

Evaluation of physiological and nutritional responses of red bean to different irrigation regimes and humic acid foliar application

Reza Nikoeinejad¹, Hojatollah Latifmanesh^{2*}, Ali Moradi³, Hamid Alahdadi⁴

¹ M.Sc. Graduate in Agrotechnology – Crop Ecology, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran, Email: Aryobarzan3197@gmail.com

^{*2} Corresponding author, Assistant Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran, Email: h.latifmanesh@yu.ac.ir

³ Associate Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran, Email: amoradi@yu.ac.ir

⁴ M.Sc. Graduate in Agrotechnology – Crop Physiology, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran, Email: hamid.alahdadii@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Full Paper

Article history:

Received: 2023-05-02

Accepted: 2025-09-30

ABSTRACT

Background and Objectives: The yield stability of red bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in many regions of the world is seriously threatened by environmental stresses, especially drought. This stress, by affecting key physiological processes of the plant such as photosynthesis and nutrient uptake, causes a significant reduction in grain yield. In arid and semi-arid regions such as Iran, the water crisis resulting from climate change and excessive exploitation has created a serious challenge to the sustainable production of drought-sensitive crops like red bean. In response to this challenge, the use of low-cost, sustainable, and environmentally friendly agronomic practices has become increasingly essential. Humic acid, as an organic compound derived from the decomposition of natural materials, is among the emerging options considered in the management of abiotic stresses. By improving the physical and chemical properties of the soil, increasing water-holding capacity, facilitating nutrient uptake, and enhancing the plant's defense mechanisms, humic acid plays an important role in improving plant tolerance to water stress. Therefore, the present study was conducted to evaluate the effect of foliar application of humic acid on some physiological and nutritional traits of red bean cultivar Yaghoot under deficit irrigation conditions.

Materials and Methods: This field experiment was carried out in 2023 in Boyer-Ahmad County (southwestern Iran). The experimental design was a split-plot arrangement based on a randomized complete block design with three replications. The main factor consisted of three irrigation levels based on the percentage of crop water requirement estimated through reference evapotranspiration using Class A evaporation pan: full irrigation (100% of crop water requirement), moderate stress (80% of crop water requirement), and severe stress (60% of crop water requirement). The subplots included foliar application of humic acid at four levels: 0 (control), 2.5, 5, and 7.5 L ha⁻¹, applied at two growth stages—six-leaf stage and beginning of flowering. The evaluated traits included proline, soluble sugars, superoxide dismutase, chlorophyll a and b, chlorophyll index, seed

Keywords:

Proline
Chlorophyll Index
Grain Yield
Deficit Irrigation
Seed Nutrient Content

nutrient contents (nitrogen, potassium, and phosphorus), and grain yield.

Results: The results showed that 60% irrigation increased leaf soluble sugar content by 33.94%, while reducing chlorophyll a and b content by 46.15% and 52.71%, respectively. The simple effect of severe stress also reduced seed phosphorus by 6.54% and increased seed potassium by 45.91%. Application of 7.5 L ha⁻¹ humic acid increased chlorophyll a, chlorophyll b, and chlorophyll index by 65.62%, 52.38%, and 9.49%, respectively. The significance of two-way interactions indicated that under 60% irrigation, application of 7.5 L ha⁻¹ humic acid increased proline by 56.97% and superoxide dismutase activity by 70.43%. Overall, higher levels of humic acid application improved grain yield by 37.41% under full irrigation and by 20.66% under severe stress.

Conclusion: The findings showed that deficit irrigation in red bean disrupts physiological balance, reduces photosynthetic efficiency, and decreases nutrient uptake, ultimately leading to yield reduction. However, foliar application of humic acid, as an effective biostimulant, enhanced the plant's physiological and nutritional capacity, increasing stress tolerance and improving yield-related traits. Therefore, foliar application of 7.5 L ha⁻¹ humic acid, by strengthening the defense system and improving nutrient uptake, improved the final yield of red bean cultivar Yaghoot under deficit irrigation conditions in Boyer-Ahmad County. To validate these findings, multi-year experiments are recommended.

Cite this article: Nikoeinejad, R., Latifmanesh, H., Moradi, A., Alahdadi, H. 2025. Evaluation of physiological and nutritional responses of red bean to different irrigation regimes and humic acid foliar application. *Crop Production Journal*, 18 (2), 155-174.



© The Author(s).

DOI: [10.22069/ejcp.2025.23737.2690](https://doi.org/10.22069/ejcp.2025.23737.2690)

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



ارزیابی پاسخ‌های فیزیولوژیک و تغذیه‌ای لوبیا قرمز رقم یاقوت به رژیم‌های مختلف آبیاری و محلول‌پاشی اسید هیومیک

رضا نیکویی نژاد^۱، حجت‌اله لطیف‌منش^{۲*}، علی مرادی^۳، حمید اله‌دادی^۴

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

رایانامه: Aryobarzan3197@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، استادیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران. رایانامه: h.latifmanesh@yu.ac.ir

^۳ دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران. رایانامه: amoradi@yu.ac.ir

^۴ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

رایانامه: hamid.alahdadii@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی	سابقه و هدف: پایداری عملکرد لوبیا قرمز (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) در بسیاری از مناطق جهان با تنش‌های محیطی، به‌ویژه خشکی، به شدت در معرض خطر است. این تنش، با تأثیر بر فرآیندهای فیزیولوژیک کلیدی گیاه نظیر فتوسنتز و جذب عناصر غذایی، کاهش چشمگیری در عملکرد دانه ایجاد می‌کند. در مناطق کم‌آب و خشک نظیر ایران، بحران منابع آبی ناشی از تغییرات اقلیمی و بهره‌برداری بی‌رویه، چالشی جدی در مسیر پایداری تولید محصولات حساس به خشکی مانند لوبیا قرمز ایجاد کرده است. در پاسخ به این چالش، توجه به روش‌های زراعی کم‌هزینه، پایدار و سازگار با محیط زیست، بیش از پیش ضرورت یافته است. اسید هیومیک به‌عنوان یک ترکیب آلی حاصل از تجزیه مواد طبیعی، از جمله گزینه‌های نوین مورد توجه در مدیریت تنش‌های غیرزیستی است. این ماده با بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت، تسهیل جذب عناصر غذایی و تقویت سازوکارهای دفاعی گیاه، نقش مؤثری در بهبود تحمل گیاهان به تنش آبی دارد. بنابراین پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تأثیر محلول‌پاشی اسید هیومیک بر برخی شاخص‌های فیزیولوژیکی و تغذیه‌ای لوبیا قرمز رقم یاقوت، تحت شرایط کم‌آبیاری انجام گرفت.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۳/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۱۹	
واژه‌های کلیدی:	مواد و روش‌ها: این پژوهش مزرعه‌ای در سال ۱۴۰۲ در شهرستان بویراحمد (جنوب غرب ایران) اجرا گردید. طرح آزمایشی به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار پیاده‌سازی شد. تیمار اصلی شامل سه سطح آبیاری بر مبنای درصد نیاز آبی برآورد شده از طریق تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از تشت تبخیر کلاس A بود: آبیاری کامل (۱۰۰٪ نیاز آبی گیاه)، تنش متوسط (۸۰٪ نیاز آبی) و تنش شدید (۶۰٪ نیاز آبی). در کرت‌های فرعی نیز، محلول‌پاشی برگ‌ی اسید هیومیک در چهار سطح شامل صفر (شاهد)، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ لیتر در هکتار طی دو مرحله شش برگ‌ی و آغاز گلدهی اعمال شد. در این آزمایش، صفات پرولین، قندهای محلول، سوپراکسید دیسموتاز، کلروفیل a و b، شاخص کلروفیل، محتوای عناصر دانه (شامل نیتروژن، پتاسیم و فسفر) و عملکرد دانه مورد ارزیابی قرار گرفت.
پرولین شاخص کلروفیل عملکرد دانه کم‌آبیاری محتوای عناصر دانه	یافته‌ها: نتایج نشان داد که آبیاری ۶۰ درصد به میزان ۳۳/۹۴ درصد محتوای قندهای محلول برگ را افزایش داد و از سوی دیگر محتوای کلروفیل a و b را به ترتیب ۴۶/۱۵ و ۵۲/۷۱ درصد کاهش داد. همچنین اثر ساده تنش

شدید با کاهش ۶/۵۴ درصدی فسفر دانه و افزایش ۴۵/۹۱ درصدی پتاسیم دانه همراه بود. کاربرد محلول پاشی ۷/۵ لیتر اسید هیومیک در هکتار نیز موجب افزایش ۶۵/۶۲، ۵۲/۳۸ و ۹/۴۹ درصدی کلروفیل a و b و شاخص کلروفیل شد. معنی داری برهمکنش های دوگانه نیز نشان داد در سطح آبیاری ۶۰ درصد، کاربرد ۷/۵ لیتر اسید هیومیک در هکتار موجب افزایش ۵۶/۹۷ درصدی پرولین و ۷۰/۴۳ درصدی فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز شد. در نهایت مجموعه صفات فیزیولوژیک اعمال بالاترین سطح کاربرد اسید هیومیک منجر به بهبود ۳۷/۴۱ و ۲۰/۶۶ درصدی عملکرد دانه تحت آبیاری ۱۰۰ درصد و تنش شدید شد.

