University of Birjand

Environmental Stresses in Crop Sciences

Journal homepage:
https://escs.birjand.ac.ir

https://doi.org/10.22077/escs.2026.9501.2370

Original article

Effects of foliar application of glutamic, nicotinic, and aspartic acids on growth, yield, and physiological traits of fenugreek (Trigonella foenum-graecum L.) under drought stress

Sepideh Dalvand[1], Hasan Mumivand[2, 3*], Bahman Zahedi[4], Abdollah Ehtesham Nia[2]

1. *PhD Student of Horticulture, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran*
2. *Associate Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran*
3. *Associate Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, University of Guilan, Rast, Iran*
4. *Assistant Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran*

Received 29 May 2025; Revised 22 July 2025; Accepted 5 August 2025

Extended abstract

Introduction

Water deficit is a major environmental constraint that limits plant establishment, growth, productivity, and photosynthetic efficiency. Plants exposed to water-deficient conditions often exhibit reduced leaf area and growth, mainly due to decreased turgor pressure, reduced photosynthetic rate, and impaired nutrient uptake by the roots. In recent years, plant biostimulants have gained considerable attention as effective agronomic tools for enhancing plant resilience and tolerance to adverse environmental conditions. Numerous studies have demonstrated that amino acids, as the fundamental building blocks of proteins, can alleviate the detrimental effects of abiotic stresses on plants.

Materials and methods

This study was conducted in the research greenhouse of the Faculty of Agriculture, Lorestan University, to evaluate the effects of biostimulants on the growth, yield, and key biochemical and physiological traits of fenugreek under drought stress. The experiment was conducted as a factorial experiment in a randomized complete block design with four replications. Plants were grown in pots containing a mixture of soil, manure, and sand. Drought stress was imposed at three field capacity (FC) levels (100%, 80%, and 60%). Biostimulants were applied as foliar sprays at five treatment levels: control, glutamic acid, nicotinic acid, aspartic acid, and a combination of all three compounds, each at a concentration of 300 mg L^{-1}. The first irrigation was applied immediately after sowing, followed by manual irrigation every two days until plant establishment. The first foliar spray was applied at the 4–6-leaf stage, followed by three additional applications at 14-day intervals, resulting in a total of four applications. Drought stress treatments were initiated at the 10-leaf stage after full plant establishment.

Results and discussion

The results indicated that the highest values of lateral branch number, internode length, leaf area, shoot fresh weight, root fresh weight, root dry weight, photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate, chlorophyll a, carotenoid content, and total nitrogen content were recorded under well-watered conditions (100% field capacity). The application of biostimulants significantly improved the studied traits compared with the control treatment (without biostimulant application). Notably, the combined application of biostimulants resulted in the greatest improvements, including increased lateral branch number, leaf area, shoot and root fresh and dry weights, stomatal conductance, transpiration and photosynthetic rates, total nitrogen accumulation, and chlorophyll a and carotenoid

* Corresponding author: Hasan Mumivand; E-Mail: mumivand.h@lu.ac.ir

© 2026, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

contents. The interaction between irrigation levels and biostimulant treatments showed that the highest values for plant height (59.75 cm), lateral branch length (42.75 cm), root length (38.50 cm), shoot dry weight (3.75 g), relative water content (79.67%), chlorophyll b content (9.07 mg g^{-1} FW), total chlorophyll content (26.14 mg g^{-1} FW), and sub-stomatal CO_2 concentration (492.50 µmol cm^{-2}) were obtained with the combined application of the three biostimulants at 100% field capacity. Amino acids, as fundamental components of proteins and precursors of various metabolites, participate in a wide range of enzymatic reactions associated with primary and secondary metabolism in plants. Therefore, amino acids can influence various physiological and biochemical processes, including vegetative growth, signaling, activation of defense mechanisms against abiotic and biotic stresses, osmotic regulation, reactive oxygen species scavenging, and nitrogen storage. Moreover, numerous studies have demonstrated that nicotinic acid can enhance the photosynthetic rate in various crops, which may be associated with increased chlorophyll content and ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase (Rubisco) activity.

Conclusion

The findings of this study demonstrated that biostimulant application, particularly their combined use, can effectively alleviate the adverse effects of drought stress by promoting plant growth and improving yield in fenugreek. Therefore, the combined application of nicotinic acid, glutamic acid, and aspartic acid is recommended as an effective strategy to mitigate the adverse effects of water deficit stress in fenugreek.

Keywords: Biostimulant, Chlorophyll, Photosynthesis, Relative water content, Water deficit

نسخه پیش از انتشار

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences

https://doi.org/10.22077/escs.2026.9501.2370

مقاله پژوهشی

اثر محلول‌پاشی گلوتامیک، نیکوتینیک و آسپارتیک اسید بر رشد، عملکرد و برخی شاخص‌های فیزیولوژیکی شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum* L.) تحت تنش خشکی

سپیده دالوند[1]، حسن مومیوند[2,3*]، بهمن زاهدی[4]، عبداله احتشام‌نیا[2]

۱. دانشجوی دکتری علوم باغبانی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد
۲. دانشیار، گروه علوم باغبانی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد
۳. دانشیار گروه علوم باغبانی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت
۴. استادیار گروه علوم باغبانی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
کم آبی
محرک زیستی
فتوسنتز
کلروفیل
محتوای نسبی آب

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۳۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۴

چکیده

به منظور بررسی اثر محرک‌های زیستی بر گیاه شنبلیله در شرایط تنش کم‌آبیاری، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با چهار تکرار انجام شد. تیمار تنش خشکی در سه سطح (۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد ظرفیت زراعی) و کاربرد برگی محرک‌های زیستی در پنج سطح (شاهد، گلوتامیک‌اسید، نیکوتینیک‌اسید، آسپارتیک‌اسید و کاربرد هر سه ترکیب با غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر) اعمال شد. نتایج نشان دهنده کاهش معنی‌دار ارتفاع بوته، سطح برگ، وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه، طول ریشه، محتوای نسبی آب برگ، هدایت روزنه‌ای، غلظت کربن دی‌اکسید زیر روزنه، سرعت فتوسنتز، تعرق و نیتروژن کل تحت تنش کم آبیاری بود. کاربرد محرک‌های زیستی موجب افزایش معنی‌دار ارتفاع بوته، وزن تر اندام هوایی، طول ریشه، محتوای نسبی آب برگ، هدایت روزنه‌ای، غلظت کربن دی‌اکسید زیر روزنه، سرعت فتوسنتز، تعرق و نیتروژن کل شد. برهمکنش تیمارهای کم‌آبیاری و کاربرد محرک‌های زیستی نشان داد که بیشترین میزان ارتفاع بوته، طول شاخه جانبی، طول ریشه، وزن خشک اندام هوایی، محتوای نسبی آب برگ، کلروفیل b، محتوای کلروفیل کل و غلظت کربن‌دی‌اکسید زیر روزنه در تیمار کاربرد ترکیبی سه محرک‌زیستی در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به دست آمد. کاربرد ترکیبی محرک‌های زیستی منجر به حصول بهترین نتایج در صفات عملکردی و فیزیولوژیکی شنبلیله شد. با این حال، آسپارتیک اسید در مقایسه با نیکوتینیک اسید و گلوتامیک اسید اثرات مثبت بیشتری در سطح برگ و وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه داشت. کاربرد محرک‌های زیستی به‌ویژه به صورت ترکیبی باعث تعدیل اثرات منفی تنش خشکی در بسیاری از صفات مورد مطالعه شد. در مجموع می‌توان اظهار داشت که کاربرد ترکیبی محرک‌های زیستی مورد استفاده در این پژوهش، می‌تواند با تاثیر مثبت بر رشد و عملکرد شنبلیله در شرایط تنش کم‌آبی موجب کاهش خسارت ناشی از تنش شود.

مقدمه

شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum* L.) گیاهی معطر و یکساله از خانواده بقولات (Fabaceae) و یکی از قدیمی‌ترین گیاهان دارویی است که به‌عنوان سبزی (برگ تازه یا خشک) و ادویه (دانه‌ها) استفاده می‌شود (Zandi et al., 2015). برگ‌های شنبلیله به رنگ سبز تیره و دمبرگ‌ها غضروفی هستند و در بالا ضخیم می‌شوند (Aasim et al. 2018). ریشه، دانه و اندام هوایی آن از لحاظ میزان متابولیت‌های ثانویه بسیار غنی هستند. این گیاه دارای برگ‌های متناوب و مرکب سه‌برگچه‌ای است و بذر و قسمت‌های هوایی آن به‌عنوان منبع ارزشمند پروتئین مورد استفاده قرار می‌گیرد (Mandegary et al., 2012). شنبلیله دارای خواص آنتی‌اکسیدانی قوی و حاوی مقدار نسبتاً بالایی فلاونوئیدها، آلکالوئیدها، ساپونین‌ها و سایر آنتی‌اکسیدان‌ها

است. فنولیک‌ها مانند اسید گالیک، پروتوکاتکویک اسید، کاتچین، اسید جنتیزیک، اسید کلروژنیک، اسید وانیلیک و اسید سیرینجیک در عصاره دانه به میزان قابل توجهی وجود دارند (Ahmad et al., 2016).

با توجه به تغییر الگوی بارندگی، فراوانی خشکسالی منجر به کمبود آب به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان شده است (Vicente-Serrano et al., 2022). گیاهانی که در شرایط کم آبی رشد می‌کنند غالباً دارای سطح برگ کم‌تری هستند (Dong et al., 2020) که ناشی از کاهش فشار تورژسانس، سرعت فتوسنتز و جذب مواد غذایی توسط ریشه است (Prasad et al., 2019; Ahmadi et al., 2024). نرخ خالص فتوسنتز مستقیما بازتاب بهره‌وری مواد در سطح برگ، سرعت فتوسنتز و تعرق است که با کاهش محتوای آب خاک کاهش می‌یابد. همچنین، کمبود آب به‌طور مستقیم فتوسنتز را با کاهش دسترسی به CO_2 وکاهش هدایت روزنه و مزوفیل کاهش می‌دهد (Nardini, 2022; Aghamirzaei et al., 2024). در شرایط تنش‌خشکی به‌دلیل کاهش فشار تورژسانس تقسیم سلولی و به‌ویژه طویل شدن و توسعه سلولی تحت تاثیر قرار می‌گیرد (Habashy et al., 2019). بنابراین رشد و توسعه سطح برگ نیز که برای فتوسنتز، تولید ماده خشک و در نهایت عملکرد گیاه اهمیت دارد، متاثر از کم آبی کاهش می‌یابد (Khodabin et al., 2020). به‌علاوه، تنش‌خشکی موجب اختلال در سیستم‌های غربال کننده گونه‌های فعال اکسیژن، افزایش پراکسیداسیون چربی‌ها و در نتیجه تخریب غشای سلولی و کلروپلاست می‌گردد (Zahra et al., 2023)، که در این شرایط مقدار کلروفیل و کاروتنوئید نیز کاهش می‌یابد (Orsak et al., 2023).

محرک‌های زیستی گیاهی به‌عنوان یک ابزار زراعی کارآمد برای بهبود تحمل و مقاومت گیاهان در برابر شرایط نامطلوب محیطی پیشنهاد شده‌اند (Bulgari et al., 2019). اثرات کلی این مواد شامل تعدیل جذب مواد مغذی، تنظیم مسیرهای سیگنال‌دهی و فعالیت‌های هورمونی است (Akbarzadeh et al., 2023). اسیدهای آمینه به‌عنوان مواد تشکیل‌دهنده انواع پروتئین‌ها، پتانسیل کاهش تنش‌های غیرزیستی را در گیاهان دارند (Sadak et al., 2015). علاوه بر این، تجزیه و تحلیل متابولیت‌های کمپلکس پروتئین میتوکندری به دنبال تنش اکسیداتیو نشان داده است که افزایش کاتابولیسم اسیدآمینه در چرخه تری‌کربوکسیلیک‌اسید، ممکن است کاهش عرضه الکترون از چرخه را جبران کند. استفاده از اسیدهای آمینه می‌تواند با کاهش تولید گونه‌های فعال اکسیژن، نیز باعث کاهش تنش اکسیداتیو در گیاهان شود (Teixeira et al., 2017). اسیدهای آمینه به‌عنوان پیش‌ساز بسیاری از متابولیت‌های اولیه و ثانویه عمل می‌کنند. اثرات مستقیم این ترکیبات روی گیاهان شامل افزایش جذب نیتروژن، با تنظیم آنزیم‌های دخیل در جذب نیتروژن و ژن‌های ساختاری آن‌ها و از طریق اثر روی مسیر سیگنال‌دهی اکتسابی نیتروژن در ریشه‌ها با تنظیم آنزیم‌های چرخه تری‌کربوکسیلیک‌اسید و متابولیسم نیتروژن در پروتئین و بافت‌ها است (Padmaja et al., 2023).

