سولفات روی موجب افزایش وزن هزار دانه به میزان ۸/۲ درصد نسبت به شاهد شد (Asadi & Malakouti, 2004). توکلو (Toklu, 2015) گزارش کرد که تیمار بذور عدس با سولفات روی درصد موجب بهبود سبز شدن، عملکرد و اجزای عملکرد عدس گردید. یکی از علل اصلی اثرات منفی غلظت‌های بالای آهن و بروز سمیت آن، تجمع سریع گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) ناشی از تجمع رادیکال هیدروکسیل مضر ($\text{OH}^{\cdot}$) است که هنگام وجود آهن آزاد در سلول‌های زنده تولید شده و ضمن تأثیرگذاری بر تجمع مواد در بذر، حتی می‌تواند موجب سقط دانه شود (Sun et al., 2021).

در بین سطوح تیمار محلول‌پاشی، کمترین تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف و وزن دانه در شرایط بدون محلول‌پاشی حاصل شد. بیشترین مقادیر تعداد غلاف و وزن دانه در شرایط محلول‌پاشی با سولفات آهن و بیشترین تعداد دانه در غلاف از محلول‌پاشی سولفات روی حاصل شد که البته تفاوت معنی‌داری با سولفات آهن نداشت (جدول ۴).

محلول‌پاشی با سولفات آهن و روی به ترتیب موجب افزایش ۱۵۱/۷ و ۹۵/۶ درصدی تعداد غلاف در بوته، افزایش ۲۴/۶ و ۳۳/۱

جدول ۳- مقایسه میانگین صفات مختلف عدس تحت تأثیر کاربرد سطوح مختلف پرایمینگ بذر

Table 3- Mean comparison of the different lentil traits as affected by the different levels of seed priming

صفات Traits	سطوح تیمار پرایمینگ بذر Seed priming levels					
	بدون پرایم No-prime	هیدروپرایم Hydroprime	سولفات روی Zinc sulfate		سولفات آهن Iron sulfate	
			50 mM	100 mM	50 mM	100 mM
ارتفاع بوته (سانتی متر) Plant height (cm)	26.26 ^{bc*}	28.27 ^{ab}	28.85 ^{ab}	22.81 ^d	30.33 ^a	24.68 ^{cd}
تعداد شاخه فرعی Axillary branch no.	7.00 ^{bc}	8.33 ^{bc}	8.83 ^b	6.50 ^c	11.25 ^a	6.67 ^c
تعداد غلاف در بوته Pods.plant ⁻¹	33.33 ^d	38.67 ^c	44.67 ^b	24.50 ^e	52.00 ^a	30.08 ^d
تعداد دانه در غلاف Seeds.pod ⁻¹	1.36 ^b	1.38 ^b	1.64 ^a	1.36 ^b	1.53 ^{ab}	1.01 ^c
وزن ۱۰۰ دانه (گرم) 100-seeds weight (g)	1.58 ^{bc}	1.60 ^b	1.69 ^b	1.33 ^d	1.88 ^a	1.41 ^{cd}
عملکرد دانه (کیلوگرم بر هکتار) Seed yield (kg.ha ⁻¹)	1743.14 ^b	1838.89 ^b	3295.00 ^a	919.71 ^c	3436.08 ^a	1059.85 ^c
عملکرد بیولوژیک (کیلوگرم بر هکتار) Biological yield (kg.ha ⁻¹)	6219.83 ^c	6659.72 ^c	7613.21 ^b	2833.00 ^e	10187.08 ^a	3842.93 ^d
شاخص برداشت (درصد) Harvest index (%)	26.59 ^b	26.64 ^b	39.47 ^a	32.18 ^b	31.86 ^b	25.92 ^b

* در هر ردیف، حروف مشترک، نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار است.

* In each row, common letters means no significant difference.

جدول ۴- مقایسه میانگین صفات مختلف عدس تحت تأثیر کاربرد سطوح مختلف محلول پاشی

Table 4- Mean comparison of the different lentil traits as affected by different levels of foliar spraying

صفات Traits	تیمارهای محلول پاشی Foliar spray			
	بدون محلول پاشی No foliar spray	آب تصفیه شده Purified water	سولفات روی Zinc sulfate	سولفات آهن Iron sulfate
ارتفاع بوته (سانتی متر) Plant height (cm)	21.80 ^{c*}	25.02 ^b	29.47 ^a	31.17 ^a
تعداد شاخه فرعی Axillary branch no.	5.67 ^c	7.11 ^c	8.94 ^b	10.67 ^a
تعداد غلاف در بوته Pods.plant ⁻¹	21.39 ^d	31.78 ^c	41.83 ^b	53.83 ^a
تعداد دانه در غلاف Seeds.pod ⁻¹	1.18 ^c	1.31 ^{bc}	1.57 ^a	1.47 ^{ab}
وزن ۱۰۰ دانه (گرم) 100-seeds weight (g)	1.29 ^d	1.45 ^c	1.68 ^b	1.91 ^a
عملکرد دانه (کیلوگرم بر هکتار) Seed yield (kg.ha ⁻¹)	719.31 ^c	1373.12 ^b	2917.88 ^a	3184.81 ^a
عملکرد بیولوژیک (کیلوگرم بر هکتار) Biological yield (kg.ha ⁻¹)	3506.53 ^d	4829.10 ^c	7805.90 ^b	8762.32 ^a
شاخص برداشت Harvest index	22.85 ^c	28.23 ^b	35.30 ^a	35.40 ^a

* در هر ردیف، حروف مشترک، نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار است.

* In each row, common letters means no significant difference.

در تحقیق حاضر، عنصر آهن نسبت به عنصر روی تأثیر بیشتری در افزایش وزن دانه داشت (جدول ۳ و ۴) که احتمالاً به دلیل نقش آن در تشکیل دانه از طریق اثرگذاری بر جنین‌زایی و نمو جنین (Grillet et al., 2014) و افزایش وزن دانه از طریق کمک به ماده‌سازی و تولید کربوهیدرات و پروتئین دانه است (Razmjoo & Ghafari, 2015). در گندم نیز یک افزایش وزن هزار دانه در شرایط کاربرد مجزا و یا ترکیبی عناصر آهن، روی و منگنز دیده شده است (Pourjamshid, 2021).

چنین بیان شده که در واکنش به مصرف عناصر ریزمغذی، مقدار کلروفیل برگ‌ها، میزان فتوسنتز و سرعت تثبیت دی‌اکسیدکربن در واحد سطح برگ افزایش می‌یابد (Amanullah et al., 2012; Mehrotra et al., 2022). بدیهی است که افزایش توان منبع و میزان مواد فتوسنتزی تولیدی در نهایت موجبات بهبود وزن هزار دانه و عملکرد دانه را فراهم می‌کند (Wu et al., 2022).

