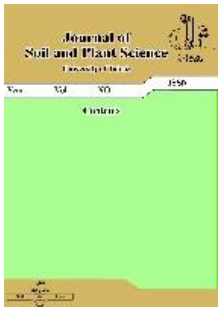
J Soil Plant Sci, 2026, 36(1): 105-123.
https://doi.org/10.22034/sps.2026.71616.1036

Journal of Soil and Plant Science

E-ISSN: 3092-6106
https://sps.tabrizu.ac.ir



Research Article

Effects of Superabsorbent Polymers, Fish Waste Hydrolysates, and Amino Acids on the Quality and Yield of Bell Pepper in a Calcareous Soil Under Greenhouse Conditions

Mehdi Nourzadeh Hadad✉[1], Saeed Moori[2], Akbar Hassani[3]

1-Nuclear Agriculture Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Karaj, Iran.
E-mail: m.nourzade@gmail.com
2-Nuclear Agriculture Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Karaj, Iran.
E-mail: smoori86@gmail.com
3-Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
E-mail: akbar.hassani@znu.ac.ir

Received: February 18, 2026	Revised: May 9, 2026
Accepted: May 10, 2026	Published: May 13, 2026

Extended Abstract

Background and Objectives

Bell pepper (*Capsicum annuum* L.) is a globally important vegetable crop valued for its high nutritional content and antioxidant compounds. However, its production faces significant challenges in arid and semi-arid regions where soils typically have high pH (alkaline), low organic matter, poor structure, and low water retention capacity. These characteristics reduce the availability of essential nutrients, impairing physiological processes and ultimately diminishing yield. In recent years, biostimulants such as fish hydrolysate (rich in amino acids and bioactive peptides) and amino acid supplements have emerged as sustainable approaches to improve plant performance under stress conditions. Additionally, superabsorbent polymers can absorb water several times their weight and gradually release it in the root zone, improving soil water status and nutrient uptake. The main objective of this research was to investigate the simultaneous effect of superabsorbent polymer application with fish hydrolysate and amino acids on improving physiological, morphological, and yield characteristics of bell pepper plants under greenhouse conditions.

Materials and Methods

This research was conducted in the research greenhouse of the University of Zanjan in a completely randomized design with three replications. The treatments included: T_1 (control), T_2 (fish hydrolysates), T_3 (amino acids), T_4 (superabsorbent polymer + fish hydrolysates), and T_5 (amino acids + superabsorbent polymer at 1 mg L^{-1} concentration). The soil used had an electrical conductivity of 0.97 dS/m, pH of 7.79, sandy loam texture, organic matter content of 0.7%, total nitrogen of 0.04%, available phosphorus of 11 mg/kg, and available potassium of 151 mg/kg. The superabsorbent polymer (Aquasorb) with 0.5-1 mm particle size was used. Harvesting and trait evaluation were performed 92 days after planting. Parameters measured included chlorophyll a, b, total chlorophyll, carotenoids, photosynthesis rate, relative water content, stem and root dry weight, plant height, leaf number and area, and fruit number and weight. Data were analyzed using SPSS software and means comparisons were done by Duncan's multiple range test at the 1% probability level.

Results

All treatments showed significant effects on measured traits compared to the control. Combined treatments (T4 and T5) demonstrated significant superiority over individual applications. The highest total chlorophyll content (2.15 mg/g fresh weight) and carotenoid content (0.36 mg/g fresh weight) were observed in T4 treatment (superabsorbent + fish hydrolysate), showing increases of 21.5% and 24%, respectively, compared to the control (1.77 mg/g for total chlorophyll). T4 treatment also exhibited the highest plant height (73.6 cm)

compared to control (63.24 cm), and the highest leaf number (57.5 leaves per plant) and leaf area (713.5 cm²), representing increases of 20% and 22%, respectively, over control.

Total plant dry weight in T4 and T5 treatments were 25.93 g and 24.78 g, respectively, showing significant increases compared to control (20.9 g), with T5 treatment showing a 24% increase. The highest photosynthesis rate (22.74 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}) and relative water content (90.66%) were measured in T4 treatment, representing increases of 16.6% and 10.2%, respectively, compared to control. The increased relative water content in treatments containing superabsorbent polymers demonstrates the ability of these polymers to maintain soil moisture and provide stable water supply to plants, maintaining stomatal opening and enhancing gas exchange.

Fruit yield was highest in T4 treatment with average fresh fruit weight of 104.75 g, showing a 17.7% increase compared to control. The number of fruits, fresh weight, and dry weight in T4 treatment were 16.57, 104.75 g, and 10.51 g, respectively, representing increases of 33%, 17.7%, and 18% compared to control. T5 treatment ranked second with fruit number of 15.55, fresh weight of 100.56 g, and dry weight of 10.8 g. The increase in fruit number indicates improved flowering and fruit set processes, while increased fruit weight reflects enhanced translocation of assimilates to reproductive organs. This results from combining the positive effects of biostimulants on photosynthesis and superabsorbent polymers on plant water status.

Conclusions

Based on the results, the application of amino acids and fish hydrolysate significantly improved the quantitative and qualitative characteristics of bell pepper plants and their yield. The combined application of fish hydrolysate with superabsorbent polymer proved particularly effective due to improved soil water status and plant nutrition. The synergistic effects observed between biostimulants and superabsorbent polymers led to coordinated improvements in vegetative growth, physiological performance, and fruit production. Heat map and correlation matrix analyses confirmed that the positive effects of treatments were not limited to specific traits but harmoniously improved all measured parameters. Therefore, the integrated application of fish hydrolysate and superabsorbent polymer can be recommended as an effective strategy for enhancing both the quantity and quality of bell pepper production, especially in calcareous soils with limited water availability.

Keywords: Biomass, Carotenoid, Chlorophyll, Integrated plant nutrition management, Relative water content.

Author Contributions

Conceptualization, MNH. and A.H.; methodology, AH. and MNH.; software, M.N.H; validation, M.N.H.; formal analysis, SM. and MNH.; investigation, AH. And MNH; resources, M.N.H. and A.H.; data curation, SM and MNH; writing-original draft preparation, M.N.H. and A.H.; writing-review and editing, M.N.H. and A.H.; visualization, M.N.H.; supervision, A.H. and MNH project administration, A.H and MNH, funding acquisition, A.H. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgements

This paper is published as a part of a scientific project supported by the Vice Chancellor for Research and Technology of the University of Zanjan, Zanjan, Iran. The authors are thankful to the University of Zanjan for all supports.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

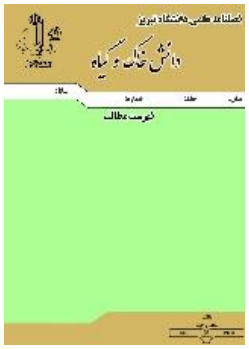
The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Cite this article: Nourzadeh Hadad, M., Moori, S. & Hassani, A. (2026). Effects of superabsorbent polymers, fish waste hydrolysates, and amino acids on the quality and yield of bell pepper in a calcareous soil under greenhouse conditions. *Journal of Soil and Plant Science*, 36(1), 105-123.
https://doi.org/10.22034/sps.2026.71616.1036

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

Copyright © 2026 The Authors.
Publisher: The University of Tabriz

OPEN ACCESS JOURNALS



نشریه دانش خاک و گیاه، جلد ۳۶، شماره ۱

صفحه‌های ۱۰۵ تا ۱۲۳، بهار ۱۴۰۵

https://doi.org/10.22034/sps.2026.71616.1036

E-ISSN: 3092-6106

https://sps.tabrizu.ac.ir

مقاله پژوهشی

تأثیر پلیمرهای سوپرجاذب، محصولات آبکافت پسماندهای ماهی و آمینو اسید بر کیفیت و عملکرد فلفل دلمه‌ای در یک خاک قلیایی و در شرایط گلخانه‌ای

مهدی نورزاده حداد[1]✉، سعید موری[2]، اکبر حسنی[3]

۱-نویسنده مسئول، پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، کرج، ایران. رایانامه:m.nourzade@gmail.com

۲- پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، کرج، ایران. رایانامه: smoori86@gmail.com

۳- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: akbar.hassani@znu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۹	**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۵/۰۲/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۰	**تاریخ انتشار:** ۱۴۰۵/۰۲/۲۳

چکیده

برای بررسی اثر کاربرد پلیمر سوپرجاذب، آکوازورب آبکافت ماهی و کود مخلوط آمینواسید بر ویژگی‌های رشدی، فیزیولوژیکی و عملکرد فلفل دلمه‌ای (*Capsicum annuum* L.)، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی و سه تکرار در یک خاک قلیایی و در شرایط گلخانه‌ای اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل شاهد (بدون کود)، آبکافت ماهی، آمینواسید، آبکافت ماهی + سوپرجاذب (آکوازورب) و آمینواسید + سوپرجاذب بودند. نتایج نشان داد که کلیه تیمارها نسبت به شاهد بر صفات اندازه‌گیری شده تأثیر معناداری داشتند. تیمارهای ترکیبی آبکافت ماهی + سوپرجاذب و آمینواسید + سوپرجاذب نسبت به کاربرد مجزای آن‌ها برتری معناداری نشان دادند. بیشترین غلظت کلروفیل کل (۲/۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و کاروتنوئید (۰/۳۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در تیمار آبکافت ماهی + سوپرجاذب مشاهده شدند که نسبت به شاهد به‌ترتیب ۲۲ و ۲۴ درصد افزایش داشتند. همچنین، تیمار آبکافت ماهی + سوپرجاذب بیشترین ارتفاع بوته (۷۴ سانتی‌متر) و بیشترین تعداد برگ در بوته (۵۸) را داشت. وزن خشک کل بوته در تیمارهای آبکافت ماهی + سوپرجاذب و آمینواسید + سوپرجاذب به‌ترتیب ۲۶ و ۲۴ گرم بود که نسبت به شاهد (۲۱ گرم) افزایش معناداری داشت. بیشترین نرخ فتوسنتز در تیمار آبکافت ماهی + سوپرجاذب به میزان ۲۲/۷ میکرومول CO_2 بر مترمربع بر ثانیه اندازه‌گیری شد. بیشترین عملکرد میوه در بوته (۱۰۵ گرم) در تیمار آبکافت ماهی + سوپرجاذب بود که نسبت به شاهد ۱۷/۷ درصد افزایش داشت. بر اساس نتایج، کاربرد تلفیقی آبکافت ماهی و پلیمر سوپرجاذب به‌دلیل بهبود تغذیه گیاه و افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک، به‌عنوان راهکاری مؤثر برای افزایش کمّیت و کیفیت محصول فلفل دلمه‌ای قابل‌توصیه است.

واژه‌های کلیدی: زیست‌توده، کاروتنوئید، کلروفیل، مدیریت تلفیقی تغذیه گیاه، مقدار نسبی آب.

