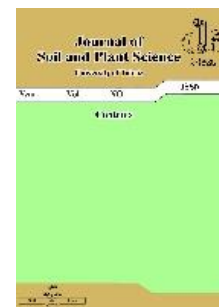




J Soil Plant Sci, 2026, 36(2): 83-101.
<https://doi.org/10.22034/sps.2026.72717.1043>

Journal of Soil and Plant Science

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



Research Article

Determination of Optimal Gamma Irradiation Dose of Humic Acid for Improving Some Agronomic Traits and Yield of Bell Pepper Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Mehdi Nourzadeh Hadad 

Nuclear Agriculture Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Karaj, Iran.
E-mail: mnoorzadeh@aeoi.org.ir

Received: May 31, 2026
Accepted: July 9, 2026

Revised: July 7, 2026
Published: July 13, 2026

Extended Abstract

Background and Objectives

Nowadays, the adoption of environmentally friendly and sustainable practices in horticultural crop production has become a critical necessity. The use of soil amendments and biostimulants, particularly humic substances, has gained considerable attention as an effective strategy to enhance plant growth, nutrient efficiency, and overall crop productivity. Humic acid (HA), as a major component of soil organic matter, is increasingly recognized for its ability to improve soil physicochemical properties, increase nutrient bioavailability, stimulate root development, enhance chlorophyll concentration, and boost photosynthetic efficiency. These effects collectively lead to stronger vegetative growth and higher yields. However, the biological efficacy of humic acid is highly dependent on its molecular structure, molecular weight, functional group composition, concentration, and application method. Recent evidence suggests that physical or chemical modification of humic substances can significantly alter their bioactivity. Among various modification techniques, gamma irradiation has emerged as a promising, clean, and residue-free method for inducing molecular fragmentation, oxidation, and structural changes in organic compounds. Gamma irradiation can break chemical bonds in hydrocarbon and aliphatic chains, reduce molecular weight, increase the abundance of functional groups such as hydroxyl and carboxyl, and improve solubility. These structural modifications potentially enhance the interaction of humic acid with plant roots and its capacity for cellular signaling. Despite the recognized benefits of humic acid in bell pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivation—an important greenhouse vegetable with a global market value of approximately \$7.5 billion in 2024—no previous study has investigated the combined effect of gamma-irradiated humic acid and its application rate on bell pepper growth and yield. Therefore, this research was conducted to determine the optimal gamma irradiation dose for modifying the molecular structure of humic acid and to evaluate its interaction with different application levels on key agronomic traits and yield of bell pepper under greenhouse conditions.

Materials and Methods

This experiment was carried out in a research greenhouse at the University of Zanjan, Iran, under controlled environmental conditions (average temperature 17.5–34.3 °C, relative humidity 24–33%, and natural light intensity ~10,000 lux). A commercial liquid humic acid (containing 10% humic acid, 3% fulvic acid, 3% potassium, and 5% nitrogen) was subjected to gamma irradiation at doses of 0, 500, 1000, 2000, and 4000 Gy using a calibrated gamma radiation source at the Nuclear Agricultural Research Institute in Karaj, Iran. The irradiation process was performed prior to soil application. The study was done as a factorial experiment based on a completely randomized design and three replications. Treatments consisted of combinations of five gamma doses and five humic acid application rates (0, 1.5, 3.0, 4.5, and 6.0 g HA per kg of soil). Humic acid was applied to the soil in three splits during the plant growth period. Bell pepper seeds (cv. Nirvin) were sown in plastic pots filled with 5 kg sandy loam soil. To evaluate structural changes in humic acid induced by gamma irradiation, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) analysis was performed. Approximately 2 mg of each HA sample (non-irradiated and irradiated at different doses) was mixed with 200 mg of spectroscopic-grade KBr and pressed into transparent pellets. FTIR spectra were recorded in the wavenumber range of 400–4000 cm⁻¹ with a resolution of 4 cm⁻¹ and 32 scans per sample. Major functional groups including hydroxyl (O–H), carbonyl (C=O), carboxyl (COOH), aromatic (C=C), and aliphatic (C–H) were compared between irradiated and non-irradiated samples. Vegetative and yield parameters of plants were measured 92 days after cultivation. Growth parameters included plant height, stem diameter, leaf number, leaf area, root dry weight, shoot dry weight, and total dry weight. Yield parameters included fruit number per plant, average fruit fresh weight, average fruit dry weight, and total marketable yield per plant. Data were analyzed using SPSS (Ver. 19) and means were compared using Duncan's multiple range test at $p < 0.01$.

Results

Analysis of variance revealed that the simple effects of gamma irradiation dose and humic acid application rate were highly significant ($p < 0.01$) for all measured traits, including fruit number, fruit fresh weight, fruit dry weight, root dry weight, total dry weight, plant height, leaf number, leaf area, and shoot dry weight. The interaction effect (gamma dose $\times$ HA rate) was also significant ($p < 0.01$) for fruit number, fruit fresh weight, fruit dry weight, Root DW, Total DW, and leaf area, but non-significant for plant height, leaf number, and shoot dry weight. FTIR analysis revealed that gamma irradiation at 2000 Gy induced the most favorable structural modifications, including increased hydroxyl and carboxyl functional groups, reduced aliphatic C–H peaks (indicating fragmentation of hydrocarbon chains), decreased aromatic C=C content (suggesting breakdown of large aromatic rings), and overall reduction in molecular weight, leading to improved solubility. In contrast, the 4000 Gy dose caused extensive degradation, with a sharp reduction in all peak intensities, near-complete loss of carboxyl structure, dehydroxylation, and formation of new peaks corresponding to adsorbed CO₂, indicating severe molecular destruction. Among all treatments, 3 g HA irradiated at 2000 Gy/kg soil exhibited the best performance. This treatment increased fruit fresh weight by 15.6%, fruit dry weight by 19.6%, leaf area by 39%, total dry weight by 54.5%, and fruit number by 62% as compared to 1.5 g non-irradiated HA. The 4000 Gy dose significantly reduced all measured traits compared to the 2000 Gy dose, confirming the detrimental effects of excessive irradiation. For instance, in 1.5 g HA at 4000 Gy, leaf area dropped to 214.4 cm²/plant and total dry weight decreased to 7.61 g/plant, which were even lower than those of the non-irradiated control treatments.

Conclusion

Based on the comprehensive evaluation of structural modifications and plant responses, gamma irradiation at 2000 Gy was identified as the optimal dose for improving the molecular structure of humic acid. At this dose, desirable structural changes—including molecular weight reduction, increased hydroxyl and carboxyl functional groups, and enhanced solubility—were achieved, while lower doses (500 and 1000 Gy) produced insufficient modifications and the higher dose (4000 Gy) caused extensive degradation. The application rate of 3 g irradiated humic acid per kg of soil was determined as the optimal concentration, as higher rates did not provide additional benefits and, in some cases, led to relative yield reduction, indicating a non-linear dose-response relationship. The treatment of 3 g HA irradiated at 2000 Gy/kg soil was identified as the best treatment, with increases of 15.6% in fruit fresh weight, 19.6% in total dry weight, and 39% in leaf area compared to the control. FTIR analysis clearly demonstrated that gamma irradiation at 2000 Gy effectively fragmented humic acid molecular chains, increased active functional groups, and improved solubility, which in turn enhanced HA uptake and bio-efficacy by the plant. The 4000 Gy dose, due to extensive molecular destruction, caused a significant decline in yield compared to the 2000 Gy treatment, emphasizing the necessity of precise dose optimization before commercial application. Overall, gamma irradiation technology can serve as a clean, cost-effective, efficient, and residue-free method to enhance the bioactivity of humic acid as a biostimulant in greenhouse bell pepper cultivation. Furthermore, it is recommended that future research investigate the effects of this optimized treatment on fruit quality attributes (vitamin C, soluble solids, anthocyanins, carotenoids, and nitrate/nitrite reduction), nutrients uptake, soil biological and chemical properties, and field-scale validation under diverse climatic conditions.

Keywords: Biological efficacy, Fruit yield, Greenhouse conditions, Humic substances, Leaf area, Root growth.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the author.

Acknowledgements

The author gratefully acknowledges the invaluable support of Dr. Akbar Hassani throughout this research. His generous assistance with greenhouse experiments and various tests was instrumental to the successful completion of this study. Special thanks to Dr. Saeed Mori for his expert assistance with statistical analyses.

