

کاربرد کربن فعال و نانوذرات غنی شده با پتاسیم بر گوجه‌فرنگی در کشت بدون خاک با استفاده از آب کم کیفیت

اعظم راهوی^۱، ملک حسین شهریار^۲، محمد هدایت^۳ و علی دیندارلو^۴

چکیده

امروزه کمبود منابع آب با کیفیت مناسب و کاهش کیفیت آب‌های موجود، ضرورت استفاده از آب‌های نامتعارف را انکارناپذیر کرده است. این پژوهش به منظور بررسی تأثیر کاربرد کربن فعال و نانوذرات غنی شده با پتاسیم به عنوان مواد جاذب در شرایط استفاده از آب شور بر عملکرد و برخی صفات گوجه‌فرنگی در دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه خلیج فارس در شرایط گلخانه‌ای در سال ۱۴۰۱ اجرا شد. آزمایش به صورت فاکتوریل، در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. فاکتورها شامل تیمار شاهد (بدون مواد جاذب)، نانوذرات غنی شده با پتاسیم و کربن فعال در دو سطح (۱۵ و ۳۰ گرم در کیلوگرم بستر کشت) و سطوح شوری آب در سه سطح (۱/۸، ۳/۵ و ۵/۵ dS/m) بود که سطوح شوری مورد نظر با استفاده از زه‌آب، آب تصفیه‌کن چاه کشاورزی اعمال شد. نتایج نشان داد که با افزایش شوری به ۵/۵ dS/m، شاخص‌های عملکردی و رشدی کاهش یافتند. بیشترین عملکرد (۶/۶۶ کیلوگرم)، وزن میوه (۹۶/۳۳ گرم) و بهره‌وری مصرف آب (۲۷/۷۵ کیلوگرم بر متر مکعب) مربوط به تیمار ۱۵ گرم نانوذرات غنی شده در کیلوگرم بستر کشت در محلول با شوری ۱/۸ dS/m بود. بالاترین سطح تنش شوری (۵/۵ dS/m) کاربرد ۱۵ گرم کربن فعال موجب افزایش ۴۵ درصدی وزن میوه نسبت به تیمار فاقد ماده جاذب در همین سطح شوری شد. شوری همچنین باعث کاهش معنی‌داری محتوای نسبی آب برگ، محتوای کاروتنوئید و میزان کلروفیل a و b و بهره‌وری مصرف آب شد، در حالی که کاربرد مواد جاذب باعث کاهش اثرهای منفی شوری شد؛ علاوه بر این افزایش شوری موجب افزایش ویتامین ث، مواد جامد محلول، اسید کل قابل تیتراسیون، نشت الکترولیتی، لیکوپین و پرولین اندام هوایی شد. به‌طور کلی نتایج حاصل از این پژوهش، نشان‌دهنده اثرات مفید کاربرد کربن فعال و نانوذرات غنی شده در شرایط تنش شوری بر عملکرد و صفات فیزیولوژیکی و بهره‌وری آب در گوجه‌فرنگی است.

واژه‌های کلیدی: بستر کشت، شوری، بهره‌وری مصرف آب، کربن فعال، کشت بدون خاک.

ارجاع: راهوی ا. شهریار م. ح. هدایت م. و دیندارلو ع. ۱۴۰۳. کاربرد کربن فعال و نانوذرات غنی شده با پتاسیم بر گوجه‌فرنگی در کشت بدون خاک با استفاده از آب کم کیفیت. مجله پژوهش آب ایران. ۵۵: ۲۱-۳۲. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2024.14921.2633>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه خلیج فارس.

۲- استادیار علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه خلیج فارس.

۳- استادیار علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه خلیج فارس.

۴- استادیار علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه خلیج فارس.

* نویسنده مسئول: Mh.shahriari@pgu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۶

مقدمه

شورشدن منابع آب و خاک یکی از چالش‌های عمده عصر حاضر است که مانع تحقق امنیت غذایی و محیط‌زیست پایدار می‌شود. براساس آخرین پایش وضعیت خاک کشور از ۱۶/۸ میلیون هکتار اراضی کشاورزی، ۶/۵ میلیون هکتار اراضی آن دارای خاک‌های مبتلا به درجات مختلف شوری هستند (Moameni, 2011). گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) یکی از مهم‌ترین سبزی‌های مورد کشت و کار در دنیای صنعتی امروز است که علاوه بر مصرف تازه‌خوری، به صورت فرآوری شده مثل سس، رب، پوره و ... نیز استفاده می‌شود. کشور ایران با تولید ۵ میلیون و ۷۰۰ هزار تن گوجه‌فرنگی در سال، در رتبه هفتم دنیا قرار دارد (FAO, 2020). براساس مدل Maas and Hoffman (1997) حد آستانه تحمل به شوری در گوجه‌فرنگی بین ۲-۲/۵ dS/m بوده و کاهش عملکرد ۹-۱۰ درصدی به‌ازای هر واحد افزایش شوری بالاتر از حد آستانه تخمین زده شده است، همچنین حد آستانه تحمل به شوری آب آبیاری برای کشت گوجه‌فرنگی نیز ۱/۷ dS/m است.

با توجه به کمبود آب‌های با کیفیت مناسب برای استفاده در کشاورزی، کشاورزان به‌اجبار به طرف استفاده از آب‌های با کیفیتی پایین و شور پیش می‌روند. غلبه بر مسئله شوری مستلزم صرف تلاشی درازمدت و هزینه هنگفت است؛ بنابراین آنچه امروزه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، برنامه‌ریزی مناسب برای حل مشکل شوری و تلاش برای یافتن راهکارهایی است که بتوان در شرایط شوری محیط نیز عملکرد قابل‌قبولی داشت. استفاده از آب‌های غیرمعارف نظیر آب‌های شور، به‌همراه افزایش کارایی مصرف و بهره‌وری آب کشاورزی، از جمله راه‌کارهای مقابله با کم‌آبی است که خود با شیوه‌های مختلف قابل‌انجام است؛ علاوه‌براین کمبود آب و عدم امکان کنترل دقیق تغذیه گیاه در سیستم‌های خاکی باعث شده تا در دهه‌های اخیر تولید محصولات کشاورزی به روش‌های مختلف کشت بدون خاک در عرصه جهانی افزایش یابد. اخیراً از جاذب‌های کربن فعال و زئولیت برای کاهش شوری آب به روش جذب سطحی استفاده می‌شود. فرایند جذب سطحی، جداشدن یک جزء از محلول و تجمع آن روی سطح جاذب است. جاذب‌ها به‌دلیل متفاوت بودن نوع، مقدار، سطح ویژه و موقعیت گروه‌های

عاملی موجود در ساختار دارای قابلیت‌های متفاوتی در جذب سطحی هستند (Kul et al., 2021)؛ بنابراین استفاده از کربن فعال و نانوزئولیت در کشت بدون خاک می‌تواند یکی از راه‌کارهای مؤثر در کاهش شوری آب آبیاری باشد.

