

The Effect of Humic Acid and Amino Acid Fertigation on Morpho-Physiological Changes in Greenhouse Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) (cv. Termeh) under Deficit Irrigation Conditions

M. Shahriari^{1*}, H. Aroiee¹, B. Abedy¹

1- Department of Horticultural Science and Landscape Architecture, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(*- Corresponding author's Email: mahdi.shahriari88@gmail.com)

Received: 20 September 2025
Revised: 20 December 2025
Accepted: 23 December 2025
Available Online: 23 December 2025

How to cite this article:

Shahriari, M., Aroiee, H., & Abedy, B. (2026). The effect of humic acid and amino acid fertigation on morpho-physiological changes in greenhouse tomato (*Solanum lycopersicum* L.) (cv. Termeh) under deficit irrigation conditions. *Journal of Horticultural Science*, 40(3), 549-569. (In Persian).
<https://doi.org/10.22067/jhs.2025.95540.1464>

Introduction

Water scarcity is a fundamental challenge to global food security, necessitating the optimization of water use in agriculture. Deficit irrigation (DI) has emerged as a key strategy to enhance water productivity, involving the controlled reduction of water application to minimize yield impact while significantly saving water. However, DI can induce physiological stress, disrupting vital processes like photosynthesis, nutrient uptake, and hormonal balance, ultimately compromising crop yield and quality. Greenhouse cultivation provides a controlled environment ideal for implementing DI strategies. To mitigate the adverse effects of water stress, the application of natural bio-stimulants like humic acid (HA) and amino acids (AA) has gained considerable attention. Humic acid improves soil structure, enhances water retention, and stimulates the absorption of macro and micronutrients. Amino acids play crucial roles as protein building blocks, osmo-regulators, and precursors to hormones, aiding in stress tolerance. This study aimed to evaluate the individual and comparative effects of humic acid and amino acid fertigation on the growth, yield, fruit quality, and nutrient uptake of greenhouse tomato (*Solanum lycopersicum* L. cv. Termeh) under deficit irrigation conditions.

Materials and Methods

The research was conducted in a commercial greenhouse in Mashhad, Iran. Two independent factorial experiments were laid out in a randomized complete block design (RCBD) with four replications. The experimental factors were: 1) Irrigation regime at two levels: full irrigation (100% of crop water requirement) and deficit irrigation (70% of crop water requirement); 2) Humic acid at two levels (0 and 3 g.L⁻¹) in the first experiment; and 3) Amino acid at two levels (0 and 1 g.L⁻¹) in the second experiment. The commercial HA product (70% humic acid, 15% fulvic acid, 12% K₂O) and AA product (80% free amino acids, 12.8% total nitrogen) were applied via fertigation at three growth stages: two weeks after transplanting, flowering initiation, and fruit set. A wide range of morphological traits, leaf nutrient content, quantitative qualitative fruit traits were measured at the fruit ripening stage. Data were analyzed using SPSS software (v.21), and means were compared using Duncan's multiple range test at a 5% probability level.

Results and Discussion

Morphological Traits: Deficit irrigation significantly reduced all morphological parameters. Main stem



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

<https://doi.org/10.22067/jhs.2025.95540.1464>

length decreased by 7%, internode number dropped from 34.75 to 29.75, internode length from 4.17 cm to 3.53 cm, and leaf area by 13.58%. Shoot fresh and dry weight and root volume were also significantly reduced. Application of both HA and AA significantly improved all growth traits under both irrigation regimes. Humic acid not only compensated for the negative effects of drought stress but also enhanced growth beyond the full irrigation control level in many cases. Comparative analysis revealed the superior efficacy of HA over AA. This superiority was consistent under stress conditions, attributed to HA's multifaceted role in improving the rhizosphere environment and enhancing simultaneous water and nutrient availability.

Leaf Nutrient Content: Deficit irrigation caused a significant decrease in the concentration of all measured macro and micronutrients. Both bio-stimulants significantly enhanced nutrient uptake. Humic acid was more effective than AA in improving the uptake of nutrients especially P, Ca, and Fe under stress. This is likely due to HA's ability to stimulate root development, increase membrane permeability, and enhance microbial activity, thereby improving nutrient solubility and absorption.

Quantitative and Qualitative Fruit Traits: DI led to a 29% reduction in fruit number per cluster, a 6% reduction in single fruit weight, and a consequent 19% reduction in total yield (from 9.45 to 7.69 kg plant⁻¹). Both HA and AA application increased yield under DI, HA increased yield by 31% and AA by 29%. Regarding quality, DI reduced TSS and vitamin C content but increased carotenoids and lycopene. HA was particularly effective in increasing TSS by 59%, vitamin C by 18%, carotenoids by 17%, and lycopene by 10% under DI. AA showed positive but generally lesser effects on quality parameters. On average, HA demonstrated a 17.1% greater improvement in quantitative traits and a significant 42.5% greater improvement in qualitative traits compared to AA.

Conclusion

This study demonstrates that deficit irrigation at 70% of field capacity significantly impairs the growth, yield, and quality of greenhouse tomatoes. The application of both humic acid (3 g.L⁻¹) and amino acids (1 g.L⁻¹) effectively mitigated these negative impacts, often enhancing traits beyond the well-watered control. However, humic acid proved to be a superior bio-stimulant than amino acids in improving morphological development, enhancing nutrient uptake (particularly N, P, K, and Ca), and boosting both quantitative yield and qualitative fruit characteristics. Therefore, humic acid fertigation is recommended as a highly effective management strategy for sustaining greenhouse tomato production under water-limited conditions, ensuring higher yield and premium fruit quality while optimizing water use efficiency.

Keywords: Fertigation, Fruit yield, Growth traits, Nutrient elements, Organic acids

اثر کودآبیاری اسید هیومیک و اسید آمینه بر تغییرات مرفوفیزیولوژیکی گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) گلخانه‌ای رقم 'ترمه' تحت شرایط کم‌آبیاری

مهدی شهریار^{۱*} - حسین آروئی^۱ - بهرام عابدی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۲

چکیده

کم‌آبیاری به‌عنوان یک راهکار مدیریتی برای بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی مطرح است، اما می‌تواند باعث کاهش رشد و عملکرد محصولات شود. این پژوهش با هدف بررسی اثر کودآبیاری اسید هیومیک و اسید آمینه بر ویژگی‌های مرفوفیزیولوژیکی، عملکرد و کیفیت میوه گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) گلخانه‌ای رقم 'ترمه' تحت شرایط کم‌آبیاری در قالب دو آزمایش مستقل انجام شد. آزمایش‌ها به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در شرایط گلخانه‌ای اجرا گردید. تیمارها شامل دو سطح آبیاری (۱۰۰ و ۷۰ درصد نیاز آبی)، دو سطح اسید هیومیک (صفر و سه گرم در لیتر) و دو سطح اسید آمینه (صفر و یک گرم در لیتر) بودند. صفات ریخت‌شناختی، غلظت عناصر غذایی برگ، و صفات کمی و کیفی میوه اندازه‌گیری و ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که تنش کم‌آبیاری به‌طور معنی‌داری کلیه صفات رشدی، غلظت عناصر غذایی، عملکرد و اکثر شاخص‌های کیفی میوه را کاهش داد. کاربرد اسید هیومیک و اسید آمینه، این اثرات منفی را به‌طور قابل‌توجهی جبران کردند و در بسیاری از موارد، صفات را حتی نسبت به شاهد (آبیاری کامل بدون کود) نیز بهبود بخشیدند. اسید هیومیک در مقایسه با اسید آمینه برتری بیشتری در بهبود اکثر صفات اندازه‌گیری‌شده به‌ویژه جذب عناصر غذایی (مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم) و صفات کیفی میوه (مانند مواد جامد محلول، ویتامین ث، کاروتنوئیدها و لیکوپن) نشان داد. به‌طور کلی، می‌توان استفاده از اسید هیومیک (سه گرم در لیتر) و اسید آمینه (یک گرم در لیتر) را به‌عنوان راهکار مؤثر برای کاهش اثرات منفی کم‌آبیاری و بهبود عملکرد و کیفیت گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای توصیه نمود.

واژه‌های کلیدی: اسیدهای آلی، صفات رشدی، عملکرد میوه، عناصر غذایی، کودآبیاری

مقدمه

گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین محصولات باغی جهان، در تأمین نیازهای غذایی به‌صورت تازه‌خوری و همچنین کاربردهای صنعتی جایگاه ویژه‌ای دارد (Locatelli et al., 2024). با افزایش جمعیت و تغییرات اقلیمی، تأمین امنیت غذایی به یک چالش بنیادین تبدیل شده است که نیازمند استفاده بهینه از منابع موجود به‌ویژه منابع آب در کشاورزی است. با توجه به کاهش منابع آبی و محدودیت‌های شدید آبی در بسیاری از مناطق کشاورزی، روش‌های نوین مدیریتی همچون

کم‌آبیاری^۲ برای بهینه‌سازی مصرف آب در تولید محصولات زراعی مورد توجه قرار گرفته است (Xu et al., 2024). کم‌آبیاری به‌معنای کاهش کنترل‌شده مقدار و زمان آبیاری است، به‌گونه‌ای که کمترین آسیب به رشد گیاه وارد شود و در عین حال مصرف آب، بهینه شود (Mukherjee et al., 2023). این روش به‌عنوان یک راهبرد مؤثر برای مقابله با محدودیت آب مطرح است و با فراهم آوردن آبیاری در مراحل حساس رشد گیاه باعث افزایش کارایی مصرف آب و حفظ عملکرد محصول می‌گردد. در واقع، کم‌آبیاری به‌گونه‌ای است که کاهش کمی در عملکرد محصول در ازای صرفه‌جویی قابل توجه در آب قابل قبول است. این روش نه‌تنها به صرفه‌جویی در منابع آب می‌انجامد، بلکه از طریق تحریک سازگاری‌های فیزیولوژیکی و ریخت‌شناختی گیاه، مقاومت آن را در برابر کم‌آبی افزایش می‌دهد (Amankwaa-Yeboah et al., 2023).

