

تأثیر کاربرد زغال‌زیستی پوسته برنج و سطوح مختلف کاربرد آب بر پتانسیل ماتریک خاک، ویژگی‌های بیوشیمیایی و کارایی مصرف آب گیاه گوجه‌فرنگی در خاک آلوده‌شده به کادمیوم

تارا جمیلی^۱، افسانه عالی‌نژادبان بیدآبادی^{۲*}، عباس ملکی^۳، محمد فیضیان^۴ و امید علی اکبرپور^۵

چکیده

زغال‌زیستی به‌عنوان ماده‌آلی اصلاح‌کننده خاک، می‌تواند در کاهش آثار جانبی کمبود آب و تغییر فعالیت آنزیم‌های گیاه رشد کرده در محیط آلوده به فلزات سنگین به‌ویژه کادمیوم مؤثر باشد. هدف از این تحقیق، تأثیر زغال‌زیستی سبوس برنج و کم‌آبیاری بر پتانسیل ماتریک و برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی گیاه گوجه‌فرنگی در خاک آلوده به کادمیوم بود. در این راستا آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو فاکتور سطح آبیاری (L) بر پایه تخلیه رطوبتی خاک در هفت سطح شامل سطح ۵۰ تا سطح ۱۱۰ درصد (L_{50} تا L_{110}) و زغال‌زیستی (B) در سه سطح شاهد (B_0)، ۳ (B_3) و ۶ (B_6) تُن بر هکتار با چهار تکرار به‌صورت گلدانی انجام شد. بررسی پتانسیل ماتریک خاک تحت‌تأثیر تیمارهای زغال‌زیستی نشان داد که پتانسیل ماتریک با افزایش مصرف زغال‌زیستی در تیمار B_6 در رطوبت‌های ظرفیت مزرعه‌ای و نقطه پژمردگی دائم افزایش یافت. مقدار کادمیوم قابل جذب خاک با کاربرد زغال‌زیستی و در سطوح رطوبتی بالا کاهش یافت. نتایج نشان داد که ویژگی‌های مواد جامد محلول و ویتامین ث میوه گوجه‌فرنگی با کاهش سطوح آبیاری و افزایش کاربرد زغال‌زیستی به‌صورت معنی‌داری افزایش یافتند. درمقابل، فعالیت آنزیم کاتالاز با افزایش سطوح آبیاری و کاربرد زغال‌زیستی به‌صورت معنی‌داری کاهش یافت. بیشترین مقادیر کلروفیل کل و کاروتنوئید برگ در $L_{110}B_6$ مشاهده شد که نسبت به $L_{110}B_0$ به‌ترتیب ۲۹/۴ و ۹۳/۸ درصد بیشتر بودند. بهترین کارایی مصرف آب با ۶۵/۲۳ و ۶۳/۱۴ کیلوگرم بر مترمکعب، به‌ترتیب در تیمارهای $L_{90}B_6$ و $L_{100}B_6$ مشاهده شد که با یکدیگر اختلاف معنی‌داری نداشتند؛ بنابراین کاربرد زغال‌زیستی می‌تواند راه‌حل خوبی برای بهبود نگاه‌داشت آب در خاک، ویژگی‌های بیوشیمیایی گیاه و کارایی مصرف آب در شرایط کم‌آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک و خاک آلوده‌شده به کادمیوم باشد.

واژه‌های کلیدی: بیوجار، پتانسیل ماتریک، کارتنوئید، کاتالاز، کلروفیل.

ارجاع: جمیلی ت. عالی‌نژادبان بیدآبادی ا. ملکی ع. فیضیان م. و اکبرپور ا. ع. ۱۴۰۱. تأثیر کاربرد زغال‌زیستی پوسته برنج و سطوح مختلف کاربرد آب بر پتانسیل ماتریک خاک، ویژگی‌های بیوشیمیایی و کارایی مصرف آب گیاه گوجه‌فرنگی در خاک آلوده‌شده به کادمیوم. مجله پژوهش آب ایران. ۴۷:

۸۱-۹۱. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.14007.2439>

- ۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی خاک (گرایش فیزیک و حفاظت خاک) گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه لرستان.
- ۲- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان.
- ۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان.
- ۴- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان.
- ۵- استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان.

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

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۹

مقدمه

تنش خشکی یکی از شدیدترین تهدیدهای غیرزیستی برای امنیت غذایی جهان محسوب می‌شود و روش‌های مدیریتی حفظ آب آبیاری مانند کم‌آبیاری در حال توسعه هستند که از جمله راهکارهای بهبود کارایی مصرف آب به‌شمار می‌روند (اسماعیل پور و اکبری، ۱۳۹۲؛ موسوی رحیمی و همکاران، ۱۳۹۳). تغییرات در صفات بیوشیمیایی مانند افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان یکی از مکانیسم‌های مقاومت گیاهان در برابر تنش خشکی است. از طرفی مقادیر آلاینده‌ها و فلزات سنگین و به‌ویژه عنصر کادمیوم در خاک به دلیل افزایش فعالیت‌های صنعتی در کشور ایران رو به افزایش است. کادمیوم در بین فلزات سنگین میل ترکیبی کمی برای اتصال به فازهای تثبیت‌کننده خاک، نظیر اکسیدها و فازهای جامد آلی خاک دارد؛ بنابراین قابلیت جذب این عنصر توسط گیاه و انتقال به اندام هوایی گیاه زیاد است (بقائی، ۱۳۹۷).

