Interactive Effects of Different Irrigation Levels and Sawdust Amendment on Yield and Yield Components of Tomato Grown in Sandy Soil

ABSTRACT

Proper irrigation management and the application of organic soil amendments are among the most important strategies for mitigating the adverse effects of water stress and improving the productivity of agricultural and horticultural crops. These approaches are particularly effective in sandy soils, which are characterized by a low water content capacity. This study investigated the interactive effects of irrigation management and sawdust amendment on the yield and yield components of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) grown in sandy soil. The experiment was conducted as a factorial arrangement with four irrigation levels, corresponding to allowable soil water depletion levels of 20–80%, and five levels of sawdust incorporation into the soil, ranging from 0 to 20% (v/v), with four replications. The results showed that the interaction between irrigation management and sawdust application had a significant effect at the 1% probability level on tomato yield, fruit number, and plant fresh weight. Under the 20% allowable soil water depletion level, increasing the proportion of sawdust up to an optimum level significantly increased yield and fruit number. For example, compared with the control treatment without sawdust, the application of 10% sawdust increased yield and fruit number by 22% and 31%, respectively. However, further increases in the proportion of sawdust resulted in declining trends in both yield and fruit number, indicating that tomato response was highly dependent on the optimum rate of the soil amendment. Overall, the results demonstrated that sawdust application can alleviate part of the adverse effects of water stress, probably by improving soil water-holding capacity, reducing evaporation from the soil surface, and enhancing the physical conditions of the root environment.

Keywords: *Allowable soil water depletion, Sandy soil, Soil organic matter, Water stress.*

Introduction

Water scarcity is increasingly constraining sustainable vegetable production, particularly in regions where irrigation is the principal source of crop water. Tomato (Solanum lycopersicum L.) is highly responsive to soil-water availability, and water deficits can impair vegetative growth, photosynthesis, flowering, fruit set, and fruit development. Although deficit irrigation can substantially reduce irrigation inputs and improve water-use efficiency, excessive soil-water depletion generally results in yield penalties. A meta-analysis of processing tomato studies showed that regulated deficit irrigation reduced yield overall but increased water-use efficiency, with the magnitude of the response depending on deficit severity, soil texture, and crop growth. The challenge is particularly pronounced in sandy soils because their relatively low water-holding capacity and high hydraulic conductivity can accelerate depletion of plant-available water. Soil-water conservation through organic amendments may therefore complement irrigation management by increasing water retention and improving the physical conditions of the rhizosphere. Previous research has shown that sawdust-derived materials can modify soil water retention, while organic mulches can increase soil moisture, crop water-use efficiency, and tomato yield. However, most previous studies have evaluated deficit irrigation and organic amendments separately or have focused on surface mulching rather than direct incorporation of sawdust into the soil. Consequently, limited information is available on whether sawdust incorporation can modify tomato responses to different levels of soil-water depletion and whether an optimum amendment rate exists under contrasting irrigation regimes. The present study therefore evaluated the interactive effects of four maximum allowable depletion (MAD) levels (20, 50, 65, and 80%) and five sawdust incorporation rates (0, 5, 10, 15, and 20% by volume) on

tomato yield and yield components in sandy-loam soil. We hypothesized that increasing water depletion would reduce tomato productivity, whereas appropriate sawdust incorporation would partially mitigate water-stress effects, with the optimum sawdust rate varying according to irrigation regime.

Method

A greenhouse experiment was conducted in greenhouse No. 3 of the Faculty of Agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, Iran, from autumn 2020 to summer 2021. The experiment was located at approximately 38°25′ N and 48°30′ E at an elevation of about 1500 m above sea level. A 4 × 5 factorial treatment structure was arranged in a randomized complete block design with four replications, resulting in 20 treatment combinations and 80 experimental pots. The irrigation treatments were based on MAD and comprised I1= 20%, I2= 50%, I3= 65%, and I4= 80% MAD. Sawdust was incorporated at five volumetric rates: S0= 0%, S1= 5%, S2= 10%, S3= 15%, and S4= 20%. Tomato seedlings of 'Saint Pievre' were raised in peat moss and transplanted at the seven- to eight-leaf stage after approximately five weeks. Irrigation thresholds were calculated from field capacity, permanent wilting point, and MAD. Soil volumetric water content was monitored using a calibrated TDR moisture meter (PMS-714), and irrigation was applied whenever the predetermined threshold for each treatment was reached. Fruit yield, fruit number, fresh plant weight, stem length, and flower number were determined. Actual evapotranspiration (ETa) was estimated using a soil-water-balance approach. Data were subjected to analysis of variance using MSTAT-C version 2.10, and treatment means were compared using Duncan's multiple-range test.

Results

Irrigation management significantly altered cumulative water application. Total irrigation depth during the growing season under I1, I2, I3, and I4 was 687.7, 669.9, 648.5 and 594.2 mm, respectively. Thus, increasing MAD from 20 to 80% reduced seasonal irrigation water by approximately 13.6%. Sawdust incorporation produced a larger reduction: cumulative irrigation depth declined from 726.8 mm under S0 to 672.2, 658.9, 629.7, and 562.7 mm under S1–S4, respectively, corresponding to a 22.6% reduction between S0 and S4. Cumulative ETa during the 140-day growing period was 618.4, 608.5, 585.2, and 545.5 mm under I1–I4, respectively. Hence, increasing MAD from 20 to 80% reduced cumulative ETa by approximately 11.8%. Similarly, cumulative ETa decreased from 641.4 mm under S0 to 606.2, 598.6, 577.2 and 517.4 mm under S1–S4. These findings indicate that both irrigation restriction and sawdust incorporation substantially modified seasonal water use. The reduction in ETa under greater water depletion is consistent with the physiological limitations imposed by soil-water deficit, whereas the lower water consumption associated with organic amendments is consistent with their potential to modify soil-water storage and availability. The irrigation × sawdust interaction was significant at $P< 0.01$ for fruit number, fruit yield, stem length, and total fresh plant weight. The individual effects of irrigation and sawdust on flower number were significant at $P< 0.05$ and $P< 0.01$, respectively. Under I1 (20% MAD), increasing sawdust from S0 to S2 increased yield from 486.4 to 917.5 g and fruit number from 10.7 to 14 fruits per plant. Fresh plant weight also increased from 63.63 to 95.9 g. However, further increasing sawdust to S4 reduced yield to 559.5 g, demonstrating a nonlinear response and indicating that excessive amendment was less favorable than the intermediate rate. Under severe water depletion (I4; 80% MAD), increasing sawdust from S0 to S4 increased yield from 64.9 to 251.5 g, representing a reported 286% increase. Thus, although severe water stress substantially reduced absolute productivity, sawdust

incorporation markedly alleviated part of the yield penalty. Stem elongation was also sensitive to water availability, with the lowest recorded stem length being 69 cm under I4S4. Overall, the magnitude and direction of the sawdust response depended on irrigation regime, demonstrating a significant interaction between soil-water availability and amendment rate.

Conclusions

The results demonstrate that sawdust incorporation can partially offset the adverse effects of soil-water depletion on tomato productivity in sandy-loam soil, but its effectiveness is strongly dependent on irrigation regime and application rate. Increasing MAD from 20 to 80% reduced seasonal irrigation water by 13.6% and cumulative ETa by 11.8%, but severe water depletion substantially reduced tomato yield and vegetative growth. Conversely, sawdust incorporation reduced cumulative irrigation requirements by up to 22.6% and significantly modified yield responses to water availability. Under relatively favorable irrigation conditions, 10% sawdust produced the most favorable yield response, whereas under severe water stress, increasing sawdust to 20% substantially improved yield relative to the untreated soil. This indicates that the optimum amendment rate is not universal and should be considered in conjunction with irrigation regime. The findings support integrated irrigation and soil-amendment management as a potential strategy for improving water conservation and maintaining tomato productivity in light-textured soils. Similar evidence from tomato studies indicates that appropriate deficit irrigation can improve water-use efficiency, while organic mulching can improve soil moisture and crop productivity.

Nevertheless, because the present study was conducted in pots under greenhouse conditions, field-scale validation is required before recommending specific sawdust rates for commercial production. Future studies should evaluate long-term changes in soil physical properties, nutrient availability, nitrogen immobilization, water-use efficiency, and economic feasibility under field conditions. Particular attention should also be given to sawdust particle size, degree of decomposition, C:N ratio, and interaction with drip-irrigation scheduling.

