

Effects of irrigation regimes and biochar on water use efficiency, yield response, and growth of tomato plants

T. Jamili¹, A. Alinejadian-Bidabadi^{2*}, A. Maleki³, M. Feizian⁴ and O.A. Akbarpour⁵

Extended Abstract

Introduction:

Water scarcity has become one of the most critical challenges to sustainable agricultural production, particularly in semi-arid regions. Efficient irrigation management and soil amendments such as biochar have shown great potential in improving soil structure, enhancing water retention, and increasing crop productivity under limited water supply. Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is one of the most economically important vegetable crops, yet it is highly sensitive to water deficit. The relationship between irrigation levels and crop yield can be analyzed through production functions and water use efficiency (WUE), which provide valuable insights for optimizing water productivity. Moreover, the Relative Growth Rate (RGR) serves as an important indicator to assess plant growth dynamics under different management conditions. This study aimed to evaluate the combined effects of various irrigation levels and biochar application rates on WUE, production function, and RGR of greenhouse-grown tomato. The findings are expected to contribute to improving irrigation strategies and sustainable resource use in protected cultivation systems.

Materials and Methods:

The experiment was conducted as a factorial arrangement in a randomized complete block design with four replications in the greenhouse of Lorestan University, during winter and spring for 120 days. The mechanized polycarbonate greenhouse (20×9 m; 6 m height) provided controlled conditions, including 18–28°C temperature, 50–70% relative humidity, and 500–600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ light intensity. Experimental factors included seven irrigation regimes and three levels of rice bran biochar. The irrigation regimes were 50, 60, 70, 80, 90, 100, and 110% of crop water requirement (designated L₅₀ to L₁₁₀, respectively) based on soil moisture depletion. Biochar was applied at three levels of 0, 3, and 6 t ha⁻¹ (designated B₀, B₃, and B₆, respectively). The Biochar was produced from agricultural residues using a muffle furnace under nitrogen gas at 500°C to ensure an oxygen-free environment. In total, 21 treatment combinations were applied to 84 pots, with L₁₀₀ and B₀ serving as the control. Soil physical and chemical characteristics, including bulk density, pH, electrical conductivity (EC), cation exchange capacity (CEC), and organic carbon, were measured following standard .Water use efficiency (WUE) was calculated as the ratio of total fruit yield to the amount of water consumed. The production function between yield and evapotranspiration (ET) was fitted using a second-degree polynomial regression model to determine yield response to irrigation. The crop yield response factor (K_y) was also calculated according to the Stewart model (1977). Relative Growth Rate (RGR) was determined based on changes in plant biomass over. Data were statistically analyzed using ANOVA, and mean comparisons were performed using the least significant difference (LSD) test at the 5% significance level.

Results and Discussions:

The results demonstrated significant effects of both irrigation levels and rice bran biochar application on tomato yield, WUE, and growth parameters. The highest WUE value was recorded with (L₉₀) combined with 6 t ha⁻¹ biochar (B₆), indicating improved water productivity with minimal yield reduction compared to L₁₀₀.

¹- Former Ph.D Student, Soil Science Department, Faculty of Agriculture and, Lorestan University, Iran.

²- Associate Professor of Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Iran.

³- Associate Professor of Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Iran.

⁴- Associate Professor of Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Iran.

⁵- Assistant Professor of Agronomy and Plant Breeding Department, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Iran.

* Corresponding Author: Email: alinezhadian.a@lu.ac.ir

Received: 2025/09/02

Accepted: 2025/11/17

The nonlinear (quadratic) relationship between yield and water use was fitted between tomato yield (Y) and cumulative water use (X), with an R^2 of 0.945, indicating that 94.5% of yield variation was explained by water consumption. In this study, K_y was calculated using the Doorenbos and Kassam (1979) model and was estimated at 0.77, which is lower than the FAO value for tomato (1.05). This lower K_y suggests that, under the experimental conditions, the crop exhibited reduced yield sensitivity and a degree of tolerance to water stress. In fact, the application of biochar reduced this sensitivity by improving soil moisture retention and root environment. Although Relative Growth Rate (RGR) naturally declined after early growth, biochar treatments (particularly B_6) mitigated the negative effects of water stress enhancing RGR by 10–25%. This result highlights the role of biochar in promoting vegetative growth throughout the growing period.

Conclusion:

The results of this study indicated that the application of biochar combined with appropriate irrigation significantly improved tomato growth, yield, and water-use efficiency (WUE). The highest WUE was observed at the treatment with supply of 90% crop water requirement (L_{90}) and 6 t ha⁻¹ rice bran biochar (B_6), reflecting water savings without reducing yield. Biochar enhanced soil water retention, root environment, and nutrient uptake, while the quadratic production function revealed a nonlinear relationship between yield and water use, with a K_y of 0.77 indicating low yield sensitivity to water deficit. Relative Growth Rate was also increased in biochar-treated plants, particularly under optimal irrigation, highlighting its role in improving vegetative growth and biomass accumulation. Overall, integrating biochar with precise irrigation management can enhance water productivity, maintain yield, and support sustainable agriculture in semi-arid regions.

Keywords: Crop yield, Deficit irrigation, Production function, Tomato growth indices

Citation: Jamili, T., Alinejadian-Bidabadi, A., Maleki, A., Feizian, M., Akbarpour, O.A., 2026. Effects of irrigation regimes and biochar on water use efficiency, yield response, and growth of tomato plants. Iranian Water Research Journal.19(59). PP: 85-102 <https://dx.doi.org/10.22034/IWRG.2025.14768.2605>

Copyright:

© Authors, Published by Iranian Water Research Journal. This is an open-access article distributed under the CC-BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



تأثیر مقادیر مختلف آب و زغال زیستی بر کارایی مصرف آب، تابع تولید و رشد گیاه گوجه فرنگی

تارا جمیلی^۱، افسانه عالی نژادیان بیدآبادی^۲، عباس ملکی^۳، محمد فیضیان^۴ و امیدعلی اکبرپور^۵

چکیده

به منظور بررسی اثر مقادیر مختلف آبیاری و کاربرد زغال زیستی سبوس برنج بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی، نرخ رشد نسبی (RGR) و کارایی مصرف آب (WUE) گوجه فرنگی، آزمایشی گلدانی به صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در دو فصل زمستان و بهار به مدت ۱۲۰ روز در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان اجرا شد. تیمارها شامل هفت تیمار آبیاری (۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ درصد تأمین نیاز آبی بر اساس تخلیه‌ی رطوبتی خاک) و سه سطح زغال زیستی (۰، ۳ و ۶ تن در هکتار) بودند و تیمار آبیاری با تأمین درصد نیاز آبی گیاه همراه با عدم مصرف زغال زیستی (۰ تن در هکتار) به عنوان تیمار شاهد در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که بیشترین WUE در آبیاری ۹۰ درصد تأمین نیاز آبی همراه با کاربرد ۶ تن در هکتار زغال زیستی در هکتار به دست آمد که به ترتیب ۳/۸ و ۱/۳ برابر بیشتر از تیمار شاهد (بدون زغال زیستی) و ۳ تن در هکتار زغال زیستی بود. همچنین، کاربرد زغال زیستی همراه با آبیاری کافی موجب افزایش RGR شد، به طوری که در روزهای ۱۰ تا ۲۰ پس از کاشت، مقدار RGR تیمار ۶ تن در هکتار زغال زیستی با آبیاری ۱۰۰ درصد تأمین نیاز آبی (۰/۱۱) به مراتب بیشتر از تیمار بدون زغال زیستی (۰/۰۳) به دست آمد. به طور کلی، مقادیر مختلف آبیاری موجب نوسان RGR شدند، ولی کاربرد زغال زیستی به ویژه ۶ تن در هکتار، RGR را حدود ۱۰ تا ۲۵٪ افزایش داد و اثرات منفی کم‌آبی یا آبیاری بیش از حد را تعدیل کرد. این روند در مراحل بعدی رشد نیز ادامه یافت که بیانگر نقش زغال زیستی و کاهش تنش خشکی در بهبود رشد گیاه بود. تحلیل تابع تولید نیز نشان داد رابطه بین عملکرد و مقدار آب مصرفی از نوع درجه دوم بوده و آبیاری بیش از نیاز گیاه (L_{110}) موجب کاهش عملکرد گردید ($R^2=0/945$). به طور کلی یافته‌ها نشان داد که کاربرد ۶ تن در هکتار زغال زیستی همراه با آبیاری ۹۰ درصد تأمین نیاز آبی، بهترین تیمار برای افزایش عملکرد و کارایی مصرف آب بود، زیرا زغال زیستی با بهبود خاک و فراهم نمودن عناصر غذایی، رشد گیاه را به صورت هم‌افزا افزایش داد.

واژه‌های کلیدی: شاخص‌های رشد گوجه فرنگی، عملکرد گیاه، کم آبیاری، نرخ رشد نسبی

ارجاع: جمیلی، ت.، عالی نژادیان بیدآبادی، ا.، ملکی، ع.، فیضیان، م.، اکبرپور، ا.ع.، ۲۰۲۶. تأثیر مقادیر مختلف آب و زغال زیستی بر کارایی مصرف آب، تابع تولید و رشد گیاه گوجه فرنگی. مجله پژوهش آب و خاک ایران. ۱۹ (۵۹). صص: ۸۵-۱۰۲

<https://dx.doi.org/10.22034/IWRG.2025.14768.2605>

۱- دانش آموخته دکترای فیزیک و حفاظت خاک گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه لرستان

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان

۴- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان

۵- استادیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی دانشگاه لرستان

* نویسنده مسئول: alinezhadian.a@lu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۱

مقدمه

رشد جمعیت جهان و محدودیت منابع آب، نیاز به افزایش بهره‌وری مصرف آب در کشاورزی را بیش از پیش آشکار کرده است. آبیاری بهینه و مدیریت منابع آبی یکی از کلیدی‌ترین عوامل در تولید پایدار محصولات کشاورزی به ویژه در مناطق نیمه‌خشک و خشک محسوب می‌شود (FAO, 2017).