Turan (2008) میزان توانایی زئولیت طبیعی در کاهش شوری شیرابه کمپوست را بررسی کرد. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که چنانچه زئولیت به‌میزان ۵ و ۱۰ درصد حجمی به شیرابه کمپوست اضافه شود، شوری آن به ترتیب حدود ۶۷ و ۸۹ درصد کاهش می‌یابد و از ۱۵/۷ dS/m به ۵/۲۴ و ۱/۷۴ می‌رسد. در پژوهشی Usman et al. (2016) اثرات زغال زیستی را بر عملکرد و کیفیت محصول گوجه‌فرنگی که تحت آبیاری قطره‌ای با آب شور یا غیرشور بود را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن زغال زیستی باعث افزایش رشد رویشی، عملکرد و شاخص‌های کیفی در تمام تیمارهای آبیاری شد؛ باین‌حال اثر منفی شوری بر رشد رویشی و عملکرد، با کاربرد زغال زیستی (به‌ویژه در میزان کاربرد بالا) کاهش یافت. (Agbna et al. (2017) در پژوهشی از زغال زیستی برای بهبود محتوای آب قابل‌دسترس، رشد، عملکرد و کارایی مصرف آب آبیاری گیاه گوجه‌فرنگی در شرایط خاک شور استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که کاربرد زغال زیستی کارایی مصرف آب آبیاری، رشد و عملکرد گوجه‌فرنگی را بهبود بخشید. نتایج پژوهش Kul et al. (2021) نشان داد که اگرچه تنش شوری رشد گیاه را در تمام سطوح زغال زیستی تحت‌تأثیر منفی قرار داد، کاربرد زغال زیستی عملکرد کلی گیاه را در شرایط شور بهبود بخشید؛ بنابراین، این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر کربن فعال و نانوزئولیت غنی‌شده با پتاسیم به‌عنوان مواد جاذب در شرایط آب شور بر عملکرد و برخی صفات گوجه‌فرنگی در شرایط گلخانه‌ای کشت بدون خاک اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه خلیج فارس واقع در ۸ کیلومتری جنوب شرقی شهر برازجان با ارتفاع ۱۱۰ متر از سطح دریا با طول شرقی ۵۱ درجه و ۱۷ دقیقه و عرض شمالی ۲۱ درجه و ۲ دقیقه، اجرا شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب

طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار در شرایط دمایی 22 ± 5 صورت گرفت. آزمایش شامل دو فاکتور بستر کشت و درجهٔ سلیسیوس و رطوبت نسبی ۵۰ تا ۷۰ درصد، شوری آب آبیاری بود (جدول ۱).

جدول ۱- تیمارهای مورد استفاده در آزمایش

ردیف	بسترهای کشت	شوری (dS/m)
۱	کوکوپیت+ پرلیت (با نسبت حجمی ۱:۲)	۱/۸
۲	کوکوپیت+ پرلیت (با نسبت حجمی ۱:۲)	۳/۵
۳	کوکوپیت+ پرلیت (با نسبت حجمی ۱:۲)	۵/۵
۴	کوکوپیت+ پرلیت (با نسبت حجمی ۱:۲) + ۱۵ گرم کربن فعال	۱/۸
۵	کوکوپیت+ پرلیت (با نسبت حجمی ۱:۲) + ۱۵ گرم کربن فعال	۳/۵
۶	کوکوپیت+ پرلیت (با نسبت حجمی ۱:۲) + ۱۵ گرم کربن فعال	۵/۵
۷	کوکوپیت+ پرلیت (با نسبت حجمی ۱:۲) + ۳۰ گرم کربن فعال	۱/۸
۸	کوکوپیت+ پرلیت (با نسبت حجمی ۱:۲) + ۳۰ گرم کربن فعال	۳/۵
۹	کوکوپیت+ پرلیت (با نسبت حجمی ۱:۲) + ۳۰ گرم کربن فعال	۵/۵
۱۰	کوکوپیت+ پرلیت (با نسبت حجمی ۱:۲) + ۱۵ گرم نانوذولیت غنی شده با پتاسیم	۱/۸
۱۱	کوکوپیت+ پرلیت (با نسبت حجمی ۱:۲) + ۱۵ گرم نانوذولیت غنی شده با پتاسیم	۳/۵
۱۲	کوکوپیت+ پرلیت (با نسبت حجمی ۱:۲) + ۱۵ گرم نانوذولیت غنی شده با پتاسیم	۵/۵
۱۳	کوکوپیت+ پرلیت (با نسبت حجمی ۱:۲) + ۳۰ گرم نانوذولیت غنی شده با پتاسیم	۱/۸
۱۴	کوکوپیت+ پرلیت (با نسبت حجمی ۱:۲) + ۳۰ گرم نانوذولیت غنی شده با پتاسیم	۳/۵
۱۵	کوکوپیت+ پرلیت (با نسبت حجمی ۱:۲) + ۳۰ گرم نانوذولیت غنی شده با پتاسیم	۵/۵

نشاءهای گوجه‌فرنگی رقم ادمینو در درون سینی‌های کشت یونولیتی تهیه شد. کربن فعال پودری محصول شرکت مرک آلمان و نانوذولیت غنی‌شده با پتاسیم (۱۰ درصد وزنی) نیز از شرکت دانش‌بنیان آذر کیمیا خاتم تهیه شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی کربن فعال و نانوذولیت در جدول ۳ نشان داده شده است. بستر کشت حاوی کوکوپیت و پرلایت با نسبت حجمی ۱:۲ تهیه و سپس نانوذولیت غنی‌شده و کربن فعال به آن افزوده شد.

پنج نوع بستر کشت شامل بستر کشت پایه (کوکوپیت و پرلیت به نسبت ۲ به ۱) و تیمارهای کربن فعال و نانوذولیت غنی‌شده با پتاسیم هر کدام در دو سطح ۱۵ و ۳۰ گرم (از هر مادهٔ جاذب در کیلوگرم بستر کشت) که به بستر کشت پایه اضافه شد. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی مواد استفاده‌شده در تهیهٔ بستر کشت پایه که با روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شده در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی مواد استفاده شده در تهیه بستر کشت پایه

بستر کشت	pH	EC(dS/m)	ظرفیت تبادل کاتیونی (cmole/kg)	چگالی ظاهری (g/cm^3)	ظرفیت نگهداری رطوبت (%)	تخلخل (%)
کوکوپیت	۶/۸	۰/۸	۲	۰/۷	۸۰	۸۷
پرلایت	۷/۶	۰/۲	۱۴۷	۰/۴	۵۱	۹۴

جدول ۳- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی جاذب‌ها

جاذب‌ها	شکل ظاهری	رنگ	اندازه	چگالی ظاهری (g/cm^3)	سطح ویژه (m^2/g)
نانوذولیت	پودر	سفید خاکستری	۲۰-۴۲ nm	۰/۴۶۵	۳۴۰
کربن فعال	پودر	تیره	$< 100 \mu m$	۰/۴۴	۱۵۰۰-۸۰۰

گلدان‌ها، آبیاری یا محلول‌دهی به اندازه‌ای بود که در انتهای آبیاری حدود ۳۰ درصد محلول از زهکش گلدان‌ها خارج شود.

سطوح شوری در سه سطح (۱/۸، ۳/۵ و ۵/۵ dS/m) اعمال شد. برای رسیدن به سطوح شوری مورد نظر، محلول غذایی هوگلند بدون شوری با $EC=1/8$ dS/m به‌عنوان سطح اول شوری در نظر گرفته و سطوح دیگر شوری از طریق افزودن پساب آب تصفیه‌کن با نسبت مشخص به محلول غذایی هوگلند حاصل شد. ویژگی‌های شیمیایی آب تصفیه‌شده و پساب استفاده‌شده برای تعیین سطوح شوری در جدول ۴ نشان داده شد.

جدول ۴- ویژگی‌های شیمیایی آب‌های استفاده‌شده برای تعیین سطوح شوری

آب	EC(dS/m)	pH	HCO ₃ ⁻ (meq/L)	Cl ⁻ (meq/L)	SO ₄ ⁻² (meq/L)	Ca ⁺² (meq/L)	Mg ⁺² (meq/L)	Na ⁺ (meq/L)	SAR
زه آب	۸/۵	۷/۵	۴/۲	۶۸/۱	۲۱/۳	۵/۶	۲۱/۳	۷۲/۴	۱۹/۷۴
آب تصفیه‌شده	۰/۱۷	۷/۴	۰	۱/۲۵	۰/۴۵	۰/۲۵	۰/۱۳	۱/۳	۲/۹۴