استناد به این مقاله: نورزاده حداد، م.، موری، س. و حسنی، ا.، (۱۴۰۵). تأثیر پلیمرهای سوپرجاذب، محصولات آبکافت پسماندهای ماهی و آمینو اسید بر کیفیت و عملکرد فلفل دلمه‌ای در یک خاک قلیایی و در شرایط گلخانه‌ای. *نشریه دانش خاک و گیاه*، ۳۶(۱)، ۱۰۵-۱۲۳.

https://doi.org/10.22034/sps.2026.71616.1036

مقدمه

فلفل دلمه‌ای شیرین (*Capsicum annuum* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات سبزی و صیفی در سطح جهانی محسوب می‌شود که به‌دلیل ارزش غذایی بالا، غلظت قابل توجه ویتامین‌ها، ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و بازارپسندی مطلوب، جایگاه ویژه‌ای در سیستم‌های تولید کشاورزی دارد. به طوری که بر اساس گزارش‌های اخیر ارزش بازار این محصول در سال ۲۰۲٤ بیش از ۷/۵ میلیارد دلار بوده است. این گیاه به‌طور گسترده در شرایط گلخانه‌ای و فضای باز کشت می‌شود، اما عملکرد و کیفیت آن به شدت تحت تأثیر شرایط خاک و مدیریت تغذیه‌ای قرار دارد. در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، تامین رطوبت کافی برای اراضی کشاورزی یکی از محدودیت‌های اصلی به شمار می‌رود (Olatunji & Afolayan, 2022; Garcia-Gomez *et al.*, 2021). خاک‌های این مناطق معمولاً دارای مقادیر بالای کربنات کلسیم، pH قلیایی تا خنثی، ماده آلی کم، ساختار ضعیف و ظرفیت نگهداری آب پایین هستند. این ویژگی‌ها موجب کاهش حلالیت و فراهمی عناصر غذایی ضروری نظیر نیتروژن، فسفر، آهن، روی و منگنز می‌شوند و در نتیجه فرایندهای فیزیولوژیکی گیاه، از جمله فتوسنتز، رشد ریشه و تقسیم سلولی را مختل می‌کنند. در چنین شرایطی، گیاهان فلفل دلمه‌ای اغلب با کاهش رشد رویشی، افت کارایی فتوسنتزی، تنش آبی و در نهایت کاهش عملکرد مواجه می‌شوند (Mengel & Kirkby, 2001; Marschner, 2012).

در سال‌های اخیر، استفاده از محرک‌های زیستی[1]رشد به‌عنوان رویکردی پایدار و سازگار با محیط‌زیست برای بهبود عملکرد گیاهان در شرایط تنش‌زا مورد توجه گسترده قرار گرفته است. محرک‌های رشد شامل طیف وسیعی از ترکیبات طبیعی مانند محصولات آبکافت پروتئین‌ها، مخلوط اسیدهای آمینه با منشا گیاهی، جلبک‌های دریایی و ترکیبات آلی زیست‌فعال هستند که بدون تأمین مستقیم عناصر غذایی، با تحریک فرایندهای متابولیکی و فیزیولوژیکی گیاه موجب بهبود رشد و تحمل تنش می‌شوند. همچنین کود آبکافت پسماند ماهی[2]به‌عنوان منبع غنی از اسیدهای آمینه آزاد، پپتیدهای زیست‌فعال و عناصر کم‌مصرف، نقش مؤثری در تحریک رشد ریشه، افزایش ساخت کلروفیل و بهبود کارایی فتوسنتزی ایفا می‌کنند (Colla *et al.*, 2015; Halpern *et al.*, 2015; Hassani *et al.*, 2018). کاربرد خارجی اسیدهای آمینه نیز می‌تواند متابولیسم نیتروژن، تنظیم اسمزی و تعادل هورمونی گیاه را بهبود بخشد و پاسخ گیاه به تنش‌های محیطی را تعدیل کند (Teixeira *et al.*, 2017). در کنار محرک‌های زیستی، پلیمرهای سوپرجاذب به‌عنوان اصلاح کننده (Shahnavaz *et al.*, 2017; Shahnavaz *et al.*, 2019) و نیز تامین کننده رطوبت خاک پتانسیل زیادی برای بهبود وضعیت آبی خاک‌های آهکی دارند. این پلیمرها قادرند چندین برابر وزن خود آب جذب کرده و آن را به‌تدریج در ناحیه ریشه آزاد کنند که این کار موجب افزایش رطوبت در دسترس، کاهش تنش آبی و بهبود جذب عناصر غذایی به‌وسیله گیاه می‌شود (Bhardwaj *et al.*, 2007).

در سال‌های اخیر پژوهش‌های متنوعی برای بررسی محرک‌های زیستی انجام شده است استفاده از این مواد در ویژگی‌های فیزیولوژیک، مورفولوژیک و عملکرد گیاهان تأثیرگذار است (Shafiei *et al.* 2025a; Shafiei *et al.* 2025b; Bayat *et al.*, 2025). این پژوهش‌ها نشان دادند که کاربرد محرک‌های زیستی مختلف در خاک‌های مختلف بسته نوع آن‌ها می‌تواند در بهبود جذب عناصر اثرات مختلفی داشته باشد (Etemadian *et al.*, 2017). در یک مطالعه پژوهشگران اثبات نمودند که کاربرد اسیدهای آمینه باعث افزایش غلظت نیتروژن کل گیاه تربچه شد. همچنین، محلول‌پاشی کود مخلوط اسیدهای آمینه با منشا گیاهی با تأثیر بر فعالیت آنزیم‌های نیترات ردوکتاز و گلوتامین سنتتاز در آسیمیلاسیون نیترات،

[1]Bio-stimulants
[2]Fish waste hydrolysates

تجمع نیترات در برگ‌های تربچه را کاهش داد ولی بر غلظت نیترات غده تأثیر معنادار نداشت (Hassani & Nourzadeh Hadad, 2017). در مطالعه‌ای دیگر نتایج نشان داد که مصرف زیاد ضایعات ماهی (۱۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار) باعث کاهش pHخاک و افزایش شوری خاک می‌شود. همچنین، مشاهده شد که کاربرد ضایعات ماهی در مقادیر کم باعث بهبود عملکرد گیاه لوبیا شده و می‌تواند به‌عنوان مکمل مناسبی برای کودهای شیمیایی مورد توجه قرار گیرد (Shahsavani *et al.*, 2017). علاوه بر این پژوهشگران اذعان داشتند که استفاده ازبرگ‌پاشی آمینو اسید در بهبود مقاومت گیاه در شرایط تنش کم‌آبی به نحو موثری تأثیرگذار بوده است (Khalesi *et al.*, 2023). همچنین در پژوهش‌های مختلف نیز استفاده از پلیمرهای سوپرجاذب به عنوان راهی قطعی در بهبود شرایط فیزیکی خاک و تامین رطوبت مورد نیاز گیاه معرفی شده است (Nourzadeh *et al.*, 2017; Zare Abyaneh *et al.*, 2019; Nourzadeh Hadad *et al.*, 2026).

علی‌رغم پژوهش‌های فراوان در زمینه تاثیر محرک‌های رشد بر عملکرد گیاهان، به نظر می‌رسد بررسی تاثیر کاربرد هم‌زمان این محرک‌ها چندان مورد مطالعه قرار نگرفته است. همچنین کاربرد این محرک‌های رشد با برخی اصلاح‌کننده‌های خاک مانند پلیمرهای جاذب آب نیز اندک می‌باشد. با توجه به اینکه تامین رطوبت و بهبود جذب عناصر غذایی خاک نقش مهمی در بهبود کیفیت محصول تولیدی دارند، هدف اصلی این تحقیق بررسی تأثیر استفاده همزمان از پلیمر سوپرجاذب، آبکافت ماهی و آمینو اسید در بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیک، مورفولوژیک و عملکرد گیاه فلفل دلمه در شرایط گلخانه بوده است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه زنجان با متوسط دمای حداق ۱۷/۵ درجه سلسیوس و حداکثر دمای ۳٤/۳ درجه سلسیوس، رطوبت ۲٤ تا ۳۳ درصد و شدت نور تقریبی ۱۰۰۰۰ لوکس در سطح گیاه اجرا شد. این آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار انجام شد. تیمارهای این تحقیق شامل شاهد (T_1)، کود آبکافت ضایعات ماهی(T_2)، مخلوط آمینو اسید با منشا گیاهی (T_3)، اعمال هم‌زمان سوپرجاذب آکوازورب و آبکافت ماهی (T_4)، اعمال همزمان آمینواسید و سوپرجاذب (T_5) با غلظت ۱ میلی‌گرم بر لیتر بودند. آبکافت ماهی (جدول ۲) و مخلوط آمینو اسید با منشا گیاهی استفاده شده در این تحقیق به‌ترتیب از شرکت‌های اکوادریپ اوشن (سخات شرکت داتیس ایران) و ایزابیون (ساخت شرکت سینجنتا سوییس) تهیه شد. ایزابیون متشکل از ٦۲ درصد آمینواسید کل بود که ۱۲ درصد آن امینواسید آزاد و ۱۲ درصد نیز نیتروژن می‌باشد. همچنین، پلیمرهای سوپرجاذب مورد استفاده در این تحقیق تحت برند آکوازورب[1] و با دانه بندی ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفتند. خاک مورد استفاده از مزرعه تحقیقاتی دانشگاه زنجان تهیه شد. ویژگی‌های خاک مورد استفاده به روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد (Sparks *et al.*, 2020) و نتایج آن در جدول ۱ نشان داده شد.

[1] Aquasorb

جدول ۱- ویژگی‌های خاک مورد استفاده در این پژوهش

ویژگی	هدایت الکتریکی (dS/m)	pH	بافت	مواد آلی (٪)	آهک یا کلسیم کربنات معادل (٪)	نیتروژن کل (٪)
روش	عصاره گل اشباع	گل اشباع	هیدرومتری	تیتراسیون	تیتراسیون	کجلدال
مقدار	۰/۹۷	۷/۷۹	Sandy loam	۰/۷	۱۴/۷	۰/۰۴

ادامه جدول ۱-

عنصر قابل‌جذب	فسفر	پتاسیم	آهن	روی	منگنز	مس
واحد	(mg/kg)					
روش عصاره‌گیری	اولسن	آمونیوم استات	DTPA	DTPA	DTPA	DTPA
مقدار	۱۱	۱۵۱	۶/۸	۰/۹۳	۵/۲	۰/۶۳

گلدان‌های مورد استفاده در این پژوهش از نوع پلاستیکی و قطر دهانه و ارتفاه آن‌ها به ترتیب ۱۶ و ۲۰ سانتیمتر بود. حجم تقریبی داخل گلدانها نیز ٤ لیتر بود. برای آبیاری دقیق، ابتدا گلدانها وزن و سپس آبیاری شدند، پس از خروج آب ثقلی گلدانها دوباره وزن شدند و اختلاف وزن بین آن‌ها نشانگر ظرفیت مزرعه‌ای بود. سوپرجاذب مورد نیاز هر تیمار هنگام پر کردن گلدانها به خاک اضافه شد و به خوبی با خاک گلدان مخلوط شد. کود ماهی همراه با آب آبیاری و به مقدار شش میلی‌لیتر در هر گلدان در سه مرحله پنج برگی، قبل از گلدهی و درشت شدن میوه‌ها و هر مرحله دو میلی‌لیتر در هر گلدان مورد استفاده قرار گرفت. مخلوط آمینواسید در دو مرحله قبل از گلدهی و هنگام درشت شدن میوه به غلظت ۳ گرم در لیتر روی بوته‌ها محلول‌پاشی شد. در جدول ۲، محصولات آبکافت پسماند ماهی ارائه شده است.

