

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 Dalvand¹, Hasan Mumivand^{2*}, Bahman Zahedi³, Abdollah Ehtesham Nia²

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. 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 contents. The interaction between irrigation levels and biostimulant treatments showed that the highest

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

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 CO₂ 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: Water deficit, Biostimulant, Photosynthesis, Chlorophyll, Relative water content

اثر محلول پاشی گلو تامیک، نیکوتینیک و آسپارتیک اسید بر رشد، عملکرد و برخی شاخص های فیزیولوژیکی شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum* L.) تحت تنش خشکی

سپیده دالوند^۱، حسن مومیوند^۲، بهمن زاهدی^۳، عبدالله احتشام نیا^۲

۱. دانشجوی دکتری علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد

۲. دانشیار، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد

۳. استادیار گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد

مشخصات مقاله	چکیده
واژه های کلیدی:	به منظور بررسی اثر محرک های زیستی بر گیاه شنبلیله در شرایط تنش کم آبیاری، آزمایشی به صورت 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 محرک های زیستی در پنج سطح (شاهد، گلو تامیک اسید، نیکوتینیک اسید، آسپارتیک اسید و کاربرد هر سه ترکیب با غلظت ۳۰۰ میلی گرم در لیتر) اعمال شد. نتایج نشان دهنده کاهش معنی دار ارتفاع بوته، سطح برگ، وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه، طول ریشه، محتوای نسبی آب برگ، هدایت روزنه ای، غلظت کربن دی اکسید زیر روزنه، سرعت فتوسنتز، تعرق و نیتروژن کل تحت تنش کم آبیاری بود. کاربرد محرک های زیستی موجب افزایش معنی دار ارتفاع بوته، وزن تر اندام هوایی، طول ریشه، محتوای نسبی آب برگ، هدایت روزنه ای، غلظت کربن دی اکسید زیر روزنه، سرعت فتوسنتز، تعرق و نیتروژن کل شد. برهمکنش تیمارهای کم آبیاری و کاربرد محرک های 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 کربن دی اکسید زیر روزنه در تیمار کاربرد ترکیبی سه محرک زیستی در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به دست آمد. کاربرد ترکیبی محرک های زیستی منجر به حصول بهترین نتایج در صفات عملکردی و فیزیولوژیکی شنبلیله شد. با این حال، آسپارتیک اسید در مقایسه با نیکوتینیک اسید و گلو تامیک اسید اثرات مثبت بیشتری در سطح برگ و وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه داشت. کاربرد محرک های زیستی به ویژه به صورت ترکیبی باعث تعدیل اثرات منفی تنش خشکی در بسیاری از صفات مورد مطالعه شد. در مجموع می توان اظهار داشت که کاربرد ترکیبی محرک های زیستی مورد استفاده در این پژوهش، می تواند با تاثیر مثبت بر رشد و عملکرد شنبلیله در شرایط تنش کم آبی موجب کاهش خسارت ناشی از تنش شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۸	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۳۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۴	

مقدمه

متناوب و مرکب سه برچه ای است و بذر و قسمت های هوایی آن به عنوان منبع ارزشمند پروتئین مورد استفاده قرار می گیرد (Mandegary et al., 2012). شنبلیله دارای خواص آنتی اکسیدانی قوی و حاوی مقدار نسبتاً بالایی فلاونوئیدها، آلکالوئیدها، ساپونین ها و سایر آنتی اکسیدان ها است. فنولیک ها مانند اسید گالیک، پروتو کاتکویک اسید، کاتچین، اسید جنتیازیک، اسید کلروژنیک، اسید وانیلیک و

شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum* L.) گیاهی معطر و یکساله از خانواده بقولات (Fabaceae) و یکی از قدیمی ترین گیاهان دارویی است که به عنوان سبزی (برگ تازه یا خشک) و ادویه (دانه ها) استفاده می شود (Zandi et al., 2015). برگ های شنبلیله به رنگ سبز تیره و دمبرگ ها غضروفی هستند و در بالا ضخیم می شوند (Aasim et al., 2018). ریشه، دانه و اندام هوایی آن از لحاظ میزان متابولیت های ثانویه بسیار غنی هستند. این گیاه دارای برگ های