نهادی آب با توجه به بحران کمبود آن در مناطق خشک و نیمه خشک از جمله کشور ایران به عنوان مهم‌ترین عامل تولید، دارای اهمیت اقتصادی ویژه‌ای است. از آنجایی که در ایران بخش کشاورزی با مصرف بیش از ۹۰ درصد از منابع آب استحصال، عمده‌ترین مصرف‌کننده آب به شمار می‌رود، هرگونه صرفه‌جویی در این بخش کمک مؤثری به صرفه‌جویی در منابع موجود می‌کند (Nouri et al., 2023). از طرف دیگر تنش خشکی یک عامل نامطلوب برای رشد گیاهان در شرایط مزرعه‌ای است. این تنش تأثیر گسترده‌ای روی شرایط رشد، مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاهان دارد (Luo et al., 2023). از این رو، استفاده از شیوه‌هایی که بتوان بدون کاهش یا با کاهش معنی‌دار در تولید محصول، مقدار مصرف آب در بخش کشاورزی را کاهش داد، اجتناب ناپذیر خواهد بود. بنابراین، نیاز به افزایش کارایی مصرف آب (WUE) و ذخیره آب به‌خصوص در نواحی خشک ضروری است (Jorooni et al., 2018). یکی از این شیوه‌های مدیریتی کم‌آبایی (DI) می‌باشد که به عنوان مصرف آب کمتر از نیاز آبی گیاه، راهکاری در راستای به حداکثر رساندن کارایی مصرف آب، تولید پایدار و امنیت غذایی است (Saremi et al., 2016). هر کاهش کوچکی در عملکرد در نتیجه اجرای یک تنش ملایم رطوبتی تحت این راهکار، با سود حاصل از کاهش مصرف آب که منجر به کاهش بیش از حد رشد رویشی می‌شود، جبران می‌گردد (Shams Beyranvand et al., 2015).

(Esmailpour and Akbari, 2013) بیان کردند که به دلیل تشدید بحران آب و ازدیاد جمعیت، کم‌آبایی از جمله راهکارهایی است که در سال‌های اخیر به منظور تولید محصول با درآمد و سود حداکثر تحت شرایط کمبود آب مورد توجه قرار گرفته است. عملکرد و مزایای کم‌آبایی به مدیریت مناسب محصول بستگی دارد (Du et al., 2015). در محصولات گیاهانی مانند گوجه فرنگی (Topcu et al., 2007)، بادمجان (Kirmak and Demirtas, 2006) و خیار (Mao et al., 2003)، ایجاد تنش آبی متوسط (معادل حدود ۷۰-۸۰٪ نیاز آبی گیاه)، باعث افزایش کارایی مصرف آب نسبت به عملکرد و کاهش اندازه میوه‌ها شده است.

استفاده از مواد اصلاح‌کننده خاک، به ویژه زغال‌زیستی، به عنوان یکی از راهکارهای مؤثر برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. زغال‌زیستی با افزایش ظرفیت نگهداری آب، بهبود تهویه و ساختمان خاک و افزایش پایداری خاکدانه‌ها، می‌تواند نقش مهمی در کاهش تنش خشکی و افزایش بهره‌وری مصرف آب گیاهان داشته باشد (Ma et al., 2016; Lehmann and Joseph, 2024). نشان داده‌اند که کاربرد زغال‌زیستی موجب افزایش تخلخل و کاهش جرم مخصوص خاک، افزایش فعالیت میکروبی و تقویت ساختمان خاک می‌شود که در نهایت بر عملکرد گیاه تأثیر مثبت دارد (Tian et al., 2020).

کارایی مصرف آب شاخص مهمی در تعیین مقدار بهره‌وری آب در تولید محصولات کشاورزی است و کاهش مصرف آب با حفظ یا افزایش عملکرد، از اهداف اصلی کشاورزی پایدار به شمار می‌رود (Kilemo, 2022). علاوه بر این، نرخ رشد نسبی (RGR) و تابع تولید (Yield Production Function) گیاهان ابزارهای مفیدی برای ارزیابی پاسخ گیاه به مدیریت آب و شرایط خاکی متفاوت هستند. این شاخص‌ها امکان تعیین مناسب‌ترین مقدار آبیاری و کاربرد اصلاح‌کننده خاک را فراهم می‌آورند، به‌طوری که عملکرد گیاه و کارایی مصرف آب در بالاترین سطح ممکن حفظ شود (Doorenbos and Kassam, 1979). Obadi et al. (2023) گزارش کردند که کاربرد زغال‌زیستی موجب بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیکی و رشد گوجه‌فرنگی و افزایش نسبت عملکرد به آب مصرفی گردید.

مطالعات دیگری نیز نقش مثبت زغال‌زیستی در افزایش عملکرد و کارایی مصرف آب گوجه‌فرنگی را تأیید کرده‌اند. Lei et al. (2024) مشاهده کردند کاربرد زغال‌زیستی باعث افزایش عملکرد میوه تا حدود ۳۰٪ و بهبود کیفیت میوه، از جمله محتوای مواد جامد محلول و ویتامین C می‌گردد.

بنابراین، شواهد جدید نشان می‌دهد که استفاده از زغال‌زیستی همراه با مدیریت بهینه آبیاری، راهکاری مؤثر برای افزایش کارایی مصرف آب و عملکرد گوجه‌فرنگی در شرایط کم‌آبایی است. این نتایج اهمیت زغال‌زیستی را به‌عنوان یک ابزار پایدار در بهینه‌سازی مصرف آب و افزایش بهره‌وری در تولید گوجه‌فرنگی نشان می‌دهد. تابع تولید، رابطه بین عملکرد محصول و عوامل محدودکننده محیطی، به ویژه مقدار آب مصرفی را نشان می‌دهد و ابزاری کلیدی برای ارزیابی پاسخ گیاه به مدیریت آب است (Doorenbos and

³ Relative Growth Rate¹ Water Use Efficiency² Deficit Irrigation

(Kassam, 1979). این تابع امکان پیش‌بینی عملکرد محصول تحت شرایط مختلف آبیاری را فراهم می‌کند و به کشاورزان و محققان کمک می‌کند تا سطح بهینه مصرف آب را برای دستیابی به حداکثر بهره‌وری تعیین کنند. توابع تولید معمولاً به فرم‌های خطی، لگاریتمی، چندجمله‌ای و نمایی مدل‌سازی می‌شوند و انتخاب بهترین فرم تابع بر اساس مقادیر آماری مانند ضریب تعیین (R^2)، ریشه مربعات خطای استاندارد (RMSE) و سایر شاخص‌های اعتبارسنجی انجام می‌شود.

در کشاورزی مدرن، تابع تولید نه تنها به تعیین مصرف بهینه آب کمک می‌کند، بلکه امکان ارزیابی تأثیر ترکیب مدیریت آب و اصلاح‌کننده‌های خاک، مانند زغال‌زیستی بر عملکرد محصول را نیز فراهم می‌آورد. این تابع نشان می‌دهد که افزایش مصرف آب در برخی سطوح ممکن است موجب افزایش عملکرد شود، اما در سطوح بالاتر، شیب افزایش عملکرد کاهش یافته و بهره‌وری آب کاهش می‌یابد. بنابراین، استفاده از تابع تولید برای تعیین نقطه بهینه آبیاری، به ویژه در سیستم‌های گلخانه‌ای و در شرایط محدودیت منابع آبی، بسیار حیاتی است (Mohammadi et al., 2010). علاوه بر WUE، تابع تولید امکان سنجش اثرات متقابل اصلاح‌کننده‌های خاک و مدیریت آب بر عملکرد محصول را فراهم می‌کند. به عنوان مثال، کاربرد زغال‌زیستی با بهبود نگهداری آب، افزایش تخلخل خاک و پایداری خاکدانه‌ها می‌تواند عملکرد محصول را در سطوح مختلف آبیاری بهبود دهد و این اثر با استفاده از مدل تابع تولید قابل پیش‌بینی و ارزیابی است.

نرخ رشد نسبی یکی از شاخص‌های مهم در ارزیابی رشد گیاه است که تغییرات زیست‌توده یا اندام‌های گیاه را نسبت به زمان و اندازه گیاه نشان می‌دهد (Hunt, 1990) و به کشاورزان و پژوهشگران کمک می‌کند تا پاسخ گیاه به تنش‌های محیطی، مانند کم‌آبی یا تغییر در مدیریت خاک، را در طول دوره رشد تشخیص دهند. افزایش RGR نشان‌دهنده رشد سریع‌تر گیاه و بهره‌وری بهتر از منابع محیطی است، در حالی که کاهش آن می‌تواند ناشی از محدودیت آب، کمبود مواد غذایی یا شرایط نامطلوب خاک باشد. تحلیل RGR می‌تواند به شناسایی دوره‌های حساس رشد کمک کند که در آن‌ها مدیریت بهینه آب و اصلاح‌کننده‌های خاک مانند زغال‌زیستی بیشترین تأثیر را بر عملکرد نهایی محصول دارند. این شاخص به‌ویژه در سیستم‌های گلخانه‌ای، که شرایط محیطی قابل کنترل و منابع محدود هستند، نقش مهمی در بهبود بهره‌وری و بهینه‌سازی مصرف آب دارد (Liu et al., 2021).

ارتباط RGR با تابع تولید نیز اهمیت بالایی دارد. تابع تولید، رابطه بین عملکرد محصول و مقدار مصرف آب یا سایر نهاده‌ها را

مدل‌سازی می‌کند، در حالی که RGR نشان می‌دهد در چه مرحله‌ای از رشد گیاه بیشترین پاسخ به مدیریت منابع رخ می‌دهد. ترکیب اطلاعات حاصل از تابع تولید و RGR، امکان پیش‌بینی عملکرد محصول تحت مقادیر مختلف آبیاری و کاربرد اصلاح‌کننده‌های خاک را فراهم می‌کند و می‌تواند به تعیین بهترین راهکار مدیریت آب و افزایش کارایی مصرف آب منجر شود. این رویکرد به تصمیم‌گیری علمی و توسعه کشاورزی پایدار کمک می‌کند. گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) به عنوان یکی از مهم‌ترین محصولات گلخانه‌ای و صیفی‌جات با ارزش اقتصادی بالا، نیازمند مدیریت دقیق منابع آب برای افزایش عملکرد و بهبود کیفیت محصول است (Mohammadi et al., 2010). این گیاه با پراکنش جهانی و ارزش اقتصادی بالا، از مهم‌ترین سبزی‌ها و میوه‌های فصل گرم است. رشد آن شامل چهار مرحله بذرکاری و استقرار، رشد رویشی، گلدهی و رشد میوه و رسیدگی میوه می‌باشد (Agbna et al., 2017). تولید این محصول در گلخانه‌ها به سرعت در حال افزایش بوده و در تأمین گوجه‌فرنگی تازه نقش مهمی دارد. با این حال، گوجه‌فرنگی از محصولات جالیزی با نیاز آبی بالا (بیش از ۱۲ هزار مترمکعب در هکتار) است که در اغلب مناطق جهان به‌جز نواحی بسیار سرد کشت می‌شود. دستیابی به حداکثر عملکرد کمی و کیفی از اهداف اصلی کشت آن محسوب می‌شود (Xiukang and Yingying, 2016). گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای در ایران نیاز آبی قابل‌توجهی دارد، این مقدار می‌تواند بسته به رقم گیاه، نوع گلخانه، شرایط محیطی و مدیریت آبیاری متفاوت باشد. بر اساس مطالعات گلخانه‌ای در ایران، نیاز آبی گوجه‌فرنگی در طول دوره رشد کامل معمولاً بین ۵۰۰ تا ۵۵۰ میلی‌متر گزارش شده است (Abedi-Koupai et al., 2011).

