

The effect of application iron and zinc nanooxides on grain yield, chlorophyll fluorescence indices and some physiological traits of three Bean cultivars

Yaghub Panahi¹, Mohammad Sedghi^{2*}, Raouf Seyed Sharifi³, Salim Farzaneh⁴

¹ Ph.D. Student, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, Email: ypanahi56@gmail.com

^{2*} Corresponding author, Professor, Department of Plant Production and Genetics, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, Email: m_sedghi@uma.ac.ir

³ Professor, Department of Plant Production and Genetics, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, Email: rsshari@ yahoo.com

⁴ Professor, Department of Plant Production and Genetics, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, Email: salimfarzaneh@yahoo.com

Article Info

Article type:

Research Full Paper

ABSTRACT

Background and Objectives: Nowadays, the significant increase in population has placed an additional burden on global agricultural resources. Consequently, meeting global food demand and increasing farmers' incomes has become a challenging task. Common bean (*Phaseolus vulgaris*) is among the most important legumes for direct human consumption and are one of the most widely cultivated bean species in the world. Nanotechnology is considered an environmentally friendly approach for providing new solutions to minimize agricultural harm. The use of zinc and iron nanoparticles as a foliar spray treatment can be a promising strategy to mitigate iron deficiency in sandy soils and enhance plant growth, pod yield, and quality in common bean. This study aimed to investigate the effects of foliar application of iron and zinc nanoparticles on seed yield and some agro-physiological traits of three common bean cultivars.

Article history:

Received: 2025-04-18

Accepted: 2025-09-21

Materials and Methods: The experiment was conducted as a split-plot design within a completely randomized block design with three replications in the village of Balasjin, city of Sarab, East Azarbaijan Province during the 2022-2023 agricultural year. The treatments included three common bean cultivars (local Sarab, Talash, and Uzbek) as the main factor and four levels of foliar application (control (water spray as control), iron oxide nanoparticles (at a concentration of one gram per liter), zinc oxide nanoparticles (at a concentration of one gram per liter), and combined application of iron and zinc oxide nanoparticles (at a concentration of one gram per liter)) as the sub-factor.

Results: The results indicated that the effects of the experimental treatments (common bean cultivars and foliar application of iron and zinc nanoparticles) on the evaluated traits were significant. Foliar application of iron and zinc nanoparticles led to increased chlorophyll index, relative water content, stomatal conductance, maximum fluorescence, variable fluorescence, quantum yield, and plant height, number of lateral branches, biological yield, and seed yield, and decreased minimum fluorescence. Furthermore, the Talash cultivar of

Keywords:

Foliar application

Chlorophyll index

Quantum yield

Relative water content

common beans exhibited the highest relative water content, stomatal conductance, maximum fluorescence, variable fluorescence, quantum yield, and seed yield compared to the other two cultivars. Under the conditions of combined foliar application of iron and zinc oxide nanoparticles, the highest values of plant height (79.033 cm), number of lateral branches (7), and biological yield (4134.3 Kg ha⁻¹) were observed in the Talash, local, and Uzbek genotypes, respectively.

Conclusion: The results of this study showed that the application of iron and zinc nanoparticles, by influencing the relative water content and photosynthetic conditions of the Talash cultivar, significantly increased the seed yield of this cultivar compared to the local and Uzbek cultivars.

Cite this article: Panahi, Y., Sedghi, M., Seyed Sharifi, R., Farzaneh, S. 2025. The effect of application iron and zinc nanooxides on grain yield, chlorophyll fluorescence indices and some physiological traits of three Bean cultivars. *Crop Production Journal*, 18 (2), 113-136.



© The Author(s).

DOI: [10.22069/ejcp.2025.23549.2678](https://doi.org/10.22069/ejcp.2025.23549.2678)

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



تاثیر کاربرد نانواکسید آهن و روی بر عملکرد دانه، شاخص های فلورسانس کلروفیل و برخی صفات فیزیولوژیک سه رقم لوبیا چیتی

یعقوب پناهی^۱، محمد صدقی^{۲*}، رئوف سیدشریفی^۳، سلیم فرزانه^۴

^۱ دانشجوی دکتری دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، رایانامه: ypanahi56@gmail.com

^{۲*} نویسنده مسئول، استاد گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، رایانامه: m_sedghi@uma.ac.ir

^۳ استاد گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، رایانامه: rsshari@yaho.com

^۴ استاد گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، رایانامه: salimfarzaneh@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	سابقه و هدف: امروزه، افزایش جمعیت به طور چشمگیری، بار اضافی بر منابع کشاورزی جهانی ایجاد کرده است. در نتیجه، دستیابی به تقاضای جهانی غذا و افزایش درآمد کشاورزان به یک کار چالش برانگیز تبدیل شده است. لوبیاچیتی یکی از مهم ترین حبوبات برای مصرف مستقیم انسان و یکی از پر کشت ترین گونه های لوبیا در جهان است. نانوتکنولوژی یک رویکرد سازگار با محیط زیست برای ارائه راه حل های جدید برای کاهش آسیب رساندن به کشاورزی در نظر گرفته می شود. استفاده از نانو اکسید روی و آهن به عنوان یک تیمار محلول پاشی، می تواند یک استراتژی امیدوارکننده برای کاهش کمبود آهن در خاک ماسه ای و افزایش رشد گیاه، عملکرد نیام و کیفیت نیام در لوبیا باشد. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر محلول پاشی نانواکسید آهن و روی بر عملکرد دانه و برخی صفات آگرو فیزیولوژیک سه رقم لوبیاچیتی اجرا گردید.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۳۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱	
واژه های کلیدی:	مواد و روش ها: آزمایش به صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار در روستای بلامسجین در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ اجرا شد. تیمارهای مورد آزمایش شامل سه رقم لوبیاچیتی (محلی سراب، تلاش و ازبک) به عنوان فاکتور اصلی و چهار سطح محلول پاشی (شاهد (محلول پاشی با آب)، محلول پاشی نانواکسید آهن (با غلظت یک گرم در لیتر)، محلول پاشی نانواکسید روی (با غلظت یک گرم در لیتر) و محلول پاشی توام نانواکسید آهن و روی (با غلظت یک گرم در لیتر) به عنوان فاکتور فرعی بودند.
عملکرد کوانتومی	یافته ها: نتایج نشان داد که تاثیر تیمارهای آزمایشی (ارقام لوبیاچیتی و محلول پاشی نانوذرات اکسید آهن و روی) بر صفات مورد بررسی معنی دار بود. به طوری که محلول پاشی نانوذرات اکسید آهن و روی موجب افزایش شاخص کلروفیل، محتوای نسبی آب، هدایت روزنه ای، فلورسانس حداکثر، فلورسانس متغیر، عملکرد کوانتومی، ارتفاع بوته، تعداد شاخه های فرعی، عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه و کاهش فلورسانس حداقل گردید. همچنین، رقم تلاش لوبیاچیتی، نسبت به دو رقم دیگر از بیش ترین محتوای نسبی آب، هدایت روزنه ای، فلورسانس حداکثر، فلورسانس متغیر، عملکرد کوانتومی و عملکرد دانه برخوردار بود. تحت شرایط

محلول پاشی توام نانواکسید آهن و روی، بیشترین مقدار ارتفاع بوته (۰۳۳/۷۹ سانتی متر)، تعداد شاخه فرعی (۷ عدد) و عملکرد بیولوژیک (۴/۱۳۴ کیلوگرم در هکتار)) نیز به ترتیب در ژنوتیپ‌های تلاش، محلی و ازبک مشاهده شد.

نتیجه‌گیری: نتایج این تحقیق نشان داد که محلول پاشی نانوذرات آهن و روی با تاثیر بر محتوای نسبی آب و شرایط فتوسنتزی رقم تلاش موجب افزایش بیشتر عملکرد دانه این رقم نسبت به ارقام محلی و ازبک شد.

استناد: پناهی، یعقوب؛ صدقی، محمد؛ سیدشریفی، رئوف؛ فرزانه، سلیم. (۱۴۰۴). تاثیر کاربرد نانواکسید آهن و روی بر عملکرد دانه، شاخص‌های فلورسانس کلروفیل و برخی صفات فیزیولوژیک سه رقم لوبیا چیتی. *مجله تولید گیاهان زراعی*، ۱۸ (۲)، ۱۱۳-۱۳۶.



© نویسندگان.

DOI: [10.22069/ejcp.2025.23549.2678](https://doi.org/10.22069/ejcp.2025.23549.2678)
ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

لوبیا یکی از مهم‌ترین حبوبات می‌باشد که قدمتی حدود هشت هزار سال دارد، این گیاه از ارزش غذایی بالایی برخوردار بوده و سرشار از پروتئین می‌باشد. دانه گیاه لوبیا به دلیل قابلیت نگهداری آسان دارای اهمیت بسیار زیادی است. در ایران هر ساله بخش گسترده‌ای از استان‌های آذربایجان شرقی، زنجان، چهارمحال و بختیاری، مرکزی، لرستان و فارس زیر کشت این محصول قرار دارد. طبق آمار وزارت جهاد کشاورزی، سطح زیر کشت لوبیا در ایران ۹۱۷۹۸ هکتار با متوسط عملکرد ۲۳۰۷ کیلو در هکتار بوده است و در استان مرکزی سطح زیرکشت این گیاه ۱۳۴۰۱ هکتار با میانگین عملکرد ۲۷۸۶ کیلوگرم در هکتار که یکی از مناطق اصلی لوبیاکاری کشور محسوب می‌شود (۱)، که در سال‌های اخیر افزایش عملکرد دانه لوبیا با محتوای آهن و روی بالا، به منظور جلوگیری از سوء تغذیه که یکی از جدی‌ترین چالش‌های بهداشتی می‌باشد، مورد توجه قرار گرفته است (۲).

امروزه ثابت شده عناصر ریزمغذی آهن و روی با بهبود فرآیندهای مهم فیزیولوژیک موجب بهبود شرایط فتوسنتزی گیاه و افزایش رشد و عملکرد گیاهان می‌شوند (۳). عنصر آهن (Fe) برای رشد و نمو گیاه ضروری می‌باشد و کمبود آن بسیاری از فعالیت‌های متابولیکی و سلولی گیاه از جمله تنفس، سنتز DNA و کلروفیل را مختل می‌کند. آهن همچنین مسیرهای متابولیکی مختلف را فعال می‌کند و برای سنتز بسیاری از آنزیم‌ها حیاتی می‌باشد (۴). گزارش شده است، استفاده از نانوذرات آهن در بخش کشاورزی به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها مانند نسبت سطح به حجم بالا که به جذب آسان توسط ریشه و برگ گیاهان کمک می‌کند و رهش کنترل‌شده و آزادسازی منظم عنصر، گسترش یافته

است (۴). آقای و همکاران (۲۰۲۲) بیان کردند، محلول‌پاشی نانواکسید آهن، از طریق بهبود شاخص کلروفیل، محتوای نسبی آب و هدایت روزنه‌ای، ضمن بهبود شرایط فتوسنتزی از جمله شاخص‌های فلورسانس کلروفیل و عملکرد کوانتومی، موجب افزایش عملکرد گیاه می‌شود (۵). در بررسی سلیمانی‌فرد و ناصری‌راد (۲۰۲۳) نیز محلول‌پاشی نانوذره آهن موجب بهبود ارتفاع بوته و عملکرد دانه لوبیاجیتی شد (۶).