عملکرد دانه

عملکرد دانه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثرات ساده تیمارهای پرایمینگ و محلول‌پاشی و نیز اثر متقابل آن‌ها قرار گرفت (جدول ۲). نتایج نشان داد که پرایمینگ با آهن و روی تنها در غلظت‌های پایین (۵۰ میلی‌مولار در این آزمایش) مؤثر بود و افزایش غلظت ماده پرایمینگ از ۵۰ به ۱۰۰ میلی‌مولار منجر به تولید کمترین میزان عملکرد دانه گردید (جدول ۳). هیدروپرایم نیز برتری معنی‌داری نسبت به بذر خشک (عدم پرایمینگ) از نظر تولید عملکرد نداشت (جدول ۳، شکل ۱). مقایسه میانگین اثر ساده محلول‌پاشی بر عملکرد دانه عدس نشان داد که محلول‌پاشی با سولفات آهن و روی سبب حصول بیشترین عملکرد دانه نسبت به شاهد بدون محلول‌پاشی و محلول‌پاشی با آب شدند (جدول ۴).

مشهودترین اثر محلول‌پاشی در ترکیب پرایم بذر با غلظت‌های پایین سولفات آهن و روی بود و بیشترین عملکرد دانه در ترکیب سطوح تیماری محلول‌پاشی آهن و یا روی بر گیاهان حاصل از بذور پرایم‌شده با غلظت ۵۰ میلی‌مولار سولفات آهن و یا روی به دست آمد (شکل ۱). در سطح پرایمینگ با ۵۰ میلی‌مولار سولفات آهن و روی، محلول‌پاشی با سولفات آهن به‌ترتیب ۱/۹ و ۱/۹۹ برابر و محلول‌پاشی با سولفات روی به‌ترتیب ۲/۱۱ و ۲/۰۹ برابر عملکرد دانه را نسبت به محلول‌پاشی با آب بهبود بخشیدند (شکل ۱). این در حالی است که پرایمینگ با غلظت بالاتر آهن و روی (۱۰۰ میلی‌مولار) منجر به کمترین سطح عملکرد دانه به‌ویژه در شرایط عدم محلول‌پاشی شد. در همین بالاترین غلظت پرایمینگ آهن و روی، محلول‌پاشی با این عناصر توانست تا حدی عملکرد را بهبود بخشد، با این‌وجود حتی در ترکیب محلول‌پاشی با هر یک از این دو عنصر و پرایمینگ با ۱۰۰

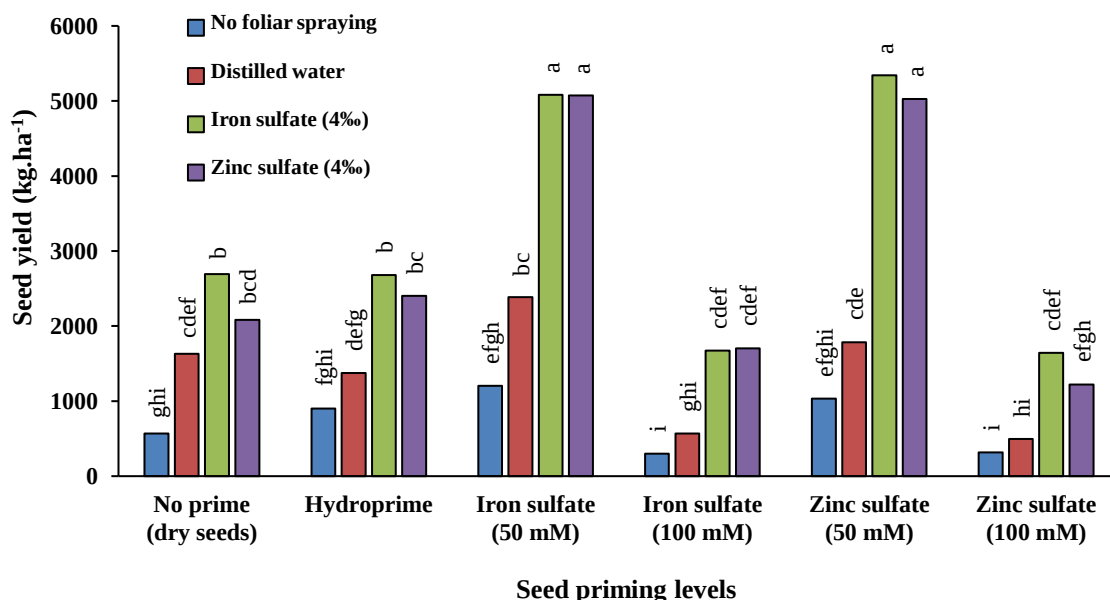
میلی‌مولار نیز عملکرد کمتر از محلول‌پاشی در شرایط عدم پرایم و هیدروپرایم بود که نشان می‌دهد احتمالاً اثرات منفی پرایمینگ با غلظت بالای عناصر روی و آهن بر رشد اولیه گیاهچه شدیدتر بوده و در چنین شرایطی گیاهان قادر به بازیابی کامل خود نمی‌باشند (شکل ۱). با توجه به این نتایج، نمی‌توان استفاده از غلظت‌های ۱۰۰ میلی‌مولار سولفات آهن و روی را برای پرایمینگ بذر توصیه نمود، اگرچه در همه سطوح پرایمینگ بذر، محلول‌پاشی توانست سبب بهبود عملکرد دانه شود. آهن و روی در اعمال متابولیکی مهمی نقش دارند که بر عملکرد مؤثرند. به‌طور خاص، روی و آهن نقش مهمی در محتوای کلروفیل برگ و فتوسنتز گیاه دارند. آهن تقریباً در تمام اجزای زنجیره انتقال الکترون در کلروپلاست‌ها وجود دارد و تا ۸۰ درصد آهن موجود در برگ‌ها در کلروپلاست‌ها یافت می‌شود و کمبود آن به‌شدت بازدارنده فتوسنتز در برگ‌ها است (Nam et al., 2021). همچنین در گیاهان دچار کمبود روی، کلروپلاست‌ها متورم شده و تغییر شکل می‌دهند، محتوای کلروفیل کاهش می‌یابد و فعالیت فتوسیستم II بازداشته می‌شود (Zhang et al., 2019). (بنابراین در نتیجه کاربرد این عناصر، میزان فتوسنتز و سرعت تثبیت دی‌اکسیدکربن در واحد سطح برگ بیشتر شده و در نهایت به بهبود عملکرد منجر می‌شود (Broadley et al., 2012). افزایش عملکرد دانه نسبت به شاهد را همچنین می‌توان به اثر مثبت پرایم در استقرار سریع‌تر و رشد بهتر گیاهچه، گسترش سطح برگ و غلظت کلروفیل و افزایش سرعت رشد گیاه (Haider et al., 2020; Mehrotra et al., 2022; Moradi & Siosemardeh, 2023) نسبت داد.