Pal3 ساخت کشور ژاپن) استفاده شد. میزان اسید کل قابل‌تیتراسیون (TA) از طریق تیتراسیون با هیدروکسید سدیم تعیین شد. اندازه‌گیری مقدار ویتامین ث با استفاده از روش (Malik and Zora (2005) و به‌وسیله تیتراسیون با یدیدور پتاسیم تعیین شد. به‌منظور اندازه‌گیری میزان نشت الکترولیتی برگ، از روش (Promyou et al. (2012) استفاده شد. محتوای نسبی آب برگ‌ها با روش (Ritchie et al. (1990) محاسبه شد. اندازه‌گیری غلظت پرولین با روش (Bates (1973) با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل UV/Vis 2100 در طول موج ۵۲۰ نانومتر و لیکوین به روش (Perkins-Veazie et al. (2001) با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۰۳ نانومتر انجام شد. برای هر تیمار، بهره‌وری آب با استفاده از معادله زیر محاسبه شد.

$$IWP = \frac{Y}{I} \quad (1)$$

IWP = بهره‌وری مصرف آب بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، Y = عملکرد بر حسب کیلوگرم و I = حجم آب مصرفی در طول آزمایش بر حسب مترمکعب است. برای مرتب‌کردن داده‌ها از نرم‌افزار اکسل استفاده شد. بررسی نرمال بودن داده‌ها و تجزیه آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (ver 9.4) انجام گرفت. مقایسه

مواد جاذب علاوه بر شروع آزمایش به فاصله یک ماهه، دو مرحله نیز در طول فصل رشد به لایه سطحی بستر کشت اضافه شد. برای جلوگیری از خروج ذرات جاذب‌ها از کف گلدان‌ها توری بسیار ریز در ته آن‌ها قرار داده شد. محلول‌ها به‌صورت هفتگی تهیه و محلول‌دهی به‌وسیله سیستم بسته چرخشی و قطره‌چکانی با دبی ۱ لیتر در ساعت و دو بار در روز انجام شد. در هر بار محلول‌دهی برای هر بوته، بسته به مرحله رشد گیاه بین ۲۵۰ میلی‌لیتر تا یک لیتر محلول غذایی در نظر گرفته و در مجموع در طول فصل رشد ۱۶۵ لیتر محلول غذایی برای هر بوته گوجه‌فرنگی استفاده شد. برای جلوگیری از تنش خشکی و اطمینان از توزیع مناسب رطوبت در

تیمارهای شوری دو هفته پس از استقرار نشاها در بستر کشت، از طریق سیستم محلول‌دهی قطره‌ای اعمال شد و تا یک هفته قبل از انتهای آزمایش ادامه داشت. برای جلوگیری از تجمع نمک در بسترهای کشت به‌صورت هفتگی آبیاری با چهار لیتر آب ($EC=0/17$ dS/m) برای هر گلدان انجام شد. طول دوره رشد گیاه ۱۲۰ روز در نظر گرفته شد. در مرحله داشت نیز کلیه عملیات برای تمام تیمارها به‌طور یکسان انجام شد. میوه‌ها با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن شدند. سپس وزن تمام میوه‌ها از ابتدا تا انتهای آزمایش با هم جمع و به‌عنوان عملکرد کل هر بوته بر حسب کیلوگرم در گلدان در نظر گرفته شد. میانگین وزن میوه نیز بر حسب گرم محاسبه شد.

میزان کلروفیل a، b و کل به روش (Arnon (1949) و کاروتنوئید با روش (Lichtenthaler (1987) با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل UV/Vis 2100 ساخت کشور چین اندازه‌گیری شد. برای بررسی صفات فیزیولوژیکی، از هر تکرار پس از برداشت دوم، تعدادی میوه رسیده سفت، به‌صورت تصادفی انتخاب و عصاره آن‌ها توسط آب‌میوه‌گیر گرفته شد. برای اندازه‌گیری مواد جامد محلول (TSS) میوه‌های گوجه‌فرنگی از دستگاه قندسنج ATAGO (مدل

میانگین به روش دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

صفات عملکردی و رنگدانه‌ای گوجه‌فرنگی

براساس نتایج تجزیه واریانس، اثر ساده مواد جاذب و تنش شوری و اثرهای متقابل آنها برای تمامی صفات بررسی شده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. براساس نتایج مقایسه میانگین‌های اثر متقابل مواد جاذب و تنش شوری مطابق با آزمون چنددامنه‌ای دانکن نشان داد که بیشترین عملکرد و متوسط وزن میوه مربوط به ۱۵ گرم نانوزئولیت غنی‌شده در کیلوگرم بستر کشت در شوری ۱/۸ dS/m به ترتیب ۶/۶۶ کیلوگرم در هر بوته و ۹۶/۳ گرم بود که با سایر تیمارها در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری داشت (جدول ۵). همچنین مشخص شد که افزایش میزان شوری، موجب کاهش عملکرد کل بوته و متوسط وزن میوه گوجه‌فرنگی شد، در مقابل افزودن مواد جاذب می‌تواند اثر شوری را تا حدودی کاهش دهد و تأثیر بهتری بر عملکرد کل بوته و متوسط وزن میوه داشته باشد؛ به طوری که کاربرد ۳۰ گرم نانوزئولیت غنی‌شده با پتاسیم و ۱۵ گرم کربن فعال در کیلوگرم بستر کشت در بالاترین سطح تنش شوری، به ترتیب موجب افزایش ۲۸ و ۴۵ درصدی عملکرد کل بوته و متوسط وزن میوه گوجه‌فرنگی نسبت به تیمار فاقد مواد جاذب در همین سطح شوری شد. شوری رشد گیاه را به دلیل ایجاد تنش در منطقه ریشه و سمیت یون‌ها در بافت‌های گیاهی کاهش می‌دهد. عناصری مانند سدیم از طریق تأثیر بر پمپ‌های پروتونی و اختلال در آنها سبب کاهش اختلال در تقسیم یاخته‌ای و طویل شدن و در نتیجه کاهش رشد می‌شوند. (AL-Amri, 2013) نیز گزارش دادند که تنش شوری در گوجه‌فرنگی باعث کاهش رشد رویشی و کاهش عملکرد می‌شود. قدرت تبادل کاتیونی بالای زئولیت و قدرت بستر در حفظ آب و pH را دلیل عملکرد بالاتر در بستر دارای زئولیت نسبت به پرلیت بیان شده است (Savvas et al., 2001). با بررسی تأثیر تنش آبی و زئولیت طبیعی بر گیاه معطر و دارویی مرهم مولداوی (*Dracocephalum moldavianum* L.) نتایج مشابهی توسط Gholizadeh et al. (2010) گزارش شد.

علاوه بر این نتایج پژوهش ما با یافته‌های Ranjbar et al. (2004) روی گیاه تنباکو مطابقت داشت. افزایش رشد گیاه در تیمارهای حاوی زئولیت ممکن است مربوط به افزایش زیست فراهمی برخی از عناصر غذایی باشد. همچنین می‌توان گفت عناصر سدیم و کلر ناشی از شوری، از طریق جذب سطحی یا نفوذ در درون کانال‌های نانوزئولیت از اثرات منفی شوری کاسته و باعث افزایش شاخص‌های رشدی گوجه‌فرنگی شده است؛ علاوه بر این به دلیل غنی‌بودن نانوزئولیت استفاده‌شده در این پژوهش از پتاسیم و وجود رابطه آنتاگونیستی بین پتاسیم و سدیم، احتمالاً از طریق کاهش جذب سدیم توسط گیاه، باعث تعدیل اثرات منفی تنش شوری بر گیاه گوجه‌فرنگی شده است. پژوهش اخیر نشان می‌دهد که افزودن زغال فعال در شرایط تنش شوری باعث افزایش عملکرد گوجه‌فرنگی می‌شود. استفاده از زغال زیستی در بستر رشد در یک سیستم کشت فشرده گلخانه‌ای باعث افزایش زیست توده گیاهی شد (Massa et al., 2019). نتایج پژوهش (Kul et al., 2021) نیز نشان داد که تنش شوری در تمام سطوح زغال زیستی، تأثیر منفی روی رشد گیاه دارد، اما کاربرد ۵ و ۱۰ درصد زغال زیستی عملکرد کلی گوجه‌فرنگی را در شرایط شور بهبود بخشید. در پژوهشی (Hossain et al., 2010) تأثیر کاربرد زغال زیستی را بر گوجه‌فرنگی گیلانی بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که کاربرد زغال زیستی، عملکرد محصول در مقایسه با تیمار شاهد را ۶۴ درصد افزایش داد. کربن فعال ظرفیت بالایی در جذب انواع نمک‌ها دارد و به همین دلیل از کربن فعال و زغال زیستی در فرایندهای صنعتی مانند نمک‌زدایی استفاده شده است؛ با این حال، استفاده بالقوه از آنها به عنوان یک اصلاح‌کننده بستر برای کاهش تنش ناشی از نمک در گیاه کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Zou et al., 2008). در این پژوهش نیز به نظر می‌رسد توانایی تیمارهای دارای کربن فعال در کاهش اثر شوری می‌تواند به دلیل جذب نمک توسط کربن فعال باشد که نهایتاً جذب یون‌های مؤثر در شوری را توسط گیاه کاهش داده و منجر به رشد بهتر گوجه‌فرنگی در شرایط شور شده است.