جدول ۲- محصولات آبکافت پسماند ماهی

ویژگی	نیتروژن کل (٪)	فسفر کل (٪)	پتاسیم کل (٪)	مواد آلی (٪)	امینواسید آزاد کل (٪)	کلسیم کل (٪)
مقدار	۸/۱	۳/۵	۶/۶	۲۳	۱۲	۱

پس از گذشت ۹۲ روز از کاشت، عملیات برداشت و بررسی صفات انجام شد. در پایان دوره، پارامترهای رشدی و مورفولوژیکی گیاه شامل کلروفیل a، b، کل، کاروتنوئید، فتوسنتز، میزان غلظت آب، وزن تر و خشک ساقه و ریشه گیاه، ارتفاع گیاه، تعداد و سطح برگ و وزن گیاه اندازه‌گیری شد.

ارتفاع گیاه، تعداد و سطح برگ و وزن گیاه با استفاده از کولیس دیجیتال، ترازو و خط‌کش اندازه‌گیری شد. برای اندازه گیری فتوسنتز از دستگاه فتوسنتز و PAR متر تس مدل 1339P استفاده شد.

برای اندازه‌گیری میزان کلروفیل و کاروتنوئید از روش استون استفاده شد (Arnon, 1949). قرائت میزان جذب محلول شناور در طول موج‌های ٦٤٥ و ٦٦٣ نانومتر برای کلروفیل و در طول موج‌های ٤٨٠ و ٥١٠ نانومتر برای کارتنوئید توسط دستگاه اسپکتروفتومتر انجام شد. در نهایت جهت گزارش غلظت آن‌ها بر حسب میکروگرم بر گرم از روابط زیر استفاده شد:

$$\text{Chlorophyll a} = (12.7 \times A663 - 2.69 \times A645) \times (V/W) \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\text{Chlorophyll b} = (22.9 \times A645 - 4.68 \times A663) \times (V/W) \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$Carotenoids = (7.6 \times A480 - 1.49 \times A510) \times (V/W)$$ رابطه (۳)

در این معادلات A645 و A663 به‌ترتیب مقدار جذب در طول موج‌های ٦٤٥ و ٦٦٣ نانومتر، A480 و A510 به‌ترتیب مقدار جذب در طول موج‌های ٤٨٠ و ٥١٠ نانومتر، V حجم نهایی نمونه به میلی‌لیتر و W وزن تر برگ به گرم است.

برای سنجش وزن تر و خشک نمونه‌ها، با آب مقطر شسته و پس از خشک شدن بخش هوایی از بخش ریشه جدا شده و وزن تر هر قسمت با ترازوی با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. پس از انجام این کار نمونه‌ها در داخل پتری دیش قرار داده شدند و به داخل آون منتقل و در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۲ روز خشک شدند، سپس وزن خشک آن‌ها با توزین مشخص شد.

برای تعیین مقدار نسبی آب برگ[1](RWC)، ابتدا یک گرم از نمونه برگ‌های تازه[2](FW) توزین گردید. سپس بافت گیاهی را به قطعات کوچک یک سانتی‌متری تقسیم کرده و به مدت ٢٤ ساعت درون پتری دیش حاوی آب مقطر غوطه ور کرده و بعد آب روی نمونه‌ها به آرامی خشک و دوباره وزن کرده و وزن اشباع برگ‌ها (TW) اندازه‌گیری شد. پس از آن دوباره نمونه‌های گیاهی را داخل پتری دیش منتقل و به مدت ٢٤ ساعت درون آون با دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار داده و سپس با وزن کردن نمونه‌ها، وزن خشک گیاه (DW) تعیین شد. در نهایت مقدار نسبی آب بافت گیاهی با استفاده از رابطه ۳-۱ محاسبه گردید (Weatherley, 1950).

$$RWC\ (\%) = (FW - DW) / (TW - DW) \times 100$$ رابطه (٤)

برای تجزیه و تحلیل داده‌های اندازه‌گیری شده با سه تکرار، از نرم افزار SPSS (ver. 19) استفاده شد. همچنین مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال یک درصد انجام شد.

نتایج و بحث

در جدول‌های ۳ و ٤، تجزیه واریانس داده‌ها (جدول‌های میانگین مربعات) تأثیر بسیار معنادار تیمارهای آزمایشی را بر تمامی صفات مورد مطالعه شامل ارتفاع بوته (PH)، تعداد برگ (LN)، سطح برگ (LA)، وزن خشک ساقه (SDW)، وزن خشک ریشه (RDW)، وزن خشک کل (TDW)، تعداد میوه (FN)، وزن تر میوه (FFW)، وزن خشک میوه (FDW)، کلروفیلa، کلروفیلb ، کلروفیل کل (Chlt)، کاروتنوئید (Cart)، نرخ فتوسنتز (Photo rate) و مقدار نسبی آب (RWC) در سطح احتمال یک درصد نشان داد. بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن، تیمار ترکیبی T_4 (آبکافت ماهی همراه با سوپرجاذب) در اکثر صفات از جمله ارتفاع بوته (۷۳/۵۹ سانتی‌متر)، کلروفیل کل (۲/۱۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر)، نرخ فتوسنتز) ۲۲/۷٤ میکرومول CO_2 بر مترمربع بر ثانیه (و وزن تر میوه (۱۰٤/۷۵ گرم) بیشترین مقدار را به خود اختصاص داد که با تیمارهای T_5 (آمینواسید + سوپرجاذب)، T_2 (آبکافت ماهی) و T_3 (آمینواسید) تفاوت معنادار داشت. کمترین مقادیر تمامی صفات نیز در تیمار شاهد (T_1) مشاهده شد که برتری تیمارهای حاوی محرک‌های زیستی و پلیمر سوپرجاذب را نسبت به شرایط بدون کاربرد تأیید می‌کند.

[1]Relative water content
[2]Fresh weight

جدول ۳- تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای مختلف تغذیه‌ای بر صفات مورفولوژیک و عملکردی گیاه فلفل دلمه‌ای.

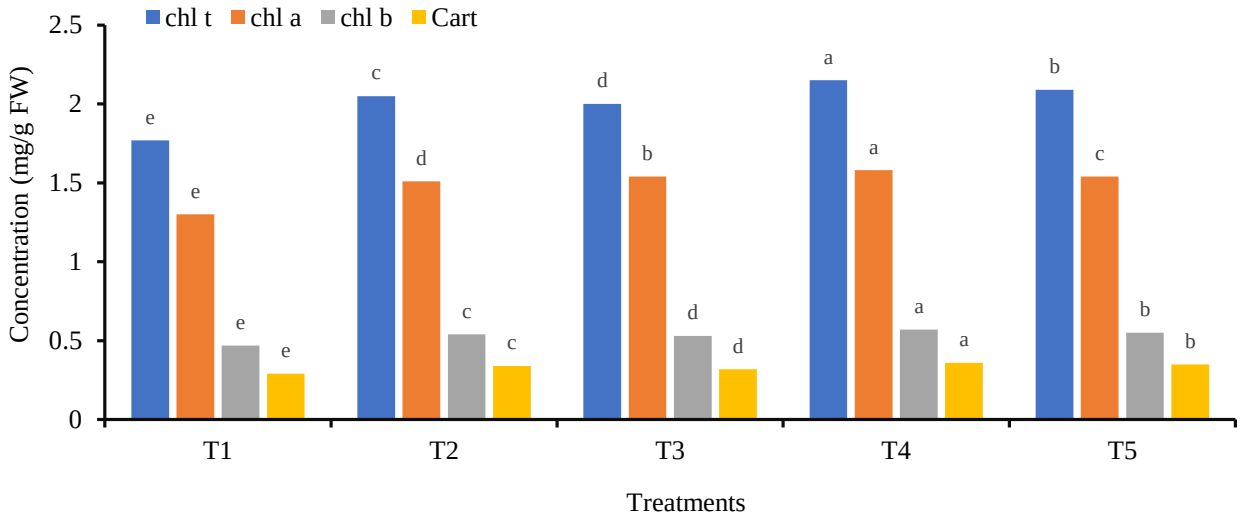
S.O.V	df	PH	LN	LA	SDW	RDW	TDW	FN	FFW	FDW
Rep	2	331.76	52.35	8131.5	1.29	1.58	5.69	2.10	88.99	1.24
Treatments	4	47.81**	38.49**	7078.0**	4.02**	1.51**	10.45**	7.09**	101.07**	1.02**
Error	8	0.22	0.047	8.70	0.002	0.002	0.007	0.005	0.062	0.0008
CV (%)		0.662	0.401	0.443	0.286	0.436	0.343	4.6	2.53	2.98

جدول ۴- تجزیه واریانس صفات فیزیولوژیک (رنگدانه‌های فتوسنتزی، نرخ فتوسنتز و مقدار نسبی آب) گیاه فلفل.