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 تری‌کربوکسیلیک‌اسید 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 -کتوگلوئارات 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 گلوئاتیون، 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-استیک‌اسید، 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 شبلیه تحت تاثیر مستقیم تنش آبیاری قرار گرفت و محلول‌پاشی اسیدآمینه گاما آمینوبوتریک‌اسید موجب تعدیل اثرات ناشی از تنش کم‌آبی و افزایش رشد گیاه شد (Torabi Giglou

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 کم‌آبی رشد می‌کنند غالباً دارای سطح برگ کم-تری 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 مستقیماً با زتاب 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 و کاهش هدایت روزنه و مزوفیل کاهش می‌دهد (Nardini, 2022; Aghamirzaei et al., 2024). در شرایط تنش خشکی به‌دلیل کاهش فشار تورژسانس تقسیم سلولی و به‌ویژه طولیل 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 کم‌آبی کاهش می‌یابد (Khodabin et al., 2020). به‌علاوه، تنش خشکی موجب اختلال در سیستم‌های غربال‌کننده 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).

محرك‌های 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 تری‌کربوکسیلیک-اسید، 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

(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 میلی گرم 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 اسید آمینه آسپارتیک اسید و گلوتامیک اسید منجر به افزایش رشد گیاهان شد، اما اسید آمینه آلانین باعث ایجاد سمیت گیاهی گردید (Alfosea-Simon et al., 2021). بالاترین تعداد و سطح برگ، وزن تازه و خشک گیاه و فعالیت آن‌تی اکسیدانی ریحان با محلول‌پاشی ترکیبی ۲ گرم در لیتر اوره و ۸ میلی گرم بر لیتر آمینو اسید حاصل شد. محققان این افزایش رشد را به بهبود فتوسنتز و محتوای رنگدانه‌های گیاهی نسبت دادند (Jahanbani et al., 2024). در مطالعه‌ای دیگر کاربرد اسید نیکوتینیک 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، دی اکسید کربن داخلی، فتوسنتز و سرعت تعرق را افزایش داد (Khurshid et al., 2023). با وجود اثرات مفید محرک‌های زیستی آسپارتیک اسید، گلوتامیک اسید و نیکوتینیک اسید، تا به حال پژوهشی در این زمینه روی گیاه شنبلیله صورت نگرفته است. بنابراین، در این پژوهش به بررسی تأثیر کاربرد سه ترکیب آسپارتیک اسید، گلوتامیک اسید و نیکوتینیک اسید 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 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 میلی گرم 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 بذر ها 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 آبیاری 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

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

جدول ۲. برخی خصوصیات آب مورد استفاده در آزمایش

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

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

(1973). اندازه‌گیری ویژگی‌های مورفولوژیکی، در شروع مرحله گلدهی تعداد چهار گلدان از هر تکرار به صورت 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 دیجیتالی (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 دیجیتالی 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 محتوای نسبی آب برگ، پس از به دست آوردن وزن تر برگ (FW)، برگ‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر غوطه‌ور و مجدداً 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):

جهت ارزیابی فتوسنتز خالص، غلظت کربن‌دی‌اکسید (CO₂) 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 کج‌دال اندازه‌گیری گردید (Nelson and Sommers, 1996).

$$RWC (\%) = (FW - DW) / (TW - DW) \quad [1]$$

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 شاخه‌ای جانبی نشان داد که بیش‌ترین طول شاخه‌جانبی در تیمار اسپارتیک‌اسید در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به دست آمد که اختلاف معنی‌داری با