Ethical considerations

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

Cite this article: Nourzadeh Hadad, M. (2026). Determination of optimal gamma irradiation dose of humic acid for improving some agronomic traits and yield of bell pepper using fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). *Journal of Soil and Plant Science*, 36(2), 83-101. <https://doi.org/10.22034/sps.2026.72717.1043>

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



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





مقاله پژوهشی

تعیین دوز بهینه پرتوتابی گامای هیومیک اسید برای بهبود برخی صفات زراعی و عملکرد فلفل دلمه‌ای با استفاده از طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR)

مهدی نورزاده حداد 

پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، کرج، ایران. رایانامه: mnoorzadeh@aeoi.org.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۰	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۸	تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۲۲

چکیده

هدف این پژوهش، تعیین دوز بهینه پرتوتابی گاما برای اصلاح ساختار مولکولی هیومیک اسید و ارزیابی اثر آن به همراه هیومیک اسید بر برخی صفات زراعی و عملکرد فلفل دلمه‌ای (*Capsicum annuum* L.) در شرایط گلخانه بود. این آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل پرتوتابی هیومیک اسید مایع با دوزهای صفر، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰ گرم و مقدار هیومیک اسید مصرفی در پنج سطح صفر، ۱/۵، ۳، ۴/۵ و ۶ گرم بر کیلوگرم خاک بودند. تغییرات ساختاری با طیف‌سنجی FTIR بررسی و صفات رویشی و عملکردی گیاه اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که اثرهای ساده دوز پرتوتابی و مقدار مصرف هیومیک اسید بر تمامی صفات در سطح احتمال ۱ درصد معنادار بودند. آنالیز FTIR نشان داد که دوز ۲۰۰۰ گرم باعث تخریب برخی پیوندهای شیمیایی و افزایش معنادار گروه‌های عاملی هیدروکسیل و کربوکسیل، کاهش وزن مولکولی و بهبود حل‌پذیری هیومیک اسید گردید، در حالی که دوز ۴۰۰۰ گرم سبب کاهش شدید پیک‌ها و از بین رفتن ساختار کربوکسیل شد. تیمار ۳ گرم هیومیک اسید با دوز پرتوتابی ۲۰۰۰ گرمی بهترین نتایج را نشان داد به طوری که نسبت به تیمار کمترین سطح هیومیک اسید و بدون پرتوتابی، وزن تر میوه فلفل دلمه‌ای ۱۵/۷ درصد (از ۱۰۴/۱ گرم به ۱۲۰/۴ گرم بر بوته)، وزن خشک میوه ۱۹/۰ درصد (از ۱۲/۱ به ۱۴/۴ گرم بر بوته) و سطح برگ ۳۹/۴ درصد (از ۲۳۳/۷ به ۳۲۵/۷ سانتی‌متر مربع بر بوته) افزایش یافت. در مقابل، دوز ۴۰۰۰ گرمی باعث کاهش عملکرد میوه فلفل دلمه‌ای گردید. به طور کلی، پرتوتابی گاما با دوز ۲۰۰۰ گرمی به عنوان روشی مؤثر و پاک برای اصلاح ساختار مولکولی هیومیک اسید، کاهش مصرف آن و افزایش کارایی زیستی آن معرفی گردید. بنابراین، استفاده از ۳ گرم هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوز ۲۰۰۰ گرمی در هر کیلوگرم خاک برای کشت گلخانه‌ای فلفل دلمه‌ای قابل توصیه است.

واژه‌های کلیدی: رشد ریشه، عملکرد میوه، سطح برگ، شرایط گلخانه، کارایی بیولوژیکی، مواد هیومیکی.

استناد به این مقاله: نورزاده حداد، م. (۱۴۰۵). تعیین دوز بهینه پرتوتابی گامای هیومیک اسید برای بهبود برخی صفات زراعی و عملکرد فلفل دلمه‌ای با استفاده از طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR). نشریه دانش خاک و گیاه، ۳۶(۲)، ۸۳-۱۰۱.

مقدمه

امروزه به‌کارگیری روش‌های سالم و سازگار با محیط‌زیست در مراحل مختلف کاشت، داشت و برداشت محصولات باغبانی به امری ضروری تبدیل شده است. استفاده از مواد افزودنی برای تقویت خاک‌های کشاورزی (Mohajjel- 2019; Shahnava et al., 2017; 2025; Nourzadeh et al., 2026; Shja et al., 2025) و اعمال محرک‌های زیستی برای بهبود رشد گیاه (Halpern et al., 2015; Hassani et al., 2018) نمونه‌هایی از این روش‌ها به شمار می‌روند. در این میان، فناوری پرتوتابی با اشعه گاما از روش‌هایی است در سال‌های اخیر مورد توجه محققان بخش کشاورزی قرار گرفته است (Balouti Dehkordi et al., 2024). گیاه فلفل دلمه‌ای (*Capsicum annuum* L.) به عنوان یکی از سبزی‌های مهم خانواده سیب‌زمینی (*Solanaceae*)، تنها در سال ۲۰۲۴ دارای ارزش بازرجانی در حدود ۷/۵ میلیارد دلار بوده است. همچنین، کاشت فلفل دلمه گلخانه‌ای در ایران با سطح زیر کشت ۹۸۵ هکتار و تولید ۱۳۲ هزار تن، جایگاه قابل توجهی در صنعت کشاورزی کشور دارد.

مواد هیومیکی، به‌ویژه هیومیک اسید، به‌طور فزاینده‌ای به عنوان محرک‌های زیستی گیاهی مؤثر شناخته می‌شوند. این مواد با بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، افزایش قابلیت دسترسی عناصر غذایی و تحریک فرآیندهای متابولیکی گیاه، نقش مهمی در افزایش رشد و عملکرد ایفا می‌کنند (Bayat et al. 2025; Shafiei et al. 2025 a & b). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که کاربرد هیومیک اسید می‌تواند توسعه ریشه، غلظت کلروفیل و کارایی فتوسنتز را بهبود بخشد که در نتیجه منجر به رشد رویشی قوی‌تر و عملکرد بالاتر می‌گردد (Etemadian et al. 2017). با این حال، کارایی زیستی هیومیک اسید به شدت تحت تأثیر ساختار مولکولی، غلظت و روش مصرف آن قرار دارد [۶]. این تنوع‌پذیری، دستیابی به نتایج قابل پیش‌بینی و یکنواخت را در سیستم‌های مختلف تولید با چالش مواجه ساخته است (Hassani et al., 2017).

شواهد اخیر نشان می‌دهد که اصلاح فیزیکی یا شیمیایی مواد هیومیکی می‌تواند فعالیت زیستی آن‌ها را به‌طور معناداری تغییر دهد (Maffia et al. 2025). در میان روش‌های مختلف، پرتوتابی گاما به عنوان روشی مؤثر برای تغییر ترکیبات آلی از طریق القای قطعه‌قطعه شدن مولکولی، اکسایش و تغییرات ساختاری، بدون برجای گذاشتن باقیمانده‌های شیمیایی مضر، متمایز است (Kumar et al. 2023). مطالعات نشان داده‌اند که پرتوتابی هیومیک اسید با گاما می‌تواند باعث شکستن پیوندهای شیمیایی در زنجیره‌های هیدروکربنی و آلیفاتیک هیومیک اسید (کاهش پیک‌های C-H در ناحیه ۲۹۲۰-۲۸۵۰ سانتی‌متر معکوس در طیف FTIR) و قطعه‌قطعه شدن مولکول‌های بزرگ و در نتیجه کاهش وزن مولکولی هیومیک اسید می‌شود. به تبع تغییرات صورت گرفته وزن مولکولی آن کاهش و فراوانی گروه‌های عاملی افزایش یافته و حلالیت آن افزایش می‌یابد (Hassanein et al., 2022). این تغییرات احتمالاً تعامل هیومیک اسید با ریشه گیاه و ظرفیت آن برای پیام‌رسانی سلولی را افزایش می‌دهند (Zhao et al., 2022). با وجود این، پیامدهای فیزیولوژیکی کلی کاربرد هیومیک اسید پرتوتابی شده با گاما در سیستم‌های باغبانی هنوز به خوبی شناخته نشده است. در یک بررسی مشاهده شد که مصرف ۱۵ و ۳۰ گرم لجن فاضلاب پرتوتابی شده در هر کیلوگرم خاک نسبت به پرتوتابی نشده، ماده خشک ریشه گیاه را به‌طور معنادار افزایش داد (Asgari et al., 2019; Lajayer et al., 2019).

رشد گیاه و فتوسنتز به عنوان شاخص‌های کلیدی اثربخشی محرک‌های زیستی عمل می‌کنند (Atero- Calvo et al., 2024). بهبود سطح برگ، غلظت کلروفیل و سرعت خالص فتوسنتز منجر به جذب بیشتر کربن و افزایش زیست‌توده گیاه می‌گردد (Navarro-León et al., 2022). در گوجه‌فرنگی، این ویژگی‌ها ارتباط نزدیکی با

قدرت رویشی و پتانسیل عملکرد دارند (Distefano *et al.*, 2022). با این حال، هنوز مشخص نیست که پرتوتابی گاما چگونه رابطه دوز-پاسخ هیومیک اسید را تحت تأثیر قرار می‌دهد و آیا این اصلاحات می‌توانند اثرهای هم‌افزا بر فیزیولوژی گیاه ایجاد کنند؛ این حوزه هنوز به‌طور کامل مطالعه نشده است. علاوه بر این، نحوه تعامل میزان مصرف هیومیک اسید با دوزهای پرتوتابی در تأثیرگذاری بر پاسخ‌های گیاهی از اهمیت بالایی برخوردار است. اصلاح بیش از حد یا میزان مصرف نامناسب می‌تواند اثربخشی محرک‌های زیستی را کاهش دهد یا حتی فرآیندهای فیزیولوژیکی را مختل کند (Aly *et al.*, 2024). در مقابل، ترکیب بهینه این عوامل می‌تواند اثرهای مثبت را تقویت نماید. شناخت این تعاملات برای تدوین دستورالعمل‌های علمی برای استفاده از مواد هیومیکی پرتوتابی شده در باغبانی پایدار حیاتی است (Muslumova *et al.*, 2022).