با توجه به اهمیت گوجه‌فرنگی در کشاورزی گلخانه‌ای و محدودیت منابع آب، بررسی تأثیر ترکیبی مقادیر مختلف آب برای آبیاری و کاربرد زغال‌زیستی بر کارایی مصرف آب، رشد گیاه و تابع تولید، می‌تواند به ارائه راهکارهای عملی برای بهبود عملکرد و کاهش مصرف آب در سیستم‌های کشاورزی مدرن کمک کند. پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که کاربرد مقدار مناسب آب و زغال‌زیستی موجب افزایش پایداری خاک، بهبود شرایط رطوبتی محیط ریشه و افزایش عملکرد گیاهان مختلف می‌شود، اما مطالعات اندکی در مورد تأثیر این ترکیب بر گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای وجود دارد (Bai et al., 2019; Liu et al., 2022).

پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که حساسیت گوجه‌فرنگی به تنش آبی وابسته به مرحله رشد است، به‌طوری که مراحل گل‌دهی و تشکیل میوه بیشترین حساسیت را به کمبود آب

(2007). همچنین نیتروژن کل با استفاده از دستگاه کج‌دال (مدل PDU_VB500، کشور ایران)، فسفر قابل جذب به روش اولسن و با کمک دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل PhotonixAr 2015، کشور ایران)، پتاسیم قابل جذب به روش آمونیوم استات با دستگاه شعله سنجی (مدل Corning 410، کشور انگلستان) و کلسیم و منیزیم محلول به روش کمپلکسومتری تعیین گردید (Carter and Gregorich, 2007). جرم مخصوص ظاهری خاک به روش سیلندر (Blake and Hartg, 1986) و رطوبت ظرفیت زراعی به صورت وزنی به دست آمدند (IAEA, 2008). همچنین از عصاره گیر DTPA برای اندازه گیری شکل قابل دسترس فلزات آهن، منگنز، روی، مس و کادمیوم استفاده شد (Lindsay and Norvel, 1978) و غلظت این فلزات با دستگاه جذب اتمی (مدل FS AA 240، کشور آمریکا) اندازه گیری شد. خاک مورد مطالعه دارای بافت لوم رسی شنی و دارای ویژگی های خاک آهکی و کربن آلی کم بود (جدول ۱).

جدول ۱- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

ویژگی	واحد	مقدار
بافت خاک	-	لوم رسی شنی
رس	%	۲۶/۷
سیلت	%	۱۵
شن	%	۵۸/۳
رطوبت ظرفیت مزرعه	%	۲۳
جرم مخصوص ظاهری	g cm ⁻³	۱/۴۰
pH	-	۷/۶۱
هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC _e)	dS m ⁻¹	۰/۷۹
ظرفیت تبادل کاتیونی	cmol(+)kg ⁻¹	۲۳/۱۴
کربن آلی	%	۰/۲۵
کربنات کلسیم معادل	%	۲۳/۰
نیتروژن کل	%	۰/۰۳
فسفر قابل جذب	mg kg ⁻¹	۱/۱
پتاسیم قابل جذب	mg kg ⁻¹	۱۴۴/۰
کلسیم	meq L ⁻¹	۶/۵۳
منیزیم	meq L ⁻¹	۲/۹۱
آهن قابل دسترس	mg kg ⁻¹	۱/۲۴
منگنز قابل دسترس	mg kg ⁻¹	۰/۵۵
روی قابل دسترس	mg kg ⁻¹	۱/۰۸
مس قابل دسترس	mg kg ⁻¹	۰/۴۲۷
کادمیوم قابل دسترس	mg kg ⁻¹	<۰/۰۰۹

نشان می دهند و تنش در این دوره ها باعث کاهش معنی دار عملکرد و کیفیت میوه می شود (Alomari-Mheidat et al., 2024). مطالعات اخیر نشان داده اند که ویژگی های فیزیکی و رطوبتی خاک نقش مهمی در نحوه پاسخ گوجه فرنگی به تنش آبی دارند و اصلاح کننده هایی مانند زغال زیستی می توانند شدت اثرات این تنش را کاهش دهند (Murtaza, et al., 2024).

(Li et al., 2023) در مطالعه ی خود، تیمارهای کم آبیاری شامل تأمین حدود ۷۰-۸۵٪ نیاز آبی کامل گوجه فرنگی را در مراحل حساس رشد به کار بردند. نتایج آنها نشان داد که کاربرد زغال زیستی در این شرایط، عملکرد میوه را تا ۵۲٪ و کارایی مصرف آب را به طور قابل توجهی افزایش داد. با توجه به نتایج پژوهش های پیشین، هدف از به کارگیری زغال زیستی در این مطالعه کاهش اثرات تنش خشکی، بهبود کارایی مصرف آب و در نهایت افزایش عملکرد گیاه بود. زغال زیستی با افزایش ظرفیت نگهداری آب، بهبود تهویه و پایداری خاکدانه ها و تقویت فعالیت میکروبی، می تواند مصرف آب را کاهش داده و شرایط رطوبتی محیط ریشه را بهبود دهد (Lehmann and Joseph, 2024; Ma et al., 2016). این ویژگی ها سبب می شود کاربرد زغال زیستی در کنار مقادیر مختلف آبیاری، به ویژه در مناطق خشک، بهبود عملکرد و افزایش بهره وری آب را در محصولات گلخانه ای مانند گوجه فرنگی امکان پذیر سازد. بر این اساس، این مطالعه با هدف بررسی اثرات متقابل مقادیر مختلف آب در آبیاری و کاربرد زغال زیستی بر کارایی مصرف آب، تابع تولید و نرخ رشد نسبی گیاه گوجه فرنگی در شرایط گلخانه ای به منظور دستیابی به بهترین راهکار برای مدیریت آب و بهبود عملکرد محصول، اجرا شد.

مواد و روش ها

نمونه برداری و تجزیه خاک

برای اجرای این پژوهش، نمونه خاک سطحی از عمق ۳۰ سانتی متری مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان جمع آوری گردید. نمونه خاک پس از هوا خشک شدن، از الک ۲ میلی متری عبور داده شد و برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن اندازه گیری شد (جدول ۱). بافت خاک به روش هیدرومتری، مقادیر pH گل اشباع توسط pH متر و هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC_e) با هدایت سنج، ظرفیت تبادل کاتیونی از طریق جایگزینی استات آمونیوم، کربن آلی به روش والکی و بلاک، کربنات کلسیم معادل از طریق تیترا سیون با استفاده از سدیم استات اندازه گیری شد (Carter and Gregorich, 2007).



شکل ۱- مراحل آماده‌سازی زغال‌زیستی سبوس برنج

جدول ۲- ویژگی‌های زغال‌زیستی تهیه شده

ویژگی	واحد	مقدار
pH	-	۸/۵۱
هدایت الکتریکی (EC)	dS m ⁻¹	۱/۰۱
ظرفیت تبادل کاتیونی	cmol(+)kg ⁻¹	۳۴/۰۱
کربن آلی	%	۳۳/۵۸
نیترژن کل	%	۱/۱۹
فسفر کل	g kg ⁻¹	۰/۴۰
پتاسیم کل	g kg ⁻¹	۲۰/۰۳
کلسیم	meq L ⁻¹	۱/۹۰
منیزیم	meq L ⁻¹	۰/۸۲
آهن کل	mg kg ⁻¹	۱۴۰/۳
منگنز کل	mg kg ⁻¹	۹۵/۴
روی کل	mg kg ⁻¹	۴/۲
مس کل	mg kg ⁻¹	۲/۳
کادمیوم کل	mg kg ⁻¹	-

طرح آزمایشی و آماده‌سازی گلدان‌ها

پژوهش حاضر به صورت آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار، در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان طی دو فصل زمستان و بهار و به مدت ۱۲۰ روز اجرا شد. گلخانه مکانیزه، دو طرفه و با چهارچوب آهنی به ارتفاع ۶ متر و ابعاد تقریبی ۹×۲۰ متر و پوشش شفاف پلی‌کربنات، نور کافی برای رشد گیاه را تأمین می‌کرد. شرایط محیطی گلخانه با توجه به نوع و رقم گیاه مورد پژوهش، شامل دمای روزانه ۱۸-۲۸ درجه سلسیوس، رطوبت ۵۰-۷۰ درصد و شدت نور ۵۰۰-۶۰۰ میکرومول فوتون بر متر مربع در ثانیه بود. فاکتورهای آزمایشی شامل هفت تیمار

تهیه، آماده‌سازی و تجزیه زغال زیستی

به منظور تهیه زغال زیستی، از سبوس برنج استفاده شد که با آب معمولی و سپس با آب مقطر شسته و هوا خشک شدند. بقایای سبوس برنج پس از عبور از الک ۲ میلی‌متری، به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار داده شد. برای تهیه زغال زیستی، بقایای آون خشک شده سبوس برنج، به مدت ۴ ساعت در کوره الکتریکی در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس با نرخ افزایش دمای ۵ درجه سلسیوس در دقیقه و در شرایط عدم حضور اکسیژن (به منظور ایجاد شرایط بدون اکسیژن از جریان گاز نیترژن استفاده گردید) قرار داده شد (Cantrell et al., 2012) (شکل ۱). پس از خنک شدن زغال زیستی، برخی ویژگی‌های آن اندازه‌گیری شد (جدول ۲). مقدار pH و EC زغال زیستی در محلول ۱ به ۱۰ (زغال زیستی به آب مقطر) به دست آمد (Singh et al., 2017). ظرفیت تبادل کاتیونی آن از طریق روش اصلاح شده جایگزینی اس‌تات آمونیوم (Munera-Echeverri et al., 2018) و کربن آلی زغال زیستی به روش والکی و بلاک (Walkley and Black, 1934) اندازه‌گیری شد. غلظت فلزات آهن، منگنز، روی، مس و کادمیوم پس از هضم خاکستر بقایا در اسیدنیتریک غلیظ و آب‌اکسیژنه (Singh et al., 2017) و با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. غلظت نیترژن کل با دستگاه کج‌دال، فسفر قابل جذب با استفاده از عصاره‌گیری با نیترات آمونیوم با دستگاه اسپکتروفتومتر، غلظت پتاسیم قابل جذب به کمک دستگاه شعله سنجی و کلسیم و منیزیم محلول به روش کمپلکسومتری به دست آمد. همچنین عملکرد زغال زیستی (Y_B) از تقسیم وزن زغال زیستی تهیه شده (W_B) به وزن آون خشک بقایای خام (W_R) مطابق رابطه ۱ به دست آمد (Singh et al., 2017).

$$Y_B (\%) = \frac{W_B (g)}{W_R (g)} \times 100 \quad (1)$$

قابل ذکر است که هزینه تقریبی زغال‌زیستی به کار رفته در این مطالعه برای ۶ تن در هکتار، با فرض قیمت هر کیلوگرم ۱۰۰ هزار تومان، حدود ۹۰ میلیون تومان برآورد شد.