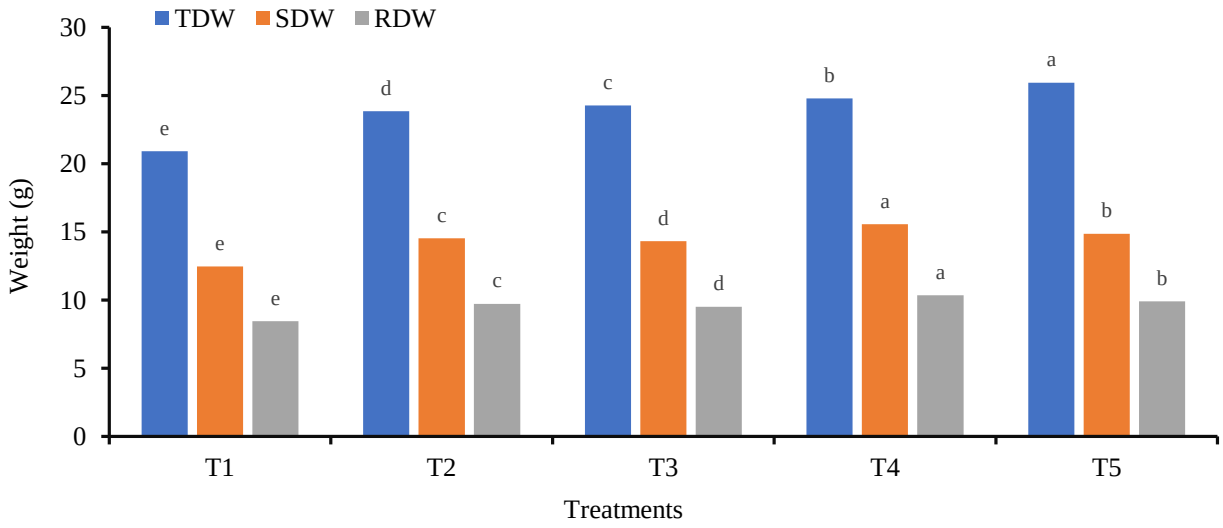
S.O.V	df	Chla	Chlb	Chlt	Cart	Photo rate	RWC
Rep	2	0.015	0.003	0.030	0.001	14.74	84.99
Trt	4	0.035**	0.003**	0.062**	0.002**	4.37**	35.30**
Error	8	0..00002	0.000002	0.00003	0.00001	0.009	0.027
CV (%)	-	0.265	0.300	0.275	0.377	0.449	0.188

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد محرک‌های زیستی و پلیمر سوپرجاذب تأثیر معناداری بر شاخص‌های مورفولوژیک، فیزیولوژیکی و عملکردی فلفل دلمه‌ای کشت‌شده داشت. به‌طور کلی، تیمارهای ترکیبی (آبکافت ماهی یا آمینواسید همراه با پلیمر سوپرجاذب) در اغلب صفات اندازه‌گیری‌شده برتری قابل توجهی نسبت به کابرد تیمارهای به تنهایی و شاهد نشان دادند. غلظت رنگدانه‌های فتوسنتزی به‌طور معناداری تحت تأثیر تیمارها قرار گرفت. همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، غلظت کلروفیلa ، کلروفیل b و کلروفیل کل در تمام تیمارها نسبت به شاهد افزایش یافت و بیشترین مقادیر مربوط به تیمارهای ترکیبی (T4 و T5) بود. بیشترین مقدار اندازه‌گیری شده کلروفیل کل، ۲/۱۵ بود که مربوط به تیمار T4 بود. با توجه به اینکه غلظت کلروفیل کل در تیمار شاهد (T1) ۱/۷۷ اندازه‌گیری شد، می‌توان نتیجه گرفت که با اعمال همزمان آآبکافت ماهی و پلیمر سوپرجاذب غلظت کلروفیل کل تا ۲۱/۵ درصد افزایش یافته است. افزایش غلظت کلروفیل نشان‌دهنده بهبود وضعیت تغذیه نیتروژنی و تحریک بیوسنتز رنگدانه‌های فتوسنتزی است که نقش کلیدی در افزایش کارایی فتوسنتز دارد. مطالعات پیشین نیز گزارش کرده‌اند که آبکافت پروتئینی و اسیدهای آمینه از طریق تأمین پیش‌سازهای متابولیکی و فعال‌سازی مسیرهای آنزیمی، سنتز کلروفیل را افزایش می‌دهند (Ertani *et al.*, 2009; Colla *et al.*, 2014). همچنین، میزان کاروتنوئید در تیمار T4 که آبکافت ماهی و پلیمر سوپرجاذب به صورت همزمان مورد استفاده قرار گرفتند، با ۰/۳٦ بیشتر از سایر تیمارها بود.

نتایج نشان داد که افزایش غلظت رنگدانه‌ها با افزایش معنادار زیست‌توده همراه بوده است، به نحوی که وزن خشک کل، وزن خشک اندام هوایی و وزن خشک ریشه در تیمارهای ترکیبی به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. در این مورد نیز وزن خشک کل گیاه در تیمار T5 با ۲۵/۹۳ گرم بیشترین میزان اندازه‌گیری شد و بر این اساس میزان افزایش وزن خشک کل گیاه در اثر اعمال همزمان آمینواسید و پلیمر سوپرجاذب ۲٤ درصد نسبت به تیمار شاهد (با وزن ۲۰/۹۲گرم) افزایش یافته است (شکل ۲).

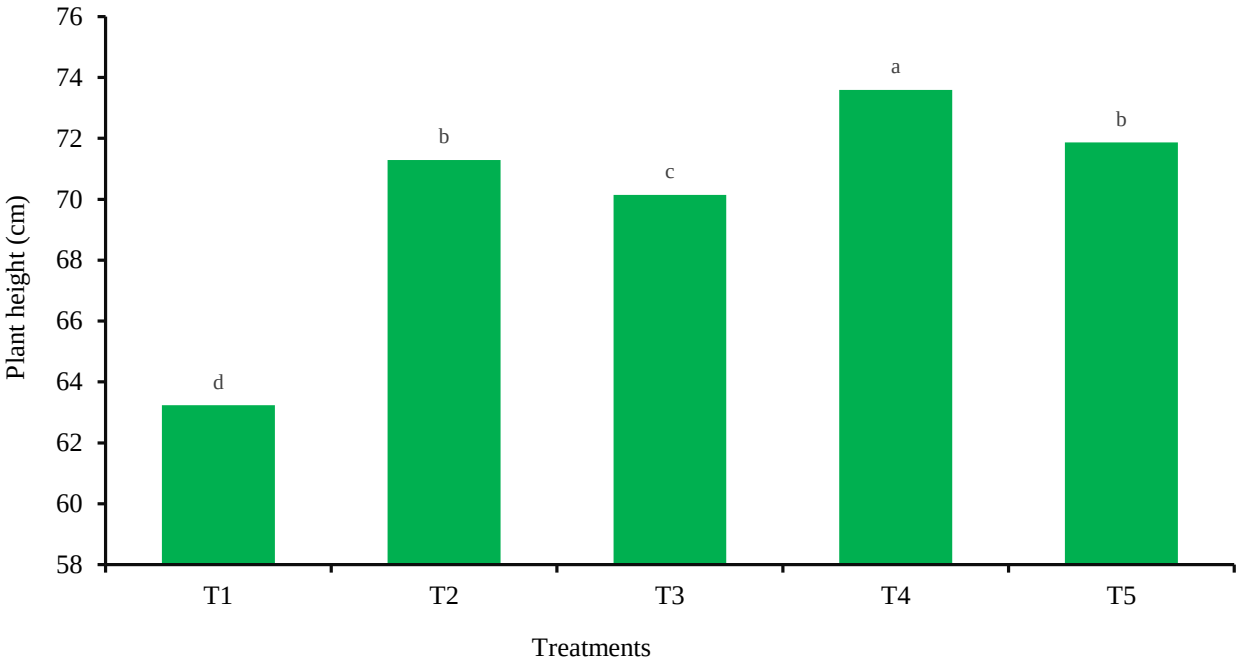


شکل ۱- تأثیر تیمارهای مختلف بر غلظت کاروتنوئید (Cart)، کلروفیل a (chl a)، کلروفیل b (chl b) و کلروفیل کل (chl t) برگ‌های فلفل دلمه‌ای.



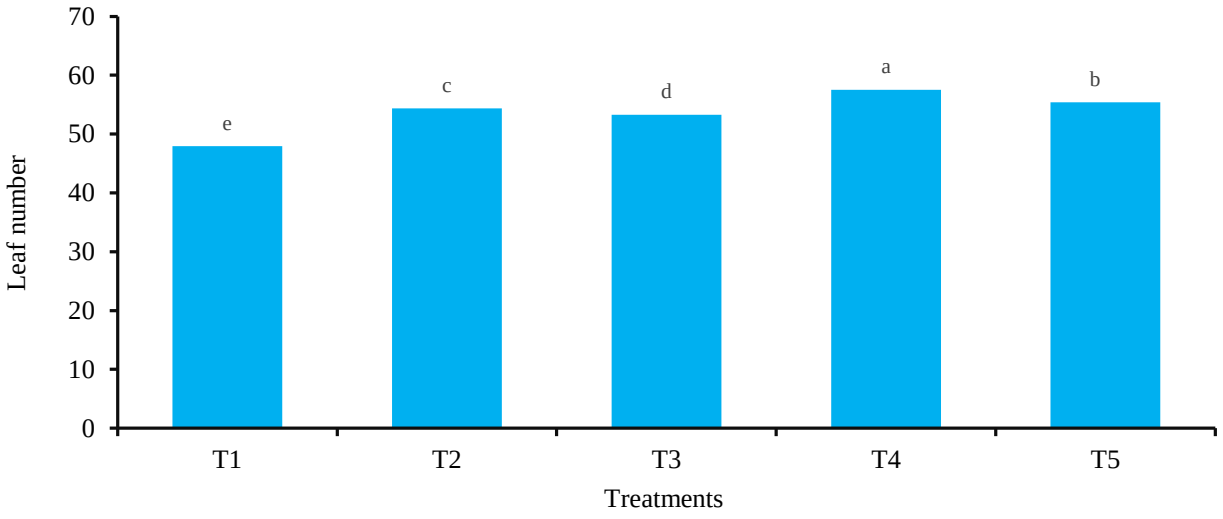
شکل ۲- تأثیر تیمارهای مختلف بر وزن خشک کل (TDW)، وزن خشک ساقه (SDW) و وزن خشک ریشه (RDW).

ارتفاع گیاه نیز به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم رشد رویشی، به‌طور معناداری تحت تأثیر تیمارها قرار گرفت (شکل ۳). بر اساس نتایج اندازه‌گیری شده تیمار T_4 با داشتن ارتفاع گیاه ۷۳/٦ سانتی‌متر بیشترین افزایش ارتفاع گیاه را نسبت به تیمار شاهد (با ارتفاع ٦۳/۲٤) داشته است. این افزایش رشد عمودی می‌تواند ناشی از تحریک تقسیم و طویل شدن سلولی باشد که به فعالیت شبه‌هورمونی پپتیدهای موجود در آبکافتات‌های پروتئینی نسبت داده شده است (Rouphael *et al.*, 2017). رشد بیشتر گیاه در حضور پلیمرهای سوپرحاذب احتمالاً به‌دلیل تامین بهتر رطوبت خاک و کاهش نوسانات آبی در ناحیه ریشه بوده است که این امر جذب عناصر غذایی را در خاک‌ها تسهیل می‌کند (Nourzadeh Hadad *et al.*, 2026). این موضوع را می‌توان در شکل ۳ و از مقایسه تیمارهای T2 و T4 دریافت. تفاوت این دو تیمار صرفا در حضور و عدم حضور پلیمرهای سوپرجاذب در کنار آبکافت ماهی بوده است.