براساس پژوهش شعبان‌زاده و گلوی (Shabanzadeh & Galavi, 2011)، بیشترین عملکرد دانه در سطوح محلول‌پاشی آهن و مخلوط عناصر ریزمغذی و کمترین آن از شاهد به دست آمد. کاربرد عناصر ریزمغذی موجب بهبود سرعت فتوسنتز و افزودن به دوام سطح برگ، تولید کربوهیدرات‌ها و مواد پروتئینی در برگ‌ها و تسهیم و تجمع آن‌ها در دانه‌ها می‌شود (Fageria, 2016) و گمان می‌رود به همین دلیل است که محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی همچون آهن باعث افزایش عملکرد دانه می‌شود (Sun et al., 2021; Usman et al., 2023). از سوی دیگر، با توجه به برهم‌کنش عناصر ریزمغذی با یکدیگر، به نظر می‌رسد که تلفیق دو تیمار پرایم کردن و محلول‌پاشی سولفات روی از یک‌سو به افزایش تعداد دانه‌ها انجامیده و از سوی دیگر ظرفیت هر دانه را در جذب آسیمیلات‌های عرضه‌شده افزایش می‌دهد (Asadi & Malakouti, 2004). به نظر می‌رسد که گیاهان حاصل از بذور پرایم‌شده با داشتن ریشه گسترده‌تر، درصد جذب روی بیش‌تری از خاک دارند. همچنین بیان شده است که کاربرد عناصر ریزمغذی آهن و روی به‌صورت پرایم به علت تأثیر مثبت بر افزایش سرعت و درصد جوانه‌زنی باعث می‌شود که گیاه بهتر و بیشتر از

گیاه، کاهش رشد، عملکرد و تأثیر منفی بر سلامت کلی گیاه شده و ضمن اینکه بر جنبه‌های مختلف رشدونمو گیاهان تأثیر منفی می‌گذارد، می‌تواند عملکرد محصولات زراعی را تا ۷۸ درصد کاهش دهد (Harish et al., 2023). علاوه بر این، محتوای بالای روی اثرات سمی بر گیاهان دارد و منجر به سرکوب تقسیم و طویل شدن سلولی می‌شود و بر تولید زیست‌توده تأثیر منفی می‌گذارد (Tsonev & Lidon, 2012). غلظت‌های بالای این عناصر همچنین می‌تواند اثرات نامطلوبی بر جذب و تعادل سایر عناصر غذایی حیاتی در گیاهان داشته باشد (Vasilachi et al., 2023).

شرایط محیطی استفاده کند و سرعت رشد محصول افزایش یابد (Badiri, 2013). نتایج حاصل با تحقیقات انجام گرفته توسط حیدریان و همکاران (Heidarian et al., 2011) در سویا، غفاری ملایری و همکاران (Ghaffari Malayeri et al., 2012) در ذرت، و کمرکی و گلوی (Kamaraki & Galavi, 2012) در گلرنگ مطابقت دارد.

با تمام این تفاسیل، همان‌طور که پیش از این اشاره شد، به نظر می‌رسد که برآیند اثرات منفی غلظت‌های بالای مواد پرایم بر صفات رشدی و اجزای عملکرد (جدول ۳) در نهایت در افت شدید عملکرد دانه در این غلظت‌ها نمود پیدا کرده است. ثابت شده است که جذب بیش از حد آهن می‌تواند منجر به سمیت آهن، آسیب به غشاء سلولی



شکل ۱- مقایسه عملکرد دانه عدس تحت تأثیر برهم‌کنش سطوح مختلف تیمارهای پرایمینگ بذر و محلول پاشی
Figure 1- Comparison of lentil seed yield as affected by the interaction of different levels of seed priming and plant foliar spray treatments

حروف نامشابه روی ستون‌ها نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد است.
Different letters on the bars indicate a significant difference at the 5% level.

همانند عملکرد دانه، کمترین میزان عملکرد بیولوژیک در ترکیب تیماری پرایمینگ با غلظت ۱۰۰ میلی‌مولار هر دو عنصر، در شرایط عدم محلول پاشی مشاهده شد (شکل ۲)، همان‌طور که در خصوص عملکرد دانه گفته شد، بیشتر نشانگر اثرات منفی غلظت‌های بالای این عناصر است (جدول ۳)، به‌نحوی که با افزایش سطح کاربرد سولفات آهن و روی از ۵۰ به ۱۰۰ میلی‌مولار، عملکرد بیولوژیک به‌ترتیب ۶۲/۲۸ و ۶۲/۷۹ درصد کاهش نشان داد. در شرایط محلول پاشی با سولفات آهن، پرایمینگ بذور با ۵۰ میلی‌مولار سولفات آهن و روی به‌ترتیب موجب افزایش ۶۶/۹۶ و ۳۲/۴۰ درصدی و در

عملکرد بیولوژیک

بر طبق نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲)، عملکرد بیولوژیک (هواخشک) تحت تأثیر تمام اثرات ساده و اثر متقابل تیمارها قرار گرفت. بیشترین عملکردهای بیولوژیک به‌ترتیب در ترکیب تیماری پرایمینگ با ۵۰ میلی‌مولار سولفات آهن و سولفات روی همراه با محلول پاشی با سولفات آهن حاصل شد. به عبارت دیگر، برخلاف عملکرد دانه، گیاهان حاصل از بذره‌ای پرایم‌شده با غلظت ۵۰ میلی‌مولار سولفات آهن و یا روی، در شرایط محلول پاشی با سولفات آهن نسبت به سولفات روی برتری نشان دادند (شکل ۲). همچنین

(به‌ویژه میزان پروتئین، روی، آهن و منگنز) گندم شد، احتمالاً به این دلیل که این عناصر با افزایش میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی، موجب بهبود فتوسنتز و در نهایت تولید ماده خشک و عملکرد بیش‌تر می‌شوند.