نتیجه گیری: نتایج تحقیق نشان داد که تنش کم آبیاری در گیاه لوبیا قرمز با برهم زدن تعادل فیزیولوژیکی، کاهش کارایی فتوسنتز و افت جذب عناصر غذایی موجب کاهش عملکرد می شود. با این حال، محلول پاشی اسید هیومیک به عنوان یک محرک زیستی مؤثر، با ارتقاء توان فیزیولوژیکی و تغذیه ای گیاه، موجب افزایش تحمل به تنش و بهبود صفات عملکردی گردید. از این رو محلول پاشی ۷/۵ لیتر اسید هیومیک در هکتار ضمن تقویت سامانه دفاعی و بهبود جذب عناصر غذایی، در شرایط این آزمایش منجر به بهبود عملکرد نهایی لوبیا قرمز رقم یاقوت تحت تنش کم آبیاری در شهرستان بویراحمد شد. جهت اطمینان از یافته ها تکرار آزمایش طی چند سال ضروری است.

استناد: نیکویی نژاد، رضا؛ لطیف منش، حجت اله؛ مرادی، علی؛ اله دادی، حمید. (۱۴۰۴). ارزیابی پاسخ های فیزیولوژیک و تغذیه ای لوبیا قرمز رقم یاقوت به رژیم های مختلف آبیاری و محلول پاشی اسید هیومیک. مجله تولید گیاهان زراعی، ۱۸ (۲)، ۱۷۴-۱۵۵.



© نویسندگان

DOI: [10.22069/ejcp.2025.23737.2690](https://doi.org/10.22069/ejcp.2025.23737.2690)

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) به‌عنوان یک محصول زراعی استراتژیک، نقشی حیاتی در امنیت غذایی بیش از ۳۰۰ میلیون نفر در جهان ایفا می‌کند. بر اساس داده‌های فائو، در سال ۲۰۲۳، سطح زیر کشت جهانی این محصول به ۳۷/۷ میلیون هکتار با تولید ۲۸/۵ میلیون تُن رسید که سهم ایران از این تولید، ۱۵۱/۲ هزار تُن از ۸۱/۲ هزار هکتار سطح زیر کشت بود (۱). اگرچه لوبیا گیاهی نسبتاً حساس به کم‌آبی تلقی می‌گردد، اما در بسیاری از مناطق جهان همچنان در شرایط تنش آبی کشت می‌شود (۲). در این زمینه بیان شده است وقوع خشکی و فقر تغذیه‌ای خاک — به‌ویژه کمبود نیتروژن — از مهم‌ترین موانع در کشت موفق لوبیا محسوب می‌شوند (۳). بر این اساس در پرتو محدودیت منابع غذایی و رشد فزاینده جمعیت، واکاوی تنش خشکی در کارایی فیزیولوژیک و تولیدی لوبیا ضرورتی راهبردی دارد.

تنش خشکی، با کاهش رطوبت ناحیه ریشه، عامل محدودکننده‌ای در رشد و عملکرد گیاهان بوده و حدود یک‌چهارم اراضی کشاورزی جهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۴). تحت این شرایط، به‌دنبال اختلال در زنجیره انتقال الکترون، تولید گونه‌های اکسیژن فعال افزایش یافته؛ در نتیجه گیاه با راه‌اندازی سازوکارهای تدافعی همچون انباشت اسمولیت‌های سازگار، موجب پایداری ساختارهای یاخته‌ای و کاهش خسارت اکسیداتیو می‌شود (۵). در این میان، پرولین با ایفای نقش حفاظتی در برابر دنا توره شدن پروتئین‌ها، حفظ تعادل اسمزی و پایداری آنزیم‌ها، و قندهای محلول با حفظ یکپارچگی غشاها و پروتئین‌ها، از اجزای کلیدی دفاع غیرآنزیمی محسوب می‌شوند (۶). گزارش شده است کم‌آبایی در ۶۰ درصد نیاز آبی موجب افزایش ۴۱/۹۴ و ۴۶/۴۴ درصدی محتوای پرولین و کربوهیدرات‌های محلول

در لوبیا شده است (۷). تنش خشکی با کاهش رشد برگ، شاخص سطح برگ و فشار تورژسانس، کارکردهای حیاتی گیاه را مختل می‌کند. در ادامه اختلال در فتوسنتز و انتقال مواد فتوسنتزی منجر به افت عملکرد می‌شود (۸). غلامی و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند میزان کلروفیل کل لوبیا چشم‌بلبلی در آبیاری ۱۶ روز یک‌بار به میزان ۴۷/۵۴ درصد در مقایسه با شاهد (آبیاری ۸ روز یک‌بار) کاهش یافت (۹). همچنین کاهش معنی‌دار محتوای کلروفیل a (۸/۵۹ درصد) و کلروفیل b (۲/۹۸ درصد) تحت شرایط تنش کم‌آبایی در لوبیا قرمز نیز بیان شده است (۱۰). با افت ذخایر متابولیکی و تخصیص مجدد آنها برای اندام‌های زایشی، در نهایت عملکرد دانه نیز کاهش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که رشیدی و همکاران (۲۰۲۲) کاهش ۳۰/۰۲ درصدی عملکرد دانه لوبیا را در پاسخ به تنش ۵۰ درصد نیاز آبی گزارش کرده‌اند (۱۱).

کاربرد اسید هیومیک به‌عنوان یک ورودی زیستی، با بهره‌مندی از اثرات مطلوب بر خصوصیات خاک و بدون پیامدهای زیست‌محیطی منفی، می‌تواند در افزایش عملکرد گیاهان نقش مؤثری ایفا کند (۱۲). اسید هیومیک، ترکیبی آلی با وزن مولکولی بین ۳ تا ۳۰ کیلو دالتون، حاصل فرایندهای هومفیکاسیون بقایای گیاهی و جانوری است که نقش کلیدی در ارتقاء ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک ایفا می‌نماید (۱۳). این ترکیب با بهبود ساختار خاک، افزایش تخلخل، تهویه و نفوذپذیری، بستر مناسبی برای توسعه سیستم ریشه‌ای فراهم می‌سازد و از طریق ظرفیت نگهداشت رطوبت، در پایداری محیط ریزوسفری نقش آفرین است (۱۴). از سوی دیگر، هیومیک اسید با کلاته کردن عناصر کم‌مقدار، تحریک ریزسازواره‌های مفید خاک و افزایش سطح تماس ریشه با عناصر غذایی، بهره‌وری جذب مواد معدنی را

در گیاه به‌طور معناداری افزایش می‌دهد (۱۵). این ویژگی‌ها، در مجموع ضمن ارتقاء کارایی مصرف نهاده‌ها، وابستگی به کودهای شیمیایی را کاهش داده و موجب بهبود پایداری و صرفه‌جویی اقتصادی در نظام‌های زراعی می‌گردد (۱۶). بر اساس گزارش‌های پژوهشی، کاربرد اسید هیومیک منجر به بهبود شاخص‌های تغذیه‌ای و فیزیولوژیکی لوبیا شده است؛ جباری بادخور و همکاران (۲۰۲۴) گزارش دادند کاربرد ۶ لیتر در هکتار اسید هیومیک موجب افزایش ۸۲/۱۸، ۷۱/۴۹ و ۸۴/۷۹ درصدی محتوای کلروفیل a و b و عملکرد دانه لوبیا قرمز شده است (۱۳). همچنین تاثیر مثبت اسید هیومیک بر افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در لوبیا چیتی (۱۷)، افزایش شاخص کلروفیل و نیتروژن دانه در نخود (۱۸) و بهبود محتوای عناصر پرمصرف NPK در باقلا (۱۹) ثبت شده است.

این پژوهش با هدف ارزیابی پاسخ فیزیولوژیک و عملکردی لوبیا قرمز رقم «یاقوت»، تحت شرایط تنش خشکی و کاربرد محلول‌پاشی اسید هیومیک در شهرستان بویراحمد، به‌منظور شناسایی راهکارهای به‌زراعی مؤثر برای ارتقاء بهره‌وری تولید اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

در سال ۱۴۰۲ و طی فصول بهار و تابستان، پژوهشی مزرعه‌ای در منطقه‌ای از شهرستان بویراحمد - دارای اقلیم سرد و نیمه‌خشک - انجام شد. این تحقیق با استفاده از طرح آماری کرت‌های یکبار خرد شده در قالب بلوک‌های کامل تصادفی و با سه تکرار پیاده‌سازی گردید. محل اجرای آزمایش در ارتفاع ۱۸۰۳ متری از سطح دریا و در مختصات جغرافیایی

۳۰ درجه و ۶۹ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۵۵ دقیقه طول شرقی قرار داشت. در این مطالعه، سطوح مختلف آبیاری به عنوان عامل اصلی در سه سطح تعریف شد: آبیاری کامل (برابر با ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه)، آبیاری با تنش ملایم (۸۰ درصد نیاز آبی) و آبیاری با تنش شدید (۶۰ درصد نیاز آبی)، که این مقادیر بر پایه میزان تبخیر از تشتک کلاس A تعیین شدند. همچنین، تیمار برگی اسید هیومیک در چهار سطح (صفر، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ لیتر در هکتار) به‌عنوان عامل فرعی مورد بررسی قرار گرفت. اسید هیومیک مورد استفاده در این آزمایش از شرکت زیست فناوری سبز مستقر در تهران تهیه گردید.