ویرایش نشده

برهم‌کنش سطوح مختلف آبیاری و کاربرد خاک‌اره بر عملکرد و اجزای عملکرد گوجه‌فرنگی در خاک سبک

چکیده

از مهم‌ترین راهکارهای تعدیل اثرات منفی تنش آبی و افزایش عملکرد گیاهان زراعی و باغی می‌توان به اعمال مدیریت صحیح آبیاری و افزودن شدن مواد آلی اصلاح‌کننده خاک اشاره نمود. این راهکارها به‌خصوص در خاک‌های شنی که ظرفیت نگهداری رطوبت کمی دارند بسیار موثر هستند. در این مطالعه به بررسی اثر مدیریت آبیاری و اصلاح خاک بر روی عملکرد و اجزای عملکرد گوجه‌فرنگی پرداخته شده است. آزمایش در قالب طرح فاکتوریل با چهار سطح آبیاری (تخلیه مجاز رطوبتی ۲۰ تا ۸۰ درصد) و پنج سطح اختلاط خاک‌اره با خاک (صفر تا ۲۰ درصد حجمی) در چهار تکرار انجام شد. مطابق نتایج این پژوهش، اثر متقابل مدیریت آبیاری و خاک‌اره بر عملکرد، تعداد میوه و وزن تر گیاه در سطح یک درصد معنی‌دار بود. همچنین در تخلیه مجاز رطوبتی ۲۰ درصد، با افزایش درصد خاک‌اره تا سطح بهینه مقدار عملکرد و تعداد میوه افزایش معنی‌دار یافت. به طور نمونه، میزان عملکرد و تعداد میوه در تیمار خاک‌اره ۱۰ درصد نسبت به تیمار بدون خاک‌اره به‌ترتیب ۲۲ و ۳۱ درصد افزایش یافت. هر چند با ادامه افزایش خاک‌اره، روند کاهشی در عملکرد و تعداد میوه مشاهده شد که این امر نشان‌دهنده این بود که گوجه‌فرنگی نسبت به مقدار بهینه ماده اصلاح‌کننده بسیار حساس است. به طور کلی نتایج نشان داد استفاده از خاک‌اره می‌تواند بخشی از اثرات منفی تنش آبی را کاهش دهد که این امر از طریق افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک، کاهش تبخیر از سطح خاک و بهبود شرایط محیطی ریشه انجام می شود.

کلیدواژه‌ها: *ماده آلی خاک، تخلیه مجاز رطوبتی، تنش رطوبتی، خاک شنی*

ویرایشاری نشده

مقدمه

گوجه فرنگی(Solanum lycopersicum L.) از پراهمیت‌ترین محصولات دنیا می‌باشد که سهم بسزایی در تأمین غذای مورد نیاز جمعیت روزافزون کره زمین ایفا می‌کند. اما از طرفی محصولی است که عملکرد آن نسبت به کمبود آب بسیار حساس است. متاسفانه امروزه بخاطر تغییر اقلیم و کاهش میزان نزولات جوی محدودیت منابع آب بسیار مشهود است. کمبود آب در خاک باعث کاهش میزان جذب آب توسط ریشه و در نتیجه کاهش رشد رویشی، فتوسنتز، اختلال در فرآیند شکل گیری میوه و کاهش میزان تولید گوجه‌فرنگی می‌شود (Xu et al., 2023; Locatelli et al., 2024).

این محدودیت‌ها در برخی خاک‌ها از جمله بافت‌های سبکتر (حاوی درصد شن بیشتر) دارای اثرات منفی‌تری می‌باشد. علت این امر، کم بودن ظرفیت نگهدای رطوبت و میزان آب قابل استفاده این خاک‌ها است که باعث سخت‌تر شدن مدیریت آبیاری این خاک‌ها می‌شود. به کار بردن مالچ‌های آلی در خاک، می‌تواند هدررفت رطوبت خاک را کاهش داده و بازه زمانی که آب در خاک باقی می‌ماند را افزایش دهد. مالچ از طریق کم کردن تبخیر از سطح خاک، باعث کاهش دمای خاک و باقی ماندن بیشتر رطوبت خاک و بهبود محیط اطراف ریشه می‌شود (Ibrahimi & Alghamdi, 2022; Ndede et al., 2022).

Aiyelari et al. (2022) در تحقیقی، اثر مالچ (در مقادیر یک تا چهار تن بر هکتار) و دور آبیاری (یک تا پنج روزه) را بر عملکرد گوجه‌فرنگی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد افزایش دورآبیاری موجب کاهش معنی‌دار عملکرد گوجه‌فرنگی شد، به طور نمونه دور آبیاری سه و پنج روز به‌ترتیب ۴۰/۱ و ۱۰۳/۷ درصد عملکرد گوجه‌فرنگی را کاهش دادند. همچنین افزایش میزان مالچ از یک به چهار تن در هکتار باعث افزایش ۸۴ و ۲۱۵ درصدی عملکرد گوجه‌فرنگی نسبت به تیمار بدون مالچ شد. همچنین نتایج مطالعات Zhang et al. (2023) نیز نشان داد که مالچ‌های آلی می‌توانند باعث افزایش ذخیره رطوبتی خاک، بهبود کارآیی مصرف آب و افزایش مقدار عملکرد گوجه‌فرنگی شوند. به طور مثال، میزان عملکرد بین ۱۱ تا ۸۲ درصد افزایش یافت که تحت تاثیر نوع مالچ این مقادیر متفاوت بود. دلیل این مسئله می‌تواند اثر حفاظت رطوبت تحت تاثیر مقادیر و نوع مالچ های مورد استفاده باشد. در پژوهشی دیگر Adombilla et al, (2024) نیز اثر متقابل کم‌آبیاری و استفاده از مالچ را بر روی رشد و عملکرد گوجه‌فرنگی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدیریت آبیاری و مالچ دارای اثر معنی‌دار بر روی رشد و عملکرد گوجه‌فرنگی است و کاربرد مالچ در سطوح مختلف کم‌آبیاری موجب بهبود شرایط رشد گیاه شد. از دیگر تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده می‌توان به مطالعه Zhang et al. (2023) اشاره نمود. نتایج مطالعات آن‌ها بیانگر این بود که مالچ‌های آلی می‌توانند باعث افزایش ذخیره رطوبتی خاک، بهبود کارآیی مصرف آب و افزایش مقدار عملکرد گوجه‌فرنگی شوند. به طور مثال، میزان عملکرد بین ۱۱ تا ۸۲ درصد افزایش یافت که تحت تاثیر نوع مالچ این مقادیر متفاوت بود. دلیل این مسئله می‌تواند ذخیره بیشتر رطوبت در خاک، تحت تاثیر مقادیر و نوع مالچ های مورد استفاده باشد.

یکی از عوامل تعیین کننده در مقدار عملکرد گوجه‌فرنگی نوع مدیریت آبیاری این محصول است. Xu et al. (2023) در تحقیقی به بررسی اثر کم‌آبیاری تنظیم‌شده و مالچ بر روی عملکرد و بهره‌وری گوجه‌فرنگی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که کم‌آبیاری ملایم می‌تواند موجب بهبود عملکرد، بهره‌وری آب و صرفه‌جویی در آب آبیاری شود. آن‌ها علت این مسئله را اصلاح میزان انتقال مواد فتوسنتزی، ساختار کانوپی و در نهایت عملکرد فتوسنتزی اظهار داشتند. از طرفی Locatelli et al. (2024) نیز در پژوهشی گلخانه‌ای به بررسی واکنش گوجه‌فرنگی نسبت به کم‌آبیاری (با کمک مدل آکواکراپ) پرداختند. تیمارهای آزمایش شامل آبیاری (۱۰۰ و ۷۵ تامین نیاز آبی گیاه) و کود (شاهد، کود معدنی و دو نوع کمپوست) بودند. بر اساس نتایج این تحقیق کم‌آبیاری ۷۰ درصدی نسبت به آبیاری کامل، موجب کاهش ۱۴ درصدی عملکرد گوجه‌فرنگی شد. همچنین مدل آکواکراپ با دقت قابل قبولی توانست عملکرد و مجموع تبخیر و تعرق گوجه‌فرنگی را پیش‌بینی کند، اگر چه میزان رطوبت خاک را بیش از حد واقعی برآورد کرد. از دیگر تحقیقات مرتبط در زمینه مدیریت آبیاری می‌توان به Burato et al. (2025) اشاره کرد. بر اساس نتایج تحقیق آن‌ها، استفاده از کم‌آبیاری تنظیم‌شده می‌تواند تا ۳۱ درصد موجب صرفه‌جویی در آب مصرفی گوجه‌فرنگی (بدون کاهش معنی‌دار عملکرد) شود. این امر بیانگر امکان حفظ عملکرد، ذخیره منابع آبی و ارتقای بهره‌وری مصرف آب می‌باشد. همچنین آن‌ها گزارش دادند که استفاده ترکیبی از کم‌آبیاری و مالچ قابل تجزیه‌زیستی موجب بهبود عملکرد و کارآیی مصرف آب گوجه‌فرنگی

ویرایش نشده

(نسبت به تیمار شاهد بدون مالچ) شد.

Kopa et al. (2026) در یک پژوهش در الجزایر طی سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ به اثر مواد اصلاح کننده خاک بر ویژگی‌های خاک و عملکرد گوجه‌فرنگی در آبیاری قطره‌ای پرداختند. طبق نتایج این تحقیق، مالچ آلی ترکیبی (شامل تراشه های چوب، خاک‌اره و کاه‌گندم به نسبت جرمی مساوی) توانست ظرفیت نگهداری رطوبت خاک و برخی خصوصیات شیمیایی خاک را بهبود بخشد. همچنین عملکرد و بهره‌وری آب مصرفی گوجه‌فرنگی در تیمارهای دارای مالچ نسبت به تیمار شاهد (بدون مالچ) به‌ترتیب ۲۳۵ و ۵۱۲ درصد افزایش یافت.