گوجه‌فرنگی به دلیل داشتن ارزش غذایی بالا، منبع آنتی‌اکسیدان‌ها، فیبر، ویتامین‌ها، پتاسیم، ترکیبات فنولیک، لیکوپن و بتاکارتن از محبوب‌ترین و اصلی‌ترین محصولات کشاورزی در جهان است که به تغذیه مناسب و سالم کمک می‌کند (مهام و همکاران، ۲۰۲۰؛ داد و همکاران، ۲۰۲۱؛ گو و همکاران، ۲۰۲۱). این گیاه دارای بیش از ۲۸۰۰ رقم است و در مقایسه با دیگر سبزی‌ها دارای بیشترین سطح زیر کشت است (کلونکلین و ساواج، ۲۰۱۷). کشور ایران با تولید ۶/۱۷ میلیون تن، رتبه ششم جهانی تولید گوجه‌فرنگی را به خود اختصاص داده است. در سال ۲۰۱۷ میزان کل سطح زیر کشت گوجه‌فرنگی در ایران ۱۵۳۷۳۵ هکتار بود که با عملکرد متوسط ۴۰/۱۸ تن در هکتار، دارای تولید سالانه ۶۱۷۷۲۹۰ تن است (اصلانی و همکاران، ۱۳۹۸).

زغال‌زیستی یک ماده جامد، متخلخل و غنی از کربن است که از تجزیه حرارتی زیست‌توده‌های آلی (مانند چوب، پسماندهای گیاهی و حیوانی) طی فرایند پیرولیز در شرایط بدون اکسیژن یا اکسیژن محدود تهیه می‌شود (جمیلی و همکاران، ۱۴۰۱؛ پندی و همکاران، ۲۰۲۰). زغال‌زیستی به دلیل داشتن سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا و همچنین داشتن گروه‌های عاملی سطحی، به‌عنوان یک جاذب آلی برای مدیریت خاک‌های آلوده به فلزات سنگین و همچنین بهبود نگهداشت آب در خاک و

رشد گیاهان، مورد توجه قرار گرفته است (وانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ منصور و همکاران، ۲۰۲۰).

بررسی پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که افزودن زغال‌زیستی به خاک، موجب تغییر در ویژگی‌های هیدرولیکی اشباع و غیراشباع خاک و سرعت نفوذ آب در خاک می‌شود (یعقوبی و همکاران، ۱۳۹۸). به‌طوری که قربانی و امیراحمدی (۱۳۹۷) گزارش کردند که کاربرد زغال‌زیستی شلتوک برنج با کاهش وزن مخصوص خاک، افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع، تخلخل کل و مقدار آب قابل‌دسترس خاک سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک لومی شد. از دیگر سو، عبید و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که افزودن زغال‌زیستی به میزان ۱۰ تن در هکتار، موجب افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی و کاهش تجمع روی و کادمیوم در میوه گوجه‌فرنگی شد. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های مزرعه‌ای آن‌ها نشان داد که اصلاح خاک با این مقدار زغال‌زیستی باعث افزایش کلروفیل و کاروتنوئیدها در برگ‌های گوجه‌فرنگی به میزان ۵۱ و ۳۵ درصد بالاتر از خاک شاهد شد. باقری و همکاران (۱۴۰۰) با بررسی تأثیر چهار سطح زغال‌زیستی برگ خرما (صفر، ۰/۱۹، ۰/۲۴ و ۰/۳۶ کیلوگرم در مترمربع) و سه سطح تنش کم‌آبی (۰، ۶۰، ۸۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی) گزارش کردند که کاربرد ۰/۲۴ کیلوگرم زغال‌زیستی خرما در مترمربع باعث افزایش رشد، کلروفیل و کارایی مصرف آب در خربزه در شرایط تنش خشکی ۸۵ درصد نیاز آبی شد. تنش خشکی باعث افزایش میزان پرولین گیاه شد؛ اما با کاربرد زغال‌زیستی، اثر تنش کم‌آبی کمتر شد و میزان پرولین برگ کاهش یافت. گو و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی کاربرد چهار سطح زغال‌زیستی (صفر، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ تن در هکتار) تهیه‌شده از تنه و شاخه درختان میوه در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد را بر رشد گیاه گوجه‌فرنگی در کشور چین بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان از افزایش عملکرد و کیفیت محصول گوجه‌فرنگی (اعم از محتوای ویتامین ث و نسبت قند به اسید میوه) با افزایش مقدار استفاده از زغال‌زیستی بود.

بر این اساس، با توجه به کمبود منابع آب در کشور و ضرورت اعمال مدیریت صحیح در آبیاری گوجه‌فرنگی به منزله یک محصول اصلی و خارج از فصل و همچنین استفاده از زغال‌زیستی به‌عنوان ماده آلی در خاک و کمک به مدیریت ضایعات اراضی شالی‌کاری، پژوهش حاضر با

برای تهیه زغال‌زیستی از بقایای سبوس برنج موجود در کارخانجات شالیکوبی استفاده شد. نمونه‌ها پس از چندین بار شست‌وشو با آب مقطر و خشک‌شدن، از الک چهار میلی‌متری عبور داده شد و زغال‌زیستی آن در درجه حرارت ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت در کوره الکتریکی در شرایط بدون اکسیژن قرار داده شد تا فرایند گرماکافت انجام شود (کنترال، ۲۰۱۲). زغال‌زیستی تولیدی از الک دو میلی‌متری عبور داده شد و در تیمارهای آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. مقدار اسیدیته و شوری آب آبیاری به ترتیب ۸/۴۶ و ۴۵۰ میکروموس بر سانتی‌متر بود. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و بیوجار در جدول ۱ و ۲ آورده شده است.