محققان (Shefazadeh Shahrehabki *et al.*, 2020) در تحقیقات خود نشان دادند که کاربرد هیومیک اسید حتی در شرایط تنش شوری باعث بهبود کیفی و کمی فلفل دلمه‌ای می‌شود. همچنین، میزان جذب عناصر معدنی پتاسیم، کلسیم و آهن با اعمال هیومیک اسید به‌طور معناداری افزایش یافت. در پژوهشی دیگر، با استفاده از ۰/۵ گرم هیومیک اسید بر کیلوگرم خاک در مراحل مختلف رشد فلفل دلمه‌ای گزارش کردند که زیست‌توده این گیاه تا ۵۵ درصد افزایش یافت (Dehghani *et al.*, 2024). (Movahedpour *et al.*, 2015) گزارش کردند که مصرف هیومیک اسید در خاک سبب افزایش عملکرد دانه به‌دلیل بهبود صفات مورفولوژیک و اجزای عملکرد گیاه کلزا شد. Mirzaei Varoei *et al.* (2024) افزایش سطح برگ، وزن تر بخش هوایی و قطر ساقه در محل طوقه گیاه ذرت را پس از مصرف هیومیک اسید مشاهده کردند. آنان در یک مطالعه دیگر، افزایش سطح برگ، وزن تر بخش هوایی و قطر ساقه در محل طوقه گیاه دارویی مرزه را پس از آنان مصرف هیومیک اسید گزارش کردند (Mirzaei Varoei *et al.*, 2023).

دیگر محققان (Roshanian *et al.*, 2024) با مطالعه تأثیر هیومیک اسید (سه سطح صفر، ۲ و ۴ گرم بر گلدان) نتیجه گرفتند که استفاده از هیومیک اسید نه تنها باعث بهبود ویژگی‌های خاک می‌شود، بلکه میزان و کیفیت فلفل دلمه‌ای تولیدشده در گلخانه نیز افزایش معناداری داشته است. در پژوهشی مشابه (Amiri *et al.*, 2025) اثر محلول‌پاشی اسید آمینه و هیومیک اسید بر صفات بیوشیمیایی فلفل دلمه‌ای را در گلخانه مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه گرفتند که هیومیک اسید در غلظت‌های ۰/۲، ۰/۶ و ۱ گرم در لیتر بر میزان نیترات و نیتريت میوه، مقدار ویتامین C، مواد جامد محلول، میزان آنتوسیانین و کاروتنوئید میوه در روز برداشت و نیز میزان آنتوسیانین و کاروتنوئید میوه پس از ۳۰ روز نگهداری تأثیر داشته است. به‌طوری که تیمار ۰/۶ گرم در لیتر باعث کاهش میزان نیتريت و نیترات میوه گردید. همچنین بیشترین مقدار ویتامین ث (۱۱۶ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم ماده خشک) و آنتوسیانین (۳/۸۷ میکرومول بر گرم وزن تر) در تیمار هیومیک اسید ۰/۲ گرم در لیتر مشاهده شد.

در تحقیقات متعددی اثبات شده است که با کاهش طول زنجیره‌های مولکولی هیومیک اسید، میزان جذب و اثرهای مثبت آن بر رشد گیاه افزایش می‌یابد (Pizzeghello *et al.*, 2020; Sun *et al.*, 2020). از سوی دیگر، اگرچه تحقیقات پیشین تأثیر مثبت مصرف هیومیک اسید بر کمیت و کیفیت فلفل دلمه‌ای تولیدشده را تأیید می‌کنند، تاکنون پژوهشی مبنی بر تأثیر پرتوتابی گاما بر افزایش کارایی هیومیک اسید در این راستا منتشر نشده است. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی چگونگی تأثیر پرتوتابی هیومیک اسید با اشعه گاما (در دوزهای مختلف پرتوتابی و مقادیر مختلف مصرف هیومیک اسید) بر رشد و میزان تولید فلفل دلمه‌ای انجام شده است.

مواد و روش‌ها

پرتوتابی هیومیک اسید و آنالیز FTIR

در این پژوهش هیومیک اسید (HA) به صورت غیرپرتودی شده و پس از پرتودی با اشعه گاما در دوزهای ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰ گری (Gy) مصرف شد. فرایند پرتودی با استفاده از یک چشمه پرتوی گاما کالیبره شده در پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای کرج و پیش از مصرف هیومیک اسید انجام گرفت. هیومیک اسید مورد استفاده در این تحقیق از شرکت زیست نهاده پویا تهیه شد. هیومیک اسید در سه مقطع به خاک اضافه شد و در مجموع این آزمایش میزان مصرف هیومیک اسید به ترتیب معادل ۱/۵، ۳، ۴/۵ و ۶ گرم بر کیلوگرم خاک بوده است. ترکیب شیمیایی هیومیک اسید مورد استفاده شامل هیومیک ۱۰ درصد، فولویک ۳ درصد، پتاسیم ۳ درصد و نیتروژن ۵ درصد بود. همچنین EC یک به ۱۰ و pH آن به ترتیب ۴ و ۱۰ بود. جدول ۱ تیمارهای این آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۱- تیمارهای استفاده شده در این پژوهش.

تیمار	شرح تیمار	مقدار هیومیک اسید مصرف شده (گرم بر کیلوگرم خاک)	دوز پرتوتابی گاما (گری)
T0	بدون هیومیک اسید	۰	۰
T1	هیومیک اسید بدون پرتوتابی	۱/۵	۰
T2	هیومیک اسید بدون پرتوتابی	۳	۰
T3	هیومیک اسید بدون پرتوتابی	۴/۵	۰
T4	هیومیک اسید بدون پرتوتابی	۶	۰
T5	هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوز ۵۰۰ گری	۱/۵	۵۰۰
T6	هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوز ۵۰۰ گری	۳	۵۰۰
T7	هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوز ۵۰۰ گری	۴/۵	۵۰۰
T8	هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوز ۵۰۰ گری	۶	۵۰۰
T9	هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوز ۱۰۰۰ گری	۱/۵	۱۰۰۰
T10	هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوز ۱۰۰۰ گری	۳	۱۰۰۰
T11	هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوز ۱۰۰۰ گری	۴/۵	۱۰۰۰
T12	هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوز ۱۰۰۰ گری	۶	۱۰۰۰
T13	هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوز ۲۰۰۰ گری	۱/۵	۲۰۰۰
T14	هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوز ۲۰۰۰ گری	۳	۲۰۰۰
T15	هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوز ۲۰۰۰ گری	۴/۵	۲۰۰۰
T16	هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوز ۲۰۰۰ گری	۶	۲۰۰۰
T17	هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوز ۴۰۰۰ گری	۱/۵	۴۰۰۰
T18	هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوز ۴۰۰۰ گری	۳	۴۰۰۰
T19	هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوز ۴۰۰۰ گری	۴/۵	۴۰۰۰
T20	هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوز ۴۰۰۰ گر	۶	۴۰۰۰

برای ارزیابی تغییرات ساختاری و گروه‌های عاملی هیومیک اسید در اثر پرتوتابی گاما، از طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) استفاده شد. برای این کار، حدود ۲ میلی‌گرم از هر نمونه هیومیک اسید (غیرپرتوتابی و پرتوتابی شده در دوزهای مختلف) با ۲۰۰ میلی‌گرم پتاسیم بروماید (KBr) با درجه خلوص طیف‌سنجی مخلوط و تحت فشار به صورت قرص‌های شفاف فشرده شدند. طیف‌ها در محدوده عدد موجی ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ سانتی‌متر معکوس (cm^{-1}) با رزولوشن ۴ سانتی‌متر معکوس و تعداد ۳۲ اسکن برای هر نمونه، توسط دستگاه FTIR [نام دستگاه در صورت وجود اضافه شود] ثبت شدند. گروه‌های عاملی اصلی شامل هیدروکسیل ($-\text{OH}$)، کربونیل ($\text{C}=\text{O}$)، کربوکسیل ($-\text{COOH}$)، ترکیبات آروماتیک ($\text{C}=\text{C}$) و آلیفاتیک ($\text{C}-\text{H}$) در طیف نمونه بدون پرتوتابی و نمونه‌های پرتوتابی شده مقایسه و تغییرات آن‌ها تحلیل گردید.