آبیاری شدند. قابل ذکر است که به منظور استقرار کامل گیاهان، شروع اعمال تیمارهای آبیاری، سه هفته پس از انتقال نشاءها به گلدان اصلی آغاز شد و تا پایان دوره رشد گیاه ادامه یافت.

عملکرد گیاه

پس از پایان رشد گیاه و مرحله برداشت، عملکرد میوه گوجه فرنگی از حاصل ضرب تعداد میوه در بوته به وزن میوه محاسبه شد.

اندازه گیری کارآیی مصرف آب (WUE)

مقدار WUE، نسبت عملکرد محصول به آب مصرف شده است که به صورت رابطه (۲) ارائه می گردد (Hatfield and Dold, 2019).

$$WUE = \frac{Y}{W} \quad (2)$$

در این رابطه، WUE کارآیی مصرف آب (کیلوگرم بر متر مکعب)، Y عملکرد محصول (کیلوگرم در هکتار) و W مقدار آب (متر مکعب در هکتار) می باشد.

تعیین تابع تولید محصول (تابع عملکرد)

یک راه معمول برای بیان این توابع تعیین رابطه بین نسبت عملکرد واقعی (Y_a) به ماکزیمم عملکرد تحت شرایط مدیریت داده شده (Y_{max}) و تبخیر و تعرق واقعی (ET_a) به تبخیر تعرق محصول برای شرایط بدون محدودیت آب (ET_{max}) است (Stewart et al., 1977). ارتباط بین کاهش نسبی تبخیر و تعرق و کاهش نسبی عملکرد همیشه خطی است و شیب آن فاکتور پاسخ عملکرد (K_y) نامیده می شود (Stewart et al., 1977). رابطه (Stewart et al., 1977) بین عملکرد و تبخیر و تعرق به صورت رابطه (۳) ارائه شده است.

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_{max}}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_{max}}\right) \quad (3)$$

در این معادله، Y_a مقدار عملکرد واقعی، Y_{max} مقدار عملکرد حداکثر، ET_a تبخیر تعرق واقعی، ET_{max} تبخیر تعرق حداکثر و K_y فاکتور کاهش محصول می باشد. بر پایه این مدل کاهش نسبی عملکرد متناسب با کاهش نسبی تبخیر و تعرق است. چنانچه منحنی رابطه (۳) رسم گردد، K_y شیب خط آن خواهد بود.

برای تخمین افزایش ارتفاع گیاه در یک زمان مشخص از شاخص RGR استفاده شد. این شاخص از رابطه (۴) محاسبه گردید (Rees et al., 2010).

$$RGR (cm \cdot cm^{-1} \cdot day^{-1}) = \frac{\ln x_{t2} - \ln x_{t1}}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

در این رابطه، x_{t1} ارتفاع گیاه در زمان t_1 ، x_{t2} ارتفاع گیاه در زمان t_2 و $t_2 - t_1$ دوره زمانی مشخص می باشد.

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه های آماری داده ها، به وسیله نرم افزار SAS (نسخه ۹/۲) انجام و نمودارها توسط نرم افزار Excel رسم شدند. همچنین

آبیاری ۵۰ (L_{50})، ۶۰ (L_{60})، ۷۰ (L_{70})، ۸۰ (L_{80})، ۹۰ (L_{90})، ۱۰۰ (L_{100}) و ۱۱۰ (L_{110}) درصد تأمین نیاز آبی بر اساس تخلیه رطوبتی خاک) و سه سطح زغال زیستی سبوس برنج (صفر (B_0)، ۳ (B_3) و ۶ (B_6) تن در هکتار) بودند. آزمایش حاضر با ۲۱ تیمار در ۸۴ گلدان انجام شد و تیمارهای L_{100} و B_0 به عنوان تیمار شاهد در نظر گرفته شدند. برای آماده سازی گلدان ها، ابتدا خاک در مقدار مورد نیاز کشت گیاه گوجه فرنگی از الک ۴ میلی متری عبور داده شد و در مقادیر ۱۰ کیلوگرمی برای استفاده در گلدان ها توزین شد. سپس مقادیر زغال زیستی مطابق تیمارهای آزمایشی به خاک های توزین شده اضافه گردید (شکل ۲).



شکل ۲- مراحل کاشت، داشت و برداشت گیاه گوجه فرنگی

کشت گوجه فرنگی و اعمال آبیاری

در این پژوهش، نشاء گوجه فرنگی رقم هیراد پس از ۲۱ روز به گلدان های ۱۰ کیلوگرمی با قطر ۲۳/۵ سانتی متر منتقل شد. سطح بالایی هر گلدان تقریباً ۴۳۰ سانتی متر مربع بود و در هر گلدان دو نشاء با طول حدود ۱۰ سانتی متر کشت و نگهداری شد. با توجه به این ابعاد و تعداد دو نشاء، تراکم گیاه به صورت تقریبی معادل حدود ۴۶۵۰۰ بوته در هکتار برآورد شد. عناصر غذایی مورد نیاز گیاه نیز بر اساس آزمون خاک پیش از کاشت تأمین شد و در طول دوره رشد، کنترل آفات و علف های هرز به صورت دستی انجام شد.

برای آبیاری تیمارها از آب با هدایت الکتریکی ۰/۴۵ دسی زیمنس بر متر استفاده شد. مقادیر مختلف آبیاری، L_{50} تا L_{110} بر اساس درصد تخلیه رطوبتی خاک محاسبه و تیمارها هر سه روز یکبار

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل مقادیر مختلف آبیاری و

زغال زیستی بر کارایی مصرف آب (WUE)

کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر متر مکعب)

تیمارها	B ₀	B ₃	B ₆
L ₅₀	^h ۴/۶۵	^e ۲۹/۶۲	^c ۴۰/۸۸
L ₆₀	^h ۵/۳۲	^e ۲۶/۰۲	^b ۵۰/۶۷
L ₇₀	^g ۱۱/۲۱	^d ۳۶/۳۴	^b ۵۰/۱۶
L ₈₀	^f ۱۴/۸۰	^{cd} ۳۹/۶۸	^b ۵۱/۶۳
L ₉₀	^f ۱۷/۲۰	^b ۴۸/۷۹	^a ۶۵/۲۳
L ₁₀₀	^f ۱۶/۵۶	^c ۴۲/۴۸	^a ۶۳/۱۴
L ₁₁₀	^f ۱۵/۸۱	^e ۲۷/۵۱	^b ۴۹/۱۷

میانگین‌های دارای حروف مشابه بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری (P<0.05) ندارند

بالاترین کارایی مصرف آب در تمام تیمارهای زغال‌زیستی در تیمار آبیاری L₉₀ مشاهده شد، به‌گونه‌ای که با ۱۰ درصد مصرف آب کمتر، حداکثر کارایی حاصل شد. در مقدار ۹۰ درصد تامین نیاز آبی گیاه، تیمار B₆ بالاترین کارایی مصرف آب را داشت و نسبت به تیمارهای B₀ و B₃ به ترتیب ۳/۸ و ۱/۳ برابر افزایش نشان داد. در تیمار L₁₁₀، کارایی مصرف آب در تیمارهای B₃ و B₆ به ترتیب ۴۳/۶ و ۲۴/۶ درصد کاهش معنی‌دار یافت و در سطح L₅₀ نیز کاهش شدیدی مشاهده گردید. به‌طور کلی، با وجود افزایش عملکرد میوه در برخی تیمارها، به دلیل افزایش بیشتر مصرف آب، نسبت عملکرد به آب مصرفی کاهش نشان داد. زغال‌زیستی به دلیل داشتن تخلخل بالا، ظرفیت نگهداشت آب و بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک، موجب بهبود وضعیت رطوبتی در ناحیه ریشه گوجه‌فرنگی و افزایش کارایی استفاده از آب می‌شود. این یافته با گزارش‌های Obadi et al., 2020, Sarfraz et al., 2017 و Liu et al., 2021 که نشان دادند کاربرد انواع زغال‌زیستی در کشت محصولات زراعی مختلف باعث حفظ رطوبت خاک و افزایش کارایی مصرف آب می‌گردد، هم‌راستا است. همچنین، Baiamonte et al. (2020) در برر سی گندم، سورگوم و گوجه‌فرنگی گزارش کردند که در شرایط کم‌آبیاری، استفاده از زغال‌زیستی باعث کاهش نیاز آبی گیاه، حفظ عملکرد و افزایش کارایی مصرف آب شد. آن‌ها تأکید کردند که تأثیر زغال‌زیستی بر بهبود کارایی مصرف آب در گوجه‌فرنگی و گندم بیش از سورگوم بوده است، که این امر نشان‌دهنده حساسیت بالاتر گوجه‌فرنگی به شرایط رطوبتی و نقش مؤثر زغال‌زیستی در بهینه‌سازی مصرف آب این گیاه می‌باشد. Murtaza et al. (2024) نیز نشان دادند که افزودن ۳٪ زغال‌زیستی به خاک تحت شرایط کم‌آبیاری، موجب افزایش رشد، عملکرد و کارایی مصرف آب گوجه‌فرنگی شد.

مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون LSD و در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

کارایی مصرف آب (WUE)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که کارایی مصرف آب به‌طور معنی‌داری در سطح یک درصد تحت تأثیر مقادیر آبیاری، زغال‌زیستی و اثر متقابل آن‌ها قرار گرفت (جدول ۳). همچنین عدم معنی‌داری اثر بلوک نشانگر این است که تغییرات بین بلوک‌ها قابل توجه نبوده و شرایط آزمایش در تکرارها از یک‌خواهی مطلوبی برخوردار بوده است. به بیان دیگر، بیشتر تغییرات مشاهده شده در داده‌ها ناشی از اثر تیمارها بوده و نه اختلافات محیطی یا عوامل تصادفی بین بلوک‌ها. از این رو، عدم معنی‌داری بلوک بیانگر کنترل مناسب شرایط و همگنی محیط آزمایش است.