عنصر ریزمغذی روی نیز نقش حیاتی در رشد و نمو گیاهان ایفا کرده و سهم مهمی در افزایش عملکرد محصولات کشاورزی دارد. بعضی عناصر غذایی کم‌مصرف همانند روی، برای رشد گیاهان ضروری هستند و در فرآیندهای فیزیولوژیکی مختلف از جمله فتوسنتز، تولید هورمون‌های رشد و تشکیل کلروفیل نقش دارند و کمبود آن می‌تواند موجب عدم توازن عناصر غذایی در گیاه و در نهایت کاهش کمیت و کیفیت محصول گردد (۷). با به‌کارگیری نانوکودها به عنوان جایگزین کودهای مرسوم، عناصر غذایی کود به تدریج و به صورت کنترل‌شده در خاک آزاد می‌شوند (۷). عنصر روی نقش اساسی در سنتز RNA، DNA و پروتئین‌ها ایفا می‌کند. کمبود این عنصر می‌تواند موجب عدم توازن عناصر غذایی در گیاه شده و کاهش راندمان مصرف آب و در نهایت کاهش کیفیت و کمیت محصول را در پی داشته باشد (۸). گزارش شده است که محلول‌پاشی نانواکسید روی به دلیل تأثیر مثبت بر شاخص کلروفیل، محتوای نسبی آب، هدایت روزنه‌ای و عملکرد کوانتومی، موجب بهبود فتوسنتز و افزایش تولید مواد فتوسنتزی می‌شود که در چنین شرایطی با طولانی شدن دوره پرشدن دانه، عملکرد دانه نیز افزایش می‌یابد (۹). فتح‌الله‌پور قرانگاه و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند محلول‌پاشی نانوذرات آهن و روی از طریق افزایش محتوای کلروفیل و کاهش مقاومت

روزنه‌ای، ضمن بهبود تولید مواد فتوسنتزی، موجب افزایش عملکرد لوبیاچیتی شد (۱۰). با توجه اهمیت لوبیاچیتی به عنوان یکی از پرکشت‌ترین گونه‌های حبوبات، که به صورت مستقیم مورد استفاده انسان قرار می‌گیرد و اهمیت محلول‌پاشی ریزمغذی‌ها (آهن و روی) به صورت نانوذر در بهبود عملکرد این گیاه زراعی و همچنین کمی بررسی‌های انجام گرفته در این خصوص، موجب شد تا تاثیر کاربرد نانوانواکسید آهن و روی بر عملکرد دانه، شاخص‌های فلورسانس کلروفیل و برخی صفات فیزیولوژیک سه رقم لوبیا چیتی، مورد ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تاثیر کاربرد نانوذرات (نانواکسید آهن و روی) بر عملکرد دانه، شاخص‌های فلورسانس کلروفیل و برخی صفات فیزیولوژیک سه رقم لوبیا چیتی، آزمایشی به صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک کامل تصادفی و در سه تکرار در روستای بلاسجین شهرستان سراب (طول جغرافیایی ۴۷ درجه ۲۷ دقیقه شمالی، عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۵۶ دقیقه شرقی و با ارتفاع ۱۷۰۸ متری از سطح دریا) در

سال ۱۴۰۲-۱۴۰۱ اجرا شد. قبل از انجام آزمایش جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی متری خاک نمونه برداری انجام و به آزمایشگاه منتقل شد که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است.

تیمارهای مورد آزمایش شامل سه رقم لوبیا چیتی (محلی سراب، تلاش و ازبک) به عنوان فاکتور اصلی و محلول‌پاشی نانوذر در چهار سطح (محلول‌پاشی با آب به عنوان شاهد، محلول‌پاشی یک گرم در لیتر نانواکسید روی، محلول‌پاشی یک گرم در لیتر نانواکسید آهن و محلول‌پاشی توام نانواکسید روی و آهن) به عنوان فاکتور فرعی بود. برای اجرای این پژوهش، سه رقم لوبیا چیتی از شرکت بذر فروشان سراب تهیه شد و برای اطمینان از جوانه زنی کافی بذور، قبل از اجرای کشت آزمون جوانه زنی بذر انجام و سپس در روستای بلاسجین در پنج کیلومتری غرب شهرستان سراب کاشته شد. نانواکسید روی و آهن تولید کشور چین بودند که از موسسه تجهیزات آزمایشگاهی و شیمیایی جهان کیمیا ارومیه تهیه شد و مشخصات آن در جدول ۲ درج شده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه

Table 1. Physical and chemical particular of farm soil

مشخصه Characteristic	درصد مواد خثی شونده	درصد کربن آلی Organic C	فسفر P	روی Zn	پتاسیم K	pH
	درصد (%)		پی پی ام (ppm)			
مقادیر Amount	2.5	-	14.6	1.36	480	
مشخصه Characteristic	عمق Depth (cm)	هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	7.77
			درصد (%)			
مقادیر Amount	0-30	1.85	40	42	18	

جدول ۲- مشخصات نانواکسید روی و آهن
Table 2. Characteristics of nano-zinc and iron oxides

نانوذرات Nanoparticles	رنگ Color	خلوص Purity (%)	میانگین اندازه ذرات Average particle size (nm)	سطح ویژه ذرات surface of particles specific (m ² /gr)
نانواکسید روی Nano zinc oxide	پودری سفید White powder	99	< 30	> 30
نانواکسید آهن Nano Iron Oxide	پودری قرمز Red powder	99	20-30	> 30

F_v/F_m (حداکثر عملکرد کوانتومی فتوسیستم دو در شرایط سازگار شده با تاریکی) بود، که توسط دستگاه فلورسانس کلروفیل (OS-30p) اندازه‌گیری شد. برای این منظور از هر واحد آزمایشی به‌طور تصادفی سه برگ توسعه یافته انتخاب و بعد از ۲۰ دقیقه تاریکی توسط کلیپس‌های مخصوص، شاخص‌های فلورسانس اندازه‌گیری شد (۱۱). شاخص کلروفیل برگ با استفاده از دستگاه کلروفیل متر (SPAD-۵۰۲ مینولتای ژاپن) اندازه‌گیری شد.

برای تعیین محتوای نسبی آب برگ از هر واحد آزمایشی چهار برگ توسعه یافته به‌طور تصادفی انتخاب و بلافاصله درون یخدان قرار گرفته و به آزمایشگاه منتقل شدند، سپس به قطعات دو سانتی متری تقسیم و با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن تر آن‌ها تعیین شدند (FW). سپس این قطعات به‌منظور تعیین وزن تورژسانس به مدت ۲۴ ساعت در شدت نور کم در داخل آب مقطر قرار داده و وزن اشباع آن‌ها اندازه‌گیری شد (TW). در نهایت این برگ‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد در آون نگهداری و سپس وزن خشک آن‌ها تعیین شد (DW). درصد رطوبت نسبی برگ با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (۱۲).

$$RWC = (FW-DW)/(TW-DW) \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه RWC محتوای نسبی آب برگ، FW وزن تر، DW وزن خشک و TW وزن برگ به حالت

محلول‌پاشی نانواکسید روی و آهن به میزان یک گرم در لیتر بود و طی یک نوبت در مرحله رشدی قبل از گلدهی اعمال شد. زمان محلول‌پاشی، ساعت ۸-۱۰ قبل از ظهر بود و محلول‌پاشی طوری انجام می‌شد که تمام قسمت‌های هوایی بوته‌های موجود در کرت‌های آزمایشی به‌طور کامل مرطوب شود. ابتدا عملیات آماده‌سازی زمین از جمله آبیاری قبل از شخم، دیسک، عملیات تسطیح زمین، آماده‌سازی کرت‌ها و نمونه‌برداری از خاک انجام گرفت و سپس عملیات کشت در ۱۰ اردیبهشت سال ۱۴۰۱ انجام گرفت. مساحت هر کرت ۴×۲ متر و کشت با دست و به‌صورت ردیفی و فاصله ردیف‌ها ۲۵ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها در روی ردیف کشت پنج سانتی‌متر در نظر گرفته شد و آبیاری مزرعه طبق عرف منطقه هر شش روز یکبار انجام شد. در طول دوره فصل رشد وجین علف‌های هرز به‌صورت مکانیکی انجام شد. بررسی صفات فیزیولوژیک مانند شاخص کلروفیل، محتوای نسبی آب، هدایت روزنه‌ای، فلورسانس کلروفیل (فلورسانس متغیر و فلورسانس حداکثر) و عملکرد کوانتومی برگ در دو هفته بعد از محلول‌پاشی در مرحله گلدهی اندازه‌گیری شد. پارامترهای فلورسانس کلروفیل برگ شامل F_0 (حداقل فلورسانس از برگ سازگار شده با تاریکی)، F_m (حداکثر فلورسانس در برگ سازگار شده با تاریکی)، F_v (فلورسانس متغیر از برگ سازگار شده با تاریکی)،

تورم است. هدایت روزنه‌ای برگ، بر روی چهار برگ توسعه یافته از هر تیمار توسط دستگاه پرومتر (Porometer AP4, Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK) اندازه‌گیری شد. در انتهای فصل رشد و پس از رسیدگی کامل مزرعه (۱۵ شهریور ماه) از هر واحد آزمایشی به‌صورت تصادفی ۱۰ بوته برداشت شد و ارتفاع بوته و تعداد شاخه‌های فرعی مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین مساحت دو متر مربع از هر واحد آزمایشی برای محاسبه عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه برداشت شد.

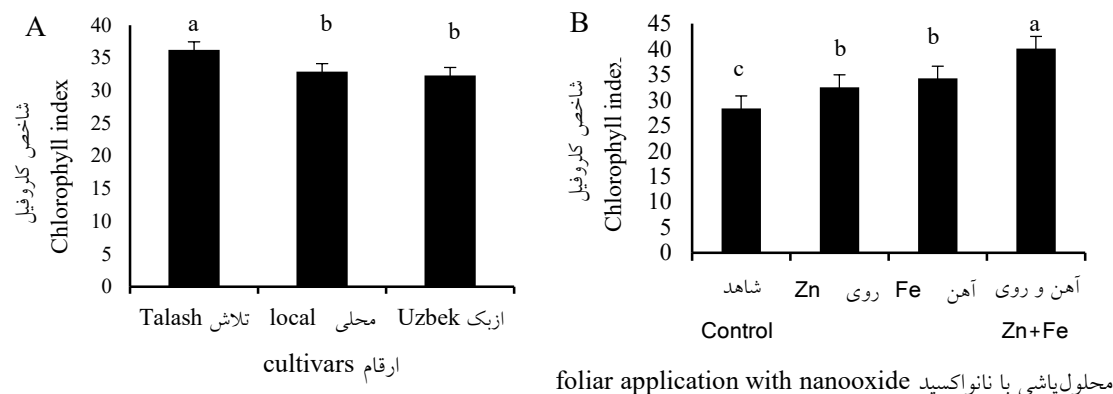
داده‌های حاصل از آزمایش پس از بررسی نرمال بودن، با استفاده از نرم‌افزارهای SAS و SPSS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و مقایسه میانگین‌های آماری داده‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام و جهت ترسیم نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده شد. برش‌دهی مقایسه برای برهم‌کنش با دستور Slice در برنامه SAS انجام گرفت.