اهداف ارزیابی تأثیر رژیم‌های مختلف آبی و سطوح زغال‌زیستی بر پتانسیل ماتریک خاک، مقدار کادمیوم قابل جذب خاک، بررسی برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی و کارایی مصرف آب میوه گوجه‌فرنگی می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه لرستان در سال ۱۳۹۸ به صورت گلدانی اجرا شد. برای انجام تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، نمونه‌های خاک هوا خشک شده از الک دو میلی‌متری، عبور داده و به آزمایشگاه منتقل شدند. خاک مورد مطالعه دارای بافت لوم رسی شنی بود.

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

| Cd (mg/kg) | K (mg/kg) | P (mg/kg) | N (%) | OC (%) | EC _e (dS/m) | pH | ρ _b (g/cm ³) | θ _s (%) | PWP (w/w %) | FC (w/w %) | شن (%) | سیلت (%) | رس (%) |
|---------------|--------------|--------------|----------|-----------|---------------------------|------|--|-----------------------|----------------|---------------|-----------|-------------|-----------|
| ۰/۰۰۹ > | ۱۴۴/۰ | ۱/۱ | ۰/۰۳ | ۰/۲۵ | ۰/۷۹ | ۷/۶۱ | ۱/۴۰ | ۴۲ | ۹/۳۳ | ۲۳ | ۵۸/۳ | ۱۵ | ۲۶/۷ |

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زغال‌زیستی حاصل شده مورد استفاده در آزمایش

| K (g/kg) | P (g/kg) | N (%) | CEC (cmol _e /kg) | OC (%) | EC (dS/m) | pH |
|-------------|-------------|----------|--------------------------------|-----------|--------------|------|
| ۲۰/۰۳ | ۰/۴ | ۱/۱۹ | ۳۴/۰۱ | ۳۳/۵۸ | ۱/۰۱ | ۸/۵۱ |

کادمیوم بر کیلوگرم خاک استفاده شد. گلدان‌ها در گلخانه به مدت ۶۰ روز در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت براساس ۷۰ درصد ظرفیت زراعی نگهداری شدند. با بررسی مشخصات خاک تجزیه‌شده برای کشت، میزان کمبود عناصر غذایی مورد نیاز شامل کودهای اوره، سوپر فسفات تریپل و سولفات پتاسیم به ترتیب به میزان ۵۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار با افزودن به خاک جبران شد. نشاهای گیاه گوجه‌فرنگی (رقم هیراد) در مرحله چهار برگی به گلدان‌های مورد نظر منتقل شد.

نحوه اعمال تیمارهای آبیاری

آبیاری همه گلدان‌ها براساس تخلیه رطوبتی انجام شد. به این صورت که پس از استقرار گیاه و برای اعمال تیمارهای آبیاری، مقدار آب مورد نیاز گیاه تا رسیدن به شرایط ظرفیت زراعی (رطوبت ۲۳ درصد) به‌عنوان تیمار آبیاری کامل (L₁₀₀) در نظر گرفته شد و میزان آب مورد نیاز در سایر تیمارهای آبیاری (L₅₀، L₆₀، L₇₀، L₈₀، L₉₀، L₁₀₀ و L₁₁₀) به ترتیب با اعمال ضرایب ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹

طرح آزمایش

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو فاکتور شامل: ۱- سطوح آبیاری (در هفت سطح ۵۰ (L₅₀)، ۶۰ (L₆₀)، ۷۰ (L₇₀)، ۸۰ (L₈₀)، ۹۰ (L₉₀)، ۱۰۰ (L₁₀₀) و ۱۱۰ (L₁₁₀) درصد، براساس تخلیه رطوبتی خاک) و ۲- زغال‌زیستی سبوس برنج (در سه سطح صفر (شاهد) (B₀)، ۳ (B₃) و ۶ (B₆) تن در هکتار) در چهار تکرار در خاک آلوده به کادمیوم انجام شد. با توجه به تعداد تیمارها (۲۱ تیمار) از ۸۴ گلدان پلاستیکی ۱۰ کیلوگرمی استفاده شد. در کف گلدان‌ها سوراخ‌هایی برای زهکشی ایجاد و فیلتر شنی به ضخامت دو سانتی‌متر در کف گلدان تعبیه شد. مقادیر زغال‌زیستی مطابق با تیمارهای آزمایشی به خاک‌های توزین شده اضافه شد.

با توجه به اینکه میانگین جهانی کادمیوم در خاک ۰/۳۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک گزارش شده است (ترکیان و ودپول، ۱۹۶۱)، برای آلوده کردن خاک از محلول نمک نیترات کادمیوم (Cd(NO₃)₂) با غلظت ۵ میلی‌گرم

رویی با دستگاه اسپکتروفتومتر برای کلروفیل به ترتیب در طول موج‌های ۶۴۵، ۶۶۳ و برای کاروتنوئید در طول موج ۴۷۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. استون به‌عنوان محلول شاهد برای تنظیم صفر جذب نوری اسپکتروفتومتر استفاده شد. میزان کلروفیل کل (Chl_{total}) و کاروتنوئید (Car) بر حسب میلی‌گرم در گرم برگ تازه محاسبه شدند (لیختن‌هالر و بوشمن، ۲۰۰۱).

آنزیم کاتالاز

برای استخراج آنزیم کاتالاز، به ۰/۳ بافت برگ پودر شده، بافر فسفات پتاسیم اضافه و سوسپانسیون حاصل سانتریفیوژ شد. سنجش آنزیم نیز در طول موج ۲۴۰ نانومتر قرائت شد. مقدار کمی فعالیت کاتالاز بر حسب میزان آب‌اکسیژنه غیرفعال شده در یک دقیقه در هر گرم بافت برگ محاسبه شد (چنس و مهلی، ۱۹۹۵).