جدول ۳- تجزیه واریانس (مقادیر F) تأثیر سطوح آبیاری و

زغال‌زیستی بر کارایی مصرف آب (WUE)

منابع تغییرات	درجه آزادی	مقادیر F	WUE
بلوک	۳	ns	۰/۵۰
آبیاری	۶	**	۹۴/۰۰
زغال‌زیستی	۲	**	۱۹۸۳/۰۰
آبیاری × زغال‌زیستی	۱۲	**	۱۱/۰۷
خطا	۶۰		
ضریب تغییرات (/)			۰/۷۸

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

مطابق جدول ۴، بیشترین مقدار WUE مربوط به تیمار B₆ در سطح آبیاری L₉₀ به دست آمد. در حالی که کاهش شدید کارایی مصرف آب در تیمارهای تحت تنش شدید آبی (L₅₀) و آبیاری بیش از حد (L₁₁₀) مشاهده گردید. این نتایج نشان می‌دهد که زغال‌زیستی با بهبود نگهداری آب در ناحیه ریشه، می‌تواند موجب افزایش کارایی مصرف آب شود. همچنین نتایج مقایسه میانگین نشان داد که با افزایش مقدار زغال‌زیستی، کارایی مصرف آب در گوجه‌فرنگی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۴).

تابع تولید

تعیین تابع تولید در این مطالعه در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. استفاده از گلخانه امکان کنترل نسبی عوامل محیطی مانند دما، رطوبت و نور را فراهم می‌کند و به این ترتیب، اثر مستقیم آبیاری و اصلاح خاک بر عملکرد گیاه با دقت بیشتری قابل ارزیابی است. بر این اساس، به منظور اشتقاق تابع آب-عملکرد از مقادیر آب مصرفی و عملکردهای متناظر با آنها در جدول ۵ استفاده گردید و تابع چند جمله‌ای درجه دوم به صورت زیر برآورد شد:

$$Y = -0.7371X^2 + 1213.8X - 265860 \quad (5)$$

که در آن، Y عملکرد محصول (کیلوگرم بر هکتار) و X ارتفاع تجمعی آب مصرفی (میلی‌متر یا کیلوگرم بر متر مربع) است. ضریب تعیین تابع تولید (R^2) برابر با ۰/۹۴۵ به دست آمد که نشان‌دهنده آن است که ۹۴/۵ درصد از تغییرات عملکرد محصول توسط مقدار مصرف آب توضیح داده می‌شود و سایر عوامل تولید ثابت در نظر گرفته شدند. لازم به ذکر است که تابع به دست آمده برای شرایط گلخانه‌ای این مطالعه معتبر است و تعمیم آن به شرایط مزرعه نیازمند مطالعات تکمیلی است.

جدول ۵- آب مصرفی و عملکرد گوجه‌فرنگی در تیمارهای مقادیر مختلف آب

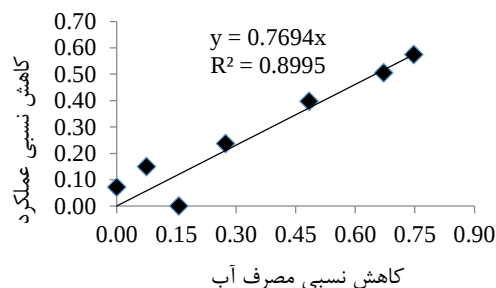
تیمارها	مقدار آب مصرفی میلی‌متر	عملکرد کیلوگرم بر هکتار
L50	۳۷۳	۱۴۷۸۱
L60	۴۳۶	۲۰۰۹۲
L70	۵۳۱	۵۳۱۱۸
L80	۶۵۰	۸۷۷۶۰
L90	۷۱۳	۱۱۲۹۳۳
L100	۷۷۶	۱۱۸۹۳۸
L110	۸۵۵	۱۲۶۰۹۷
L50	۳۲۲	۷۸۲۹۱
L60	۳۷۵	۸۶۳۷۴
L70	۴۵۸	۱۵۷۵۰۶
L80	۵۸۱	۲۰۷۶۲۱
L90	۶۴۷	۲۷۱۵۹۴
L100	۷۱۰	۲۹۰۳۰۰
L110	۷۶۸	۲۰۰۰۰۰
L50	۲۸۵	۹۵۳۸۱
L60	۳۳۰	۱۳۸۱۰۶
L70	۳۹۹	۱۷۳۹۰۳
L80	۵۲۷	۲۴۵۲۶۶
L90	۶۰۱	۳۰۴۳۸۸
L100	۶۵۳	۳۳۵۵۶۶
L110	۶۸۰	۳۰۲۳۰۹

مطابق جدول ۵، با افزایش مقدار آب آبیاری، عملکرد گوجه‌فرنگی افزایش می‌یابد، اما در مقادیر بالاتر از نیاز کامل گیاه، نرخ افزایش عملکرد نسبت به افزایش مصرف آب کاهش می‌یابد. این پدیده به ویژه در مقادیر آبیاری بالاتر از ۱۰۰ درصد تأمین نیاز آبی گیاه مشهود است. از سوی دیگر کاربرد زغال‌زیستی سبوس برنج، با بهبود نگهداری آب، تهویه و ساختمان خاک، می‌تواند کاهش عملکرد در مقادیر بالای آبیاری را جبران کرده و کارایی مصرف آب (WUE) را افزایش دهد. به عبارت دیگر، اثر متقابل زغال‌زیستی و سطح آبیاری نشان می‌دهد که در سطوح بالاتر از نیاز آبی گیاه، حضور زغال‌زیستی به حفظ عملکرد و افزایش بهره‌وری آب کمک می‌کند. مطالعات مشابه نیز نشان‌دهنده ارتباط غیرخطی بین عملکرد گوجه‌فرنگی و مقدار مصرف آب هستند. برای مثال، در تحقیقی که توسط Chen et al., (2015) انجام شد، مدل چندجمله‌ای درجه دوم با R^2 برابر با ۰/۸۹ برای عملکرد محصول گوجه‌فرنگی و R^2 برابر با ۰/۸۰ برای کارایی مصرف آب به دست آمد. همچنین، در مطالعه‌ای دیگر توسط Liu et al., (2013)، رابطه درجه دوم بین عملکرد گوجه‌فرنگی و تبخیر-تعرق (ET) با R^2 برابر با ۰/۸۶۷۱ گزارش شد.

یافته‌های مطالعات جدید نیز نشان‌دهنده ارتباط غیرخطی بین عملکرد گوجه‌فرنگی و مقدار مصرف آب هستند. به طور مثال، Obadi et al., (2024) نشان دادند که افزودن زغال‌زیستی تحت شرایط تنش شوری و کم‌آبیاری، موجب افزایش عملکرد و کیفیت میوه گوجه‌فرنگی شد. همچنین، Murtaza et al., (2024) گزارش کردند که کاربرد زغال‌زیستی باعث افزایش کارایی مصرف آب (WUE) در گوجه‌فرنگی شد (Alghamdi et al., 2023). نیز دریافتند که کاربرد زغال‌زیستی همراه با کم‌آبیاری، موجب افزایش کارایی مصرف آب و عملکرد محصول گردید.

در مطالعه‌ی Shewangizaw et al., (2024) و Jiang et al., (2024)، مدل‌های غیرخطی درجه دوم، بهترین برازش را برای پیش‌بینی عملکرد و کیفیت میوه گوجه‌فرنگی تحت رژیم‌های مختلف آبیاری و مدیریت نیروژن نشان دادند و افزایش مصرف آب در مقادیر بالا با کاهش نرخ افزایش عملکرد همراه شد.

مطابق شکل ۳، در پژوهش حاضر با افزایش مقدار مصرف آب، عملکرد گیاه گوجه‌فرنگی نیز افزایش یافت، با این حال در تیمارهای آبیاری L₁₀₀ و L₁₁₀، شیب افزایش عملکرد با افزایش مقدار آب مصرفی کاهش یافت و نشان داد که نرخ افزایش عملکرد نسبت به افزایش مقدار آب مصرفی کمتر است.



شکل ۴- تغییرات کاهش نسبی عملکرد گیاه گوجه‌فرنگی در مقابل کاهش نسبی مصرف آب (K_y)

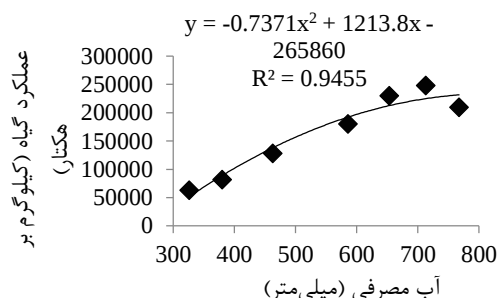
فاکتور K_y می‌تواند برای ارزیابی تحمل گیاه به تنش آبی مورد استفاده قرار گیرد. به‌طور کلی، زمانی که $K_y \leq 1$ باشد، گیاه نسبت به تنش آبی مقاوم است و زمانی که $K_y > 1$ باشد، گیاه در شرایط حساس قرار دارد (Kurunç, 2021). مقدار به‌دست‌آمده در این پژوهش با دامنه گزارش‌شده در مطالعات پیشین نیز سازگار است. (Kirda et al., 2004) در مطالعه‌ای مقدار K_y را برای گوجه‌فرنگی در شرایط گلخانه ۰/۶۸ گزارش کردند.

عوامل مدیریتی، شرایط اقلیمی، نوع خاک و تفاوت ژنتیکی ارقام در تعیین مقدار حساسیت گیاه به تنش خشکی مؤثر هستند. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که رقم گوجه‌فرنگی مورد استفاده و شرایط مدیریتی آزمایش، منجر به کاهش حساسیت گیاه نسبت به کمبود آب شده و گیاه در برابر محدودیت رطوبتی واکنش متعادل‌تری نشان داده است. این یافته به‌ویژه در تبیین رفتار تابع تولید عملکرد در برابر کاهش آب مصرفی و تحلیل پاسخ فیزیولوژیک گیاه اهمیت دارد.

علاوه بر این، مطالعات جدید نشان می‌دهند که تنظیم مقدار و زمان آبیاری بر اساس نیاز واقعی گیاه (مدیریت بهینه آبیاری) همراه با افزودن زغال زیستی می‌تواند مقدار K_y را کاهش داده و عملکرد گوجه‌فرنگی را در شرایط کم‌آبیاری حفظ کند. به‌طور مثال، Murtaza et al., (2024) نشان دادند که استفاده از زغال زیستی تحت تنش خشکی باعث افزایش کارایی مصرف آب و کاهش حساسیت گیاه به خشکی می‌شود. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که مدیریت منابع آب همراه با اصلاح خاک می‌تواند ابزاری مؤثر برای کاهش اثر منفی تنش خشکی بر عملکرد گوجه‌فرنگی باشد.

علاوه بر این، Xu et al., (2025) نشان داد که افزودن زغال زیستی به خاک‌های سبز در شرایط تنش آبی، ضمن افزایش عملکرد، باعث بهبود تحمل گیاه و کاهش ضریب حساسیت به خشکی می‌شود.