نتایج و بحث

شاخص کلروفیل برگ (SPAD): نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که تاثیر تیمارهای ارقام لوبیاچیتی (تلاش، محلی سراب و ازبک) و محلول‌پاشی نانوذرات (نانواکسید آهن و روی) بر شاخص کلروفیل برگ در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود. براساس نتایج، در بین ارقام لوبیاچیتی (تلاش، محلی سراب و ازبک) مورد مطالعه، رقم تلاش از بیش‌ترین (۳۶/۲۱۷) مقدار شاخص کلروفیل برگ برخوردار بود، که در مقابل آن ارقام محلی سراب و ازبک به‌ترتیب ۳۲/۸۵۸ و ۳۲/۲۹۲ دارای کم‌ترین مقدار شاخص کلروفیل برگ بودند (شکل ۱ا). با این حال، ارقام محلی سراب و ازبک از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری باهم نداشتند (شکل ۱ا). محلول‌پاشی توام نانواکسید آهن و روی سبب افزایش

معنی‌دار شاخص کلروفیل برگ در ارقام لوبیاچیتی شد. در این شرایط اگرچه محلول‌پاشی نانواکسید آهن و روی به‌تنهایی موجب افزایش معنی‌دار شاخص کلروفیل برگ گردید، اما محلول‌پاشی توام این دو نانوذره (نانواکسید آهن + نانواکسید روی)، موجب شد تا شاخص کلروفیل برگ‌های ارقام لوبیاچیتی افزایش بیشتری داشته باشند، که این امر نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی محلول‌پاشی توام نانواکسید آهن و روی می‌باشد، به‌طوری که بیش‌ترین شاخص کلروفیل برگ (۴۰/۰۶۷) در محلول‌پاشی یک گرم در لیتر نانواکسید آهن و یک گرم در لیتر نانواکسید روی به‌دست آمد، که به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار شاهد و تیمارهای محلول‌پاشی جداگانه نانواکسید آهن و روی بود (شکل ۱ب). کمبود آهن می‌تواند اثرات نامطلوبی بر گیاهان گذاشته و با کاهش محتوای کلروفیل، موجب محدود شدن ظرفیت فتوسنتزی گیاه شود (۱۳). گزارش شده است، محتوای کلروفیل گیاهان به در دسترس بودن مداوم آهن بستگی دارد و با توجه به اینکه عنصر آهن در ساختار کلروفیل نقش مستقیمی دارد، وجود آهن کافی موجب بهبود کلروفیل‌سازی گیاه می‌گردد و وضعیت گیاه می‌تواند میزان فتوسنتز تاثیر بگذارد (۱۴). از آنجایی که عنصر آهن نقش اساسی در متابولیسم کلروفیل دارد، حضور این عنصر در بافت‌های برگ می‌تواند در تشکیل رنگدانه‌های فتوسنتزی مهم باشد (۱۵). عناصر ریزمغذی از جمله آهن و روی، آنزیم‌های دخیل در سنتز کلروفیل مانند کربونیک دهیدروژناز، تریپتوفان سنتتاز و غیره را فعال کرده و محلول‌پاشی آن‌ها موجب افزایش انواع کلروفیل می‌شود (۱۶). اگرچه روی به‌طور مستقیم بر سنتز و بهبود محتوای کلروفیل موثر نیست، اما بر غلظت عناصر غذایی درگیر در تشکیل کلروفیل با عناصری مانند آهن و منیزیم، که قسمتی از مولکول کلروفیل محسوب می‌شوند، موثر است (۱۷).

همچنین، عنصر روی در راه‌اندازی برخی از آنزیم‌های مسیر بیوسنتز کلروفیل و نیز برخی از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند آسکوربات پراکسیداز و گلوکاتایون ردوکتاز در مسیر حفاظت از تخریب کلروفیل توسط رادیکال‌های فعال اکسیژن نقش اساسی دارد (۱۸).



شکل ۱- مقایسه اثر ساده ارقام (A) و محلول‌پاشی (B) بر شاخص کلروفیل (SPAD) در لوبیا
حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج است.

Figure 1. Mean comparison of the simple effects of cultivars (A) and foliar application (B) on Chlorophyll index (SPAD) in Bean.

The different letters in each column indicate significant differences at 5% probability level.

جدول ۲- تجزیه واریانس تأثیر ارقام و محلول‌پاشی بر صفات مورد مطالعه در لوبیا

Tabel 2. Analysis of variance for the effect of cultivars and foliar application on studied traits in Bean

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean Square					
		شاخص کلروفیل Chlorophyll index	محتوای نسبی آب برگ Leaf relative water content	هدایت روزنه‌ای stomatal conductivity	عملکرد کوانتومی Quantum yield	ارتفاع بوته Plant height	تعداد ساقه فرعی Number of branches
تکرار Replication	2	72.850**	29.504 ^{ns}	73.211**	0.01090344*	614.931**	23.202**
رقم (C) Cultivar	2	54.010*	609.459**	8.493 ^{ns}	0.03935436**	176.583*	3.522**
خطای اصلی Error a	4	2.019	4.762	2.337	0.00065761	7.417	0.599
محلول‌پاشی (F) Foliar application	3	212.256**	1143.092**	89.483**	0.13141366**	487.588**	6.072**
C×F	6	8.482 ^{ns}	81.180*	11.300*	0.00705110*	113.155*	0.416*
F× R	6	2.589 ^{ns}	19.889 ^{ns}	7.309 ^{ns}	0.00268430 ^{ns}	27.568 ^{ns}	1.257**
خطای فرعی Error b	12	8.243	25.333	3.468	0.00232091	34.571	0.135
ضریب تغییرات CV(%)		8.497	7.328	7.309	7.081	9.035	6.477

^{ns} و * به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱

^{ns} and ** indicating not significant, the significant differences at 5 and 1 percent probability levels.

ادامه جدول ۳- تجزیه واریانس تاثیر ارقام و محلول پاشی بر صفات مورد مورد مطالعه در لوبیا

Continued Table 3. Analysis of variance for the effect of cultivars and foliar application on studied traits in Bean

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean Square				
		عملکرد بیولوژیکی Biological yield	عملکرد دانه Seed yield	فلورسانس حداکثر Maximum fluorescence	فلورسانس متغیر fluorescence Variable	فلورسانس حداقل Minimum fluorescence
تکرار Replication	2	786543.528**	108016.08 ^{ns}	11896.02*	20898.68**	1557.45 ^{ns}
رقم (C) Cultivar	2	43300.361 ^{ns}	216423.58*	36914.52**	65897.68**	5373.34**
خطای اصلی Error a	4	9401.236	5904.29	1481.78	1445.28	259.88
محلول پاشی (F) Foliar application	3	1332310.102**	551733.88**	81055.58**	199219.09**	27262.46**
C×F	6	180013.213*	117206.98*	5048.75*	8715.62*	3217.64**
F× R	6	40892.269 ^{ns}	37320.71 ^{ns}	1030.13 ^{ns}	3006.01 ^{ns}	842.04 ^{ns}
خطای فرعی Error b	12	46440.255	35378.86	1788.39	2911.22	642.86
ضریب تغییرات CV (%)		6.041	10.412	6.011	10.982	11.946

ns و ** به ترتیب غیر معنی دار و معنی دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱

ns and ** indicating not significant, the significant differences at 5 and 1 percent probability levels.

توام نانواکسید آهن و روی می باشد، به طوری که بیش ترین محتوای نسبی آب برگ (۸۷/۳۶۷ درصد) در محلول پاشی توام نانواکسید آهن و روی رقم تلاش به دست آمد، که در مقابل آن ارقام محلی سراب و ازبک به ترتیب ۷۷/۷ و ۷۷/۴۶۷ درصد دارای کم ترین محتوای نسبی آب برگ نسبت به رقم تلاش بودند. با این حال، ارقام محلی سراب و ازبک از لحاظ آماری تفاوت معنی داری باهم نداشتند (جدول ۴ و ۵). همچنین، کم ترین محتوای نسبی آب برگ (۵۴/۶۳۳ درصد) در محلول پاشی با نانواکسید روی و رقم ازبک مشاهده شد (جدول ۴). بالا بودن محتوای نسبی آب برگ در رقم تلاش می تواند به علت کاهش اتلاف آب از طریق بستن روزنه ها، جذب بیشتر آب از طریق گسترش ریشه ها و یا تنظیم اسمزی از طریق تولید

محتوای نسبی آب برگ: نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که تاثیر تیمارهای ارقام لوبیاچیتی (تلاش، محلی سراب و ازبک) و محلول پاشی (نانواکسید آهن و روی) و تاثیر برهم کنش توام آنها روی محتوای نسبی آب برگ معنی دار بود. طبق برش دهی اثر ارقام در هر سطح محلول پاشی (محلول پاشی با آب، نانواکسید آهن، نانواکسید روی و نانواکسید آهن + نانواکسید روی) و اثر محلول پاشی در هر سه سطح ارقام (تلاش، محلی و ازبک) بر محتوای نسبی آب برگ معنی دار بود (جدول ۴ و ۵). براساس نتایج، محلول پاشی توام نانوذرات (نانواکسید آهن + نانواکسید روی)، موجب شد تا محتوای نسبی آب برگ های ارقام لوبیاچیتی افزایش بیشتری داشته باشند، که این امر نشان دهنده اثر هم افزایی محلول پاشی

اسمولیت‌هایی مانند گلیسین بتائین، پرولین و قندهای محلول باشد (۱۹). در این راستا دولا و همکاران (۲۰۲۲) اظهار داشتند که شرایط نامساعد محیطی موجب کاهش محتوای نسبی آب در سویا می‌شود که محلول‌پاشی نانوذرات آهن (۲۰۰ پی پی ام) با بهبود سنتز اسمولیت‌ها، وضعیت آبی گیاهان را در چنین شرایطی را بهبود بخشیده و موجب افزایش محتوای نسبی آب می‌شود (۲۰). عنصر روی نیز نقش مهمی در تنظیم میزان باز بودن روزنه‌ها دارد، به این دلیل که این عنصر در نگهداری عنصر پتاسیم در سلول‌های محافظ روزنه نقش دارد و از طریق کاهش تلفات آب برگ موجب افزایش محتوای نسبی آب برگ می‌شود (۲۱). همچنین، با توجه به نقش مستقیم عنصر آهن

در ساختار کلروفیل، وجود کافی این عنصر موجب بهبود کلروفیل‌سازی در گیاه می‌شود که با تأثیر بر فتوسنتز و افزایش تولید مواد فتوسنتزی، محتوای اسمولیت‌های سازگار را در گیاه افزایش می‌دهد که با بهبود وضعیت آبی گیاه و محافظت از ساختار غشاء، موجب بهبود محتوای نسبی آب می‌شود (۱۴). در این راستا زمانی و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که محلول‌پاشی آهن از طریق جلوگیری از تخریب غشاء و بهبود محتوای کلروفیل (جدول ۴) و افزایش تولید مواد فتوسنتزی از جمله کربوهیدرات‌های محلول، موجب تنظیم اسمزی و جذب بیشتر آب در بافت‌های گیاهی و بهبود محتوای نسبی آب می‌شود (۲۲).

جدول ۴- مقایسه میانگین برهمکنش ارقام و محلول‌پاشی روی صفات مطالعه شده در لویا (برش ارقام در هر سطح محلول‌پاشی)
Table 4. Mean comparison for the interaction effect of cultivars and foliar application on studied traits in Bean (Cutting of cultivars at each foliar spray level).