پس از اتمام عملیات خاک‌ورزی اولیه، تسطیح زمین و تقسیم‌بندی آن به کرت‌های آزمایشی بر اساس نقشه طرح انجام شد. هر واحد آزمایشی شامل چهار ردیف کشت به طول سه متر بود که با فاصله بین ردیفی ۵۰ سانتی‌متر از یکدیگر قرار گرفته بودند. فاصله‌گذاری بین کرت‌های فرعی، کرت‌های اصلی و بلوک‌ها به‌ترتیب برابر با ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر در نظر گرفته شد. پیش از آغاز کشت، جهت ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، نمونه‌هایی از عمق ۳۰ سانتی‌متری برداشت و مورد تجزیه قرار گرفت. بر اساس نتایج این آزمون (جدول ۱)، مقادیر مورد نیاز کود شامل ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره (در دو مرحله) و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل، به خاک افزوده شد. به‌طور کلی مقادیر مورد نیاز برخی از عناصر غذایی پرمصرف و کم‌مصرف در مراحل مختلف رشد لوبیا در جدول ۲ مطرح شده است (۲۰).

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش.

Table 1. Physical and chemical characteristics of the soil where the experiment was carried out.

شاخص	نیترژن	فسفر (میلی گرم در کیلو گرم)	پتاسیم (میلی گرم در کیلو گرم)	آهن (میلی گرم در کیلو گرم)	روی (میلی گرم در کیلو گرم)	کربن آلی (%)	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	یافت texture
واکنش pH	N (%)	P (mg kg ⁻¹)	K (mg kg ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)	Organic carbon (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	
7.48	0.16	17.1	298	4.99	0.88	1.06	18	48	34	سیلتی لوم Silty loam

جدول ۲- غلظت بهینه برخی از عناصر پرمصرف و کم‌مصرف در مراحل مختلف رشد لوبیا.

Table 2. Optimum concentration of some macro- and micro-nutrients at different growth stages of bean.

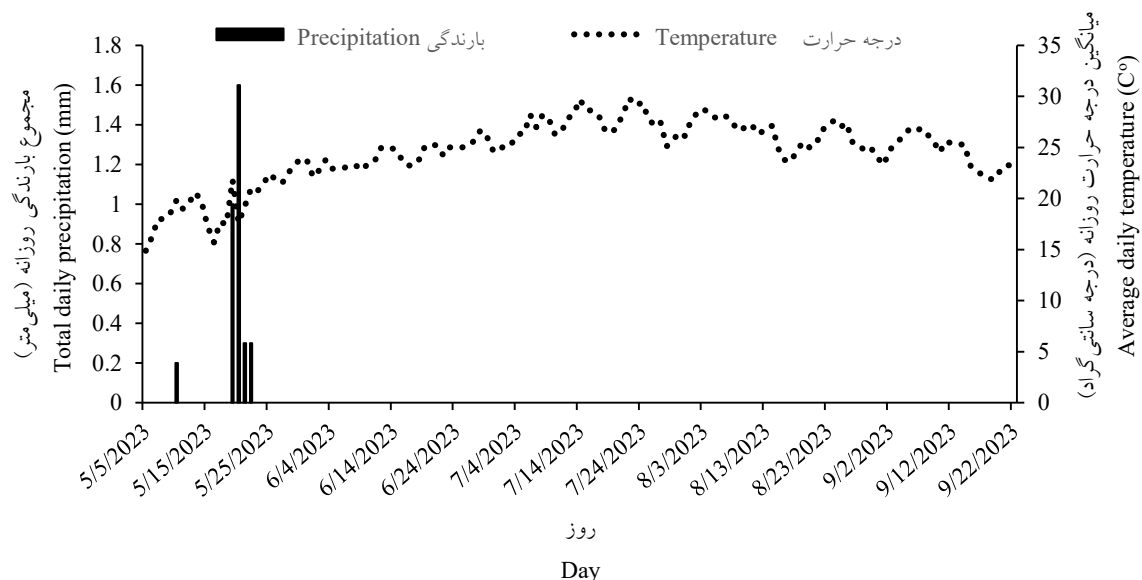
مرحله رشد	فسفر (%)	پتاسیم (%)	منیزیم (%)	کلسیم (%)	آهن (میلی گرم در کیلو گرم)	روی (میلی گرم در کیلو گرم)
Growth Stage	P	K	Mg	Ca	Fe	Zn
	(%)				(mg kg ⁻¹)	
گلدهی Flowering	0.3	2.09	1.9	0.24	31	13
تشکیل غلاف Pod formation	-	1.48	4.2	0.26	20	18
پر شدن دانه Seed filling	0.9	1.49	4.22	0.26	20	16

اجرای تیمارهای آبیاری، ابتدا تبخیر روزانه از تشتک تبخیر کلاس A اندازه‌گیری شد. سپس، نیاز آبی مرجع (ET₀) با استفاده از تبخیر از تشتک و ضریب تشتک (K_p) محاسبه گردید. نیاز آبی واقعی گیاه (ET_c) با ضرب نیاز آبی مرجع در ضریب گیاهی (K_c) به‌دست آمد که این مقدار به عنوان آبیاری کامل (۱۰۰ درصد نیاز آبی؛ معادل ۴۳۲۲/۰۳ مترمکعب در هکتار) در نظر گرفته شد. سپس، حجم آب برای تیمارهای ۸۰ و ۶۰ درصد به ترتیب با کاهش ۲۰ و ۴۰ درصد از نیاز آبی شاهد تعیین گردید. آبیاری‌ها زمانی انجام می‌شد که مجموع تبخیر تجمعی از تشتک به آستانه مورد نظر می‌رسید و در هر نوبت، حجم دقیق آب محاسبه‌شده جداگانه برای هر کرت اعمال می‌شد. کاربرد محلول برگری اسید هیومیک در دو مرحله انجام پذیرفت: نخست در مرحله شش‌برگی (۲۱ روز پس از کشت) و بار دوم در زمان آغاز گلدهی (۴۵ روز پس از کشت). کنترل دستی علف‌های هرز بر اساس اصل

برای کشت، از رقم یاقوت (رشد نامحدود، فرم بوته‌ای ایستاده و سازگار با شرایط اقلیمی سرد و معتدل) استفاده شد. این بذر توسط مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تأمین گردیده بود. عملیات کشت در اواسط خرداد ۱۴۰۲، با رعایت فاصله کاشت ۵ سانتی‌متر و در عمق ۴ تا ۵ سانتی‌متر، بر روی پشته‌ها و به روش دستی انجام گرفت. پیش از کاشت، بذرها با محلول هیپوکلریت سدیم ضدعفونی شدند. در مرحله‌ای که گیاهان به مرحله چهار برگی رسیدند، تنک‌سازی صورت گرفت و تنها بوته‌های سالم و قوی باقی ماندند. سیستم آبیاری قطره‌ای با استفاده از نوار تیپ در امتداد محور پشته‌ها راه‌اندازی شد تا تأمین آب به‌طور یکنواخت و کارآمد انجام گیرد. داده‌های هواشناسی طی دوره رشد در شکل ۱ ارائه شده است.

اعمال تیمارهای آبیاری از مرحله شش‌برگی گیاهان (مطابق با BBCH 60) آغاز شد (۷). برای

پیشگیری از راهبرد مدیریت تلفیقی علف‌های هرز
شدن تاج پوشش گیاهی انجام شد تا رقابت آن‌ها با گیاهان اصلی به حداقل برسد.



شکل ۱- اطلاعات هواشناسی شامل میانگین درجه حرارت و مجموع بارندگی در طول سال زراعی ۱۴۰۲.

Figure 1. Meteorological information including the mean temperature and total rainfall during the 2023 crop year.

نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. به کمک منحنی استاندارد تهیه‌شده بر پایه ال-پرولین، غلظت پرولین محاسبه گردید (۲۱).

اندازه‌گیری محتوای قندهای محلول برگ: به عصاره الکلی حاصل از برگ‌های جوان، معرف آنترون تازه تهیه‌شده افزوده شد. سپس مخلوط در بن‌ماری قرار گرفت تا واکنش کامل گردد. پس از خارج کردن نمونه‌ها، اجازه داده شد تا در دمای محیط خنک شوند. میزان جذب نوری محلول‌ها در طول موج ۶۲۵ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری گردید. غلظت قندهای محلول برگ با ترسیم منحنی استاندارد تهیه‌شده بر پایه غلظت‌های مختلف گلوکز، محاسبه شد (۲۲).

سنجش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز: مخلوط واکنش شامل ۳ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم با غلظت ۵۰ میلی‌مولار و pH معادل ۷/۵، حاوی NaEDTA با

اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیک در اواسط مرحله پر شدن دانه، به منظور بررسی پاسخ‌های گیاه به تنش در حساس‌ترین دوره رشد، از طریق نمونه‌برداری از برگ‌های جوان و کاملاً توسعه‌یافته صورت گرفت. در مرحله برداشت نهایی، محتوای عناصر غذایی پرمصرف و عملکرد دانه نیز به منظور ارزیابی تأثیر نهایی تیمارها بر کیفیت و کمیت محصول نهایی اندازه‌گیری شدند.