تیمار ترکیبی کاربرد سه اسیدآمین به دو سطح آبیاری ۱۰۰ و ۸۰ درصد ظرفیت زراعی نشان نداد. در مجموع کاربرد آمینواسیدها به صورت منفرد در سطوح کم آبیاری ۸۰ و ۶۰ درصد ظرفیت زراعی تاثیر معنی داری بر طول شاخه‌ی جانبی نداشت. در حالی که کاربرد همزمان هر سه اسیدآمین 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 کم آبیاری 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)	محلول پاشی	4	7.60 ^{**}	386.85 ^{**}	619.80 ^{**}	2.16 ^{**}	0.62 ^{**}
S × SP	تنش × محلول پاشی	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)	محلول پاشی	4	260.51 ^{**}	91.07 ^{**}	30.26 ^{**}	4.55 ^{**}	4.92 ^{**}	0.21 ^{**}
S × SP	تنش × محلول پاشی	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 معنی دار، * و ** به ترتیب اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱

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 کم آبیاری و محرک‌های زیستی و اثر متقابل آن‌ها بر ارتفاع بوته در سطح احتمال یک درصد معنی دار شد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که کاربرد هر سه محرک زیستی گلوتامیک اسید، نیکوتینیک اسید و آسپارتیک اسید هم به صورت مجزا و هم در ترکیب با یکدیگر، موجب افزایش معنی دار ارتفاع بوته شنبلیله در تمام سطوح تنش کم آبیاری شد. تنش کم آبیاری نیز منجر به کاهش معنی دار ارتفاع بوته

گردید. بیش‌ترین میزان ارتفاع بوته مربوط به محلول پاشی همزمان گلوتامیک اسید، نیکوتینیک اسید و آسپارتیک اسید در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی بود. تیمار عدم محلول پاشی در شرایط تنش کم آبیاری ۶۰ درصد ظرفیت زراعی، کم‌ترین میزان ارتفاع بوته را نشان داد. در مجموع نتایج نشان داد که محلول پاشی محرک‌های زیستی به‌ویژه به صورت ترکیبی تا حد زیادی اثرات تنش خشکی را در شنبلیله تعدیل کرد (جدول ۶).

فاصله میانگروه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثرات ساده محلول‌پاشی محرک‌های زیستی و تنش کم‌آبیاری بر فاصله میانگروه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین اثر ساده کم‌آبیاری نشان داد که با کاهش میزان آبیاری فاصله میانگروه به صورت معنی‌داری کاهش یافت و بیش‌ترین فاصله میانگروه 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 میانگروه را نسبت به شاهد (عدم کاربرد محرک‌های زیستی) افزایش داد. بیش‌ترین میزان فاصله میانگروه 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. بیش‌ترین 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 نحوی که 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 آسپارتیک‌اسید 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 نحوی که 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 آسپارتیک‌اسید و کاربرد ترکیبی سه محرک زیستی افزایش پیدا کرد. بیش‌ترین میزان وزن تر به‌ترتیب در تیمار کاربرد ترکیبی سه محرک زیستی و کاربرد آسپارتیک‌اسید به‌دست آمد (جدول

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 کم آبیاری و اثر ساده محلول پاشی محرک های زیستی بر وزن تر و خشک ریشه شنبلیله در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۳).

۵. نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل برای وزن خشک اندام هوایی نشان داد که بیشترین میزان این صفت متعلق به تیمار کاربرد ترکیبی سه محرک زیستی در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی بود. کاربرد آسپارتیک اسید و کاربرد ترکیبی سه محرک زیستی در همه سطوح تنش کم آبیاری باعث افزایش وزن خشک اندام هوایی شد. کاربرد گلو تامیک اسید نیز تنها در شرایط ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی افزایش وزن خشک اندام هوایی را به همراه داشت. در حالی که محلول پاشی

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر تنش کم آبیاری بر ویژگی های مورفولوژیکی و عملکرد گیاه شنبلیله