تعداد شاخه فرعی (عدد) Number of branching			
رقم ازبک Uzbek cultivar	رقم محلی local cultivar	رقم تلاش Talash cultivar	تیمار محلول‌پاشی (گرم در لیتر) Foliar treatment (g/l)
4.400b	4.000b	5.267a	محلول‌پاشی با آب Foliar application with water
5.500b	4.933c	6.700a	محلول‌پاشی با نانواکسید روی Foliar application with nano Zn oxide
5.700ab	5.767a	5.633b	محلول‌پاشی با نانواکسید آهن Foliar application with nano Fe oxide
6.800b	6.067ab	7.000a	محلول‌پاشی توام نانواکسید آهن و روی Combined foliar application with nano oxide Zn and Fe
محتوای نسبی آب برگ (درصد) Leaf relative water content			
رقم ازبک Uzbek cultivar	رقم محلی local cultivar	رقم تلاش Talash cultivar	تیمار محلول‌پاشی (گرم در لیتر) Foliar treatment (g/l)
49.533c	53.100b	61.300a	محلول‌پاشی با آب Foliar application with water
54.633c	66.800b	71.967a	محلول‌پاشی با نانواکسید روی Foliar application with nano Zn oxide
63.267c	74.633b	84.233a	محلول‌پاشی با نانواکسید آهن Foliar application with nano Fe oxide
77.467bc	77.700b	87.367a	محلول‌پاشی توام نانواکسید آهن و روی Combined foliar application with nano oxide Zn and Fe
هدایت روزنه‌ای ($\mu\text{MH}_2\text{Om}^{-2}\text{S}^{-1}$) Stomatal conductivity			
رقم ازبک Uzbek cultivar	رقم محلی local cultivar	رقم تلاش Talash cultivar	تیمار محلول‌پاشی (گرم در لیتر) Foliar treatment (g/l)
21.867b	21.667bc	24.300a	محلول‌پاشی با آب

Foliar application with water محلول پاشی با نانواکسید روی	27.267a	23.100b	22.500bc
Foliar application with nano Zn oxide محلول پاشی با نانواکسید آهن	25.567b	26.533a	26.067ab
Foliar application with nano Fe oxide محلول پاشی توام نانواکسید آهن و روی	29.500a	27.567b	26.367bc
Combined foliar application with nano oxide Zn and Fe			

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح احتمال پنج درصد است.

The different letters in each column indicate significant differences at 5% probability level.

ادامه جدول ۴- مقایسه میانگین برهمکنش ارقام و محلول پاشی روی صفات مطالعه شده در لوبیا (برش ارقام در هر سطح محلول پاشی)

Table 4. Continued- Mean comparison for the interaction effect of cultivars and foliar application on studied traits in Bean (Cutting of cultivars at each foliar spray level).

عملکرد کوانتومی Quantum yield			
رقم ازبک Uzbek cultivar	رقم محلی local cultivar	رقم تلاش Talash cultivar	تیمار محلول پاشی (گرم در لیتر) Foliar treatment (g/l)
0.517ab	0.529b	0.570a	محلول پاشی با آب Foliar application with water
0.555c	0.735a	0.649b	محلول پاشی با نانواکسید روی Foliar application with nano Zn oxide
0.598b	0.734ab	0.791a	محلول پاشی با نانواکسید آهن Foliar application with nano Fe oxide
0.788b	0.834ab	0.864a	محلول پاشی توام نانواکسید آهن و روی Combined foliar application with nano oxide Zn and Fe
فلورسانس حداکثر Maximum fluorescence			
رقم ازبک Uzbek cultivar	رقم محلی local cultivar	رقم تلاش Talash cultivar	تیمار محلول پاشی (گرم در لیتر) Foliar treatment (g/l)
542.33b	549.00b	681.67a	محلول پاشی با آب Foliar application with water
625.00b	728.00ab	738.33a	محلول پاشی با نانواکسید روی Foliar application with nano Zn oxide
685.00c	756.67b	797.00a	محلول پاشی با نانواکسید آهن Foliar application with nano Fe oxide
783.33c	813.00b	828.00a	محلول پاشی توام نانواکسید آهن و روی Combined foliar application with nano oxide Zn and Fe
فلورسانس متغیر fluorescence Variable			
رقم ازبک Uzbek cultivar	رقم محلی local cultivar	رقم تلاش Talash cultivar	تیمار محلول پاشی (گرم در لیتر) Foliar treatment (g/l)
282.06bc	290.74b	389.71a	محلول پاشی با آب Foliar application with water
323.11c	536.79a	460.13b	محلول پاشی با نانواکسید روی Foliar application with nano Zn oxide
405.83c	560.39b	626.60a	محلول پاشی با نانواکسید آهن Foliar application with nano Fe oxide
620.23bc	679.10b	720.76a	محلول پاشی توام نانواکسید آهن و روی Combined foliar application with nano oxide Zn and Fe

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح احتمال پنج درصد است.

The different letters in each column indicate significant differences at 5% probability level.

تأثیر کاربرد نانواکسید آهن و روی بر عملکرد دانه، شاخص‌های... / یعقوب پناهی و همکاران

ادامه جدول ۴- مقایسه میانگین برهمکنش ارقام و محلول‌پاشی روی صفات مطالعه شده در لوبیا (برش ارقام در هر سطح (محلول‌پاشی))
Continued Table 4. Mean comparison for the interaction effect of cultivars and foliar application on studied traits in Bean (Cutting of cultivars at each foliar spray level).

فلورسانس حداقل Minimum fluorescence			
رقم ازبک Uzbek cultivar	رقم محلی local cultivar	رقم تلاش Talash cultivar	تیمار محلول‌پاشی (گرم در لیتر) Foliar treatment (g/l)
256.94b	258.26b	291.95a	محلول‌پاشی با آب Foliar application with water
255.23a	191.21c	248.20b	محلول‌پاشی با نانواکسید روی Foliar application with nano Zn oxide
265.83a	200.94b	163.73c	محلول‌پاشی با نانواکسید آهن Foliar application with nano Fe oxide
166.77a	133.90b	113.91c	محلول‌پاشی توام نانواکسید آهن و روی Combined foliar application with nano oxide Zn and Fe
ارتفاع بوته (سانتی‌متر) Plant height			
رقم ازبک Uzbek cultivar	رقم محلی local cultivar	رقم تلاش Talash cultivar	تیمار محلول‌پاشی (گرم در لیتر) Foliar treatment (g/l)
56.667a	55.133b	56.467ab	محلول‌پاشی با آب Foliar application with water
61.733bc	65.067b	73.200a	محلول‌پاشی با نانواکسید روی Foliar application with nano Zn oxide
63.167b	67.600a	62.267bc	محلول‌پاشی با نانواکسید آهن Foliar application with nano Fe oxide
61.067c	79.833a	79.033b	محلول‌پاشی توام نانواکسید آهن و روی Combined foliar application with nano oxide Zn and Fe
عملکرد بیولوژیکی (کیلوگرم در هکتار) Biological yield			
رقم ازبک Uzbek cultivar	رقم محلی local cultivar	رقم تلاش Talash cultivar	تیمار محلول‌پاشی (گرم در لیتر) Foliar treatment (g/l)
3007.0c	3227.7a	3126.0b	محلول‌پاشی با آب Foliar application with water
3517.3b	3281.7c	3892.3a	محلول‌پاشی با نانواکسید روی Foliar application with nano Zn oxide
3506.7b	3817.7a	3254.7c	محلول‌پاشی با نانواکسید آهن Foliar application with nano Fe oxide
3961.7b	4083.3ab	4134.3a	محلول‌پاشی توام نانواکسید آهن و روی Combined foliar application with nano oxide Zn and Fe
عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) Seed yield			
رقم ازبک Uzbek cultivar	رقم محلی local cultivar	رقم تلاش Talash cultivar	تیمار محلول‌پاشی (گرم در لیتر) Foliar treatment (g/l)
1459.0b	1500.3ab	1523.7a	محلول‌پاشی با آب Foliar application with water
1581.3c	1941.3a	1856.7b	محلول‌پاشی با نانواکسید روی Foliar application with nano Zn oxide
1682.0c	1754.3b	2282.3a	محلول‌پاشی با نانواکسید آهن Foliar application with nano Fe oxide
2098b	1913.3c	2193.3a	محلول‌پاشی توام نانواکسید آهن و روی Combined foliar application with nano oxide Zn and Fe

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد است.

The different letters in each column indicate significant differences at 5% probability level.

جدول ۵- مقایسه میانگین برهمکنش ارقام و محلول پاشی روی صفات مطالعه شده در لوبیا (برش محلول پاشی در هر سطح ارقام)

Table 5- Mean comparison for the interaction effect of cultivars and foliar application on studied traits in Bean (Foliar spray cutting at each level of the cultivars)

تعداد شاخه فرعی (عدد) Number of branching				
ارقام Cultivars	محلول پاشی با آب Foliar application with water	محلول پاشی با نانواکسید روی (گرم در لیتر) Foliar application with nano Zn oxide	محلول پاشی با نانواکسید آهن (گرم در لیتر) Foliar application with nano Fe oxide	محلول پاشی توام نانواکسید آهن و روی (گرم در لیتر) Combined foliar application with nano oxide Zn and Fe
Talash تلاش	5.267c	6.700b	5.633bc	7.000a
local محلی	4.000cd	4.933c	5.767b	6.067a
Uzbek ازبک	4.400c	5.500bc	5.700b	6.800a
محتوای نسبی آب برگ (درصد) Leaf relative water content				
ارقام Cultivars	محلول پاشی با آب Foliar application with water	محلول پاشی با نانواکسید روی (گرم در لیتر) Foliar application with nano Zn oxide	محلول پاشی با نانواکسید آهن (گرم در لیتر) Foliar application with nano Fe oxide	محلول پاشی توام نانواکسید آهن و روی (گرم در لیتر) Combined foliar application with nano oxide Zn and Fe
Talash تلاش	61.300d	71.967c	84.233b	87.367a
local محلی	53.100d	66.800c	74.633b	77.700a
Uzbek ازبک	49.533d	54.633c	63.267b	77.467a
هدایت روزنه‌ای ($\mu\text{MH}_2\text{O m}^{-2}\text{S}^{-1}$) Stomatal conductivity				
ارقام Cultivars	محلول پاشی با آب Foliar application with water	محلول پاشی با نانواکسید روی (گرم در لیتر) Foliar application with nano Zn oxide	محلول پاشی با نانواکسید آهن (گرم در لیتر) Foliar application with nano Fe oxide	محلول پاشی توام نانواکسید آهن و روی (گرم در لیتر) Combined foliar application with nano oxide Zn and Fe
Talash تلاش	24.300d	27.267b	25.567c	29.500a
local محلی	21.667d	23.100c	26.533b	27.567a
Uzbek ازبک	21.867c	22.500b	26.067ab	26.367a
عملکرد کوانتومی Quantum yield				
ارقام Cultivars	محلول پاشی با آب Foliar application with water	محلول پاشی با نانواکسید روی (گرم در لیتر) Foliar application with nano Zn oxide	محلول پاشی با نانواکسید آهن (گرم در لیتر) Foliar application with nano Fe oxide	محلول پاشی توام نانواکسید آهن و روی (گرم در لیتر) Combined foliar application with nano oxide Zn and Fe
Talash تلاش	0.570d	0.649c	0.791b	0.864a
local محلی	0.529c	0.735b	0.734b	0.834a
Uzbek ازبک	0.517c	0.555bc	0.598b	0.788a
فلورسانس حداکثر Maximum fluorescence				
ارقام Cultivars	محلول پاشی با آب Foliar application with water	محلول پاشی با نانواکسید روی (گرم در لیتر) Foliar application with nano Zn oxide	محلول پاشی با نانواکسید آهن (گرم در لیتر) Foliar application with nano Fe oxide	محلول پاشی توام نانواکسید آهن و روی (گرم در لیتر) Combined foliar application with nano oxide Zn and Fe
Talash تلاش	681.67d	738.33c	797.00b	828.00a
local محلی	549.00c	728.00bc	756.67b	813.00a
Uzbek ازبک	542.33d	625.00c	685.00b	783.33a

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد است..