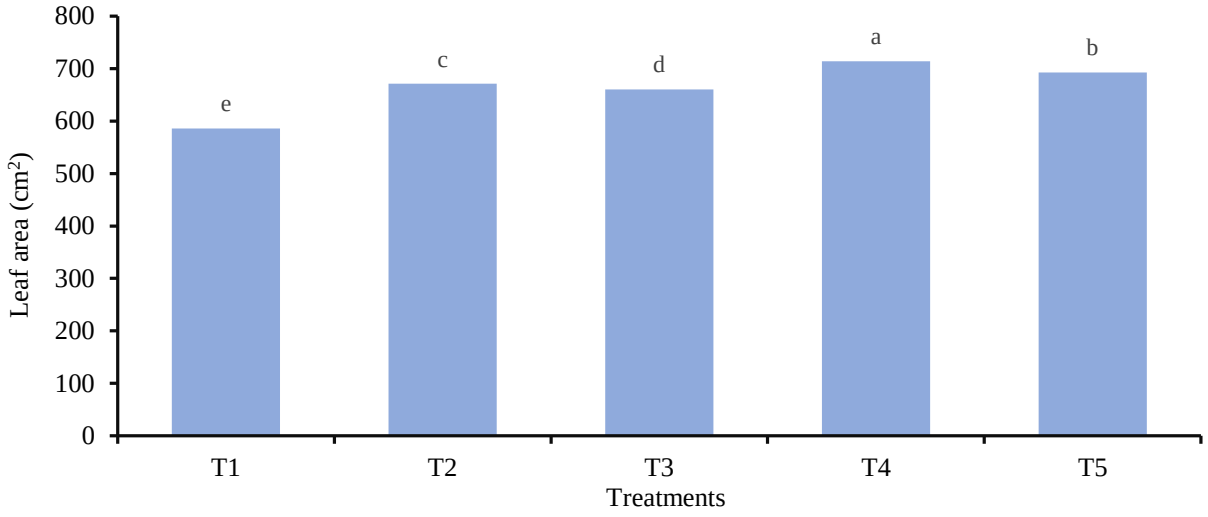


شکل ۳- اثر تیمارهای مختلف بر ارتفاع گیاه فلفل.

همانطور که در شکل‌های ٤ و ٥ مشخص است تعداد و سطح برگ در تیمارهای T_4 و T_5 بیشتر از سایر تیمارها بوده است ولی تیمار T_4 با داشتن ٥٧/٥ برگ و سطح برگ ٧١٣/٥ سانتی‌متر مربع بیشترین این مقادیر را در بین تمامی تیمارها داشته است. بر همین اساس تعداد و سطح برگ با اعمال آبکافت ماهی و پلیمر سوپرجاذب نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب ۲۰ و۲۲ درصد افزایش پیدا کرده است. توسعه سطح برگ نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش جذب نور و ظرفیت فتوسنتزی گیاه دارد. افزایش تعداد برگ در تیمارهای ترکیبی نشان‌دهنده بهبود تعادل مبدا–مخزن و شرایط مطلوب رشد رویشی است که در نهایت به افزایش تولید ماده خشک منجر می‌شود. نتایج مشابهی در فلفل و سایر گیاهان سبزی پس از کاربرد محرک‌های زیستی گزارش شده است (Parađiković *et al.*, 2019) .

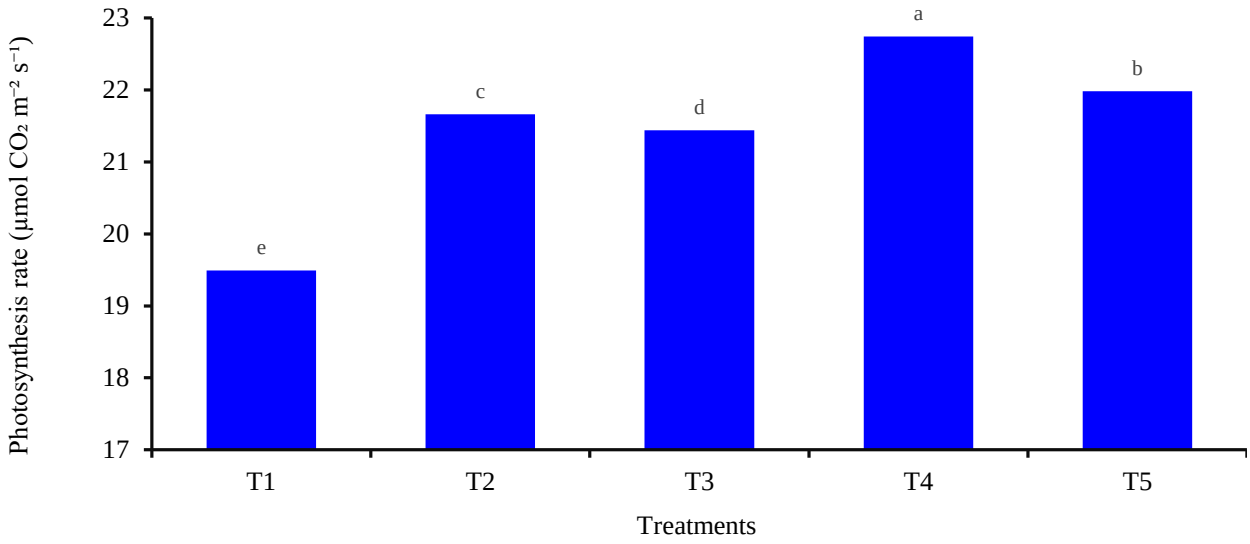


شکل ۴- تأثیر تیمارهای مختلف بر تعداد برگ.

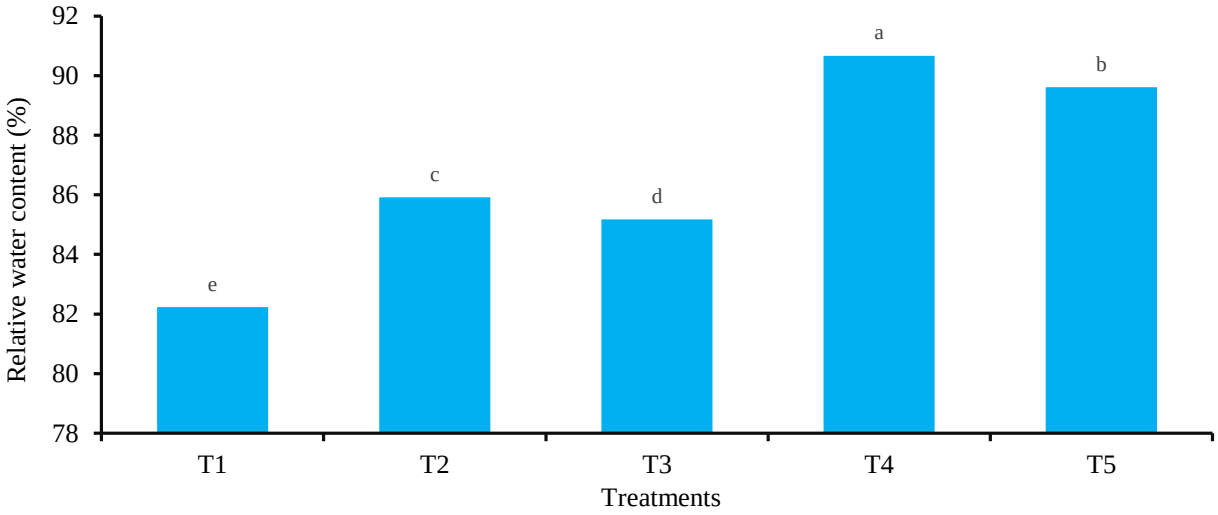


شکل ۵- تأثیر تیمارهای مختلف بر سطح برگ.

اندازه‌گیری میزان فتوسنتز و مقدار نسبی آب گیاه (شکل‌های ٦ و ٧) نشان داد که تیمار T4 بیشترین افزایش این مقادیر را نسبت به نمونه شاهد داشته است. میزان فتوسنتز و مقدار نسبی آب در این تیمار به‌ترتیب ٢٢/٧٤ میکرومول CO_2بر مترمربع بر ثانیه و ٩٠/٦٦ درصد بوده است که مبین افزایش ١٦/٦ و ١٠/٢ درصدی این ویژگی‌ها نسبت به تیمار T1 می‌باشد. از سویی دیگر اعمال هر کدام از تیمارها سبب افزایش میزان فتوسنتز و مقدار نسبی آب نسبت به تیمار شاهد شده است. افزایش مقدار نسبی آب در تیمارهای حاوی پلیمرهای سوپرجاذب نشان‌دهنده توانایی این پلیمرها در حفظ آب خاک و تأمین پایدار رطوبت برای گیاه است. وضعیت آبی بهتر گیاه موجب حفظ بازبودن روزنه‌ها، افزایش تبادل گازی و در نتیجه افزایش نرخ فتوسنتز شده است. این یافته‌ها با نتایج مطالعات پیشین در مورد نقش پلیمرهای سوپرجاذب در بهبود روابط آبی در گیاه مطابقت (Bhardwaj *et al.*, 2007).

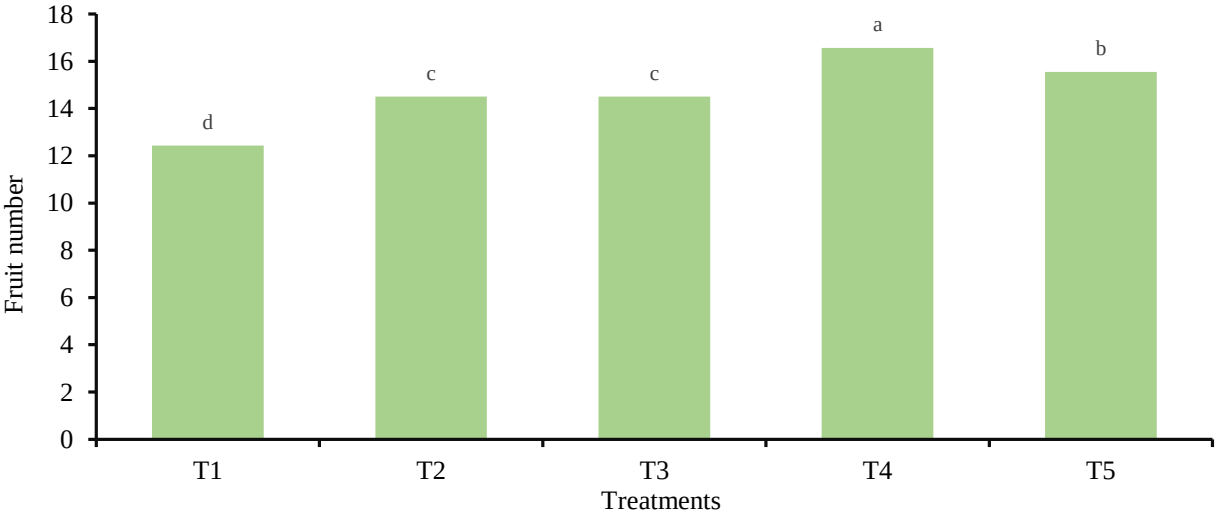


شکل ۶- تأثیر تیمارهای مختلف در آزمایش بر نرخ فتوسنتز.