جدول ۵- مقایسه میانگین صفات عملکردی و رنگدانه‌ای در گوجه‌فرنگی

جاذب	شوری (dS/m)	عملکرد (کیلوگرم در بوته)	وزن میوه (گرم)	کلروفیل a (mg. g FW ⁻¹)	کلروفیل b (mg. g FW ⁻¹)	کلروفیل کل (mg. g FW ⁻¹)	کاروتنوئید (mg. g FW ⁻¹)
	۱/۸	۵/۱ ^d	۷۷/۸ ^g	۱/۰۲ ^b	-/۵۴ ^b	۱/۵۶ ^b	۱/۴۱ ^b
شاهد	۳/۵	۴/۵ ^c	۵۸/۸ ^k	-/۹۸ ^{bc}	-/۵۸ ^a	۱/۵۶ ^b	۱/۲۶ ^{cd}
	۵/۵	۳/۴۵ ⁱ	۵۵/۱ ^l	-/۷۴ ^f	-/۳۵ ^d	۱/۰۹ ^e	۱/۱۱ ^c
	۱/۸	۵/۹۱ ^c	۸۹/۳ ^d	۱/۰ ^b	-/۵۸ ^a	۱/۵۸ ^b	۱/۴۷ ^a
کربن فعال ۱۵	۳/۵	۴/۷۷ ^d	۸۵/۶ ^e	-/۹۸ ^{bc}	-/۵۷ ^a	۱/۵۶ ^b	۱/۲۷ ^{cd}
	۵/۵	۴/۱۷ ^{gh}	۸۰/۳ ^f	-/۸۷ ^d	-/۴۷ ^c	۱/۳۴ ^d	۱/۲۱ ^{de}
	۱/۸	۶/۰ ^c	۹۱/۵ ^c	۱/۱۰ ^a	-/۶۰ ^a	۱/۷۰ ^a	۱/۴۷ ^a
کربن فعال ۳۰	۳/۵	۵/۹۱ ^c	۸۴/۷ ^e	-/۹۳ ^c	-/۴۰ ^c	۱/۳۳ ^{de}	۱/۴۰ ^b
	۵/۵	۴/۷۴ ^d	۷۵/۳ ^h	-/۸۰ ^c	-/۴۱ ^c	۱/۲۱ ^f	۱/۳۵ ^{bc}
	۱/۸	۶/۶۶ ^a	۹۶/۳ ^a	۱/۰۹ ^a	-/۵۷ ^a	۱/۶۶ ^a	۱/۵۱ ^a
نانوزئولیت ۱۵	۳/۵	۴/۷۴ ^d	۸۰/۵ ^f	-/۹۳ ^c	-/۴۴ ^c	۱/۳۶ ^{cd}	۱/۲۶ ^{cd}
	۵/۵	۴/۲۹ ^{ef}	۷۰/۵ ⁿ	-/۸۸ ^d	-/۴۳ ^c	۱/۳۰ ^{de}	۱/۱۷ ^{de}
	۱/۸	۶/۳۳ ^b	۹۳/۴ ^b	۱/۱۳ ^a	-/۵۷ ^a	۱/۶۹ ^a	۱/۵۳ ^a
نانوزئولیت ۳۰	۳/۵	۴/۸۳ ^d	۷۳/۵ ⁱ	-/۹۷ ^{bc}	-/۵۳ ^b	۱/۴۰ ^c	۱/۳۴ ^{bc}
	۵/۵	۴/۴۱ ^e	۷۱/۷ ^j	-/۸۷ ^d	-/۵۱ ^b	۱/۳۸ ^c	۱/۲۶ ^{cd}

در هر ستون میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد، تفاوت معنی‌داری ندارند.

شرایط تنش افزایش داده و اثر تنش شوری بر گیاه را کاهش داده است که تأییدی بر نتایج پژوهش حاضر است. بررسی نتایج نشان داد که کاربرد مواد جاذب موجب افزایش کلروفیل کل، کلروفیل a، b و کاروتنوئید نسبت به عدم کاربرد آن شد، به خصوص تیمار دارای نانوزئولیت غنی شده با پتاسیم، که بیشترین کلروفیل a و b را در ۱/۸ dS/m بر متر نشان داد و موجب افزایش این شاخص‌ها نسبت به تیمار فاقد مواد جاذب (شاهد) در همین سطح شوری شد. در واقع آنچه از نتایج این پژوهش برمی‌آید، این است که نانوزئولیت بر رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه تأثیر داشته و باعث افزایش این شاخص‌ها شده است. براساس نتایج این آزمایش می‌توان گفت مصرف نانوزئولیت غنی شده با پتاسیم در شرایط تنش، ممکن است از کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی القاشده توسط تنش ممانعت به عمل آورده و با حفظ فتوسنتز گیاه، خسارات ناشی از تنش را کاهش دهد. در پژوهشی دیگر (She *et al.* (2018) تأثیر کاربرد زغال زیستی را بر تنش شوری در گوجه‌فرنگی بررسی کردند نتایج آن‌ها نشان داد که رشد رویشی و عملکرد گوجه‌فرنگی تحت تأثیر معکوس و معنی‌دار آبیاری با آب شور قرار گرفت؛ اما اصلاح با زغال زیستی باعث افزایش رشد رویشی، عملکرد و پارامترهای کیفی در رژیم‌های آبیاری با آب شور شد که در راستای پژوهش حاضر است؛

نتایج نشان داد که با کاربرد هر دو نوع مواد جاذب میزان کلروفیل a، b و کل افزایش پیدا کرد؛ بدین صورت که کاربرد ۳۰ گرم نانوزئولیت غنی شده با پتاسیم در کیلوگرم بستر کشت در شوری ۱/۸ dS/m، موجب کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید رنگیزه‌های مهم فتوسنتزی هستند که نقش مهمی در فتوسنتز دارند. شوری باعث کاهش شاخص کلروفیل، کلروفیل a، b، کل و کاروتنوئید شد. شوری از طریق تنش‌های اکسیداتیو باعث تخریب کلروفیل می‌شود. به نظر می‌رسد ماده اولیه گلوتامات که برای تولید پرولین و کلروفیل به کار می‌رود، در تنش شوری موجب تحریک آنزیم لیگاز و در نتیجه تبدیل گلوتامات به پرولین می‌شود و بدین صورت گلوتامات بیشتر به تولید پرولین اختصاص می‌یابد، دلیل دیگر کاهش کلروفیل، افزایش استفاده از نیتروژن برای سنتز پرولین است (Bybordi, 2012). نتایج این پژوهش بیانگر این است که افزایش شوری از ۱/۸ به ۵/۵ dS/m باعث کاهش شاخص کلروفیل، کلروفیل a، b و کاروتنوئید شده است که می‌تواند به دلیل تجمع یون‌ها، تخریب کلروپلاست، کاهش تولید کلروفیل، کاهش سطح برگ، اختلال در جذب عناصر آهن و منیزیم باشد. Ramjardi *et al.* (2015) در خصوص اثر کاربرد زئولیت در کاهو تحت شرایط تنش شوری گزارش دادند که زئولیت به طور معنی‌داری کلروفیل a، b، کل و کاروتنوئید گیاه را در

(Eris, 2005) نیز گزارش شده است. به نظر می‌رسد که تنش شوری، دیواره سلول‌های برگ گوجه‌فرنگی را تخریب کرده و مایع درون سلولی و واکوئلی به داخل محیط تراوش و باعث غلیظ شدن و بالارفتن نشت یونی می‌شود.