The different letters in each column indicate significant differences at 5% probability level.

تأثیر کاربرد نانواکسید آهن و روی بر عملکرد دانه، شاخص‌های... / یعقوب پناهی و همکاران

ادامه جدول ۵- مقایسه میانگین برهمکنش ارقام و محلول‌پاشی روی صفات مطالعه شده در لوبیا (برش محلول‌پاشی در هر سطح ارقام)

Table 5 Continued- Mean comparison for the interaction effect of cultivars and foliar application on studied traits in Bean (Foliar spray cutting at each level of the cultivars)

fluorescence Variable فلورسانس متغیر				
ارقام Cultivars	محلول‌پاشی با آب Foliar application with water	محلول‌پاشی با نانواکسید روی (گرم در لیتر) Foliar application with nano Zn oxide	محلول‌پاشی با نانواکسید آهن (گرم در لیتر) Foliar application with nano Fe oxide	محلول‌پاشی توام نانواکسید آهن و روی (گرم در لیتر) Combined foliar application with nano oxide Zn and Fe
Talash تلاش	389.71d	460.13c	626.60b	720.76a
local محلی	290.74d	536.79c	560.39b	679.10a
Uzbek ازبک	282.06d	323.11c	405.83b	620.23a
Minimum fluorescence فلورسانس حداقل				
ارقام Cultivars	محلول‌پاشی با آب Foliar application with water	محلول‌پاشی با نانواکسید روی (گرم در لیتر) Foliar application with nano Zn oxide	محلول‌پاشی با نانواکسید آهن (گرم در لیتر) Foliar application with nano Fe oxide	محلول‌پاشی توام نانواکسید آهن و روی (گرم در لیتر) Combined foliar application with nano oxide Zn and Fe
Talash تلاش	291.95a	248.20b	163.73c	113.91d
local محلی	258.26a	191.21c	200.94b	133.90d
Uzbek ازبک	256.94ab	255.23b	265.83a	166.77c
Plant height ارتفاع بوته (سانتی‌متر)				
ارقام Cultivars	محلول‌پاشی با آب Foliar application with water	محلول‌پاشی با نانواکسید روی (گرم در لیتر) Foliar application with nano Zn oxide	محلول‌پاشی با نانواکسید آهن (گرم در لیتر) Foliar application with nano Fe oxide	محلول‌پاشی توام نانواکسید آهن و روی (گرم در لیتر) Combined foliar application with nano oxide Zn and Fe
Talash تلاش	56.467d	73.200c	62.267b	79.033a
local محلی	55.133d	65.067c	67.600b	79.833a
Uzbek ازبک	56.667d	61.733c	63.167b	61.067a
Biological yield عملکرد بیولوژیکی (کیلوگرم در هکتار)				
ارقام Cultivars	محلول‌پاشی با آب Foliar application with water	محلول‌پاشی با نانواکسید روی (گرم در لیتر) Foliar application with nano Zn oxide	محلول‌پاشی با نانواکسید آهن (گرم در لیتر) Foliar application with nano Fe oxide	محلول‌پاشی توام نانواکسید آهن و روی (گرم در لیتر) Combined foliar application with nano oxide Zn and Fe
Talash تلاش	3126.0d	3892.3b	3254.7c	4134.3a
local محلی	3227.7c	3281.7c	3817.7b	4083.3a
Uzbek ازبک	3007.0c	3517.3b	3506.7b	3961.7a
Seed yield عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)				
ارقام Cultivars	محلول‌پاشی با آب Foliar application with water	محلول‌پاشی با نانواکسید روی (گرم در لیتر) Foliar application with nano Zn oxide	محلول‌پاشی با نانواکسید آهن (گرم در لیتر) Foliar application with nano Fe oxide	محلول‌پاشی توام نانواکسید آهن و روی (گرم در لیتر) Combined foliar application with nano oxide Zn and Fe
Talash تلاش	1523.7d	1856.7c	2282.3a	2193.3b
local محلی	1500.3c	1941.3a	1754.3b	1913.3ab
Uzbek ازبک	1459.0d	1581.3c	1682.0b	2098a

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد است..

The different letters in each column indicate significant differences at 5% probability level.

هدایت روزنه‌ای برگ: نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که تاثیر تیمار محلول‌پاشی (نانواکسید آهن و روی) و تاثیر برهم‌کنش توام ارقام لوبیاجیتی $\times$ محلول‌پاشی نانوذرات روی هدایت روزنه‌ای معنی‌دار بود. طبق برش‌دهی اثر ارقام در هر سطح محلول‌پاشی (محلول‌پاشی با آب، نانوآکسید آهن، نانوآکسید روی و نانوآکسید آهن + نانوآکسید روی) و اثر محلول‌پاشی در هر سه سطح ارقام (تلاش، محلی و ازبک) بر هدایت روزنه‌ای معنی‌دار بود (جدول ۴ و ۵). براساس نتایج، محلول‌پاشی توام نانوآکسید آهن و روی سبب افزایش معنی‌دار هدایت روزنه‌ای برگ در ارقام لوبیاجیتی شد. در این شرایط اگرچه محلول‌پاشی نانوآکسید آهن و روی به‌تنهایی موجب افزایش معنی‌دار هدایت روزنه‌ای برگ گردید، اما محلول‌پاشی توام این دو نانوذر (نانوآکسید آهن + نانوآکسید روی)، موجب شد تا هدایت روزنه‌ای برگ‌های ارقام لوبیاجیتی افزایش بیشتری داشته باشند، که این امر نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی محلول‌پاشی توام نانوآکسید آهن و روی می‌باشد، به‌طوری که بیش‌ترین هدایت روزنه‌ای برگ $(29/500 \mu\text{MH}_2\text{Om}^{-2}\text{S}^{-1})$ در محلول‌پاشی توام نانوآکسید آهن و روی رقم تلاش به‌دست آمد، که در مقابل آن ارقام محلی سراب و ازبک به‌ترتیب $27/567 \mu\text{MH}_2\text{Om}^{-2}\text{S}^{-1}$ و $26/367 \mu\text{MH}_2\text{Om}^{-2}\text{S}^{-1}$ دارای کم‌ترین هدایت روزنه‌ای برگ نسبت به رقم تلاش بودند (جدول ۳) و کمترین هدایت روزنه‌ای $(21/667 \mu\text{MH}_2\text{Om}^{-2}\text{S}^{-1})$ در شاهد (عدم محلول‌پاشی) و رقم محلی به‌دست آمد که تفاوت چندانی با رقم ازبک در شاهد (بدون محلول‌پاشی) نداشت (جدول ۴ و ۵). عنصر روی با حفظ پتاسیم در سلول‌های نگهبان روزنه و همچنین بهبود محتوای کلروفیل و کارایی فتوسیستم II، موجب افزایش هدایت روزنه‌ای و ظرفیت فتوسنتزی گیاه می‌شود (۲۳). در این راستا محمدزاده و همکاران (۲۰۲۳)

اظهار داشتند که محلول‌پاشی نانوآکسید روی از طریق بهبود شاخص کلروفیل، محتوای نسبی آب و عملکرد کوانتومی، موجب بهبود هدایت روزنه‌ای برگ شد (۲۴). همچنین آقایی و همکاران (۲۰۲۲) بهبود هدایت روزنه‌ای برگ به‌واسطه محلول‌پاشی با نانوآکسید آهن را به افزایش محتوای نسبی آب و بهبود سنتز کلروفیل نسبت دادند (۵).

شاخص‌های فلورسانس کلروفیل و عملکرد

کوانتومی: نتایج نشان داد که تاثیر تیمارهای ارقام لوبیاجیتی (تلاش، محلی سراب و ازبک)، محلول‌پاشی (نانوآکسید آهن و روی) و تاثیر برهم‌کنش آن‌ها روی فلورسانس حداقل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). طبق برش‌دهی اثر ارقام در هر سطح محلول‌پاشی (محلول‌پاشی با آب، نانوآکسید آهن، نانوآکسید روی و نانوآکسید آهن + نانوآکسید روی) و اثر محلول‌پاشی در هر سه سطح ارقام (تلاش، محلی و ازبک) بر فلورسانس حداقل معنی‌دار بود (جدول ۴ و ۵). براساس نتایج، محلول‌پاشی توام نانوآکسید آهن و روی سبب افزایش معنی‌دار فلورسانس حداقل در ارقام لوبیاجیتی شد. محلول‌پاشی توام این دو نانوذر (نانوآکسید آهن + نانوآکسید روی)، موجب شد تا فلورسانس حداقل ارقام لوبیاجیتی کاهش بیشتری داشته باشند، که این امر نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی محلول‌پاشی توام نانوآکسید آهن و روی می‌باشد، به‌طوری که بیش‌ترین فلورسانس حداقل $(291/95)$ در شاهد (بدون محلول‌پاشی) و رقم تلاش به‌دست آمد، که در مقابل آن ارقام محلی سراب و ازبک به‌ترتیب $258/26$ و $256/94$ دارای کم‌ترین فلورسانس متغیر نسبت به رقم تلاش بودند (جدول ۴). همچنین، کم‌ترین فلورسانس حداقل $(113/91)$ در محلول‌پاشی توام نانوآکسید آهن و روی به‌دست آمد (جدول ۴ و ۵). فلورسانس اولیه نشان دهنده سطحی از فلورسانس است که پذیرنده کوئینون

آ (QA) در بالاترین شرایط اکسیداسیونی قرار دارد (مرکز فتوسیستم II باز است). در حقیقت هرچه مقدار F_0 کمتر باشد، نشان از مطلوبیت جریان فعالیت فتوستزی است و در این شرایط تثبیت کربن یا انتقال الکترون با سرعت بیشتری در جریان است. در حالیکه مقدار F_0 بالاتر، نشان از آسیب وارد شده به زنجیره انتقال الکترون فتوسیستم II بر اثر کاهش ظرفیت QA و عدم اکسیداسیون کامل آن به دلیل جریان کند الکترون در طول مسیر فتوسیستم II دارد (۲۵).