نقش انواع موادآلی صرفا مربوط به تاثیرشان بر میزان رطوبت و کاهش تبخیر نیست، بلکه موادآلی می‌توانند موجب اصلاح شیمیایی و فیزیکی، حذف فلزات سنگین خاک و بهبود عملکرد گیاهان شوند، که البته این امر به مقدار و نوع ماده بسیار وابسته است (شکسته‌بند و همکاران، ۱۴۰۵). نتایج تحقیق کوهستانی و همکاران (۱۴۰۵) بیانگر این بود که اصلاح خاک با بیوچارها می‌تواند موجب افزایش معنی‌دار اسیدیته، کربن آلی، چگالی ظاهری، خلل و فرج و بهبود ساختمان خاک گردد. همچنین در پژوهشی دیگر مشایخی و دهقانی (۱۴۰۵) به بررسی اثر نوع و مقدار ماده‌آلی بر بهره‌وری مصرف آب در شرایط شور پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از مواد آلی موجب افزایش عملکرد دانه و کاه به ترتیب برابر ۲۳ و ۳۰ درصد شد.

نتایج پژوهش پیری و سپهر (۱۴۰۵) نیز نشان داد که کودهای مبتنی بر بیوچار می‌توانند در مدیریت پایدار خاک و بهبود مواد مغذی گیاه استفاده شوند، بویژه در شرایط فعلی که انواع محدودیت های آبی و کمبود موادغذایی در اراضی کشاورزی مشهود است. سطح ویژه بالای این کودها و میزان خلل و فرج قابل قبول باعث اصلاح ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک می‌شود.

با وجود این‌که پژوهش های زیادی در مورد کم‌آبیاری و استفاده از بیوچار، مالچ و موادآلی مختلف انجام شده، اما اطلاعات زیادی در مورد اثر برهم‌کنش تخلیه مجاز رطوبتی و کاربرد خاک‌اره در خاک‌های شنی وجود ندارد. بخصوص اینکه آیا اختلاط خاک‌اره می‌تواند اثرات تنش آبی بر عملکرد گوجه‌فرنگی را تعدیل نماید، و این‌که آیا بازه بهینه‌ای برای میزان اختلاط خاک‌اره در این موارد وجود دارد. همچنین روند تغییرات عملکرد در زمان اعمال تنش آبی، بر اساس میزان درصد اختلاط خاک‌اره چگونه تغییر می‌یابد. بنابراین، در این پژوهش اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری و خاک‌اره بر عملکرد و اجزای عملکرد گوجه‌فرنگی در خاک سبک مورد بررسی قرار گرفت تا میزان تاثیر خاک‌اره در کاهش تنش آبی و بهبود مدیریت آب مشخص گردد.

مواد و روش‌ها

محل انجام این تحقیق گلخانه شماره سه دانشکده کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی (واقع در شهرستان اردبیل) بود و در بازه زمانی پاییز ۱۳۹۹ تا تابستان ۱۴۰۰ (یک دوره کشت) اجرا شد (شکل ۱). شهرستان اردبیل دارای ۱۵۰۰ متر ارتفاع نسبت سطح آزاد دریاها است و محل انجام آزمایش دارای مختصات جغرافیایی ۳۸ درجه و ۲۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۳۰ دقیقه طول شرقی می‌باشد. خاک مورد نیاز این آزمایش از روستای شیخ‌کلخوران تهیه و پس از انتقال به گلخانه، در ابتدا از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. در این آزمایش از گلدان‌هایی با شکل مخروط ناقص به ارتفاع ۲۷، قطر دهانه ۲۶ و قطر قاعده ۱۹ سانتی‌متراستفاده شد. برای اینکه زهکشی مناسب‌تر انجام شود و بافت خاک شنی و سبک باشد، حدود ۱/۵ کیلوگرم شن (عبوری از الک ۲میلی‌متری) در کف گلدان و در ادامه ده کیلوگرم خاک بر روی آن ریخته شد، این خاک شامل ۳۳ درصد شن و ۶۷ درصد خاک مزرعه بود. همچنین برای کم شدن میزان تبخیر از سطح خاک حدود ۱/۵ کیلوگرم شن بر روی خاک گلدان ریخته شد .

این آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کاملا تصادفی با چهار تکرار انجام شد. تیمارها شامل مدیریت آبیاری در چهار سطح (I1، I2، I3 و I4 مقادیر تخلیه مجاز رطوبتی به‌ترتیب ۲۰، ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درصد) و درصد اختلاط خاک‌اره با خاک در پنج سطح (S0، S1 ، S2، S3 و S4 درصد حجمی اختلاط خاک‌اره به‌ترتیب صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) بودند (جدول ۱ و شکل ۲). ضمنا تیمار صفر درصد خاک‌اره به عنوان شاهد در نظر گرفته شد.

ویرایشگری نشده



شکل ۱. موقعیت مکانی محل اجرای تحقیق

در این مطالعه، گوجه‌فرنگی از طریق نشاکاری کشت شد. بذر گوجه‌فرنگی از رقم Saint Pievre انتخاب شد. بدین منظور ابتدا در سینی‌های کشت حاوی پیت‌ماس قرار گرفت، بعد از حدود پنج هفته خزانه‌داری (مرحله هفت تا هشت برگی) به گلدان‌ها انتقال یافتند (شکل ۳). پس از انتقال نشاها به گلدان‌ها، به‌منظور استقرار اولیه گیاهان، تمامی گلدان‌ها به‌صورت یکنواخت و بر اساس نیاز آبی متعارف گیاه آبیاری شدند. اعمال تیمارهای مختلف آبیاری پس از گذشت حدود یک ماه از انتقال نشاها و پس از استقرار اولیه گیاهان آغاز شد. به منظور اعمال سطوح مختلف آبیاری، بر اساس مقادیر حداکثر تخلیه مجاز، مقدار رطوبت حجمی (قبل از آبیاری) برای هر تیمار آبیاری محاسبه شد.

جدول ۱. ترکیب تیمارهای طرح آماری

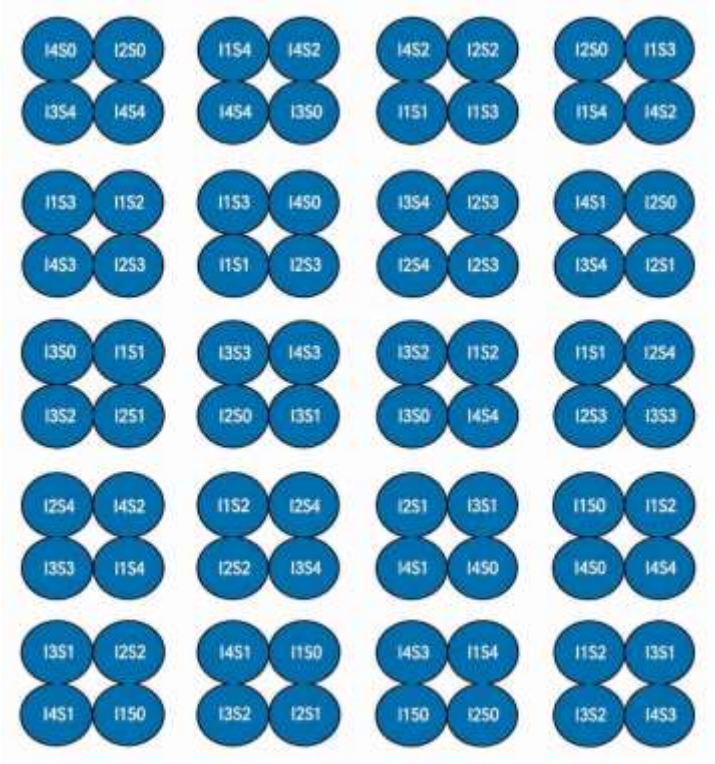
مدیریت آبیاری (درصد تخلیه آب قابل نگهداری)	درصد حجمی تلفیق خاک‌اره با خاک				
	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4
I_1=%20 SMD	I_1S0	I_1S_1	I_1S_2	I_1S_3	I_1S_4
I_2=%50 SMD	I_2S0	I_2S_1	I_2S_2	I_2S_3	I_2S_4
I_3=%65 SMD	I_3S0	I_3S_1	I_3S_2	I_3S_3	I_3S_4
I_4=%80 SMD	I_4S0	I_4S_1	I_4S_2	I_4S_3	I_4S_4

برای اعمال تیمارهای آبیاری، رطوبت حجمی خاک در آستانه آبیاری بر اساس مقادیر مختلف تخلیه مجاز رطوبتی خاک محاسبه شد. رطوبت حجمی با کمک رابطه ۱ محاسبه شد (اعتمادی‌نیا، ۱۴۰۰).

$$\theta_i = \theta_{fc} - \left((\theta_{fc} - \theta_{pwp}) \times MAD\right)$$ رابطهٔ ۱)

که در رابطه ۱، θ_i: رطوبت حجمی در زمان آبیاری، θ_{fc}: رطوبت حجمی در نقطه ظرفیت زراعی، θ_{wp}: رطوبت حجمی در نقطه پژمردگی و MAD: حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی خاک می‌باشند.