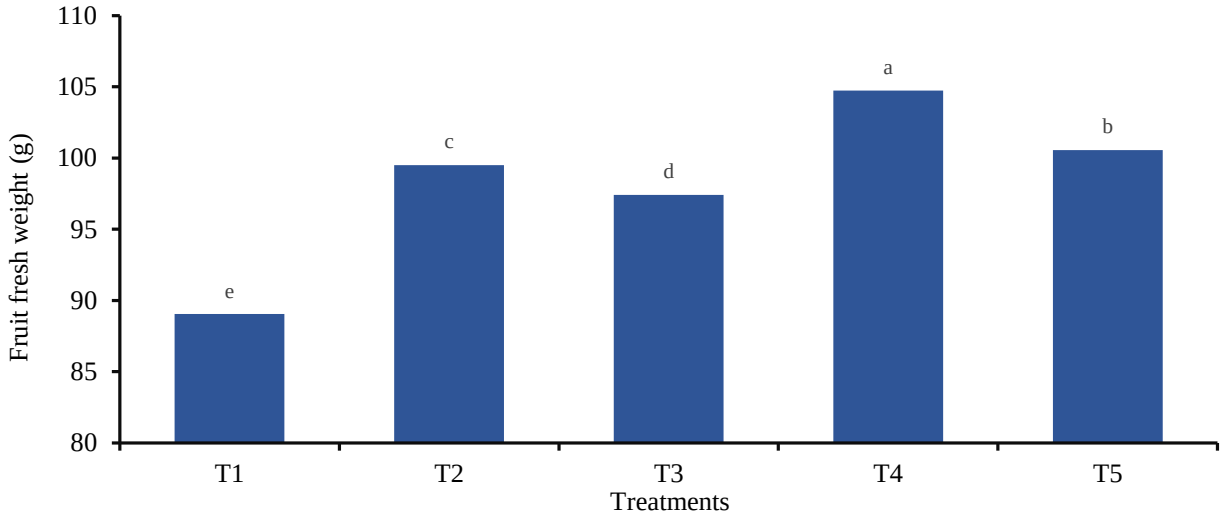


شکل ۷- تأثیر تیمارهای مختلف بر مقدار نسبی آب برگ.

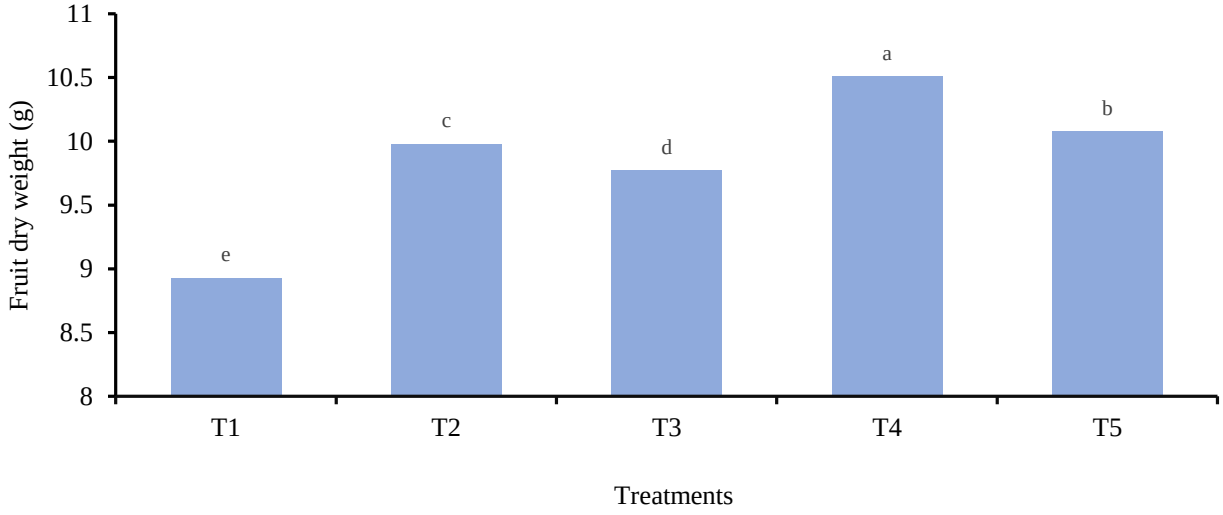
شکل‌های ۸ تا ۱۰ تأثیر اعمال تیمارهای مختلف بر افزایش تعداد، وزن تر و خشک میوه را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با اعمال هر کدام از تیمارهای مورد استفاده در این تحقیق عملکرد محصول تولیدی از نظر کمی و کیفی افزایش پیدا کرده است ولی بیشترین افزایش عملکرد در تیمار T4 مشاهده شد. به نحوی که تعداد، وزن تر و خشک گیاه به‌ترتیب ۱۶/۵۷، ۱۰۴/۷۵ و ۱۰/۵۱ اندازه‌گیری شده که نشان دهنده افزایش این مقادیر نسبه به تیمار شاهد به میزان ۳۳، ۱۷/۷ و ۱۸ درصد است. همچنین تیمار T5 رتبه دوم را در بهبود عملکرد محصول تولیدی داشته است به نحوی که تعداد، وزن تر و خشک گیاه به‌ترتیب ۱۵/۵۵، ۱۰۰/۵۶ و ۱۰/۸ در آن اندازه‌گیری شد. افزایش تعداد میوه نشان‌دهنده بهبود فرایند گل‌دهی و تشکیل میوه است، در حالی که افزایش وزن میوه بیانگر افزایش انتقال و تخصیص محصولات فتوسنتز به اندام‌های زایشی است. این امر احتمالاً نتیجه ترکیب اثرات مثبت محرک‌های زیستی بر فتوسنتز و اثر پلیمرهای سوپرجاذب بر وضعیت آبی گیاه بوده است.



شکل ۸- تأثیر تیمارهای مختلف بر تعداد میوه.



شکل ۹- تأثیر تیمارهای مختلف بر وزن تر میوه.



شکل ۱۰- تأثیر تیمارهای مختلف بر وزن خشک میوه.

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد همزمان آبکافت ماهی و پلیمر سوپرجاذب (تیمار T4) باعث افزایش ۲۱/۵ درصدی کلروفیل کل نسبت به تیمار شاهد شد. این افزایش غلظت رنگدانه‌های فتوسنتزی نشان‌دهنده بهبود وضعیت تغذیه نیتروژنی و تحریک بیوسنتز کلروفیل است که نقش کلیدی در افزایش کارایی فتوسنتز دارد. این یافته با نتایج بر محققان همسو است، جایی که Bhuimbar و Dandge (۲۰۲۳) گزارش کردند که استفاده از هیدرولیزات ضایعات ماهی تولید شده توسط باسیلوس، غلظت کلروفیل را در گیاه فلفل (Capsicum annum) به طور معناداری افزایش داد. همچنین نشان داده شده است که آبکافتهای پروتئین مشتق از ماهی در تیمار FT6 (شامل هیدرولیزات ماهی به عنوان منبع نیتروژن) باعث افزایش وزن خشک برگ و زیست‌توده کل گیاه گوجه‌فرنگی گیلاسی شد (García-Santiago *et al.*, 2021). هیدرولیزات پروتئین ماهی سرشار از اسیدهای آمینه آزاد و پپتیدهای کم‌وزن مولکولی است که مستقیماً متابولیسم گیاه را تحریک می‌کنند (Domínguez *et al.*, 2024). علاوه بر این، نشان داده شده است که محرک‌های زیستی بر پایه آمینواسید مانند کادوستیم توانستند کلروفیل a را در شرایط تنش شوری تا ٤١ درصد افزایش دهند (Seyedi *et al.*, 2024). پیش از این

نیز گزارش شده بود که آبکافت‌های پروتئینی از طریق تأمین پیش‌سازهای متابولیکی و فعال‌سازی مسیرهای آنزیمی، سنتز کلروفیل را افزایش می‌دهند (Colla *et al.*, et al).

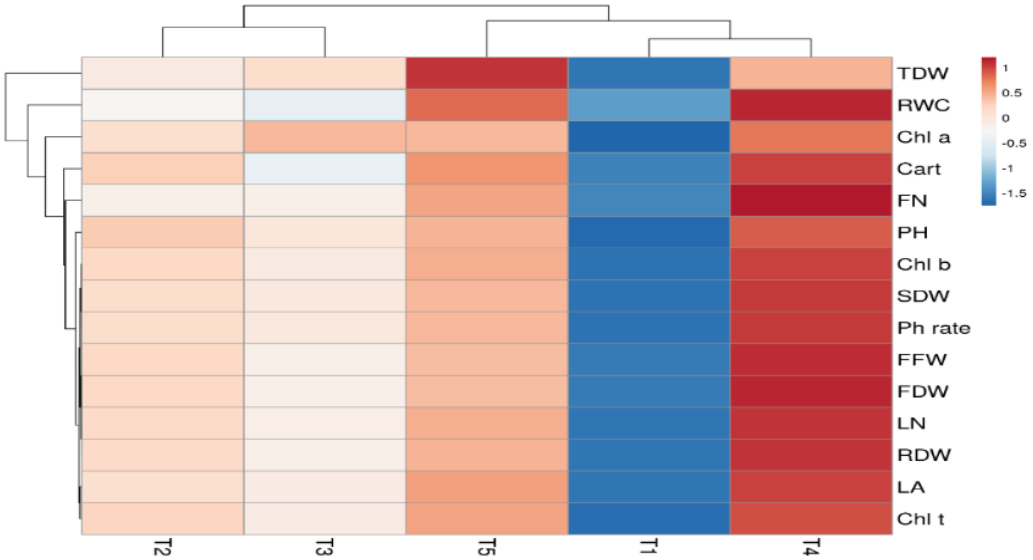
در این پژوهش ، تیمار ترکیبی آبکافت ماهی و سوپرجاذب (T4) باعث افزایش ۲۰ درصدی تعداد برگ و ۲۲ درصدی سطح برگ نسبت به شاهد شد. همچنین وزن خشک کل گیاه در تیمار T5 (آمینواسید + سوپرجاذب) با ۲۵/۹۳ گرم، افزایش ۲٤ درصدی نسبت به شاهد نشان داد. این نتایج با یافته‌های برخی محققان مطابقت دارد، جایی که Zare Abyaneh *et al.* (۲۰۱۹) گزارش کردند که استفاده از سوپرجاذب آکوازورب به میزان ۵ گرم بر کیلوگرم خاک باعث افزایش معنادار وزن تر و خشک اندام هوایی و وزن میوه فلفل دلمه‌ای شد. منز و همکاران نیز نشان دادند که کاربرد هیدروژل در ترکیب با آبیاری کامل (۱۲۵٪ ETc) بیشترین عملکرد را با ۱۱۹,۵ مگاگرم در هکتار به همراه داشت (Menezes *et al.*, 2022). تأکید شده است که هیدرولیزات پروتئینی با منشأ گیاهی نسبت به نوع حیوانی برتری دارند، اما هر دو دسته توانایی تحریک رشد رویشی و افزایش زیست‌توده را دارند (Thuynsma, Agri Technovation). همچنین نشان داده شده است که هیدرولیزات ماهی در بلوبری پا کوتاه به اندازه کود معدنی ۵-۱۰-۵ در افزایش غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم برگ مؤثر بوده و عملکرد را افزایش داده است (Smagula & Dunham, 1995). Halpern *et al.* (۲۰۱۵) نیز بیان کردند که محرک‌های زیستی با تحریک رشد ریشه و افزایش جذب عناصر غذایی، به طور غیرمستقیم سبب افزایش زیست‌توده گیاهی می‌شوند.