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که تأثیر تیمارهای ارقام لوبیاچیتی (تلاش، محلی سراب و ازبک) و محلول پاشی (نانواکسید آهن و روی) و تأثیر برهم‌کنش آن‌ها روی فلورسانس حداکثر معنی‌دار بود. طبق برش‌دهی اثر ارقام در هر سطح محلول پاشی (محلول پاشی با آب، نانواکسید آهن، نانواکسید روی و نانواکسید آهن + نانواکسید روی) و اثر محلول پاشی در هر سه سطح ارقام (تلاش، محلی و ازبک) بر فلورسانس حداکثر معنی‌دار بود (جدول ۴ و ۵). براساس نتایج، محلول پاشی توام نانواکسید آهن و روی سبب افزایش معنی‌دار فلورسانس حداکثر در ارقام لوبیاچیتی شد. در این شرایط اگرچه محلول پاشی نانواکسید آهن و روی به‌تنهایی موجب افزایش معنی‌دار فلورسانس حداکثر گردید، اما محلول پاشی توام این دو نانوذره (نانواکسید آهن + نانواکسید روی)، موجب شد تا فلورسانس حداکثر ارقام لوبیاچیتی افزایش بیشتری داشته باشند، که این امر نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی محلول پاشی توام نانواکسید آهن و روی می‌باشد، به‌طوری که بیش‌ترین فلورسانس حداکثر (۸۲۸) در محلول پاشی توام نانواکسید آهن روی رقم تلاش به‌دست آمد، که در مقابل آن ارقام محلی سراب و ازبک به‌ترتیب ۸۱۳ و ۷۸۳/۳۳ درصد دارای کم‌ترین فلورسانس حداکثر نسبت به رقم تلاش بودند (جدول ۴ و ۵). همچنین، کم‌ترین شاخص

فلورسانس حداکثر (۵۴۲/۳۳) در شاهد (بدون محلول پاشی) و رقم ازبک به‌دست آمد (جدول ۴). فلورسانس حداکثر (F_m) در اثر تابش فوتون‌های نوری و احیای تمامی ناقل‌های الکترون و در اثر بسته بودن همه مراکز واکنش ایجاد می‌گردد (۲۶). زمانی که همه مراکز واکنشی فتوسیستم II بسته می‌باشد، افزایش تدریجی عملکرد فلورسانس صورت گرفته و سرعت واکنش‌های فتوشیمیایی رو به کاهش است و هر چه زمان بسته‌شدن سیستم دیرتر انجام گیرد، یعنی بتواند تعداد الکترون‌های بیشتری را پذیرا باشد، سیستم از کارایی بیشتر یا فلورسانس حداکثر آن بالاتر خواهد بود. در واقع، افزایش فلورسانس حداقل به فلورسانس حداکثر به‌دلیل کوئینون ب (QB) و مخزن بزرگی از پلاستوکوئینون است (۲۶). بر اساس نتایج این پژوهش نیز تحت شرایط محلول پاشی توام نانواکسید آهن و روی، افزایش قابل توجهی در فلورسانس حداکثر و بهبود سیستم فتوشیمیایی (جدول ۴) مشاهده شد.

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که تأثیر تیمارهای ارقام لوبیاچیتی (تلاش، محلی سراب و ازبک) و محلول پاشی (نانواکسید آهن و روی) و تأثیر برهم‌کنش آن‌ها روی فلورسانس متغیر معنی‌دار بود. طبق برش‌دهی اثر ارقام در هر سطح محلول پاشی (محلول پاشی با آب، نانواکسید آهن، نانواکسید روی و نانواکسید آهن + نانواکسید روی) و اثر محلول پاشی در هر سه سطح ارقام (تلاش، محلی و ازبک) بر فلورسانس متغیر معنی‌دار بود (جدول ۴ و ۵). براساس نتایج، محلول پاشی توام این نانوذرات (نانواکسید آهن + نانواکسید روی)، موجب شد تا فلورسانس متغیر ارقام لوبیاچیتی افزایش بیشتری داشته باشند، که این امر نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی محلول پاشی توام نانواکسید آهن و روی می‌باشد، به‌طوری که بیش‌ترین فلورسانس متغیر (۷۲۰/۷۶) در محلول پاشی توام نانواکسید آهن و روی رقم تلاش به‌دست آمد، که در

مقابل آن ارقام محلی سراب و ازبک به ترتیب ۶۷۹/۱۰ و ۶۲۰/۲۳ درصد دارای کمترین فلورسانس متغیر نسبت به رقم تلاش بودند (جدول ۴ و ۵). همچنین، کمترین شاخص فلورسانس حداکثر (۵۴۲/۳۳) در شاهد (بدون محلول پاشی) و رقم ازبک به دست آمد (جدول ۴ و ۵). اصولاً میزان فلورسانس زمانی که پذیرنده الکترون (کوئینون) در حالت احیا باشد، زیاد بوده و به این دلیل میزان فلورسانس متغیر نیز در این شرایط زیاد می‌گردد، ولی موقعی که کینون در حالت اکسیداسیون باشد میزان فلورسانس کلروفیل a کم شده و در نتیجه میزان فلورسانس متغیر کاهش پیدا می‌کند (۲۷). بخشی از کاهش میزان فلورسانس متغیر توسط شرایط نامساعد محیطی به دلیل ممانعت از فتواکسیداسیون فتوسیستم II است. با توجه به اینکه فلورسانس متغیر نشان‌گر احیای کامل کینون است، لذا می‌توان نتیجه‌گیری کرد که اختلال در انتقال الکترون موجب کاهش آن شده است (۲۷). نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که تاثیر تیمارهای ارقام لوبیاچیتی (تلاش، محلی سراب و ازبک) و محلول پاشی (نانواکسید آهن و روی) و تاثیر برهم‌کنش آن‌ها روی عملکرد کوانتومی برگ معنی‌دار بود. طبق برش‌دهی اثر ارقام در هر سطح محلول پاشی (محلول پاشی با آب، نانو اکسید آهن، نانو اکسید روی و نانو اکسید آهن + نانو اکسید روی) و اثر محلول پاشی در هر سه سطح ارقام (تلاش، محلی و ازبک) بر عملکرد کوانتومی برگ معنی‌دار بود (جدول ۴ و ۵). براساس نتایج، محلول پاشی توام نانو اکسید آهن و روی سبب افزایش معنی‌دار عملکرد کوانتومی برگ در ارقام لوبیاچیتی شد. در این شرایط اگرچه محلول پاشی نانو اکسید آهن و روی به تنهایی موجب افزایش معنی‌دار عملکرد کوانتومی برگ گردید، اما محلول پاشی توام این دو نانوذره (نانو اکسید آهن + نانو اکسید روی)، موجب شد تا عملکرد کوانتومی

برگ‌های ارقام لوبیاچیتی افزایش بیشتری داشته باشند، که این امر نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی محلول پاشی توام نانو اکسید آهن و روی می‌باشد، به طوری که بیشترین عملکرد کوانتومی برگ (۰/۸۶۴) در محلول پاشی توام نانو اکسید آهن و روی رقم تلاش به دست آمد، که در مقابل آن ارقام محلی سراب و ازبک به ترتیب ۰/۸۳۴ و ۰/۷۸۸ درصد دارای کمترین عملکرد کوانتومی برگ نسبت به رقم تلاش بودند. با این حال، ارقام تلاش و محلی سراب از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری باهم نداشتند (جدول ۴ و ۵). همچنین، کمترین عملکرد کوانتومی برگ (۰/۵۱۷) در شاهد (بدون محلول پاشی) و رقم ازبک مشاهده شد (جدول ۴ و ۵). نسبت فلورسانس متغیر به فلورسانس حداکثر، کارایی فتوسیستم II را در تبدیل نور جذب شده به انرژی شیمیایی نشان می‌دهد و در شرایط طبیعی مقدار این نسبت در بیش‌تر گیاهان ۰/۸۳ است (بیارش و رقامی، ۱۴۰۰). از آنجایی که با کاهش محتوای نسبی آب برگ، فشار تورگر کاهش می‌یابد و از طرفی کاهش مقدار پتاسیم برگ در شرایط تنش، موجب می‌شود انتقال آب به سمت روزنه کاهش یافته و در نهایت سلول‌های نگهبان روزنه نیز بسته می‌شوند. در چنین شرایطی با بسته شدن روزنه‌ها، هدایت روزنه‌ای و تعرق کاهش می‌یابد (۲۸). با کاهش نرخ تعرق، دمای برگ افزایش می‌یابد و این افزایش دمای برگ موجب آسیب به دستگاه فتوسنتزی به ویژه فتوسیستم II و کاهش شاخص‌های فلورسانس کلروفیل و در نهایت عملکرد کوانتومی برگ می‌شود (۲۹). همچنین گزارش شده است، محتوای کم کلروفیل با جلوگیری از فتواکسیداسیون فتوسیستم II و ایجاد اختلال در انتقال الکترون به فتوسیستم I منجر به افزایش فلورسانس حداقل (F_0) و کاهش فلورسانس حداکثر (F_m) می‌شود که در نهایت عملکرد کوانتومی را کاهش می‌دهد (۲۷). در این بررسی نیز ارقامی که محتوای کلروفیل

(جدول ۴ و ۵) کمتری داشتند، در همین ارقام مقادیر فلورسانس حداقل از بیش‌ترین و فلورسانس حداکثر و عملکرد کوانتومی (جدول ۴ و ۵). از کم‌ترین مقدار خود برخوردار بود. در این راستا وانگ و جین (۲۰۰۵) اظهار داشتند که کاربرد روی با افزایش محتوای کلروفیل و همچنین بهبود هدایت روزنه‌ای را از طریق حفظ پتاسیم در سلول‌های نگهبان روزنه، ضمن افزایش اندازه مخزن مولکول‌های پلاستوکوئنون، موجب بهبود شاخص‌های فلورسانس کلروفیل (فلورسانس حداکثر، فلورسانس متغیر) و عملکرد کوانتومی می‌شود (۲۳). در بررسی نریمانی و سیدشریفی (۲۰۲۳) نیز بهبود عملکرد کوانتومی به‌واسطه محلول‌پاشی با نانواکسید روی را به افزایش شاخص کلروفیل (شکل ۱)، محتوای نسبی آب و هدایت روزنه‌ای (جدول ۴ و ۵) نسبت دادند (۹).

ارتفاع بوته و تعداد شاخه فرعی: نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که تأثیر تیمارهای ارقام لوبیاچیتی (تلاش، محلی سراب و ازبک)، محلول‌پاشی (نانواکسید آهن و روی) و تأثیر برهم‌کنش توام ارقام لوبیاچیتی × محلول‌پاشی نانوذرات روی ارتفاع بوته معنی‌داری بود. طبق برش‌دهی اثر ارقام در هر سطح محلول‌پاشی (محلول‌پاشی با آب، نانواکسید آهن، نانواکسید روی و نانواکسید آهن + نانواکسید روی) و اثر محلول‌پاشی در هر سه سطح ارقام (تلاش، محلی و ازبک) بر ارتفاع بوته معنی‌دار بود (جدول ۴ و ۵). براساس نتایج، محلول‌پاشی توام نانواکسید آهن و روی سبب افزایش معنی‌دار ارتفاع بوته در ارقام لوبیاچیتی شد. علاوه بر تأثیر معنی‌دار نانواکسید آهن و روی به‌تنهایی بر روی ارتفاع بوته، محلول‌پاشی توام این دو نانوذره (نانواکسید آهن + نانواکسید روی)، موجب شد تا ارتفاع بوته ارقام لوبیاچیتی افزایش بیشتری داشته باشند، که این امر نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی محلول‌پاشی توام نانواکسید آهن و روی