در گیاهان، آسپارتیک‌اسید اتصال نیتروژن به اسیدهای آمینه را تنظیم می‌کند (Caspi et al., 2020) و بر متابولیسم اسیدهای آمینه در چرخه تری کربوکسیلیک اسید و متابولیسم کربن در مسیر گلیکولیز موثر است (Jahanbani et al., 2024). به‌طور کلی، آسپارتیک‌اسید برای بیوسنتز اسیدهای آمینه و اسیدهای آلی ضروری است (Caspi et al., 2020). گلوتامیک‌اسید یک مولکول سیگنال‌دهی مهم تحت شرایط محیطی مختلف در بسیاری از گونه‌های گیاهی است (Kan et al., 2017). گلوتامات منبع کربن بوده و در متابولیسم نیتروژن با کمک آنزیم گلوتامات دهیدروژناز به α-کتوگلوتارات تبدیل می‌شود. گلوتامات همچنین در تنظیم اسمزی سلولی، به‌ویژه در سلول‌های محافظ روزنه، نقش دارد، بنابراین باز و بسته شدن روزنه را تنظیم می‌کند. در کنترل مکانیسم دفاع آنتی‌اکسیدانی از طریق بیوسنتز گلوتاتیون، به‌عنوان یک بخش فعال سیستم آنتی‌اکسیدانی نقش دارد (Ali et al., 2019). کاربرد ویتامین‌ها در گیاهان موجب افزایش بنیه گیاه، افزایش نرخ تولید مثل و مقاومت بیش‌تر به تنش خشکی می‌شود (Vendruscolo, 2019). نیکوتینیک‌اسید (نیاسین یا ویتامین B3) به‌عنوان یک مکانیسم دفاعی در برابر تنش عمل می‌کند. در گندم، نیکوتینیک‌اسید موجب افزایش سطح ایندول-۳-استیک اسید، اسیدجیبرلیک و سیتوکینین‌ها می‌شود، در حالی که سطح اسیدآبسیزیک را کاهش می‌دهند (Farooq et al., 2022). در آزمایشی کاربرد دو گرم در لیتر اسیدآمینه منجر به افزایش سرعت فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، تعرق، کلروفیل و کاروتنوئید کلزا (*Brassica Napus* L.) در شرایط تنش کم‌آبی شد (Fayaz et al., 2024). نتایج پژوهشی دیگر نشان داد که خصوصیات مورفولوژیکی و عملکردی شنبلیه تحت تاثیر مستقیم تنش آبیاری قرار گرفت و محلول‌پاشی

اسیدآمینه گاما آمینوبوتریک‌اسید موجب تعدیل اثرات ناشی از تنش کم آبی و افزایش رشد گیاه شد (Torabi Giglou et al., 2024). کاربرد نیاسین موجب افزایش ارتفاع بوته، تعداد برگ، تعداد شاخه‌ی جانبی، سطح برگ، محتوای کلروفیل کل و نیتروژن برگ شمعدانی (*Pelargonium hortorum* L.) گردید (Khudair et al., 2019). نتایج پژوهشی دیگر نشان داد که محلول‌پاشی اسیدهای آمینه گلیسین و گلوتامین در غلظت ۲۵۰ و به‌ویژه ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر باعث بهبود وزن تر و خشک اندام هوایی، سطح برگ و محتوای کلروفیل ریحان (*Ocimum basilicum* L.) در مقایسه با گیاهان شاهد شد (Noroozlo et al., 2019). در آزمایشی روی گوجه‌فرنگی کاربرد دو اسیدآمینه آسپارتیک اسید و گلوتامیک‌اسید منجر به افزایش رشد گیاهان شد، اما اسیدآمینه آلانین باعث ایجاد سمیت گیاهی گردید (Alfosea-Simon et al., 2021). بالاترین تعداد و سطح برگ، وزن تازه و خشک گیاه و فعالیت آنتی‌اکسیدانی ریحان با محلول‌پاشی ترکیبی ۲ گرم در لیتر اوره و ۸ میلی‌گرم بر لیتر آمینواسید حاصل شد. محققان این افزایش رشد را به بهبود فتوسنتز و محتوای رنگدانه‌های گیاهی نسبت دادند (Jahanbani et al., 2024). در مطالعه‌ای دیگر کاربرد اسیدنیکوتینیک منجر به افزایش رشد ریشه (طول، وزن تر و خشک، سطح و قطر ریشه) و اندام هوایی (طول ساقه، وزن تر و خشک اندام هوایی) گندم شد. همچنین محتوای نسبی آب، سطح برگ، هدایت روزنه‌ای، دی‌اکسیدکربن داخلی، فتوسنتز و سرعت تعرق را افزایش داد (Khurshid et al., 2023). با وجود اثرات مفید محرک‌های زیستی آسپارتیک‌اسید، گلوتامیک‌اسید و نیکوتینیک‌اسید، تا به حال پژوهشی در این زمینه روی گیاه شنبلیله صورت نگرفته است. بنابراین، در این پژوهش به بررسی تأثیر کاربرد سه ترکیب آسپارتیک‌اسید، گلوتامیک‌اسید و نیکوتینیک‌اسید بر خصوصیات مورفولوژیکی، عملکرد، محتوای نسبی آب، رنگدانه‌های گیاهی و فتوسنتز گیاه شنبلیله تحت تنش خشکی پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان در سال ۱۴۰۳ انجام شد. گلخانه مورد نظر در مختصات ۴۸ درجه و ۲۲ دقیقه شرقی و ۳۳ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی، با ارتفاع ۱۱۲۵ متر از سطح دریا واقع شده است. رطوبت نسبی داخل گلخانه بین ۶۰ تا ۷۰ درصد، میانگین شدت نور ۶۰۰ میکرومول بر متر مربع بر ثانیه و میانگین دما نیز بین ۱۸ تا ۲۴ درجه سانتی‌گراد بود. مطالعه حاضر به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار (در هر تکرار ۵ گلدان) اجرا شد. فاکتور اول شامل تنش کم‌آبی در سه سطح (۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ (شاهد) درصد ظرفیت زراعی) و فاکتور دوم نیز محلول‌پاشی برگی محرک‌های زیستی در ۵ سطح شامل محلول‌پاشی با آب مقطر (شاهد)، آسپارتیک اسید، گلوتامیک اسید، نیکوتینیک اسید و هر سه ترکیب به صورت جداگانه (با غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر) بود. غلظت محرک‌های زیستی بر اساس نتایج آزمایش قبلی انتخاب گردید. محلول‌پاشی به گونه‌ای انجام شد که گیاهان به طور کامل با محلول شسته شوند. تعداد هشت بذر شنبلیله در هر گلدان کشت شد. بعد از جوانه‌زنی بذرها و استقرار گیاهچه‌ها، تعداد سه بوته با رشد مشابه در هر گلدان نگهداری شد. اولین آبیاری بلافاصله بعد از کاشت و آبیاری‌های بعدی تا زمان استقرار گیاه (مرحله ۶ برگی شروع ساقه دهی گیاه) هر دو روز یکبار به‌صورت دستی با آبپاش صورت گرفت. اولین مرحله محلول‌پاشی گیاهان در مرحله ۴ تا ۶ برگی (یک ماه پس از کشت بذر) و محلول‌پاشی‌های بعدی هر ۱۴ روز یکبار (جمعا ۴ بار) صورت گرفت.

ده روز پس از اولین محلول‌پاشی برگی، تنش خشکی اعمال شد و تا پایان آزمایش ادامه یافت. در این تحقیق از گلدان‌هایی با قطر دهانه ۲۰ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر استفاده شد. قبل از شروع آزمایش، وزن هر گلدان به همراه زهکش اندازه‌گیری شد و گلدان‌ها با ترکیبی از خاک زراعی، کود دامی پوسیده و ماسه با نسبت ۱:۱:۲ پر شدند. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در جدول ۱ ذکر شده است. خصوصیات کیفی آب آبیاری نیز در جدول ۲ گزارش شده است. در این مطالعه اندازه‌گیری ظرفیت زراعی خاک و اعمال تنش خشکی به روش وزنی صورت گرفت. برای این منظور، ابتدا خاک تا حد اشباع آبیاری شد و پس از گذشت ۴۸ ساعت (زمانی که زهکش آزاد متوقف شد) رطوبت خاک که نمایان‌گر ظرفیت زراعی است اندازه‌گیری شد. در ادامه با وزن کردن روزانه گلدان‌ها، نقصان رطوبت آن‌ها در تیمارهای مختلف با اضافه نمودن آب و رساندن آن‌ها به ظرفیت زراعی مدنظر جبران شد. در طول دوره آزمایش، مبارزه با علف‌های هرز و آفات و بیماری‌ها در زمان مورد نیاز صورت گرفت.

جدول ۱. برخی خصوصیات خاک مورد استفاده در آزمایش

Table 1. Names of cultivated genotypes

بافت خاک	کربن	پتاسیم	فسفر	نیتروژن	هدایت الکتریکی	اسیدیته
Soil Texture	**C ()**	**K**	**P**	**N**	**EC**	**pH**
	%	----------ppm----------		%	dSm^{-1}	
clay loam	1.02	346	7.8	0.07	0.72	7.4

جدول ۲. برخی خصوصیات آب مورد استفاده در آزمایش

Table 2. Some characteristics of the water used in the research

مس	آهن	کلسیم	منیزیم	فسفر	پتاسیم	نیتروژن	هدایت الکتریکی	اسیدیته
Cu	**Fe**	**Ca**	**Mg**	**P**	**K**	**N**	**EC**	**pH**
----------$mg\ l^{-1}$----------		----------$meq\ l^{-1}$----------		%	ppm	%	dSm^{-1}	
0.06	0.02	8.00	4.10	0.20	20.00	22.00	0.66	7.54

جهت اندازه‌گیری ویژگی‌های مورفولوژیکی، در شروع مرحله گلدهی تعداد چهار گلدان از هر تکرار به‌صورت تصادفی انتخاب شد. سپس ارتفاع بوته، طول شاخه جانبی و طول ریشه با استفاده از خط‌کش، تعداد شاخه جانبی با استفاده از شمارش شاخه‌ها در هر بوته، قطر طوقه و فاصله میانگره به کمک کولیس دیجیتال (Extra Strong model) و سطح برگ با استفاده از دستگاه، سطح برگ‌سنج (CI 202) اندازه‌گیری شدند. پس از برداشت بوته‌ها، وزن تر اندام هوایی و ریشه با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ (AND FX3000I model) ثبت شد، سپس برای تعیین وزن خشک، اندام‌های گیاهی مورد نظر در پاکت‌های کاغذی و در آون به مدت ۴۸ ساعت (در دمای درجه ۸۰ درجه سانتی‌گراد) قرار گرفتند و مجدد توزین شدند. برای اندازه‌گیری محتوی نسبی آب برگ، پس از به دست آوردن وزن تر برگ (FW)، برگ‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر غوطه‌ور و مجددا توزین شدند (TW). پس از آن وزن خشک (DW) برگ‌ها با قرار دادن آن‌ها در آون (۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت) ثبت شد. سپس با استفاده از رابطه زیر میزان محتوای نسبی آب برگ براساس درصد به دست آمد (Ritchi et al., 1990):

$$RWC\ (\%) = (FW - DW / TW - DW) \qquad [۱]$$

جهت ارزیابی فتوسنتز خالص، غلظت کربن‌دی‌اکسید (CO_2) زیر اتاقک روزنه، هدایت روزنه‌ای و تعرق از دستگاه سنجش تبادلات گازی برگ (CI-340 Handheld photosynthesis system) استفاده شد (Mumivand et al., 2023). میزان نیتروژن برگ با استفاده از روش هضم کجلدال اندازه‌گیری گردید (Nelson and Sommers, 1973). اندازه‌گیری محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی از جمله کلروفیل و کاروتنوئید با استفاده از روش (Lichtentaler, 1987) صورت گرفت. تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS Version 9.4 انجام شد و مقایسه میانگین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد ($P< 0.05$) صورت گرفت.

نتایج و بحث

تعداد و طول شاخه جانبی

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات ساده تیمارهای تنش کم‌آبیاری و محرک‌های زیستی بر تعداد و طول شاخه جانبی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. اثر متقابل تنش کم‌آبیاری و محرک‌های زیستی نیز بر طول شاخه جانبی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین اثر ساده کم‌آبیاری نشان داد که با کاهش میزان آب خاک، تعداد شاخه جانبی کاهش یافت. بیش‌ترین تعداد شاخه جانبی متعلق به سطح آبیاری شاهد (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) بود (جدول ۴). مقایسه میانگین اثر ساده محرک‌های زیستی نیز نشان داد که کاربرد این ترکیبات تعداد شاخه جانبی را نسبت به شاهد (عدم محلول‌پاشی) افزایش داد. بیش‌ترین تعداد شاخه جانبی در تیمارهای نیکوتینیک‌اسید و تیمار کاربرد ترکیبی محرک‌های زیستی به‌دست آمد (جدول ۵).