تنش کم آبیاری	تعداد شاخه	فاصله	قطر طوقه	سطح برگ	وزن تر اندام هوایی	وزن تر ریشه	وزن خشک ریشه
Water deficit stress	Lateral shoot number	Internode length	Crown diameter	Leaf area	Shoot fresh weight	Root fresh weight	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

میانگین های دارای حروف مشترک در هر ستون، بیانگر عدم اختلاف معنی دار در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از آزمون LSD می باشند.
Means with common letters in each column indicate no significant difference at the 5% probability level using the LSD

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر محلول پاشی محرک های زیستی بر ویژگی های مورفولوژیکی و عملکرد گیاه شنبلیله

Table 5. Mean comparison of the effect of foliar spraying of biostimulants on morphological characteristics and yield of fenugreek

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

میانگین های دارای حروف مشترک در هر ستون، بیانگر عدم اختلاف معنی دار در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از آزمون LSD می باشند.
Means with common letters in each column indicate no significant difference at the 5% probability level using the LSD test

در این صفت ایجاد نکرد. در حالی که وزن خشک ریشه در تیمار ۸۰ درصد ظرفیت زراعی نسبت به شاهد تغییر معنی داری نشان نداد و تنها در تیمار ۶۰ درصد ظرفیت زراعی نسبت به شاهد کاهش یافت. در مجموع بیشترین میزان وزن

نتایج مقایسه میانگین اثر ساده کم آبیاری نشان داد که تنش کم آبیاری 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 معنی داری

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 محرک زیستی 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 % FC	Biostimulants	محرک‌های زیستی	ارتفاع بوته Plant height	طول شاخه جانبی Lateral shoot length cm	طول ریشه Root length	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight g
100	Control	شاهد	36.25 ^{eg}	24.75 ^{ce}	26.25 ^f	1.40 ^{de}
	Glutamic acid (GA)	گلو تامیک اسید	38.50 ^{df}	26.25 ^{cd}	35.50 ^e	2.40 ^b
	Nicotinic acid (NA)	نیکوتینیک اسید	49.00 ^{bc}	36.25 ^b	32.75 ^c	1.69 ^{ce}
	Aspartic acid (AA)	آسپار تیک اسید	53.25 ^b	42.75 ^a	29.75 ^d	2.20 ^{bc}
	GA × NA × AA	گلو تامیک × نیکوتینیک × آسپار تیک	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)	گلو تامیک اسید	35.05 ^{fh}	22.75 ^{cf}	29.25 ^d	1.38 ^{de}
	Nicotinic acid (NA)	نیکوتینیک اسید	41.50 ^{de}	24.75 ^{ce}	28.25 ^{de}	1.43 ^{de}
	Aspartic acid (AA)	آسپار تیک اسید	43.02 ^{cd}	27.82 ^c	28.50 ^{de}	2.11 ^{bc}
	GA × NA × AA	گلو تامیک × نیکوتینیک × آسپار تیک	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)	گلو تامیک اسید	33.25 ^{fh}	18.50 ^g	26.22 ^f	1.27 ^{de}
	Nicotinic acid (NA)	نیکوتینیک اسید	31.12 ^{gh}	18.75 ^{fg}	27.00 ^{ef}	1.31 ^{de}
	Aspartic acid (AA)	آسپار تیک اسید	29.50 ^h	19.50 ^{eg}	26.75 ^{ef}	1.90 ^{bd}
	GA × NA × AA	گلو تامیک × نیکوتینیک × آسپار تیک	36.97 ^{dg}	26.00 ^{cd}	35.50 ^b	2.18 ^{bc}