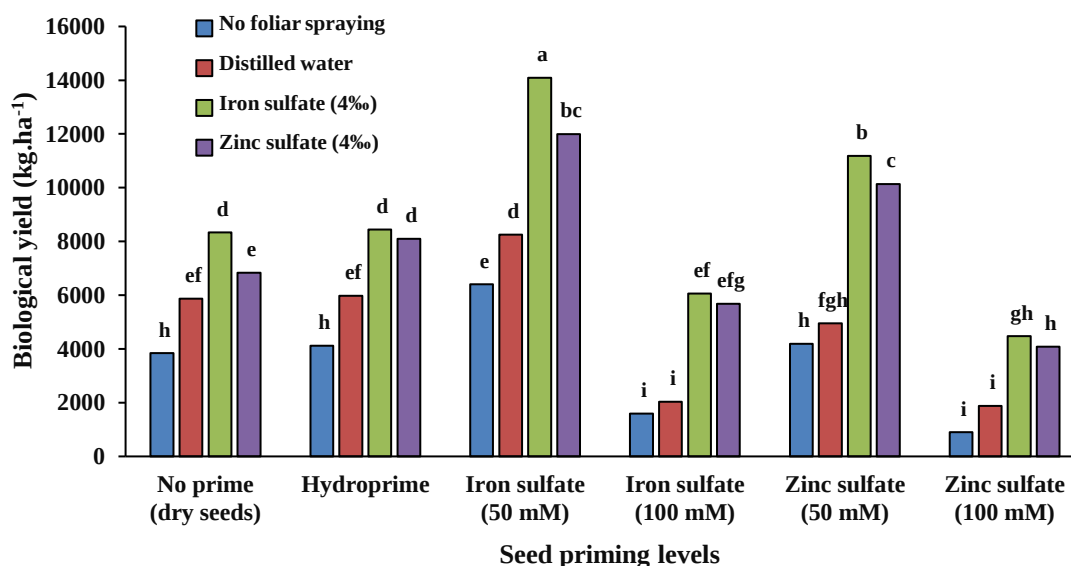
شاخص برداشت

شاخص برداشت تنها تحت تأثیر اثرات ساده پرایمینگ بذور و محلول‌پاشی قرار گرفت (جدول ۲). روند تأثیرپذیری شاخص برداشت از سطوح پرایمینگ تا حدی متفاوت از عملکردهای بیولوژیک و دانه بود، به‌نحوی که بیشترین و کمترین میزان شاخص برداشت به‌ترتیب در سطوح پرایم با ۵۰ میلی‌مولار سولفات روی و ۱۰۰ میلی‌مولار سولفات آهن مشاهده شد (جدول ۳). با افزایش میزان کاربرد سولفات آهن و روی از ۵۰ به ۱۰۰ میلی‌مولار، شاخص برداشت ۱۸/۶۴ و ۱۸/۴۸ درصد کاهش یافت (جدول ۳). وزن دانه به‌هنگام برداشت تابعی از تسهیم مواد فتوسنتزی، از فتوسنتز جاری یا از انتقال مجدد، در طول پُر شدن دانه است. تسریع در مراحل نمو و بهبود رشد گیاه در اثر پیش‌تیمار بذور ممکن است زمان بیشتری را برای انتقال و ذخیره مواد پرورده در اختیار دلنه قرار داده و همچنین ضریب انتقال مجدد مواد به دلنه را افزایش دهد و بدین ترتیب موجب افزایش شاخص برداشت شود (Farooq et al., 2012). در ذرت نیز پرایم کردن با محلول سولفات روی، شاخص برداشت را به‌صورت معنی‌داری افزایش داده است (Musavi et al., 2012).

محلول‌پاشی با آب موجب افزایش ۲۳/۵ درصدی شاخص برداشت شد و تفاوت معنی‌داری بین شاخص برداشت در سطوح محلول‌پاشی با سولفات روی و آهن مشاهده نشد. به‌طور کلی، شاخص برداشت در شرایط محلول‌پاشی با سولفات آهن و سولفات روی به‌طور متوسط حدود ۵۵ درصد در مقایسه با شرایط عدم محلول‌پاشی و حدود ۲۵ درصد در مقایسه با محلول‌پاشی با آب افزایش نشان داد (جدول ۴). در تحقیق شعبان زاده و گلوی (Shabanzadeh & Galavi, 2011) نیز بالاترین شاخص برداشت از تیمار محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی و کمترین آن از شاهد به‌دست آمد و اختلاف بین تیمارهای محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی روی، بور و آهن از نظر آماری معنی‌دار نبود. در پنبه نیز اثرات مثبت محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی در افزایش عملکرد دانه و شاخص برداشت گزارش شده است.

محلول‌پاشی با سولفات روی در همین سطح پرایمینگ به‌ترتیب موجب افزایش ۴۸/۱۱ و ۲۵/۱۱ درصدی عملکرد بیولوژیک نسبت به شاهد هیدروپرایم گردید؛ هرچند در زمان پرایمینگ بذور با ۱۰۰ میلی‌مولار سولفات آهن و روی، محلول‌پاشی با سولفات آهن موجب کاهش ۲۸/۲۸ و ۴۷/۰۱ درصدی و محلول‌پاشی با سولفات روی موجب کاهش ۲۹/۸۲ و ۴۹/۵۷ درصدی عملکرد بیولوژیک نسبت به شاهد آب شد (شکل ۲)؛ با وجود این، حتی در همین غلظت‌های بالای پرایمینگ نیز محلول‌پاشی با عناصر آهن و روی موجب بازیابی عملکرد بیولوژیک شد، به‌نحوی که در شرایط پرایم با غلظت ۱۰۰ میلی‌مولار سولفات آهن، محلول‌پاشی با سولفات آهن و روی به‌ترتیب عملکرد بیولوژیک را ۲۷۹/۵ و ۲۵۶/۳ درصد نسبت به عدم محلول‌پاشی افزایش دادند. این مقادیر در شرایط پرایم با غلظت ۱۰۰ میلی‌مولار سولفات روی به‌ترتیب ۳۹۹/۰ و ۳۵۵/۷ درصد افزایش یافتند که اثرگذاری قابل توجه محلول‌پاشی را نشان می‌دهد (شکل ۲). همچنین در اغلب موارد، تفاوت چندانی بین هیدروپرایمینگ و شرایط عدم پرایم مشاهده نشد (جدول ۳، شکل ۲) که نشان می‌دهد اثرات مثبت پرایمینگ تغذیه‌ای بیشتر ناشی از خود عناصر به‌کاررفته است، نه عمل پرایم با آب. همچنین هر دو تیمار هیدروپرایم و عدم پرایم به‌تنهایی (جدول ۳) و یا در ترکیب با محلول‌پاشی (شکل ۲) نسبت به پرایمینگ با غلظت‌های بالای دو عنصر برتری نشان دادند. تأثیر نسبی بالاتر کاربرد آهن نسبت به روی در سطوح محلول‌پاشی ترکیب سولفات این عناصر نیز مشاهده شد (جدول ۴)، به‌نحوی که در نتیجه محلول‌پاشی با سولفات آهن و روی، عملکرد بیولوژیک به‌ترتیب ۲/۵ و ۲/۲۳ برابر نسبت به شرایط بدون محلول‌پاشی افزایش یافت که این مورد می‌تواند از بهبود ویژگی‌های رویشی و افزایش اجزای مهم و تأثیرگذار در عملکرد گیاه (جدول ۴) منشأ گرفته باشد.

کمبود عناصر ریزمغذی همچون روی و آهن سبب کاهش غلظت کلروفیل و فعالیت ریبولوز بیس فسفات کربوکسیلاز و در نهایت افت شدید فتوسنتز و به‌دنبال آن کاهش وزن خشک گیاهان می‌گردد (Fageria, 2016)، همان‌طور که در این آزمایش نیز کمترین عملکرد بیولوژیکی در شاهد عدم محلول‌پاشی این عناصر به‌دست آمد (جدول ۴). نتایج مشابهی در زیره (Sayyari Zahan et al., 2024) گلرنگ (Kamaraki & Galavi, 2012) و عدس (Dhaliwal et al., 2021) مشاهده شده است. مارالیان و همکاران (Maralian et al., 2012) گزارش کردند که محلول‌پاشی آهن و روی سبب بهبود صفات زراعی (مانند تعداد پنجه، تعداد پنجه بارور و عملکرد) و افزایش کیفیت دلنه



شکل ۲- مقایسه عملکرد بیولوژیک (هواخشک) عدس تحت تأثیر برهم کنش سطوح مختلف تیمارهای پرایمینگ بذر و محلول پاشی
Figure 2- Comparison of lentil biological yield (air-dried) as affected by the interaction of different levels of seed priming and plant foliar spray treatments

حروف نامشابه روی ستون‌ها نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد است.
Different letters on the bars indicate a significant difference at the 5% level.