مقایسه میانگین برهمکنش تنش کم‌آبیاری و محرک‌های زیستی بر طول شاخه‌ی جانبی نشان داد که بیش‌ترین طول

نسخه پیش از انتشار

شاخه‌جانبی در تیمار آسپارتیک‌اسید در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به دست آمد که اختلاف معنی‌داری با تیمار ترکیبی کاربرد سه اسیدآمینه در دو سطح آبیاری ۱۰۰ و ۸۰ درصد ظرفیت زراعی نشان نداد. در مجموع کاربرد آمینواسیدها به صورت منفرد در سطوح کم‌آبیاری ۸۰ و ۶۰ درصد ظرفیت زراعی تاثیر معنی‌داری بر طول شاخه‌ی جانبی نداشت. در حالی‌که کاربرد همزمان هر سه اسیدآمینه در تمام سطوح آبیاری، باعث افزایش طول شاخه‌ی جانبی گردید. تیمار تنش کم آبیاری نیز تنها در سطح ۶۰ درصد ظرفیت زراعی کاهش طول شاخه‌ی جانبی را به همراه داشت (جدول ۶).

جدول ۳. تجزیه واریانس اثر تنش کم‌آبیاری و محرک‌های زیستی بر ویژگی‌های مورفولوژیکی و عملکرد گیاه شنبلیله

Table 3. Analysis of variance of the effect of water deficit stress and biostimulants on morphological characteristics and yield of fenugreek

S. O. V	منبع تغییرات	درجه آزادی df	تعداد شاخه جانبی Lateral shoot number	طول شاخه جانبی Lateral shoot length	ارتفاع بوته Plant height	فاصله میانگره Internode length	قطر طوقه Crown diameter
R	بلوک	3	0.06^{ns}	9.48^{ns}	26.78^{ns}	0.05^{ns}	0.005^{ns}
Stress (S)	تنش	2	40.71**	994.05**	1457.34**	4.72**	4.01**
Spray (SP)	محلول‌پاشی	4	7.60**	386.85**	619.80**	2.16**	0.62**
S × SP	تنش × محلول‌پاشی	8	0.19^{ns}	59.50**	58.57**	0.17^{ns}	0.11^{ns}
Total error	خطای کل	42	0.25	17.52	19.91	0.15	0.07
CV (%)	ضریب تغییرات	-	*12.91*	*15.52*	*11.33*	*16.77*	*12.69*

Table 3. Continued **جدول ۳. ادامه**

S. O. V	منبع تغییرات	درجه آزادی df	طول ریشه Root length	سطح برگ Leaf area	وزن تر اندام هوایی Shoot fresh weight	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	وزن تر ریشه Root fresh weight	وزن خشک ریشه Root dry weight
R	بلوک	3	5.95*	8.98*	2.53^{ns}	0.23^{ns}	0.49^{ns}	0.006**
Stress (S)	تنش	2	109.53**	58.10**	41.28**	2.92**	1.55**	0.01**
Spray (SP)	محلول‌پاشی	4	260.51**	91.07**	30.26**	4.55**	4.92**	0.21**
S × SP	تنش × محلول‌پاشی	8	4.16*	0.59^{ns}	0.72^{ns}	0.41*	0.13^{ns}	0.001^{ns}
Total error	خطای کل	42	1.61	2.53	2.89	0.21	0.28	0.001
CV (%)	ضریب تغییرات	-	*4.27*	*11.37*	*21.69*	*24.85*	*25.42*	*18.14*

^{ns} عدم وجود اختلاف معنی‌دار، ** و * به ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱ و ۰/۰۵

no significant difference, ** and * significant difference at the 0.01 and 0.05 probability levels, respectively

ارتفاع بوته

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده تنش کم‌آبیاری و محرک‌های زیستی و اثر متقابل آن‌ها بر ارتفاع بوته در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که کاربرد هر سه محرک‌زیستی گلوتامیک‌اسید، نیکوتینیک‌اسید و آسپارتیک‌اسید هم به صورت مجزا و هم در ترکیب با یکدیگر، موجب افزایش معنی‌دار ارتفاع بوته شنبلیله در تمام سطوح تنش کم‌آبیاری شد. تنش کم آبیاری نیز منجر به کاهش معنی‌دار ارتفاع بوته گردید. بیش‌ترین میزان ارتفاع بوته مربوط به محلول‌پاشی همزمان گلوتامیک‌اسید، نیکوتینیک‌اسید و آسپارتیک‌اسید در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی بود. تیمار عدم محلول‌پاشی در شرایط تنش کم‌آبیاری ۶۰ درصد ظرفیت زراعی، کم‌ترین میزان ارتفاع بوته را نشان داد. در مجموع نتایج نشان داد که محلول‌پاشی محرک‌های زیستی به‌ویژه به صورت ترکیبی تا حد زیادی اثرات تنش خشکی را در شنبلیله تعدیل کرد (جدول ۶).

نسخه پیش از انتشار

فاصله میانگره

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثرات ساده محلول‌پاشی محرک‌های زیستی و تنش کم‌آبیاری بر فاصله میانگره در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین اثر ساده کم‌آبیاری نشان داد که با کاهش میزان آبیاری فاصله میانگره به صورت معنی‌داری کاهش یافت و بیش‌ترین فاصله میانگره متعلق به سطح آبیاری شاهد (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) بود (جدول ۴). مقایسه میانگین اثر ساده محرک‌های زیستی نیز نشان داد که کاربرد این ترکیبات، فاصله میانگره را نسبت به شاهد (عدم کاربرد محرک‌های زیستی) افزایش داد. بیش‌ترین میزان فاصله میانگره متعلق به تیمار نیکوتینیک‌اسید بود که با تیمار کاربرد ترکیبی محرک‌های زیستی تفاوت معنی‌داری از نظر آماری نشان نداد (جدول ۵).

قطر طوقه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر ساده تنش کم‌آبیاری و اثر ساده محلول‌پاشی محرک‌های زیستی بر قطر طوقه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین اثر ساده کم‌آبیاری نشان داد که اعمال تنش کم‌آبیاری موجب کاهش قطر طوقه در گیاه شنبلیله گردید، به‌طوریکه بیش‌ترین میزان قطر طوقه در سطح آبیاری شاهد (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) مشاهده شد (جدول ۴). مقایسه میانگین اثر ساده محرک‌های زیستی نیز نشان داد که کاربرد این ترکیبات قطر طوقه را نسبت به شرایط عدم کاربرد محرک‌های زیستی افزایش داد. بیش-ترین میزان قطر طوقه در تیمار نیکوتینیک‌اسید مشاهده شد که با تیمارهای آسپارتیک‌اسید و کاربرد ترکیبی محرک‌های زیستی تفاوت معنی‌داری نشان نداد (جدول ۵).

طول ریشه

با توجه به جدول تجزیه واریانس، اثر ساده تنش کم‌آبیاری و اثر ساده محلول‌پاشی محرک‌های زیستی بر طول ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. برهمکنش تیمارهای کم‌آبیاری و محلول‌پاشی محرک‌های زیستی نیز در مورد طول ریشه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که کاربرد آمینواسیدها موجب افزایش معنی‌دار طول ریشه در تمام سطوح آبیاری شد. بیش‌ترین میزان طول ریشه (۳۸/۵۰ سانتی‌متر) در تیمار کاربرد ترکیبی محرک‌های زیستی در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده گردید که اختلاف معنی‌داری با تیمار کاربرد ترکیبی محرک‌های زیستی در سطح آبیاری ۸۰ درصد ظرفیت زراعی نشان نداد. کم‌ترین طول ریشه نیز متعلق به تیمار عدم محلول‌پاشی محرک‌های زیستی در شرایط کم‌آبیاری ۶۰ درصد ظرفیت زراعی بود. علاوه بر این فارغ از کاربرد محرک‌های زیستی، تنش خشکی منجر به کاهش طول ریشه در شنبلیله شد (جدول ۶).

سطح برگ

تجزیه واریانس نشان داد که تنها اثرات ساده تنش کم‌آبیاری و تیمار محرک‌های زیستی بر سطح برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین اثر ساده کم‌آبیاری نشان داد که با افزایش تنش کم‌آبیاری سطح برگ کاهش یافت، به نحوی‌که سطح برگ در تیمار ۶۰ درصد ظرفیت زراعی نسبت به تیمار شاهد ۲۱/۷۶ درصد کاهش نشان داد (جدول ۴). بررسی مقایسه میانگین اثر ساده محرک‌های زیستی نیز نشان داد که سطح برگ تنها تحت تاثیر کاربرد آسپارتیک اسید و کاربرد ترکیبی سه محرک-زیستی افزایش نشان داد. در مجموع سطح برگ در تیمار کاربرد ترکیبی سه محرک زیستی نسبت به شاهد ۵۹/۳۰ درصد افزایش یافت (جدول ۵).

وزن تر و خشک اندام هوایی

با توجه به جدول تجزیه واریانس، اثرات ساده تنش کم‌آبیاری و محلول‌پاشی محرک‌های زیستی بر وزن تر و خشک شنبلیله در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. برهمکنش تیمارهای تنش کم‌آبیاری و محرک‌های زیستی تنها در مورد وزن خشک اندام هوایی در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین اثر ساده کم‌آبیاری نشان دهنده کاهش خطی وزن تر اندام هوایی شنبلیله با کاهش میزان آبیاری بود، به نحوی‌که وزن تر اندام هوایی در تیمار ۶۰ درصد ظرفیت زراعی در مقایسه با شاهد (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) ۳۰/۶۷ درصد کاهش یافت (جدول ۴). بررسی مقایسه میانگین اثر تیمار محرک‌های زیستی نیز نشان داد که وزن تر اندام هوایی تنها تحت تاثیر کاربرد آسپارتیک اسید و کاربرد ترکیبی سه محرک‌زیستی افزایش پیدا کرد. بیش‌ترین میزان وزن تر به‌ترتیب در تیمار کاربرد ترکیبی سه

نسخه پیش از انتشار

محرک‌زیستی و کاربرد آسپارتیک‌اسید به‌دست آمد (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل برای وزن خشک اندام هوایی نشان داد که بیش‌ترین میزان این صفت متعلق به تیمار کاربرد ترکیبی سه محرک‌زیستی در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی بود. کاربرد آسپارتیک اسید و کاربرد ترکیبی سه محرک‌زیستی در همه سطوح تنش کم آبیاری باعث افزایش وزن خشک اندام هوایی شد. کاربرد گلوتامیک اسید نیز تنها در شرایط ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی افزایش وزن خشک اندام هوایی را به همراه داشت. در حالی‌که محلول‌پاشی نیکوتینیک اسید هیچ تاثیری بر وزن خشک اندام هوایی نشان نداد (جدول ۶).

وزن تر و خشک ریشه

طبق نتایج جدول تجزیه واریانس، اثر ساده تنش کم‌آبیاری و اثر ساده محلول‌پاشی محرک‌های زیستی بر وزن تر و خشک ریشه شنبلیله در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳).

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر تنش کم‌آبیاری بر ویژگی‌های مورفولوژیکی و عملکرد گیاه شنبلیله

Table4. Mean comparison of the effect of water deficit stress on morphological characteristics and yield of fenugree

تنش کم‌آبیاری Water deficit stress	تعداد شاخه جانبی Lateral shoot number	فاصله میانگره Internode length	قطر طوقه Crown diameter	سطح برگ Leaf area	وزن تر اندام هوایی Shoot fresh weight	وزن تر ریشه Root fresh weight	وزن خشک ریشه Root dry weight
% FC		cm	mm	cm^2	----------g----------		
100	5.500[a]	2.903[a]	2.622[a]	15.624[a]	9.360[a]	2.053[a]	0.256[a]
80	3.350[b]	2.246[b]	1.951[b]	14.162[b]	8.030[b]	1.640[b]	0.234[a]
60	2.800[c]	1.954[c]	1.773[c]	12.226[c]	6.489[c]	1.521[b]	0.194[b]

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از آزمون LSD می‌باشند.