ویرایشی نشده



شکل ۲. نحوه جانمایی تیمارهای طرح



شکل ۳. کشت گیاه گوجه‌فرنگی در محیط گلخانه

در این تحقیق، میزان رطوبت خاک داخل گلدان‌ها با کمک دستگاه رطوبت‌سنج TDR مدل PMS-714 تعیین شد. به طوری که رطوبت خاک توسط دستگاه TDR قرائت و با کمک رابطه کالیبراسیون تصحیح شد. هر زمان مقادیر رطوبت حجمی بر اساس تیمارهای مختلف آبیاری به عدد رطوبت حجمی زمان آبیاری (بر اساس درصد تخلیه مجاز رطوبتی) می‌رسید (اعداد محاسبه شده از رابطه ۱)، آبیاری انجام می‌شد. ضمنا دستگاه TDR قبل از شروع آزمایش کالیبره شد. برای کالیبراسیون دستگاه TDR، مقادیر رطوبت حجمی قرائت‌شده توسط دستگاه با مقادیر اندازه‌گیری‌شده به روش مستقیم مقایسه شدند (Roth et al., 1992). رابطه کالیبراسیون به‌صورت $Y=0.9757X-0.072$، با ضریب تعیین ($R^2=0.97$) به دست آمد که در آن Y، رطوبت حجمی اندازه‌گیری‌شده به روش مستقیم و X، رطوبت حجمی قرائت‌شده توسط دستگاه TDR است. از این رابطه برای اصلاح داده‌های رطوبت حجمی استفاده شد. همچنین مقدار RMSE برابر با ۰/۰۰۸۱ و مقدار MAPE برابر با ۳/۱۷ درصد به‌دست آمد.

مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۲ و ۳ ارایه شده است. مطابق جدول ۲، بافت خاک لومی شنی و مقادیر تخلخل، چگالی ظاهری و حقیقی به ترتیب ۴۵٪، ۱/۴۳ (گرم بر سانتی‌مترمکعب) و ۲/۶۲ (گرم بر سانتی‌مترمکعب) بودند. همچنین مقادیر رطوبت حجمی ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی به ترتیب ۲۸ و ۱۷ درصد به دست آمدند.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی خاک مورد آزمایش

شن (٪)	سیلت (٪)	رس (٪)	بافت خاک	ρ_b (gr/cm^3)	ρ_p (gr/cm^3)	n %	θ_{fc} (cm^3/cm^3)	θ_{pwp} (cm^3/cm^3)
۶۱/۲۸	۱۴	۲۴/۷۳	لومی‌شنی	۱/۴۳	۲/۶۲	۴۵	۲۸	۱۷

جدول ۳. مشخصات شیمیایی خاک مورد آزمایش

pH	EC (ds/m)	N_{totale} %	OC %	TNV %	P (mg/kg)	K (mg/kg)	CEC (meq/100grsoil)
۷/۵	۰/۹۵	۰/۰۶۱	۰/۵۵	۱۰	۱۰/۱۹	۴۴۴/۶۶	۴۱/۸۵

در این پژوهش، EC عصاره اشباع خاک از طریق تهیه عصاره خمیر اشباع و استخراج محلول آن تحت خلأ اندازه‌گیری شد. سپس EC عصاره با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد تعیین و بر حسب دسی‌زیمنس بر متر گزارش شد (Abrol et al., 1988). مقدار EC عصاره اشباع خاک مورد آزمایش، ۰/۹۵ دسی‌زیمنس بر متر بود که از خاک‌های با شوری پایین و قابل رویش برای اکثر گیاهان است. بنا براین گیاه کشت شده در این تحقیق، کاهش عملکردی بابت شوری خاک نخواهد داشت (علیزاده، ۱۳۹۰).

از آن‌جایی که هدف از این پژوهش، بررسی اثر مدیریت آبیاری و اصلاح خاک بر عملکرد و اجزای عملکرد گوجه‌فرنگی بود، بنا براین در طول دوره رشد و در پایان آزمایش، برخی صفات رویشی و عملکردی گوجه‌فرنگی اندازه‌گیری شد. صفات مورد بررسی شامل عملکرد، تعداد میوه، وزن تر، طول ساقه و تعداد شکوفه بودند. عملکرد میوه بر اساس مجموع وزن میوه‌های برداشت‌شده از هر گلدان در طول فصل کشت محاسبه شد. طول ساقه نیز با اندازه‌گیری طول نهایی ساقه هر بوته گوجه‌فرنگی در گلدان تعیین گردید. تعداد میوه‌ها و شکوفه‌ها از طریق شمارش آن‌ها ثبت شد. همچنین، وزن تر گیاه در پایان دوره کشت، پس از برداشت میوه‌ها و با حذف ریشه‌ها، اندازه‌گیری شد (Heuvelink, 1995). همچنین به‌منظور تعیین تبخیر و تعرق واقعی گیاه، از معادله بیلان آبی بر پایه قانون بقای جرم استفاده شد (رابطه ۲). در شرایط گلخانه‌ای، با توجه به بسته بودن محیط و نبود بارندگی و رواناب، این دو مؤلفه برابر صفر در نظر گرفته شدند. همچنین تغییرات ذخیره رطوبت خاک در مقایسه با سایر مؤلفه‌های بیلان آبی ناچیز بود. ازاین‌رو، تبخیر و تعرق واقعی بر اساس مؤلفه‌های اصلی بیلان آب محاسبه شد .تبخیر و تعرق روزانه و تجمعی در طول فصل رشد برای تیمارهای مختلف آبیاری و سطوح اختلاط خاک‌اره محاسبه شد (اعتمادی‌نیا، ۱۴۰۰).

$$ET_a = P + I \pm \Delta S - D \pm R$$ رابطهٔ ۲)

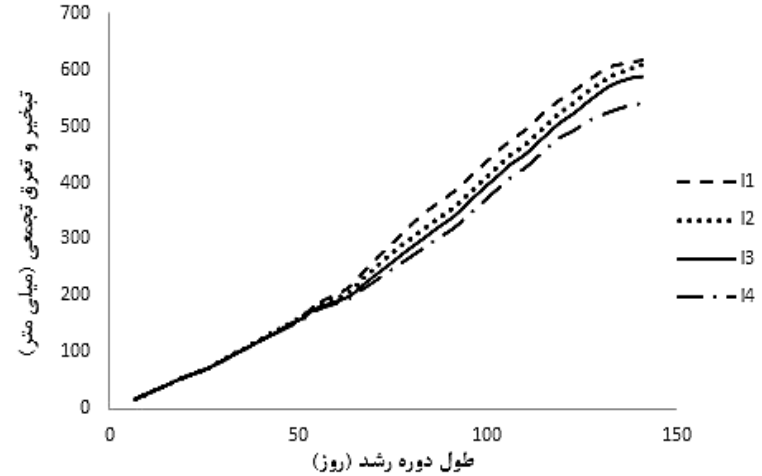
که در رابطه ۲، ETa: تبخیر و تعرق واقعی گیاه (میلی‌متر)، P: بارندگی (میلی‌متر)، I: آبیاری (میلی‌متر)، ΔS: تغییرات رطوبت خاک (میلی‌متر)، D: زهکشی زیر عمق ریشه (میلی‌متر) و R: مقدار رواناب می‌باشند.

در نهایت، داده‌های اندازه‌گیری‌شده و محاسبه‌شده حاصل از این پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار آماری MSTAT-C (نسخه ۲,۱۰) تجزیه و تحلیل شدند. به‌منظور بررسی اثرات اصلی تیمارها و اثر متقابل آن‌ها، از تجزیه واریانس استفاده شد و مقایسه میانگین تیمارها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام گرفت. همچنین، به‌منظور بررسی رابطه بین عملکرد گوجه‌فرنگی و تبخیر و تعرق، تحلیل رگرسیون انجام شد. از نرم‌افزار Microsoft Excel نیز برای رسم شکل‌ها و نمودارها استفاده شد.