کارایی مصرف آب

برای تعیین کارایی مصرف آب بر پایه تعداد و وزن میوه گوجه‌فرنگی، ابتدا مقدار عملکرد برای هر تیمار به‌طور جداگانه محاسبه و سپس با تقسیم عملکرد در واحد سطح (Kg/ha) به مقدار آب مصرفی در واحد سطح (m^3/ha)، کارایی مصرف آب (Kg/m^3) تعیین شد (دین‌آباد و همکاران، ۱۴۰۱). تحلیل‌های آماری داده‌ها، با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۲) انجام و نمودارها توسط نرم‌افزار Excel رسم شدند. همچنین مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون دانکن و در سطح احتمال ۵ درصد محاسبه شد.

نتایج و بحث

پتانسیل ماتریک

بررسی پتانسیل ماتریک خاک تحت‌تأثیر تیمارهای زغال‌زیستی نشان داد که پتانسیل ماتریک با افزایش مصرف زغال‌زیستی افزایش می‌یابد (شکل ۱) که این می‌تواند به دلیل افزایش قابلیت نگهداری آب در خاک در حضور زغال‌زیستی باشد. مطابق با نتایج، اختلاف رطوبت خاک در پتانسیل ماتریک ۰/۱ و ۱ اتمسفر در تیمارهای B_0 ، B_3 و B_6 به ترتیب ۰/۲۹، ۰/۱۶ و ۰/۱۴ بود؛ بنابراین در عدم کاربرد زغال‌زیستی، سرعت کاهش رطوبت خاک با افزایش پتانسیل ماتریک خاک در حداکثر مقدار خود و در

و ۱/۱ نسبت به تیمار (L_{100}) محاسبه و به گلدان‌ها اضافه شد. هر سه روز یک مرتبه عمل آبیاری گلدان‌ها انجام شد تا کمبود آب نسبت به سطوح مختلف آبیاری مورد نظر تأمین شود.

پتانسیل ماتریک خاک

پتانسیل ماتریک خاک توسط نمونه‌های خاک اشباع‌شده تیمارهای شاهد (B_0)، ۳ تن در هکتار (B_3) و ۶ تن در هکتار (B_6) زغال‌زیستی و دستگاه صفحات فشاری، در مکش‌های مختلف تعیین شد. همچنین مقدار آب قابل دسترس گیاه (AWC) در تیمارهای مختلف از تفاضل مقدار آب نقطه ظرفیت مزرعه‌ای (θ_{FC}) در مکش ۰/۳ اتمسفر و نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP}) در مکش ۱۵ اتمسفر محاسبه شد (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۵). در پایان فصل رشد و رسیدگی فیزیولوژیک، میوه‌های هر گلدان به‌طور کامل برداشت شده و صفات بیوشیمیایی و کارایی مصرف آب مورد ارزیابی قرار گرفت.

ویتامین ث

محتوای ویتامین ث یا اسید آسکوربیک میوه به روش تیتراسیون با یدور پتاسیم ۰/۲ نرمال اندازه‌گیری و بر حسب میلی‌گرم ویتامین ث در هر ۱۰۰ میلی‌لیتر آب میوه محاسبه شد.

مواد جامد محلول

میزان مواد جامد محلول در میوه که بر حسب درجه بریکس گزارش می‌شود، توسط رفراکتومتر دستی (ATAGO Brix-%32) در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد (احتشام‌نیا و همکاران، ۲۰۲۱).

لیکوپن

لیکوپن میوه با روش عصاره‌گیری از میوه و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (اواک، ۱۹۹۰).

کلروفیل و کاروتنوئید

برای سنجش محتوای کلروفیل و کاروتنوئید ۰/۱ گرم از برگ با ازت مایع خرد و با ۱۰ میلی‌لیتر استون خالص مخلوط و عصاره به‌دست‌آمده در فالكون ۱۵ میلی‌لیتری ریخته و سانتریفیوژ شد. سپس شدت جذب محلول شفاف

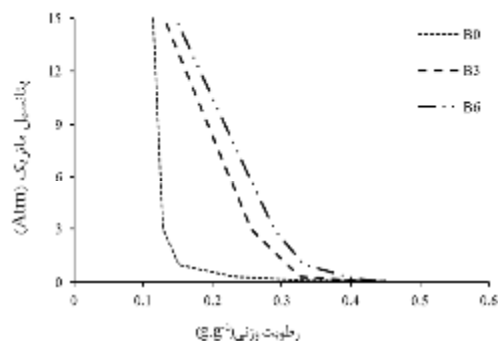
ایکولباش و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که حتی افزایش اندک در سطح ویژه خاک و تخلخل خاک با کاربرد زغال‌زیستی نیشکر در خاک، می‌تواند زمینه‌ساز افزایش پتانسیل ماتریک خاک شود. نتایج آن‌ها نشان داد که بسته به نرخ مصرف زغال‌زیستی، پتانسیل ماتریک خاک متفاوت است. به طوری که در یک مکش معین، مقدار رطوبت خاک در تیمارهای حاوی زغال‌زیستی بیشتر بود و با افزایش مقدار زغال‌زیستی مصرفی آب قابل دسترس گیاه به ویژه در خاک‌های سبک افزایش یافت. به صورت مشابه، لی و همکاران (۲۰۲۱) نیز نشان دادند که کاربرد زغال‌زیستی ترکیب چوب درختان سدر، سرو و بامبو، سبب افزایش مکش خاک و کاهش سرعت تخلیه رطوبتی خاک نسبت به تیمارهای بدون زغال‌زیستی شد.