شرایط کشت در گلخانه

این پژوهش برای بررسی تأثیر هیومیک اسید پرتوتابی شده با گاما بر رشد، عملکرد فیزیولوژیکی، عملکرد محصول و کیفیت میوه فلفل دلمه‌ای در شرایط گلخانه انجام شد. آزمایش در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه زنجان با میانگین دمای حداقل ۱۷/۵ درجه سلسیوس، حداکثر ۳۴/۳ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی ۲۴ تا ۳۳ درصد و شدت نور طبیعی تقریبی ۱۰۰۰۰ لوکس در سطح گیاه اجرا گردید. در طول دوره رشد، عوامل محیطی از جمله دما، نور، آبیاری و تغذیه به‌طور یکسان برای تمام تیمارها کنترل شد تا از اثر متغیرهای مداخله‌گر جلوگیری گردد. بذورهای فلفل دلمه‌ای (رقم نیروین) در گلدان‌های پلاستیکی ۵ کیلویی حاوی خاک لومی شنی کشت شدند. آب استفاده شده برای آبیاری گیاهان دارای هدایت الکتریکی ۷۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و TDS کمتر از ۴۵۰ میلی‌گرم در لیتر بود. همان‌طور که در جدول ۲ مشخص است این خاک دارای بافت لوم شنی (Sandy loam)، قابلیت هدایت الکتریکی پایین (۰/۹۷ dS/m) و pH تقریباً قلیایی (۷/۷۹) است. از نظر حاصلخیزی، مواد آلی (۰/۷ درصد) و نیتروژن کل (۰/۰۴ درصد) آن کم، ولی کربنات کلسیم معادل (۱۴/۷ درصد) و پتاسیم (۱۵۱ mg/kg) آن نسبتاً کم است (Goraczko & Slawinski, 2008).

جدول ۲- ویژگی‌های خاک مورد استفاده.

منبع	روش اندازه‌گیری	مقدار	واحد	ویژگی
Miller & Curtin (2008)	عصاره گل اشباع	۰/۹۷	dS/m	قابلیت هدایت الکتریکی (EC)
Hendershot <i>et al.</i> (2008)	گل اشباع	۷/۷۹	-	pH
Bouyoucos (1927)	هیدرومتری	Sandy loam	-	بافت خاک
Walkley & Black (1934)	تیتراژ کردن	۰/۷	%	ماده آلی خاک
Loeppert & Suarez (1996)	تیتراژ کردن	۱۴/۷	%	کلسیم کربنات معادل
Bremner (1996)	کج‌لدا	۰/۰۴	%	نیتروژن کل
Olsen <i>et al.</i> (1954)	اولسن	۱۱	mg/kg	P قابل جذب گیاه در خاک
Hanway & Heidel (1952)	آمونیم استات	۱۵۱	mg/kg	K قابل جذب گیاه در خاک
Lindsay & Norvell (1978)	DTPA	۶/۸	mg/kg	Fe قابل جذب گیاه در خاک
Lindsay & Norvell (1978)	DTPA	۰/۹۳	mg/kg	Zn قابل جذب گیاه در خاک
Lindsay & Norvell (1978)	DTPA	۵/۲	mg/kg	Mn قابل جذب گیاه در خاک
Lindsay & Norvell (1978)	DTPA	۰/۶۳	mg/kg	Cu قابل جذب گیاه در خاک

اندازه‌گیری‌های فاکتورهای رشد گیاه

عملیات برداشت و بررسی صفات پس از گذشت ۹۲ روز از کاشت، انجام شد. رشد گیاه از طریق پارامترهای ریخت‌شناختی استاندارد (Sparks et al., 2020) ارزیابی شد. ارتفاع گیاه از سطح خاک تا مریستم انتهایی اندازه‌گیری و به سانتی‌متر ثبت گردید. قطر ساقه در نقطه‌ای استاندارد بالای خاک با استفاده از کولیس دیجیتال اندازه‌گیری و به میلی‌متر بیان شد. سطح برگ برای هر گیاه با اندازه‌گیری برگ‌های کاملاً توسعه‌یافته محاسبه و به سانتی‌متر مربع گزارش گردید. وزن خشک ریشه با خارج کردن دقیق ریشه‌ها در پایان آزمایش، شستشوی خاک، خشک کردن در آون تا رسیدن به وزن ثابت و گزارش نتایج به گرم در هر گیاه به دست آمد. پارامترهای مربوط به برداشت برای ارزیابی تأثیر تیمارها بر بهره‌وری ثبت شدند. تعداد میوه در هر بوته در طول دوره برداشت ثبت شد. میانگین وزن میوه با تقسیم وزن کل میوه بر تعداد میوه در هر بوته به دست آمد و بر حسب گرم بیان شد. همچنین عملکرد کل قابل عرضه به بازار برای هر بوته تعیین و به کیلوگرم در هر بوته گزارش شد.

تحلیل آماری داده‌ها

پس از انجام آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی (CRD) و در سه تکرار، تحلیل آماری داده‌های اندازه‌گیری شده با نرم‌افزار SPSS (ver. 19) و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرهای ساده دوز پرتوتابی گاما^۱ و مقدار مصرف هیومیک اسید (HA) بر تمامی صفات شامل تعداد میوه (FN)، وزن تر میوه (FFW)، وزن خشک میوه (FDW)، وزن خشک ریشه (Root DW)، وزن خشک کل (Total DW)، ارتفاع بوته (Ht)، تعداد برگ (Leaf no)، سطح برگ (Leaf area) و وزن خشک ساقه (Shoot DW) در سطح احتمال ۱ درصد معنادار بودند (جدول ۳).

جدول ۳ - تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده در آزمایش.

Root DW	Total DW	Plant height	Leaf number	df	SOV
3.06**	25.04**	235.99**	116.09**	4	Gamma
1.82**	16.84**	148.97**	84.73**	3	Humic acid (HA)
0.20*	1.72*	13.24ns	9.22ns	12	Gamma × HA
0.09	0.78	8.39	5.29	40	Error
9.4	9.2	5.9	9.4	-	CV (%)

^۱-Gamma irradiation

ادامه جدول ۳

Leaf area	Shoot DW	Fruit number	Fruit fresh weight	Fruit dry weigh	df	SOV
1081.5**	9.53**	50.29**	13298.8**	214.7**	4	Gamma
7210.8**	6.78**	24.62**	7490.8**	122.8**	3	Humic acid (HA)
712.6*	0.67ns	3.78**	896.3*	14.50*	12	Gamma × HA
338.5	0.37	1.17	4094.0	6.35	40	Error
7.2	9.9	13.6	15.4	15.0	-	CV (%)

جدول ۴- مقایسه میانگین‌های صفات اندازه‌گیری شده در تیمارهای مختلف.

Shoot DW (g)	Leaf area (cm ² /plant)	Leaf number	Fruit fresh weight (g/plant)	Fruit dry weigh (g/plant)	Humic acid (g/kg soil)	Gamma (Gy)
3.97j	185.2j	17j	100.05h	10.5g	0	0
5.37ei	233.7eh	22ei	104.09g	12.07f	1.5	
6.07de	256.4de	25ce	105.50f	12.66e	3	
5.94dg	252.2e	24cg	107.24e	13.11d	4.5	
4.43i	199.7i	19i	106.79e	12.97e	6	
5.72eh	247.4ef	23ei	107.23e	12.87e	1.5	500
6.45ce	269.0ce	26ce	109.69d	13.16d	3	
6.31ce	264.8ce	25ce	111.71cd	13.41c	4.5	
4.78g-i	212.9gi	20gi	107.81e	12.88e	6	
6.00df	255.5de	24cf	109.80d	13.18d	1.5	
7.02bd	287.9bd	28bd	114.68c	13.76c	3	1000
7.21ac	293.6ac	28bc	113.79c	13.65c	4.5	
5.84eg	248.2ef	24dh	102.19g	12.26e	6	
5.84eg	251.6e	23eh	111.87c	13.42cd	1.5	
8.25a	325.7a	32a	120.35a	14.44a	3	
8.02ab	319.9ab	31ab	116.06b	13.93b	4.5	2000
7.66ab	307.8ab	30ab	109.88d	13.19d	6	
4.85f-i	214.4fi	20f-i	106.42e	12.97e	1.5	
5.82eg	245.1eg	23gh	107.99e	12.88e	3	
5.69eh	241.3eg	23gh	109.93d	12.59e	4.5	
4.67hi	206.8hi	19hi	106.57e	10.27g	6	4000

ادامه جدول ۴- مقایسه میانگین‌های صفات اندازه‌گیری شده در تیمارهای مختلف.