Means with common letters in each column indicate no significant difference at the 5% probability level using the LSD

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی محرک‌های زیستی بر ویژگی‌های مورفولوژیکی و عملکرد گیاه شنبلیله

Table5. Mean comparison of the effect of foliar spraying of biostimulants on morphological characteristics and yield of fenugreek

محرک‌های زیستی Biostimulants	تعداد شاخه جانبی Lateral shoot number	فاصله میانگره Internode length	قطر طوقه Crown diameter	سطح برگ Leaf area	وزن تر اندام هوایی Shoot fresh weight	وزن تر ریشه Root fresh weight	وزن خشک ریشه Root dry weight
$mg.L^{-1}$		cm	mm	cm^2	----------g----------		
شاهد **Control**	2.750[d]	1.701[d]	1.754[c]	11.450[c]	6.364[b]	1.131[c]	0.060[d]
گلوتامیک‌اسید **Glutamic acid (G)**	3.416[c]	2.276[c]	2.047[b]	12.498[c]	7.273[b]	1.439[c]	0.287[b]
نیکوتینیک‌اسید **Nicotinic acid (N)**	4.500[a]	2.802[a]	2.342[a]	12.580[c]	6.950[b]	1.346[c]	0.136[c]
آسپارتیک‌اسید **Aspartic acid (A)**	4.083[b]	2.411[bc]	2.188[ab]	15.247[b]	9.041[a]	2.081[b]	0.258[b]
گلوتامیک×نیکوتینیک×آسپارتیک **G × N × A**	4.666[a]	2.647[ab]	2.246[ab]	18.245[a]	10.169[a]	2.693[a]	0.399[a]

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از آزمون LSD می‌باشند.

Means with common letters in each column indicate no significant difference at the 5% probability level using the LSD test

نتایج مقایسه میانگین اثر ساده کم‌آبیاری نشان داد که تنش کم‌آبیاری تا سطح ۸۰ درصد ظرفیت زراعی منجر به کاهش وزن تر ریشه شد، در حالی که تیمار ۶۰ درصد ظرفیت زراعی در مقایسه با ۸۰ درصد ظرفیت زراعی تغییر معنی‌داری در این صفت ایجاد نکرد. در حالی‌که وزن خشک ریشه در تیمار ۸۰ درصد ظرفیت زراعی نسبت به شاهد تغییر

معنی‌داری نشان نداد و تنها در تیمار ۶۰ درصد ظرفیت زراعی نسبت به شاهد کاهش یافت. در مجموع بیش‌ترین میزان وزن تر و خشک ریشه در تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی ثبت شد (جدول ۴). بررسی مقایسه میانگین اثر ساده محرک‌های زیستی نشان داد که وزن تر و خشک ریشه شنبلیله غالباً تحت تاثیر کاربرد این ترکیبات افزایش نشان داد. با این حال بیش‌ترین میزان وزن تر و خشک ریشه در تیمار کاربرد ترکیبی سه محرک‌زیستی به‌دست آمد (جدول ۵).

جدول ۶. مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم‌آبیاری و محلول‌پاشی محرک‌های زیستی بر عملکرد، تبادلات گازی و رنگدانه‌های گیاهی شنبلیله

Table 6. Mean comparison of the interaction effect of water deficit stress and foliar application of biostimulants on yield, gas exchange, and plant pigments of fenugreek

تنش کم‌آبیاری water deficit stress	Biostimulants	محرک‌های زیستی	ارتفاع بوته Plant height	طول شاخه جانبی Lateral shoot length	طول ریشه Root length	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight
% FC			----------cm----------			g
100	Control	شاهد	36.25^{eg}	24.75^{ce}	26.25^{f}	1.40^{de}
	Glutamic acid (GA)	گلوتامیک‌اسید	38.50^{df}	26.25^{cd}	35.50^{c}	2.40^{b}
	Nicotinic acid (NA)	نیکوتینیک‌اسید	49.00^{bc}	36.25^{b}	32.75^{c}	1.69^{ce}
	Aspartic acid (AA)	آسپارتیک‌اسید	53.25^{b}	42.75^{a}	29.75^{d}	2.20^{bc}
	GA × NA × AA	گلوتامیک×نیکوتینیک×آسپارتیک	59.75^{a}	40.00^{ab}	38.50^{a}	3.75^{a}
80	Control	شاهد	32.22^{fh}	21.00^{cd}	24.00^{g}	1.30^{de}
	Glutamic acid (GA)	گلوتامیک‌اسید	35.05^{fh}	22.75^{cf}	29.25^{d}	1.38^{de}
	Nicotinic acid (NA)	نیکوتینیک‌اسید	41.50^{de}	24.75^{ce}	28.25^{de}	1.43^{de}
	Aspartic acid (AA)	آسپارتیک‌اسید	43.02^{cd}	27.82^{c}	28.50^{de}	2.11^{bc}
	GA × NA × AA	گلوتامیک×نیکوتینیک×آسپارتیک	50.40^{bc}	38.50^{ab}	37.00^{ab}	2.55^{b}
60	Control	شاهد	21.02^{i}	16.75^{g}	22.00^{h}	1.09^{e}
	Glutamic acid (GA)	گلوتامیک‌اسید	33.25^{fh}	18.50^{g}	26.22^{f}	1.27^{de}
	Nicotinic acid (NA)	نیکوتینیک‌اسید	31.12^{gh}	18.75^{fg}	27.00^{ef}	1.31^{de}
	Aspartic acid (AA)	آسپارتیک‌اسید	29.50^{h}	19.50^{eg}	26.75^{ef}	1.90^{bd}
	GA × NA × AA	گلوتامیک×نیکوتینیک×آسپارتیک	36.97^{dg}	26.00^{cd}	35.50^{b}	2.18^{bc}

Table 6. Continued **جدول ۶. ادامه**

تنش کم‌آبیاری water deficit stress	Biostimulants	محرک‌های زیستی	محتوای نسبی آب برگ RWC	کربن دی اکسید زیر روزنه Int. CO_2	کلروفیل b Chl b	کلروفیل کل Total Chl
% FC			%	mmol cm^{-2}	----------mg g^{-1} FW----------	
100	Control	شاهد	70.94^{ce}	397.75^{ef}	6.39^{d}	19.30^{d}
	Glutamic acid (GA)	گلوتامیک‌اسید	77.40^{ab}	470.25^{ac}	7.84^{b}	22.12^{bc}
	Nicotinic acid (NA)	نیکوتینیک‌اسید	72.47^{cd}	446.75^{cd}	8.10^{ab}	23.53^{b}
	Aspartic acid (AA)	آسپارتیک‌اسید	73.97^{bd}	455.25^{bd}	6.75^{cd}	19.30^{d}
	GA × NA × AA	گلوتامیک×نیکوتینیک×آسپارتیک	79.67^{a}	492.50^{a}	9.07^{a}	26.14^{a}
80	Control	شاهد	65.42^{f}	350.50^{ef}	3.84^{fg}	11.84^{g}
	Glutamic acid (GA)	گلوتامیک‌اسید	74.06^{bc}	442.00^{cd}	4.58^{ef}	17.18^{ef}
	Nicotinic acid (NA)	نیکوتینیک‌اسید	70.07^{de}	430.75^{d}	8.08^{ab}	22.88^{b}
	Aspartic acid (AA)	آسپارتیک‌اسید	70.35^{ce}	425.75^{d}	5.07^{e}	15.70^{ef}
	GA × NA × AA	گلوتامیک×نیکوتینیک×آسپارتیک	76.90^{ab}	482.50^{ab}	8.35^{ab}	23.67^{b}
60	Control	شاهد	46.87^{h}	212.75^{g}	3.09^{g}	8.92^{h}
	Glutamic acid (GA)	گلوتامیک‌اسید	58.39^{g}	327.75^{f}	6.43^{d}	17.38^{e}
	Nicotinic acid (NA)	نیکوتینیک‌اسید	63.85^{f}	358.50^{ef}	6.29^{d}	19.80^{d}
	Aspartic acid (AA)	آسپارتیک‌اسید	64.76^{f}	221.00^{g}	4.48^{ef}	13.33^{g}
	GA × NA × AA	گلوتامیک×نیکوتینیک×آسپارتیک	67.52^{ef}	439.25^{cd}	7.62^{bc}	20.95^{cd}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از آزمون LSD می‌باشند.

Means with common letters in each column indicate no significant difference at the 5% probability level using the LSD test

محتوای نسبی آب برگ

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات ساده و متقابل تنش کم‌آبیاری و محلول‌پاشی محرک‌های زیستی بر محتوای نسبی

آب برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۷). برهمکنش تنش کم‌آبیاری و محرک‌های زیستی نیز نشان داد که بالاترین محتوای نسبی آب برگ در تیمار کاربرد ترکیبی سه محرک‌زیستی در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به دست آمد که اختلاف معنی‌داری با تیمار کاربرد گلوتامیک‌اسید در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و تیمار کاربرد ترکیبی سه محرک‌زیستی در سطح آبیاری ۸۰ درصد ظرفیت زراعی نداشت. کم‌ترین میزان محتوای نسبی آب برگ نیز مربوط به تیمار شاهد در سطح آبیاری ۶۰ درصد ظرفیت زراعی بود. در مجموع نتایج نشان داد که کاربرد محرک‌های زیستی به صورت منفرد و ترکیبی منجر به افزایش محتوای نسبی آب برگ شد. در حالی‌که محتوای نسبی آب برگ با کاهش میزان آبیاری کاهش نشان داد (جدول ۶).

هدایت روزنه‌ای و کربن دی‌اکسید زیر روزنه

با توجه به جدول تجزیه واریانس، اثر ساده تنش کم‌آبیاری در سطح احتمال پنج درصد و اثر ساده محرک‌های زیستی در سطح احتمال یک درصد بر هدایت روزنه‌ای معنی‌دار بود. اثرات ساده تنش کم‌آبیاری و محرک‌های زیستی و برهمکنش آن‌ها بر غلظت کربن دی‌اکسید زیر روزنه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۷). نتایج مقایسه میانگین اثر ساده کم‌آبیاری نشان داد که هدایت روزنه‌ای شنبلیله در تیمار ۶۰ درصد ظرفیت زراعی در مقایسه با تیمار کم‌آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی کاهش یافت، به نحوی‌که بیش‌ترین میزان هدایت روزنه‌ای در تیمار شاهد به دست آمد (جدول ۸). بررسی مقایسه میانگین اثر ساده محرک‌های زیستی نیز نشان داد که میزان هدایت روزنه‌ای شنبلیله تحت تاثیر کاربرد این ترکیبات افزایش نشان داد. بیش‌ترین میزان هدایت روزنه‌ای در تیمار کاربرد ترکیبی سه محرک‌زیستی به‌دست آمد که با تیمار گلوتامیک‌اسید تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۹).

نتایج مقایسه میانگین برهمکنش کم‌آبیاری و محرک‌های زیستی نشان داد که بالاترین غلظت کربن دی‌اکسید زیر روزنه با کاربرد ترکیبی سه محرک‌زیستی در ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به دست آمد، اما با تیمار کاربرد ترکیبی سه محرک-زیستی در ۸۰ درصد ظرفیت زراعی و تیمار کاربرد گلوتامیک-اسید در ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی اختلاف معنی‌داری نشان نداد. در مجموع کاربرد محرک‌های زیستی در همه سطوح تنش کم‌آبیاری منجر به افزایش غلظت کربن دی‌اکسید زیر روزنه شد. برخلاف این، تیمار تنش کم آبیاری، فارغ از کاربرد محرک‌های زیستی، کاهش غلظت کربن دی‌اکسید زیر روزنه را به همراه داشت (جدول ۶).

نرخ فتوسنتز و تعرق

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات ساده تنش کم-آبیاری و محرک‌های زیستی بر سرعت فتوسنتز و تعرق در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۷). نتایج مقایسه میانگین اثر ساده کم‌آبیاری نشان داد که تنش کم-آبیاری باعث کاهش سرعت فتوسنتز و تعرق شد، به‌نحوی‌که میزان فتوسنتز و تعرق در تیمار ۶۰ درصد ظرفیت زراعی در مقایسه با تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به ترتیب ۲۰/۶۹ و ۱۶/۱۰ درصد کاهش یافت (جدول ۸). بررسی مقایسه میانگین اثر ساده محرک‌های زیستی نیز نشان داد که کاربرد هر یک از محرک‌های زیستی به تنهایی منجر به افزایش میزان فتوسنتز و تعرق شد. با این حال اثر مثبت کاربرد ترکیبی سه محرک‌زیستی بر فتوسنتز و تعرق بسیار بیشتر بود، به‌نحوی‌که بیش‌ترین میزان فتوسنتز در تیمار کاربرد ترکیبی سه محرک‌زیستی به‌دست آمد. بیش‌ترین میزان تعرق در تیمار کاربرد ترکیبی سه محرک‌زیستی حاصل شد، اما اختلاف معنی‌داری با تیمار گلوتامیک اسید نشان نداد (جدول ۹).