کادمیوم قابل جذب خاک

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان‌دهنده کاهش معنی‌دار فراهمی کادمیوم در خاک در اثر افزایش کاربرد زغال‌زیستی و افزایش سطح آب آبیاری بود (شکل ۲). به طوری که کمترین غلظت کادمیوم خاک در تیمار B₆ در سطح آبیاری ۱۱۰ درصد دیده شد. همچنین مقادیر کادمیوم قابل جذب خاک در تیمارهای L₁₀₀B₆ و L₁₁₀B₆ فاقد اختلاف معنی‌دار بودند. مطابق با نتایج مقدار کادمیوم در تیمار B₆ در شرایط ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ درصد در مقایسه با تیمار B₆ در شرایط ۵۰ درصد، به ترتیب، ۲۴/۳، ۲۷/۹ و ۳۴/۲ درصد کاهش یافت. تبادل یونی می‌تواند یکی از دلایل تثبیت فلزات سنگین در خاک در اثر کاربرد زغال‌زیستی باشد (زو و همکاران، ۲۰۲۰). با توجه به نتایج حاصل از این مطالعه، دلیل کاهش غلظت کادمیوم در تیمارهای کاربرد زغال‌زیستی و سطوح رطوبتی بالا را می‌توان به تبادل یونی نسبت داد. در این مطالعه، کاربرد زغال‌زیستی و افزایش سطح رطوبت خاک، سبب افزایش غلظت قابل استفاده پتاسیم، کلسیم، آهن، منگنز، روی و مس در خاک شده است؛ بنابراین احتمالاً افزایش آزادسازی این عناصر در خاک، تثبیت کادمیوم و کاهش غلظت قابل استفاده آن را در خاک به دنبال داشته است.

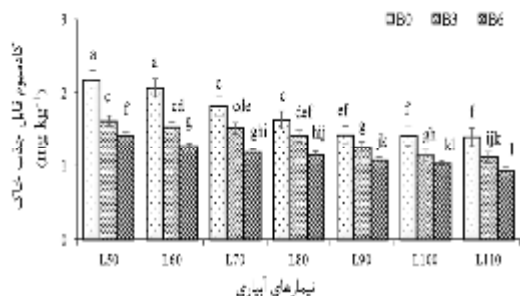
این بخش از نتایج با نتایج پژوهش وانگ و همکاران (۲۰۲۱) مطابقت داشت. آن‌ها نیز کاهش کادمیوم قابل جذب خاک را با کاربرد زغال‌زیستی سبوس برنج در

تیمار B₆ در کمترین مقدار خود بود. همچنین مطابق با شکل ۱، میانگین مقادیر رطوبت در وضعیت FC برای خاک در سه سطح B₀، B₃ و B₆ به ترتیب ۰/۲۲۹، ۰/۳۲۷ و ۰/۳۹۶ و برای رطوبت در وضعیت PWP نیز ۰/۱۱۴، ۰/۱۲۷ و ۰/۱۳۹ به دست آمد که نشان می‌دهد با افزایش کاربرد سطوح زغال‌زیستی در خاک، مقادیر رطوبت در نقاط مختلف منحنی رطوبتی (از نقطه ظرفیت زراعی تا نقطه پژمردگی دائم) افزایش یافت. همچنین میزان رطوبت تیمار B₆ نسبت به B₃ و B₀ در وضعیت PAWC، به ترتیب ۲۸/۵۰ و ۱۲۳/۴۸ درصد افزایش پیدا کرد. با وجود اینکه مدت زمان پژوهش کوتاه بود و آزمایش‌ها بلافاصله بعد از پایان فصل رشد گوجه‌فرنگی (پس از ۴ ماه) انجام گرفت، زغال‌زیستی حاصل از سبوس برنج سبب بهبود شرایط فیزیکی خاک شد. یافته‌های پژوهش حاضر به وضوح تأثیر زغال‌زیستی روی حفظ رطوبت و نگه‌داشت آب در خاک را نشان می‌دهد. مطالعات نشان داده است که خواص ماتریکس خاک‌ها بر اساس نوع خاک، توسعه و مدیریت خاک می‌تواند تغییر کند و همگی این عوامل می‌توانند بر کل محتوای آب خاک و آب در دسترس گیاه تأثیر بگذارند (اتکینسون و همکاران، ۲۰۱۸). نوروزی و همکاران (۱۳۹۷) در نتایج خود بیان کردند که کاربرد زغال‌زیستی برگ خرما توانست میزان رطوبت در نقاط ظرفیت زراعی و آب قابل دسترس گیاه را نسبت به تیمار بدون کاربرد افزایش دهد و همچنین داده‌های منحنی مشخصه رطوبتی نشان داد که زغال‌زیستی باعث افزایش منافذ بزرگ‌تر از ۰/۲ μm شد که به لحاظ ذخیره رطوبت قابل دسترس گیاه حائز اهمیت است.



شکل ۱- تغییرات پتانسیل ماتریک خاک تحت تأثیر تیمارهای زغال‌زیستی

B₀ و B₃ و B₆ به ترتیب سطوح صفر (شاهد)، ۳ و ۶ تن زغال‌زیستی در هکتار هستند.)



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری و زغال‌زیستی بر کادمیوم قابل جذب خاک

خاک گزارش کردند. همچنین، نتایج پژوهش مرادی و کریمی (۲۰۲۱) نیز نشان داد کاربرد زغال‌زیستی بقایای ذرت و سبوس برنج سبب کاهش فراهمی کادمیوم در خاک شد.

صفات بیوشیمیایی گوجه‌فرنگی

نتایج نشان داد رژیم‌های مختلف آبیاری و زغال‌زیستی بر تغییرات ویژگی‌های بیوشیمیایی گیاه گوجه‌فرنگی مانند ویتامین ث، مواد جامد محلول، کلروفیل کل و کارتنوئید برگ و همچنین لیکوپن و کاتالاز میوه گوجه‌فرنگی در سطح یک درصد اثر معنی‌دار داشتند (جدول ۳).