با توجه به تیمارهای آب، دامنه‌ی آب مصرفی در این تحقیق ۳۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر به دست آمد و در این دامنه آب و تحت شرایط مشابه مکان اجرای پژوهش، استفاده از معادله برازش داده شده برای پیش‌بینی عملکرد گوجه‌فرنگی در محدوده کاربرد مقادیر مختلف مصرف آب، رویکردی مناسب و مؤثر است.



شکل ۳- تغییرات عملکرد گیاه گوجه‌فرنگی نسبت به مقادیر مختلف آب مصرفی

ضریب حساسیت گیاه (K_y)

طبق نتایج به‌دست‌آمده، با افزایش تنش خشکی، عملکرد گوجه‌فرنگی کاهش می‌یابد و بیشترین عملکرد در شرایطی مشاهده شد که تبخیر و تعرق در حداکثر مقدار خود قرار داشت؛ چرا که کاهش رطوبت خاک موجب محدود شدن دسترسی ریشه به آب، کاهش جذب مؤثر آب و عناصر غذایی و در نتیجه کاهش رشد و عملکرد گیاه می‌شود. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که رژیم‌های مختلف کم آبیاری اثر قابل توجهی بر مقادیر ضریب حساسیت گیاه (K_y) دارند (Patanè et al., 2011). در مطالعه حاضر، ضریب حساسیت گیاه به تنش خشکی (K_y) بر اساس رابطه (Doorenbos and Kassam, 1979) محاسبه شد و مقدار آن ۰/۷۷ به دست آمد (شکل ۴) که این مقدار در مقایسه با مقدار گزارش‌شده برای گوجه‌فرنگی در راهنمای فائو (۱/۰۵) پایین‌تر است و نشان می‌دهد که شدت پاسخ عملکرد نسبت به کاهش تبخیر و تعرق در شرایط این تحقیق کمتر بوده است. در واقع، K_y کمتر از ۱ بیانگر آن است که گیاه کاهش نسبی عملکردی کمتر از کاهش نسبی آب مصرفی تجربه کرده و از درجه‌ای از تحمل به تنش خشکی برخوردار بوده است (Doorenbos and Kassam, 1979).

ارتفاع گیاه گوجه‌فرنگی در نهایت توانست رشد گیاه را بهبود بخشد. این نتایج با مطالعات پیشین همخوانی دارد و تأیید می‌کند که کاربرد زغال‌زیستی همراه با آبیاری مناسب می‌تواند سازگاری گیاه گوجه‌فرنگی را با کمبود آب افزایش دهد.

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر متقابل مقادیر مختلف آبیاری و زغال‌زیستی بر ارتفاع گیاه گوجه‌فرنگی

تیماها	ارتفاع (سانتی‌متر)		
	B ₆	B ₃	B ₀
L ₅₀	de _{۱۳۳/۲۵}	fg _{۱۲۹/۶۲}	j _{۱۲۱/۵۰}
L ₆₀	de _{۱۳۳/۳۸}	f _{۱۲۹/۷۵}	j _{۱۲۲/۲۵}
L ₇₀	cd _{۱۳۴/۳۸}	e _{۱۳۲/۵۰}	i _{۱۲۴/۷۵}
L ₈₀	b _{۱۳۷/۰۰}	c _{۱۳۴/۷۵}	h _{۱۲۶/۳۸}
L ₉₀	a _{۱۳۸/۷۵}	c _{۱۳۵/۶۲}	h _{۱۲۶/۷۵}
L ₁₀₀	a _{۱۳۹/۸۵}	c _{۱۳۵/۵۰}	g _{۱۲۸/۳۸}
L ₁₁₀	a _{۱۳۹/۸۸}	c _{۱۳۵/۲۵}	fg _{۱۲۸/۶۲}

ارتباط تابع تولید و نرخ رشد نسبی (RGR) در گوجه‌فرنگی ارتباط بین مصرف آب، نرخ رشد نسبی (RGR) و عملکرد گوجه‌فرنگی نشان‌دهنده اهمیت مدیریت بهینه آبیاری و اصلاح خاک است. نتایج این مطالعه نشان داد که با کاهش تنش خشکی و کاربرد زغال‌زیستی، به ویژه در مراحل حساس رشد رویشی و رسیدگی میوه، RGR افزایش و رشد گیاه بهبود یافت.

نرخ رشد نسبی نیز با مصرف آب و کاربرد زغال‌زیستی ارتباط نزدیکی دارد. نتایج نشان دادند که با افزایش تنش خشکی، RGR کاهش می‌یابد، اما افزودن زغال‌زیستی به خاک به ویژه در ابتدای دوره رشد رویشی و زمان رسیدگی میوه، موجب افزایش RGR و بهبود رشد رویشی گیاه می‌شود (Murtaza et al., 2024). این موضوع بیانگر این است که بهبود شرایط رطوبتی خاک و افزایش مواد غذایی در دسترس گیاه، اثر مستقیم بر رشد نسبی و نهایتاً عملکرد محصول دارد.

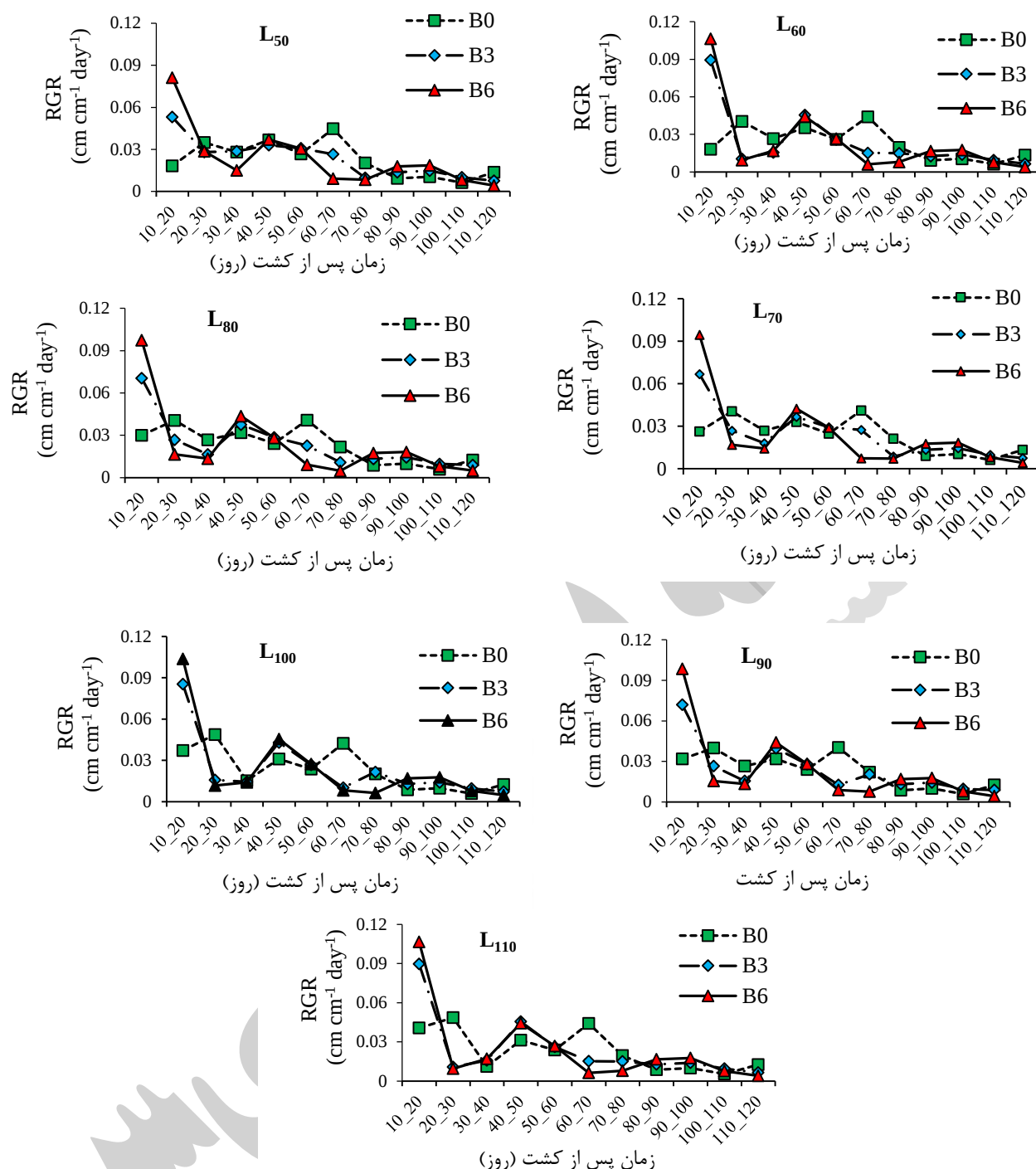
ارتباط بین تابع تولید و RGR نیز از این نظر اهمیت دارد که افزایش RGR در مراحل اولیه رشد، به معنی افزایش زیست‌توده و عملکرد نهایی میوه است. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که کاربرد زغال‌زیستی موجب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و کاهش اثر تنش خشکی می‌شود، که این امر موجب افزایش RGR و عملکرد گوجه‌فرنگی می‌گردد (Adekiya et al., 2025; Xu et al., 2025).

این یافته‌ها تأکید می‌کنند که مدیریت منابع آب همراه با اصلاح خاک، به‌ویژه با کاربرد زغال‌زیستی، می‌تواند ابزار مؤثری برای کاهش اثر منفی تنش خشکی بر عملکرد گوجه‌فرنگی و بهبود K_y باشد.