Root DW (g/plant)	Total DW (g/plant)	Plant height (cm)	Fruit number	Humic acid (g/kg soil)	Gamma (Gy)
2.18i	6.61j	40.32k	6.85f	0	0
2.77eh	8.44fi	45.5gj	7.4e	1.5	
3.12e	9.52ef	48.8dg	7.51e	3	
3.05rf	9.33f	48.1eh	7.5e	4.5	
2.29h	6.97j	41.0j	7.7e	6	
2.98ef	9.01fg	47.9eh	8.16d	1.5	500
3.35de	10.14df	51.2df	8.18d	3	
3.29de	9.94df	50.5dg	8.18d	4.5	
2.49fh	7.53gi	43.0hj	8.11d	6	
3.16e	9.50ef	48.4dh	8.20d	1.5	
3.70cd	11.10ce	53.0ce	9.89c	3	1000
3.79bd	11.38bd	53.9bd	10.23c	4.5	
3.03ef	9.15fg	47.7eh	9.47c	6	
3.06ef	9.20fg	48.9dg	8.7d	1.5	
4.36a	13.04a	59.6a	12.01a	3	
4.26ab	12.72ab	58.6ab	11.76b	4.5	2000
4.06ac	12.11a-c	56.5ac	11.58b	6	
2.50fh	7.61gi	42.9hj	8.11e	1.5	
2.97ef	8.08fg	47.5eh	9.80c	3	
2.91eg	8.89f-h	46.9fi	9.81c	4.5	
2.42gh	7.30hi	41.9ij	8.39d	6	4000

اثر متقابل دوز پرتوتابی و مقدار مصرف هیومیک اسید ($G \times H$) نیز بر اکثر صفات معنادار بود، به‌طوری که بر تعداد میوه، وزن تر میوه، وزن خشک میوه، وزن خشک ریشه، وزن خشک کل و سطح برگ در سطح احتمال ۱ درصد معنادار بود. همچنین این اثر بر ارتفاع بوته، تعداد برگ و وزن خشک ساقه اثر متقابل معنادار نبود. همانطور که در جدول ۴ مشخص است ضرایب تغییرات (CV) برای صفات مختلف بین ۵/۹ درصد (ارتفاع بوته) تا ۱۵/۴ درصد (وزن تر میوه) متغیر بود که نشان‌دهنده دقت قابل قبول آزمایش می‌باشد.

بر اساس نتایج ارائه شده جدول ۴ بیشترین ارتفاع بوته (۵۹/۶ سانتی‌متر)، تعداد برگ (۳۲ عدد) و سطح برگ (۳۲۵/۷ سانتی‌متر مربع) در تیمار ۱۴ با ۳ گرم هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوز ۲۰۰۰ گرمی در هر کیلوگرم خاک مشاهده شد. تیمار دوز ۲۰۰۰ گرمی + ۴/۵ گرم هیومیک اسید با مقادیر (۵۸/۶) سانتی‌متر ارتفاع، ۳۱ برگ و ۳۱۹/۹ سانتی‌متر مربع سطح برگ) در رتبه دوم قرار داشت و اختلاف معناداری با تیمار ۴ گرم در برخی صفات نداشت.

همچنین، تیمار دوز ۲۰۰۰ گرمی + ۶ گرم هیومیک اسید با مقادیر (۵۶/۵) سانتی‌متر ارتفاع، ۳۰ برگ و ۳۰۷/۸ سانتی‌متر مربع سطح برگ) در رتبه سوم قرار گرفت. کمترین مقادیر صفات رویشی در تیمار ۱ (۱/۱ گرم هیومیک اسید بدون پرتوتابی در هر کیلوگرم خاک) با ارتفاع ۴۵/۵ سانتی‌متر، تعداد برگ ۲۲ و سطح برگ ۲۳۳/۷ سانتی‌متر مربع ثبت شد. در دوز ۴۰۰۰ گرمی نیز، کاهش معنادار تمام صفات رویشی نسبت به دوز ۲۰۰۰ گرمی مشاهده گردید. برای مثال در تیمار ۴۰۰۰ گرمی + ۱/۵ گرم هیومیک اسید، ارتفاع به ۴۲/۹ سانتی‌متر، تعداد برگ به ۲۰ و سطح برگ به ۲۱۴/۴ سانتی‌متر مربع کاهش یافت.

بیشترین وزن تر میوه (۱۲۰/۳۵ گرم)، وزن خشک میوه (۱۴/۴۴ گرم)، وزن خشک ریشه (۴/۳۶ گرم)، وزن خشک کل (۱۳/۰۴ گرم)، وزن خشک ساقه (۸/۲۵ گرم) و بیشترین تعداد میوه (۳۲ عدد) مربوط به تیمار ۱۴ بود. تیمار دوز ۲۰۰۰ گرمی + ۴/۵ گرم هیومیک اسید با مقادیر (۱۱۶/۰۶ گرم وزن تر میوه، ۱۳/۹۳ گرم وزن خشک میوه، ۴/۲۶ گرم وزن خشک ریشه و ۱۲/۷۲ گرم وزن خشک کل) در جایگاه بعدی قرار داشت. کمترین وزن تر میوه (۱۰۴/۰۹ گرم) و کمترین وزن خشک کل (۱۲/۰۷ گرم) در تیمار ۱ (۱/۵ گرم هیومیک اسید بدون پرتوتابی در هر کیلوگرم خاک) مشاهده شد.

محققان دیگر (Balouti Dehkordi et al., 2024) نشان دادند که پرتوتابی مستقیم گاما بر میوه فلفل دلمه‌ای می‌تواند کیفیت و انبارداری آن را بهبود بخشد. اما در تحقیق حاضر، رویکرد نوآورانه پرتوتابی ماده افزودنی (هیومیک اسید) به جای پرتوتابی مستقیم گیاه یا میوه مورد استفاده قرار گرفته است که مزیت قابلیت کاربرد در مقیاس وسیع‌تر را دارد. در پژوهشی دیگر (Shefazadeh Shahrehabki et al., 2020) اثبات کردند که کاربرد هیومیک اسید (بدون پرتوتابی) حتی در شرایط تنش شوری باعث بهبود کیفی و کمی فلفل دلمه‌ای و افزایش جذب عناصر پتاسیم، کلسیم و آهن می‌گردد. تحقیق حاضر نشان داد که پرتوتابی گاما می‌تواند این اثرهای مثبت را به‌طور معناداری تقویت کند.

همچنین، در یک مطالعه (Dehghani et al., 2024) گزارش شد که مصرف ۰/۵ گرم هیومیک اسید بر کیلوگرم خاک، زیست‌توده فلفل دلمه‌ای را تا ۵۵ درصد افزایش داده است. در تحقیق حاضر، با استفاده از هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوز ۲۰۰۰ گرمی، بیشترین افزایش وزن کل خشک (تیمار ۱۴ نسبت به تیمار ۱) افزایشی حدود ۸۷ درصد داشت. همچنین افزایش وزن تر میوه ۱۵/۶ درصدی حاصل شد که نشان‌دهنده کارایی بالاتر هیومیک اسید پرتوتابی شده نسبت به نوع معمولی آن می‌باشد. در تحقیقی متفاوت (Roshanian et al., 2024) و با مطالعه تأثیر هیومیک اسید (سطوح ۲ و ۴ گرم بر گلدان) مشخص شد که استفاده از هیومیک اسید باعث بهبود ویژگی‌های خاک و افزایش کمیت و کیفیت فلفل دلمه‌ای می‌گردد. تحقیق حاضر نشان داد که پرتوتابی گاما با دوز ۲۰۰۰ گرمی باعث می‌شود حتی سطح ۳ گرم هیومیک اسید عملکردی بالاتر از سطح ۴/۵ گرم هیومیک اسید معمولی داشته باشد (بهینه‌سازی مصرف). در خصوص مصرف بهینه هیومیک اسید محققان (Amiri et al., 2025) نشان دادند که غلظت ۰/۶ گرم در لیتر هیومیک اسید (در محلول‌پاشی) بهترین نتایج را دارد و غلظت‌های بالاتر اثرهای منفی بر ویتامین ث و نیترات میوه دارند. این یافته با مشاهده تحقیق حاضر که مصرف ۳ گرم هیومیک اسید پرتوتابی شده بهتر از ۴/۵ گرم عمل می‌کند، همخوانی دارد و نشان‌دهنده وجود یک دوز بهینه برای هر دو شرایط است. از سویی دیگر تحقیقات پیشین (Halpern et al., 2015) نیز اثبات نموده‌اند که اصلاح بیش از حد یا میزان مصرف نامناسب محرک‌های زیستی می‌تواند اثربخشی آن‌ها را کاهش دهد یا حتی فرآیندهای فیزیولوژیکی را مختل کند. در تحقیق حاضر، دوز ۴۰۰۰ گرمی و مصرف ۶ گرم هیومیک اسید نمونه‌ای از این اثر منفی است.

نتایج طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR)

شکل‌های ۱ تا ۵ آنالیز FTIR نمونه‌های هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوزهای ۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰ گرمی را نشان می‌دهد که بیانگر تغییرات ساختاری آن است. همانطور که در شکل ۲ مشخص است در دوز ۵۰۰ گرمی تغییرات جزئی نسبت به نمونه ۱ مشاهده شد. به نحوی که پیک هیدروکسیل (O-H) در محدوده ۳۴۰۰-۳۳۰۰

سانتی‌متر معکوس اندکی پهن‌تر گردید که نشان‌دهنده افزایش جزئی پیوندهای هیدروژنی بود. همچنین پیک‌های کربونیل ($C=O$) در ۱۷۰۰-۱۷۲۰ سانتی‌متر معکوس و کربوکسیل ($COOH$) تغییری قابل توجه نشان ندادند. شکل ۳ بیانگر تاثیر پرتوتابی گاما با دوز ۱۰۰۰ گری است و بر این اساس افزایش جزئی در شدت پیک کربوکسیل (حدود ۱۳۹۰-۱۴۰۰ سانتی‌متر معکوس) مشاهده شد که نشان‌دهنده تشکیل گروه‌های کربوکسیل جدید بود. همچنین پیک مربوط به کربن آروماتیک ($C=C$) در حدود ۱۶۰۰ سانتی‌متر معکوس اندکی کاهش یافت و نسبت آلیفاتیک به آروماتیک (شدت پیک‌های $C-H$ در ۲۸۵۰-۲۹۲۰ به $C=C$ در ۱۶۰۰) کاهش جزئی نشان داد.