اندازه‌گیری محتوای پرولین برگ: به عصاره الکلی تهیه‌شده از برگ‌های جوان و کاملاً توسعه‌یافته، آب دوبار تقطیر، نین‌هیدرین و اسید استیک گلاسیال افزوده شد و پس از اختلاط، نمونه‌ها در بن‌ماری قرار داده شدند. در ادامه، واکنش‌ها در دمای محیط سرد شدند. سپس، به هر نمونه بزن اضافه گردید تا پرولین به فاز آلی منتقل شود. پس از جداسازی فازها و استراحت نمونه‌ها، میزان جذب در طول موج ۵۱۵

شعله‌ای و به وسیله دستگاه فلیم‌فوتومتر تعیین شد (۲۷). همچنین، سنجش محتوای نیتروژن گیاه با استفاده از روش کجلدال، که شامل مراحل هضم، تقطیر و تیتراسیون بود، انجام گردید (۲۸).

محاسبه عملکرد دانه: در مرحله رسیدگی گیاه لوبیا قرمز، که با قهوه‌ای شدن برگ‌ها و غلاف‌ها و کاهش رطوبت دانه‌ها مشخص می‌شود، عملیات برداشت نهایی انجام گرفت. با حذف اثرات حاشیه‌ای، برداشت تنها از سطحی معادل دو متر مربع صورت پذیرفت و با محاسبه و تعیین اجزای عملکرد، عملکرد نهایی دانه در واحد سطح یادداشت گردید.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ صورت گرفت. برای مقایسه میانگین تیمارها، آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد به کار گرفته شد. همچنین، تجزیه اثرات متقابل تیمارها بر اساس روش L.S. Means انجام پذیرفت.

نتایج و بحث

محتوای پرولین برگ: تجزیه واریانس بیانگر معنی‌داری برهم‌کنش دوگانه رژیم آبیاری $\times$ اسید هیومیک در سطح احتمال خطای یک درصد بر محتوای پرولین برگ دارد (جدول ۳). مقایسه میانگین نشان داد در هر دو سطح آبیاری ۸۰ و ۶۰ درصد بیشترین محتوای پرولین برگ با میانگین‌های ۴/۰۳ و ۵/۴ میکرومول بر گرم وزن تر برگ از تیمار محلول‌پاشی ۷/۵ لیتر اسید هیومیک در هکتار و کم‌ترین آن از عدم محلول‌پاشی اسید هیومیک (شاهد) به دست آمد که به ترتیب با یکدیگر اختلاف ۳۸/۰۱ و ۵۶/۹۷ درصدی را نشان دادند. در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد، تیمارها تفاوت معنی‌داری نداشتند (جدول ۴).

غلظت ۰/۱ میلی‌مولار، متیونین (۱۳ میلی‌مولار)، نیتروبولوتترازولیوم (NBT) با غلظت ۷۵ میکرومولار، ریوفلاوین (۴ میکرومولار) و ۵۰ میکرولیتر از عصاره آنزیمی بود. این مخلوط به مدت ۱۵ دقیقه در معرض نور با شدت تقریبی ۸۰۰۰ لوکس قرار گرفت. سپس میزان جذب در طول موج ۵۶۰ نانومتر با اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (۲۳).

اندازه‌گیری محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی: برای اندازه‌گیری رنگیزه‌های کلروفیلی، برگ‌های تازه و کاملاً توسعه‌یافته در شرایط نوری ضعیف و دمای پایین، همراه با ۸۰ درصد استون و مقدار مناسبی از پودر کربنات کلسیم، در هاون چینی آسیاب و همگن‌سازی شدند. سپس این مخلوط سانتیفریوژ شده و عصاره حاصل با استون ۸۰ درصد رقیق گردید. غلظت کلروفیل‌های a و b بر اساس روش آرنون (۱۹۴۹) با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج‌های ۶۶۳ و ۶۴۵ نانومتر اندازه‌گیری شد (۲۴). شاخص سبزینه‌گی برگ نیز، به عنوان نمایه‌ای غیرمستقیم از میزان کلروفیل کل برگ، در ساعات ابتدایی صبح و از برگ‌های جوان گیاه اندازه‌گیری شد. برای این منظور، از دستگاه کلروفیل‌متر SPAD-502 ساخت شرکت مینولتا، ژاپن استفاده گردید. این دستگاه با بهره‌گیری از تفاوت در جذب و عبور نور مادون قرمز و قرمز، محتوای کلروفیل را برآورد می‌نماید (۲۵).

اندازه‌گیری محتوای عناصر پرمصرف دانه: برای تعیین میزان عناصر غذایی فسفر و پتاسیم، ابتدا عصاره نمونه‌ها از طریق روش هضم خشک تهیه شد. اندازه‌گیری فسفر به کمک تکنیک رنگ‌سنجی (کالریمتری) با استفاده از واکنش زرد رنگ مولیبدات-وانادات و بهره‌گیری از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Lambda EZ 210 در طول موج ۴۲۰ نانومتر صورت گرفت (۲۶). مقدار پتاسیم نیز از طریق روش نشر

در هکتار نیز نسبت به شاهد با افزایش ۲۸/۷۲ درصدی همراه بود (جدول ۵).

در این پژوهش، افزایش شدت کم آبیاری منجر به افزایش معنی دار غلظت قندهای محلول در لوبیا قرمز شد. این انباشت قندها در شرایط تنش، علاوه بر نقش مهمی که در تأمین انرژی دارد، با کاهش پتانسیل اسمزی به گیاه کمک کرده تا روند جذب آب را ادامه داده و به این ترتیب در تحمل به خشکی مؤثر باشد. همسو با این یافته‌ها، پژوهشگران نیز افزایش قندهای محلول را در لوبیا لیما تحت تنش خشکی گزارش کرده‌اند (۳۱). علاوه بر این، نتایج ما نشان داد که کاربرد اسید هیومیک نیز به افزایش معنی دار محتوای قندهای محلول منجر شده است. این افزایش را می‌توان به نقش‌های چندگانه هیومیک اسید در بهبود متابولیسم گیاه نسبت داد. اسید هیومیک با تقویت سامانه ریشه‌ای و افزایش جذب عناصر غذایی، به‌طور غیرمستقیم مسیرهای متابولیک تولید کربوهیدرات‌ها را تحریک می‌کند. همچنین، فعالیت شبه‌هورمونی این ماده می‌تواند به‌طور مستقیم بر روند تنفس سلولی و ستر قندها تأثیرگذار باشد (۱۰). این سازوکارها به گیاه کمک می‌کنند تا در شرایط تنش، منابع کافی برای تولید اسمولیت‌های لازم جهت مقابله با خشکی را در اختیار داشته باشد.

فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز: تجزیه واریانس اثر دو گانه رژیم آبیاری $\times$ اسید هیومیک در سطح احتمال خطای یک درصد بر محتوای آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز معنی دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در سه سطح رژیم آبیاری بیشترین فعالیت این آنزیم با محلول‌پاشی ۷/۵ لیتر اسید هیومیک در هکتار حاصل شد و از این جهت به نسبت شاهد با افزایش ۴۳/۱۸، ۷۹/۵۴ و ۷۰/۴۳ درصدی همراه بود (جدول ۴).

در این پژوهش، کم آبیاری باعث افزایش معنی دار میزان پرولین در گیاهان لوبیا قرمز شد. این نتیجه با یافته‌های پژوهش‌های پیشین که نقش پرولین را به عنوان یک اسمولیت سازگار در پاسخ به تنش خشکی در گیاهانی مانند لوبیا سیاه نشان داده‌اند، همخوانی دارد (۲۹). تجمع پرولین در سلول‌های گیاهی، از طریق تنظیم تعادل اسمزی و محافظت از غشاهای سلولی کمک می‌کند تا گیاه با کاهش پتانسیل آب سلول، از آسیب‌های ناشی از تنش خشکی در امان بماند. بر همین اساس در این نتایج، افزایش پرولین تحت تیمارهای ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی، نشان‌دهنده واکنش دفاعی گیاه در برابر تنش‌های اعمالی بود. محلول‌پاشی اسید هیومیک نیز با بهبود جذب عناصر مغذی (به‌ویژه نیتروژن)، منجر به تحریک مسیرهای بیوسنتز پرولین شده و در نتیجه، تحمل‌پذیری گیاه را در شرایط تنش افزایش می‌دهد. در این راستا بهشتی و تدین (۲۰۱۸) گزارش کردند در لوبیا لیما، بیشترین تجمع پرولین (۱۱/۵۶ میکرومول بر گرم وزن تر) در شرایط آبیاری پس از ۱۱۰ میلی‌متر تبخیر همراه با مصرف ۶ لیتر در هکتار اسید هیومیک مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار آن در شاهد (فاقد تنش و فاقد اسید هیومیک) ثبت گردید (۳۰).

محتوای قندهای محلول برگ: اثرات اصلی رژیم آبیاری و اسید هیومیک در سطح احتمال خطای یک درصد بر محتوای قندهای محلول برگ معنی دار شد (جدول ۳). در سطوح رژیم آبیاری بیشترین محتوای قندهای محلول برگ در تیمار آبیاری ۶۰ درصد با میانگین ۱۸/۹ میلی گرم بر گرم وزن تر برگ حاصل شد که موجب افزایش ۳۳/۹۴ درصدی محتوای قندهای محلول برگ نسبت به آبیاری کامل شد (جدول ۵). کاربرد محلول‌پاشی ۷/۵ لیتر اسید هیومیک

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات متقابل رژیم آبیاری و محلول‌پاشی اسید هیومیک بر محتوای پرولین و فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در لوبیا قرمز رقم یاقوت.