نرخ رشد نسبی (RGR)

نرخ رشد نسبی از ارتفاع گیاه محاسبه شده و افزایش ارتفاع گیاه موجب افزایش RGR می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود که با افزایش ارتفاع گیاه در مقادیر بیشتر آبیاری و کاربرد زغال‌زیستی، RGR افزایش یابد (جدول ۶). مطابق شکل ۵، RGR در همه‌ی تیمارها پس از اوایل رشد به‌طور طبیعی کاهش می‌یابد، اما شدت این کاهش تحت تنش کم‌آبی بیشتر است، به‌طوری‌که در مقادیر کم‌آبیاری (L₅₀–L₇₀) مقدار RGR تا حدود ۳۰–۵۰ درصد کمتر از تیمارهایی است که آب کافی دریافت می‌کنند، در حالی که کاربرد زغال‌زیستی به‌ویژه B₆ در اکثر دوره‌های رشد باعث افزایش ۱۰ تا ۲۵ درصدی RGR نسبت به خاک بدون زغال‌زیستی شده و اثرات منفی کمبود یا زیادآبی را تعدیل کرده است (شکل ۵). بنابراین از آنجا که RGR یکی از شاخص‌های کلیدی برای تحلیل پویایی رشد در زمان است، ارائه منحنی‌های آن برای ارزیابی اثرات آبیاری و زغال‌زیستی ضروری است و اهمیت زیادی در تبیین روند رشد گوجه‌فرنگی دارند، زیرا نشان می‌دهد که در تیمارهای با آبیاری مناسب (به‌ویژه L₉₀) و کاربرد زغال‌زیستی (به‌ویژه B₆) مقدار RGR در طی دوره رشد به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است. این روند در مراحل ابتدایی رشد (۱۰–۲۰ روز پس از کشت) و دوره رسیدگی میوه و تولید رنگ قرمز میوه (۸۰–۱۰۰ روز پس از کشت) واضح‌تر بوده و نقش بهبود رطوبت خاک و تغذیه خاک توسط زغال‌زیستی را نشان می‌دهد. این یافته‌ها با نتایج Xu et al., (2025) نیز همخوانی دارد. آنها نشان دادند که کاربرد زغال‌زیستی ضمن بهبود شرایط فیزیکی و رطوبتی خاک، می‌تواند RGR و رشد رویشی صیفی‌جات، از جمله گوجه‌فرنگی، را افزایش دهد. بنابراین، ترکیب مدیریت بهینه آب و اصلاح خاک با زغال‌زیستی یک ابزار مؤثر برای ارتقای نرخ رشد نسبی گیاه در شرایط تنش خشکی محسوب می‌شود.

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که کاربرد زغال‌زیستی در خاک‌های تحت تنش خشکی می‌تواند با بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک و افزایش ظرفیت نگهداری آب، رشد گیاه و عملکرد را بهبود ببخشد (Murtaza et al., 2024). در مطالعه حاضر، اثر زغال‌زیستی و آبیاری مناسب بر نرخ رشد نسبی (RGR) و



شکل ۵- تغییرات نرخ رشد نسبی (RGR) گوجه‌فرنگی در دوره‌ی رشد تحت مقادیر مختلف آبیاری (L_{50} تا L_{100}) و زغال‌زیستی (B_0 , B_3 و B_6)

در مجموع یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که کاربرد زغال‌زیستی همراه با مقدار مناسب آب آبیاری با بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک، موجب افزایش نرخ رشد نسبی و عملکرد گوجه‌فرنگی می‌شود. بدین ترتیب، هدف اصلی از به‌کارگیری این راهکار، یعنی کاهش تنش خشکی و ارتقای عملکرد گیاه، محقق گردید.

نتایج نشان می‌دهند که مدیریت بهینه آب و کاربرد زغال‌زیستی به عنوان اصلاح‌کننده خاک، نه تنها RGR را در دوره‌های حساس رشد افزایش می‌دهد، بلکه به حداکثرسازی عملکرد نهایی محصول نیز کمک می‌کند. این یافته‌ها با مطالعات قبلی بر گوجه‌فرنگی و سایر سبزیجات سازگار است و تأکید می‌کند که ارتباط غیرخطی بین مصرف آب، نرخ رشد و عملکرد میوه باید در برنامه‌ریزی آبیاری و مدیریت خاک لحاظ شود.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد زغال‌زیستی و مقدار مناسب آب تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود رشد، عملکرد و کارایی مصرف آب گوجه‌فرنگی دارد. بیشترین مقدار WUE در سطح آبیاری ۹۰ درصد تأمین نیاز آبی (L_{90}) و کاربرد ۶ تن در هکتار زغال‌زیستی (B_6) مشاهده شد که بیانگر صرفه‌جویی در مصرف آب بدون کاهش معنی‌دار عملکرد بود. زغال‌زیستی با افزایش ظرفیت نگهداری آب، بهبود تهویه و پایداری خاکدانه‌ها، موجب بهبود شرایط ریشه و افزایش جذب عناصر غذایی گردید. تحلیل تابع تولید نشان داد که رابطه بین عملکرد و مصرف آب از نوع غیرخطی و درجه دوم است. در نتیجه، افزایش بیش از حد آبیاری اثر معنی‌داری بر عملکرد ندارد. مقدار K_y (۰/۷۷) نشان داد که حساسیت عملکرد به کاهش تبخیر و تعرق در شرایط این پژوهش نسبتاً پایین بوده و با کاهش عملکرد کمتری همراه بوده است. شاخص رشد نسبی (RGR) نیز در تیمارهای حاوی زغال‌زیستی به‌ویژه در سطوح مناسب آبیاری افزایش یافت که نشان‌دهنده بهبود رشد رویشی و تجمع زیست‌توده بود. در مجموع، استفاده از زغال‌زیستی همراه با مدیریت دقیق آبیاری موجب افزایش کارایی مصرف آب، بهبود ساختمان خاک و حفظ عملکرد در شرایط کم‌آبی شد. بنابراین، این روش می‌تواند به‌عنوان یک راهکار پایدار برای افزایش بازده تولید و پایداری کشاورزی در مناطق نیمه‌خشک توصیه شود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از کارشناسان آزمایشگاه مرکزی دانشگاه لرستان به خاطر همکاری و انجام برخی آزمایش‌ها تشکر می‌نمایند.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید همه نویسندگان است.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های این پژوهش بخشی از داده‌های مربوط به رساله دکتری نویسنده اول می‌باشد و داده‌های استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

نویسنده اول: اجرای پژوهش، انجام مراحل آزمایشگاهی و گلخانه‌ای و انجام تحلیل آماری داده‌ها
نویسنده دوم: راهنمایی، تحلیل داده‌ها، نگارش مقاله، بررسی و کنترل نتایج و ارسال مقاله به نشریه
نویسندگان سوم، چهارم و پنجم: ویرایش، بازبینی و بازخوانی متن مقاله.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنها می‌باشد.

منابع

- 1- Abedi-Koupai, J., Eslamian, S.S. and Zareian, M.J., 2011. Measurement and modeling of water requirement and crop coefficient for cucumber, tomato and pepper using microlysimeter in greenhouse. *Journal of soil and plant intractions*, 7(2), pp. 51-63. <https://doi.org/20.1001.1.20089082.1390.2.3.6.1>
- 2- Adekiya, A.O., Ogunbode, T.O., Esan, V.I., Adedokun, O., Olatubi, I.V. and Ayegboyin, M.H., 2025. Short term effects of biochar on soil chemical properties, growth, yield, quality, and shelf life of tomato. *Scientific Reports*, 15, 24965. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10411-5>
- 3- Agbna, G.H.D., She, D., Liu, Z., Elshaikh, N. A., Shao, G.C. and Timm, L.C., 2017. Effects of deficit irrigation and biochar addition on the growth, yield, and quality of tomato. *Scientia Horticulturae*, 222, pp. 90–101. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.05.004>
- 4- Alghamdi, A.G., Aly, A.A., Al-Omran, A.M., Louki, I.I. and Alkhasha, A., 2023. Tomato yield responses to deficit irrigation and partial root zone drying methods using biochar: A greenhouse experiment in a loamy sand soil using fresh and saline irrigation water. *Water*, 15(15), 2797. <https://doi.org/10.3390/w15152797>
- 5- Alomari-Mheidat, M., Corell, M., Martín-Palomo, M.J., Castro-Valdecantos, P., Medina-Zurita, N., de Sosa, L.L. and Moriana, F., 2024. Moderate Water Stress Impact on Yield Components of Greenhouse Tomatoes in Relation to Plant Water Status. *Plants*, 13(1), 128. <https://doi.org/10.3390/plants13010128>
- 6- Bai, N., Zhang, H., Li, S., Zheng, X., Zhang, J., Zhang, H., Zhou, S., Sun, H. and Lv, W., 2019. Long-term effects of straw and straw-derived biochar on soil aggregation and fungal community in a rice–wheat rotation system. *PeerJ Life and*

- Presidency of Germany (Land and Water Division, FAO). Rome: FAO. 33 p.
- 17- Hatfield, J.L. and Dold, C., 2019. Water-Use Efficiency: Advances and Challenges in a Changing Climate. *Front Plant Science*, 10, <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00103>
 - 18- Hunt, R. 1990. Basic growth analysis: Plant growth analysis for beginners. London, UK: *Unwin Hyman*. 112 p. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-010-9117-6>
 - 19- International Atomic Energy Agency (IAEA), 2008. Field estimation of soil water content. Training course series No. 30. Vienna: IAEA. Available at: <https://www.iaea.org/publications/7801/field-estimation-of-fsoil-water-content>.
 - 20- Jiang, X., Fan, M., Wang, T., Gong, S., Hao, W., Ye, Y., Zhao, Y., Cui, N., Zhao, H. and Zhao, L., 2024. Modeling tomato yield and quality responses to water and nitrogen deficits with a modified crop water production function. *Horticulturae*, 10(9), 898. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10090898>
 - 21- Jorooni, E., Alinejadian Bidabadi, A. and Maleki, A., 2018. Determination of crop water production function and response of total dry matter and grain yield to deficit irrigation in Maize. *Journal of Water and Irrigation Management*, 7(2), pp. 241–256. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/jwim.2017.235685.546>.
 - 22- Kilemo, D.B. 2022. The Review of Water Use Efficiency and Water Productivity Metrics and Their Role in Sustainable Water Resources Management. *Open Access Library Journal*, 9(1), 106885. DOI: [10.4236/oalib.1107075](https://doi.org/10.4236/oalib.1107075)
 - 23- Kirda, C., Cetin, M., Dasgan, Y., Topcu, S., Kaman, H., Ekici, B., Derici, M.R. and Ozguven, A. I., 2004. Yield response of greenhouse grown tomato to partial root drying and conventional deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 69(3), pp. 191-201. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.04.008>.
 - 24- Kirnak, H. and Demirtas, M.N., 2006. Effects of different irrigation regimes and mulches on yield and macronutrition levels of drip-irrigated cucumber under open field conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 29, pp. 1675–1690. <https://doi.org/10.1080/01904160600851619>
 - 25- Kurunç, A., 2021. Effects of water and salinity stresses on growth, yield, and water use of iceberg lettuce. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(13), pp. 5688–5696. doi: [10.1002/jsfa.11223](https://doi.org/10.1002/jsfa.11223)
 - Environment*, 6, e6171. <https://doi.org/10.7717/peerj.6171>
 - 7- Baiamonte, G., Minacapilli, M. and Crescimanno, G., 2020. Effects of biochar on irrigation management and water use efficiency for three different crops in a desert sandy soil. *Sustainability*, 12(18), 7678. <https://doi.org/10.3390/su12187678>
 - 8- Blake, G.R. and Hartge, K.H., 1986. Bulk density. In: Klute, A., Ed., *Methods of Soil Analysis, Part 1- Physical and Mineralogical Methods*, 2nd Edition, Agronomy Monograph 9, American Society of Agronomy—Soil Science Society of America, Madison, pp. 363-382.
 - 9- Cantrell, K.B., Hunt, P.G., Uchimiya, M., Novak, J.M. and Ro, K.S., 2012. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource Technology*, 107, pp. 419–428. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.084>
 - 10- Carter, M.R. and Gregorich, E.G., 2007. *Soil Sampling and Methods of Analysis* (2nd ed.). CRC Press, Boca Raton, FL. 1264 p. <https://doi.org/10.1201/9781420005271>
 - 11- Chen, S., Zhenjiang, Z., Andersen, M.N. and Hu, T.T., 2015. Tomato yield and water use efficiency- Coupling effects between growth stage specific soil water deficits. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil & Plant Science*, 65(5), pp. 460–469. <https://doi.org/10.1080/09064710.2015.1024279>
 - 12- Diedhiou, S., Maiga, A., Himbane, P.B., Iboko M.P., Ndiaye, L.G. and Diedhiou, I., 2024. The Biochar Amendment improves tomato growth and yield under deficit irrigation in sandy loam soil in Senegal. *Scientific World Journal*, [doi: 10.1155/2024/9945354](https://doi.org/10.1155/2024/9945354).
 - 13- Doorenbos, J. and Kassam, A.H., 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage paper No. 33, FAO, Rome, Italy, 193 p.
 - 14- Du, T., Kang, S., Zhang, J. and Davis, W.J., 2015. Deficit irrigation and sustainable water-resource strategies in agriculture for China's food security. *Journal of Experimental Botany*, 66(8), pp. 2253–2269. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv034>
 - 15- Esmailpour, B. and Akbari, M., 2013. Evaluation the effect of deficit irrigation on growth properties, yield and post harvest quality of two tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivars under Mindoab conditions. *Journal of Agroecology*, 5(2), pp. 178-187. [In Persian]. <https://doi.org/10.22067/jag.v5i2.24497>
 - 16- FAO. 2017. Water for Sustainable Food and Agriculture – A report produced for the G20