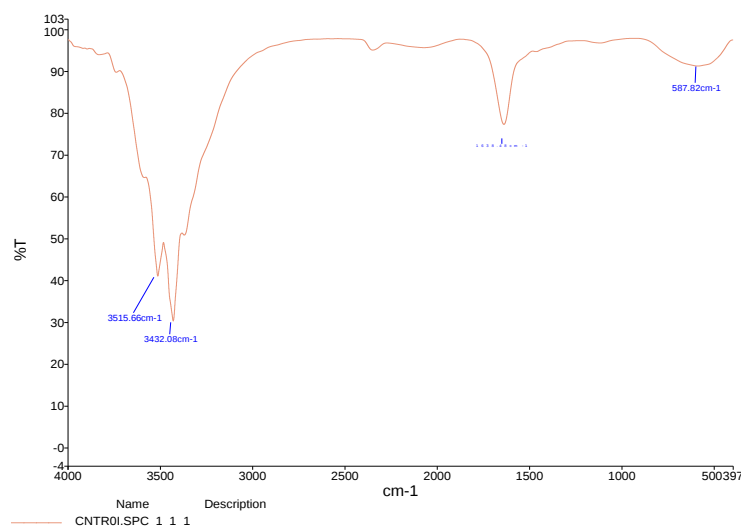
شکل ۴ تاثیر پرتوتابی با دوز ۲۰۰۰ گری را نشان می‌دهد. بیشترین تغییرات ساختاری مطلوب در این دوز مشاهده شد به نحوی که افزایش افزایش گروه‌های فنولی، الکلی و کربوکسیل ($COOH$) مشاهده شد. همچنین کاهش معنادار گروه آلیفاتیک ($C-H$) که نشان‌دهنده قطعه‌قطعه شدن زنجیره‌های هیدروکربنی است، مشاهده شد که بیانگر جذب سریع‌تر و راحت‌تر آن توسط گیاه است. علاوه بر این کاهش نسبی ترکیبات آروماتیک ($C=C$) به دلیل شکسته شدن حلقه‌های آروماتیک بزرگ مشاهده شد. بنابراین ترکیب جدید هیومیک اسید پرتوتابی شده در این دوز دارای وزن مولکولی کمتر، حل‌پذیری بیشتر و گروه‌های عاملی فعال‌تر می‌باشد.

شکل ۵ تغییرات هیومیک اسید را در اثر پرتوتابی با دوز ۴۰۰۰ گری را نشان می‌دهد که بیانگر غالب بودن اثرهای تخریبی تحت تاثیر پرتوتابی است. کاهش چشمگیر شدت تمام پیک‌ها به ویژه در ناحیه ۳۳۰۰-۳۴۰۰ (هیدروکسیل) و ۱۷۰۰-۱۷۲۰ (کربونیل) و ظاهر شدن پیک‌های جدید در ناحیه ۲۳۴۰-۲۳۶۰ سانتی‌متر معکوس مربوط به دی‌اکسید کربن جذب شده، نشان‌دهنده تخریب کامل بخشی از مولکول‌های آن است. از بین رفتن تقریباً کامل ساختار کربوکسیل و تبدیل آن به ترکیبات کربونیل ساده و کاهش شدید نسبت $O-H$ به $C-H$ به دلیل دهیدروکسیلاسیون (از دست دادن گروه‌های هیدروکسیل) از دیگر اثرهای پرتوتابی گاما در این دوز است. در مطالعه‌ای مشابه (Zhao et al., 2021) که روی پرتوتابی گامای هیومیک اسید با دوزهای ۱ تا ۱۰۰ کیلوگری انجام شد مشخص شد که پرتوتابی گاما باعث تخریب مولکول‌های هیومیک اسید و تغییر نسبت گروه‌های عاملی می‌شود، به‌طوری که گروه‌های هیدروکسیل فنولی در کسرهای با وزن مولکولی پایین غالب می‌گردند. این یافته با نتایج تحقیق حاضر (افزایش گروه هیدروکسیل در دوز ۲۰۰۰ گری) همخوانی کامل دارد.

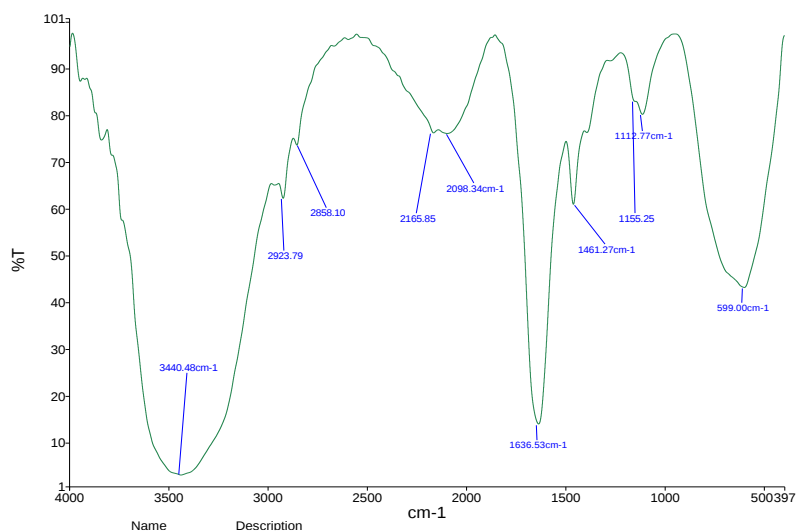
همچنین، در تحقیقات پیشین (Goraczko & Slawinski, 2008) که با استفاده از طیف‌سنجی FTIR و آنالیز عنصری انجام شد، مشخص شد که پرتوتابی گاما باعث افزایش اتم‌های اکسیژن و کاهش اتم‌های کربن در نمونه‌های هیومیک اسید می‌شود که نشان‌دهنده تخریب رادیولیتیک هیومیک اسید به موادی شبیه اسید فولویک با آب‌دوستی بیشتر و اندازه مولکولی کمتر است. این یافته دقیقاً با مشاهده کاهش وزن مولکولی و افزایش حل‌پذیری هیومیک اسید در دوز ۲۰۰۰ گری تحقیق حاضر مطابقت دارد. در پژوهشی متفاوت (Ilçin et al., 2009) در مطالعه بر روی پلی‌وینیل الکل حاوی هیومیک اسید نشان دادند که پرتوتابی گاما باعث تشکیل پیوندهای دوگانه $C=C$ و گروه‌های کربونیل $C=O$ می‌شود. این یافته با مشاهده تغییرات در پیک‌های مربوط به کربن آروماتیک و کربونیل در تحقیق حاضر تأیید می‌شود. تحقیقی دیگر (Pizzeghello et al., 2020) نشان دادند که کسرهای با وزن مولکولی پایین هیومیک اسید (حاصل از جزءبندی فیزیکی) فعالیت زیستی بیشتری نسبت به کسرهای با وزن مولکولی بالا دارند. تحقیق حاضر نشان می‌دهد که پرتوتابی گاما با دوز ۲۰۰۰ گری می‌تواند به‌طور مؤثری وزن مولکولی هیومیک اسید را کاهش داده و در نتیجه فعالیت زیستی آن را افزایش دهد. همچنین محققان اثبات کردند که افزایش گروه‌های

^۱-Fractionation

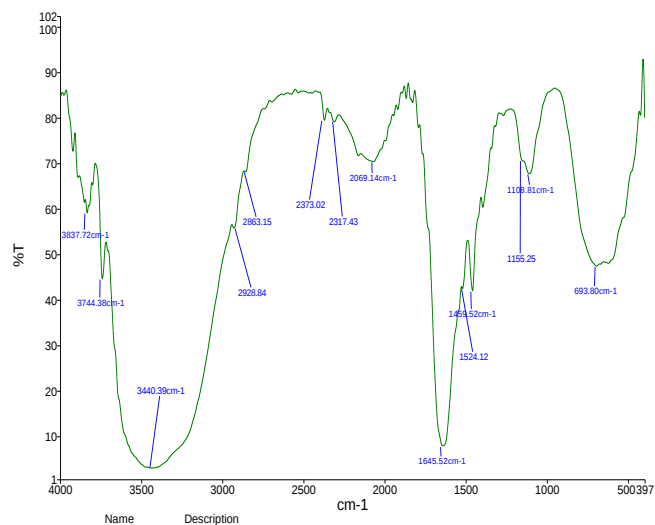
کربوکسیل در هیومیک اسید (از طریق اصلاح شیمیایی) باعث افزایش دسترسی زیستی عناصر غذایی و بهبود فعالیت آنزیم‌های خاک می‌گردد (Sun et al., 2020). در تحقیق حاضر، دوز ۲۰۰۰ گری بیشترین افزایش گروه‌های کربوکسیل را نشان داد که با حداکثر عملکرد گیاه مطابقت دارد.