۱- گروه مهندسی علوم باغبانی و فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(*) نویسنده مسئول: Email: mahdi.shahriari88@gmail.com

<https://doi.org/10.22067/jhs.2025.95540.1464>

با توجه به اهمیت کم‌آبیاری به‌عنوان یک راهکار عملی و ضروری در مدیریت منابع آب و همچنین نقش کلیدی اسید هیومیک و اسیدهای آمینه در ارتقای مقاومت گیاه به شرایط کم‌آبیاری، بررسی تأثیر این دو محرک رشد بر گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای بسیار حائز اهمیت است. مطالعه اثرات این ترکیب بر شاخص‌های رشدی، کیفی و کمی محصول می‌تواند زمینه‌ساز ارائه راهکارهای بهینه در مدیریت کشاورزی پایدار و افزایش بهره‌وری منابع آب باشد. بنابراین این پژوهش با هدف ارزیابی اثرات جداگانه اسید هیومیک و اسیدهای آمینه بر ویژگی‌های رشد، عملکرد کمی و کیفیت میوه گوجه‌فرنگی تحت شرایط کم‌آبیاری در شرایط گلخانه‌ای انجام گرفت. نتایج این مطالعه می‌تواند به توسعه راهبردهای کاربردی برای افزایش تولید پایدار و بهینه‌سازی مصرف آب در محصولات باغبانی کمک کند.

مواد و روش‌ها

محل اجرا و طرح آزمایش

به‌منظور بررسی اثرات اسید هیومیک و اسید آمینه بر رشد و عملکرد گوجه‌فرنگی در شرایط کم‌آبیاری، دو آزمایش مستقل به‌صورت فاکتوریل برپایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل اسید هیومیک در دو سطح (صفر و سه گرم در لیتر) و رژیم آبیاری در دو سطح آبیاری (۱۰۰ درصد و ۷۰ درصد نیاز آبی گیاه) و همچنین اسید آمینه با غلظت‌های صفر و یک گرم در لیتر و رژیم آبیاری در دو سطح آبیاری (۱۰۰ درصد و ۷۰ درصد نیاز آبی گیاه) بود. تیمارهای اسید هیومیک و اسید آمینه به‌روش کودآبیاری اعمال شدند و تیمار شاهد برای هر مکمل، آب مقطر بود.

این آزمایش در گلخانه تجاری بنیاد تعاون سازمان زندان‌های خراسان رضوی واقع در شهر شاندیز اجرا شد و از گوجه‌فرنگی رقم 'ترمه' استفاده گردید. 'ترمه'، رقم هیبرید گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای دارای بوته و ریشه قوی با مقاومت فوق‌العاده بالا به بیماری‌های بوته‌میری، کپک خاکستری و ویروس پیچیدگی برگ زرد گوجه‌فرنگی است. این رقم پربار دارای میوه سفت، خوش‌رنگ و با ماندگاری بالا می‌باشد. کشت به‌صورت غیرمستقیم و در سینی‌های کشت ۱۲۵ سلولی حاوی بستر کوکوپیت و پیت ماس (با نسبت ۵۰:۵۰) انجام گرفت. پس از چهار هفته، نشاها با تراکم دو بوته در هر مترمربع به گروپ‌های پلاستیکی (با ابعاد ۳۰ × ۴۰ سانتی‌متر) که با پوشش بیرونی روشن (برای جلوگیری از جذب نور و تنش دمایی به ریشه) طراحی شده بودند، منتقل گردید. بستر نهایی گروپ‌ها، مخلوطی از خاک زراعی و خاک برگ با نسبت ۳ به ۱ بود.

حیاتی گیاه اثر می‌گذارد و فرآیندهای مهمی مانند فتوسنتز، تعرق، تعادل هورمونی و جذب مواد مغذی را مختل می‌سازد که اگر به‌درستی مدیریت نشود منجر به کاهش کمی و کیفی محصول خواهد شد (Chen et al., 2025). بااین‌حال، اعمال کم‌آبیاری به‌صورت هدفمند و با استفاده از تکنولوژی‌های نوین می‌تواند به افزایش راندمان آب و کاهش اثرات منفی تنش آبی کمک کند (Tüzel et al., 2024). دراین‌بین، کشت گلخانه‌ای به‌دلیل قابلیت کنترل دقیق شرایط محیطی همچون دما، رطوبت و نور، بستری مناسب برای اجرای برنامه‌های کم‌آبیاری و بهره‌وری بیشتر از منابع آبی فراهم می‌آورد. بااین‌وجود، حتی در حوزه کشت‌های گلخانه‌ای نیز کم‌آبیاری به‌عنوان یک عامل محدودکننده، نیازمند راهکارهای تقویتی و حمایتی است (Chand et al., 2021).

گیاه گوجه‌فرنگی در مواجهه با کم‌آبیاری واکنش‌های زیستی-فیزیولوژیکی مختلفی از خود نشان می‌دهد. این تغییرات شامل تجمع ترکیبات اسمولیتی، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تنظیم دقیق عملکرد روزنه‌ها است که همگی در جهت حفظ آب و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از کم‌آبی عمل می‌کنند (Amankwaa- Yeboah et al., 2023; Locatelli et al., 2024; Mukherjee et al., 2023; Xu et al., 2024). این پاسخ‌ها اگرچه تا حدی از آسیب‌های ناشی از کم‌آبیاری می‌کاهند، اما به‌تنهایی برای حفظ عملکرد و کیفیت محصول در شرایط کم‌آبیاری کافی نیستند و ازاین‌رو استفاده از محرک‌های رشد طبیعی که بتوانند تحمل گیاه را افزایش دهند، از اهمیت بالایی برخوردار است (Aslani et al., 2019; Najafi et al., 2022). در این زمینه، در سال‌های اخیر اسید هیومیک و اسیدهای آمینه به‌عنوان موادی با اثرات تقویتی بر رشد و مقاومت گیاه مورد توجه فراوان قرار گرفته‌اند. اسید هیومیک با بهبود ساختار خاک، افزایش تخلخل و ظرفیت نگهداری آب در خاک، و همچنین تحریک جذب عناصر غذایی ماکرو و میکرو، عملکرد گیاه در شرایط کم‌آبیاری را بهبود می‌بخشد (Sadeghi Chah-Nasir et al., 2023). کاربرد اسید هیومیک موجب افزایش کلروفیل، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تجمع پرولین می‌شود که شاخص‌هایی برای ارتقای تحمل کم‌آبیاری هستند (Khorasani et al., 2023; Mehrnia et al., 2024). اسیدهای آمینه نیز با نقش‌های کلیدی خود در فرآیندهای زیستی گیاه همچون تحریک سنتز پروتئین، تنظیم فشار اسمزی سلول، تولید هورمون‌های رشد و کاهش تنش اکسیداتیو، می‌توانند به کاهش اثرات منفی کم‌آبیاری کمک کنند. افزایش جذب عناصر غذایی، بهبود عملکرد روزنه و افزایش رشد و عملکرد گیاه در واکنش به مصرف خارجی اسیدهای آمینه در بسیاری از گونه‌های گیاهی تحت شرایط کم‌آبی گزارش شده است (El-Beltagi et al., 2023; Fayaz et al., 2024).

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد مطالعه
Table 1- The soil physico-chemical properties of the studied filed

هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)	کل مواد خنثی Total neutralizing material (%)	کربن آلی Organic carbon (%)	کل نیتروژن Total nitrogen (%)	اسیدیته Acidity	پتاسیم Potassium (mg.kg ⁻¹)	فسفر Phosphorus (mg.kg ⁻¹)	روی Zinc (mg.kg ⁻¹)	منگنز Manganese (mg.kg ⁻¹)	آهن Iron (mg.kg ⁻¹)	مس Copper (mg.kg ⁻¹)	بافت Texture
2.73	19.10	0.90	0.20	7.73	265.22	13.16	0.70	4.34	5.00	0.50	لومی Loamy

درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت تا حصول وزن ثابت، با استفاده از ترازوی دیجیتال توزین گردید. پس از شست‌وشوی کامل ریشه، حجم ریشه هر گیاه با غوطه‌ورسازی آن در یک استوانه مدرج حاوی آب و اندازه‌گیری میزان آب جابه‌جاشده، تعیین شد.

عناصر غذایی برگ

برای اندازه‌گیری عناصر غذایی پرمصرف (نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم) و کم‌مصرف (آهن، منگنز و روی) از روش ICP یا آنالیز پلاسما جفت‌شده القایی-طیف‌سنج نشر نوری استفاده شد. اساس این روش برانگیختگی الکترون‌های عناصر مختلف در محیطی به‌نام پلاسما و نشر نور بعد از حالت آسایش الکترونی است و به‌دلیل تطبیق‌پذیری و تکرارپذیری، می‌توان نتایجی با دقت و صحت بالا به دست آورد.

صفات کمی و کیفی میوه

صفات عملکردی میوه

تعداد میوه در هر خوشه، وزن میوه و عملکرد میوه در بوته به‌عنوان صفات کمی میوه گوجه‌فرنگی اندازه‌گیری شد.

صفات کیفی میوه

صفات کیفی مورد ارزیابی میوه شامل سفتی بافت میوه، مواد جامد محلول، اسیدیته، ویتامین C، کاروتنوئیدها و لیکوپن بود که به روش‌های زیر انجام شد.