آزمون جوانه‌زنی بذرهای برداشت‌شده

بر طبق نتایج تجزیه واریانس، تنها اثر محلول پاشی عناصر ریزمغذی بر تمامی صفات مرتبط با جوانه‌زنی بذور حاصل معنی‌دار شد (جدول ۵). با توجه به اینکه محلول پاشی در طی فصل رشد دیرتر نسبت به پرایمینگ و در مراحل آغازین رشد زایشی صورت گرفته است، دور از انتظار نبود که در خصوصیات بذور تولیدی و بنیه آن‌ها مؤثرتر بوده باشد.

به‌طور کلی، ترتیب اثرگذاری سطوح محلول پاشی بر صفات جوانه‌زنی و رشد گیاهچه به‌ترتیب سولفات آهن < سولفات روی < آب < بدون محلول پاشی بود (جدول ۶). محلول پاشی با سولفات آهن به‌ترتیب موجب افزایش ۳۹/۱۱ و ۳۳/۱۶ درصدی درصد و سرعت جوانه‌زنی، ۵۴/۴۸ درصدی شاخص طولی بنیه بذر، ۳۰/۹۹ درصدی طول ریشه‌چه، ۳۰/۵۴ درصدی طول ساقچه‌چه و ۱۸/۱۵ درصدی وزن خشک گیاهچه نسبت به شاهد بدون محلول پاشی گردید. تنها در صفت طول ساقچه‌چه، اختلاف معنی‌داری بین کاربرد سولفات آهن و روی مشاهده نشد، ولی در بقیه صفات این اختلاف معنی‌دار بود (جدول ۶). چنین تأثیر مثبتی از محلول پاشی بر صفات گیاه و بذرهای حاصل تا حدی می‌تواند ناشی از محدودیت جذب عناصر، به‌ویژه از طریق جریان توده‌ای، در شرایط محدودیت رطوبت مانند شرایط دیم مطالعه حاضر باشد؛ به‌ویژه اینکه جریان توده‌ای وابستگی زیادی به

مقدار رطوبت داشته و در صورت کاهش رطوبت، جذب عناصری که به‌وسیله این جریان انتقال می‌یابند، روند منفی نشان می‌دهد (Taiz et al., 2015) و عرضه این عناصر از طریق محلول پاشی می‌تواند این نقصان را جبران نماید، زیرا دیده شده است که محلول پاشی عناصر ریزمغذی سبب افزایش غلظت این عناصر در بافت گیاه شده (Moradi & Siosemardeh, 2023) و می‌تواند غلظت این عناصر در دانه را به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش دهد (Saeidi et al., 2015). گمان می‌رود که وجود غلظت‌های بالاتر این عناصر در بذر با تأمین نیازهای متابولیسمی گیاه، سبب می‌شود تا گیاهچه‌های قوی‌تری تولید شوند؛ از همین رو محلول پاشی با عناصر ریزمغذی می‌تواند بر جوانه‌زنی و بنیه بذرهای تولیدی نیز مؤثر باشد (Mahlooji & Jenab, 2021)، مطابق با آنچه در این آزمایش نیز دیده شد. محلول پاشی گیاهان با عناصر غذایی مورد نیاز گیاه احتمالاً سلامت کلی و قدرت گیاه مادری را بهبود می‌بخشند که خود می‌تواند منجر به بهبود کیفیت بذر، از جمله ذخایر بیشتر مواد مغذی در بذر که برای جوانه‌زنی موفق و رشد اولیه گیاهچه‌ها حیاتی هستند، شود. علاوه بر این، ریزمغذی‌ها ممکن است بر فرایندهای فیزیولوژیکی بذر تأثیر بگذارند و از این طریق سرعت جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه را افزایش دهند (Boonchuay et al., 2013; Saleem et al., 2023).

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس صفات مرتبط با جوانه‌زنی بذور عدس حاصل از گیاهان تیمار شده با پرایمینگ تغذیه‌ای و محلول‌پاشی سولفات روی و آهن

Table 5- Results of analysis of variance of traits related to germination of lentil seeds from parental plants treated with nutritional priming and foliar spraying by zinc and iron sulfate

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات Mean of squares					
		درصد جوانه‌زنی Germination percentage	سرعت جوانه‌زنی Germination rate	شاخص طولی بنبیه Longitudinal vigour index	طول ریشه‌چه Radicle length	طول ساقه‌چه Epicotyl length	وزن خشک گیاهچه Seedling dry weight
پرایمینگ Priming (P)	5	44.8889 ^{ns}	20.7133 ^{ns}	9055.6289 ^{ns}	0.0593 ^{ns}	0.1008 ^{ns}	0.00002 ^{ns}
محلول‌پاشی Foliar spray (F)	3	2469.3333 ^{**}	795.2881 ^{**}	594795.2207 ^{**}	8.2928 ^{**}	7.4005 ^{**}	0.0003 ^{**}
پرایمینگ × محلول‌پاشی P × F	15	24.8000 ^{ns}	13.7828 ^{ns}	4431.4790 ^{ns}	0.0484 ^{ns}	0.0112 ^{ns}	0.00001 ^{ns}
خطا Error	46	89.7222	31.3315	7760.8678	0.1507	0.2126	0.00002
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)		13.70	15.21	15.29	8.57	12.63	17.22

^{ns}, * و **: به ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار و معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد می‌باشند.

ns, *, and **: indicate no significant difference and significant difference at the 5 and 1 percent probability levels, respectively.

جدول ۶- مقایسه میانگین صفات مرتبط با جوانه‌زنی بذور عدس حاصل از گیاهان مادری تیمار شده با سطوح محلول‌پاشی سولفات روی و آهن
Table 6- Mean comparison of traits related to the germination of seeds harvested from parental plants treated with foliar spraying by zinc and iron sulfate

صفات Traits	تیمارهای محلول‌پاشی Foliar spray			
	بدون محلول‌پاشی No foliar spray	آب Distilled water	سولفات روی Zinc sulfate	سولفات آهن Iron sulfate
درصد جوانه‌زنی (%) Germination percentage (%)	53.78 ^{d*}	67.33 ^c	74.43 ^b	81.33 ^a
سرعت جوانه‌زنی (بذر در روز) Germination rate (seed.day ⁻¹)	30.21 ^c	32.97 ^c	38.81 ^b	45.20 ^a
شاخص طولی بنبیه Longitudinal vigour index	354.73 ^d	519.84 ^c	651.40 ^b	779.31 ^a
طول ریشه‌چه (سانتی‌متر) Radicle length (cm)	3.63 ^c	4.50 ^b	4.71 ^b	5.26 ^a
طول ساقه‌چه (سانتی‌متر) Epicotyl length (cm)	2.98 ^b	3.23 ^b	4.09 ^a	4.29 ^a
وزن خشک گیاهچه (میلی‌گرم) Seedling dry weight (mg)	23.8 ^c	27.0 ^{bc}	30.2 ^b	33.6 ^a

* در هر ردیف، حروف مشترک نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار است.

* In each row, common letters means no significant difference.