کاربرد جاذب‌ها می‌توانند با تأمین عناصر غذایی مثل کلسیم، منیزیم و آهن باعث بهبود رشد گیاه شوند؛ برای مثال کلسیم باعث بهبود دیواره غشاء یاخته‌ای شده و در نتیجه نشت الکترولیتی غشاء کم‌تر و رشد گیاه بیشتر می‌شود. در بررسی تأثیر زئولیت بر شوری در گل همیشه‌بهار (Moghimi and Qavami, 2014) گزارش کردند که استفاده از زئولیت باعث کاهش اثرات منفی شوری شد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که اگرچه تیمار شوری موجب افزایش ویتامین ث و نشت الکترولیتی شد؛ اما کاربرد کربن فعال و نانوزئولیت در بستر کشت گوجه‌فرنگی باعث کاهش این صفات شد که می‌تواند بیانگر مؤثر بودن جاذب‌ها در کاهش اثر تنش شوری آب باشد. سطح ویژه زیاد جاذب‌ها، توانایی بالای آن‌ها در جذب یون‌های مؤثر در شوری و کاهش جذب یون‌ها توسط گیاه می‌تواند از دلایل مؤثر بودن جاذب‌ها در کاهش تنش شوری باشد و نهایتاً با کاهش تنش شوری صفات فیزیولوژیکی گیاه که در نتیجه تنش شوری افزایش یافته را کاهش داد.

بیشترین اسید کل قابل‌تیتراسیون، لیکوپن میوه، کل مواد جامد محلول میوه و پرولین برگ به ترتیب با مقادیر ۱۷/۲ درصد، ۱۶/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده تر، ۶/۵۰ درجه بریکس و ۳۲/۵ میکرومول بر گرم وزن تر در تیمار ۳۰ گرم نانوزئولیت غنی‌شده با پتاسیم در کیلوگرم بستر کشت در شوری ۵/۵ dS/m بود که با سایر تیمارها اختلاف آماری معنی‌داری داشتند. بیشترین محتوای نسبی آب برگ متعلق به ۳۰ گرم نانوزئولیت غنی‌شده با پتاسیم و ۳۰ گرم کربن فعال در تیمار محلول پایه به ترتیب به میزان ۷۰/۵ و ۶۹/۱ درصد بود که با سایر تیمارها اختلاف آماری معنی‌داری داشت. نتایج نشان داد که کاربرد ۳۰ گرم نانوزئولیت غنی‌شده با پتاسیم در شوری ۵/۵ dS/m، موجب افزایش ۹ درصدی TSS و ۳۴ درصدی اسید کل قابل‌تیتراسیون گوجه‌فرنگی نسبت به تیمار فاقد مواد جاذب در همین سطح شوری شد (جدول ۶).

بنابراین می‌توان بیان کرد که کاربرد کربن فعال در این پژوهش به دلیل دارا بودن سطح ویژه خیلی زیاد و متخلخل بودن ساختار آن باعث کاهش اثرهای تنش شوری و جلوگیری از تخریب شدید کلروفیل a، b و کاروتنوئید در سطوح بالای شوری شده است.

صفات فیزیولوژیکی

بر اساس نتایج تجزیه واریانس مربوط به صفات فیزیولوژیکی گوجه‌فرنگی، اثر ساده مواد جاذب و تنش شوری برای تمامی صفات در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. همچنین بررسی نتایج نشان داد اثر متقابل مواد جاذب و تنش شوری نیز برای تمامی صفات به جز مواد جامد محلول کل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد.

بررسی نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل مواد جاذب و تنش شوری بیانگر این است که بیشترین ویتامین ث و نشت الکترولیتی متعلق به تیمار فاقد مواد جاذب در محلول با شوری ۵/۵ dS/m، به ترتیب به میزان ۶۰/۹ میلی‌گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب میوه و ۵۱/۲ درصد مشاهده شد که با سایر تیمارها اختلاف آماری معنی‌داری داشتند؛ علاوه بر این کاربرد ۱۵ گرم کربن فعال در کیلوگرم بستر کشت در بالاترین سطح تنش شوری (۵/۵ dS/m) موجب کاهش ۱۹ درصدی ویتامین ث نسبت به تیمار شاهد در همان سطح تنش شد (جدول ۶). گوجه‌فرنگی گیاهی است که به دلیل داشتن ویتامین‌های مختلف به ویژه ویتامین ث و وجود اسیدهای خاص، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نتایج این پژوهش با یافته‌های (Cuartero and Fernández-Muñoz, 1998) در مورد گوجه‌فرنگی مطابقت دارد که عنوان کردند تنش شوری سبب افزایش محتوای ویتامین ث می‌شود. در پژوهشی (Moharreri et al., 2015) بیان کردند که کم‌ترین مقدار ویتامین ث در بین واریته‌های گوجه‌فرنگی مربوط به تیمار زغال زیستی بود. به عبارت دیگر کاربرد زغال زیستی سبب کاهش میزان ویتامین ث در مقایسه با شاهد بود که با نتایج پژوهش حاضر مبنی بر کاهش ویتامین ث در اثر کاربرد کربن فعال مطابقت دارد.

با افزایش شوری، نشت یونی در گوجه‌فرنگی افزایش یافت. افزایش نشت یونی غشاء با افزایش شوری در اسفناج (Kaya et al., 2001) و توت‌فرنگی (Turhan and

جدول ۶- مقایسه میانگین صفات فیزیولوژیکی مورد بررسی در گوجه‌فرنگی

جاذب	شوری محلول غذایی (dS/m)	نشت الکترولیتی (%)	محتوای نسبی آب برگ (%)	لیکوپن میوه (میلی‌گرم در کیلوگرم ماده تر)	پرولین برگ (میکرومول بر گرم وزن تر)	ویتامین ث میوه (میلی‌گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب میوه)	اسید کل قابل تیتراسیون میوه (میلی‌گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب میوه)	کل مواد جامد محلول میوه (درجه بریکس)
	۱/۸	۴۴/۱ ^{de}	۶۵/۷ ^b	۱۴/۸ ⁱ	۳/۳۵ ⁱ	۴۴/۱ ^c	۶/۴ ^h	۴/۳۰ ^h
شاهد	۳/۵	۴۷/۶ ^b	۵۸/۶ ^d	۱۵/۲ ^f	۱۰/۲ ^g	۵۳/۰ ^c	۸/۳۳ ^f	۵/۰ ^{defg}
	۵/۵	۵۱/۲ ^a	۴۹/۳ ^f	۱۵/۹ ^c	۱۹/۴ ^c	۶۰/۹ ^a	۱۲/۸ ^b	۵/۹۶ ^b
کربن فعال ۱۵	۱/۸	۴۵/۸ ^c	۶۵/۸ ^b	۱۱/۶ ^m	۴/۳۳ ^{hi}	۳۹/۴ ^f	۸/۹۳ ^e	۴/۷ ^{efgh}
	۳/۵	۴۶/۲ ^c	۶۰/۵ ^{cd}	۱۴/۹ ⁱ	۴/۸۴ ^h	۳۰/۸ ⁱ	۱۰/۲ ^d	۵/۲ ^{def}
	۵/۵	۴۸/۸ ^b	۵۸/۴ ^d	۱۵/۴ ^d	۲۶/۰ ^b	۴۹/۱ ^d	۱۰/۹ ^c	۵/۵۶ ^{bcd}
کربن فعال ۳۰	۱/۸	۴۰/۳ ^e	۶۹/۱ ^a	۱۴/۳ ⁱ	۴/۳۰ ^{hi}	۴۴/۱ ^c	۷/۰۴ ^g	۴/۴۶ ^{gh}
	۳/۵	۴۳/۷ ^{de}	۶۳/۶ ^b	۱۵/۲ ^e	۱۳/۴ ^f	۳۹/۵ ^f	۱۰/۲ ^d	۴/۹۰ ^{efg}
	۵/۵	۴۶/۲ ^c	۵۳/۷ ^c	۱۵/۰ ^h	۱۷/۷ ^d	۵۳/۱ ^c	۱۰/۹ ^c	۵/۳۳ ^{cde}
نانوذرات ۱۵	۱/۸	۴۰/۳ ^e	۶۵/۸ ^b	۱۴/۴ ^k	۴/۵۴ ^{hi}	۳۵/۲ ^h	۶/۳۹ ^h	۴/۷۶ ^{efgh}
	۳/۵	۴۳/۷ ^{de}	۵۹/۶ ^{cd}	۱۵/۱ ^e	۱۵/۵ ^e	۳۵/۱ ^h	۸/۹۵ ^c	۵/۳۳ ^{cde}
	۵/۵	۴۶/۲ ^c	۵۴/۷ ^c	۱۵/۹ ^c	۱۷/۳ ^d	۵۷/۲ ^b	۱۰/۲ ^d	۵/۸۸ ^{bc}
نانوذرات ۳۰	۱/۸	۳۶/۷ ^b	۷۰/۵ ^a	۱۴/۱ ^m	۴/۴۰ ^{hi}	۳۵/۱ ^h	۱۰/۲ ^d	۴/۸۰ ^{efgh}
	۳/۵	۴۲/۰ ^f	۶۰/۹ ^c	۱۵/۹ ^b	۵/۱۲ ^h	۳۶/۸ ^g	۱۰/۲ ^d	۵/۳۰ ^{cdef}
	۵/۵	۴۷/۷ ^b	۵۱/۰ ^f	۱۶/۱ ^a	۳۲/۵ ^a	۵۲/۸ ^c	۱۷/۳ ^a	۶/۵۰ ^a