بر مبنای نتایج این پژوهش میزان فتوسنتز در تیمار T4 به ۲۲/۷٤ میکرومول CO_2 بر مترمربع بر ثانیه رسید که نسبت به شاهد ۱٦/٦ درصد افزایش داشت. همچنین مقدار نسبی آب گیاه (RWC) در این تیمار با ۹۰/٦٦ درصد، افزایش ۱۰/۲ درصدی نشان داد. این یافته‌ها با نتایجی که توسط Stutte (۱۹۹۰) ارائه شده، همخوانی دارد؛ وی نشان داد که تنش‌های محیطی به طور مستقیم بر فتوسنتز گیاهان تأثیر می‌گذارند و تکنیک‌های ویدئوگرافی می‌توانند این تنش‌ها را به صورت غیرمخرب شناسایی کنند. سیدی نیز کاهش RWC را تحت تنش شوری گزارش کرد و نشان داد که کاربرد آمینواسیدها می‌تواند غلظت نسبی آب برگ را به طور معناداری افزایش دهد (Seyedi *et al.*, 2024). دمینگوز توضیح می‌دهد که اسیدهای آمینه موجود در هیدرولیزات ماهی، به ویژه گلوتامیک اسید و پرولین، نقش مهمی در تنظیم اسمزی و حفظ یکپارچگی غشاها در شرایط تنش دارند (Domínguez *et al.*, 2024). همچنین گزارش شده است که هیدرولیزات ماهی با افزایش غلظت فنولیک و فلاونوئیدی، باعث بهبود تحمل گیاه به تنش‌های محیطی می‌شود (Bhuimbar & Dandge, 2023). Ertani *et al.* (۲۰۰۹) نیز پیش از این اثبات کرده بودند که آبکافت‌های پروتئینی با فعال‌سازی مسیرهای آنزیمی مرتبط با نیتروژن، کارایی فتوسنتزی را بهبود می‌بخشند.

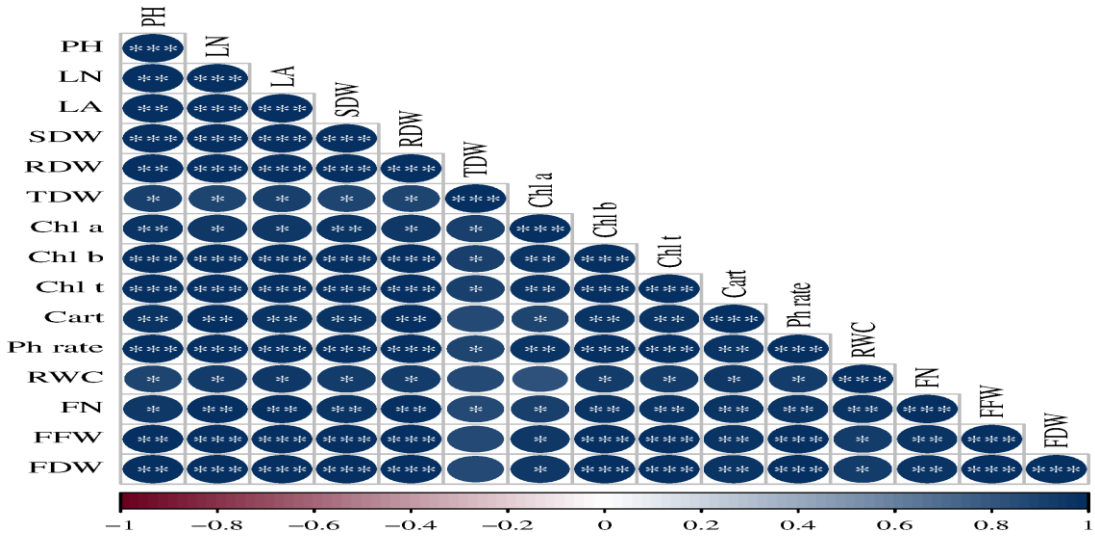
از نظر عملکرد میوه، این پژوهش نشان داد که تیمار T4 با ۱٦/۵۷ عدد میوه در بوته، ۱۰٤/۷۵ گرم وزن تر میوه و ۱۰/۵۱ گرم وزن خشک میوه، به ترتیب افزایش ۳۳، ۱۷/۷ و ۱۸ درصدی نسبت به شاهد داشت. نتایج مشابهی گزارش شده است، جایی که هیدرولیزات ماهی در سیستم آبیاری غرقابی (drenching) باعث افزایش ۲۱ درصدی تعداد میوه و ٤ درصدی عملکرد کل نسبت به کود شیمیایی معمولی شد (García-Santiago *et al.*, 2021). همچنین نشان داده شده است که بیشترین عملکرد میوه (۹۱٦,٦۵ گرم در بوته) در تیمار ترکیبی A2W3 (۵ گرم سوپرجاذب + ۱۰۰٪ نیاز آبی) به دست آمد (Zare Abyaneh *et al.*, 2019). منز نیز اثبات کرد که هیدروژل می‌تواند اثرات منفی کم آبیاری را جبران کند و در تیمار ۵۰٪ ETc همراه با هیدروژل، عملکرد قابل قبولی حاصل شد (Menezes *et al.*, 2022). با استناد به برخی مطالعات متعدد، تأکید شده است که هیدرولیزات احشای ماهی سرشار از اسیدهای آمینه آزاد (تا ۵۰ درصد ماده خشک) هستند که

به عنوان محرک‌های زیستی مؤثر، کیفیت و عملکرد محصولات زراعی را افزایش می‌دهند (Domínguez *et al.*, 2024). Rouphael *et al.* (۲۰۱۷) نیز گزارش کردند که پپتیدهای زیست‌فعال موجود در آبکافت‌های پروتئینی دارای فعالیت شبه‌هورمونی هستند که تقسیم و طویل شدن سلولی را در اندام‌های زایشی تحریک می‌کند. در مجموع، نتایج این پژوهش و مطالعات مروری نشان می‌دهد که کاربرد همزمان محرک‌های زیستی و پلیمرهای سوپرجاذب می‌تواند راهبردی مؤثر برای بهبود عملکرد و کارآیی مصرف آب در کشت فلفل دلمه‌ای در شرایط گلخانه باشد.

شکل ۱۱ نقشه حرارتی و شکل ۱۲ ماتریس همبستگی صفات اندازه‌گیری شده در این پژوهش را نشان می‌دهند. این شکل‌ها در واقع الگوهای کلی پاسخ گیاه به تیمارهای اعمال شده را نشان می‌دهند. این نتایج تصویر جامعی از برتری تیمارهای ترکیبی (T_4 و T_5) در تمامی صفات اندازه‌گیری‌شده فراهم می‌کنند. این شکل‌ها نشان می‌دهند که اثرات مثبت تیمارها محدود به یک ویژگی خاص نبوده، بلکه به‌صورت هماهنگ رشد رویشی، عملکرد فیزیولوژیکی و تولید میوه را بهبود داده‌اند. این پاسخ‌های هماهنگ بیانگر وجود اثر سینرژیستی بین محرک‌های زیستی اعمال شده و پلیمرهای سوپرجاذب است.



شکل ۱۱- نقشه حرارتی سلسله‌مراتبی تغییرات نرمال‌شده صفات مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و عملکردی گیاه فلفل دلمه‌ای شیرین در پاسخ به تیمارهای تغذیه‌ای مختلف در خاک آهکی. PH (ارتفاع بوته)، LA (سطح برگ)، TDW (وزن خشک کل)، Chlt (کلروفیل کل)، Cart (کاروتنوئید)، Photo rate (نرخ فتوسنتز)، RWC (مقدار نسبی آب)، FN (تعداد میوه)، FFW (وزن تر میوه)، FDW (وزن خشک میوه). T1: شاهد، T2: آبکافت ماهی، T3: آمینواسید، T4: آبکافت ماهی + سوپرجاذب، T5: آمینواسید + سوپرجاذب.