Table 4. Comparison of means for the interaction effects of irrigation regime and humic acid foliar application on proline content and superoxide dismutase enzyme activity in red bean cultivar Yaqout.

رژیم آبیاری Irrigation regime	اسید هیومیک (لیتر در هکتار) Humic acid (L ha ⁻¹)	پرولین (میکرومول بر گرم وزن تر) Prolin (μmol g ⁻¹ FW)	فعالیت سوپراکسید دیسموتاز (میلی‌مول بر گرم در دقیقه) SOD activity (mmol g ⁻¹ min)
۱۰۰ درصد نیاز آبی 100 % water requirement	0	2.37 ^a	1.32 ^d
	2.5	2.42 ^a	1.53 ^c
	5	2.58 ^a	1.73 ^b
	7.5	2.42 ^a	1.89 ^a
۸۰ درصد نیاز آبی 80 % water requirement	0	2.92 ^c	1.32 ^d
	2.5	3.31 ^b	1.83 ^c
	5	3.89 ^{ab}	2.12 ^b
	7.5	4.03 ^a	2.37 ^a
۶۰ درصد نیاز آبی 60 % water requirement	0	3.44 ^d	1.86 ^d
	2.5	3.77 ^c	2.61 ^c
	5	4.55 ^b	2.83 ^b
	7.5	5.4 ^a	3.17 ^a

در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف متفاوت در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌داری دارند.

In each column, the averages with different characters are significantly different at the 5% level.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات رژیم آبیاری و محلول‌پاشی اسید هیومیک بر محتوای قندهای محلول، کلروفیل a، b و شاخص کلروفیل در لوبیا قرمز رقم یاقوت.

Table 5. Comparison of means for the effects of irrigation regime and humic acid foliar application on the content of soluble sugars, chlorophyll a, b, and chlorophyll index in red bean cultivar Yaqout.

تیمار Treatment	سطوح تیمار Treatment levels	قندهای محلول (میلی‌گرم بر گرم وزن تر) Soluble sugar (mg g ⁻¹ FW)	کلروفیل a (میلی‌گرم بر گرم وزن تر) Chlorophyll a (mg g ⁻¹ FW)	کلروفیل b (میلی‌گرم بر گرم وزن تر) Chlorophyll b (mg g ⁻¹ FW)	شاخص کلروفیل Chlorophyll Index
رژیم آبیاری Irrigation regime	۱۰۰ درصد نیاز آبی 100 % water requirement	14.11 ^c	0.169 ^a	0.129 ^a	43.44 ^a
	۸۰ درصد نیاز آبی 80 % water requirement	16.55 ^b	0.114 ^b	0.105 ^b	41.96 ^b
	۶۰ درصد نیاز آبی 60 % water requirement	18.9 ^a	0.091 ^c	0.061 ^c	39.95 ^c
اسید هیومیک (لیتر در هکتار) Humic acid (L.ha ⁻¹)	0	14.31 ^c	0.096 ^c	0.084 ^c	39.71 ^c
	2.5	16.33 ^b	0.104 ^c	0.08 ^c	41.29 ^{bc}
	5	17.03 ^b	0.139 ^b	0.102 ^b	42.65 ^{ab}
	7.5	18.42 ^a	0.159 ^a	0.0128 ^a	43.48 ^a

در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف متفاوت در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌داری دارند.

In each column, the averages with different characters are significantly different at the 5% level.

آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD) به‌عنوان یکی از نخستین سامانه‌های آنزیمی دفاع آنتی‌اکسیدانی، نشان‌دهنده راهبرد مؤثر گیاه در مهار اثرات مخرب

تولید بیش‌ازحد گونه‌های فعال اکسیژن موجب برهم‌خوردن تعادل اکسیداتیو و آسیب به ساختارهای یاخته‌ای می‌شود. در چنین شرایطی، افزایش فعالیت

رادیكال‌های آزاد است. هم‌راستا با پژوهش حاضر تحقیق میری و همکاران (۲۰۲۱) بر لوبیا چشم‌بلبلی، گویای آن است که بیشینه فعالیت SOD از تیمار تنش شدید ۹۰ میلی‌متر تبخیر حاصل شد (۳۲). در پژوهش حاضر، محلول‌پاشی اسید هیومیک سبب ارتقاء معنی‌دار فعالیت آنزیم SOD در گیاه لوبیاقرمز شد. به‌نظر می‌رسد این اثر نه‌تنها از طریق بهبود تغذیه عناصر کلیدی مؤثر در ساختار یا فعالیت آنزیم توجیه‌پذیر است بلکه با تعدیل تجمع هورمون آبسزیک اسید نیز در ارتباط است که می‌تواند از تشدید سیگنال‌های تنش‌زا جلوگیری نماید (۳۳). یافته‌های مشابهی در سیاهدانه نیز گزارش شده است، که بیشترین فعالیت SOD در تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر اسید هیومیک مشاهده گردید (۳۴). یافته‌های مذکور بر نقش چندوجهی اسید هیومیک در تقویت پاسخ‌های آنتی‌اکسیدانی گیاهان تحت تنش تأکید دارد.

محتوای کلروفیل a و b برگ و شاخص کلروفیل برگ: اثرات اصلی رژیم آبیاری و محلول‌پاشی اسید هیومیک در سطح احتمال یک درصد بر محتوای کلروفیل a و b برگ معنی‌دار شد (جدول ۳). بیشترین میزان کلروفیل a و b در سطح آبیاری کامل با میانگین‌های ۰/۱۶۹ و ۰/۱۲۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ و کم‌ترین آن در سطح آبیاری ۶۰ درصد مشاهده شد که کاهش ۴۶/۱۵ و ۵۲/۷۱ درصدی محتوای این صفات را بروز داد. از سوی دیگر محلول‌پاشی ۷/۵ لیتر اسید هیومیک در هکتار در مقایسه با شاهد موجب افزایش ۶۵/۶۲ و ۵۲/۳۸ درصدی محتوای کلروفیل a و b شد (جدول ۵). همچنین مطابق با جدول ۳ هر یک از اثرات اصلی رژیم آبیاری و اسید هیومیک در سطح احتمال خطای یک درصد بر شاخص کلروفیل برگ معنی‌دار بود. جدول ۵ نیز حاکی از آن است که این صفت تحت تنش شدید با کاهش ۸/۰۳ درصد مواجه شد، اما اعمال بالاترین سطح محلول‌پاشی اسید

هیومیک با افزایش ۹/۴۹ درصدی به مقدار زیادی این کاهش را جبران نمود.

پایداری کلروفیل و تداوم فتوسنتز، از شاخص‌های کلیدی تحمل فیزیولوژیکی به تنش خشکی محسوب می‌شوند. تحت تنش کم‌آبی، کاهش آب‌رسانی یاخته‌ای، اختلال در تحرکات کلروپلاستی و فعالیت سامانه‌های آنزیمی آنتی‌اکسیدان، موجب افزایش پراکسیداسیون لیپیدی و تخریب رنگدانه‌ها شده (۳۵)؛ در نهایت به دنبال افزایش کلروفیل‌از و افت فعالیت فتوسیستم II، کارایی فتوسنتزی نیز به‌شدت کاهش می‌یابد (۳۶). علیرغم واکنش تدافعی گیاهان با ضخیم‌تر شدن برگ‌ها و افزایش غلظت نسبی رنگدانه‌ها، فتوسنتز کل کم می‌شود، نتایج حاضر نیز کاهش شاخص کلروفیل را با افزایش شدت تنش تأیید می‌کند. از دیگر سو، با توجه به اشتراک پیش‌ماده گلوتامات در مسیرهای بیوسنتزی پرولین و کلروفیل، تحت تنش خشکی اولویت متابولیکی گیاه به‌سمت افزایش پرولین به‌عنوان اسمولیت سازگار سوق یافته و در نتیجه سنتز کلروفیل محدود می‌شود (۳۷)؛ یافته‌ای که در پژوهش حاضر نیز مشاهده گردید.

ساختار کلروفیل به‌طور مستقیم وابسته به حضور عناصر پرمصرفی نظیر نیتروژن و فسفر است؛ بر این اساس اسید هیومیک با افزایش توان کلات‌کنندگی و جذب عناصر غذایی، شرایط تغذیه‌ای گیاه را بهبود بخشیده و از طریق حفظ سنتز کلروفیل، موجب ارتقاء کارایی فتوسنتزی و افزایش پایداری رنگدانه‌ها در شرایط تنش شده است (۳۸). همچنین در این رابطه مواد هیومیکی با افزایش فعالیت آنزیم‌های درگیر در مسیر آسیمیلاسیون نیتروژن، می‌توانند موجب بهبود جذب نیتروژن به‌عنوان یکی از عناصر دخیل در بیوسنتز کلروفیل شوند (۳۹). در راستای این نتایج، افزایش معنی‌داری محتوای کلروفیل a و b در لوبیا

قرمز سهم عمده‌ای در تغذیه نیتروژنی گیاه ایفا می‌کند. به دنبال آن، کارایی فتوسنتزی نیز بهبود یافته و ترکیبات نیتروژنه بیشتری تولید و به بذرها منتقل می‌شوند. افزون بر این، بخشی از نیتروژن ذخیره‌شده در اندام‌های رویشی طی فرآیند انتقال مجدد در مراحل پایانی رشد به سمت دانه‌ها منتقل می‌شود. بنابراین، افزایش نیتروژن در دانه نه تنها به دلیل جذب بیشتر از خاک بلکه حاصل بازتوزیع درون‌گیاهی کارآمد نیتروژن نیز خواهد بود. مطابق با این نتایج بیشترین محتوای نیتروژن دانه لوبیا قرمز در شرایط بدون تنش آبی مشاهده شده، در حالی که تیمار قطع آبیاری در مرحله گلدهی منجر به افت قابل توجه این صفت گردیده است (۴۰). همچنین نتایج مطالعه ناصری‌نژاد و همکاران (۲۰۲۵) در نخود زراعی، افزایش ۵۰/۳ درصدی نیتروژن دانه تحت تیمار مصرف خاکی + دوبار محلول‌پاشی اسید هیومیک نسبت به شاهد را گزارش کرده‌اند (۴۱) که با یافته‌های این تحقیق در لوبیا قرمز هم‌راستا است.