نیتروژن کل

براساس نتایج تجزیه واریانس، اثرات ساده تنش کم‌آبیاری و محرک‌های‌زیستی بر محتوای نیتروژن کل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۷). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که تنش کم‌آبیاری موجب کاهش معنی‌دار میزان نیتروژن کل شد، بطوریکه کاهش ۱۹/۱۴ درصدی در میزان نیتروژن کل در سطح آبیاری ۶۰ درصد ظرفیت زراعی در مقایسه با ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده گردید (جدول ۸). بررسی مقایسه میانگین اثر ساده محرک‌های زیستی نیز نشان داد که کاربرد هر یک از محرک‌های زیستی به صورت جداگانه باعث افزایش میزان نیتروژن شنبلیله گردید. با این حال، اثر مثبت کاربرد ترکیبی سه محرک زیستی بسیار بیشتر بود، به‌نحوی‌که بیش‌ترین نیتروژن کل در این تیمار به‌دست آمد (جدول ۹).

محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی

نسخه پیش از انتشار

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات ساده تنش کم-آبیاری و محرک‌های زیستی بر میزان کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید در سطح احتمال یک درصد معنی-دار بود. برهمکنش دو تیمار تنها در مورد کلروفیل b و کلروفیل کل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۷). نتایج مقایسه میانگین اثر ساده کم‌آبیاری نشان داد که با اعمال تنش کم‌آبیاری، میزان کلروفیل a و کاروتنوئید به صورت خطی کاهش یافت، به نحوی که در تیمار ۶۰ درصد ظرفیت زراعی به ترتیب کاهش ۲۳/۲۶ و ۳۲/۱۳ درصدی میزان کلروفیل a و کاروتنوئید در مقایسه با تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد (جدول ۸). بررسی مقایسه میانگین اثر ساده محرک‌های زیستی نیز نشان داد که میزان کلروفیل a و کاروتنوئید تحت تاثیر کاربرد منفرد و ترکیبی محرک‌های زیستی افزایش نشان داد. بیش‌ترین میزان کلروفیل a در تیمارهای کاربرد ترکیبی سه محرک‌زیستی و نیکوتینیک‌اسید به‌دست آمد. بیش‌ترین میزان کاروتنوئید نیز مربوط به تیمار کاربرد ترکیبی سه محرک‌زیستی بود (جدول ۹).

جدول ۷. تجزیه واریانس اثر تنش کم‌آبیاری و محرک‌های زیستی بر برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی و تبادلات گازی گیاه شنبلیله

Table 7. Analysis of variance of the effect of water deficit stress and biostimulants on some biochemical characteristics and gas exchange of fenugreek

منبع تغییرات S. O. V	درجه آزادی df	محتوای نسبی آب برگ RWC	سرعت فتوسنتز Pn	هدایت روزنه‌ای Stomatal conductance	کربن دی اکسید زیر اتاقک روزنه Int. CO_2	تعرق Transpiration
بلوک R	3	22.92*	27.52**	2261.26^{ns}	2332.15**	0.14^{ns}
تنش Stress (S)	2	1162.52**	74.33**	6413.75*	107974.21**	1.20**
محلول‌پاشی Spray (SP)	4	289.53**	110.65**	52679.55**	41204.51**	3.31**
تنش × محلول‌پاشی S × SP	8	53.18**	1.07^{ns}	95.95^{ns}	5941.96**	0.05^{ns}
خطای کل Total error	42	7.65	5.73	1494.96	571.776	0.13
ضریب تغییرات CV (%)	-	*4.01*	*14.36*	*14.70*	*6.04*	*13.37*

Table 7. Continued

جدول ۷. ادامه

منبع تغییرات S. O. V	درجه آزادی df	نیتروژن کل Total nitrogen	کلروفیل a Chl a	کلروفیل b Chl b	کلروفیل کل Total Chl	کاروتنوئید Carotenoid
بلوک R	3	0.16^{ns}	2.74*	1.08^{ns}	6.98**	2.52**
تنش Stress (S)	2	3.24**	50.63**	23.61**	137.85**	17.54**
محلول‌پاشی Spray (SP)	4	7.30**	114.95**	29.29**	257.67**	31.88**
تنش × محلول‌پاشی S × SP	8	0.07^{ns}	0.63^{ns}	2.77**	3.70**	0.06^{ns}
خطای کل Total error	42	0.19	0.80	0.49	1.79	0.43
ضریب تغییرات CV (%)	-	*11.54*	*7.38*	*10.93*	*7.21*	*13.41*

^{ns} عدم وجود اختلاف معنی‌دار، ** و * به ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱ و ۰/۰۵

^{ns} no significant difference, ** and * significant difference at the 0.01 and 0.05 probability levels, respectively.

برهمکنش تیمارهای کم‌آبیاری و محرک‌های زیستی نشان داد که بیشترین میزان کلروفیل b در تیمار کاربرد ترکیبی سه محرک‌زیستی در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به دست آمد که اختلاف معنی‌داری با

نسخه پیش از انتشار

تیمارهای کاربرد ترکیبی سه محرک‌زیستی در ۸۰ درصد ظرفیت زراعی و کاربرد نیکوتینیک‌اسید در هر دو سطح آبیاری ۱۰۰ و ۸۰ درصد ظرفیت زراعی نشان نداد. کمترین میزان کلروفیل b نیز مربوط به تیمار شاهد در سطح کم-آبیاری ۶۰ درصد ظرفیت زراعی بود، اما اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد در سطح کم‌آبیاری ۸۰ درصد ظرفیت زراعی نداشت. نتایج برهمکنش تیمارها بر میزان کلروفیل کل نیز نشان داد که تیمار کاربرد ترکیبی سه محرک‌زیستی در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی بالاترین میزان کلروفیل کل را به همراه داشت. کمترین میزان کلروفیل کل نیز در تیمار عدم محلول‌پاشی محرک‌های زیستی و در سطح کم‌آبیاری ۶۰ درصد ظرفیت زراعی ثبت شد. در مجموع کاربرد محرک‌های زیستی در اغلب سطوح تنش خشکی باعث افزایش میزان کلروفیل b و کلروفیل کل شد. بر خلاف این، اعمال تنش کم‌آبیاری کاهش کلروفیل b و کلروفیل کل را به همراه داشت (جدول ۶).

جدول ۸. مقایسه میانگین اثر تنش کم‌آبیاری بر تبادلات گازی، رنگدانه‌های فتوسنتزی و نیتروژن کل گیاه شنبلیله

Table 8. Mean comparison of the effect of water deficit stress on gas exchange, photosynthetic pigments and total nitrogen of fenugreek

تنش کم‌آبیاری Stress	هدایت روزنه‌ای Stomatal conductance	سرعت فتوسنتز Pn	تعرق Transpiration	کلروفیل a Chl a	کاروتنوئید Carotenoid	نیتروژن کل Total nitrogen
% FC	----------mmol cm^{-2}----------			-------mg g^{-1} FW-------		%
100	281.35^{a}	18.60^{a}	2.98^{a}	13.67^{a}	5.82^{a}	4.23^{a}
80	261.60^{ab}	16.63^{b}	2.66^{b}	12.27^{b}	5.03^{b}	3.83^{b}
60	245.60^{b}	14.75^{c}	2.50^{b}	10.49^{c}	3.95^{c}	3.42^{c}

*میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از آزمون LSD می‌باشند.

*Means with common letters in each column indicate no significant difference at the 5% probability level using the LSD test

جدول ۹. مقایسه میانگین اثر تیمار محلول‌پاشی محرک‌های زیستی بر تبادلات گازی، رنگدانه‌های فتوسنتزی و نیتروژن کل گیاه شنبلیله

Table 9. Mean comparison of the effect of foliar spray treatment with biostimulants on gas exchange, photosynthetic pigments and total nitrogen of fenugree

محرک‌های زیستی Biostimulants	هدایت روزنه‌ای Stomatal conductance	سرعت فتوسنتز Pn	تعرق Transpiration	کلروفیل a Chl a	کاروتنوئید Carotenoid	نیتروژن کل Total nitrogen
$mg.L^{-1}$	----------mmol cm^{-2}----------			-------mg g^{-1} FW-------		%
شاهد **Control**	157.67^{d}	12.02^{d}	1.94^{d}	7.62^{d}	2.70^{e}	2.71^{c}
گلوتامیک‌اسید **Glutamic acid (GA)**	301.3^{ab}	17.96^{b}	2.72^{bc}	12.61^{b}	5.94^{b}	3.99^{b}
نیکوتینیک‌اسید **Nicotinic acid (NA)**	281.58^{b}	15.75^{c}	2.96^{b}	14.58^{a}	5.34^{c}	3.91^{b}
آسپارتیک‌اسید **Aspartic acid (AA)**	244.92^{c}	17.40^{bc}	2.60^{c}	10.67^{c}	3.91^{d}	3.63^{b}
گلوتامیک×نیکوتینیک×آسپارتیک **GA × NA × AA**	328.75^{a}	20.17^{a}	3.37^{a}	15.24^{a}	6.77^{a}	4.88^{a}

*میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از آزمون LSD می‌باشند.

*Means with common letters in each column indicate no significant difference at the 5% probability level using the LSD test

بحث

خشکی به دوره کمبود آب اطلاق می‌شود که بر سرعت رشد گیاه تأثیر منفی می‌گذارد. این پدیده در کشاورزی از اهمیت بالایی برخوردار است. تنش خشکی زمانی رخ می‌دهد که مقدار آبی که توسط ریشه گیاه جذب می‌شود برای تعرق

برگ‌ها کافی نباشد، در نتیجه منجر به کاهش پتانسیل آب و کم آبی سلولی می‌شود (Qiao et al., 2024).

خشکی بر فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی مختلف گیاه مانند فتوسنتز، جذب و متابولیسم نیتروژن تأثیر می‌گذارد (Mumivand et al., 2021b; Khanizadeh et al., 2024; Nadeem et al., 2019). با این حال، تأثیر اولیه تنش خشکی در کاهش رشد سلولی، به‌ویژه در ساقه و برگ منعکس شده و رشد ساقه متوقف و رشد برگ نیز محدود می‌شود (Zhang et al., 2018). یکی از علائم اولیه کمبود آب کاهش فشار تورژسانس است که منجر به اختلال در رشد و تکامل سلولی، به‌ویژه در ساقه و برگ می‌شود (Gao et al., 2018; Huang et al., 2018). علاوه بر این، در شرایط تنش خشکی جذب مواد مغذی کاهش می‌یابد. این موضوع به دلیل کاهش سرعت انتشار مواد مغذی از ماتریکس خاک به سطح جذب کننده ریشه است که رشد و توسعه برگ را محدود می‌کند، در نتیجه کاهش سطح برگ و ظرفیت کلی فتوسنتزی را موجب می‌شود (Emami Bistgani et al., 2023). همانطور که نتایج پژوهش حاضر نیز نشان داد، تنش خشکی منجر به کاهش ویژگی‌های رشدی و عملکرد شنبلیله از قبیل ارتفاع بوته، سطح برگ و وزن تر و خشک بوته گردید. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2018) اشاره کردند که کاهش زیست توده در شرایط تنش خشکی را می‌توان به کاهش سطح برگ و نرخ فتوسنتزی کم‌تر به دلیل محدودیت‌های بیوشیمیایی و کمبود آب، مانند کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی نسبت داد. در شرایط خشکی، نرخ فتوسنتز کاهش می‌یابد. این فرآیند ممکن است با آسیب به مزوفیل در نتیجه افزایش مقاومت روزنه‌ها تحت تنش خشکی همراه باشد که با ممانعت از ورود دی‌اکسیدکربن به گیاه، فتوسنتز خالص کاهش یافته و منجر به کاهش شدید در رشد و زیست توده گیاهی می‌شود (Bagheri Faradonbeh et al., 2022). گزارشات سایر محققان نیز تاثیر منفی تنش خشکی را بر خصوصیات مورفولوژیکی و عملکرد (استقرار گیاه، ارتفاع بوته، خصوصیات برگ و ریشه، وزن خشک اندام هوایی و ریشه و عملکرد) و همچنین ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان مختلف از جمله ترخون (*Artemisia dracunculus* L.) و مرزه (*Satureja rechingeri* Jamzad) نشان داده است (Mumivand et al., 2021a; Beiranvandi et al., 2022).