Table 6. Continued

جدول ۶. ادامه

تنش کم‌آبیاری water deficit stress % FC	Biostimulants	محرک‌های زیستی	محتوای نسبی آب برگ RWC %	کربن دی اکسید زیر روزنه Int. CO ₂ mmol cm ⁻²	کلروفیل b Chl b mg g ⁻¹ FW	کلروفیل کل Total Chl
100	Control	شاهد	70.94 ^{ce}	397.75 ^{ef}	6.39 ^d	19.30 ^d
	Glutamic acid (GA)	گلو تامیک اسید	77.40 ^{ab}	470.25 ^{ac}	7.84 ^b	22.12 ^{bc}
	Nicotinic acid (NA)	نیکوتینیک اسید	72.47 ^{cd}	446.75 ^{cd}	8.10 ^{ab}	23.53 ^b
	Aspartic acid (AA)	آسپار تیک اسید	73.97 ^{bd}	455.25 ^{bd}	6.75 ^{cd}	19.30 ^d
	GA × NA × AA	گلو تامیک × نیکوتینیک × آسپار تیک	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)	گلو تامیک اسید	74.06 ^{bc}	442.00 ^{cd}	4.58 ^{ef}	17.18 ^{ef}
	Nicotinic acid (NA)	نیکوتینیک اسید	70.07 ^{de}	430.75 ^d	8.08 ^{ab}	22.88 ^b
	Aspartic acid (AA)	آسپار تیک اسید	70.35 ^{ce}	425.75 ^d	5.07 ^e	15.70 ^{ef}
	GA × NA × AA	گلو تامیک × نیکوتینیک × آسپار تیک	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)	گلو تامیک اسید	58.39 ^g	327.75 ^f	6.43 ^d	17.38 ^e
	Nicotinic acid (NA)	نیکوتینیک اسید	63.85 ^f	358.50 ^{ef}	6.29 ^d	19.80 ^d
	Aspartic acid (AA)	آسپار تیک اسید	64.76 ^f	221.00 ^g	4.48 ^{ef}	13.33 ^g
	GA × NA × AA	گلو تامیک × نیکوتینیک × آسپار تیک	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

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

محتوای نسبی آب برگ

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

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، به‌نحوی که 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، به‌نحوی که 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).

نیترژن کل

براساس نتایج تجزیه واریانس، اثرات ساده تنش کم‌آبیاری و محرک‌های زیستی بر محتوای نیترژن کل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۷). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که تنش کم‌آبیاری موجب کاهش معنی‌دار میزان نیترژن کل شد، بطوریکه کاهش ۱۹/۱۴ درصدی در میزان نیترژن 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 نیترژن شنبلیله گردید. با این حال، اثر مثبت کاربرد ترکیبی سه محرک زیستی بسیار بیشتر بود، به‌نحوی که بیش‌ترین نیترژن کل در این تیمار به‌دست آمد (جدول ۹).

محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات ساده تنش کم-آبیاری و محرک‌های زیستی بر میزان کلروفیل a، کلروفیل b،

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 حالی که 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 نحوی که 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 تأثیر 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 محرک‌زیستی در ۸۰ درصد ظرفیت زراعی و تیمار کاربرد گلوتامیک‌اسید 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 کم‌آبیاری، فارغ از کاربرد محرک‌های زیستی، کاهش غلظت کربن دی‌اکسید زیر روزنه را به همراه داشت (جدول ۶).

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 معنی-دار شد (جدول ۷). نتایج مقایسه میانگین اثر ساده کم آبیاری نشان داد که با اعمال تنش کم آبیاری، 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 محرک زیستی و نیکوتینیک اسید به دست آمد. بیش‌ترین میزان کاروتنوئید نیز مربوط به تیمار کاربرد ترکیبی سه محرک زیستی بود (جدول ۹).