- 36-Mohammadi, M., Liaqa, A. and Molavi, H., 2010. Optimization of water use and determination of tomato sensitivity coefficients under combined salinity and drought stress in Karaj. *Journal of Water and Soil*, 24(3), pp. 583–592. [In Persian]. doi: [10.22067/jsw.v0i0.3629](https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.3629).
- 37-Munera-Echeverri, J.L., Martinsen, V., Strand, L.T., Zivanovic, V., Cornelissen, G. and Mulder, G., 2018. Cation exchange capacity of biochar: An urgent method modification. *Science of The Total Environment*, 642, pp. 190-197. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06>.
- 38-Murtaza, G., Usman, M., Iqbal, J., Tahir, M N., Elshikh, MS., Alkahtani, J., Toleikienè, M., Iqbal, R., Akram, M.I. and Gruda, N.S., 2024. The impact of biochar addition on morpho-physiological characteristics, yield and water use efficiency of tomato plants under drought and salinity stress. *BMC Plant Biology* 24, 356. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05058-9>.
- 39-Nouri, M., Homace, M., Pereira, L. S. and Bybordi, M., 2023. Water management dilemma in the agricultural sector of Iran: A review focusing on water governance. *Agricultural Water Management*, 288, 108480. DOI: [10.1016/j.agwat.2023.108480](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108480)
- 40-Obadi, A., AlHarbi, A., Abdel-Razzak, H. and Al-Omran, A., 2020. Biochar and compost as soil amendments: effect on sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) growth under partial root zone drying irrigation. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 508. doi: [10.1007/s12517-020-05529-x](https://doi.org/10.1007/s12517-020-05529-x).
- 41-Obadi, A., AlHarbi, A., Alomran, A., Alghamdi, A. G., Louki, I. Alkhasha, A. and Alqardaei, T., 2024. Enhancement in tomato yield and quality using biochar amendments in greenhouse under salinity and drought stress. *Plants*, 13, <https://doi.org/10.3390/plants13121634>
- 42-Obadi, A., Alharbi, A., Alomran, A., Alghamdi, A.G., Louki, I. and Alkhasha, A., 2023. Effect of biochar application on morpho-physiological traits, yield, and water use efficiency of tomato crop under water quality and drought stress. *Plants*, 12(12), 2355. doi: [10.3390/plants12122355](https://doi.org/10.3390/plants12122355).
- 43-Patanè, C., Tringali, S., and Sortino, O., 2011. Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions. *Scientia Horticulturae*, 129(4), pp. 590-596. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.04.030>
- 44-Rees, M., Osborne, C.P., Woodward, F.I., Hulme, S.P., Turnbull, L.A. and Taylor, S.H., 2010. Partitioning the components of relative growth rate: how important is plant size variation? *The American*
- 26-Lehmann, J. and Joseph, S. (Eds.), 2024. Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation (3rd ed.). *Routledge*. 884 p.
- 27-Lei, Y., Xu, L., Wang, M., Sun, S., Yang, Y. and Xu, C., 2024. Effects of biochar application on tomato yield and fruit quality: A meta-analysis. *Sustainability*, 16(15), 6397. <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/15/6397>
- 28-Li, X., Zheng, L. and Ma, J. 2023. Biochar Improves Greenhouse Tomato Yield: Source–Sink Relations under Deficit Irrigation. *Agronomy*, 13(9), 2336. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092336>
- 29-Lindsay, W.L. and Norvell, W.A., 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3), pp. 421–428. doi: [10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x](https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x).
- 30-Liu, H., Duan, A.W., Li, F.S., Sun, J.S., Wang, Y.C. and Sun, C.T., 2013. Drip irrigation scheduling for tomato grown in solar greenhouse based on pan evaporation in North China Plain. *Journal of Integrative Agriculture*, 12(3), pp. 520–531. doi: [10.1016/S2095-3119\(13\)60253-1](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60253-1).
- 31-Liu, X., Wei, Z., Manevski, K., Liu, J., Ma, Y., Andersen, M. N. and Liu, F., 2021. Partial root-zone drying irrigation increases water-use efficiency of tobacco plants amended with biochar. *Industrial Crops and Products*, 166, 113487. doi: [10.1016/j.indcrop.2021.113487](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113487).
- 32-Liu, X., Zhang, J., Wang, Q., Chang, T., Shaghaleh, H. and Hamoud, Y.A., 2022. Improvement of photosynthesis by biochar and vermicompost to enhance tomato (*Solanum lycopersicum* L.) yield under greenhouse conditions. *Plants*, 11(23), 3214. <https://doi.org/10.3390/plants11233214>
- 33-Luo, Q., Xie, H., Chen, Z., Ma, Y., Yang, H., Yang, B. and Ma, Y., 2023. Morphology, photosynthetic physiology and biochemistry of nine herbaceous plants under water stress. *Frontiers in Plant Science*, 198, pp. 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107116>
- 34-Ma, N., Zhang, L., Zhang, Y., Yang, L., Yu, C., Yin, G., Doane, T.A., Wu, Z., Zhu, P. and Ma, X., 2016. Biochar improves soil aggregate stability and water availability in a Mollisol after three years of field application. *PLOS ONE*, 11(5), e0154091. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154091>
- 35-Mao, X., Liu, M., Wang, X., Liu, C., Hou, Z. and Shi, J., 2003. Effects of deficit irrigation on yield and water use of greenhouse grown cucumber in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 61, pp. 219–228. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(03\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(03)00022-2)

- organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), pp. 29–38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- 54- Xiukang, W. and Yingying, X., 2016. Evaluation of the effect of irrigation and fertilization by drip fertigation on tomato yield and water use efficiency in greenhouse. *International Journal of Agronomy*, 4(16), pp. 1–10. <https://doi.org/10.1155/2016/3961903>
- 55- Xu, X., Wang, H., Egun, I.L., Gan, T., Huang, Z., Liu, H., Gustave W. and Zhang, X., 2025. Enhancing vegetable yield and quality with biochar: prospects and challenges. *Frontiers in Plant Science*, 14, <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1147208>
- Naturalist*, 176(6), E152–E161. [doi: 10.1086/657037](https://doi.org/10.1086/657037)
- 45- Saremi, M., Farhadi, B., Maleki, A. and Farasati, M., 2016. Effects of deficit irrigation on yield, yield components and water use efficiency of lentil in Khorramabad. *Journal of Plant Production Research*, 22(3), pp. 337–342. [In Persian]. <https://doi.org/20.1001.1.23222050.1394.22.3.17.8>
- 46- Sarfraz, R., Shakoor, A., Abdullah, M., Arooj, A., Hussain, A. and Xing, S., 2017. Impact of integrated application of biochar and nitrogen fertilizers on maize growth and nitrogen recovery in alkaline calcareous soil. *Soil Science and Plant Nutrition*, 63(5), pp. 488–498. <https://doi.org/10.1080/00380768.2017.1376225>
- 47- Shams Beyranvand, M., Boroumand Nasab, S., Maleki, A. and Daneshvar, M., 2015. Effect of deficit irrigation on seed yield and some qualitative characters of soybean cultivars in Khorramabad. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 38(3), pp. 13–21. [In Persian]. <https://doi.org/10.22055/jise.2015.11471>
- 48- Shewangizaw, B., Kassie, K., Assefa, S., Lemma, G., Gete, Y., Getu, D., Getanh, L., Shegaw, G. and Manaze, G., 2024. Tomato yield and water use efficiency as affected by nitrogen rate and irrigation regime in the central low lands of Ethiopia. *Scientific Reports*, 14, 13307. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62884-5>
- 49- Singh, B., Camps-Arbestain, M. and Lehmann, J., 2017. Biochar: A guide to analytical methods. Melbourne: *CSIRO Publishing*. 320 p.
- 50- Stewart, J.I., Hagan, R.M., Pruitt, W.O., Danielson, R.E., Franklin W.T., Hanks, J., Riley J.P. and Jackson E.B., 1977. Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil. *Reports*. Paper 67. https://digitalcommons.usu.edu/water_rep/67
- 51- Tian, X., Li, Z., Wang, L., Wang, Y., Li, B., Duan, M. and Liu, B., 2020. Effects of biochar combined with nitrogen fertilizer reduction on rapeseed yield and soil aggregate stability in upland of purple soils. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(1), 279. <https://doi.org/10.3390/ijerph17010279>
- 52- Topcu, S., Kirda, C., Dasgan, Y., Kaman, H., Cetin, M., Yazici, A. and Bacon, M. A., 2007. Yield response and N-fertiliser recovery of tomato grown under deficit irrigation. *European Journal of Agronomy*, 26, pp. 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.08.004>
- 53- Walkley, A. and Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil

نسخه پیش از چاپ