سفتی بافت میوه: سفتی بافت در دو طرف طول و قطر میوه، با استفاده از دستگاه بافت‌سنج مجهز به پروب مخروطی هشت میلی‌متری اندازه‌گیری و میانگین نتایج براساس کیلوگرم بر سانتی-مترمربع ثبت گردید.

مواد جامد محلول^۱: میزان مواد جامد محلول در عصاره میوه‌های کاملاً رسیده با استفاده از رفراکتومتر دستی برحسب درجه بریکس اندازه‌گیری شد (Fisk et al., 2008).

اسیدیته میوه: pH عصاره میوه‌های با استفاده از pH متر دیجیتال (Model: HI 98107) اندازه‌گیری گردید (Fisk et al., 2008).

ویتامین C: محتوای اسید آسکوربیک میوه گوجه‌فرنگی براساس روش تیتراسیون با معرف ۲،۶-دی کلروفنول ایندوفنول و برحسب میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم وزن تر میوه اندازه‌گیری و محاسبه شد (Mukherjee & Choudhuri, 1983).

هر گروپک حاوی ۱۲/۸ کیلوگرم خاک بود که این مقدار خاک دقیقاً برای تمامی گروپک‌ها یکسان بوده است. در این آزمایش، بذرها در تاریخ ۱۴۰۲/۱۱/۰۱ در سینی نشاء کاشته شد. نشاءها در تاریخ ۱۴۰۲/۱۱/۳۰ به گروپک انتقال داده شد و دوره رشد تا تاریخ ۱۴۰۳/۷/۱۰ به طول انجامید (مدت دوره رشد از کاشت بذر تا پایان دوره حدود هشت ماه طول کشید). آنالیز خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک به‌روش ICP انجام گردید که در **جدول ۱** گزارش شده است. لازم به ذکر است که بعد از مخلوط کردن خاک باغچه با خاک‌برگ، آنالیز خاک انجام شد.

تنش خشکی با روش وزنی و براساس محاسبه ظرفیت زراعی (FC) خاک، دو هفته بعد از انتقال نشاءها اعمال گردید. پس از اشباع کردن گروپک و خارج شدن آب ثقی (۲۴ ساعت پس از آبیاری)، وزن خاک در حالت ظرفیت زراعی کامل تعیین و تیمار آبیاری کامل (شاهد) معادل ۱۰۰ درصد این وزن و تیمار کم‌آبیاری معادل ۷۰ درصد آن در نظر گرفته شد. از اسید هیومیک تجاری (محصول چین دارای ۷۰ درصد اسید هیومیک، ۸۵ درصد ماده آلی، ۱۵ درصد اسید فولویک و ۱۲ درصد پتاسیم محلول) و اسید آمینه تجاری ناتورآمین (محصول اسپانیا حاوی ۸۰ درصد اسیدهای آمینه آزاد و ۱۲/۸ درصد نیتروژن کل) استفاده گردید. تیمارهای اسید هیومیک و اسید آمینه به‌صورت کودآبیاری در سه مرحله از رشد گوجه‌فرنگی شامل دو هفته پس از انتقال نشاء به گروپک، مرحله شروع گل‌دهی، و مرحله تشکیل میوه اعمال شدند. صفات ریخت‌شناختی، عملکردی و بیوشیمیایی در مرحله رسیدگی میوه گوجه‌فرنگی اندازه‌گیری گردید.

صفات مورد ارزیابی

صفات ریخت‌شناختی

صفات ریخت‌شناختی مورد ارزیابی در پژوهش حاضر شامل طول شاخه اصلی، تعداد و طول میان‌گره ساقه اصلی، سطح برگ، وزن تر و خشک بوته و سطح حجم می‌باشد. طول اصلی‌ترین ساقه هر گیاه از سطح خاک تا انتهای جوانه انتهایی، بلافاصله پس از برداشت و با استفاده از یک متر نواری استاندارد اندازه‌گیری گردید. فاصله بین دو گره متوالی در میانه ساقه اصلی با استفاده از یک کولیس دیجیتال با دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری و میانگین گرفته شد. سطح برگ در برگ‌های کاملاً توسعه‌یافته پس از جدا کردن از گیاه، با استفاده از دستگاه سطح‌سنج دیجیتال (Leaf Area Meter, Model CI-202) اندازه‌گیری گردید.

برای تعیین وزن تر و خشک بوته، کل اندام هوایی گیاه بلافاصله پس از برداشت، با استفاده از یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ گرم توزین شد. وزن خشک بوته نیز پس از قرارگیری در آون با دمای ۷۲

1- Total soluble solide (TSS)

کاروتنوئیدها: محتوای کاروتنوئید کل پس از استخراج نمونه میوه با حلال استون و قرائت جذب در طول موج‌های ۶۴۳، ۶۴۵ و ۴۷۰ نانومتر به وسیله اسپکتروفوتومتر و برحسب میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم میوه محاسبه گردید (Lichtenthaler, 1987).

لیکوپن: مقدار لیکوپن در عصاره گوجه‌فرنگی براساس روش اسپکتروفوتومتری و پس از استخراج با مخلوط هگزان-استون-اتانول، از طریق قرائت جذب در طول موج ۵۰۳ نانومتر تعیین و برحسب میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم میوه محاسبه شد (Sadler et al., 1990).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

تجزیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS 21 و مقایسه میانگین داده‌ها براساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. جهت رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel 2013 استفاده گردید. برآورد همبستگی بین صفات براساس آزمون همبستگی پیرسون انجام شد.

نتایج و بحث

صفات ریخت‌شناختی

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی تیمارهای کم‌آبیاری و اسید هیومیک بر صفات ریخت‌شناختی (طول شاخه اصلی، طول و تعداد میان‌گره، وزن تر و خشک بوته و حجم ریشه) معنی‌دار شد. همچنین اثر متقابل تیمارها بر همه صفات به‌جز تعداد میان‌گره ساقه اصلی معنی‌دار بود (جدول ۲). در آزمایش اسید آمینه نیز نتایج مشابهی حاصل شد و اثرات اصلی و متقابل کم‌آبیاری و اسید آمینه بر صفات مزبور معنی‌دار شد (جدول ۳). اعمال تیمار کم‌آبیاری (۷۰ درصد ظرفیت مزرعه) باعث کاهش معنی‌دار کلیه صفات رشدی شد. طول شاخه اصلی نسبت به شرایط کم‌آبیاری هفت درصد کاهش یافت. تعداد میان‌گره از ۳۴/۷۵ به ۲۹/۷۵ و طول میان‌گره از ۴/۱۷ به ۳/۵۳ سانتی‌متر کاهش پیدا کرد. سطح برگ در گیاهان رشدیافته تحت شرایط کم‌آبی نیز کاهش محسوسی (۱۳/۵۸ درصد) نشان داد. همچنین کم‌آبیاری باعث کاهش وزن تر و وزن خشک اندام هوایی شد. حجم ریشه نیز از ۳۴/۷۱ به ۳۰/۰۷ سانتی‌مترمکعب کاهش یافت (جدول ۴). اسید هیومیک به‌طور معنی‌داری باعث بهبود تمامی صفات ریخت‌شناختی تحت شرایط آبیاری کامل و تیمار کم‌آبیاری شد. اسید هیومیک نه تنها اثرات منفی کم‌آبیاری را جبران کرد، بلکه در بسیاری از موارد باعث ارتقای رشد گیاه فراتر از سطح شاهد (آبیاری کامل) نیز گردید. تحت شرایط کم‌آبیاری، اسید هیومیک طول شاخه اصلی را ۱۳/۱ درصد افزایش داد و طول میان‌گره به ۴/۳۰ سانتی‌متر افزایش یافت. سطح برگ نیز به‌میزان معنی‌داری نسبت به شرایط بدون

کودآبیاری بهبود یافت. همچنین در این شرایط وزن تر اندام هوایی به ۲/۴۰ کیلوگرم، وزن خشک اندام هوایی به ۳۶۸/۹۸ گرم و حجم ریشه به ۳۶/۹۱ سانتی‌مترمکعب افزایش پیدا کرد. کودآبیاری اسید آمینه نیز در بهبود صفات رشدی گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای در هر دو شرایط آبیاری کامل و کم‌آبیاری مؤثر بود. مقایسه داده‌ها نشان داد که اسید هیومیک در بهبود صفات ریخت‌شناختی برتر از اسید آمینه عمل کرد. در شرایط آبیاری کامل، اسید هیومیک باعث افزایش بیشترین مقدار در طول شاخه اصلی (۴/۳ درصد بیشتر از اسید آمینه)، تعداد میان‌گره (۵/۶ درصد بیشتر) و طول میان‌گره (۴/۱ درصد بیشتر) شد. همچنین در خصوص وزن تر اندام هوایی (۹/۷ درصد بیشتر)، وزن خشک اندام هوایی (۵/۴ درصد بیشتر) و حجم ریشه (۱۲/۸ درصد بیشتر) نیز برتری معنی‌داری نشان داد. در شرایط کم‌آبیاری نیز کارایی اسید هیومیک در بهبود رشد گوجه‌فرنگی بیشتر از اسید آمینه بود (جدول ۴).