نتیجه‌گیری

در تعداد غلاف در بوته ایجاد کردند، درحالی‌که تغذیه دیرتر این عناصر از طریق محلول‌پاشی، بیشترین اثر را بر روی وزن دانه داشت. انتخاب غلظت مناسب این مواد (۵۰ میلی‌مولار) و کاربرد آن در زمان مناسب، نقش مؤثری بر افزایش صفات رویشی و زایشی گیاه زراعی عدس

در این تحقیق در اکثر صفات، هیدروپرایم اختلاف معنی‌داری با عدم پرایمینگ نداشت و پرایمینگ با سولفات آهن و روی از طریق بهبود ارتفاع و تعداد شاخه جانبی، بیشترین افزایش در بین اجزای عملکرد را

گردید. محلول پاشی گیاهان مادری با سولفات آهن سبب شد که بذره‌های حاصله از توان رویش و بنیه بالاتری نیز برخوردار باشند. با توجه به نتایج به دست آمده، به نظر می‌رسد که به کارگیری عملیاتی نظیر پرایمینگ تغذیه‌ای و محلول پاشی با ریزمغذی‌ها، راهکاری مناسب جهت بهبود رشد و تولید گیاه و نیز شاخص‌های جوانه‌زنی و استقرار بذور تولیدشده باشد.

داشت، درحالی‌که غلظت بالای ماده پرایمینگ (۱۰۰ میلی‌مولار) اثر عکس بر تمامی صفات اندازه‌گیری شده داشت و از این رو باید در میزان مصرف این عناصر دقت شود. استفاده از غلظت ۵۰ میلی‌مولار سولفات آهن و یا سولفات روی به همراه محلول پاشی هر یک از این عناصر موجب بالاترین عملکرد دانه در عدس در شرایط دیم شد. همچنین بیشترین عملکرد بیولوژیک در ترکیب تیماری پرایمینگ با ۵۰ میلی‌مولار سولفات آهن به همراه محلول پاشی با همین عنصر حاصل

References

- Abdel-Motagally, F. M. F., Mahmoud, M. W. Sh., & Ahmed, E. M. (2016). Response of two peanut varieties to foliar spray of some micronutrients and sulphur application under east of El-Ewinat conditions. *Assiut Journal of Agricultural Sciences*, 47(1), 14-30.
- Abdul-Baki, A. A., & Anderson, J. D. (1973). Vigor determination in soybean seed by multiple criteria. *Crop Science*, 13(6), 630-633. <https://doi.org/10.2135/cropsci1973.0011183X001300060013x>
- Aboutalebian, M. A., & Mohagheghi, A. (2015). Influence of different seed priming treatments on yield and yield components of lentil under terminal drought stress condition. *Journal of Crop Production and Processing*, 5(15), 129-141. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.18869/acadpub.jcpp.5.15.129>
- Adhikari, T., Kundu, S., & Rao, A. S. (2016). Zinc delivery to plants through seed coating with nano-zinc oxide particles. *Journal of Plant Nutrition*, 39(1), 136-146. <https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1087562>
- Ahmad, B., Rahim, H. U., Mian, I. A., & Ali, W. (2025). Synergistic biochar--nitrogen application enhances soil fertility and compensates for nutrient deficiency, improving wheat production in calcareous soil. *Sustainability*, 17(5), 2321. <https://doi.org/10.3390/su17052321>
- Alexander, R., Khaja, A., Debiec, N., Fazioli, A., Torrance, M., & Razzaque, M. S. (2024). Health-promoting benefits of lentils: Anti-inflammatory and anti-microbial effects. *Current Research in Physiology*, 7, 100124. <https://doi.org/10.1016/j.crphys.2024.100124>
- Amanullah, M. M., Archana, J., Manoharan, S., & Subramanian, K. S. (2012). Influence of iron and AM inoculation on metabolically active iron, chlorophyll content and yield of hybrid maize in calcareous soil. *Journal of Agronomy*, 11(1), 27-30. <https://doi.org/10.3923/ja.2012.27.30>
- Asadi, A., & Malakouti, M. J. (2004). Determination of zinc critical level and its effects on the yield of soybean. In: M. J. Malakouti & E. Sepehr (Eds.), *Balanced Nutrition of Oil Crops: An Approach Towards Self-Sufficiency in Oil*, Khaniran Press, Tehran, Iran. p. 379-390. (In Persian)
- Badiri, A. (2013). The effect of seed priming with micronutrients on germination, growth, and yield indices of the medicinal plant plantain (*Plantago major*). M.Sc. Thesis, Islamic Azad University, Karaj Branch, Iran. (In Persian with English Abstract).
- Boonchuay, P., Cakmak, I., Rerkasem, B., & Prom-U-Thai, C. (2013). Effect of different foliar zinc application at different growth stages on seed zinc concentration and its impact on seedling vigor in rice. *Soil Science and Plant Nutrition*, 59(2), 180-188. <https://doi.org/10.1080/00380768.2013.763382>
- Borowski, E., & Michalek, S. (2011). The effect of foliar fertilization of French bean with iron salts and urea on some physiological processes in plants relative to iron uptake and translocation in leaves. *Acta Scientiarum Polonorum-Hortorum Cultus*, 10, 183-193.
- Broadley, M., Brown, P. I. C., Rengel, Z., & Zhao, F. (2012). Function of nutrients: Micronutrients. In P. Marschner (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3rd ed. pp. 191-248. Elsevier.
- Cakmak, I. (2008). Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? *Plant and Soil*, 302, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9466-3>
- Chattha, M. U., Hassan, M. U., Khan, I., Chattha, M. B., Mahmood, A., Chattha, M. U., Nawaz, M., Subhani, M. N., Kharal, M., & Khan, S. (2017). Biofortification of wheat cultivars to combat zinc deficiency. *Frontiers in Plant Science*, 8, 281. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00281>
- Choukri, M., Abouabdillah, A., Bouabid, R., Abd-Elkader, O. H., Pacioglu, O., Boufahja, F., & Bouriou, M. (2022). Zn application through seed priming improves productivity and grain nutritional quality of silage corn. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(12), 103456. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103456>
- Dhaliwal, S. S., Sharma, V., Shukla, A. K., Kaur, J., Verma, V., Singh, P., Singh, H., Abdel-Hafez, S. H., Sayed, S., Gaber, A., Ali, R., & Hossain, A. (2021). Enrichment of zinc and iron micronutrients in lentil