می‌باشد، به‌طوری که بیش‌ترین ارتفاع بوته (۷۹/۰۳۳ سانتی‌متر) در محلول‌پاشی توام نانواکسید آهن و روی رقم تلاش به‌دست آمد. که در مقابل آن ارقام محلی سراب و ازبک به‌ترتیب ۷۹/۸۳۳ و ۶۱/۰۶۷ سانتی‌متر دارای کم‌ترین ارتفاع بوته نسبت به رقم تلاش بودند. با این حال، ارقام تلاش و محلی سراب از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری باهم نداشتند (جدول ۴ و ۵). همچنین، کم‌ترین ارتفاع بوته (۵۵/۱۳۳ سانتی‌متر) در شاهد (بدون محلول‌پاشی) و رقم محلی مشاهده شد (جدول ۴ و ۵). از سوی دیگر، یافته‌های ما نشان داد که محلول‌پاشی آهن نسبت به روی عملکرد بهتری داشت و باعث افزایش ارتفاع بوته شد.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر تیمارهای ارقام لوبیاچیتی (تلاش، محلی سراب و ازبک) و محلول‌پاشی (نانواکسید آهن و روی) و تأثیر برهم‌کنش توام آن‌ها بر تعداد ساقه فرعی لوبیاچیتی معنی‌دار شد (جدول ۳). طبق برش‌دهی اثر ارقام در هر سطح محلول‌پاشی (محلول‌پاشی با آب، نانواکسید آهن، نانواکسید روی و نانواکسید آهن + نانواکسید روی) و اثر محلول‌پاشی در هر سه سطح ارقام (تلاش، محلی و ازبک) بر تعداد ساقه فرعی معنی‌دار بود. (جدول ۴ و ۵). براساس نتایج، محلول‌پاشی توام نانواکسید آهن و روی سبب افزایش معنی‌دار تعداد ساقه فرعی در ارقام لوبیاچیتی شد. در این شرایط اگرچه محلول‌پاشی نانواکسید آهن و روی به‌تنهایی موجب افزایش معنی‌دار تعداد ساقه فرعی گردید، اما محلول‌پاشی توام این دو نانوذره (نانواکسید آهن + نانواکسید روی)، موجب شد تا تعداد ساقه‌های فرعی ارقام لوبیاچیتی افزایش بیشتری داشته باشند، که این امر نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی محلول‌پاشی توام نانواکسید آهن و روی می‌باشد، به‌طوری که بیش‌ترین تعداد ساقه فرعی (۷ عدد) در محلول‌پاشی توام نانواکسید آهن و روی رقم تلاش به‌دست آمد. که در

مقابل آن ارقام محلی سراب و ازبک به ترتیب ۶/۰۶۷ و ۶/۸۰۰ عدد دارای کمترین ارتفاع بوته نسبت به رقم تلاش بودند (جدول ۴ و ۵). همچنین، کمترین تعداد شاخه فرعی (۴ عدد) در شاهد (عدم محلول پاشی) و رقم محلی به دست آمد، هرچند تفاوت معنی داری با رقم ازبک نداشت (جدول ۴ و ۵). به نظر می‌رسد کاربرد آهن به دلیل نقش مستقیم این عنصر در ساختار کلروفیل، موجب بهبود سنتز رنگیزه‌های فتوسنتزی می‌شود که تحت چنین شرایطی با بهبود فتوسنتز و افزایش تولید مواد فتوسنتزی و انتقال آن به اندام رویشی گیاه، موجب افزایش ارتفاع بوته می‌شود (۱۴). همچنین، افزایش بیشتر ارتفاع گیاه تحت محلول پاشی آهن می‌تواند به دلیل نقش حیاتی آهن در سنتز کلروفیل باشد. بنابراین، دسترسی به آهن فتوسنتزی و رشد نهایی گیاه تحت تأثیر قرار خواهد گرفت (۳۰). دولا و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند، محلول پاشی نانوذرات آهن از طریق بهبود محتوای نسبی آب و محتوای کلروفیل برگ، ضمن بهبود فتوسنتز و تولید مواد فتوسنتزی، موجب افزایش ارتفاع بوته سویا شد (۲۰). عنصر روی نیز با دخالت در تشکیل اسید ایندول استیک و فعال کردن بسیاری از آنزیم‌ها، رشد گیاه را تنظیم می‌کند و همچنین با سنتز کلروفیل و تولید کربوهیدرات‌ها و انتقال آن‌ها به نقاط رشد، ارتفاع گیاه و تعداد شاخه فرعی گیاه را افزایش می‌دهد (۳۱). افزایش ارتفاع بوته در اثر مصرف روی را می‌توان به نقش موثر این عنصر در متابولیسم RNA و ریبوزوم در سلول‌های گیاهی نسبت داد که موجب تحریک تولید کربوهیدرات، پروتئین و ساخت DNA می‌شود و در نتیجه موجب افزایش رشد گیاه می‌شود. همچنین، روی در تشکیل و ساخت پیش‌ماده تولید اکسین (تریپتوفان) که هورمون رشدی در گیاهان می‌باشد، شرکت دارد (۳۲). در کل، کاربرد نانواکسید آهن و روی موجب افزایش رشد گیاه می‌شود و یکی

از علل این افزایش در رشد و طول شدن سلول‌ها از طریق نانوذرات می‌تواند تحت تأثیر قرار دادن توزیع هورمون و سازماندهی میکروتوبول‌ها به وسیله نانوذرات در جهت تسریع رشد و تقسیم سلولی باشد. همچنین نانوذرات با ایجاد پروتئین‌های حامل، توسط آکوپورین‌ها و کانال‌های یونی با ایجاد منفذهای جدید وارد سلول‌های گیاهی شده و با اصلاح مسیرهای بیولوژیکی منجر به افزایش عملکرد و بهبود سیستم‌های رشدی در گیاهان می‌شود (۳۳). محلول پاشی نانواکسید روی و آهن به دلیل افزایش دسترسی به ریزمغذی‌ها در طول دوره‌ی رشد رویشی و زایشی، ضمن فعالیت‌های فتوسنتزی گیاه موجب افزایش ارتفاع بوته و اعداد شاخه فرعی گیاه می‌شود (۳۴).

عملکرد بیولوژیک: نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که تأثیر تیمار ارقام لوبیاچیتی (تلاش، محلی سراب و ازبک) و تأثیر برهم‌کنش توام ارقام لوبیاچیتی $\times$ محلول پاشی نانوذرات بر عملکرد بیولوژیک ارقام لوبیاچیتی معنی دار شد. طبق برش‌دهی اثر ارقام در هر سطح محلول پاشی (محلول پاشی با آب، نانواکسید آهن، نانواکسید روی و نانواکسید آهن + نانواکسید روی) و اثر محلول پاشی در هر سه سطح ارقام (تلاش، محلی و ازبک) بر عملکرد بیولوژیک معنی دار بود (جدول ۴ و ۵). براساس نتایج، محلول پاشی توام نانواکسید آهن و روی سبب افزایش معنی دار عملکرد بیولوژیک در ارقام لوبیاچیتی شد. در این شرایط اگرچه محلول پاشی نانواکسید آهن و روی به تنهایی موجب افزایش معنی دار عملکرد بیولوژیک گردید، اما محلول پاشی توام این دو نانوذره (نانواکسید آهن + نانواکسید روی)، موجب شد تا عملکرد بیولوژیک ارقام لوبیاچیتی افزایش بیشتری داشته باشند، که این امر نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی محلول پاشی توام نانواکسید آهن و روی می‌باشد، به طوری که بیش‌ترین عملکرد بیولوژیک (۱۳۴/۳ کیلوگرم در هکتار) در

محلول‌پاشی توام نانواکسید آهن و روی رقم تلاش به‌دست آمد. که در مقابل آن ارقام محلی سراب و ازبک به‌ترتیب $4083/3$ و $3961/7$ کیلوگرم در هکتار دارای کم‌ترین عملکرد بیولوژیک نسبت به رقم تلاش بودند. با این حال، ارقام تلاش، محلی سراب و ازبک از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری باهم نداشتند (جدول ۴ و ۵). همچنین، کم‌ترین عملکرد بیولوژیک (3007 کیلوگرم در هکتار) در شاهد (بدون محلول‌پاشی) و رقم ازبک مشاهده شد (جدول ۴ و ۵). دولا و همکاران (۲۰۲۲) بیان کردند که محلول‌پاشی نانوذرات آهن از طریق بهبود سنتز کلروفیل و افزایش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و محتوای نسبی آب و همچنین بهبود فعالیت آنزیم رویسکو، ضمن کمک به بهبود فتوسنتز و افزایش تولید مواد فتوسنتزی، موجب بهبود وزن خشک کل بوته سویا شد (۲۰). از آنجایی که روی نقش کلیدی در فعالیت‌های آنزیمی و مشارکت آهن در تولید کلروفیل دارد، عملکرد بیولوژیکی گیاه با بهبود فتوسنتز و تولید مواد مغذی ضروری افزایش یافته است (۳۵). وانگ و جین (۲۰۰۵) نیز افزایش وزن خشک بوته به‌واسطه کاربرد عنصر روی را بهبود بهبود محتوای کلروفیل (جدول ۴)، هدایت روزنه‌ای (جدول ۴ و ۵)، شاخص‌های فلورسانس کلروفیل (فلورسانس حداکثر و فلورسانس متغیر) و عملکرد کوانتومی (جدول ۴) نسبت دادند (۲۳). افزایش عملکرد بیولوژیک با کاربرد توام عناصر آهن و روی می‌تواند به‌دلیل افزایش بیوسنتز اکسین در حضور روی، افزایش فتوسنتز ناشی از افزایش محتوای کلروفیل و نقش موثر آهن در فتوسیستم‌های I و II و افزایش فعالیت‌های متابولیسمی گیاه باشد (۳۶).

عملکرد دانه: نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که تأثیر محلول‌پاشی (نانواکسید آهن و روی)، تأثیر تیمار ارقام لوبیاچیتی (تلاش، محلی سراب و

ازبک) و تأثیر برهم‌کنش آن‌ها روی عملکرد دانه معنی‌دار بود. طبق برش‌دهی اثر ارقام در هر سطح محلول‌پاشی (محلول‌پاشی با آب، نانواکسید آهن، نانواکسید روی و نانواکسید آهن + نانواکسید روی) و اثر محلول‌پاشی در هر سه سطح ارقام (تلاش، محلی و ازبک) بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۴ و ۵). براساس نتایج، محلول‌پاشی توام نانواکسید آهن و روی سبب افزایش معنی‌دار عملکرد دانه در ارقام لوبیاچیتی شد. محلول‌پاشی نانواکسید آهن به‌تنهایی موجب شد تا عملکرد دانه رقم تلاش افزایش بیشتری داشته باشند، به‌طوری که بیش‌ترین عملکرد دانه ($2282/3$ کیلوگرم در هکتار) در محلول‌پاشی یک گرم در لیتر نانواکسید آهن در رقم تلاش به‌دست آمد. که در مقابل آن ارقام محلی سراب و ازبک به‌ترتیب $1754/3$ و $1682/0$ کیلوگرم در هکتار دارای کم‌ترین عملکرد دانه نسبت به رقم تلاش بودند. با این حال، ارقام محلی سراب و ازبک از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری باهم نداشتند (جدول ۴ و ۵). همچنین، کم‌ترین عملکرد دانه (1459 کیلوگرم در هکتار) در تیمار شاهد (عدم محلول‌پاشی) و رقم ازبک مشاهده شد (جدول ۴ و ۵). آقای و همکاران (۲۰۲۲) نیز افزایش عملکرد دانه به‌واسطه محلول‌پاشی با نانواکسید آهن را به بهبود شاخص کلروفیل، محتوای نسبی آب، هدایت روزنه‌ای و عملکرد کوانتومی برگ نسبت دادند (۵). عنصر روی به‌عنوان اجزای فلزی آنزیم‌های مختلف عمل می‌کند و همچنین به‌عنوان یک کوفاکتور عملکردی، ساختاری و تنظیمی در ارتباط با متابولیسم ساکارید، فتوسنتز و ساخت پروتئین نقش دارد. از این‌رو نقش عنصر روی در افزایش عملکرد محصولات قابل توجه است (۸). همچنین، به‌نظر می‌رسد محلول‌پاشی نانواکسید روی از طریق بهبود فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه از جمله شاخص کلروفیل (شکل ۱)، محتوای نسبی آب،

هدایت روزنه‌ای و عملکرد کوانتومی موجب افزایش عملکرد دانه می‌شود (جدول ۴ و ۵). گزارش شده است، محلول‌پاشی عناصر آهن و روی با تأثیر بر محتوای کلروفیل برگ، غلظت اسید استیک ایندول و افزایش فتوسنتز، منجر به افزایش رشد رویشی و در نتیجه با بهبود ظرفیت تولید موجب افزایش عملکرد دانه می‌شود (۳۷).