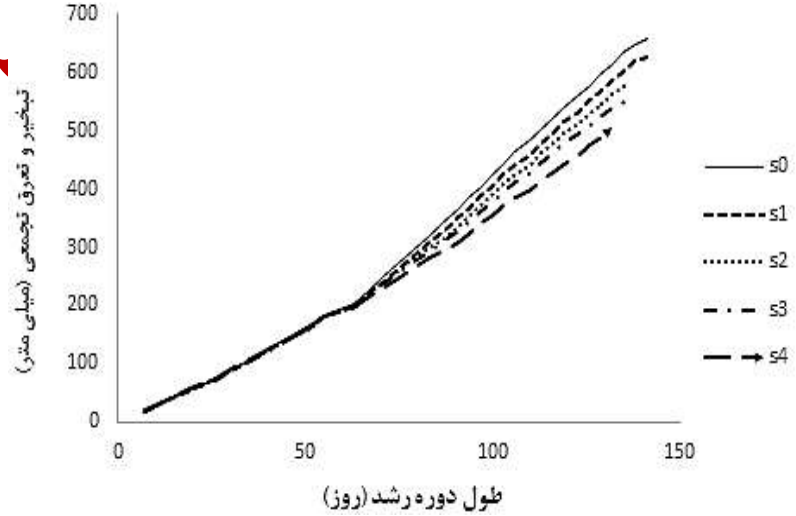
ویرایش شده

نتایج و بحث

عمق آب آبیاری و مجموع تبخیر و تعرق در طول فصل کشت، از عوامل تاثیرگذار بر عملکرد گوجه‌فرنگی هستند. با توجه به تأثیر مدیریت آبیاری و کاربرد خاک‌اره بر وضعیت آبی گیاه، ابتدا میزان تجمعی آب آبیاری به‌عنوان ورودی آب به سامانه کشت بررسی شد و سپس تبخیر و تعرق واقعی گوجه‌فرنگی به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های مرتبط با مصرف آب گیاه مورد ارزیابی قرار گرفت. این بررسی امکان مقایسه تغییرات آب آبیاری و تبخیر و تعرق را در سطوح مختلف تخلیه مجاز رطوبتی و اختلاط خاک‌اره با خاک فراهم می‌کند. مطابق نتایج این پژوهش، مجموع عمق آب آبیاری در طول فصل کشت گوجه‌فرنگی در سطوح مختلف آبیاری I1 تا I4 به‌ترتیب برابر ۶۸۷/۷، ۶۶۹/۹، ۶۴۸/۵ و ۵۹۴/۲ میلی‌متر و برای مقادیر مختلف خاک‌اره S0 تا S4 به‌ترتیب برابر ۷۲۶/۸، ۶۷۲/۲، ۶۵۸/۹، ۶۲۹/۷ و ۵۶۲/۷ میلی‌متر بود(اعتمادی‌نیا، ۱۴۰۰). از طرفی بر اساس نتایج این پژوهش، با اضافه شدن میزان تخلیه مجاز رطوبتی، عمق آب‌آبیاری به طور معنی‌داری کاهش یافت، به طوری که میزان عمق آب‌آبیاری از I1 تا I4 حدود ۱۳/۶ درصد کاهش پیدا کرد. همچنین با افزایش میزان تخلیه مجاز رطوبتی (کاهش آب مصرفی) میزان تبخیر و تعرق گوجه‌فرنگی کاهش یافت (شکل ۴).



شکل ۴. تبخیر و تعرق تجمعی در طول فصل کشت در سطوح مختلف آبیاری



شکل ۵. تبخیر و تعرق تجمعی در طول فصل کشت برای مقادیر مختلف خاک‌اره

مطابق نتایج شکل ۴، مجموع تبخیر و تعرق فصل کشت در تیمار ۲۰ درصد تخلیه مجاز رطوبتی، ۱۱/۷۸ درصد نسبت به تیمار ۸۰ درصد تخلیه مجاز رطوبتی بیشتر بود. دلیل این امر می‌تواند دسترسی راحت‌ترگیاه به آب در تنش‌های ملایم رطوبتی و در نتیجه باز بودن بیشتر روزنه‌های گیاه و در نهایت افزایش میزان تبخیر و تعرق باشد. از طرفی اصلاح خاک با خاک‌اره موجب کاهش معنی‌دار عمق آب‌آبیاری شد، به طوری که عمق آب مصرفی در تیمار S4 نسبت به تیمار S0 حدود ۲۲/۶ درصد کاهش یافت (شکل ۵). داده‌های شکل ۵، نشان‌دهنده تفاوت در مقدار آب آبیاری مصرف‌شده بین تیمارهاست. کاهش عمق تجمعی آب آبیاری در تیمارهای دارای خاک‌اره می‌تواند با تغییر در وضعیت آب خاک و پاسخ سامانه خاک–گیاه به تیمارهای آزمایشی مرتبط باشد؛ بااین‌حال، سازوکار مسئول این تفاوت را نمی‌توان صرفاً بر اساس مقدار آب آبیاری تعیین کرد. از آنجا که زمان آبیاری بر اساس سطوح مختلف تخلیه مجاز رطوبتی تعیین شد، تفاوت در آستانه رطوبتی و زمان‌بندی آبیاری نیز باید هنگام تفسیر نتایج در نظر گرفته شود. اگرچه برخی مطالعات پیشین اثر مثبت مواد اصلاح‌کننده مشتق از خاک‌اره را بر نگهداشت آب خاک گزارش کرده‌اند (Zhang et al., 2024; Upadhyay et al., 2024; Zhao et al., 2024)، این شواهد لزوماً به معنای اثبات همان اثر برای خاک‌اره خام، در شرایط آزمایش حاضر، نیستند. بنابراین، در پژوهش حاضر افزایش ظرفیت نگهداشت آب خاک به‌عنوان یک سازوکار احتمالی مطرح می‌شود و تأیید مستقیم آن به اندازه‌گیری و تحلیل داده‌های رطوبت خاک نیاز دارد. در ادامه به بررسی اثرات متقابل مدیریت آبیاری و اصلاح خاک (با خاک‌اره) بر عملکرد و اجزای عملکرد گوجه‌فرنگی پرداخته شده است.

بر اساس نتایج جدول ۴، اثر متقابل مدیریت آبیاری و اختلاط خاک‌اره با خاک بر روی تعداد میوه، عملکرد، طول ساقه و وزن کل تر گیاه در سطح یک درصد معنی‌دار بود. همچنین اثرات جداگانه مدیریت آبیاری و اختلاط خاک‌اره بر روی تعداد شکوفه به‌ترتیب در سطح پنج و یک‌درصد معنی‌دار بود. در این تحقیق، به منظور مقایسه میانگین صفات مورد بررسی از آزمون دانکن (با کمک نرم افزار MSTATC) استفاده شد (جدول ۵).

جدول ۴. آنالیز واریانس میانگین صفات تحت اثر سطوح مختلف آبیاری و خاک اره

منابع تغییرات	درجه آزادی	تعداد میوه	عملکرد (گرم)	تعداد شکوفه	طول ساقه (سانتی‌متر)	وزن کل تر گیاه (گرم)
تکرار	۳	۸/۹ ns	۱۳۶۱۲ ns	۲۸/۷۵ ns	۶/۳ ns	۱۱۸/۸۹ ns
آبیاری	۳	۱۲۶/۶ **	۱۱۱۳۰۸۳ **	۱۲۸/۰۸ *	۲۵۳۸ **	۷۲۶۴/۷ **
خاک اره	۴	۲۸/۴۲ **	۸۹۷۵۹ **	۱۸۲/۷ **	۲۰۶/۸۹ **	۲۲۴/۴ ns
آبیاری * خاک اره	۱۲	۲۵/۴۶ **	۴۷۹۶۸ **	۷۷/۲۴ ns	۱۶۰/۸ **	۷۷۹/۸ **

ns، **و * به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی دار در سطح یک و پنج درصد.

در شکل ۶، اثرات متقابل آبیاری و خاک‌اره بر عملکرد گوجه‌فرنگی ارایه شده است. البته با توجه به اینکه در جدول ۵، تمامی اعداد مربوط به اثرات متقابل آبیاری و خاک‌اره بر اجزای عملکرد گوجه‌فرنگی ارایه شده است، تنها به شکل ۶، بسنده کرده و از جهت اختصار از بقیه شکل‌های مرتبط با جدول ۵، صرف نظر شده است. مطابق نتایج جدول ۵، واکنش گوجه‌فرنگی به سطوح

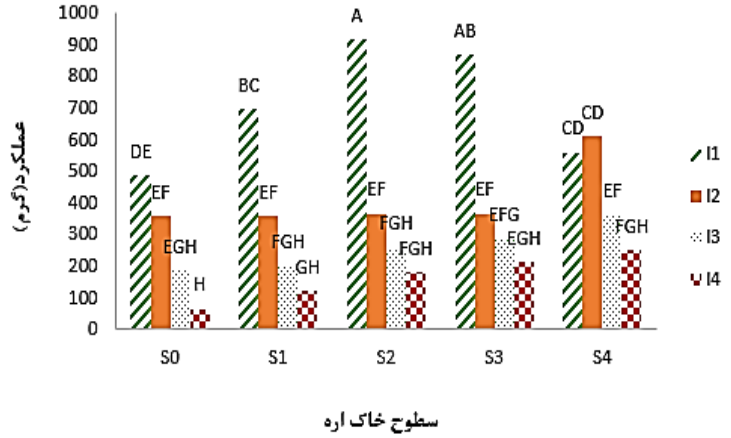
مختلف خاک‌اره، به نوع مدیریت آبیاری گوجه‌فرنگی بستگی دارد. به طور نمونه، در مدیریت آبیاری I1، با افزایش درصد خاک‌اره از S0 به S2 مقادیر عملکرد از ۴۸۶/۴ به ۹۱۷/۵ گرم (شکل ۶) و تعداد میوه‌ها از ۱۰/۷ به ۱۴ عدد افزایش یافت (جدول ۵). بنا بر این در آبیاری I1، که به نوعی بهینه‌ترین شرایط رطوبتی گوجه‌فرنگی بود، S2 مناسب‌ترین گزینه برای تولید میوه (وعملکرد) می‌باشد. از طرفی مقدار وزن‌تر گوجه‌فرنگی از ۶۳/۶۳ به ۹۵/۹ گرم ارتقا یافت، که نشان‌دهنده افزایش میزان رشد رویشی بود (جدول ۵).