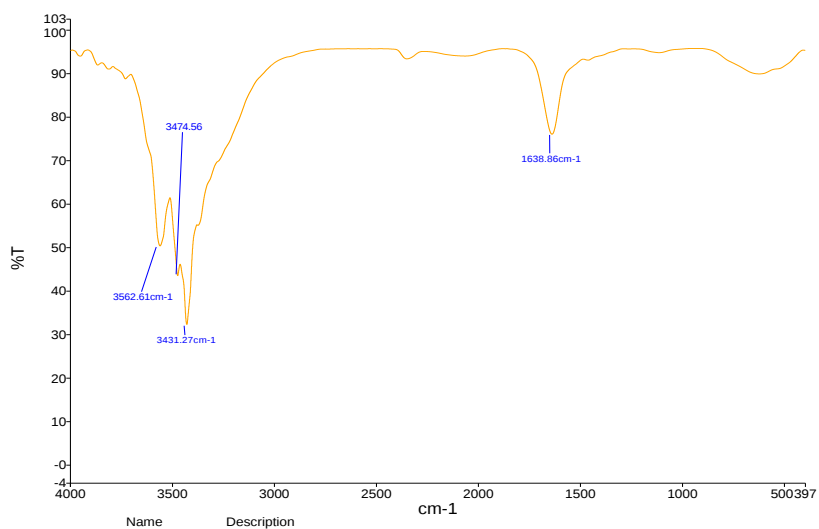
شکل ۱- آنالیز FTIR هیومیک اسید بدون پرتوتابی.



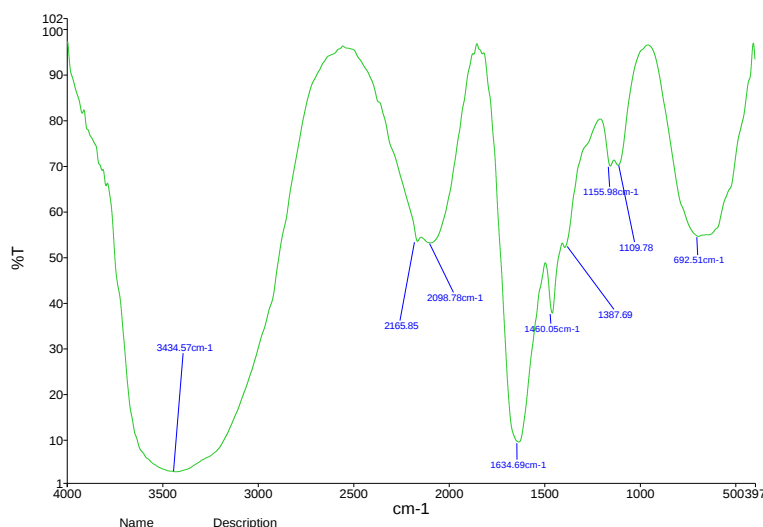
شکل ۲- آنالیز FTIR هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوز ۵۰۰ گری.



شکل ۳- آنالیز FTIR هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوز ۱۰۰۰ گری.



شکل ۴- آنالیز FTIR هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوز ۲۰۰۰ گری.



شکل ۵ - آنالیز FTIR هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوز ۴۰۰۰ گری.

ارتباط بین تغییرات FTIR و پاسخ‌های گیاه

نتایج حاصل از تحلیل آماری و طیف‌سنجی FTIR در جدول ۵ نشان داده شده است. بر اساس این نتایج تیمار ۱۴ حاوی مقدار ۳ گرم هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوز ۲۰۰۰ گری (در هر کیلوگرم خاک) بهترین تیمار این پژوهش بوده است. به نحوی که نسبت به تیمار ۱، وزن تر میوه ۱۵/۶ درصد افزایش (از ۱۰۴/۰۹ در تیمار ۱ به ۱۲۰/۳۵ گرم در تیمار ۱۴)، وزن خشک کل ۱۹/۶ درصد افزایش (از ۱۲/۰۷ در تیمار ۱ به ۱۴/۴۴ گرم در تیمار ۱۴)، و سطح برگ ۳۹ درصد افزایش (از ۷/۲۳۳ به ۷/۳۲۵ سانتی‌متر مربع) نشان داد.

جدول ۵ - ارتباط بین تغییرات ساختاری هیومیک اسید پرتوتابی شده و عملکرد گیاه.

تغییرات ساختاری کلیدی (FTIR)	وزن خشک کل (گرم)	وزن تر میوه (گرم)	دوز پرتوتابی (گری)
زنجره‌های بلند، گروه‌های عاملی محدود	۸/۴۴	۱۰۴/۰۹	۰
اکسایش سطحی جزئی	۹/۱	۱۲۰/۲۳	۵۰۰
افزایش کربوکسیل، شروع قطعه‌قطعه شدن	۱۱/۳۸	۱۷۰/۷۹	۱۰۰۰
حداکثر افزایش O-H و COOH، کاهش وزن مولکولی	۱۳/۴	۲۱۰/۳۵	۲۰۰۰
بهینه			
تخریب گسترده، کاهش تمام گروه‌های فعال	۸/۸	۱۱۷/۹۹	۴۰۰۰

نتیجه‌گیری

پرتوتابی گاما با دوز ۲۰۰۰ گری به عنوان دوز بهینه جهت اصلاح ساختار مولکولی هیومیک اسید تعیین گردید. در این دوز، تغییرات ساختاری مطلوب شامل کاهش وزن مولکولی، افزایش گروه‌های عاملی هیدروکسیل و کربوکسیل و بهبود حل‌پذیری مشاهده شد، در حالی که دوزهای پایین‌تر (۵۰۰ و ۱۰۰۰ گری) تغییرات ناکافی و دوز بالاتر (۴۰۰۰ گری) اثرهای تخریبی غالب از خود نشان دادند. مقدار ۳ گرم هیومیک اسید پرتوتابی شده در هر کیلوگرم

خاک به عنوان غلظت بهینه مصرف تعیین گردید، به طوری که مصرف مقادیر بیشتر (۴/۵ و ۶ گرم) نه تنها مزیت اضافی نداشت بلکه در برخی موارد باعث کاهش نسبی عملکرد شد که بیانگر وجود رابطه غیرخطی دوز-پاسخ می باشد. آنالیز FTIR به وضوح نشان داد که پرتوتابی گاما با دوز ۲۰۰۰ گری باعث قطعه قطعه شدن زنجیره های مولکولی هیومیک اسید، افزایش گروه های عاملی فعال و بهبود حل پذیری می گردد که این تغییرات ساختاری، جذب و کارایی زیستی هیومیک اسید توسط گیاه را افزایش می دهد.

تیمار ۱۴ (حاوی ۳ گرم هیومیک اسید پرتوتابی شده با دوز ۲۰۰۰ گری بر کیلوگرم خاک) با افزایش ۱۵/۶ درصدی وزن تر میوه، ۱۹/۶ درصدی وزن خشک کل و ۳۹ درصدی سطح برگ نسبت به تیمار ۱ (حاوی ۱/۵ گرم هیومیک اسید بدون پرتوتابی در هر کیلوگرم خاک)، به عنوان بهترین تیمار معرفی می گردد. با توجه به اینکه دوز ۴۰۰۰ گری به دلیل تخریب گسترده مولکولی) کاهش شدید پیک های FTIR، از بین رفتن ساختار کربوکسیل و دهیدروکسیلاسیون (باعث کاهش معنادار عملکرد نسبت به دوز ۲۰۰۰ گری شد)، تعیین دقیق دوز بهینه پیش از کاربرد تجاری ضروری است. به طور کلی، فناوری پرتوتابی گاما می تواند به عنوان یک روش پاک، اقتصادی، مؤثر و بدون باقیمانده شیمیایی برای افزایش کارایی هیومیک اسید به عنوان محرک زیستی در کشت گلخانه ای فلفل دلمه ای مورد استفاده قرار گیرد. همچنین پیشنهاد می شود تحقیقات تکمیلی در زمینه بررسی اثر این تیمار بر ویژگی های کیفی میوه (ویتامین ث، مواد جامد محلول، آنتوسیانین، کاروتنوئید و کاهش نیترات و نیتريت)، جذب عناصر توسط گیاه، ویژگی های بیولوژیک و شیمیایی خاک و نیز مطالعات مزرعه ای در شرایط اقلیمی مختلف انجام شود.

شفاف سازی استفاده از هوش مصنوعی

در مراحل مختلف این پژوهش اعم از ایده پردازی، طراحی، جمع آوری و تحلیل داده ها، نگارش متن و ویرایش یا ترجمه از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نشده است.