کاهش رشد تحت کم‌آبیاری می‌تواند ناشی از اختلال در تقسیم سلولی، کاهش تورم سلولی و بسته شدن روزنه‌ها باشد که منجر به کاهش فتوسنتز و تولید فرآورده فتوسنتزی می‌شود (Amankwaa, Yeboah et al., 2023; Locatelli et al., 2024). اسید هیومیک با بهبود نفوذپذیری غشای سلولی و افزایش جذب آب و مواد غذایی باعث حفظ تورم سلولی و بهبود فرآیندهای رشد می‌شود (Mehrnia et al., 2024). از سوی دیگر، اسید آمینه‌ها به‌عنوان واحدهای سازنده پروتئین‌ها و پیش‌سازهای هورمونی، به‌طور مستقیم در متابولیسم و رشد گیاه نقش دارند (Elshamly et al., 2024). اما به نظر می‌رسد که اسید هیومیک با بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک و افزایش دسترسی به مواد غذایی، بستر بهتری برای رشد را نسبت به اسید آمینه‌ها فراهم می‌کند. این نتایج با یافته‌های نجفی و همکاران (Najafi et al., 2022) که به تأثیر مثبت اسید هیومیک بر بهبود رشد رویشی و توسعه سیستم ریشه در شرایط تنش خشکی اشاره داشته‌اند، هم‌خوانی دارد. همچنین نتایج حاضر با پژوهش حیدرزاده (Heidarzadeh, 2025) که نقش اسید آمینه‌ها در بهبود تحمل به کم‌آبیاری را مورد تأیید قرار داده، مطابقت دارد. اگرچه هر دو تیمار کودی در بهبود رشد گوجه‌فرنگی در هر دو شرایط آبیاری کامل و کم‌آبیاری مؤثر بودند، اما براساس داده‌های این پژوهش (جدول ۴)، اسید هیومیک در مقایسه با اسید آمینه، کارایی بالاتری در بهبود تقریباً تمامی صفات اندازه‌گیری‌شده نشان داد. این برتری به‌ویژه در صفاتی مانند حجم ریشه و وزن تر اندام هوایی مشهود بود. این امر می‌تواند ناشی از نقش چندجانبه اسید هیومیک در بهبود محیط ریشه و فراهمی هم‌زمان آب و عناصر غذایی باشد (Khorasani et al., 2023; Mehrnia et al., 2024).

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر کودآبیاری اسید هیومیک بر صفات ریخت‌شناختی گوجه‌فرنگی رقم 'ترمه' تحت شرایط کم‌آبیاری
Table 2- Variance analysis of the humic acid fertigation effect on the morphological traits of tomato cv. 'Termeh' under deficit irrigation conditions

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares						
		طول شاخه اصلی Branch length	تعداد میان‌گره No. internodes per stem	طول میان‌گره Internode length	سطح برگ Leaf area	وزن تر اندام هوایی بوته Plant aerial fresh weight	وزن خشک اندام هوایی بوته Plant aerial dry weight	حجم ریشه Root volume
بلوک Block	3	0.217 ns	0.167 ns	0.001 ns	0.755 ns	0.01 ns	4.057 ns	0.09 ns
اسید هیومیک Humic acid (H)	1	2809.53 **	256 **	2.657 **	7208.859 **	0.685 **	15889.23 **	237.083 **
کم‌آبیاری Irrigation (I)	1	1101.908 **	100 **	1.85 **	5107.961 **	0.426 **	7307.258 **	121.055 **
کم‌آبیاری × اسید هیومیک H × I	1	41.796 **	2.95 ns	0.006 *	10.89 **	0.066 **	683.43 **	2.967 **
خطا Error	9	0.143	1.833	0.001	0.796	0.007	6.662	0.035

** : معنی‌دار در سطح یک درصد، * : معنی‌دار در سطح پنج درصد، ns : غیرمعنی‌دار
** : Significant at 1% of probability level, * : Significant at 5% of probability level, ns : non-significant

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر کودآبیاری اسید آمینه بر صفات ریخت‌شناسی گوجه‌فرنگی رقم 'ترمه' تحت شرایط کم‌آبیاری
Table 3- Variance analysis of the amino acid fertigation effect on morphological traits of tomato cv. 'Termeh' under deficit irrigation conditions

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares						
		طول شاخه اصلی Branch length	تعداد میان‌گره No. internodes per stem	طول میان‌گره Internode length	سطح برگ Leaf area	وزن تر اندام هوایی بوته Plant aerial fresh weight	وزن خشک اندام هوایی بوته Plant aerial dry weight	حجم ریشه Root volume
بلوک Block	3	0.546 ns	0.729 ns	0.002 ns	14.385 ns	0.012 ns	17.314 ns	0.367 **
اسید آمینه Amino acid (A)	1	1468.039 **	162.562 **	1.884 **	3648.16 **	0.212 **	8559.95 **	69.931 **
کم‌آبیاری Irrigation (I)	1	892.516 **	76.562 **	1.446 **	3763.209 **	0.331 **	5687.422 **	67.035 **
کم‌آبیاری × اسید آمینه A × I	1	9.891 **	1.562 ns	0.006 *	180.231 **	0.112 **	258.406 **	1.194 **
خطا Error	9	0.592	2.118	0.001	6.79	0.008	12.855	0.044

** : معنی‌دار در سطح یک درصد؛ * : معنی‌دار در سطح پنج درصد؛ ns : غیر معنی‌دار
** : Significant at 1% of probability level, * : Significant at 5% of probability level, ns : non-significant

جدول ۴- اثرات متقابل کودآبیاری اسید هیومیک × کم آبیاری و کودآبیاری اسید آمینه × کم آبیاری بر صفات ریخت‌شناختی گوجه‌فرنگی رقم 'ترمه'
Table 4- Interaction effects of humic acid fertigation × deficit irrigation and amino acid fertigation × deficit irrigation on the morphological traits of tomato cv. 'Termeh'

کودآبیاری Fertigation	کم آبیاری Irrigation (% FC)	طول شاخه اصلی Branch length (cm)	تعداد میان‌گره No. internodes per stem	طول میان‌گره Internode length (cm)	سطح برگ Leaf area (cm ²)	وزن تر اندام هوایی بوته Plant aerial fresh weight (kg)	وزن خشک اندام هوایی بوته Plant aerial dry weight (g)	حجم ریشه Root volume (cm ³)
اسید هیومیک Humic acid (g.L ⁻¹)	0	191.06±0.38 c*	34.75±1.25 c	4.17±0.04 c	275.18±0.72 c	2.31±0.08 b	348.70±2.66 c	34.71±0.31 c
	70	177.69±0.64 d	29.75±1.70 d	3.53±0.04 d	237.80±1.60 d	1.86±0.11 c	319.03±4.09 d	30.07±0.29 d
	100	220.79±0.26 a	42.75±0.95 a	5.02±0.01 a	315.98±0.14 a	2.60±0.10 a	424.79±0.32 a	43.27±0.02 a
	70	200.96±0.10 b	37.75±0.50 b	4.30±0.01 b	281.90±0.13 b	2.40±0.01 b	368.98±0.23 b	36.91±0.11 b
اسید آمینه Amino acid (g.L ⁻¹)	0	191.06±0.38 c	34.75±1.25 b	4.17±0.04 c	275.18±0.72 b	2.31±0.08 a	348.70±2.66 c	34.71±0.31 b
	70	177.69±0.64 d	29.75±1.70 c	3.53±0.04 d	237.80±1.60 c	1.86±0.11 b	319.03±4.09 d	30.07±0.29 c
	100	211.78±1.26 a	40.50±1.29 a	4.82±0.02 a	298.67±2.98 a	2.37±0.11 a	403.00±1.82 a	38.35±0.50 a
	70	195.28±0.40 b	36.75±0.95 b	4.25±0.02 b	274.71±4.77 b	2.25±0.04 a	357.25±5.35 b	34.80±0.24 b

* در هر صفت و گروه مقایسه‌شده، تیمارهای با حروف یکسان اختلاف معنی‌داری با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال 1mk درصد ندارند.
* Values followed by the same letter in each trait have no significant difference based on Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$.

عناصر غذایی برگ

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی تیمارهای کم‌آبیاری، اسید هیومیک (جدول ۵) و اسید آمینه (جدول ۶) و همچنین اثر متقابل آن‌ها بر غلظت تمامی عناصر غذایی پرمصرف و کم‌مصرف اندازه‌گیری شده در برگ (به جز اثر متقابل بر منیزیم در آزمایش اسید هیومیک و عنصر روی در آزمایش اسید آمینه که غیرمعنی‌دار بود) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود.

عناصر پرمصرف

نیتروژن: تنش کم‌آبیاری باعث کاهش ۱۶ درصدی غلظت نیتروژن برگ (از ۴/۹۹ درصد به ۴/۱۹ درصد) گردید. کودآبیاری هر دو ترکیب اثر معنی‌داری بر افزایش مقدار نیتروژن برگ گوجه‌فرنگی داشت. کاربرد اسید هیومیک در شرایط آبیاری مطلوب و کم‌آبیاری، مقدار نیتروژن را به ترتیب ۳۰ و ۳۳ درصد افزایش داد. درحالی‌که اسید آمینه مقدار این عنصر را در شرایط آبیاری کامل ۲۳ درصد و در گیاهان تحت تیمار کم‌آبیاری ۱۹ درصد (بازگشت مقدار نیتروژن به ۴/۹۹ درصد) بهبود داد. مقایسه اثرات دو کود حاکی از برتری شش درصدی اسید هیومیک نسبت به اسید آمینه در بهبود جذب نیتروژن می‌باشد (جدول ۷).

فسفر: تحت تأثیر تیمار کم‌آبیاری، غلظت فسفر برگ از ۰/۴۲ به ۰/۳۲ درصد کاهش یافت. کودآبیاری باعث بهبود جذب فسفر به‌ویژه در شرایط کم‌آبیاری شد. اسید هیومیک، این شاخص را در شرایط نرمال و تنش کم‌آبیاری به ترتیب ۳۸ و ۶۶ درصد افزایش داد، درحالی‌که اسید آمینه افزایش‌های ۳۰ و ۳۴ درصدی را در این شرایط ایجاد نمود که نشان می‌دهد اسید هیومیک در شرایط تنش ۲۳ درصد برتر از اسید آمینه عمل کرد (جدول ۷).