در هر ستون میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد، تفاوت معنی‌داری ندارند.

یافته‌های Hameeda *et al.* (2019) را تأیید می‌کند. آنها گزارش دادند که کاربرد بیوجار می‌تواند مقادیر TA و TSS گوجه‌فرنگی را در شرایط شوری افزایش دهد. کاربرد کربن فعال و نانوذرات غنی‌شده با پتاسیم با افزایش طول ریشه و تولید زیست‌توده سطح بیشتری را برای جذب بیشتر مواد مغذی و آب حتی در یک محیط شور فراهم می‌کنند؛ بنابراین باعث افزایش صفات کیفی ذکرشده در این پژوهش شدند.

کاربرد کربن فعال و نانوذرات غنی‌شده با پتاسیم موجب افزایش لیکوپن نسبت به عدم کاربرد آن شد؛ بدین‌صورت که بیشترین میزان لیکوپن در تیمار ۳۰ گرم در کیلوگرم نانوذرات غنی‌شده با پتاسیم مشاهده شد. احتمال می‌رود عنصر سدیم ناشی از شوری، جذب سطحی کانی زئولیت شده و درون کانال‌های زئولیت نفوذ کرده و به این ترتیب نانوذرات اثرات منفی شوری را کاهش داده و باعث افزایش لیکوپن شده است.

با افزایش سطوح شوری، پرولین برگ افزایش یافت، از طرفی دیگر افزودن مواد جاذب به خاک نیز موجب

با افزایش سطوح هدایت الکتریکی محلول غذایی، میزان اسیدهای قابل تیتراسیون نیز افزایش یافت. تفاوت بین مقادیر کاتیون و آنیون‌های معدنی در میوه‌های تحت تیمار شوری منجر به ایجاد غلظت‌های بالاتر اسیدهای آلی در این میوه می‌شود (De Pascale *et al.*, 2002). از علت‌های افزایش مواد جامد محلول (TSS) در گیاه گوجه‌فرنگی تحت تیمار شوری، تجمع گلوکز و یونها به‌ویژه کلر گزارش شده است. به‌نظر می‌رسد در میوه‌های تحت تیمار شوری، کاهش مقادیر آب به‌دلیل پتانسیل پایین آب در گیاه و برگ و همچنین افزایش غلظت برخی از عناصر مانند سدیم و کلر میوه، نقش مهمی در افزایش هدایت الکتریکی (EC) عصاره میوه داشته باشند. پژوهش Zhang *et al.* (2016) مرتبط با تأثیر شوری بر شاخص‌های میوه گوجه‌فرنگی نشان داد که تنش شوری بر شاخص‌های کیفی میوه مانند اسید کل قابل تیتراسیون، لیکوپن میوه، کل مواد جامد محلول میوه و پرولین تأثیر مثبت دارد؛ علاوه‌براین کاربرد مواد جاذب باعث افزایش TA و TSS میوه گوجه‌فرنگی شد. نتایج ما،

تیمار شاهد در همین سطح تنش شد که بیانگر تأثیر بیشتر مواد جاذب در سطوح شوری بالا است (جدول ۶). کاهش محتوای نسبی آب برگ یک پاسخ عمومی به شرایط تنش اسمزی است. علت کاهش محتوای نسبی آب برگ در شرایط تنش شوری آن است که در زمان تنش، میزان تعرق بیشتر از جذب آب توسط گیاه بوده و در نتیجه با به هم خوردن تعادل آبی گیاه محتوای نسبی آب برگ‌ها کم می‌شود. وجود زئولیت در بستر کشت باعث افزایش محتوای نسبی آب برگ کاهو شد (Gül et al., 2005).

Kül et al. (2021) نیز در پژوهشی نشان دادند در حالی که تنش شوری رشد گیاه گوجه‌فرنگی را در تمام سطوح بیوجار تحت تأثیر منفی قرار می‌دهد، پارامترهای فیزیولوژیکی مانند محتوای آب نسبی برگ با کاربرد ۵ درصد زغال زیستی افزایش یافت. با توجه به نقش بستر رشد گیاه، کاربرد کربن فعال و نانوزئولیت غنی‌شده با پتاسیم در بستر کشت به دلیل کاهش تنش شوری بستر و بهبود ظرفیت نگهداری آب باعث افزایش محتوای نسبی آب برگ نسبت به عدم کاربرد آن شده است.

بهره‌وری مصرف آب

نتایج جدول تجزیه واریانس، نشان داد که اثر ساده مواد جاذب و تنش شوری و اثرهای متقابل آن‌ها بر بهره‌وری مصرف آب در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. براساس نتایج مقایسه میانگین اثرهای متقابل مواد جاذب و تنش شوری مطابق با آزمون چنددامنه‌ای دانکن، بیشترین بهره‌وری مصرف آب مربوط به ۱۵ گرم نانوزئولیت غنی‌شده در کیلوگرم بستر کشت در شوری ۱/۸ dS/m (۲۷/۷۵ کیلوگرم بر مترمکعب) بود که با سایر تیمارها در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری داشت (شکل ۱). همچنین مشخص شد که با افزایش شوری از ۱/۸ به ۵/۵ dS/m، بهره‌وری مصرف آب در تمامی سطوح جاذب‌ها کاهش یافت.