منابع مورد استفاده

References

- Asgari Lajayer, B., Najafi, N., Moghiseh, E., Mosaferi, M. & Hadian, J. (2019). Effects of gamma irradiated and non-irradiated sewage sludge on growth characteristics, leaf chlorophyll index, and macronutrients concentrations in basil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(3), 580–591. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00057-4>
- Atero-Calvo, S., Izquierdo-Ramos, M.J., García-Huertas, C., Rodríguez-Alcántara, M., Navarro-Morillo, I. & Navarro-León, E. (2024). An Evaluation of the effectivity of the green leaves biostimulant on lettuce growth, nutritional quality, and mineral element efficiencies under optimal growth conditions. *Plants*, 13(7), 917. <https://doi.org/10.3390/plants13070917>
- Aly, A.A., Eliwa, N.E. & Safwat, G. (2024). Role of gamma-irradiated sodium alginate on growth, physiological and active components of iceberg lettuce (*Lactuca sativa* L.) plant. *BMC Plant Biology*, 24(1), 185. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04905-7>
- Amiri, F., Aboutalebi Jahromi, A., Zakerin, A., Hassanzadeh Khankahdani, H. & Ejraei, A. (2025). The effect of amino acid and humic acid foliar spraying on nitrate, nitrite levels, and some biochemical traits of two greenhouse bell pepper cultivars (Paramo and Taranto). *Journal of Vegetables Sciences*, 9(17), 1-20. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22034/iuvs.2022.562928.1238>
- Balouti Dehkordi, M., Rabiei, G., Rabiei, M. & Raisi, M. (2024). The effect of gamma radiation intensity and time on storage and quality of capsicum (*Capsicum annuum* L.). *Journal of*

- Vegetables Sciences*, 8(15), 19-38. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22034/iuvs.2023.1987227.1269>
- 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>
- Bouyoucos, G.J. (1927). The hydrometer as a new method for the mechanical analysis of soils. *Soil Science*, 23(5), 343-354. <https://doi.org/10.1097/00010694-192705000-00002>
- Bremner, J.M. (1996). Nitrogen - Total. In D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnston & M.E. Sumner (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods* (SSSA Book Series No. 5, pp. 1085-1121). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c37>
- Dehghani, M.K., Ghasemi-Fasaei, R., Safarzadeh Shirazi, S. & Etemadi, M. (2024). Effects of Silicon and Humic Acid on Some Physiological Responses in Bell Pepper at Different Salinity Levels. *Iranian Journal of Soil Research*, 38(2), 181-195. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22092/ijsr.2024.364062.731>
- Distefano, M., Steingass, C.B., Leonardi, C., Giuffrida, F., Schweiggert, R. & Mauro, R.P. (2022). Effects of a plant-derived biostimulant application on quality and functional traits of greenhouse cherry tomato cultivars. *Food Research International*, 157, 111218. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111218>
- 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>
- Goraczko, W. & Slawinski, J. (2008). Luminescence from γ -irradiated humic acid. *Journal of Luminescence*, 128(7), 1155-1161. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2007.12.023>
- 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>
- Hanway, J.J. & Heidel, H. (1952). Soil analysis methods as used in Iowa State College Soil Testing Laboratory. *Iowa Agriculture*, 57, 1-13.
- 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)
- Hassanein, R.A., Hussein, O.S., Farag, I.A., Hassan, Y.E., Abdelkader, A.F. & Ibrahim, M. (2022). Salt-stressed coriander (*Coriandrum sativum* L.) responses to potassium silicate, humic acid and gamma irradiation pretreatments. *Agronomy*, 12(10), 2268. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102268>
- 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>
- Hendershot, W.H., Lalande, H. & Duquette, M. (2008). Soil reaction and exchangeable acidity. pp. 173-178. In: M.R. Carter & E.G. Gregorich (Eds.), *Soil sampling and methods of analysis*. Second Edition, CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420005271>
- Ilčin, M., Holá, O., Bakajová, B. & Kučerík, J. (2009). FT-IR study of gamma-radiation induced degradation of polyvinyl alcohol (PVA) and PVA/humic acids blends. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 283(1), 9-13. <https://doi.org/10.1007/s10967-009-0340-3>
- Kumar, A. & Kumar, G.A. (2023). Modification of lignin properties using alpha particles and gamma-rays for diverse applications. *Radiation Physics and Chemistry*, 202, 110562. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110562>

- Lindsay, W.L. & Norvell, W.A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3), 421-428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
- Loeppert, R.H. & Suarez, D.L. (1996). Carbonate and Gypsum. In D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnston & M.E. Sumner (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods* (SSSA Book Series No. 5, pp. 437-474). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c19>
- Maffia, A., Oliva, M., Marra, F., Mallamaci, C., Nardi, S. & Muscolo, A. (2025). Humic substances: Bridging ecology and agriculture for a greener future. *Agronomy*, 15(2), 410. <https://doi.org/10.3390/agronomy15020410>
- Miller, J.J. & Curtin, D. (2008). Electrical Conductivity and Soluble Ions. pp. 161-171. In: M.R. Carter & E.G. Gregorich (Eds.), In: M.R. Carter & E.G. Gregorich (Eds.), *Soil sampling and methods of analysis*. Second Edition, CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420005271>
- Mirzaei Varoei, M., Oustan, S., Reyhanitabar, A., & Najafi, N. (2023). Effect of nitrohumic acid application on some morphological and physiological characteristics of savory plant (*Satureja hortensis* L.). *Journal of Water and Soil*, 37(2), 333–352. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.80642.1244>
- Mirzaei Varoei, M., Oustan, S., Reyhanitabar, A. & Najafi, N. (2024). Effect of application of nitrogen-enriched humic acid (NHA) on morphological and physiological characteristics of maize (Single cross 704). *Journal of Water and Soil Science (Journal of Soil and Plant Science)*, 34(1), 91–111. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22034/ws.2023.54175.2501>
- Mohajjel-Shoja H, Ajir V, Mohajel Kazemi E, Lamizadeh E, Nourzadeh Hadad M. (2025). Growth, anatomical and biochemical responses of spinach plants to zinc oxide nanoparticles treatment. *Soil Fertility*, 2(1), e735507. <https://doi.org/10.30470/jsp.2025.735507>
- Movahedpour, F., Dabbagh Mohammadi Nassab, A., Najafi, N., & Amini, R. (2015). Effect of humic acid and EDTA on growth characteristics, grain yield and yield components of oilseed rape (*Brassica napus* L.) under copper toxicity stress. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 24(4), 103–121. (in Persian with English abstract)
- Muslumova, Z., Mammadli, S. & Farajov, M. (2022). Study of radioprotective properties of potassium humate in gamma irradiated wheat seedlings. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, 18(3), 53-9.
- Navarro-León, E., López-Moreno, F.J., Borda, E., Marín, C., Sierras, N., Blasco, B. & Ruiz, J.M. (2022). Effect of l-amino acid-based biostimulants on nitrogen use efficiency (NUE) in lettuce plants. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(15), 7098-7106. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12089>
- Nourzadeh Haddad, M., Hasani, A. & Karami Moghadam, 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. *Journal of Water and Soil*. 31 (1), 156–167. <https://doi.org/10.22067/jsw.v31i1.53226>.
- 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. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22034/sps.2026.71616.1036>
- Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S. & Dean, L.A. (1954). *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate*. USDA Circular No. 939, U.S. Department of Agriculture, USA.
- Pizzeghello, D., Schiavon, M., Francioso, O. et al. (2020). Bioactivity of size-fractionated and unfractionated humic substances from two forest soils. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1203. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.554894>
- Roshaniyan, M., Alinejadian-Bidabadi, A., Maleki, A. & Lakzian, A. (2024). Investigating the application of humic acid and irrigation levels on some physical, chemical, and biological properties of the soil under bell pepper cultivation. *Iranian Journal of Soil and Water Research*,

- 54(12), 1929-1943. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.365880.669582>
- 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>
- Shahnavaz, M., Nourzadeh Haddad, M., Gholami, A. & Panahpour, 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.
<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>
- Shefazadeh Shahrehabki, M., HosseiniFarahi, S.M. & Mohamadineia, G. (2020). Improvement of salt tolerance and nutrient absorption in pepper (*Capsicum annum* L.) through application of salicylic acid and humic acid. *Journal of Horticultural Science*, 34(1), 91-106. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/jhorts4.v34i1.80187>
- 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, USA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3>
- Sun, Q., Liu, J. *et al.* (2020). Humic acids derived from Leonardite to improve enzymatic activities and bioavailability of nutrients in a calcareous soil. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 13(3), 200-205. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201303.5456>
- Walkley, A. & Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Zhao, Q., Saito, T., Miyakawa, K., Sasamoto, H., Kobayashi, T. & Sasaki, T. (2022). Sorption of Cs⁺ and Eu³⁺ ions onto sedimentary rock in the presence of gamma-irradiated humic acid. *Journal of Hazardous Materials*, 428, 128211. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128211>