پتاسیم: مقدار پتاسیم برگ گوجه‌فرنگی از ۳/۷۱ درصد در آبیاری کامل به ۲/۸۱ درصد در شرایط کم‌آبیاری کاهش یافت. اسید هیومیک موجب افزایش ۴۳ درصدی مقدار پتاسیم در شرایط نرمال و ۶۹ درصدی در شرایط تنش شد، درحالی‌که در تیمار اسید آمینه، مقدار افزایش پتاسیم در گیاهان رشدیافته در شرایط آبیاری کامل و کم‌آبیاری به ترتیب ۳۸ و ۳۰ درصد بود (جدول ۷).

کلسیم: تنش کم‌آبیاری، مقدار کلسیم برگ گوجه‌فرنگی را ۲۰ درصد نسبت به شرایط آبیاری مطلوب از ۲/۸۵ به ۲/۲۸ درصد کاهش داد و در مقابل کودآبیاری اسید هیومیک و اسید آمینه، نقش مؤثری در بهبود غلظت این عنصر در هر دو شرایط آبیاری داشت. اسید

هیومیک، مقدار کلسیم را به‌طور معنی‌داری افزایش داد و افزایش مقدار این عنصر در شرایط کم‌آبیاری بیشتر از سطح شاهد (آبیاری کامل) بود. مقایسه اثر دو ترکیب استفاده‌شده به‌عنوان کودآبیاری بر مقدار کلسیم نشان می‌دهد که اسید هیومیک در شرایط تنش ۱۸ درصد مؤثرتر از اسید آمینه بود (جدول ۷).

منیزیم: کاهش ۱۸ درصدی منیزیم برگ (از ۰/۸۸ به ۰/۷۲ درصد) تحت تأثیر کم‌آبیاری مشاهده شد. مقدار منیزیم در برگ گیاهان رشدیافته در هر دو شرایط آبیاری در واکنش به تیمارهای اسید هیومیک و اسید آمینه افزایش معنی‌داری نشان دادند، اگرچه براساس نتایج تجزیه واریانس، اثر متقابل رژیم آبیاری و اسید هیومیک معنی‌دار نبود. براساس نتایج حاصل، عملکرد دو کود در بهبود منیزیم بسیار نزدیک و بدون اختلاف عمده بود (جدول ۷).

عناصر کم‌مصرف

آهن: کم‌آبیاری اثر معنی‌داری بر کاهش مقدار آهن برگ گیاه گوجه‌فرنگی داشت و موجب کاهش ۲۰ درصدی آهن برگ (۳۱/۸۱ به ۲۵/۵۵ پی‌پی‌ام) گردید. اسید هیومیک و اسید آمینه، مقدار این عنصر را در شرایط آبیاری کامل به ترتیب ۱۷ و ۱۰ درصد افزایش داد و در شرایط کم‌آبیاری این افزایش ۳۳ و ۲۴ درصد بود که نشان می‌دهد اسید هیومیک در شرایط کم‌آبیاری هفت درصد برتر عمل کرده است (جدول ۷).

منگنز: کم‌آبیاری، مقدار منگنز برگ را ۱۸ درصد نسبت به شرایط آبیاری مطلوب کاهش داد و تیمارهای کودی استفاده‌شده نیز در بهبود مقدار این عنصر به‌ویژه در شرایط تنش مؤثر بودند (جدول ۷).

روی: مقدار عنصر روی تحت شرایط کم‌آبیاری با کاهش ۱۵ درصدی از ۲۰/۹۴ به ۱۷/۸۵ پی‌پی‌ام رسید. اسید هیومیک، مقدار این عنصر را در شرایط آبیاری کامل و کم‌آبیاری به ترتیب ۲۵ و ۲۴ درصد افزایش داد. اگرچه براساس نتایج تجزیه واریانس، اثر متقابل رژیم آبیاری و اسید آمینه بر مقدار عنصر روی معنی‌دار نبود، ولی نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان می‌دهد که در تیمار اسید آمینه، مقدار این عنصر در شرایط عادی و تنش به ترتیب ۱۵ و ۱۸ افزایش یافت. نتایج بیانگر آن است که اسید هیومیک در بهبود مقدار عنصر روی در شرایط تنش به‌میزان شش درصد مؤثرتر بود (جدول ۷).

جدول ۵- تجزیه واریانس اثر کودآبیاری اسید هیومیک بر غلظت عناصر غذایی برگ گوجه‌فرنگی رقم 'ترمه' تحت شرایط کم‌آبیاری
Table 5- Variance analysis of the humic acid fertigation effect on the concentration of leaf nutrient elements in tomato cv. 'Termeh' under deficit irrigation conditions

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares							
		نیتروژن N	فسفر P	پتاسیم K	کلسیم Ca	منیزیم Mg	آهن Fe	منگنز Mn	روی Zn
بلوک Block	3	0.003 ns	0.0008 ns	0.022 ns	0.002 ns	0.005 ns	0.108 ns	0.086 ns	0.028 ns
اسید هیومیک Humic acid (H)	1	8.396 **	0.137 **	12.479 **	2.288 **	0.194 **	190.854 **	1173.919 **	92.496 **
کم آبیاری Irrigation (I)	1	2.899 **	0.022 **	2.124 **	0.522 **	0.07 **	87.703 **	531.879 **	49.808 **
کم آبیاری × اسید هیومیک H × I	1	0.014 **	0.003 **	0.128 *	0.174 **	0.003 ns	9.891 **	1.925 **	0.779 **
خطا Error	9	0.001	0.0006	0.018	0.001	0.001	0.21	0.143	0.021

***: Significant at 1% of probability level, **: Significant at 5% of probability level, ns: non-significant
*: معنی‌دار در سطح یک درصد، **: معنی‌دار در سطح پنج درصد، ns: غیرمعنی‌دار

جدول ۶- تجزیه واریانس اثر کودآبیاری اسید آمینه بر غلظت عناصر غذایی برگ گوجه‌فرنگی رقم 'ترمه' تحت شرایط کم‌آبیاری
Table 6- Variance analysis of the amino acid fertigation effect on the concentration of leaf nutrient elements in tomato cv. 'Termeh' under deficit irrigation conditions

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares							
		نیترژن N	فسفر P	پتاسیم K	کلسیم Ca	منیزیم Mg	آهن Fe	منگنز Mn	روی Zn
بلوک Block	3	0.009 **	0.0002 ns	0.059 ns	0.0009 ns	0.0006 ns	0.161 ns	0.277 ns	0.044 ns
اسید آمینه Amino acid (A)	1	3.744 **	0.056 **	5.085 **	0.714 **	0.216 **	90.44 **	454.01 **	39.47 **
کم‌آبیاری Irrigation (I)	1	3.686 **	0.047 **	5.546 **	1.145 **	0.068 **	90.25 **	401.702 **	37.73 **
کم‌آبیاری × اسید آمینه A × I	1	0.112 **	0.001 *	0.292 **	0.005 **	0.004 **	9.06 **	19.426 **	0.001 ns
خطا Error	9	0.001	0.00005	0.019	0.00009	0.00009	0.114	0.079	0.04

***: معنی‌دار در سطح یک درصد؛ *: معنی‌دار در سطح پنج درصد؛ **: غیرمعنی‌دار
**: Significant at 1% of probability level, *: Significant at 5% of probability level, ns: non-significant

جدول ۷- اثرات متقابل کودآبیاری اسید هیومیک × کم آبیاری و کودآبیاری اسید آمینه × کم آبیاری بر غلظت عناصر غذایی برگ گوجه‌فرنگی رقم 'ترمه'
Table 7- Interaction effects of humic acid fertigation × deficit irrigation and amino acid fertigation × deficit irrigation on the leaf nutrient elements concentration of tomato cv. 'Termeh'

کودآبیاری Fertigation	کم آبیاری Irrigation (% FC)	نیتروژن N (%)	فسفر P (%)	پتاسیم K (%)	کلسیم Ca (%)	منیزیم Mg (%)	آهن Fe (ppm)	منگنز Mn (ppm)	روی Zn (ppm)
اسید هیومیک Humic acid (g.L ⁻¹)	0	4.99±0.04 c*	0.42±0.01 c	3.71±0.25 c	2.85±0.01 c	0.88±0.01 c	31.81±0.53 c	66.31±0.66 c	20.94±0.07 c
	70	4.19±0.06 d	0.32±0.01 d	2.81±0.08 d	2.28±0.01 d	0.72±0.01 d	25.55±0.41 d	54.08±0.13 d	17.85±0.11 d
	100	6.49±0.02 a	0.58±0.01 a	5.30±0.01 a	3.40±0.07 a	1.07±0.06 a	37.14±0.52 a	82.75±0.21 a	26.19±0.16 a
	70	5.58±0.01 b	0.53±0.01 b	4.75±0.05 b	3.24±0.01 b	0.97±0.06 b	34.03±0.07 b	71.91±0.10 b	22.22±0.20 b
اسید آمینه Amino acid (g.L ⁻¹)	0	4.99±0.04 b	0.425±0.01 b	3.71±0.25 b	2.85±0.01 b	0.88±0.01 c	31.81±0.53 b	66.31±0.66 c	20.94±0.07 b
	70	4.19±0.06 c	0.325±0.01 c	2.81±0.08 c	2.28±0.01 d	0.72±0.01 d	25.55±0.41 c	54.08±0.13 d	17.85±0.11 c
	100	6.12±0.06 a	0.5525±0.01 a	5.11±0.19 a	3.24±0.01 a	1.08±0.01 a	35.06±0.08 a	74.76±0.23 a	24.07±0.34 a
	70	4.99±0.04b	0.435±0.01 b	3.66±0.08 b	2.74±0.01 c	0.98±0.01 b	31.81±0.20 b	66.94±0.07 b	21.015±0.14 b

* Values followed by the same letter in each trait have no significant difference based on Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$.
در هر صفت و گروه مقایسه‌شده، تیمارهای با حروف یکسان اختلاف معنی‌داری با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ درصد ندارند.