جدول۵. مقایسه میانگین صفات برای اثر متقابل سطوح آبیاری و خاک اره

آبیاری	درصد خاک اره	عملکرد (گرم)	طول ساقه (cm)	تعداد میوه	وزن تر گیاه (گرم)
	S_0	۴۸۶/۴^{DE}	۹۲^{ABC}	۱۰/۷^{BCD}	۶۳/۶۳^{BCDEF}
	S_1	۶۹۵/۹^{BC}	۹۱/۷۵^{ABC}	۱۲/۵^{BC}	۷۷/۵۵^{ABC}
I_1	S_2	۹۱۷/۵^{A}	۱۰۶/۵^{A}	۱۹/۵^{A}	۹۵/۹^{A}
	S_3	۸۶۸/۸^{AB}	۱۰۲^{A}	۱۴^{B}	۹۴^{AB}
	S_4	۵۵۹/۵^{CD}	۱۰۲/۵^{A}	۸^{CDEF}	۷۴/۱^{ABCD}
	S_0	۳۵۷/۳^{EF}	۹۱/۲۵^{ABC}	۹/۷^{BCDE}	۷۲/۷^{ABCDE}
	S_1	۳۵۸^{EF}	۹۶/۷۵^{AB}	۸/۷^{CDEF}	۴۴/۵۸^{DEFG}
I_2	S_2	۳۶۶/۱^{EF}	۹۴/۲۵^{ABC}	۹/۵^{CDE}	۵۳/۸۳^{CDEFG}
	S_3	۳۶۷/۶^{EF}	۱۰۵/۳^{A}	۷^{DEF}	۴۹/۸۸^{CDEFG}
	S_4	۶۱۲/۲^{CD}	۱۰۰^{A}	۱۱^{BCD}	۸۹/۳۲^{AB}
	S_0	۱۸۷/۶^{EGH}	۷۱/۵^{D}	۸/۲۵^{CDEF}	۵۰/۲۵^{CDEFG}
	S_1	۲۰۰/۲^{FGH}	۹۰/۷۵^{ABC}	۷^{OEF}	۴۱/۴۲^{EFG}
I_3	S_2	۲۶۰^{FGH}	۹۲/۵^{ABC}	۸/۵^{CDEF}	۳۴/۷^{FG}
	S_3	۲۸۸/۹^{EFG}	۸۳/۷۵^{BCD}	۹/۲^{CDEF}	۵۲/۷۵^{CDEFG}
	S_4	۳۶۴/۳^{EF}	۷۹/۷۵^{CD}	۶^{EF}	۳۷/۷۲^{FG}
	S_0	۶۴/۹^{H}	۷۸/۷۵^{CD}	۴/۷^{F}	۲۹/۲۳^{G}
	S_1	۱۲۰/۵^{GH}	۸۰/۲۵^{CD}	۶^{EF}	۴۲/۴۵^{DEFG}
I_4	S_2	۱۸۱^{FGH}	۷۸/۵^{CD}	۸/۲^{CDEF}	۴۴/۹۷^{DEFG}
	S_3	۲۱۳/۴^{EGH}	۷۱/۲۵^{D}	۹/۵^{CDE}	۴۵/۲^{DEFG}
	S_4	۲۵۱/۵^{FGH}	۶۹^{D}	۸/۷^{CDEF}	۳۶/۳۳^{FG}

در هر ستون میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک باشند برپایه آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی داری ندارند.

دلیل این امر می‌تواند بالا رفتن میزان توان فتوسنتز و واگذاری بیومس به اندام‌های تولیدکننده گوجه‌فرنگی باشد. از طرفی با افزایش درصد اختلاط خاک‌اره (در تیمار I1) تا S4، عملکرد تا ۵۵۹/۵ گرم کاهش داشت (جدول ۵). این امر نشان‌دهنده این است که خاک‌اره دارای یک بازه بهینه است و اگر از آن مقادیر بیشتر شود عملکرد روند معکوسی را طی خواهد نمود (کاهش می‌یابد). در بررسی مقادیر آبیاری با تخلیه مجاز بالاتر (I3 و I4) نیز مشخص شد که به طور کلی با افزایش تخلیه مجاز رطوبتی، عملکرد کم خواهد شد (شکل ۶).



شکل ۶. مقایسه عملکرد گوجه‌فرنگی تحت اثرات متقابل خاک‌اره و کم‌آبیاری

علت این امر احتمالا تاثیر منفی کمبود آب در تشکیل و پر شدن میوه گوجه‌فرنگی می‌باشد. به طور نمونه در تیمار I4، با افزایش میزان اختلاط خاک‌اره از S0 به S4 عملکرد از ۶۴/۹ به ۲۵۱/۵ گرم ارتقا یافت (۲۸۶ درصد افزایش عملکرد). این امر بیانگر این است که می‌توان با استفاده از خاک‌اره بخشی از اثرات منفی کمبود آب را حذف نمود. شاید به خاطر این‌که خاک‌اره می‌تواند پتانسیل حفظ آب در خاک را بالا برده و تبخیر از سطح خاک را کم کند، همچنین موجب بهبود وضعیت هندسی کلی منافذ خاک و شرایط فیزیکی محیط خاک و ریشه شود، که این امر در نهایت موجب دسترسی پایدارتر و مستمر ریشه به رطوبت خاک خواهد شد. این نتایج در سایر تحقیقات نیز به طور مشابه مشاهده شده است. به طور نمونه مالچ در تنش های ایجاد شده در دورآبیاری های طولانی مدت توانسته موجب کاهش بخشی از تنش‌های رطوبتی در گوجه‌فرنگی شود (Korie et al., 2022).

همچنین نتایج این مطالعه بیانگر این بود که اثر متقابل مدیریت آبیاری و خاک‌اره بر طول ساقه در بیشتر تیمارها معنی‌دار نبود (جدول ۴ و ۵). هر چند به طور کلی با افزایش میزان تخلیه مجاز رطوبتی (از I1 به I4) طول ساقه گوجه‌فرنگی کاهش یافت، به طوری که کمترین مقدار طول ساقه (۶۹ سانتی‌متر) مربوط به I4S4 بود (جدول ۵) که نشان‌دهنده حساسیت رشد طولی گوجه‌فرنگی نسبت به تنش و محدودیت رطوبت خاک است. علت این روند تغییر می‌تواند به خاطر کم بودن پتانسیل آب، کاهش فتوسنتز و در نتیجه کم شدن میزان تقسیم و توسعه سلولی باشد. همچنین مطابق اعداد جدول ۵، خاک‌اره توانست بخشی از اثرات منفی تنش رطوبتی را کاهش دهد. البته انتخاب مقادیر مناسب خاک‌اره ممکن است بتواند با بالا بردن ظرفیت نگهداری رطوبت خاک و اصلاح محیط ریشه، کمی از تنش رطوبتی اعمالی به گیاه را تعدیل کند. نتایج این پژوهش توسط برخی از تحقیقات مشابه تایید شده است. به طور نمونه بر اساس نتایج برخی پژوهش‌ها، اصلاح کننده‌های کربنی، موادآلی (مانند خاک‌اره) و مالچ‌ها می‌توانند عملکرد گیاه و میزان رطوبت خاک را در شرایط کم‌آبی بهبود بخشند. البته که میزان بهبود به نوع ماده اصلاحی و مقدار آن بستگی داشت (Zhang et al., 2024; Kafle et al., 2025; Chen et al., 2025).

از طرفی بر اساس نتایج این پژوهش، تاثیر متقابل مدیریت آبیاری و خاک‌اره بر تعداد میوه و وزن تر گوجه‌فرنگی گویای این بود که واکنش گوجه‌فرنگی شدیدا به نوع مدیریت آبیاری (میزان آب داده شده) بستگی دارد، به‌طوری که در تیمارهای مختلف آبیاری واکنش‌های مختلفی دیده شد. به طور نمونه بیشینه تعداد میوه (۱۹/۵ میوه در بوته) مربوط به تیمار I1S2 بود، اما کمینه تعداد میوه (۴/۷ میوه در بوته) در تیمار I4S0 مشاهده شد. این اعداد بیانگر این است که احتمالا در وضعیت مناسب آبیاری، با بالا رفتن میزان خاک‌اره تا S2، میزان نگهدای آب در خاک بهبود یافته و به‌خصوص با داشتن بافت سبک شنی، می‌توان محیط بهتری برای رشد ریشه و شکل‌گیری میوه گوجه‌فرنگی انتظار داشت.