جدول ۷. تجزیه واریانس اثر تنش کم آبیاری 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
R	3	22.92*	27.52**	2261.26 ^{ns}	2332.15**	0.14 ^{ns}
Stress (S)	2	1162.52**	74.33**	6413.75*	107974.21**	1.20**
محلول پاشی Spray (SP)	4	289.53**	110.65**	52679.55**	41204.51**	3.31**
تنش × محلول پاشی 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

جدول ۷. ادامه

منبع تغییرات S. O. V	درجه آزادی df	کل نیتروژن Total nitrogen	کلروفیل a Chl a	کلروفیل b Chl b	کلروفیل کل Total Chl	کاروتنوئید Carotenoid
R	3	0.16 ^{ns}	2.74*	1.08 ^{ns}	6.98**	2.52**
Stress (S)	2	3.24**	50.63**	23.61**	137.85**	17.54**
محلول پاشی Spray (SP)	4	7.30**	114.95**	29.29**	257.67**	31.88**
تنش × محلول پاشی 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.

ظرفیت زراعی به دست آمد که اختلاف معنی‌داری با تیمارهای کاربرد ترکیبی سه محرک زیستی در ۸۰ درصد ظرفیت زراعی و کاربرد نیکوتینیک اسید در هر دو سطح

برهمکنش تیمارهای کم آبیاری و محرک‌های زیستی نشان داد که بیش‌ترین میزان کلروفیل b در تیمار کاربرد ترکیبی سه محرک زیستی در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد

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 محرک زیستی 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 -----	-----mmol cm ⁻² -----	-----mmol cm ⁻² -----	-----mg g ⁻¹ FW-----	-----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 fenugreek

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 -----	-----mmol cm ⁻² -----	-----mmol cm ⁻² -----	-----mg g ⁻¹ FW-----	-----mg g ⁻¹ FW-----	%
شاهد Control	157.67 ^d	12.02 ^d	1.94 ^d	7.62 ^d	2.70 ^e	2.71 ^c
گلوتامیک اسید Glutamic acid (GA)	301.3 ^{ab}	17.96 ^b	2.72 ^{bc}	12.61 ^b	5.94 ^b	3.99 ^b
نیکوتینیک اسید Nicotinic acid (NA)	281.58 ^b	15.75 ^c	2.96 ^b	14.58 ^a	5.34 ^c	3.91 ^b
آسپارتیک اسید 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

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 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

خشکی بر فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی مختلف گیاه مانند فتوسنتز، جذب و متابولیسم نیتروژن تأثیر می‌گذارد (Mumivand et al., 2021b; Khanizadeh et al., 2019; Nadeem et al., 2024). 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 روزه‌ها 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 تأثیر 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 آگریز 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 حداقل رساندن استفاده از آب با حفظ مسیرهای ضروری، دستخوش تغییرات فیزیولوژیکی متعددی می‌شوند (Gupta et al., 2020; Qi et al., 2021; Sato et al., 2024). برخی از این رفتارهای فیزیولوژیکی شامل بسته شدن روزه 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 روزه‌ها 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، دهیدرونازها، لیاها 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. *pekinensis*) 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 تریپتوفان 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 تریپتوفان باعث افزایش میزان هدایت روزنه و تعرق در بسیاری از محصولات شده است (Mustafa et al., 2018). محلول پاشی گلوتامیک اسید و آسپارتیک اسید 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 کم‌آبایی 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، محلول پاشی 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 محلول پاشی آمینواسید گابا بوتیریک اسید 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 جانگلانگ 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)، فتوسنتز و دفاع گیاهی (Weiland et al., 2016) و همچنین تعادل بین متابولیسم کربن و نیتروژن را تنظیم کند

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 محرک‌های زیستی می‌تواند با تاثیر مثبت بر رشد و عملکرد شنبلیله در شرایط تنش کم‌آبی موجب کاهش خسارت تنش شود.

(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

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., Chaomurilge, 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* $\times$ *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., Cámara-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., Bakhoun, 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., Mingjun, 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 Fe₂O₃ nanoparticles improves the growth, antioxidant power, flavonoid content, and essential oil yield and composition of *Dracocephalum*

- kotschy 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](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 edicagomatory 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](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., Souiri, 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., Payani, 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 Viciado, D., Habermann, E., Calero Hurtado, A., Lupino Grato, 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/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 Environment 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. <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/tjp.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., Mahdavia, 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](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>