براساس نتایج مقایسه میانگین، کاربرد اسید هیومیک در شرایط مطلوب آبیاری و تنش به‌ترتیب افزایش ۳۶ و ۵۰ درصدی تعداد میوه را موجب شد. گیاهان تیمار شده با اسید آمینه تحت شرایط آبیاری کامل و کم‌آبیاری به‌ترتیب افزایش ۳۶ و ۴۰ درصدی (بازگشت به شرایط بدون تنش) را نشان دادند (جدول ۱۰).

وزن تک میوه: تحت تأثیر تنش کم‌آبیاری، وزن تک میوه با کاهش شش درصدی از ۱۲۹/۹ گرم به ۱۲۲/۳۸ گرم رسید. اسید هیومیک، این شاخص را در شرایط نرمال و تنش به‌ترتیب ۳۱ و ۲۲ درصد افزایش داد، درحالی‌که اسید آمینه با وجود غیرمعنی‌دار بودن اثر متقابل آن با آبیاری، افزایش‌های ۲۲ درصدی و ۱۸ درصدی در وزن تک میوه را ایجاد نمود (جدول ۱۰).

عملکرد میوه: عملکرد میوه گوجه‌فرنگی تحت تیمار کم‌آبیاری از ۹/۴۵ به ۷/۶۹ کیلوگرم در بوته کاهش یافت. کاربرد اسید هیومیک و اسید آمینه هر دو به افزایش عملکرد منجر شد. در شرایط نرمال، اسید هیومیک، عملکرد را ۲۱ درصد و اسید آمینه آن را ۱۸ درصد افزایش داد. در شرایط تنش، این افزایش برای اسید هیومیک به ۳۱ درصد و برای اسید آمینه به ۲۹ درصد رسید (جدول ۱۰).

صفات کیفی میوه

سفتی بافت میوه: رژیم آبیاری و اسید آمینه تأثیر معنی‌داری بر سفتی بافت میوه نداشت، اما اسید هیومیک تأثیر مثبتی بر بهبود اندک سفتی میوه گوجه‌فرنگی داشت (جدول ۱۰).

مواد جامد محلول: تحت شرایط کم‌آبیاری، مقدار مواد جامد محلول از ۴/۷۵ به ۳/۳۴ درجه بریکس کاهش یافت. اسید هیومیک، این شاخص را در شرایط نرمال و تنش به‌ترتیب ۲۳ درصد (به ۵/۸۲ درجه بریکس) و ۵۹ درصد (به ۵/۳۰ درجه بریکس) افزایش داد. در شرایط آبیاری کامل، اسید آمینه تأثیر معنی‌داری بر مقدار مواد جامد محلول نداشت، ولی در شرایط تنش به حفظ مواد جامد محلول کمک کرد (جدول ۱۰).

اسیدیته: تنش کم‌آبیاری تأثیر معنی‌داری بر pH میوه نداشت. اسید هیومیک، این شاخص را در شرایط آبیاری مطلوب ۱۲ درصد افزایش داد، درحالی‌که در تیمار اسید آمینه افزایش هفت درصدی را نشان داد (جدول ۱۰).

ویتامین ث: کم‌آبیاری، کاهش ۱۳ درصدی اسید آسکوربیک میوه‌های گوجه‌فرنگی را به دنبال داشت. اسید هیومیک موجب افزایش ۲۴ و ۱۸ درصدی به‌ترتیب در شرایط نرمال و کم‌آبیاری شد، درحالی‌که اسید آمینه، افزایش‌های ۲۱ و ۱۴ درصدی را ایجاد نمود (جدول ۱۰).

براساس نتایج حاصل، تنش کم‌آبیاری موجب کاهش معنی‌دار غلظت تمامی عناصر پرمصرف و کم‌مصرف در برگ گیاه گوجه‌فرنگی شد. کاهش غلظت عناصر غذایی تحت کم‌آبیاری می‌تواند ناشی از کاهش فعالیت میکروبی خاک، کاهش انتقال از طریق جریان توده‌ای و کاهش جذب فعال به‌دلیل محدودیت انرژی باشد (Chand et al., 2021; Wu et al., 2022). کاربرد اسید هیومیک با تحریک توسعه سیستم ریشه، سطح تماس ریشه با خاک و در نتیجه جذب عناصر را افزایش می‌دهد (Gholami et al., 2019). از سوی دیگر، اسید آمینه‌ها می‌توانند به‌عنوان لیگاند های طبیعی عمل کرده و با تشکیل کمپلکس با عناصر، قابلیت جذب آن‌ها را بهبود بخشند (Fayaz et al., 2024; Khan et al., 2025). همچنین اسید آمینه‌ها می‌توانند به‌عنوان منبع کربن و انرژی برای ریزجانداران خاکری عمل کرده و فعالیت میکروبی خاک را افزایش دهند که این امر به‌نوبه خود باعث آزادسازی عناصر غذایی می‌شود (Haghighi et al., 2020). راید و همکاران (Ride et al., 2024) گزارش کردند که اسید هیومیک باعث بهبود جذب عناصر غذایی از طریق افزایش نفوذپذیری غشای سلولی و تحریک فعالیت آنزیم‌های مرتبط با جذب عناصر می‌شود. براساس نتایج حاصل از این پژوهش، اسید هیومیک در مقایسه با اسید آمینه در بهبود جذب و غلظت اکثر عناصر به‌ویژه فسفر، پتاسیم، کلسیم و منگنز برتر بود. این برتری احتمالاً ناشی از نقش اسید هیومیک در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و افزایش قابلیت جذب عناصر است. اگرچه تیمار اسید آمینه نیز به‌دلیل نقش در سنتز پروتئین‌های حامل و کلاته کردن عناصر، اثرات مثبت قابل توجهی در بهبود جذب عناصر غذایی مورد ارزیابی داشت، اما در پژوهش حاضر این اثر در مقایسه با اسید هیومیک کمتر بود.

صفات کمی و کیفی میوه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که در هر دو آزمایش، اثرات اصلی تیمارهای کم‌آبیاری، اسید هیومیک (جدول ۸) و اسید آمینه (جدول ۹) بر بیشتر صفات کمی و کیفی میوه گوجه‌فرنگی معنی‌دار بود. اثر متقابل کم‌آبیاری × اسید هیومیک بر همه صفات مورد ارزیابی به‌جز تعداد میوه و سفتی میوه معنی‌دار بود. اثر متقابل اسید آمینه و کم‌آبیاری نیز بر عملکرد میوه، مواد جامد محلول، اسیدیته، ویتامین ث، کاروتنوئیدها و لیکوپن معنی‌دار شد، اما بر تعداد، وزن و سفتی میوه معنی‌دار نبود.

صفات کمی میوه

تعداد میوه در خوشه: تنش کم‌آبیاری باعث کاهش ۲۹ درصدی تعداد میوه در خوشه در تیمارهای بدون کود گردید. اگرچه اثرات متقابل آبیاری و کودآبیاری بر تعداد میوه معنی‌دار نبود، ولی

جدول ۸- تجزیه واریانس اثر کودآبیاری اسید هیومیک بر صفات کمی و کیفی میوه گوجه‌فرنگی رقم 'ترمه' تحت شرایط کم‌آبیاری
Table 8- Variance analysis of the humic acid fertigation effect on the quantitative and qualitative traits of tomato cv. 'Termeh' fruit under deficit irrigation conditions

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares								
		تعداد میوه No. fruits per cluster	وزن میوه Fruit weight	عملکرد Fruit yield	سفتی بافت Firmness	مواد جامد محلول TSS	اسیدیته pH	ویتامین ث Ascorbic acid	کاروتنوئیدها Carotenoids	لیکوپن Lycopene
بلوک Block	3	0.25 ns	42.354 ns	0.024 ns	0.435 ns	0.028 *	0.078 **	0.124 ns	0.02 **	0.007 ns
اسید هیومیک Humic acid (H)	1	6.25 **	4585.321 **	19.625 **	3.744 **	9.211 **	0.522 **	268.796 **	1.476 **	2.576 **
کم آبیاری Irrigation (I)	1	4.011 **	813.105 **	9.703 **	0.07 ns	3.764 **	0.007 ns	210.83 **	0.073 **	0.017 ns
کم آبیاری × اسید هیومیک H × I	1	0.001 ns	181.845 *	0.156 *	0.07 ns	0.801 **	0.111 **	12.532 *	0.017 *	0.189 **
خطا Error	9	0.306	36.018	0.024	0.163	0.004	0.008	2.194	0.002	0.004

** : معنی‌دار در سطح یک درصد؛ * : معنی‌دار در سطح پنج درصد؛ ns : غیرمعنی‌دار
** : Significant at 1% of probability level, * : Significant at 5% of probability level, ns : non-significant

جدول ۹- تجزیه واریانس اثر کودآبیاری اسید آمینه بر صفات کمی و کیفی میوه گوجه‌فرنگی رقم 'ترمه' تحت شرایط کم‌آبیاری
Table 9- Variance analysis of the amino acid fertigation effect on the quantitative and qualitative traits of tomato cv. 'Termeh' fruit under deficit irrigation conditions