قرمز (۱۳) و شاخص کلروفیل در نخود (۱۸) تحت کاربرد اسید هیومیک گزارش شده است.

محتوای نیتروژن دانه: تجزیه واریانس نشانگر معنی‌داری برهم‌کنش اسید هیومیک × رژیم آبیاری در سطح احتمال خطای پنج درصد بر درصد نیتروژن دانه بود (جدول ۶). درصد نیتروژن دانه با افزایش تنش کم‌آبیاری، کاهش یافت اما محلول‌پاشی اسید هیومیک این روند را بهبود بخشید. در سطوح آبیاری ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد، تیمار کاربرد ۷/۵ لیتر اسید هیومیک در مقایسه با عدم محلول‌پاشی موجب افزایش ۸/۷۱، ۷/۹۳ و ۱۲/۵ درصدی نیتروژن دانه شد (جدول ۷).

تأثیر مثبت اسید هیومیک بر افزایش محتوای نیتروژن دانه در گیاه لوبیا قرمز را می‌توان به بهبود فراهمی، جذب و انتقال نیتروژن در سراسر گیاه نسبت داد. اسید هیومیک با افزایش توانایی کلات‌کنندگی و بهبود ساختار خاک، فراهمی عناصر غذایی به‌ویژه نیتروژن را برای ریشه‌ها افزایش داده و از طریق تحریک رشد ریشه و ارتقاء جذب عناصر پرمصرف،

جدول ۶- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر رژیم آبیاری و اسید هیومیک بر محتوای عناصر پرمصرف دانه و عملکرد دانه در لوبیا قرمز رقم یاقوت.

Table 6- Analysis of variance (mean square) of the effect of irrigation regime and humic acid on seed macroelement content and grain yield in red bean cultivar Yaqout.

منابع تغییرات	درجه آزادی	نیتروژن دانه	فسفر دانه	پتاسیم دانه	عملکرد دانه
S.O.V	df	N Seed	P Seed	K Seed	Grain Yield
تکرار	2	0.00011 ^{ns}	0.0001*	0.00004 ^{ns}	1738 ^{ns}
Replication					
رژیم آبیاری	2	0.06**	0.015**	0.61**	164923**
Irrigation regime (I)					
خطای اصلی	4	0.00015	0.00006	0.003	1526
Main plot error					
اسید هیومیک	3	0.05**	0.003**	0.11* ⁸	502681**
Humic acid (H)					
I × H	6	0.001*	0.00003 ^{ns}	0.0038 ^{ns}	24264**
خطای فرعی	18	0.0005	0.00002	0.005	2399
Subplot error					
ضریب تغییرات (درصد)		1.17	0.51	6.06	2.21
CV (%)					

^{ns}، * و ** به ترتیب عدم وجود اختلاف معنی‌دار و معنی‌داری در سطوح احتمال ۵٪ و ۱٪ را نشان می‌دهد.

ns, * and **: Non-significant and significant at the 5% and 1% probability levels, respectively.

جدول ۷- مقایسه میانگین اثرات متقابل رژیم آبیاری و محلول پاشی اسید هیومیک بر محتوای نیتروژن دانه و عملکرد دانه در لوبیا قرمز رقم یاقوت.

Table 7. Comparison of means for the interaction effects of irrigation regime and humic acid foliar application on seed nitrogen content and grain yield in red bean cultivar Yaqout.

رژیم آبیاری Irrigation regime	اسید هیومیک (لیتر در هکتار) Humic acid (L ha ⁻¹)	نیتروژن دانه (%) N Seed (%)	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) Grain Yield (kg ha ⁻¹)
۱۰۰ درصد نیاز آبی 100 % water requirement	0	3.9 ^c	2010 ^d
	2.5	4 ^c	2110 ^c
	5	4.14 ^b	2301 ^b
	7.5	4.24 ^a	2762 ^a
۸۰ درصد نیاز آبی 80 % water requirement	0	3.78 ^c	2021 ^d
	2.5	3.84 ^c	2181 ^c
	5	3.92 ^b	2283 ^b
	7.5	4.08 ^a	2513 ^a
۶۰ درصد نیاز آبی 60 % water requirement	0	3.52 ^d	1907 ^c
	2.5	3.74 ^c	1976 ^c
	5	3.86 ^b	2110 ^b
	7.5	3.96 ^a	2301 ^a

در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف متفاوت در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌داری دارند.

In each column, the averages with different characters are significantly different at the 5% level.

آلی از طریق افزایش فعالیت آنزیم فسفاتاز، حل‌پذیری فسفات‌های نامحلول را بهبود داده و فراهمی فسفر قابل جذب را برای گیاه افزایش می‌دهد (۴۳). علاوه بر آن، خواص شبه‌هورمونی اسید هیومیک با تقویت سامانه ریشه‌ای و افزایش سطح جذب، شرایط مطلوب‌تری برای دسترسی گیاه به منابع محدود فسفر فراهم می‌سازد. نتایج حاضر هم‌راستا با یافته‌های وفاعهد و همکاران (۲۰۲۴) در گیاه سیاهدانه است که افزایش معنی‌دار فسفر دانه در تیمار اسید هیومیک (۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر) را گزارش کردند (۴۴).

محتوای پتاسیم دانه: تجزیه واریانس نشان داد اثرات اصلی رژیم آبیاری و اسید هیومیک در سطح احتمال خطای یک درصد بر درصد پتاسیم دانه معنی‌دار بود (جدول ۶). مقایسه میانگین سطوح رژیم آبیاری نشان داد سطح آبیاری ۶۰ درصد، موجب افزایش ۴۵/۹۱ درصدی محتوای پتاسیم دانه شد (جدول ۸). همچنین کاربرد محلول پاشی ۷/۵ لیتر در هکتار نیز در مقایسه با شاهد افزایش ۲۵/۲۳ درصدی را نشان داد (جدول ۸).

محتوای فسفر دانه: اثرات اصلی رژیم آبیاری و اسید هیومیک در سطح احتمال خطای یک درصد بر درصد فسفر دانه معنی‌دار بود (جدول ۶). بر اساس جدول ۸ بیشترین مقدار درصد فسفر دانه از تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد مشاهده شد که در مقایسه با آبیاری ۶۰ درصد اختلاف ۶/۵۴ درصدی داشت. مقایسه میانگین اثر اسید هیومیک نیز نشان داد که سطح ۷/۵ لیتر در هکتار به میزان ۴/۳۰ درصد از شاهد برتری نشان داد (جدول ۸). کاهش رشد ریشه در گیاه لوبیا قرمز تحت شرایط تنش کم‌آبی یکی از عوامل اصلی محدودکننده جذب فسفر از خاک است؛ زیرا فسفر به دلیل تحرک محدود در بافت خاک، نیازمند گسترش سطح ریشه برای دسترسی به منابع آن است. در چنین شرایطی، محدودیت توسعه ریشه به‌طور مستقیم منجر به کاهش جذب فسفر می‌گردد. یافته‌های کرامتی و همکاران (۲۰۲۱) نیز در لوبیا چشم بلبلی نشان داد کم‌ترین مقدار فسفر دانه در تیمار قطع آبیاری از مرحله گلدهی مشاهده شد (۴۲). در این راستا، اسید هیومیک به‌عنوان محرک رشد ریشه و تعدیل‌کننده شیمی خاک، نقش مؤثری در افزایش جذب فسفر ایفا می‌کند. این ترکیب

جدول ۸- مقایسه میانگین اثرات رژیم آبیاری و محلول‌پاشی اسید هیومیک بر محتوای فسفر و پتاسیم دانه در لوبیا قرمز رقم یاقوت.
Table 8. Comparison of means for the effects of irrigation regime and humic acid foliar application on seed content of phosphorus and potassium in red bean cultivar Yagout.

تیمار	سطوح تیمار	فسفر دانه (%)	پتاسیم دانه (%)
Treatment	Treatment levels	P Seed (%)	K Seed (%)
رژیم آبیاری Irrigation regime	۱۰۰ درصد نیاز آبی 100 % water requirement	1.07 ^a	0.98 ^c
	۸۰ درصد نیاز آبی 80 % water requirement	1.05 ^b	1.2 ^b
	۶۰ درصد نیاز آبی 60 % water requirement	1 ^c	1.43 ^a
اسید هیومیک (لیتر در هکتار) Humic acid (L.ha ⁻¹)	0	1.023 ^d	1.07 ^d
	2.5	1.033 ^c	1.15 ^c
	5	1.049 ^b	1.24 ^b
	7.5	1.067 ^a	1.34 ^a

در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف متفاوت در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌داری دارند.

In each column, the averages with different characters are significantly different at the 5% level.

عملکرد دانه: برهم‌کنش دوگانه رژیم آبیاری × اسید هیومیک در سطح احتمال خطای یک درصد بر عملکرد دانه معنی‌دار شد (جدول ۶). بر مبنای مقایسه میانگین‌ها در سطوح آبیاری ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد کاربرد محلول‌پاشی ۷/۵ لیتر اسید هیومیک در هکتار موجب افزایش ۳۷/۴۱، ۲۴/۳۴ و ۲۰/۶۶ درصدی عملکرد دانه به نسبت شاهد (عدم محلول‌پاشی) شد (جدول ۷).

کم‌آبیاری با تأثیرات چندگانه خود بر فرآیندهای فیزیولوژیک گیاه، مستقیماً بر عملکرد نهایی اثرگذار است. اولین واکنش گیاه به کاهش پتانسیل آب خاک، بسته‌شدن روزنه‌ها است تا از اتلاف آب جلوگیری کند. این سازوکار دفاعی، با محدود کردن تبادلات گازی، به‌شدت نرخ فتوسنتز و تولید ترکیبات کربوهیدراتی (آسیمیلات‌ها) را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، کمبود آب به کاهش جذب عناصر غذایی پرمصرف از خاک منجر می‌شود که برای فرآیندهای متابولیکی کلیدی ضروری هستند. این اختلال تغذیه‌ای، همراه با کاهش فعالیت آنزیم‌های اصلی فتوسنتز، موجب افت رشد اندام‌های فتوسنتزکننده و

در این پژوهش، افزایش غلظت پتاسیم در دانه گیاهان تحت تنش خشکی، عمدتاً ناشی از انتقال مجدد این عنصر از اندام‌های رویشی به سمت اندام‌های زایشی در مراحل پایانی رشد است. این فرآیند، به عنوان یک پاسخ تطبیقی به کم‌آبی عمل می‌کند؛ زیرا پتاسیم نقشی حیاتی در حفظ فشار تورژسانس سلول‌ها و تنظیم اسمزی بافت‌های در حال رشد دانه ایفا می‌کند. این سازوکار به گیاه کمک می‌کند تا با تأمین منابع حیاتی، به بقای سلولی در اندام‌های کلیدی برای تولید مثل ادامه دهد. پژوهشی در سیاهدانه نشان داد قطع آبیاری از مرحله گلدهی منجر به افزایش ۷/۱۰ درصدی پتاسیم دانه نسبت به شاهد گردید (۴۵)؛ این امر تأکیدی بر نقش پتاسیم به‌عنوان یک عامل دفاعی در شرایط تنش آبی است. کاربرد اسید هیومیک نیز با ارتقاء قابلیت جذب عناصر غذایی، از جمله پتاسیم و تسهیل انتقال آن درون گیاه، اثر مثبتی بر غلظت این عنصر در دانه‌ها برجای گذاشت. این نتایج با یافته‌های دوندر و توگای (۲۰۲۱) در نخود هم‌راستا است، که ارتباط مستقیم کاربرد اسید هیومیک با افزایش جذب پتاسیم دانه را گزارش کردند (۴۶).

نتیجه‌گیری کلی

یافته‌های پژوهش به‌وضوح نشان داد تنش کم‌آبایی در طول دوره رشد لوبیا قرمز، با مختل کردن فرآیندهای فیزیولوژیک کلیدی، موجب کاهش معنی‌دار عملکرد نهایی شد. افزایش ترکیباتی مانند پرولین و قندهای محلول، در کنار کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی و غلظت عناصر غذایی در دانه، نشانگر پاسخ‌های منفی گیاه به تنش بود که به افت تولید آسیمیلات‌ها و انتقال آن‌ها به مخزن نهایی (دانه) ختم شد. در مقابل، محلول‌پاشی اسید هیومیک با مصرف ۷/۵ لیتر در هکتار، با تعدیل مؤثر این پاسخ‌ها، به بهبود عملکرد نهایی کمک شایانی کرد. این ماده با حفظ بالاتر محتوای کلروفیل و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نظیر SOD، از آسیب‌های اکسیداتیو جلوگیری کرده و کارایی فتوسنتزی را حفظ نمود. همچنین، نقش اسید هیومیک در بهبود جذب و انتقال مؤثر عناصر غذایی، به پرشدن بهتر دانه‌ها و افزایش عملکرد دانه انجامید. این ارتباط مستقیم میان بهبود صفات فیزیولوژیک با عملکرد نهایی، نشان می‌دهد که در شرایط آزمایش حاضر اسید هیومیک به عنوان یک تعدیل‌کننده زیستی، راه‌حل مؤثری برای ارتقاء تولید لوبیا قرمز تحت تنش کم‌آبی بوده است. به‌طور کلی محلول‌پاشی ۷/۵ لیتر اسید هیومیک در هکتار، در تعدیل اثرات منفی تنش آبی و ارتقاء عملکرد گیاه نقش مؤثری ایفا نمود.

در نهایت کاهش انباشت ماده خشک در گیاه می‌شود. همچنین تنش کم‌آبی به افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن می‌انجامد که به عنوان رادیکال‌های آزاد، موجب آسیب‌های اکسیداتیو به سلول‌ها و تخریب کلروفیل می‌شوند. در نتیجه، کارایی سامانه فتوسنتزی کاهش یافته و در صورت ناتوانی سامانه آنتی‌اکسیدانی، آسیب‌های جدی به غشاهای سلولی و سایر اندامک‌ها وارد می‌گردد. تمامی این عوامل فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در نهایت به کاهش چشمگیر عملکرد دانه لوبیا قرمز در این آزمایش منجر شد، یافته‌ای که توسط حسنی و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی بر لوبیا قرمز رقم گلی و لوبیا یام مکزیکی نیز تأیید شده است (۴۷). علاوه بر این، اسید هیومیک به صورت مستقیم بر رشد ریشه تأثیر می‌گذارد؛ به‌طوری که با افزایش سطح جذب ریشه، موجب جذب بیشتر آب و عناصر غذایی می‌شود و به کارایی بالاتر گیاه در بهره‌برداری از منابع خاک کمک می‌کند. از منظر فیزیولوژیک، اسید هیومیک با تحریک فعالیت آنزیم‌های کلیدی مانند SOD و افزایش کارایی فتوسنتز، منجر به تولید بیشتر آسیمیلات‌ها و انتقال مؤثر آن‌ها به مخازن ذخیره‌ای (دانه‌ها) می‌شود که در نهایت افزایش عملکرد دانه را به دنبال دارد. یافته‌های ملکی و همکاران (۲۰۲۱) همسو با این آزمایش نشان داد کاربرد اسید هیومیک با غلظت ۴ در هزار، بالاترین عملکرد دانه را در گیاه نخود به دنبال داشته است (۴۸).

References

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). FAOSTAT: Crops and livestock products (QCL). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
2. Bayati, K., Majnoon Hosseini, N., Moghadam, H., & Basiri, R. (2018). Effects of drought stress and nitrogen on grain yield and some agronomic traits of red kidney bean cultivars. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 48(4), 1069–1081. [In Persian].
3. Majnoun Hosseini, N. (2008). *Grain legume production* (in Farsi). Tehran: Jihad-Daneshghahi Publications, University of Tehran. (p. 283) [In Persian].
4. Bandurska, H. (2022). Drought stress responses: Coping strategy and resistance. *Plants*, 11(7), 922.