یکی دیگر از علائم قابل توجه تنش‌های محیطی در گیاهان کاهش محتوای کلروفیل است. در این پژوهش مشخص شد که تنش خشکی محتوای کلروفیل و کاروتنوئید را در برگ‌های شنبلیله کاهش داد و این کاهش در سطح تنش شدید مشهودتر بود. کلروفیل نقش حیاتی در فتوسنتز از طریق جذب، انتقال، توزیع و تبدیل انرژی نور دارد. محتوای کلروفیل اغلب با سرعت فتوسنتز و تجمع مواد آلی ارتباط دارد (Jianguo et al., 2018). متابولیسم کلروفیل شامل یک مسیر پیچیده از جمله بیوسنتز و تخریب است. آنزیم‌های مختلفی بیوسنتز کلروفیل را کاتالیز می‌کند و فعالیت آن‌ها می‌تواند تحت شرایط تنش خشکی مهار شود (Liu et al., 2019). گزارش شده که کاهش مشاهده شده در کلروفیل در گیاه تحت شرایط کم آبی، با تغییرات ناشی از تنش در پیش‌ساز کلروفیل، سنتز یا تخریب تحت تنش خشکی و فعال شدن Pheide a که یک واسطه در تجزیه کلروفیل است افزایش می‌یابد (Emami Bistgani et al., 2023). همچنین حذف اتم منیزیم مرکزی پورفیرین و فیتول آبگریز از طریق Pheide a اکسیژناز (PAO) تحت تنش شدید رخ می‌دهد. علاوه بر این، هیدرولیز فیتول کاتالیز شده توسط کلروفیلاز ممکن است قبل از حذف منیزیم رخ دهد (Shin et al., 2021).

گیاهان در طول خشکی برای به حداکثر رساندن استفاده از آب با حفظ مسیرهای ضروری، دستخوش تغییرات فیزیولوژیکی متعددی می‌شوند (Gupta et al., 2020; Sato et al., 2024; Qi et al., 2021). برخی از این رفتارهای فیزیولوژیکی شامل بسته شدن روزنه برای به حداقل رساندن اتلاف آب از طریق تعرق و تغییرات سیستم ریشه با هدف افزایش جذب آب گیاهان است (Pei et al., 2023; Gupta et al., 2020). بسته شدن روزنه‌ها در شرایط تنش خشکی، در دسترس بودن دی‌کسیدکربن برای کلروپلاست و در نتیجه سرعت فتوسنتز را کاهش می‌دهد. تنش خشکی به‌طور قابل توجهی بر محتوای نسبی آب بافت‌های گیاهی که یک شاخص حیاتی از وضعیت آبی گیاه و توانایی آن در حفظ عملکردهای فیزیولوژیکی تحت شرایط کمبود آب است تأثیر می‌گذارد (Martinez-Vilalta et al., 2019; Ahmad et al., 2022). کاهش محتوای نسبی آب منجر به کم آبی سلولی، کاهش تورژسانس سلولی و اختلال در فعالیت‌های متابولیکی از جمله فتوسنتز می‌شود (Qiao et al., 2024). بهبود جذب آب از طریق تغییرات در سیستم ریشه، شامل

تغییرات در ساختار ریشه با رشد سیستم ریشه عمیق، کاهش تراکم انشعابات جانبی ریشه و افزایش نسبت ریشه به ساقه، یکی از جنبه‌های ضروری بقای گیاه در شرایط تنش خشکی است (Lucob-Agustin et al., 2021).

در پژوهش حاضر کاربرد محرک‌های زیستی اثرات قابل توجهی در بهبود اغلب ویژگی‌های شنبلیله بر جای گذاشت و با افزایش ارتفاع بوته، تعداد شاخه جانبی، سطح برگ، وزن تر و خشک بوته و ریشه نقش موثری در بهبود عملکرد گیاه ایفا نمود. اسیدهای آمینه به‌عنوان اجزای تشکیل دهنده آنزیم‌ها (مانند آمینوترانسفرازها، دهیدروژنازها، لیازها و دکربوکسیلازها) در طیف گسترده‌ای از واکنش‌های آنزیمی سلول در متابولیسم اولیه و ثانویه گیاهان شرکت می‌کنند. بنابراین می‌توانند روی انواع فرآیندهای فنولوژیک و فیزیولوژیکی مانند رشد رویشی، سیگنال‌دهی و فعال‌سازی سیستم‌های دفاعی در برابر تنش‌های غیرزیستی و زیستی، تنظیم اسمزی، غیرفعال‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن تأثیر بگذارند و به‌عنوان منبع ذخیره نیتروژن ایفای نقش کنند (Teixeira et al., 2017). این عملکردهای مهم آمینواسیدها در گیاهان منجر به استفاده از محصولات محرک زیستی حاوی آمینواسیدها یا به شکل آزاد خود شده است (Khan et al., 2019). در پژوهش‌های پیشین اثرات مثبت استفاده همزمان از گلوتامیک اسید و آسپارتیک اسید در گیاه کیمچی (*Brassica campestris* spp. pekinensi) گزارش شده است (Lee et al., 2017). اثر مثبت محرک‌های زیستی در شرایط تنش، احتمالاً به نقش حیاتی آن‌ها در محافظت از پروتئین‌ها و دستگاه فتوسنتزی مربوط می‌شود. به‌عنوان مثال رن و همکاران (Ren et al., 2020) نشان دادند که آمینواسیدها می‌توانند به‌عنوان اسمولیت‌های مهم برای تعادل پتانسیل اسمزی سلولی و کنترل انتقال یون و باز شدن روزنه عمل کنند. همچنین، کاربرد ترپیتوفان باعث افزایش هدایت روزنه‌ای و تعرق در بسیاری از محصولات شده است (Peña Calzada et al., 2022). همچنین نشان داده شده که میزان فتوسنتز آفتابگردان با کاربرد آرژنین بهبود یافت (Ramadan et al., 2019). علاوه بر این، نشان داده شده است که کاربرد خارجی ترپیتوفان باعث افزایش میزان هدایت روزنه و تعرق در بسیاری از محصولات شده است (Mustafa et al., 2018). محلول‌پاشی گلوتامیک‌اسید و آسپارتیک‌اسید در شرایط تنش خشکی سرعت فتوسنتز و هدایت روزنه‌ای برنج را بهبود بخشید (Rizwan et al., 2017; Lee et al., 2017). در مطالعه حاضر نیز تاثیر مثبت کاربرد محرک‌های زیستی بر رشد و عملکرد شنبلیله را می‌توان به نقش موثر این ترکیبات در افزایش رنگدانه‌های گیاهی، نرخ فتوسنتز خالص، بهبود تبادلات گازی و وضعیت آبی گیاه و افزایش میزان نیتروژن نسبت داد.

در مطالعه حاضر محتوای نسبی آب برگ با افزایش تنش کم‌آبیاری کاهش یافت. با این حال، استفاده از تیمار ترکیبی محرک‌های زیستی باعث بهبود محتوای نسبی آب برگ شد که علاوه بر اثر تنظیمی این ترکیبات بر تبادلات گازی می‌تواند با نقش این ترکیبات در تولید محلول‌های سازگار در ارتباط باشد. اسیدهای آمینه به‌عنوان یک محافظ اسمزی عمل کرده و در تنظیم اسمزی، غیرفعال کردن رادیکال‌های آزاد اکسیژن و تنظیم جذب مواد مغذی نقش دارند، همچنین می‌توانند جذب کربن دی‌اکسید را القا کند (Pervaiz et al., 2019; Jadidi et al., 2023). از طرف دیگر، محلول‌پاشی آمینواسیدها می‌تواند روابط آبی را با تنظیم حمل و نقل یون تنظیم کند (Patel et al., 2020). نتایج مطالعات انجام شده در ریحان (Kahveci et al., 2021) و گوجه فرنگی (Alfosea-Simón et al., 2020) نشان دهنده بهبود محتوای آب گیاهان با کاربرد ترکیبی گلیسین و تریپتوفان بود و با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد. نتایج به دست آمده از این پژوهش، مبنی بر افزایش میزان محتوای نسبی آب برگ در گیاه شنبلیله تحت تنش خشکی با کاربرد محرک‌های زیستی، به خوبی بیانگر تنظیم روابط آبی گیاه است. مقادیر بالاتر محتوای نسبی آب برگ در هویج در پاسخ به محلول‌پاشی آمینواسید گابا بوتیریک‌اسید تحت شرایط کم‌آبی گزارش شده است که با نتایج مطالعه حاضر مطابقت دارد (Bashir et al., 2020). همچنین نتایج ما در این زمینه با گزارشات جانگکلانگ و همکاران (Jungklang et al., 2017) در *Curcuma alismatifolia* Gagnep و ژو و همکاران (Zhou et al., 2014) در علف برمودای هیبریدی (*Cynodon dactylon*) مطابقت دارد. گیاهان دارای گیرنده‌های گلوتامات هستند که نه تنها می‌توانند توسط گلوتامات فعال شوند، بلکه توسط سایر آمینواسیدها نیز فعال خواهند شد. فعال شدن این گیرنده‌ها می‌تواند زنجیره‌ای از مکانیسم‌های سیگنال‌دهی در فرآیندهای مربوط به جذب نیتروژن در ریشه (Alfosea-Simón et al., 2021)، رشد و ساختار ریشه (Weiland et al., 2016)، متابولیسم آنتی‌اکسیدانی (Hildebrandt et al., 2015; Weiland et al., 2016)،

نسخه پیش از انتشار

فتوسنتز و دفاع گیاهی (Weiland et al., 2016) و همچنین تعادل بین متابولیسم کربن و نیتروژن را تنظیم کند (Alfosea-Simón et al., 2021). یافته‌های ما نیز نشان داد که کاربرد آسپارتیک اسید و گلوتامیک اسید نه تنها باعث افزایش وزن تر و خشک ریشه شد، بلکه محتوای نیتروژن کل شنبلیله را افزایش داد. این امر می‌تواند نشان دهنده‌ی نقش مثبت این ترکیبات در بهبود رشد و توسعه ریشه و جذب بهتر نیتروژن گیاه باشد.

نیکوتینیک‌اسید در بسیاری از مسیرهای فیزیولوژیکی گیاهان نقش دارد و از اجزاء چندین آنزیم درگیر در مسیرهای بیوشیمیایی اصلی مانند بیوسنتز پروتئین، ایندول استیک-اسید اکسیداز (Noctor et al., 2016)، آمیلاز و پروتئیناز است (Hussein et al., 2014). نتایج بررسی‌ها نشان دهنده افزایش معنی‌دار ویژگی‌های رشدی شنبلیله (وزن تر و خشک بوته و ریشه، تعداد و سطح برگ) تحت تیمار نیکوتینیک‌اسید است (Najafi et al., 2022). بهبود محتوای کاروتنوئید و کلروفیل نیز با محلول‌پاشی نیکوتین‌آمید در لوبیا (*Vicia faba* L.) مشاهده شده است که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد (Dawood et al., 2019). کاربرد این ماده در جو (*Hordeum vulgare* L.) تحت تنش خشکی نیز منجر به افزایش ویژگی‌های رشدی، عملکردی و نیز بهبود محتوای نسبی آب برگ گردید (Farooq et al., 2022). مطالعات متعدد نشان داده است که نیکوتینیک‌اسید می‌تواند منجر به افزایش سرعت فتوسنتز در محصولات مختلف شود، که به‌طور بالقوه به عواملی مانند افزایش غلظت کلروفیل، تغییر در ساختار برگ و افزایش فعالیت ریبولوز بیس فسفات کربوکسیلاز نسبت داده می‌شود (Shemi et al., 2021). کاربرد نیکوتینیک‌اسید در گیاهان غالباً باعث افزایش تجمع ماده خشک می‌شود. در تطابق با نتایج مطالعه حاضر، کاربرد نیکوتینیک‌اسید در گندم به‌طور قابل توجهی کارایی فتوسنتز و تثبیت کربن را بهبود بخشید که منجر به افزایش عملکرد گیاه شد (Ahmad et al., 2021).

نتیجه‌گیری نهایی

یافته‌های مطالعه حاضر مشخص نمود که تنش کم‌آبیاری به خصوص در سطح ۶۰ درصد ظرفیت زراعی، با کاهش تبادلات گازی، نرخ فتوسنتز، رنگدانه‌های گیاهی، نیتروژن کل و محتوای نسبی آب برگ منجر به کاهش رشد و عملکرد کلی شنبلیله شد. به‌نحوی که ارتفاع بوته، سطح برگ، وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه با اعمال تنش کم آبیاری کاهش نشان دادند. همچنین مشخص شد که با کاربرد محرک‌های زیستی به‌عنوان تعدیل‌کننده، اثرات منفی ناشی از تنش خشکی بر ارتفاع بوته، تعداد و طول شاخه جانبی، طول ریشه، فاصله میانگره، سطح برگ، وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه کاهش یافت. با توجه به افزایش محتوای نسبی آب برگ، رنگدانه‌های گیاهی، تبادلات گازی، نرخ فتوسنتز و محتوای نیتروژن کل با کاربرد محرک‌های زیستی، بهبود رشد و ویژگی‌های عملکردی گیاه می‌تواند با این اثرات مثبت محرک‌های زیستی مرتبط باشد. کاربرد ترکیبی محرک‌های زیستی منجر به حصول بهترین نتایج در صفات عملکردی و فیزیولوژیکی گیاه شد. با این حال، آسپارتیک اسید در مقایسه با نیکوتینیک اسید و گلوتامیک اسید اثرات مثبت بیشتری در سطح برگ و وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه داشت. در مجموع می‌توان اظهار داشت که کاربرد ترکیبی این محرک-های زیستی می‌تواند با تاثیر مثبت بر رشد و عملکرد شنبلیله در شرایط تنش کم‌آبی موجب کاهش خسارت تنش شود.