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares								
		تعداد میوه No. fruits per cluster	وزن میوه Fruit weight	عملکرد Fruit yield	سفتی بافت Firmness	مواد جامد محلول TSS	اسیدیته pH	ویتامین ث Ascorbic acid	کاروتنوئیدها Carotenoids	لیکوپن Lycopene
بلوک Block	3	0.563 ns	5.139 ns	0.024 ns	0.729 ns	0.102 **	0.102 **	0.443 ns	0.018 **	0.015 *
اسید آمینه Amino acid (A)	1	5.062 **	2493.255 **	15.761 **	0.562 ns	0.031 ns	0.031 ns	195.51 **	1.188 **	1.562 **
کم آبیاری Irrigation (I)	1	5.062 **	450.607 **	8.97 **	0.563 ns	0.031 ns	0.031 ns	209.598 **	0.081 **	0.106 **
کم آبیاری × اسید آمینه A × I	1	0.062 ns	38.409 ns	0.265 **	0.562 ns	0.181 **	0.181 **	12.233 *	0.013 *	0.058 **
خطا Error	9	0.229	28.036	0.024	0.229	0.008	0.008	2.244	0.002	0.003

** : Significant at 1% of probability level, * : Significant at 5% of probability level, ns : non-significant
*: معنی‌دار در سطح یک درصد، **: معنی‌دار در سطح پنج درصد، ns: غیرمعنی‌دار

جدول ۱۰- اثرات متقابل کودبازی اسید هیومیک × کم‌آبیاری و کودبازی اسید آمینه × کم‌آبیاری بر صفات کمی و کیفی میوه گوجه‌فرنگی رقم 'ترمه'،
Table 10- Interaction effects of humic acid fertigation × deficit irrigation and amino acid fertigation × deficit irrigation on the quantitative and qualitative traits of tomato cv. 'Termeh' fruit

کودبازی Fertigation	کودبازی (% FC) Irrigation (% FC)	تعداد میوه No. fruits per cluster	وزن میوه Fruit weight (g)	عملکرد Fruit yield (kg per plant)	سفتی بالشت Firmness (kg per cm ²)	مواد جامد محلول TSS (°Brix)	اسیدیته pH	ویتامین ث Ascorbic acid (mg per 100 g)	کاروتنوئیدها Carotenoids (mg per 100 g)	لیکوپن Lycopene (mg per 100 g)
اسید هیومیک Humic acid (g.L ⁻¹)	0	3.50±0.57 b*	129.90±7.41 c	9.45±0.07 c	5.25±0.50 b	4.75±0.05 c	4.25±0.20 c	42.01±1.28 b	2.95±0.06 c	5.34±0.08 d
	70	2.50±0.57 c	122.38±3.48 c	7.69±0.21 d	5.25±0.50 b	3.34±0.04 d	4.37±0.15 bc	36.52±2.09 c	3.15±0.08 b	5.63±0.06 c
	100	4.75±0.50 a	170.50±6.45 a	11.47±0.19 a	6.35±0.49 a	5.82±0.13 a	4.77±0.13 a	51.98±0.80 a	3.62±0.09 a	6.36±0.08 a
اسید آمینه amino acid (g.L ⁻¹)	0	3.75±0.50 b	149.50±6.45 b	10.11±0.08 b	6.08±0.42 a	5.30±0.13 b	4.57±0.13 b	42.95±0.06 a	3.69±0.08 a	6.21±0.03 c
	70	3.50±0.57 b	129.90±7.41 c	9.45±0.07 c	5.25±0.50 a	4.25±0.20 b	4.25±0.20 b	42.01±1.28 b	2.95±0.06 c	5.34±0.08 c
	100	2.50±0.57 c	122.38±3.48 d	7.69±0.21 d	5.25±0.50 a	4.37±0.15 ab	4.37±0.15 ab	36.52±2.09 c	3.15±0.08 b	5.63±0.06 b
	1	4.75±0.50 a	157.97±1.97 a	11.18±0.19 a	6.00±0.81 a	4.55±0.12 a	4.55±0.12 a	50.75±0.96 a	3.55±0.07 a	6.09±0.10 a
	70	3.50±0.57 b	144.25±4.279 b	9.94±0.08 b	5.25±0.50 a	4.25±0.20 b	4.25±0.20 b	41.76±0.43 b	3.64±0.09 a	6.13±0.05 a

* Values followed by the same letter in each trait have no significant difference based on Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$.

لیکوپن در میوه می‌شوند. این نتایج با یافته‌های رستمی و همکاران (Rostami et al., 2022) که گزارش کردند اسید هیومیک با تحریک فعالیت آنزیم‌های دخیل در سنتز کاروتنوئیدها و اسیدهای آلی باعث افزایش محتوای این ترکیبات در میوه می‌شود، هم‌خوانی دارد. همچنین نتایج گزارش‌شده توسط وانگ و همکاران (Wang et al., 2023) نشان دادند که اسید آمینه‌ها می‌توانند با بهبود متابولیسم ثانویه، کیفیت میوه را افزایش دهند، مطابقت دارد.

اگرچه کاربرد هر دو ماده اسید هیومیک و اسید آمینه به بهبود معنی‌دار هر دو دسته صفات کمی (شامل تعداد میوه، وزن میوه و عملکرد) و کیفی میوه (شامل سفتی بافت، مواد جامد محلول، ویتامین ث، کاروتنوئیدها و لیکوپن) منجر شد، با این‌وجود میزان اثرگذاری آن‌ها متفاوت بود. به‌طوری که اثر اسید هیومیک در بهبود صفات کمی و کیفی به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از اسید آمینه بود. این نتایج حاکی از برتری ۱۷/۱ درصدی اسید هیومیک در صفات کمی و برتری چشمگیر ۴۲/۵ درصدی آن در صفات کیفی میوه گوجه‌فرنگی در مقایسه با اسید آمینه است.

نتیجه‌گیری

این مطالعه به‌وضوح نشان داد که اعمال تیمار کم‌آبیاری (۷۰ درصد ظرفیت مزرعه) تأثیر منفی و معنی‌داری بر تمامی صفات ریخت‌شناختی و عملکرد گوجه‌فرنگی داشت. این کاهش را می‌توان به محدودیت در دسترسی به آب، اختلال در جذب عناصر غذایی، کاهش نرخ فتوسنتز و در نهایت اختلال در متابولیسم و تقسیم سلولی نسبت داد. با این‌حال، یافته‌های این تحقیق مؤید این است که کاربرد هر دو نوع کود آلی اسید هیومیک (سه گرم در لیتر) و اسید آمینه (یک گرم در لیتر) نه تنها این اثرات منفی را به‌طور قابل توجهی خنثی کرد، بلکه در بسیاری از موارد منجر به بهبود شاخص‌های رشدی و کیفی حتی در مقایسه با شاهد (آبیاری کامل بدون کود) نیز گردید. با توجه به نتایج این پژوهش، می‌توان استفاده از اسید هیومیک را به‌عنوان یک راهکار مدیریتی عملی و مؤثر برای کاهش خسارات ناشی از تنش کم‌آبیاری و افزایش کمی و کیفی محصول گوجه‌فرنگی در حد شرایط مطلوب آبیاری توصیه نمود. استفاده از این کودها به‌ویژه در شرایط محدودیت منابع آب، می‌تواند ضمن حفظ عملکرد و کیفیت محصول، به پایداری سیستم‌های کشاورزی کمک شایانی کند.

کاروتنوئیدها: تنش کم‌آبیاری به افزایش هفت درصدی محتوای کاروتنوئیدها منجر شد. اسید هیومیک با افزایش ۲۳ درصدی در شرایط نرمال و ۱۷ درصدی در شرایط کم‌آبیاری، بیشترین تأثیر را بر غلظت کاروتنوئیدها داشت. اسید آمینه نیز با ایجاد افزایش ۲۰ درصدی، اثر مثبت و قابل توجهی بر مقدار کاروتنوئیدهای میوه گوجه‌فرنگی داشت (جدول ۱۰).

لیکوپن: مقدار لیکوپن در میوه گیاهان رشدیافته تحت شرایط کم‌آبیاری، پنج درصد بیشتر از شرایط آبیاری کامل بود. اسید هیومیک، این شاخص را در شرایط نرمال و کم‌آبی به‌ترتیب ۱۹ و ۱۰ درصد بهبود بخشید. اسید آمینه نیز افزایش ۱۴ درصدی مقدار لیکوپن را سبب شد (جدول ۱۰).

کاهش عملکرد و کیفیت میوه گوجه‌فرنگی تحت کم‌آبیاری می‌تواند ناشی از اختلال در فرآیندهای گرده‌افشانی، تلقیح و تشکیل میوه باشد. کم‌آبیاری و تنش خشکی می‌تواند باعث کاهش تولید گرده، کاهش زنده‌مانی و رشد لوله گرده، و تغییر در باز شدن گل‌ها شود. این عوامل منجر به کاهش درصد تلقیح موفق و کاهش تعداد و کیفیت میوه گوجه‌فرنگی می‌شوند. بنابراین، مدیریت آبیاری در مرحله گل‌دهی و قبل از آن برای حفظ عملکرد و کیفیت میوه بسیار حیاتی است (Mukherjee et al., 2023). از طرف دیگر، افزایش کاروتنوئیدها و لیکوپن تحت تنش خشکی می‌تواند یک پاسخ سازگاری برای محافظت از دستگاه فتوسنتزی در برابر تنش ناشی از کم‌آبیاری باشد، زیرا این ترکیبات نقش آنتی‌اکسیدانی قوی دارند (Chen et al., 2025). اسید هیومیک با بهبود جذب عناصر غذایی کلیدی مانند پتاسیم و کلسیم که نقش بسزایی در انتقال مواد فتوسنتزی به میوه، سفتی بافت و کیفیت میوه دارند باعث بهبود صفات کمی و کیفی می‌شود (Ride et al., 2024; Singh et al., 2017). اسید آمینه‌ها نیز به‌عنوان پیش‌ساز ترکیبات آلی و کوآنزیم‌ها، به‌طور مستقیم در متابولیسم ثانویه و سنتز ترکیبات طعم‌دهنده میوه نقش دارند (Ali et al., 2024). اسید هیومیک با بهبود تقسیم سلولی و ریشه و افزایش جذب آب و مواد غذایی باعث بهبود تقسیم سلولی و پُر شدن میوه می‌شود (Rostami et al., 2022). از طرف دیگر، اسید آمینه‌ها با تأمین مستقیم واحدهای سازنده پروتئین‌ها و تنظیم سنتز هورمون‌های رشد باعث بهبود رشد و توسعه میوه می‌گردند (Sadeghi Chah-Nasir et al., 2023).