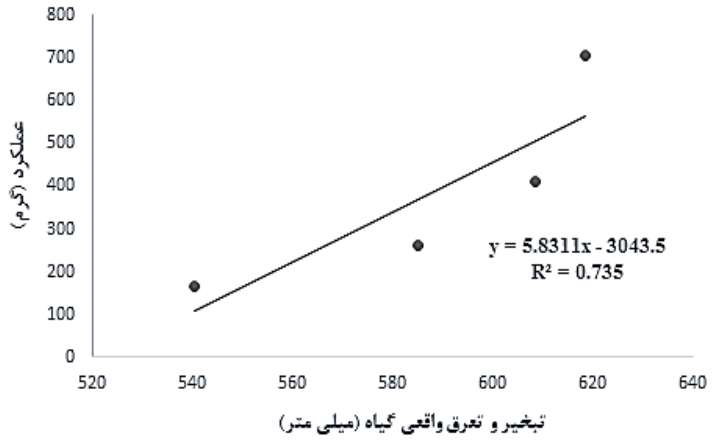
همچنین بر اساس نتایج این پژوهش، بیشینه (۹۴ گرم) و کمینه (۲۹/۳ گرم) وزن تر گوجه‌فرنگی به‌ترتیب مربوط به تیمار I1S3 و I4S0 بودند (جدول ۵). بنابراین، با افزایش تنش و محدودیت آبی، رشد رویشی کم شد، هر چند در برخی تیمارهای خاک‌اره

ویرایش اولیه

بخشی از این اثرات منفی تعدیل شد. نتایج تحقیق Li et al. (2023) نیز نشان داد استفاده از ۴۵ تا ۶۰ تن در هکتار بیوچار می‌تواند اثرات منفی کم‌آبیاری را بر روی رشد ریشه و اندام هوایی گوجه‌فرنگی کاهش دهد.

از طرفی نتایج مطالعات Obadi et al. (2023) نیز نشان داد که افزایش پنج درصد بیوچار می‌تواند ۵/۲ درصد وزن تر گوجه‌فرنگی را افزایش دهد. همچنین نتایج مطالعه Murtaza et al. (2024) نیز بیانگر این بود که افزودن بیوچار در وضعیت کم‌آبیاری، می‌تواند باعث زیاد شدن میزان موجب بیوماس و تولید گوجه‌فرنگی شود. تحقیقات Adekiya et al. (2025) نیز نشان داد که استفاده از بیوچار می‌تواند تعداد میوه را تا ۵۷ درصد نسبت به تیمار شاهد (بدون بیوچار) افزایش دهد.

به طور کلی بر اساس نتایج جدول ۵، اختلاط خاک‌اره می‌تواند در قالب یک ماده اصلاحی، میزان تنش رطوبتی را تعدیل کند، البته باید توجه داشت که میزان بهینه این تاثیر بسته به نوع مدیریت آبیاری فرق می‌کند و در شرایط بدون محدودیت آبیاری، بهترین واکنش عملکردی گوجه‌فرنگی مربوط به تیمار S2 بود.



شکل ۷. رابطه عملکرد – تبخیر و تعرق

رابطه بین تبخیر و تعرق و عملکرد یک گیاه، یک رابطه بسیار مهم است و بیانگر تاثیر میزان تبخیر و تعرق بر عملکرد گیاه می‌باشد. در شکل ۷، رابطه عملکرد و تبخیر و تعرق ارایه شده است. مطابق شکل ۷، بین تبخیر و تعرق و عملکرد گوجه‌فرنگی رابطه مستقیم خطی وجود دارد. معادله برازش $Y = 5.8311X - 3043.5$ و ضریب تبیین ۰/۷۳۵ به دست آمد که بیانگر ارتباط مثبت و نسبتاً قوی بین عملکرد و تبخیر و تعرق گوجه‌فرنگی می‌باشد، هرچند از نظر علم آمار، حدود ۲۶/۵ درصد از تغییرات عملکرد احتمالا تحت اثر سایر عوامل (مانند رطوبت حجمی میزان توان نگهداری رطوبت خاک، هدایت هیدرولیکی خاک، سطح برگ و...) می‌باشد. از نظر زراعی، احتمالا افزایش مقدار تبخیر و تعرق در محدوده مورد مطالعه این تحقیق، بیانگر این است که میزان آب بیشتری برای فرآیندهای مختلف (توسعه سطح برگ، فتوسنتز، دریافت مواد غذایی، شکل گیری و پر شدن میوه) در اختیار گوجه‌فرنگی قرار گرفته است. امروزه برخی مطالعات، نتایج مشابه این امر را تایید کرده‌اند و اظهار داشتند نوع و مدیریت آبیاری بر مبنای تبخیر و تعرق به طور مستقیم بر عمکرد و بهره‌وری آب‌آبیاری تاثیر دارد. همچنین بر اساس این تحقیقات، کم‌آبیاری معمولا موجب کاهش تولید محصول می‌شود، هر چند ممکن است میزان بهره‌وری آب مصرفی را افزایش دهد (Boltana et al., 2024; Mekonnen et al., 2024; Badr et al., 2026).

در تحقیق حاضر، یکی از تیمارها، اضافه‌شدن خاک‌اره به خاک بود و بر اساس نتایج این پژوهش افزودن این ماده اصلاحی توانسته میزان آب قابل نگهداری را افزوده و میزان آب‌مصرفی را کاهش داده و در نتیجه میزان تبخیر و تعرق را کاهش دهد (شکل ۷ و جدول ۵). اما نکته قابل توجه این بود که کاهش آب مصرفی و تبخیر و تعرق، میزان عملکرد را نسبت به تیمار شاهد (بدون خاک‌اره) کاهش نداد، که بیانگر قابلیت خاک‌اره (به عنوان یک ماده اصلاحی) در تعدیل اثرات منفی تنش‌های آبی بود (شکل۶).

ویرایش نشده

نتایج پژوهش Liu et al. (2026) بیانگر این بود که اثرات متقابل آب و بیوچار بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک اثر گذاشته و به عل تغییرات در ریزوسفر، موجب تغییر عملکرد گوجه‌فرنگی می‌شود. عامل کم‌آبیاری به تنهایی موجب کاهش معنی‌دار تولید گوجه‌فرنگی شد، اما استفاده از بیوچار بخشی از این کاهش را بهبود بخشید.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که اثر متقابل مدیریت آبیاری و اختلاط خاک‌اره (بخصوص در خاک سبک) اثر قابل ملاحظه‌ای در روند و میزان رشد گوجه‌فرنگی و در نهایت عملکرد آن دارد. همچنین با بیشتر شدن حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی، میزان آب مصرفی گیاه کاهش یافت. البته طول ساقه، تعداد میوه و عملکرد گیاه نیز کاهش یافت، که این امر بخصوص در مقادیر زیاد تنش آبی مشهودتر بود. از طرفی، اصلاح خاک با خاک‌اره موجب افزایش قابلیت نگهداری آب در خاک و بهبود وضعیت رطوبت منطقه ریشه شد، که این امر توانست به جبران بخشی از اثرات منفی تنش رطوبتی کمک کند.

همچنین مطابق نتایج این پژوهش، برهمکنش مدیریت آبیاری و خاک‌اره بر عملکرد، تعداد میوه و وزن تر گیاه اثر معنی‌دار داشت. به این معنا که اثر خاک‌اره به مقدار زیادی به سطوح مختلف آبیاری وابسته بود. مثلاً در شرایط مناسب آبیاری، استفاده از ۱۰ درصد خاک‌اره بهترین واکنش عملکردی گوجه‌فرنگی را نشان داد و میزان عملکرد و تعداد میوه نسبت به تیمار شاهد (خاک‌اره صفر) به‌ترتیب ۲۲ و ۳۱ درصد بیشتر شد. از طرفی استفاده از خاک‌اره در وضعیت تنش آبی بالا، توانست بخشی از کاهش محصول ناشی از محدودیت آبی را جبران کند. اما نکته جالب این بود که افزایش خاک‌اره بیش از مقدار بهینه، موجب کم شدن عملکرد گوجه‌فرنگی شد که نشان می‌دهد حتما باید مقدار بهینه ماده اصلاحی تعیین و به کار برده شود.

از طرفی مطابق نتایج، در تیمارهای خاک‌اره، کاهش میزان آب‌مصرفی اثر کاهشی معنی‌داری (در سطح پنج‌درصد) بر عملکرد نداشت و بیانگر این است که می‌توان برای بهبود بهره‌وری آب مصرفی (در خاک سبک) از خاک‌اره استفاده کرد. بنا بر این کاربرد صحیح خاک‌اره در کنار مدیریت مناسب آبیاری می‌تواند به عنوان یک راهکار ارزان قیمت به منظور اصلاح وضعیت رطوبتی محیط ریشه پیشنهاد شود که اثرات منفی کم‌آبی را بر عملکرد گوجه‌فرنگی کاهش می‌دهد. البته که باید در استفاده از سطوح مختلف آبیاری و خاک‌اره به خصوصیات فیزیکی- شیمیایی خاک، وضعیت آب و هوایی و نیاز آبی گیاه نیز توجه کافی صورت پذیرد. در انتها توصیه می‌شود آزمایش‌های مزرعه‌ای و طولانی مدت جهت بررسی اثر خاک‌اره بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، بهره‌وری آب و عملکرد گیاه انجام شود تا بتوان با اطمینان بیشتر در مورد کارآیی خاک‌اره در خاک‌های مختلف اظهار نظر نمود.

ویرایش شده

منابع

۱. اعتمادی‌نیا، متینه (۱۴۰۰). بررسی اثر اختلاط خاک‌اره بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه گوجه‌فرنگی در بافت سبک تحت مدیریت زمان آبیاری. به راهنمایی جواد رمضانی مقدم و یاسر حسینی. اردبیل: دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی.