- (*Lens culinaris* Medik.) through biofortification. *Molecules*, 26(24), 7671. <https://doi.org/10.3390/molecules26247671>
- Fageria, N. K. (2016). *The Use of Nutrients in Crop Plants*, (1st ed.). CRC Press, Boca Raton, USA. 448 p. <https://doi.org/10.1201/9781420075113>
- Farooq, M., Wahid, A., Siddique, K. H. M., & Siddique, M. (2012). Micronutrient application through seed treatments - a review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12(1), 125-142. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162012000100011>
- Ghaffari Malayeri, M., Akbari, G. A., & Mohammadzadeh, A. (2012). Response of yield and yield components of corn on soil use and foliar application of micronutrients. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 10(2), 368-373. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.22067/gsc.v10i2.16239>
- Grillet, L., Mari, S., & Schmidt, W. (2014). Iron in seeds—Loading pathways and subcellular localization. *Frontiers in Plant Science*, 4, 535. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00535>
- Hagigati Maleki, A., Attarilar, J., & Khorsandi, H. (2014). Effects of manganese sulfate application on seed yield of safflower genotypes under dryland conditions. *Iranian Dryland Agronomy Journal*, 3(1), 33-39. (In Persian with English Abstract).
- Haider, M. U., Hussain, M., Farooq, M., & Nawaz, A. (2020). Optimizing zinc seed priming for improving the growth, yield and grain biofortification of mungbean (*Vigna radiata* (L.) wilczek). *Journal of Plant Nutrition*, 43(10), 1438-1446. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1730895>
- Harish, V., Aslam, S., Chouhan, S., Pratap, Y., & Lalotra, S. (2023). Iron toxicity in plants: A review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(8), 1894-1900. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i82145>
- Hassan, M. U., Chattha, M. U., Ullah, A., Khan, I., Qadeer, A., Aamer, M., Khan, A. U., Nadeem, F., & Khan, T. A. (2019). Agronomic biofortification to improve productivity and grain Zn concentration of bread wheat. *International Journal of Agriculture and Biology*, 21, 615-620. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0936>
- Heidarian, A. R., Kord, H., Mostafavi, K., Lak, A. P., & Amini Mashhadi, F. (2011). 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.
- Heidarzade, A., Esmaeili, M., & Abbasi, R. (2016). Response of soybean to molybdenum and iron spray under well-watered and water deficit conditions. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 4(1), 37-46. [https://doi.org/10.18006/2015.4\(1\).37.46](https://doi.org/10.18006/2015.4(1).37.46)
- Hoseinpour Askarian, E., Abbasi Surki, A., & Danesh Shahraki, A. (2019). Effect of seed priming with ZnSO₄ and FeSO₄ on dormancy break optimization and germination traits of shallot (*Allium hirtifolium*). *Iranian Journal of Seed Research*, 6(1), 33-49. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.29252/yujs.6.1.33>
- Iranshahi, Sh., Sajedi, N. A., & Changizi, M. (2014, February 26). The effect of foliar spraying of nanoparticles and iron sulfate on the yield and yield components of pinto beans [Conference presentation]. 5th Iranian Pulses Symposium, Agricultural Campus, University of Tehran, Iran. (In Persian). https://www.sid.ir/fa/VEWSSID/s_pdf/6791392H0590.pdf
- Jokar, L., Ronaghi, A., Karimian, N., & Ghasemi-Fasaei, R. (2015). Effects of different Fe levels from Fe-nano-chelate and Fe-EDDHA sources on growth and some nutrients concentrations in cowpea in a calcareous soil. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 6(2), 9-19. (In Persian with English Abstract). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089082.1394.6.2.2.3>
- Kamaraki, H., & Galavi, M. (2012). Evaluation of foliar Fe, Zn and B micronutrients application on quantitative and qualitative traits of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Journal of Agroecology*, 4(3), 201-206. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.22067/jag.v4i3.15308>
- Kooshki, M. H., Kordi Bairanvand, Y., Jafarzadeh Sarkenari, M., & Beizae, E. (2014). Study of effect of foliar boron on yield and yield components of white bean promising lines [Conference presentation]. 13th Iranian Crop Science Congress and 3rd Iranian Seed Science and Technology Conference, Seed and Plant Improvement Institute, Karaj, Iran, August 24-26. (In Persian)
- Kordi, S., Marsafari, 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*) under water deficit stress in Ilam weather conditions. *Applied Field Crops Research*, 29(2), 105-114. (In Persian with English Abstract).
- Maguire, J. D. (1962). Speed of germination-aid selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science*, 2, 176-177. <https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x>

- Mahlooji, M., & Jenab, M. (2021). Effect of water deficit stress and foliar application of maternal plant on germination characteristics of three barley (*Hordeum vulgare*) cultivars. *Iranian Journal of Seed Research*, 8(1), 137-150. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.52547/yujs.8.1.137>
- Maralian, H., Didar Taleshmikail, R., Shahbazi, K., & Torabi Giglou, M. (2012). Study of the effects of foliar application of Fe and Zn on wheat quality and quantity properties. *Agricultural Research*, 9(5), 47-60. (In Persian with English Abstract).
- Martínez-Ríos, O., Bravo-Vinaja, Á., San-Martín-Hernández, C., Hidalgo-Moreno, C. I., Sánchez-de-Jesús, M. A., Llampallas-Díaz, J. D., Santillan-Balderas, D. R., & García-Preciado, J. C. (2024). Zinc deficiency in calcareous soils: A bibliometric analysis from 1989 to 2024. *Agriculture*, 14(12), 2285. <https://doi.org/10.3390/agriculture14122285>
- Mehraban, A. (2017). The effect of iron foliar application on yield, yield components and protein of lentil grain. *Vegetative Environmental Physiology*, 12(45), 27-37.
- Mehrotra, R., Verma, R. K., & Pal, A. (2022). Iron deficiency chlorosis in aromatic grasses—A review. *Environmental Challenges*, 9, 100646. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100646>
- Moaaz, A., Javed, M. T., Mauro, R. P., Shabbir, R., Afzal, I., & Yousef, A. F. (2020). Effect of seed priming with potassium nitrate on the performance of tomato. *Agriculture*, 10(11), 498. <https://doi.org/10.3390/agriculture10110498>
- Moradi, L., & Siosemardeh, A. (2023). Combination of seed priming and nutrient foliar application improved physiological attributes, grain yield, and biofortification of rainfed wheat. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1287677. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1287677>
- Mousavi, S. R., Galavi, M., & Ahmadvand, G. (2007). Effect of zinc and manganese foliar application on yield, quality and enrichment on potato (*Solanum tuberosum* L.). *Asian Journal of Plant Sciences*, 6(8), 1256-1260. <https://doi.org/10.3923/ajps.2007.1256.1260>
- Musavi, R., Aboutalebian, M. A., & Sepehri, A. (2012). The effects of on-farm seed priming and planting date on emergence characteristics, yield and yield components of a corn cultivar (SC. 260) in Hamedan. *Annals of Biological Research*, 3(9), 4427-4434.
- Nam, H. I., Shahzad, Z., Dorone, Y., Clowez, S., Zhao, K., Bouain, N., Lay-Pruitt, K. S., Cho, H., Rhee, S. Y., & Rouached, H. (2021). Interdependent iron and phosphorus availability controls photosynthesis through retrograde signaling. *Nature Communications*, 12, 7211. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27548-2>
- Pandey, N., Pathak, G. C., & Sharma, C. P. (2006). Zinc is critically required for pollen function and fertilisation in lentil. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 20(2), 89-96. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2005.09.006>
- Potarzycki, J., & Grzebisz, W. (2009). Effect of zinc foliar application on grain yield of maize and its yielding components. *Plant, Soil and Environment*, 55(12), 519-527. <https://doi.org/10.17221/95/2009-PSE>
- Pourjamshid, S. A. (2021). Study the effect of iron, zinc and manganese foliar application on morphological and agronomic traits of bread wheat (Chamran cultivar) under different irrigation regimes. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 14(1), 109-118. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.22077/escs.2020.2448.1643>
- Ray, H., Bett, K., Tar'an, B., Vandenberg, A., Thavarajah, D., & Warkentin, T. (2014). Mineral micronutrient content of cultivars of field pea, chickpea, common bean, and lentil grown in Saskatchewan, Canada. *Crop Science*, 54, 1698-1708. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.08.0568>
- Razmjoo, J., & Ghafari, H. (2015). Response of durum wheat to foliar application of varied sources and rates of iron fertilizers. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17(2), 321-331. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.16807073.2015.17.2.21.4>
- Rehman, A., Nadeem, F., & Farooq, M. (2021). Role of seed priming in root development and crop production. In Z. Rengel & I. Djalovic (Eds.), *The Root Systems in Sustainable Agricultural Intensification*. pp. 221-243. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119525417.ch8>
- Rengel, Z., Cakmak, I., & White, P. J. (2023). *Marschner's Mineral Nutrition of Plants* (4th ed.). Academic Press. London, United Kingdom. 816 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819773-8.00023-X>
- Roosta, H. R., & Jafari, H. (2017). Effect of different iron sources on the growth and physiological characteristics of two cultivars of lettuce in a hydroponic culture. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 8(1), 21-33. (In Persian with English Abstract). <http://dorl.net/dor/20.1001.1.20089082.1396.8.1.6.9>
- Rudani, K., Patel, V., & Prajapati, K. (2018). The importance of zinc in plant growth - A review. *International Research Journal of Natural and Applied Sciences*, 5(2), 38-48. <https://www.aarf.asia/current/2018/Feb/p4TrUEdfPkzaxsI.pdf>