Zhang et al. (2017) با اعمال تنش شوری ۲ dS/m بر گوجه‌فرنگی در کشت بدون خاک بیان کردند که تنش شوری در کوتاه‌مدت بر بهره‌وری مصرف آب تأثیر معنی‌داری نداشته، اما با اعمال آن در کل دوره رشد گیاه به‌طور معنی‌داری بهره‌وری مصرف آب را کاهش داد. یافته‌های Li et al. (2023) نشان داد که با افزایش شوری

افزایش پرولین برگ گوجه‌فرنگی شد. به‌طوری‌که کاربرد ۱۵ گرم نانوزئولیت غنی‌شده با پتاسیم در شوری ۳/۵ dS/m و کاربرد ۳۰ گرم نانوزئولیت غنی‌شده در شوری ۵/۵، به ترتیب موجب افزایش ۵۲ و ۶۸ درصدی پرولین نسبت به تیمار فاقد مواد جاذب در همین سطوح شوری شد (جدول ۶). پرولین نقش کلیدی در برقراری فشار اسمزی، حفظ غشای یاخته‌ای و آنزیم‌های سیتوپلاسمی ناشی از آسیب‌های وارده دارد و از طریق جذب رادیکال‌های آزاد نقش خود را ایفا می‌کند. افزایش پرولین تحت تنش شوری می‌تواند به علت بالا بردن فعالیت‌های اورنیتین آمینوترانسفراز (OAT) و پرولین-۵-کربوکسیلات ردوکتاز (P-5-CR) باشد، که در بیوسنتز پرولین دخیل هستند (Sadak and Mostafa, 2015). در تأیید نتایج این پژوهش، Türkan et al. (2005) بیان کردند وقتی غلظت نمک در محیط بیرون یاخته‌ها از ۶۰ میلی‌مولار بیشتر شد، پرولین افزایش بیشتری پیدا کرد تا با تجمع خود در شرایط تنش با ایجاد تعادل بین کشش اسمزی سیتوزول و واکوئل با محیط بیرون از یاخته محافظت کند. (Elsawy et al., 2023) گزارش کردند که کاربرد زئولیت و مواد آلی باعث افزایش پرولین در گندم نان شد. آن‌ها افزایش جذب عناصری مانند کلسیم را دلیل بالارفتن محتوای پرولین برگ در نتیجه کاربرد زئولیت دانستند. براساس نتایج این پژوهش، کاربرد نانوزئولیت غنی‌شده با پتاسیم و کربن فعال نیز باعث افزایش میزان پرولین برگ شد که در راستای پژوهش ذکر شده است.

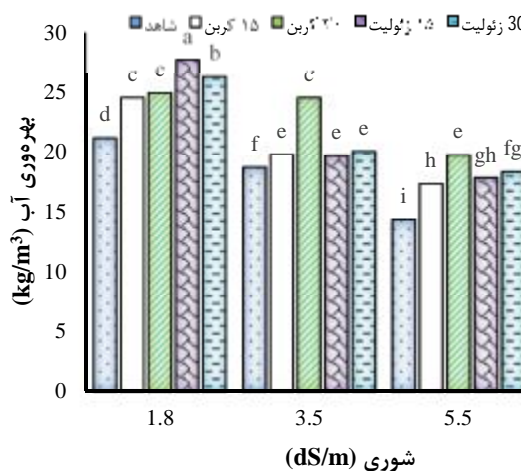
با افزایش شوری، محتوای نسبی آب برگ روندی نزولی داشت؛ در حالی که کاربرد مواد جاذب موجب افزایش محتوای نسبی آب برگ شد. بدین‌صورت که کاربرد ۳۰ گرم نانوزئولیت غنی‌شده با پتاسیم و کربن فعال در کیلوگرم بستر کشت در شوری ۱/۸ dS/m، به ترتیب موجب افزایش ۷ و ۵ درصدی محتوای نسبی آب برگ گوجه‌فرنگی نسبت به تیمار فاقد مواد جاذب در همین سطح شوری شد. در شوری ۳/۵ dS/m کاربرد ۳۰ گرم کربن فعال در کیلوگرم بستر کشت موجب افزایش ۹ درصدی محتوای نسبی آب برگ نسبت به تیمار شاهد همان سطح شوری شد و در شوری ۵/۵ dS/m نیز کاربرد ۱۵ گرم کربن فعال در کیلوگرم بستر کشت، موجب افزایش ۱۸ درصدی محتوای نسبی آب برگ نسبت به

شد. از طرفی افزایش شوری موجب افزایش ویتامین ث، TSS، TA، نشت الکترولیتی، لیکوپن و پرولین اندام هوایی شد. علاوه‌براین نتایج حاکی از تأثیر مثبت مواد جاذب بر کاهش اثرات سوء تنش شوری است. به‌طورکلی نتایج حاصل از این پژوهش نشان‌دهندهٔ اثرهای مثبت کربن فعال و نانوزئولیت غنی‌شده در شرایط تنش شوری بر صفات بررسی‌شدهٔ گوجه‌فرنگی و بهره‌وری مصرف آب است. به نظر می‌رسد که کاربرد کربن فعال در این پژوهش به‌دلیل دارا بودن سطح ویژه خیلی زیاد و متخلخل بودن ساختار آن باعث کاهش اثرهای تنش شوری شده است. با کاربرد نانوزئولیت غنی‌شده در بستر کشت، به‌دلیل توانایی نانوزئولیت در نگهداری رطوبت بیشتر، جذب یون‌های عامل شوری، از طریق جذب سطحی یا نفوذ در درون کانال‌های نانوزئولیت از اثرات منفی شوری کاسته و باعث افزایش شاخص‌های رشدی گوجه‌فرنگی شده است. علاوه‌براین به‌دلیل غنی‌بودن نانوزئولیت استفاده شده در این پژوهش از پتاسیم و وجود رابطهٔ آنتاگونیستی بین پتاسیم و سدیم احتمالاً از طریق کاهش جذب سدیم توسط گیاه، باعث تعدیل اثرات منفی تنش شوری و افزایش شاخص‌های مرتبط با رشد و عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در گوجه‌فرنگی شده است. نتایج حاصل از پژوهش حاضر و پژوهش‌های مشابه می‌تواند ظرفیت جدیدی برای استفاده از کربن فعال و نانوزئولیت و دیگر جاذب‌های آلی و معدنی با هدف کاهش اثرهای منفی شوری آب و خاک و افزایش عملکرد محصولات کشاورزی ایجاد کند.

منابع

1. Agbna G. Ali A. Bashir A. Eltoum F. & Hassan M. 2017. Influence of biochar amendment on soil water characteristics and crop growth enhancement under salinity stress. International Journal of Engineering Works Kambohwell Publishers Enterprise, 4(4): 49-54.
2. Al-Amri S. M. 2013. Improved growth, productivity and quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants through application of shikimic acid. Saudi journal of biological sciences, 20(4): 339-345.
3. Arnon D. I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. Plant physiology, 24(1): 1.
4. Bates L.S. Waldren R.P. & Teare I.D. 1973. Rapid determination of free proline for

آب آبیاری، بهره‌وری مصرف آب در گوجه‌فرنگی کاهش یافت که با نتایج پژوهش ما در یک راستا است. دلیل اصلی این کاهش می‌تواند مربوط به تأثیر منفی شوری بر رشد و عملکرد گوجه‌فرنگی باشد. درمقابل، اضافه کردن مواد جاذب به‌ویژه نانوزئولیت به بستر کشت باعث افزایش بهره‌وری مصرف آب در تمام سطوح شوری شد؛ به‌طوری‌که کاربرد ۳۰ گرم نانوزئولیت غنی‌شده با پتاسیم در بالاترین سطح تنش شوری، افزایش ۲۸ درصدی بهره‌وری مصرف آب را نسبت به تیمار فاقد مواد جاذب در همین سطح شوری در پی داشت. نتایج پژوهش ما بیانگر این است که کاربرد مواد جاذب به‌خصوص نانوزئولیت غنی‌شده از پتاسیم با بهبود شرایط رشد گوجه‌فرنگی و کاهش اثرهای تنش شوری توانسته است با افزایش عملکرد، بهره‌وری مصرف آب را افزایش دهد. *Hazrati et al.* (2017) نیز بیان کردند که کاربرد زئولیت بهره‌وری مصرف آب در گیاه آلوئه‌ورا را از طریق تولید محصول بیشتر افزایش داد که مشابه یافته‌های پژوهش حاضر است.