نسخه پیش از انتشار

منابع

Aasim, M., Baloch, F.S., Nadeem, M.A., Bakhsh, A., Sameeullah, M., Day, S., 2018. Fenugreek (*Trigonella foenum*-graecum L.): an underutilized edible plant of the modern world. In Global perspectives on underutilized crops. (pp. 381-408). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77776-4_12

Aghamirzaei, H., Mumivand, H., Nia, A.E., Raji, M.R., Maroyi, A., Maggi, F., 2024. Effects of micronutrients on the growth and phytochemical composition of Basil (*Ocimum basilicum* L.) in the field and greenhouse (hydroponics and soil culture). Plants. 13, 2498. https://doi.org/10.3390/plants13172498

Ahmad, A., Alghamdi, S.S., Mahmood, K., Afzal, M., 2016. Fenugreek a multipurpose crop: Potentialities and improvements. Saudi Journal of Biological Sciences. 23, 300–310. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.09.015

Ahmad, A., Aslam, Z., Javed, T., Hussain, S., Raza, A., Shabbir, R., Mora-Poblete, F., Saeed, T., Zulfiqar, F., Ali, M.M., 2022. Screening of Wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes for drought tolerance through agronomic and physiological response. Agronomy. 12, 287. https://doi.org/10.3390/agronomy12020287

Ahmad, Z., Bashir, K., Matsui, A., Tanaka, M., Sasaki, R., Oikawa, A., Hirai, M.Y., Chaomurilege, Zu, Y, Kawai-Yamada, M., Rashid, B., Husnain, T., Seki, M., 2021. Overexpression of nicotinamidase 3 (NIC3) gene and the exogenous application of nicotinic acid (NA) enhance drought tolerance and increase biomass in Arabidopsis. Plant Molecular Biology. 107, 63–84. https://doi.org/10.1007/s11103-021-01179-z

Ahmadi, S. Z., Zahedi, B., Ghorbanpour, M., Mumivand, H., 2024. Comparative morpho-physiological and biochemical responses of *Capsicum annuum* L. plants to multi-walled carbon nanotubes, fullerene C60 and graphene nanoplatelets exposure under water deficit stress. BMC Plant Biology. 24, 116. https://doi.org/10.1186/s12870-024-04798-y

Akbarzadeh, S., Morshedloo, M. R., Behtash, F., Mumivand, H., Maggi, F., 2023. Exogenous β-aminobutyric acid (BABA) improves the growth, essential oil content, and composition of grapefruit mint (*Mentha suaveolens*× *piperita*) under water deficit stress conditions. Horticulturae. 9, 354. https://doi.org/10.3390/horticulturae9030354

Alfosea-Simón M, Simón-Grao, S., Zavala-Gonzalez, E.A., Cámara-Zapata, J.M., Simón, I., Martínez-Nicolás, J.J., Lidón, V., García-Sánchez, F., 2021. Physiological, nutritional and metabolomic responses of tomato plants after the foliar application of amino acids aspartic acid, glutamic acid and alanine. Frontiers in Plant Science. 11, 581234. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.581234

Alfosea-Simón, M., Zavala-Gonzalez, E.A., Camara-Zapata, J.M., Martínez-Nicolás, J.J., Simón, I., Simón-Grao, S., García-Sánchez, F., 2020. Effect of foliar application of amino acids on the salinity tolerance of tomato plants cultivated under hydroponic system. Science Horticulture. 272, 109509. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109509

Ali, Q., Athar, H.R., Haider, M.Z., Shahid, S., Aslam, N., Shehzad, F., Naseem, J., Ashraf, R., Ali, A., Hussain, S.M., 2019. Role of amino acids in improving abiotic stress tolerance to plants. Plant Tolerance to Environmental Stress. 175-203. https://doi.org/10.1201/9780203705315-12

Bagheri Faradonbeh, H.R., Emami Bistgani, Z., Barker, A.V., 2022. Tuber yield and physiological characteristics of potato under irrigation and fertilizer application, Commun. Soil Science and Plant Analysis. 11, 1432–1443. https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2046039

Bashir, R., Naila Riaz, H., Anwar, S., Parveen, N., Khalilzadeh, R., Hussain, I., Mahmood, S., 2020. Morpho physiological changes in carrots by foliar γ aminobutyric acid under drought stress. Brazilian Journal of Botany. 44 (1), 57-68. https://doi.org/10.1007/s40415-020-00676-7

Beiranvandi, M., Akbari, N., Ahmadi, A., Mumivand, H., Nazarian, F., 2022. Biochar and super absorbent polymer improved growth, yield, and phytochemical characteristics of Satureja rechingeri Jamzad in water-deficiency conditions. Industrial Crops and Products. 183, 114959 . https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114959

Bulgari, R., Franzoni, G., Ferrante, A., 2019. Biostimulants application in horticultural crops under abiotic stress conditions. Agronomy. 9, 306. https://doi.org/10.3390/agronomy9060306

Caspi, R., Billington, R., Keseler, I.M., Kothari, A., Krummenacker, M., Midford, P.E., Ong, W.K., Paley, S., Subhraveti, P., Karp, P.D., 2020. The metacyc database of metabolic pathways and enzymes–A 2020 update. Nucleic Acids Research. 48, D445–D453. https://doi.org/10.1093/nar/gkz862

Dawood, M.G., Abdel-Baky, Y.R., El-Awadi, M.E.S., Bakhoum, G.S., 2019. Enhancement quality and quantity of faba bean plants grown under sandy soil conditions by nicotinamide and/or humic acid application. Bulletin of the National Research Centre. 43 , 1–8. https://doi.org/10.1186/s42269-019-0067-0

Dong, N., Prentice, I.C., Wright, I.J., Evans, B.J., Togashi, H.F., Caddy-Retalic, S., McInerney, F.A., Sparrow, B., Leitch, E., Lowe, A.J., 2020. Components of leaf-trait variation along environmental gradients. New Phytologist. 228, 82–94. https://doi.org/10.1111/nph.16558

Emami Bistgani, Z., Hashemi, M., Akbari, P., Mumivand, H., 2023. Influence of drought stress and foliar application of chitosan on nutrient accumulation and phenolic composition of *Thymus daenensis* Celak. Crop Science. 63, 921-935. https://doi.org/10.1002/csc2.20901

Farooq, T.H., Bukhari, M.A., Irfan, M.S., Rafay, M., Shakoor, A., Rashid, M.H.U., Khurshid, N., 2022. Effect of exogenous application of nicotinic acid on morpho-physiological characteristics of *Hordeum vulgare* L. under Water Stress. Plants. 11, 2443. https://doi.org/10.3390/plants11182443

Fayaz, E., Sorooshzadeh, A., Heidarzadeh, A. 2024. Effect of foliar application of amino acids on some physiological processes of oil rapeseed (*Brassica Napus* L.) under lateseason drought stress conditions. Plant Productions. 47, 65-83. https://doi.org/10.22055/ppd.2024.45873.2138

Gao, Q., Sun, J., Tong, H., Wag, W., Zhang, Y., Zhang, G., Ma, D., Chen, W., 2018. Evaluation of rice drought stress response using carbon isotope discrimination. Plant Physiology and Biochemistry. 132, 80–88. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.08.030

Gupta, A., Rico-Medina, A., Caño-Delgado, A.I., 2020. The physiology of plant responses to drought. Science. 368, 266–269. https://doi.org/10.1126/science.aaz7614

Habashy, W.S., Milfort, M.C., Rekaya, R., Aggrey, S.E., 2019. Cellular antioxidant enzyme activity and biomarkers for oxidative stress are affected by heat stress. International journal of biometeorology. 63, 1569-1584. https://doi.org/10.1007/s00484-019-01769-z

Hildebrandt, T. M., Nunes Nesi, A., Araújo, W. L., Braun, H.P., 2015. Amino acid catabolism in plants. Molecular Plant. 8, 1563–1579. https://doi.org/10.1016/j.molp.2015. 09.005

Huang, L., Li, M., Zhou, K.,Sun, T., Hu, L., Li, C., Ma, F., 2018. Uptake and metabolism of ammonium and nitrate in response to drought stress in *Malus prunifolia*, Plant Physiology and Biochemistry. 127, 185–193. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.03.031

Hussein, M.M., Faham, S.Y., Alva, A.K., 2014. Role of foliar application of NA and tryptophan on onion plants response to salinity stress. Journal of Agricultural Science. 6, 41–45. URL: http://dx.doi.org/10.5539/jas.v6n8p41

Jadidi, M., Mumivand, H., Nia, A.E., Shayganfar, A., Maggi, F., 2023. UV-A and UV-B combined with photosynthetically active radiation change plant growth, antioxidant capacity and essential oil composition of Pelargonium graveolens. BMC Plant Biology. 23, 555. https://doi.org/10.1186/s12870-023-04556-6

Jahanbani, S., Mumivand, H., Zahedi, B., Argento, S., 2024. Foliar application of urea and amino acids regulates growth, photosynthesis, pigments, antioxidant activity, and the essential oil content and composition of Basil (*Ocimum basilicum* L.). Agronomy. 14, 2950. https://doi.org/10.3390/agronomy14122950

Jianguo, Q.L., Simin, S., Lin, Y., Mingiun, L.I., Fengwang, M.A., Yangjun, Z., 2018. Potassium uptake and transport in apple roots under drought stress. Horticultural Plant Journal. 5, 10–16. https://doi.org/10.1016/j.hpj.2018.10.001

Jungklang, J., Saengnil, K., Uthaibutra, J., 2017. Effects of water-deficit stress and paclobutrazol on growth, relative water content, electrolyte leakage, proline content and some antioxidant changes in *Curcuma alismatifolia* Gagnep. Cv. Chiang Mai Pink. Saudi Journal of Biol Science, 24, 1505–1512. https://doi.org/10.1016/j. sjbs.2015.09.017

Kahveci, H., Bilginer, N., Diraz-Yildirim, E., Kulak, M., Yazar, E., Kocacinar, F., Karaman, S.P., 2021. Riming with salicylic acid, β-carotene and tryptophan modulates growth, phenolics and essential oil components of *Ocimum basilicum* L. grown under salinity. Science Horticulture. 281, 109964. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109964

Kan, C.C., Chung, T.Y., Wu, H.Y., Juo, Y.A., Hsieh, M.H., 2017. Exogenous glutamate rapidly induces the expression of genes involved in metabolism and defense responses in rice roots. BMC Genomics. 18, 186. https://doi.org/10.1186/s12864-017-3588-7

Khan, S., Yu, H., Li, Q., Gao, Y., Sallam, B. N., Wang, H., 2019. Exogenous application of amino acids improves the growth and yield of lettuce by enhancing photosynthetic assimilation and nutrient availability. Agronomy. 9, 5. https://doi.org/10.3390/agronomy9050266

Khanizadeh, P., Mumivand, H., Morshedloo, M. R., Maggi, F., 2024. Application of Fe_2O_3

nanoparticles improves the growth, antioxidant power, flavonoid content, and essential oil yield and composition of Dracocephalum kotschyi Boiss. Frontiers in Plant Science. 15, 1475284. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1475284

Khodabin, G., Tahmasebi-Sarvestani, Z., Rad, A.H.S., Modarres-Sanavy, S.A.M., 2020. Effect of drought stress on certain morphological and physiological characteristics of a resistant and a sensitive canola cultivar. Chemistry and biodiversity. 17, e1900399. https://doi.org/10.1002/cbdv.201900399

Khudair, T.Y., Abdul Albbas, F.A., Abdul Kreem, K.A., 2019. Effect of niacin (nicotinamide) and humic acid on growth and chemical traits of *Pelargonium hortorum* L. Indian Journal of Ecology. 46, 173-178. https://faculty.uobasrah.edu.iq/uploads/publications/1628187601

Khurshid, N., Bukhari, M.A., Ahmad, T., Ahmad, Z., Jatoi, W.N., Abbas, S.M., Latif, A., Raza, A., Aurangzaib, M., Hashem, A., Avila-Quezada, G.D., Abd_Allah, E.F., 2023. Exogenously applied nicotinic acid alleviates drought stress by enhancing morpho-physiological traits and antioxidant defense mechanisms in wheat. Ecotoxicology and Environmental Safety. 263, 115350. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115350