جدول ۳- تجزیه واریانس تأثیر سطوح آبیاری و زغال‌زیستی بر مقادیر صفات بیوشیمیایی گیاه گوجه‌فرنگی

| مقادیر F | | | | | | | |
|--------------------------|------------|----------------------|----------------------|-------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
| منابع تغییرات | درجه آزادی | ویتامین ث | مواد جامد محلول | کلروفیل کل | کارتنوئید برگ | لیکوپن | کاتالاز |
| بلوک | ۳ | ۰/۹۵ ^{ns} | ۰/۵۳ ^{ns} | ۰/۰۱ ^{ns} | ۰/۴۳ ^{ns} | ۱/۸۸ ^{ns} | ۱/۳۱ ^{ns} |
| سطوح آبیاری | ۶ | ۲۳۶/۳۳ ^{**} | ۳۹۲/۴۵ ^{**} | ۱۳۲۰۰۰/۰۰ ^{**} | ۸۱۷۶/۰۰ ^{**} | ۹۵۰/۹۲ ^{**} | ۸۴۸/۶۷ ^{**} |
| زغال‌زیستی | ۲ | ۸۹/۰۶ ^{**} | ۸۰/۳۴ ^{**} | ۲۴۴۲۰۰/۰۰ ^{**} | ۷۷۶۲/۰۰ ^{**} | ۱۰۱/۲۸ ^{**} | ۵۰/۷۶ ^{**} |
| سطوح آبیاری × زغال‌زیستی | ۱۲ | ۹/۲۳ ^{**} | ۲/۱۷ [*] | ۵۲۳/۹۹ ^{**} | ۲۲۰۲۰/۰۰ ^{**} | ۵/۱۹ ^{**} | ۴/۴۷ ^{**} |
| خطا | ۶۰ | | | | | | |
| ضریب تغییرات (درصد) | | ۰/۳۹ | ۰/۳۵ | ۰/۰۱۷ | ۰/۲۶ | ۰/۱۴ | ۰/۲۷ |

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

مواد جامد محلول و ویتامین ث در میوه گوجه‌فرنگی

نتایج مقایسه میانگین ویژگی‌های مواد جامد محلول و ویتامین ث میوه گوجه‌فرنگی نشان داد که این ویژگی‌ها با کاهش سطوح آبیاری و افزایش کاربرد زغال‌زیستی به صورت معنی‌داری افزایش یافتند (جدول ۴).

البته در هریک از سطوح آبیاری با افزایش مقدار کاربرد زغال‌زیستی، ویتامین ث افزایش معنی‌داری نشان نداد. مواد جامد محلول و ویتامین ث میوه گوجه‌فرنگی در تیمار L₅₀B₆ بیشترین مقدار و در تیمار L₁₁₀B₀ کمترین مقدار را داشتند؛ به طوری که ویژگی‌های مواد جامد محلول و ویتامین ث میوه گوجه‌فرنگی در تیمار L₅₀B₆ نسبت به تیمار L₁₁₀B₀، به ترتیب ۶۸/۹ و ۶۵/۳ درصد بیشتر بود.

از طرفی در تیمارهای شاهد بدون کاربرد زغال‌زیستی (B₀)، کادمیوم احتمالاً بر میزان مواد جامد محلول و ویتامین ث اثر منفی گذاشته است، به طوری که در همه سطوح مختلف آبیاری این تیمار (B₀)، میانگین مقادیر این دو صفت بیوشیمیایی از سایر تیمارهای دریافت‌کننده

زغال‌زیستی کمتر به دست آمد. درحقیقت حضور عناصر غذایی موجود در ترکیب زغال‌زیستی توانسته است از اثر منفی کادمیوم بکاهد و ویژگی‌های گیاه را بهبود بخشد. هنگامی که گیاه گوجه‌فرنگی طی رشد آب کمتری دریافت کند، این گیاه برخی از فعالیت‌های متابولیک مانند تنظیم اسمزی را کنترل می‌کند و به طور ترجیحی ساکارز بیشتری را به اندام‌های گیاهی برگ و میوه اختصاص می‌دهد، نرخ تبدیل اسید آلی را افزایش می‌دهد، عناصر غذایی بیشتری به میوه‌ها هدایت شده و بدین ترتیب محتوای مواد جامد محلول و ویتامین ث افزایش می‌یابد. این نتایج در میوه گوجه‌فرنگی با افزایش میزان مصرف زغال‌زیستی دیده شد که می‌توان آن را به بهبود رشد ریشه در لایه‌های عمیق‌تر خاک نسبت داد؛ به گونه‌ای که باعث جذب بیشتر مواد مغذی و آب (شکل ۱)، تغییرات پتانسیل ماتریک خاک تحت تأثیر تیمارهای زغال‌زیستی) توسط گیاهان شده است (آگبنا و همکاران، ۲۰۱۷).