اسید هیومیک و اسید آمینه با تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه باعث افزایش سنتز ترکیبات آنتی‌اکسیدانی به‌ویژه کاروتنوئیدها و

References

1. Ali, H., Mahmood, I., Ali, M. F., Waheed, A., Jawad, H., Hussain, S., Abasi, F., Zulfiqar, U., Siddiqui, M. H., & Alamri, S. (2024). Individual and interactive effects of amino acid and paracetamol on growth, physiological and biochemical aspects of *Brassica napus* L. under drought conditions. *Heliyon*, 10(11), e31544. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31544>
2. Amankwaa-Yeboah, P., Aruna Akoriko, F., Amponsah, W., Yeboah, S., Brempong, M. B., & Keteku, A. K. (2023). Combining deficit irrigation and nutrient amendment enhances the water productivity of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in the tropics. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1199386. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1199386>
3. Aslani, S., Barzegar, T., & Nikbakht, J. (2019). Effect of humic acid on physiological and biochemical indices and yield of tomato under deficit irrigation. *Journal of Crops Improvement*, 21(2), 221-232. (in Persian). <https://doi.org/10.22059/jci.2019.272278.2137>
4. Chand, J. B., Hewa, G., Hassanli, A., & Myers, B. (2021). Deficit irrigation on tomato production in a greenhouse environment: A review. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(2), 04020041. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001529](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001529)
5. Chen, X., Dong, H., Qi, Z., Gui, D., Ma, L., Thorp, K. R., Malone, R., Wu, H., Liu, B., & Feng, S. (2025). Potential deficit irrigation adaptation strategies under climate change for sustaining cotton production in hyper-arid areas. *Agricultural Water Management*, 132, 109417. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109417>
6. El-Beltagi, H. S., Abuarab, M. E., Fahmy, M. A., Abdelaziz, S. M., Abdel-Hakim, S. G., Abdeldaym, E. A., & Tawfic, G. A. (2023). Impact of biostimulants based amino acids and irrigation frequency on agro-physiological characteristics and productivity of broccoli plants. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 51(4), 13454. <https://doi.org/10.15835/nbha51413454>
7. Elshamly, A. M., Iqbal, R., Ali, B., Ahmed, I., Akram, M. I., Ali, S., Ditta, A., ÇİĞ, F., Elshikh, M. S., Mustafa, A. E. Z. M., & Hamed, M. H. (2024). Zinc and amino acids improve the growth, physiological, and biochemical attributes of corn under different irrigation levels. *Rhizosphere*, 29, 100820. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100820>
8. Fayaz, E., Sorooshzadeh, A., & Heidarzadeh, A. (2024). Effect of foliar application of amino acids under water deficit conditions during late-season on yield and yield components of oil rapeseed (*Brassica napus* L.). *Iranian Journal of Field Crop Science*, 55(1), 139-149. (in Persian). <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2024.368145.655044>
9. Fisk, C. L., Silver, A. M., Strik, B. C., & Zhao, Y. (2008). Postharvest quality of hardy kiwifruit (*Actinidia arguta* 'Ananasnaya') associated with packaging and storage conditions. *Postharvest Biology and Technology*, 47(3), 338-345. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.07.015>
10. Gholami, H., Ghani, A., Raouf Fard, F., Saharkhiz, M. J., & Hazrati, H. (2019). Changes in photosynthetic pigments and uptake of some soil elements by chicory supplied with organic fertilizers. *Acta Ecologica Sinica*, 39(3), 250-256. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2018.09.003>
11. Haghighi, M., Saadat, S., & Abbey, L. (2020). Effect of exogenous amino acids application on growth and nutritional value of cabbage under drought stress. *Scientia Horticulturae*, 272, 109561. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109561>
12. Heidarzadeh, A. (2025). Role of amino acids in plant growth, development, and stress responses: A comprehensive review. *Discover Plants*, 2, 237. <https://doi.org/10.1007/s44372-025-00322-0>
13. Khan, S., Iqbal, M. Z., Solangi, F., Azeem, S., Bodlah, M. A., Zaheer, M. S., Niaz, Y., Ashraf, M., Abid, M., Gul, H., Yu, H., Li, Q., Weijie, J., Rizwan, M., & Manoharadas, S. (2025). Impact of amino acid supplementation on hydroponic lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth and nutrient content. *Scientific Reports*, 15(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00294-x>
14. Khorasani, H., Rajabzadeh, F., Mozafari, H., & Pirbalouti, A. G. (2023). Water deficit stress impairment of morphophysiological and phytochemical traits of stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) buffered by humic acid application. *South African Journal of Botany*, 154, 365-371. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.01.030>
15. Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic bio membranes. *Methods in Enzymology*, 148, 350-382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
16. Locatelli, S., Barrera, W., Verdi, L., Nicoletto, C., Dalla Marta, A., & Maucieri, C. (2024). Modelling the response of tomato on deficit irrigation under greenhouse conditions. *Scientia Horticulturae*, 326, 112770. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112770>
17. Mehrnia, M., Filizadeh, Y., & Naji, A. (2024). Evaluation the effects of shade and humic acid on the eco-physiological traits of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) under different irrigation regimes. *Journal of Medicinal plants and By-products*, 13(4), 1026-1036. (in Persian). <https://doi.org/10.22034/jmpb.2024.364076.1625>

18. Mukherjee, S., Dash, P. K., Das, D., & Das, S. (2023). Growth, yield and water productivity of tomato as influenced by deficit irrigation water management. *Environmental Processes*, 10, 10. <https://doi.org/10.1007/s40710-023-00624-z>
19. Mukherjee, S. P., & Choudhuri, M. A. (1983). Implication of water stress-induced changes in the levels of endogenous ascorbic acid and hydrogen peroxide in *Vigna* seedlings. *Journal of Plant Physiology*, 58, 166-170. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1983.tb04162.x>
20. Najafi, M., Arouiee, H., & Aminifard, M. H. (2022). Effects of humic acid and amino acid on some growth traits on super daminus cucumber (*Cucumis sativus* L.) under drought stress. *Journal of Horticultural Science*, 35(4), 521-533. (in Persian). <https://doi.org/10.22067/jhs.2021.61892.0>
21. Ride, R. S., Ahmed, S., Monami, S. A., & Sarkar, M. D. (2024). Improvement in growth, yield, and fruit quality of tomato by foliar application of humic and salicylic acids. *Notulae Scientia Biologicae*, 16(4), 12189. <https://doi.org/10.55779/nsb16412189>
22. Rostami, M., Shokouhian, A., & Mohebodini, M. (2022). Effect of humic acid, nitrogen concentrations and application method on the morphological, yield and biochemical characteristics of strawberry 'Paros.' *International Journal of Fruit Science*, 22(1), 203–214. <https://doi.org/10.1080/15538362.2021.2022566>
23. Sadeghi Chah-Nasir, A., Abootalebi Jahromi, A., Behrooznam, B., Hassanzadeh Khankahdani, H., & Ejraei, A. (2023). Effect of humic acid and amino acid foliar applications on the growth characteristics, yield, and fruit quality of tomato (*Solanum lycopersicom* L.). *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 10(3), 309-318. (in Persian). <https://doi.org/10.22059/ijhst.2022.325793.477>
24. Sadler, G., Davis, J., & Dezman, D. (1990). Rapid extraction of lycopene and β -carotene from reconstituted tomato paste and pink grapefruit homogenates. *Journal of Food Science*, 55(5), 1460–1461. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1990.tb03958.x>
25. Singh, M., Ameta, K. D., Dubey, R. B., Pareek, S., Meena, N. L., Meena, S., & Lal, S. (2017). Effect of humic acid and micro nutrients on growth and yield of poly house grown capsicum (*Capsicum annum* L.). *Chemical Science Review and Letters*, 6(22), 1189–1193.
26. Tüzel, Y., Biyke, H., Harouna, O. S., Durdu, T., Tepecik, M., Oztekin, G. B., Tunalı, U., & Gruda, N. S. (2024). Deficit irrigation response and climate resilience of Mediterranean tomato landraces. *Horticulturae*, 11(1), 74. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11010074>
27. Wang, X., Zhang, Y., Xu, W., Cheng, J., Liu, J., Pei, W., Wang, J., & Chuang, S. (2023). Amino acid fertilizer strengthens its effect on crop yield and quality by recruiting beneficial rhizosphere microbes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(12), 5970-5980. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12667>
28. Wu, W., Liu, M., Wu, X., Wang, Z., & Yang, H. (2022). Effects of deficit irrigation on nitrogen uptake and soil mineral nitrogen in alfalfa grasslands of the inland arid area of China. *Agricultural Water Management*, 269, 107724. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107724>
29. Xu, J., Li, X., Wan, W., Zhu, X., Li, C., Zhao, X., Zhao, Y., Pang, S., & Diao, M. (2024). Impact of regulated deficit irrigation on the dynamics of quality changes in processing tomato fruits during ripening. *Agricultural Water Management*, 304, 109068. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109068>