- Sadiqpoor, M. A., Aytekin, R. İ., Yavuz, C., & Çalışkan, S. (2025). Effect of different application methods of iron chelate (EDDHA Na Fe) on agronomic, yield, and quality characteristics of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 56(10), 1483--1499. <https://doi.org/10.1080/00103624.2025.2458734>
- Saeidi Aboueshaghi, R., & Yadavi, A. (2015). Effects of irrigation levels and foliar application with iron and zinc on quantitative and qualitative traits of red bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Iranian Journal of Pulses Research*, 6(1), 54-65. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.22067/ijpr.v1394i1.49008>
- Saleem, S., Mushtaq, N. U., Rasool, A., Shah, W. H., Tahir, I., & Rehman, R. U. (2023). Plant nutrition and soil fertility: Physiological and molecular avenues for crop improvement. In T. Aftab & K. R. Hakeem (Eds.), *Sustainable Plant Nutrition*. pp. 23-49. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18675-2.00009-2>
- Sayyari Zahan, M. H., Norozi, Z., & Mahmoodi, S. (2024). Biological yield and harvest index of *Cuminum cyminum* L. affected by diatomite foliar application [Conference presentation]. 2nd National Conference on Medicinal Plants, Entrepreneurship and Commercialization, University of Jiroft, Iran. (In Persian with English Abstract).
- Shabanzadeh, S., & Galavi, M. (2011). Effect of micronutrients foliar application and irrigation regimes on agronomic traits and yield of black cumin (*Nigella sativa* L.). *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 4(1), 1-9. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.22077/escs.2011.94>
- Shakeri, S., & Azadi, A. (2022). The effect of land use change on chemical forms and availability of iron and manganese in arid and semi-arid region of southwestern Iran. *Desert*, 27(1), 69-80. <https://doi.org/10.22059/jdesert.2022.88510>
- Shakeri, S., & Saffari, M. (2019). Distribution of zinc and copper chemical forms and their relationship with some physico-chemical properties and clay minerals in some calcareous soils. *Iranian Agricultural Research*, 38(2), 71-82. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.22099/iar.2020.34620.1362>
- Shoormij, F., Mirlohi, A., Saeidi, G., & Shirvani, M. (2022). Combined foliar application of Zn and Fe increases grain micronutrient concentrations and alleviates water stress across diverse wheat species and ploidal levels. *Scientific Reports*, 12, 20328. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24868-1>
- Soltani, A., Gholipoor, M., & Zeinali, E. (2006). Seed reserve utilization and seedling growth of wheat as affected by drought and salinity. *Environmental and Experimental Botany*, 55(1-2), 195-200. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.10.012>
- Sun, L., Wei, Y. Q., Wu, K. H., Yan, J. Y., Xu, J. N., Wu, Y. R., Li, G. X., Xu, J. M., Harberd, N. P., Ding, Z. J., & Zheng, S. J. (2021). Restriction of iron loading into developing seeds by a YABBY transcription factor safeguards successful reproduction in *Arabidopsis*. *Molecular Plant*, 14(10), 1624-1639. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2021.06.005>
- Tahmasebi, R., Sajedi, N. A., & Shoaee, S. (2017). Evaluation effect of different solutions and seed priming treatments on germination, agronomic and quality characteristics of red bean genotypes. *Iranian Journal of Pulses Research*, 8(1), 60-72. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.22067/ijpr.v8i1.26145>
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development* (6th ed.). Sinauer Associates. Sunderland, Massachusetts U.S.A. 761p.
- Toklu, F. (2015). Effects of different priming treatments on seed germination properties, yield components and grain yield of lentil (*Lens culinaris* Medik.). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 43(1), 153-158. <https://doi.org/10.15835/nbha4319832>
- Tsonev, T., & Lidon, F. J. C. (2012). Zinc in plants—An overview. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 24(4), 322-333.
- Umair Hassan, M., Aamer, M., Umer Chattha, M., Haiying, T., Shahzad, B., Barbanti, L., Nawaz, M., Rasheed, A., Afzal, A., Liu, Y., & Guoqin, H. (2020). The critical role of zinc in plants facing the drought stress. *Agriculture*, 10(9), 396. <https://doi.org/10.3390/agriculture10090396>
- Usman, M., Khalid, M. U., Soomro, M. A., Panhwar, S. A., Panhwar, A., Riaz, U., Iqbal, H. M. W., & Haq, I. U. (2023). Unlocking chickpea potential: Zinc and iron foliar treatments for enhanced growth and yield. *Plant Bulletin*, 2(2), 104-111. <https://doi.org/10.55627/pbulletin.002.02.0518>
- Vasilachi, I. C., Stoleru, V., & Gavrilescu, M. (2023). Analysis of heavy metal impacts on cereal crop growth and development in contaminated soils. *Agriculture*, 13(10), 1983. <https://doi.org/10.3390/agriculture13101983>
- Wu, X. L., Liu, M., Li, C. S., McHugh, A. D. J., Li, M., Xiong, T., Liu, Y. B., & Tang, Y. L. (2022). Source-sink relations and responses to sink-source manipulations during grain filling in wheat. *Journal of Integrative Agriculture*, 21(6), 1593-1605. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(21\)63640-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(21)63640-7)

- Yaseen, M., Ahmed, W., & Shahbaz, M. (2013). Role of foliar feeding of micronutrients in yield maximization of cotton in Punjab. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 37(4), 420-429. <https://doi.org/10.3906/tar-1206-56>
- Zhang, J., Wang, S., Song, S., Xu, F., Pan, Y., & Wang, H. (2019). Transcriptomic and proteomic analyses reveal new insight into chlorophyll synthesis and chloroplast structure of maize leaves under zinc deficiency stress. *Journal of Proteomics*, 199, 123-134.