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری و زغال‌زیستی بر مواد جامد محلول و ویتامین ث در میوه گوجه‌فرنگی

| ویتامین ث (mg/100 g) | | | مواد جامد محلول (°Brix) | | | |
|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| B ₆ | B ₃ | B ₀ | B ₆ | B ₃ | B ₀ | |
| ۴۵/۵۶ ^a | ۴۵/۴۸ ^a | ۴۰/۴۵ ^b | ۶/۸۶ ^a | ۶/۵۷ ^b | ۶/۲۵ ^c | L ₅₀ |
| ۴۵/۶۰ ^a | ۴۴/۱۲ ^a | ۳۸/۹۵ ^b | ۵/۸۴ ^d | ۵/۲۳ ^e | ۵/۰۷ ^e | L ₆₀ |
| ۴۵/۷۵ ^a | ۴۳/۸۱ ^a | ۳۴/۴۲ ^{cd} | ۵/۱۱ ^e | ۴/۷۹ ^f | ۴/۳۳ ^{gh} | L ₇₀ |
| ۳۵/۳۴ ^c | ۳۴/۷۵ ^{cd} | ۳۳/۹۰ ^{cde} | ۴/۵۵ ^g | ۴/۲۴ ^{hi} | ۴/۰۷ ⁱ | L ₈₀ |
| ۳۳/۶۷ ^{cde} | ۳۳/۴۱ ^{cde} | ۳۲/۷۶ ^{def} | ۴/۳۸ ^{gh} | ۴/۱۶ ^{hi} | ۴/۰۸ ⁱ | L ₉₀ |
| ۳۱/۸۵ ^{efg} | ۳۱/۹۷ ^{efg} | ۳۰/۱۰ ^g | ۴/۳۴ ^{gh} | ۴/۱۶ ^{hi} | ۴/۰۶ ⁱ | L ₁₀₀ |
| ۳۱/۰۸ ^g | ۳۰/۳۲ ^g | ۲۷/۵۶ ^h | ۴/۵۵ ^g | ۴/۲۵ ^{hi} | ۴/۰۶ ⁱ | L ₁₁₀ |

میانگین‌هایی که حروف مشترک کوچک دارند، در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

فلزات سنگین از جمله کادمیوم، کلروفل و کاروتنوئیدها را در محصول گوجه‌فرنگی کاهش می‌دهند و در نهایت باعث تأثیر بر متابولیسم گیاه و کاهش فتوسنتز می‌شوند (زیشان و همکاران، ۲۰۲۰). با کاربرد زغال‌زیستی در خاک، دسترسی ریشه گیاه به مواد غذایی از جمله نیتروژن افزایش می‌یابد که این امر به بهبود محتوای کلروفل گیاه کمک می‌کند. گزارش شده است که مصرف زغال‌زیستی در خاک سبب بهبود تولید کلروفل، کاروتنوئید، فتوسنتز و تسهیل انتقال الکترون می‌شود (لیو و همکاران، ۲۰۱۶؛ زیشان و همکاران، ۲۰۲۰). در مطالعه‌ای که توسط منیر و همکاران (۲۰۲۰) انجام شد، بوته‌های خیار که در زغال‌زیستی برگ و ساقه نخل خرما رشد کردند، ۱۵ درصد کلروفل بیشتری نسبت به گیاهان شاهد تولید کردند. این می‌تواند به دلیل کارایی نگهداری آب و ویژگی‌های منحصر به فرد زغال‌زیستی (شکل ۱) باشد که آب کافی و مواد مغذی محلول گیاه را در طول مراحل مختلف رشد گیاه فراهم می‌کند و موجب بهبود پارامترهای رشد محصولات زراعی می‌شود (دانش و همکاران، ۲۰۲۰).

این نتایج همچنین مطابق با مطالعات المرادی و عیسی (۲۰۲۰) است که گزارش کردند با کاربرد ۱۰ تن در هکتار زغال‌زیستی ساقه ذرت، مواد جامد محلول و ویتامین ث میوه گوجه‌فرنگی در مقایسه با شاهد به میزان ۳۳، ۲۹ و ۳۹ درصد افزایش یافت. همچنین ژانگ و همکاران (۲۰۲۰) به ترتیب با کاربرد زغال‌زیستی کاه گندم در شرایط تنش خشکی، افزایش مواد جامد محلول و ویتامین ث را در میوه گوجه‌فرنگی نسبت به تیمار شاهد گزارش کردند.

رنگدانه‌های فتوسنتزی (کلروفل کل و کاروتنوئید برگ)

میانگین مقادیر کلروفل کل و کاروتنوئید برگ گیاه با افزایش مقدار زغال‌زیستی مصرفی و سطوح آبیاری به صورت معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۵). بیشترین مقدار کلروفل کل و کاروتنوئید برگ در تیمار L₁₁₀B₆ مشاهده شد که نسبت به تیمار L₁₁₀B₀ به ترتیب ۲۹/۴ و ۹۳/۸ درصد بیشتر بود. این مقادیر در L₁₁₀B₆ نسبت به L₁₁₀B₃ به ترتیب ۱۵/۵ و ۳۳/۸ درصد افزایش نشان داد (جدول ۵).

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری و زغال‌زیستی بر کلروفل کل، کاروتنوئید برگ و کاتالاز (µg/g FW)