5. Tanhaie, R., Yadavi, A., Movahhedi Dehnavi, M., Salehi, A., Rafiee, S., & Hamidian, M. (2022). The effect of mycorrhizal fungi and phosphorus solubilizing bacteria on physiological traits and grain yield of red bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in different irrigation regimes. *Journal of Crop Production*, 15(4), 39–60. [In Persian].
6. Ozturk, M., Turkyilmaz Unal, B., García-Caparrós, P., Khursheed, A., Gul, A., & Hasanuzzaman, M. (2021). Osmoregulation and its actions during the drought stress in plants. *Physiologia Plantarum*, 172(2), 1321–1335.
7. Samfar, S., Latifmanesh, H., Moradi, A., Mirshekari, A., & Alahdadi, H. (2024). The effect of 24-Epibrassinolide foliar application on the enzymatic and non-enzymatic defense system and yield of pinto beans (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Pinto) under low irrigation stress. *Plant Productions*, 47(4), 543–560. [In Persian].
8. Hu, W.H., Yan, X.H., Xiao, Y.A., Zeng, J.J., Qi, H.J., & Ogwen, J.O. (2013). 24-Epibrassinosteroid alleviates drought-induced inhibition of photosynthesis in *Capsicum annuum*. *Scientia Horticulturae*, 150, 232–237.
9. Gholami, F., Amerian, M. R., Asghari, H.R., & Ebrahimi, A. (2025). Evaluating the impact of yeast extract and 24-epi-brassinolid treatments on physiological characteristics and yield of cowpea (*Vigna unguiculata*) subjected to irrigation condition. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 56(1), 1–22. [In Persian].
10. Kazem Alilou, M., Roshdi, M., Rezadust, S., & Khalili Mahaleh, J. (2024). Evaluation of the biochemical characteristics of red beans (*Phaseolus vulgaris* L.) and seed protein under different levels of irrigation and growth stimulating compounds. *Crop Science Research in Arid Regions*, 6(2), 541–558. [In Persian].
11. Rashidi, Z., Bannayan Aval, M., Azizi, K., & Nasiri Mahalati, M. (2022). Effect of drought stress on yield and yield components and radiation use efficiency of three types of red, white and pinto beans. *Journal of Plant Production Research*, 29(3), 143–164. [In Persian].
12. Rezazadeh, H., Khrasani, S., & Haghighi, R. (2012). Effects of humic acid on decrease of phosphorus usage in forage maize var. KSC704 (*Zea mays* L.). *Australian Journal of Agricultural Engineering*, 3, 34–38.
13. Jabbari Badkhor, Z., Dadkhah, A., & Rezvani, R. (2024). Investigation of the effect of sulphurous humic acid and plant density on the growth and yield of red beans (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivar. *Iranian Journal of Pulses Research*, 15(1), 233–247. [In Persian].
14. Nahidan, S., & Movahed, S. (2025). The effect of phosphate solubilizing fungi, humic acid and phosphorus sources on growth and phosphorus uptake of tomato plant. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56(2), 433–444. [In Persian].
15. Karimi, E., Shirmardi, M., Dehestani Ardakani, M., Gholamnezhad, J., & Zarebanadkouki, M. (2020). The effect of humic acid and biochar on growth and nutrients uptake of calendula (*Calendula officinalis* L.). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(12), 1658–1669.
16. Jahandideh, A., Barani, M., Dordipour, E., & Ghorbani Nasrabadi, R. (2020). The effect of humic acid on the availability of phosphorus fertilizer and some physiological traits of rapeseed (canola). *Water and Soil*, 33(6), 873–884. [In Persian].
17. Hossinzadeh, N., & Pirzad, A. (2024). Biochemical response and nutrient uptake of common bean to humic acid and phosphorus sources (biological and chemical) under deficit irrigation. *Journal of Crops Improvement*, 26(4), 805–824. [In Persian].
18. Seyed Sharifi, R., & Seyedsharifi, R. (2025). Effects of supplementary irrigation and some stress modifiers (vermicompost, nano iron oxide, and humic acid) on grain filling components, nodulation and grain yield of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under rainfed conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 23(1), 91–108. [In Persian].
19. Roudgarnezhad, S., Sam Deliri, M., Mousavi Mirkalaei, A.A., & Neshae Moghaddam, M. (2018). The effect of spraying humic acid on some morphological and physiological traits of bean (*Vicia faba* L.). *Journal of Plant Environmental Physiology*, 49(13), 33–42. [In Persian].
20. Anonymous. (2020). *Guidelines for certified bean production*. Seed and Plant Certification and Registration Research Institute. [In Persian].

21. Paquine, R., & Lechasseur, P. (1979). Observations sur une méthode de dosage de la libre dans les de plantes. *Canadian Journal of Botany*, 57, 1851–1854.
22. Irigoyen, J.J., Emerich, D.W., & Sanchez-Diaz, M. (1992). Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa*) plants. *Physiologia Plantarum*, 84, 55–60.
23. Beauchamp, C., & Fridovich, I. (1971). Superoxide dismutase: Improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry*, 44(1), 276–287.
24. Arnon, D.I. (1949). Copper enzyme in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24(1), 1–15.
25. Van Kooten, O., & Snel, J.F.H. (1990). The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology. *Photosynthesis Research*, 25, 147–150.
26. Emami, A. (1996). *Methods of plant analysis* (Vol. 982, No. 1, p. 128). Soil and Water Research Institute. [In Persian].
27. Patterson, B., Macrae, E., & Ferguson, I. (1984). Estimation of hydrogen peroxide in plant extracts using titanium (IV). *Annual Biochemical*, 139(2), 487–492.
28. Jones, C.A., Jacobsen, J.S., & Mugaas, A. (2004). Effect of humic acid phosphorus availability and spring wheat yield. *Fertilizer Facts*, No. 32, Extension Service, Montana State University, USA.
29. Keshtegar khajedad, M., Sirousmehr, A., Khammari, I., & Dahmardeh, K. (2023). The Effect of Humic Acid Foliar Application on Morphophysiological Characteristics and Yield of Black Bean Plant Under Different Irrigation Regimes. *Journal of Crops Improvement*, 25(1), 127–142. [In Persian].
30. Beheshti, S., & Tadayyon, A. (2018). Effects of drought stress and humic acid on some physiological parameters of lima bean (*Phaseolus lunatus* L.). *Plant Process and Function*, 6(19), 1–14. [In Persian].
31. Sakr, M.T., Ibrahim, H.M., ElAwady, A.E., & Abo ElMakarem, A.A. (2019). Effect of humic acid, seaweed extract and essential oils as antioxidants on pre-and post-harvest quality of red radish plants. *Horticulture International Journal*, 3(3), 129–138.
32. Miri, G., Ghooshchi, F., Tohidi Moghaddam, H., Larijani, H., & Kasraie, P. (2021). Evaluation of the effects of glycine betaine and gibberellic acid on antioxidant and biochemical traits of cowpea under drought stress conditions. *Plant Process and Function*, 10(42), 313–334. [In Persian].
33. Gorny, M., Bilska-Wilkosz, A., Iciek, M., Hereta, M., Kamińska, K., Kamińska, A., & Lorenc-Koci, E. (2020). Alterations in the antioxidant enzyme activities in the neurodevelopmental rat model of schizophrenia induced by glutathione deficiency during early postnatal life. *Antioxidants*, 9, 1–24.
34. Azizi, S., Zare, N., Sheikhzadeh, P., Azizi Mobser, J., & Karimizadeh, R. (2024). Effects of drought stress and re-irrigation at the flowering stage on the physiological and biochemical responses and yield in promising lentil lines. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 55(1), 123–137. [In Persian].
35. Hosseinzadeh, S.R., Amiri, H., & Ismaili, A. (2016). Effect of vermicompost fertilizer on photosynthetic characteristics of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under drought stress. *Photosynthetica*, 54, 87–92.
36. Khorasaninejad, S., Alizadeh Ahmadabadi, A., & Hemmati, K. (2018). The effect of humic acid on leaf morphophysiological and phytochemical properties of *Echinacea purpurea* L. under water deficit stress. *Scientia Horticulturae*, 239, 314–323.
37. Seyed Sharif, R., & Seyed Sharifi, R. (2019). Effects of different irrigation levels and application of methanol and nano iron oxide on yield and grain filling components of sunflower. *Journal of Crops Improvement*, 21(1), 27–42. [In Persian].
38. Nardi, S., Pizzeghello, D., Muscolo, A., & Vianello, A. (2002). Physiological effects of humic substances on higher plants. *Soil Biology and Biochemistry*, 34, 1527–1536.

39. Hernandez, O.L., Calderín, A., Huelva, R., Martínez-Balmori, D., Guridi, F., Aguiar, N.O., Olivares, F.L., & Canellas, L.P. (2015). Humic substances from vermicompost enhance urban lettuce production. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(1): 225–232.
40. Mirzaei Heydari, M., Fathi, A., & Atashpikar, R. (2024). The effect of chemical and biofertilizer on the nutrient concentration of root, shoot and seed of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under drought stress. *Crop Science Research in Arid Regions*, 5(3), 539–554. [In Persian].
41. Naseri nejad, H., Naeemi, M., Nakhzari Moghaddam, A., & Zarei, M. (2025). Investigating the effect of biochar and humic acid application on nutrient content and grain yield of chickpea. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56(3), 807-823. [In Persian].
42. Keramati, S., Gholami, A., Baradaran, M., & Abbasdokht, H. (2021). The effect of yeast extract on physiological and biochemical indicators of cowpea in drought stress conditions. *Journal of Crops Improvement*, 23(2), 247–261. [In Persian].
43. Yang, F., Sui, L., Tang, C., Li, J., Cheng, K., & Xue, Q. (2021). Sustainable advances on phosphorus utilization in soil via addition of biochar and humic substances. *Science of the Total Environment*, 768, 145106.
44. Vafaahd, F., Khalesro, S., Zareei, S., & Heidari, G. (2024). Response of black cumin (*Nigella sativa* L.) to digested fertilizer and humic acid in the sustainable agricultural system. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 33(4), 99–112. [In Persian].
45. Heidari, M., & Jahantighi, H. (2013). Evaluate effect of water stress and different amounts of nitrogen fertilizer on seed quality of black cumin (*Nigella sativa* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 11(4), 640–647. [In Persian].
46. Donder, E., & Toogay, Y. (2021). The effect of humic acid and potassium applications on the yield and yield components in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, 5(3), 568-574.
47. Hasani, M., Tadayon, M.R., & Olia, M. (2022). The effect of organic and biological fertilizers on the growth and yield of two bean species (*Phaseolus calcaratus* L. and *Pachyrhizus erosus* (L.) Urban) under drought stress. *Journal of Arid Biome*, 12(2), 95–110. [In Persian].
48. Maleki, N., Shakeri Bostanabad, R., Salehi Komroudi, M., & Seyedabadi, S. (2021). Investigating the status of the combined water security index of Iranian provinces in the period of 2012-2017: Application of multi-criteria analysis methods. *Journal of Water and Sustainable Development*, 8(2), 21–32. [In Persian].