شکل ۱۲- ماتریس همبستگی صفات مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و عملکردی در فلفل دلمه‌ای شیرین تحت تیمارهای تغذیه‌ای در خاک آهکی. اعداد داخل ماتریس نشان‌دهنده ضرایب همبستگی پیرسون هستند. سطوح معناداری: ($p < 0.05$)، ($p < 0.01$) . PH (ارتفاع بوته)، LA (سطح برگ)، TDW (وزن خشک کل)، Chlt (کلروفیل کل)، Cart (کاروتنوئید)، Photo (نرخ فتوسنتز)، RWC (مقدار نسبی آب)، FN (تعداد میوه)، FFW (وزن تر میوه)، FDW (وزن خشک میوه).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد محرک‌های زیستی (آبکافت ماهی و مخلوط آمینواسید) به‌تنهایی و به‌ویژه در ترکیب با پلیمر سوپرجاذب آکوازورب، تأثیر معناداری بر بهبود ویژگی‌های مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و عملکردی گیاه فلفل دلمه‌ای در شرایط خاک قلیایی داشت. تیمارهای ترکیبی (آبکافت ماهی + سوپرجاذب و آمینواسید + سوپرجاذب) در مقایسه با کاربرد مجزای هر یک از این مواد و نیز تیمار شاهد، برتری واضحی از نظر تمامی صفات اندازه‌گیری‌شده از جمله غلظت کلروفیل، کاروتنوئید، نرخ فتوسنتز، غلظت نسبی آب، ارتفاع بوته، تعداد و سطح برگ، زیست‌توده خشک و عملکرد میوه نشان دادند. بهترین نتایج در تیمار آبکافت ماهی همراه با سوپرجاذب مشاهده شد که افزایش ۲۱/۵ درصدی کلروفیل کل، ۲٤ درصدی کاروتنوئید، ١٦/٦ درصدی نرخ فتوسنتز و ۱۷/۷ درصدی وزن تر میوه را نسبت به شاهد به همراه داشت. نقشه حرارتی و ماتریس همبستگی نیز تأیید کردند که اثرات مثبت تیمارها محدود به یک ویژگی خاص نبوده، بلکه به‌صورت هماهنگ رشد رویشی، عملکرد فیزیولوژیکی و تولید میوه را بهبود بخشیده‌اند که بیانگر وجود اثر سینرژیستی بین محرک‌های زیستی و پلیمرهای سوپرجاذب است. بر اساس نتایج این تحقیق، کاربرد تلفیقی آبکافت ماهی و پلیمر سوپرجاذب به‌دلیل بهبود تغذیه گیاه (تأمین پیش‌سازهای متابولیکی و اسیدهای آمینه) از یک سو و افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک و کاهش نوسانات رطوبتی از سوی دیگر، به‌عنوان راهکاری مؤثر و پایدار برای افزایش کمّیت و کیفیت محصول فلفل دلمه‌ای در خاک‌های قلیایی و شرایط گلخانه‌ای قابل‌توصیه است.

شفاف‌سازی استفاده از هوش مصنوعی

در مراحل مختلف این پژوهش اعم از ایده‌پردازی، طراحی، جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها، نگارش متن و ویرایش یا ترجمه از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نشده است.

منابع مورد استفاده

References

Arnon D.T. (1949). Copper enzymes in isolation chloroplast phenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24(1), 1–15. https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1

Bayat M., Hassani A. & Nourzadeh Hadad M. (2025). Improving the characteristics of tomato seedlings by integrated application of humic acid, auxin, and phosphoric acid. *Journal of Soil and Plant Science*, 35(1), 51–65. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22034/sps.2025.66358.1003

Bhardwaj A.K., Shainberg I., Goldstein D., Warrington D.N. & Levy G.J. (2007). Water retention and hydraulic conductivity of cross-linked polyacrylamides in sandy soils. *Soil Science Society of America Journal*, 71(2), 406–412. https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0138

Bhuimbar M.V. & Dandge P.B. (2023). Production of organic liquid biofertilizer from fish waste and study of its plant growth promoting effect. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 93, 235–243. https://doi.org/10.1007/s40011-022-01413-8

Colla G., Nardi S., Cardarelli M., Ertani A., Lucini L., Canaguier R. & Rouphael Y. (2015). Protein hydrolysates as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, 28–38. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.037

Colla G., Rouphael Y., Canaguier R., Svecova E. & Cardarelli M. (2014). Biostimulant action of a plant-derived protein hydrolysate produced through enzymatic hydrolysis. *Frontiers in Plant Science*, 5, 448. https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00448

Domínguez H., Iñarra B., Labidi J. & Bald C. (2024). Fish viscera hydrolysates and their use as biostimulants for plants as an approach towards a circular economy in Europe: A review. *Sustainability*, 16(20), 8779. https://doi.org/10.3390/su16208779

Ertani A., Cavani L., Pizzeghello D., Brandellero E., Altissimo A., Ciavatta C. & Nardi S. (2009). Biostimulant activity of two protein hydrolyzates in the growth and nitrogen metabolism of maize seedlings. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(2), 237–244. https://doi.org/10.1002/jpln.200800174

Etemadian M., Hassani A., Nourzadeh Haddad M. & Hanifeie M. (2017). Effect of organic and inorganic acids on the release of nutrients in calcareous soils. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(5), 73–91. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22069/jwsc.2017.12528.2723

García-Gómez B.E. *et al.* (2021). Waste-derived NPK nanofertilizer enhances growth and productivity of *Capsicum annuum* L. *Nanomaterials*, 11(6), 1552. https://doi.org/10.3390/plants10061144

García-Santiago J.C., Lozano Cavazos C.J., González-Fuentes J.A., Zermeño-González A., Rascón Alvarado E., Rojas Duarte A. Hernández Maruri J.A. (2021). Effects of fish-derived protein hydrolysate, animal-based organic fertilisers and irrigation method on the growth and quality of grape tomatoes. *Biological Agriculture & Horticulture*, 37(2), 107–124. https://doi.org/10.1080/01448765.2021.1891458

Halpern M., Bar-Tal A., Ofek M., Minz D., Muller T. & Yermiyahu U. (2015). The use of biostimulants for enhancing nutrient uptake. *Advances in Agronomy*, 130, 141–174. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.10.001

Hasani A. & Nourzadeh Haddad M. (2017). Effect of ammonium nitrate and free amino acids on the nitrate accumulation in radish. *Water and Soil Science*, 26(4.1), 67–78. (in Persian with English abstract) https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_5831.html?lang=en

Hassani A., Etemadian M., Nourzadeh Haddad M. & Hanifeie M. (2018). Application effects of organic acids on growth of forage corn and concentration of nutritional elements in shoots and roots. *Water and Soil*, 32(3), 547–558. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/jsw.v32i3.68528

Khalesi A., Mousavi Mirkalaeia S.A., Modares Sanavi S.A.M., Eftekhari A. & Nashaeai Moghadam M. (2023). Effect of foliar application of some amino acids on growth and yield of chickpea (*Cicer arientinum* L.) under different irrigation regimes. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 54(1), 27–40. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22059/ijfcs.2022.339351.654902

Maghsoodi M.R., Najafi N., Reyhanitabar A. & Oustan S. (2020). Hydroxyapatite nanorods, hydrochar, biochar, and zeolite for controlled-release urea fertilizers. *Geoderma*, 379(114644), 1–15. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114644

Marschner H. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press.

Menezes A.S., Pinheiro Neto L.G. & Bastos E.A. (2022). Water regimes and hydrogel applied on bell pepper grown in a protected environment. *Research Article*. https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2024.v59.03566

Mengel K. & Kirkby E.A. (2001). *Principles of plant nutrition* (5th ed.). Kluwer Academic Publishers.

Nourzadeh Haddad M., Hassani A. & Mastinu A. (2026). Electron-irradiated superabsorbent polymer and zeolite amendments enhance soil properties, microbial activity, and tomato yield in greenhouse sandy loam. *Scientia Horticulturae*, 355, 114585. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2025.114585

Nourzadeh Haddad M., Hasani A. & Karami Mighadam M. (2017). Comparison the efficiency of Aquasorb and Accepta superabsorbent polymers in improving physical, chemical, and biological properties of soil and tomato turnover under greenhouse condition. *Water and Soil*, 31(1), 156–167. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/jsw.v31i1.53226

Olatunji T.L. & Afolayan A.J. (2022). Antioxidant, anti-obesity, nutritional and other beneficial effects of different chili pepper: A review. *Molecules*, 27(3), 898. https://doi.org/10.3390/molecules27030898

Parađiković N., Teklić T., Zeljković S., Lisjak M. & Špoljarević M. (2019). Biostimulants research in some horticultural plant species – a review. *Food and Energy Security*, 8(2), e00162. https://doi.org/10.1002/fes3.162

Rouphael Y., Colla G., Giordano M., El-Nakhel C., Kyriacou M.C. & De Pascale S. (2017). Foliar applications of a legume-derived protein hydrolysate elicit dose-dependent increases of growth, leaf mineral composition, yield and fruit quality in two greenhouse tomato cultivars. *Scientia Horticulturae*, 226, 353–360. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.09.007

Shafie M., Hassani A., Amanifar S. & Nourzadeh Hadad M. (2025a). Improving uptake of nitrogen, phosphorus, and potassium and growth of *Opuntia* cactus by integrated application of humic acid, mycorrhiza, and seaweed extract. *Journal of Soil and Plant Science*, 35(1), 1–13. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22034/sps.2025.66187.1002

Shafie M., Hassani A., Nourzadeh Hadad M. & Amanifar S. (2025b). Enhancement of bioactive compounds concentration in *Opuntia cactus* using humic acid, seaweed extract, and mycorrhizal fungi. *Journal of Soil and Plant Science*, 35(2), 115–130. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22034/sps.2025.68460.1015

Seyedi A., Fathi S. & Movlodzadeh R. (2024). The effect of biostimulants based on free amino acids on some growth and physiological parameters of *Dracocephalum moldavica* L. under salinity stress. *Journal of Medicinal Plants and By-products*, 13(2), 469–477. https://doi.org/10.22092/JMPB.2022.356634.1424

Shahnavaz M., Nourzadeh Haddad M., Gholami A. & Panahpoor I. (2017). Study of performance polymer and plant mulch to reduce soil loss in areas prone to wind erosion in Khuzestan. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(3), 651–658. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22059/ijswr.2017.134302.667320

Shahnavaz M., Nourzadeh Haddad M., Gholami A. & Panahpour E. (2019). Investigation the efficiency of soil stabilizers against soil loss and their effects on chemical properties of soil. *Arid Land Research and Management*, 33(2), 119–135. https://doi.org/10.1080/15324982.2018.1531324

Shahsavani S., Abaspour A., Parsaeeyan M. & Yonesi Z. (2017). Effect of fish waste, chemical fertilizer and biofertilizer on yield and yield components of bean (*Vigna sinensis*) and some soil

properties. *Iranian Journal Pulses Research*, 8(1), 45–59. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/ijpr.v8i1.47428

Smagula J.M. & Dunham S. (1995). Comparison of fish hydrolysate and inorganic fertilizers for lowbush blueberry. *HortScience*, 30(2), 187. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.30.2.187d

Sparks D.L., Page A.L., Helmke P.A. & Loeppert R.H. (Eds.). (2020). *Methods of soil analysis, part 3: Chemical methods*. John Wiley & Sons.

Stutte G. (1990). Videographic assessment of plant stress: Potentials and limitations. *HortScience*, 25(6), 1.

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

Thuynsma R. (n.d.). Plant-based protein hydrolysates: Biostimulants for the future. *Agri Technovation*. https://agritechnovation.co.nz/plant-based-protein-hydrolysates-biostimulants-for-the-future/

Weatherley P.E. (1970). Some aspects of water relations. *Advances in Botany Research*, 3, 171–206. https://doi.org/10.1016/S0065-2296(08)60320-1

Zare Abyaneh H., Heidari F., Heidari G. & Jovzi M. (2019). Effect of superabsorbent, nitrogen fertilizer and drought stress on yield and water productivity of bell pepper. *Water and Soil*, 33(3), 463–476. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.76431