نتیجه‌گیری کلی

رقم تلاش نسبت به ارقام محلی سراب و ازبک بیشترین شاخص کلروفیل، محتوای نسبی آب، هدایت

روزنه‌ای، فلورسانس حداکثر، فلورسانس متغیر، فلورسانس حداقل، عملکرد کوانتومی، ارتفاع بوته، تعداد شاخه‌های فرعی، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه را به خود اختصاص داد. محلول‌پاشی توام نانوذرات (نانواکسید آهن + نانواکسید روی) باعث شد اکثر صفات اندازه‌گیری شده نسبت به محلول‌پاشی جداگانه نانواکسید آهن و روی برتری داشته باشند. بطور کلی با محلول‌پاشی عناصر ریز مغذی مهم مانند روی و آهن می‌توان برای بهبود کمیت و کیفیت عملکرد در ارقام لوبیاجیتی استفاده کرد.

References

- Ahmadi, K., Ebadzadeh, H., Hatami, F., Abdshah, H. & Kazemian, A. (2022). Agricultural statistics, the first volume of crops. Ministry of Jihad Agriculture, Bureau of Statistics and Information Technology. 99p.
- Kimani, P.M. (2025). Advances in breeding for enhanced iron and zinc concentrations in common bean in eastern Africa. *Journal of Experimental Botany*, 76(5), 1390–1407.
- Dhaliwal, S. S., Sharma, V., Shukla, A.K., Verma, V., Behera, S.K., Singh, P., Alotaibi, S.S., Gaber, A. & Hossain, A. (2021). Comparative efficiency of mineral, chelated and nano forms of zinc and iron for improvement of zinc and iron in chickpea (*Cicer arietinum* L.) through biofortification. *Agronomy*, 11, 2436.
- Shirsat, S. & Suthindhiran, K.S. (2024). Iron oxide nanoparticles as iron micronutrient fertilizer Opportunities and limitations. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 187(5), 565-588.
- Aghaei, F., Seyed Sharifi, R. & Farzaneh, S. (2022). The Effect of Some Nanoparticles and Biofertilizers on Chlorophyll Fluorescence Components and Some Physiological Traits of Triticale (*Triticosecale Wittmack*) at Different Irrigation Levels. *Journal of Plant Biological Sciences*, 14(53), 13-40. [In Persian]
- Solymanifard, A. & Naserirad, H. (2023). Assess Effect of Rhizobium Bacteria (*Rhizobium leguminosarum* L.) and Iron Nano-chelate on Seed yield and its Components of Pinto Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Cultivars. *Journal of Crop Nutrition Science*, 9(1), 71-80.
- Ahmed, R., Uddin, M. K., Quddus, M.A., Samad, M.Y.A., Hossain, M.A.M. & Haque, A.N.A. (2023). Impact of foliar application of zinc and zinc oxide nanoparticles on growth, yield, nutrient uptake and quality of tomato. *Horticulturae*, 9(2), 162.
- Radhika, K. & Meena, S. (2021). Effect of zinc on growth, yield, nutrient uptake and quality of groundnut: A review. *Pharma Innovation Journal*, 10(2), 541-546.
- Narimani, H. & Seyed Sharifi, R. (2023). Effect of Foliar and Soil Application of Zinc on Grain Filling, Yield and Some Physiological Traits of Wheat (*Triticum aestivum* L.) under Salinity Stress. *Russian Journal of Plant Physiology*, 70, 133.
- Fatollahpour Grangah, M., Rashidi, V., Mirshekari, B., Khalilvand Behrouzyar, E. & Farahvash, F. (2020). Effects of nano-fertilizers on physiological and yield characteristics of pinto bean cultivars under water deficit stress. *Journal of Plant Nutrition*, 43(11), 1-13.
- Moludin, A, Ebadi, A., Jahanbakhsh, S., Davari, M. & Parmoon, G. (2014). The effect of water deficit and nitrogen on the antioxidant enzymes activity and quantum yield of barley (*Hordeum vulgare* L.). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 42(2), 398-404.

12. Kostopoulou, P., Barbayiannis, N. & Basile, N. (2010). Water relations of yellow sweet clover under the synergy of drought and selenium addition. *Journal Plant and Soil*, 330(1-2), 65-71.
13. Wang, Y., Kang, Y., Zhong, M., Zhang, L., Chai, X., Jiang, X. & Yang, X. (2022). Effects of iron deficiency stress on plant growth and quality in flowering Chinese cabbage and its adaptive response. *Agronomy*, 12(4), 875.
14. Arab, R., Yadavi, A., Balochi, H. & Khadem Hamzeh, H. (2018). The Effect of Irrigation Interval and Iron and Zinc Foliar Application on Some Morpho-Physiological Characteristics and Yield of Sunflower. *Journal of Crop Production*, 11(2), 77-90. [In Persian]
15. Al-Amri, N., Tombuloglu, H., Slimani, Y., Akhtar, S., Barghouthi, M., Almessiere, M., Alshammari, T., Baykal, A., Sabit, H., Ercan, I. & Ozcelik, S. (2020). Size effect of iron (III) oxide nanomaterials on the growth, and their uptake and translocation in common wheat (*Triticum aestivum* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 194, 110377.
16. Mohammadzadeh Toutounchi, P. & Amirinia, R. (2016). Effect of foliar application of iron, zinc and manganese on yield and yield components of fenugreek. *Journal of Crops Improvement*, 18(1), 69-78. [In Persian]
17. Kaya, C. & Higgs, D. (2002). Response of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) cultivars to foliar application of zinc when grown in sand culture at low zinc. *Scientia Horticulturae*, 93, 53-64.
18. Marschner, H. (1995). Mineral Nutrition of Higher Plant. Academic Press.
19. Hejazi Mehrizi, M., Shariatmadari, H., Khoshgoftarmanesh, A.H. & Zarezadeh, A. (2011). Effect of salinity and zinc on physiological and nutritional responses of rosemary. *International Agrophysics*, 25(4), 349-353
20. Dola, D.B., Mannan, M.A., Sarker, U., Mamun, M.A.A., Islam, T., Ercisli, S., Saleem, M.H., Ali, B., Pop, O.L. & Marc, R.A. (2022). Nano-iron oxide accelerates growth, yield, and quality of Glycine max seed in water deficits. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1-12.
21. Weisany, W., Sohrabi, Y., Heidari, G., Siosemardeh, A. & GhasemiGolezani, K. (2011). Physiological response of soybean (*Glycine max* L.) to zinc application under salinity stress. *Australian Journal of Crop Science*, 5, 1441- 1447
22. Zamani, E., Salari, H. & Ghobadi, M. (2022). Effects of Foliar Iron Chelated Application on some Physiological Traits in Saffron (*Crocus sativus* L) in Kermanshah. *Saffron Agronomy and Technology*, 9(4), 343-356. [In Persian]
23. Wang, H. & Jin, J.Y. (2005) Photosynthetic rate, chlorophyll fluorescence parameters and lipid peroxidation of maize leaves as affected by zinc deficiency. *Photosynthetica*, 43, 591-596.
24. Mohammadzadeh, Z., Sharifi, R. & Farzaneh, S. (2023). Narimani, H. Effects of salinity, Azosperlium and nanoparticles (zinc and silicon) on yield and some physiological traits of triticale ($\times$ *Triticosecale Wittmak.*). *Journal of Crop Production*, 16(20), 79-104. [In Persian]
25. Sadeghi-Shoae, M., Paknejad, F., Shahbazpanahi, B. & Tookaloo, M.R. (2014) Florescence parameters, chlorophyll content and relative water content (RWC) of wheat varieties as affected by different regimes of irrigation. *International Journal of Biosciences*, 4(5), 135.
26. Mehta, P., Jajoo, A., Mathur, S. & Bharti, S. (2010). Chlorophyll a fluorescence study revealing effects of high salt stress on Photosystem II in wheat leaves. *Journal of Plant Physiology and Biochemistry*, 48(1), 16-20.
27. Paknejad, F., Majidi Heravan, E., Noor Mohammadi, Q., Siyadat, A. & Vazan, S. (2007). Effects of drought stress on chlorophyll fluorescence parameters, chlorophyll content and grain yield of wheat cultivars. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 5, 162-169.
28. Sharma, N., Gupta, N.K., Gupta, S. & Hasegawa, H. (2005). Effect of NaCl salinity on photosynthetic rate, transpiration rate, and oxidative stress tolerance in contrasting wheat genotypes. *Photosynthetica*, 43(4), 609-613.
29. Bayarash, M. & Raghani, M. (2021). The effect of salinity stress on growth and photosynthetic parameters of hybrid and Iranian spinach cultivars. *Journal of Plant Production Research*, 28(2), 131-146. [In Persian]

30. Jin, Z., Minyan, W., Lianghuan, W., Jiangguo. W. & Chunhai, S. (2008). Impacts of combination of foliar iron and boron application on iron biofortification and nutritional quality of rice grain. *Journal of Plant Nutrition*, 31(9), 1599- 1611.
31. Shafiee, A., Sajedi, N. & Changizi, M. (2015). The effects of different treatments of seed priming and foliar application of nano particle and zinc sulphate on agronomic traits in safflower. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 4(2), 71-80. [In Persian]
32. Fang, Y., Wang, L., Xin, Z., Zhao, L., An, X. & Hu, Q. (2008). Effect of foliar application of zinc, selenium, and iron fertilizers on nutrients concentration and yield of rice grain in China. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 56(6), 2079-2084.
33. Aslani, F., Bagheri, S., Julkapli, N.M., Juraimi, A.S., Hashemi, F.S.G. & Baghdadi, A. (2014). Effects of Engineered Nanomaterials on Plants Growth: An Overview. *Scientific World Journal*, 14, 641759.
34. Azimi, S.M., Eisvand, H.R., Ismaili, A. & Akbari, N. (2022). Effect of gibberellin, nano-nutrition with titanium, zinc and iron on yield and some physiological and qualitative traits of white bean. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 49(1), 12538 .
35. Tehrani, M.M. & Malakouti, M.J. (2000). The role of micronutrients in increasing yield and improving the quality of agricultural products Microelements with macro impact. Tarbiat Modares University Press. 329p.
36. Roshan zamir, M., Razmjoo, R. & Ehsanzadeh, P. (2014). The effect of nano-zinc and iron oxide fertilizers on yield, yield components and protein content of red kidney beans, Master's thesis, Isfahan University of Technology, 71p.
37. Ravi, S., Channel, H.T., Hebsur, N.S., Patil, B.N. & Dharmatti, P.R. (2008). Effect of sulphur, zinc and iron nutrition on growth, yield, nutrient uptake and quality of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Karnataka Journal of Agricultural Sciences*, 21(3), 382-385.