شکل ۱- تأثیر کاربرد جاذب‌های مختلف در بستر کشت، بر بهره‌وری آب در شرایط تنش شوری

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که شوری باعث کاهش عملکرد، رشد گیاه و ویژگی‌های فیتوشیمیایی گوجه‌فرنگی شده است. اعمال تنش شوری موجب کاهش شاخص‌های عملکردی، محتوای نسبی آب برگ، محتوای کاروتنوئید و میزان کلروفیل a و b و بهره‌وری مصرف آب

16. Kul R. Arjumend T. Ekinçi M. Yildirim E. Turan M. & Argın S. 2021. Biochar as an organic soil conditioner for mitigating salinity stress in tomato. *Soil Science and Plant Nutrition*, 67(6): 693-706.
17. Li H. Hou X. Bertin N. Ding R. & Du T. 2023. Quantitative responses of tomato yield, fruit quality and water use efficiency to soil salinity under different water regimes in Northwest China. *Agricultural Water Management*, 277: 108134.
18. Lichtenthaler H.K. 1987. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. In *Methods in enzymology*, 148: 350-382
19. Maas E.V. & Hoffman G.J. 1977. Crop salt tolerance—current assessment. *Journal of the irrigation and drainage division*, 103(2): 115-134.
20. Malik A. U. & Zora S. 2005. Pre-storage application of polyamines improves shelf-life and fruit quality of mango. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 80(3): 363-369.
21. Massa D. Bonetti A. Cacini S. Faraloni C. Prisa D. Tuccio L. & Petruccelli R. 2019. Soilless tomato grown under nutritional stress increases green biomass but not yield or quality in presence of biochar as growing medium. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 60(6): 871-881.
22. Moameni A. 2011. Geographical distribution and salinity levels of soil resources of Iran. *Iranian Journal of Soil Research*, 24(3): 203-215. (In Persian).
23. Moghimi M. A. & Qavami S. H. 2014. The effect of zeolite and irrigation water salinity on growth indicators of *Calendula officinalis*. The second national conference of applied researches in agricultural sciences, Tehran. University of applied science. (In Persian).
24. Moharreri N. Rahnema K. Lekzian A. & Tehranifar A. 2015. Effect of Biochar and vermicompost on the chlorophyll and vitamin C of two variety of tomato. The first scientific research conference of biology and horticultural sciences of Iran, Tehran. 1-10. (In Persian).
25. Perkins-Veazie P. Collins J.K. Pair S.D. & Roberts W. 2001. Lycopene content differs among red-fleshed watermelon cultivars. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81(10): 983-987.
26. Promyou S. Ketsa S. & van Doorn W.G. 2012. Salicylic acid alleviates chilling injury in anthurium (*Anthurium andraeanum* L.) flowers. *Postharvest Biology and Technology*, 64(1): 104-110.
27. Ramjardi F. Shahriari M. H. Rastgoo S. and water-stress studies. *Plant and soil*, 39(1): 205-207.
5. Bybordi A. 2012. Study effect of salinity on some physiologic and morphologic properties of two grape cultivars. *Life Science Journal*, 9(4): 1092-1101.
6. Cuartero J. & Fernández-Muñoz R. 1998. Tomato and salinity. *Scientia horticulturae*, 78(1-4): 83-125.
7. De Pascale S. Maggio A. Angelino G. & Graziani G. 2002. Effect of salt stress on water relations and antioxidant activity in tomato. In *VIII International Symposium on the Processing Tomato*, 613: 39-46.
8. Elsayy H. I. Mohamed A. M. Mohamed E. N. & Gad K. I. 2023. The Potential of a mixture of Zeolite, Calcium, and Organic compounds on mitigating the salinity stress in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Egyptian Journal of Agricultural*
9. FAO. 2020. *World food and agriculture. statistical yearbook*. Rome, Italy.
10. Gholizadeh A. Amin M. S. M. Anuar A. R. & Saberioon M. M. 2010. Water stress and natural zeolite impacts on phisiomorphological characteristics of Moldavian balm (*Dracocephalum moldavica* L.). *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(10): 5184-5190.
11. Gül A. Eroğul D. & Ongun A.R. 2005. Comparison of the use of zeolite and perlite as substrate for crisp-head lettuce. *Scientia Horticulturae*, 106(4): 464-471.
12. Hameeda Gul S. Bano G. Manzoor M. Chandio T. A. & Awan A.A. 2019. Biochar and manure influences tomato fruit yield, heavy metal accumulation and concentration of soil nutrients under wastewater irrigation in arid climatic conditions. *Cogent Food & Agriculture*, 5(1): 1576406.
13. Hazrati S. Tahmasebi-Sarvestani Z. Mokhtassi-Bidgoli A. Modarres-Sanavy S.A.M. Mohammadi H. & Nicola S. 2017. Effects of zeolite and water stress on growth, yield and chemical compositions of *Aloe vera* L. *Agricultural Water Management*, 181: 66-72.
14. Hossain M.K. Strezov V. Chan K.Y. & Nelson P.F. 2010. Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Chemosphere*, 78(9): 1167-1171.
15. Kaya C. Higgs D. & Kirnak H. 2001. The effects of high salinity (NaCl) and supplementary phosphorus and potassium on physiology and nutrition development of spinach. *Bulgarian. Journal of plant physiology*, 27(3-4): 47-59.

- under saline irrigation. *Pedosphere*, 26(1): 27-38.
37. Zhang P. Senge M. & Dai Y. 2017. Effects of salinity stress at different growth stages on tomato growth, yield, and water-use efficiency. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(6): 624-634.
 38. Zhang P. Senge M. & Dai Y. 2016. Effects of salinity stress on growth, yield, fruit quality and water use efficiency of tomato under hydroponics system. *Reviews in Agricultural Science*, 4(1): 46-55.
 39. Zou L. Morris G. & Qi D. 2008. Using activated carbon electrode in electrosorptive deionisation of brackish water. *Desalination*, 225(1-3): 329-340.
 - Hidayat M. 2015. The effect of zeolite on the content of proline, sodium, potassium and some characteristics of lettuce (*Lactuca sativa* var taftan) under salt stress conditions. The first international conference and the fourth national conference on sustainable and agricultural plants, Hamedan. (In Persian).
 28. Ranjbar M. Esfahani M. Kavousi M. & Yazdani M.R. 2004. Effects of irrigation and natural zeolite application yield and quality of tobacco (*Nicotiana tabacum* var. Coker 347). *Agricultural Sciences*, 1(2): 71-84.
 29. Ritchie S. W. Nguyen H. T. & Holaday A.S. 1990. Leaf water content and gas-exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. *Crop science*, 30(1): 105-111.
 30. Sadak M. S. & Mostafa H. A. 2015. Physiological role of pre-sowing seed with proline on some growth, biochemical aspects, yield quantity and quality of two sunflower cultivars grown under seawater salinity stress. *Scientia Agriculturae*, 9(1): 60-69.
 31. Savvas D. Samantouros K. Paralemos D. Vlachakos G. Stamnatakis M. & Vassilatos C. 2001. Yield and nutrient status in the root environment of tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) grown on chemically active and inactive inorganic substrates. In *International Symposium on Growing Media and Hydroponics*. 644: 377-383.
 32. She D. Sun X. Gamareldawla A.H. Nazar E.A. Hu W. Edith K. & Yu S.E. 2018. Benefits of soil biochar amendments to tomato growth under saline water irrigation. *Scientific Reports*, 8(1): 1-10.
 33. Turan N. G. 2008. The effects of natural zeolite on salinity level of poultry litter compost. *Bioresource technology*, 99(7): 2097-2101.
 34. Turhan E. & Eris A. 2005. Effects of sodium chloride applications and different growth media on ionic composition in strawberry plant. *Journal of plant nutrition*, 27(9): 1653-1665.
 35. Türkan I. Bor M. Özdemir F. & Koca H. 2005. Differential responses of lipid peroxidation and antioxidants in the leaves of drought-tolerant *P. acutifolius* Gray and drought-sensitive *P. vulgaris* L. subjected to polyethylene glycol mediated water stress. *Plant Science*, 168(1): 223-231.
 36. Usman A. R. A. Al-Wabel M. I. Abdulaziz A. H. Mahmoud W. A. El-Naggar A. H. Ahmad M. & Abdurassoul A. O. 2016. *Conocarpus* biochar induces changes in soil nutrient availability and tomato growth