Lee, H.J., Kim, J.S., Lee, S.G., Kim, S.K., Mun, B., Choi, C.S., 2017. Glutamic acid foliar application enhances antioxidant enzyme activities in kimchi cabbages leaves treated with low air temperature. Horticultural Science Technology. 35, 700–706. https://doi:org/10.12972/kjhst.20170074

Lichtenthaler, H. K., 1987. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. Methods in Enzymology. 148, 350-382. Academic Press. https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1

Liu, S., Mi, X., Zhang, R., An, Y., Zhou, Q.,Yang, T., Xia, X., Guo, R., Wang, X., Wei, C., 2019. Integrated analysis of miRNAs and their targets reveals that miR319c/TCP2 regulates apical bud burst in tea plant (*Camellia sinensis*). Planta. 250, 1111–1129. https://doi.org/10.1007/s00425-019-03207-1

Lucob-Agustin, N., Kawai, T., Kano-Nakata, M., Suralta, R.R., Niones, J.M., Hasegawa, T., Inari-Ikeda, M., Yamauchi, A., Inukai, Y., 2021. Morpho-physiological and molecular mechanisms of phenotypic root plasticity for rice adaptation to water stress conditions. Breeding Science. 71, 20–29. https://doi.org/10.1270/jsbbs.20106

Mandegary, A., Pournamdari, M., Sharififar, F., Pour Nour Mohammadi, S., Fardiar, R., Shooli, S., 2012. Alkaloid and flavonoid rich fractions of fenugreek seeds (*Trigonella foenum*-graecum L.) with antinociceptive and edicago ammatory effects. Journal of Food Chemistry. 50, 2503–2507. https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.04.020

Martinez-Vilalta, J., Anderegg, W.R.L., Sapes, G., Sala, A., 2019. Greater focus on water pools may improve our ability to understand and anticipate drought-induced mortality in plants. New Phytologist Foundation. 223, 22–32. https://doi.org/10.1111/nph.15644

Mumivand, H., Ebrahimi, A., Morshedloo, M. R., Shayganfar, A., 2021a. Water deficit stress changes in drug yield, antioxidant enzymes activity and essential oil quality and quantity of Tarragon (*Artemisia dracunculus* L.). Industrial Crops and Products. 164, 113381. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113381

Mumivand, H., Ebrahimi, A., Shayganfar, A., Khoshro, H.H., 2021b. Screening of tarragon accessions based on physiological and phytochemical responses under water deficit. Scientific reports. 11, 17839. https://doi.org/10.1038/s41598-021-97388-z

Mumivand, H., Izadi, Z., Amirizadeh, F., Maggi, F., Morshedloo, M.R., 2023. Biochar amendment improves growth and the essential oil quality and quantity of peppermint (*Mentha*× *piperita* L.) grown under waste water and reduces environmental contamination from waste water disposal. Journal of Hazardous Materials. 446, 130674. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130674

Mustafa, A., Imran, M., Ashraf, M., Mahmood, K., 2018. Perspectives of using L-tryptophan for improving productivity of agricultural crops: A review. Pedosphere. 28, 16–34. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60002-5

Nadeem, M., Li, J., Yahya, M., Sher, A., Ma, C., Wang, X., Qiu, L., 2019. Research progress and perspective on drought stress in legumes: A Review. International Journal of Molecular Science. 20, 2541. https://doi.org/10.3390/ijms20102541

Najafi, R., Rezaei, A., Talei, D., 2022. Potential of ultrasound and nicotinic acid to improve physiological responses and trigonelline biosynthesis in fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.). Industrial Crops & Products. 18, 114815. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114815

Nardini, A., 2022. Hard and tough: the coordination between leaf mechanical resistance and drought tolerance. Flora. 288, 152023. https://doi.org/10.1016/j.flora.2022.152023

Nelson, D.W., Sommers, L.E., 1973. Determination of total nitrogen in plant material 1. Agronomy Journal. 65, 109-112. https://doi.org/10.2134/agronj1973.00021962006500010033x

Noctor, G., Mhamdi, A., Foyer, C.H., 2016. Oxidative stress and antioxidative systems: recipes for successful data collection and interpretation. Plant, Cell and Environment. 39, 1140–1160. https://doi.org/10.1111/pce.12726

Noroozlo, Y.A., Souri, M.K., Delshad, M., 2019. Effects of foliar application of glycine and glutamine amino acids on growth and quality of sweet basil. Advances in Horticultural Science. 33(4), 495-502. https://doi.org/10.13128/ahsc-8127

Orsák, M., Kotíková, Z., Hnilička, F., Lachman, J., 2023. Effect of long-term drought and waterlogging stress on photosynthetic pigments in potato. Plant, Soil & Environment. 69. https://doi.org/10.17221/415/2022-PSE

Padmaja, V.V., Pavani, K., Srilatha, P., Lalitha, K., Sarada, G., Raja Naik, M., Deepti Kiran, Y., Gopal, K., 2023. Role of Biostimulants in Horticulture. International Journal of Environment and Climate Change. 13, 1146-1157. https://doi.org/10.9734/IJECC/2023/v13i82054

Patel, M.K., Kumar, M., Li, W., Luo, Y., Burritt, D.J., Alkan, N., Tran, L.-S.P., 2020. Enhancing salt tolerance of plants: From metabolic reprogramming to exogenous chemical treatments and molecular approaches. Cells. 9, 2492. https://doi.org/10.3390/cells9112492

Pei, Y.Y., Lei, L., Fan, X.W., Li, Y.Z., 2023. Effects of high air temperature, drought, and both combinations on maize: A case study. Plant Science. 327, 111543. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2022.111543

Peña Calzada, K., Olivera Viciedo, D., Habermann, E., Calero Hurtado, A., Lupino Gratão, P., De Mello Prado, R., Lata-Tenesaca, L.F., Martinez, C.A., Ajila Celi, G.E., Rodríguez, J.C., 2022. Exogenous application of amino acids mitigates the deleterious effects of salt stress on Soybean plants. Agronomy. 12, 2014. https://doi.org/doi.org/10.3390/agronomy12092014

Pervaiz, A., Iqbal, A., Khalid, A., Manzoor, A., Noreen, S., Ayaz, A., 2019. Proline induced modulation in physiological responses in wheat plants. Journal of Agricultural Environmente Science. 8, 112–119. https://doi.org/10.15640/jaes.v8n1a11

Prasad, P.V.V., Djanaguiraman, M., Jagadish, S.V.K., Ciampitti, I.A., 2019. Drought and high temperature stress and traits associated with tolerance. In: Ciampitti I.A., Prasad P.V.V. (eds.), Sorghum: A State of the Art and Future Perspectives. Madison, American Society of Agronomy. 245–265. https://doi.org/10.2134/agronmonogr58.c11

Qi, M., Liu, X., Li, Y., Song, H., Yin, Z., Zhang, F., He, Q., Xu, Z., Zhou, G., 2021. Photosynthetic resistance and resilience under drought, flooding and rewatering in maize plants. Photosynthesis Research. 148, 1–15. Photosynthesis Research. https://doi.org/10.1007/s11120-021-00825-3

Qiao, M., Hong, C., Jiao, Y., Hou, S., Gao, H., 2024. Impacts of drought on photosynthesis in major food crops and the related mechanisms of plant responses to drought. Plants. 13, 1808. https://doi.org/10.3390/plants13131808

Ramadan, A.A., Elhamid, E.M.A., Sadak, M.S., 2019. Comparative study for the effect of arginine and sodium nitroprusside on sunflower plants grown under salinity stress conditions. Bulletin of the National Research Centre. 43, 118. https://doi.org/10.1186/s42269-019-0156-0

Ren, J., Ye, J., Yin, L., Li, G., Deng, X., Wang, S., 2020. Exogenous melatonin improves salt tolerance by mitigating osmotic, ion, and oxidative stresses in Maize seedlings. Agronomy. 10, 663. https://doi.org/10.3390/agronomy10050663

Ritchie, S.W., Hanson, A.D., 1990. Leaf water content and gas exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. Crop Science Journal. 30, 105-11.

https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000010025x

Rizwan, M., Ali, S., Akbar, M. Z., Shakoor, M. B., Mahmood, A., Ishaque, W., 2017. Foliar application of aspartic acid lowers cadmium uptake and Cd-induced oxidative stress in rice under Cd stress. Environmental Science and Pollution Research. 24, 21938–21947. https://doi.org/10.1007/s11356-017- 9860-1

Sadak, M.S.H., Abdelhamid, M.T., Schmidhalter, U., 2015. Effect of foliar application of aminoacids on plant yield and some physiological parameters in bean plants irrigated with seawater. Acta Biológica Colombiana. 20, 141–152. https://doi.org/10.15446/abc.v20n1.42865

Santi, C., Molesini, B., Gluzzo, F., Pii, Y., Vitulo, N., Pandolfini, T., 2017. Genome-wide transcriptional changes and lipid profile modifications induced by edicago truncatula N5 overexpression at an early stage of the symbiotic interaction with sinorhizobium meliloti. Genes. 8, 396. https://doi.org/10.3390/genes8120396

Sato, H., Mizoi, J., Shinozaki, K., Yamaguchi-Shinozaki, K., 2024. Complex plant responses to drought and heat stress under climate change. Plant Journal. 117, 1873–1892. https://doi.org/10.1111/tpj.16612

Shemi, R., Wang, R., Gheith, E.S.M.S., Hussain, H.A., Hussain, S., Irfan, M., Cholidah, L., Zhang, K., Zhang, S., Wang, L., 2021. Effects of salicylic acid, zinc and glycine betaine on morpho-physiological growth and yield of maize under drought stress. Scientific Reports. 11. https://doi.org/10.1038/s41598-021-82264-7

Shin, Y.K., Bhandari, S.R., Song, J.S., Lee, J., 2021. Effect of drought stress on chlorophyll fluorescence parameters, phytochemical contents, and antioxidant activities in lettuce seedlings. Journal of Horticultural. 7, 1–16. https://doi.org/10.3390/horticulturae7080238

Teixeira, W.F., Fagan, E.B., Soares, L.H., Umburanas, R.C., Reichardt, K., Neto, D.D., 2017. Foliar and seed application of amino acids affects the antioxidant metabolism of the soybean crop. Frontiers in Plant Science. 8, 327. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00327

Torabi Giglou, M., Elhami, R., Mahdavikia, H., Heydarnajad Giglou, R., Ghahramanzadeh, S., 2024. Investigating the effects of GABA on the growth and quantitative and qualitative yield of fenugreek under water stress conditions. Environmental Science Studies. 9, 8503-8515. https://doi.org/10.22034/jess.2023.416320.2127

Vendruscolo, E., 2019. Different soaking times and niacin concentrations affect yield of upland rice under water deficit conditions. Agronomía Colombiana. 37, 166-172. https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v37n2.72765

Vicente-Serrano, S.M., Peña-Angulo, D., Beguería, S., Domínguez-Castro, F., Tomás-Burguera, M., Noguera, I., Gimeno-Sotelo, L., El Kenawy, A., 2022. Global drought trends and future projections. Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 380 (2238), 20210285. https://doi.org/10.1098/rsta.2021.0285

Weiland, M., Mancuso, S., Baluska, F., 2016. Signalling via glutamate and GLRs in *Arabidopsis thaliana*. Functional Plant Biology. 43, 1–25. https://doi.org/10.1071/FP15109

Zahra, N., Hafeez, M.B., Kausar, A., Al Zeidi, M., Asekova, S., Siddique, K.H., Farooq, M., 2023. Plant photosynthetic responses under drought stress: Effects and management. Journal of Agronomy and Crop Science. 209, 651-672. https://doi.org/10.1111/jac.12652

Zandi, P., Basu, S. K., Khatibani, L. B., Balogun, M. O., Aremu, M. O., Sharma, M., Tashi, S., 2015. Fenugreek (Trigonella foenum-graecum L.) seed: a review of physiological and biochemical properties and their genetic improvement. Acta Physiologiae Plantarum. 37, 1714. https://doi.org/10.1007/s11738-014-1714-6

Zhang, S., XU, X.F., Sun, Y.M., Zhang, L., Zhou, C., 2018. Influence of drought hardening on the resistance physiology of potato seedling under drought stress. Journal of Integrative Agricultural. 17, 336–347. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61758-1

Zhou, P., An, Y., Wang, Z., Du, H., Huang, B., 2014. Characterization of gene expression associated with drought avoidance and tolerance traits in a perennial grass species. PloS ONE. 9(8), e103611. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103611

نسخه پیش از انتشار