۲. پیری، مرضیه و سپهر، ابراهیم (۱۴۰۵). مروری بر کودهای مبتنی بر بیوچار و کاربردهای آن در کشاورزی پایدار. *تحقیقات آب و خاک ایران*. ۵۷(۶)، ۱۵۱۲-۱۴۹۱.

۳. شکسته بند، فاطمه؛ عمادی، سید مصطفی؛ بهمنیار، محمدعلی،گلی کلانپا؛ اسماعیل و قاجار سپانلو، مهدی (۱۴۰۵). مقایسه کارایی بیوچار کاه وکلش برنج و هیدروکسید دوگانه لایه‌ای منیزیم-آلومینیوم در حذف سرب از محلول آبی. *تحقیقات آب و خاک ایران*. ۵۷(۱)، ۸۵-۱۰۵.

۴. علیزاده، امین (۱۳۹۰). *رابطه آب و خاک و گیاه*. مشهد: انتشارات دانشگاه امام رضا، صفحه ۶۱۰.

۵. کوهستانی، مهسا؛ ابریشم کش، سپیده؛ قربانزاده، نسرین و یغمائیان، نفیسه (۱۴۰۵). اثر هم‌افزایی بیوچار و ریزجلبک در بهبود ویژگی‌های

فیزیکی یک خاک لوم سیلتی متاثر از آتش. *تحقیقات آب و خاک ایران*. ۵۷(۱)، ۱۶۹-۱۸۸.

۶. مشایخی، پریسا و دهقانی، محسن (۱۴۰۵). بررسی تأثیر منابع و سطوح مختلف ماده آلی بر کارایی مصرف آب در کشت گندم در شرایط شور. *تحقیقات آب و خاک ایران*. ۵۷(۶)، ۱۳۰۷-۱۳۲۰.

Abrol, I. P., Yadav, J. S. P., & Massoud, F. I. (1988). Salt-affected Soils and Their Management. FAO Soils Bulletin No. 39. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Rome. https://www.fao.org/4/x5871e/x5871e00.htm

Adhikari, S., Timms, W., & Mahmud, M. A. P. (2022). Optimising water holding capacity and hydrophobicity of biochar for soil amendment – A review. *Science of The Total Environment*, 851(Pt 1), 158043. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158043

Adombilla, R., Abubakari, A.-H., & Abagale, F. K. (2024). Effect of drip irrigation regime and mulching on growth and yield parameters of tomato (Solanum lycopersicum L.) varieties. *Tropical Agriculture*, 101(1), 1–18.

Ahmad Bhat, S., Kuriqi, A., Dar, M. U. D., Bhat, O., Sammen, S. S., Towfiqul Islam, A. R. M., Elbeltagi, A., Shah, O., Al-Ansari, N., Ali, R., & Heddam, S. (2022). Application of biochar for improving physical, chemical, and hydrological soil properties: A systematic review. *Sustainability*, 14(17), 11104. https://doi.org/10.3390/su141711104

Aiyelari, E. A., Oshunsanya, S. O., Aliku, O., Adeniran, S. A., & Ona, M. (2022). Response of irrigated tomato (Solanum lycopersicum Mill) to mulch application rates. *Heliyon*, 8(10), e11270. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11270

Alizadeh, A. (2011). Water, soil and plant relationship. Imam Reza University Press. 610 pages (In Persian).

Burato, A., Fusco, G. M., Pentangelo, A., Ronga, D., Carillo, P., Campi, P., & Parisi, M. (2025). Balancing yield, water productivity, and fruit quality of processing tomatoes through the combined use of biodegradable mulch film and regulated deficit irrigation. *European Journal of Agronomy*, 169, 127695. https://doi.org/10.1016/j.eja.2025.127695

Chen, Y., Feng, X., Shi, Y., Xu, Z., Hao, X., Tong, L., Wang, S., & Ding, R. (2025). Effects of irrigation and biochar management strategies on the multifunctionality of maize field ecosystem in the arid region of Northwest China. *Agricultural Systems*, 228, 104369. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104369

Etemadiniya, M. (2022). Investigation of the effect of sawdust mixing on yield and yield components of tomato plant in light texture under irrigation time management (Master's thesis, University of Mohaghegh Ardabili). (In Persian).

Heuvelink, E. (1995). Growth, development and yield of a tomato crop: Periodic destructive measurements in a greenhouse. *Scientia Horticulturae*, 61(1–2), 77–99. https://doi.org/10.1016/0304-4238(94)00729-Y

Ibrahimi, K., & Alghamdi, A. G. (2022). Available water capacity of sandy soils as affected by biochar application: A meta-analysis. *CATENA*, 214, 106281. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106281

Kafle, A., Singh, S., Singh, M., Bajwa, P., Deb, S., Simpson, C., & Ritchie, G. (2025). Influence of deficit irrigation and biochar amendment on growth, physiology, and yield of cucumber in West Texas. *Scientific Reports*, 15, 9615. https://doi.org/10.1038/s41598-025-94113-y

Koohestani, M., Abrishamkesh, S., Ghorbanzadeh, N., & Yaghmaean, N. (2026). Synergistic effect of biochar and microalgae on improving the physical properties of a fire-affected silt loam soil. Iranian *Journal of Soil and Water Research*. https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.408494.670077 (In Persian).

Kopa, I. T., Ammari, A., & Meddi, M. (2026). Integrated effects of organic mulch composites and drip irrigation on soil quality, water conservation and tomato growth under semi-arid Mediterranean conditions. *Irrigation and Drainage*, 1–14. https://doi.org/10.1002/ird.70183

Locatelli, S., Barrera, W., Verdi, L., Nicoletto, C., Dalla Marta, A., & Maucieri, C. (2024). Modelling the response of tomato on deficit irrigation under greenhouse conditions. *Scientia Horticulturae*, 326, 112770. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112770

Mashayekhi, P., & Dehghani, M. (2026). Evaluation of the effects of different rates and sources of organic materials on water use efficiency in wheat cultivation under saline conditions. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57(6), 1307–1320. https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.413495.670128 (In

Persian).
Mukherjee, S., Dash, P. K., Das, D., & Das, S. (2023). Growth, yield and water productivity of tomato as influenced by deficit irrigation water management. *Environmental Processes*, 10, 10. https://doi.org/10.1007/s40710-023-00624-z
Ndede, E. O., Kurebito, S., Idowu, O., Tokunari, T., & Jindo, K. (2022). The potential of biochar to enhance the water retention properties of sandy agricultural soils. *Agronomy*, 12(2), 311. https://doi.org/10.3390/agronomy12020311
Piri, M., & Sepehr, E. (2026). A review of biochar-based fertilizers and their applications in sustainable agriculture. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57(6), 1491–1512. https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.414670.670144 (In Persian).
Roth, C. H., Malicki, M. A., & Plagge, R. (1992). Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR. *Journal of Soil Science*, 43(1), 1–13. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1992.tb00115.x
Shekasteband, F., Emadi, S. M., Bahmanyar, M. A., Goli Kalanpa, E., & Ghajar Sepanlou, M. (2026). Comparative efficiency of rice husk biochar and magnesium/aluminum layered double hydroxide for lead removal from aqueous solution. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57(1), 85–105. https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.404609.670043 (In Persian).
Upadhyay, V., Choudhary, K. K., & Agrawal, S. B. (2024). Use of biochar as a sustainable agronomic tool, its limitations and impact on environment: A review. *Discover Agriculture*, 2, 20. https://doi.org/10.1007/s44279-024-00033-2
Xu, J., Wan, W., Zhu, X., Zhao, Y., Chai, Y., Guan, S., & Diao, M. (2023). Effect of regulated deficit irrigation on the growth, yield, and irrigation water productivity of processing tomatoes under drip irrigation and mulching. *Agronomy*, 13(12), 2862. https://doi.org/10.3390/agronomy13122862
Zhang, H., Cheng, Y., Zhong, Y., Ni, J., Wei, R., & Chen, W. (2024). Roles of biochars' properties in their water-holding capacity and bound water evaporation: Quantitative importance and controlling mechanism. *Biochar*, 6(1), 30. https://doi.org/10.1007/s42773-024-00317-2
Zhang, P., Zhang, Z., Xiao, M., Chao, J., Dai, Y., Liu, G., & Senge, M. (2023). Effects of organic mulching on moisture and temperature of soil in greenhouse production of tomato under unheated greenhouse cultivation in the cold zone of China. *Food Science & Nutrition*, 11(8), 4829–4842. https://doi.org/10.1002/fsn3.3460
Zhang, W., Niu, W., & Luo, H. (2024). Effect of biochar amendment on the growth and photosynthetic traits of plants under drought stress: A meta-analysis. *Agronomy*, 14(12), 2952. https://doi.org/10.3390/agronomy14122952
Zhao, Y., Li, G., Li, S., Luo, Y., & Bai, Y. (2024). A review on the optimization of irrigation schedules for farmlands based on a simulation–optimization model. *Water*, 16(17), 2545. https://doi.org/10.3390/w16172545