| کاتالاز (µg/g FW) | | | کاروتنوئید برگ (mg/kg FW) | | | کلروفل کل (mg/kg FW) | | | |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| B ₆ | B ₃ | B ₀ | B ₆ | B ₃ | B ₀ | B ₆ | B ₃ | B ₀ | تیمارها |
| ۰/۴۵ ^c | ۰/۴۷ ^b | ۰/۵۱ ^a | ۰/۱۱ ^r | ۰/۰۹ ^s | ۰/۰۹ ^s | ۴/۷۰ ^q | ۴/۱۸ ^s | ۳/۴۱ ^t | L ₅₀ |
| ۰/۴۳ ^d | ۰/۴۴ ^c | ۰/۴۷ ^b | ۰/۳۰ ⁱ | ۰/۱۳ ^q | ۰/۱۰ ^{rs} | ۵/۷۳ ^j | ۵/۰۸ ^o | ۴/۲۸ ^r | L ₆₀ |
| ۰/۳۹ ^e | ۰/۳۹ ^e | ۰/۴۱ ^d | ۰/۳۲ ^k | ۰/۲۴ ⁿ | ۰/۱۵ ^p | ۶/۳۳ ^e | ۵/۷۳ ^j | ۴/۸۹ ^p | L ₇₀ |
| ۰/۳۴ ^f | ۰/۳۵ ^f | ۰/۳۵ ^f | ۰/۴۵ ^h | ۰/۴۳ ⁱ | ۰/۱۹ ^o | ۶/۶۲ ^d | ۵/۹۷ ⁱ | ۵/۲۳ ^m | L ₈₀ |
| ۰/۲۷ ^{hi} | ۰/۲۸ ^h | ۰/۳۰ ^g | ۰/۸۵ ^c | ۰/۴۸ ^g | ۰/۲۶ ^m | ۶/۸۴ ^c | ۶/۱۸ ^h | ۵/۴۶ ^m | L ₉₀ |
| ۰/۲۶ ^{hij} | ۰/۲۶ ^{hij} | ۰/۲۷ ^{hi} | ۰/۸۸ ^b | ۰/۵۹ ^e | ۰/۳۷ ^j | ۷/۱۷ ^b | ۶/۲۳ ^g | ۵/۵۲ ^l | L ₁₀₀ |
| ۰/۲۴ ^j | ۰/۲۵ ^{ij} | ۰/۲۶ ^{hij} | ۰/۹۵ ^a | ۰/۷۱ ^d | ۰/۴۹ ^f | ۷/۲۰ ^a | ۶/۲۶ ^f | ۵/۵۶ ^k | L ₁₁₀ |

میانگین‌هایی که حروف مشترک کوچک دارند، در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

آنزیم کاتالاز

نتایج مقایسه میانگین فعالیت آنزیم کاتالاز (جدول ۵) در میوه گوجه‌فرنگی نشان داد که با افزایش سطوح آبیاری و کاربرد زغال‌زیستی از شدت فعالیت این آنزیم به صورت معنی‌داری کاسته شد. بیشترین مقدار آنزیم کاتالاز در تیمار $L_{50}B_0$ دیده شد که با میزان این آنزیم در تیمارهای B_6 و B_3 در سطح آبیاری مشابه با $۸/۵$ و $۱۳/۳$ درصد و به صورت معنی‌داری بیشتر بود. میزان افزایش آنزیم کاتالاز در تیمار $L_{50}B_0$ نسبت به تیمار $L_{110}B_6$ به حداکثر خود رسید و $۲/۱$ برابر شد.

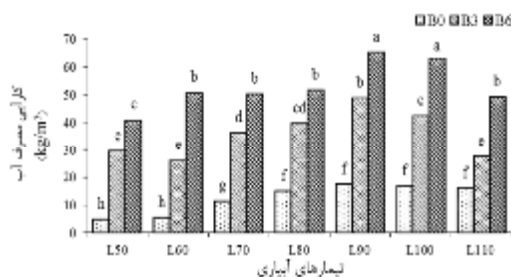
گزارش شده است که ژن‌های فعال در طول تنش خشکی با سنتز آنزیم‌هایی مانند سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات ردوکتاز، گلوتاتیون ردوکتاز و ... با ایجاد سیستم آنتی‌اکسیدانی کارآمد در حفاظت گیاه نقش دارند (جانگید و دوپودی، ۲۰۱۷)؛ بنابراین در پژوهش حاضر با افزایش تنش خشکی، افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز مشاهده شد و از آنجا که کاربرد زغال‌زیستی بر کاهش تنش خشکی مؤثر است، از شدت فعالیت این آنزیم در حضور زغال‌زیستی کاسته شد؛ اما با این وجود مقدار این آنزیم بیش از تیمارهایی بود که در آبیاری مناسب و بدون زغال‌زیستی رشد کرده بود. ابراهیمی و همکاران (۲۰۲۱) بیان کردند که در شرایط کم‌آبیاری و مصرف زغال‌زیستی تهیه‌شده از شاخه و برگ درختان خرما و پسته، غلظت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی برگ گیاه بادمجان از جمله گایاکول پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز برگ تحت تأثیر قرار گرفتند. آن‌ها گزارش کردند که بیشترین مقدار این آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاهانی مشاهده شد که در شرایط آبیاری ۵۰ درصد تخلیه رطوبتی خاک و بدون اضافه‌شدن زغال‌زیستی به خاک رشد کرده بودند و در مقابل گیاهانی که در شرایط آبیاری کامل خاک و افزودن زغال‌زیستی به خاک رشد کردند، غلظت پایینی از این آنزیم‌ها داشتند.

کارایی مصرف آب (WUE)

کارایی مصرف آب در همه تیمارهای زغال‌زیستی در سطح آبیاری L_{90} نسبت به دیگر سطوح آبیاری بالاتر بود (شکل ۳). در سطح آبیاری L_{90} ، بیشترین مقدار کارایی مصرف آب مربوط به تیمار B_6 بود که نسبت به تیمارهای B_3 و B_0 به ترتیب $۳/۸$ و $۱/۳$ برابر افزایش یافت. قابل توجه است که

در تیمارهای B_3 و B_6 در سطح آبیاری L_{110} نسبت به سطح آبیاری L_{90} ، کارایی مصرف آب به ترتیب $۴۳/۶$ و $۲۴/۶$ درصد به صورت معنی‌داری کاهش داشت. همچنین کاهش شدید کارایی مصرف آب در تیمار L_{50} نیز مشاهده شد. کارایی مصرف آب از نسبت عملکرد میوه گوجه‌فرنگی بر مقدار آب مصرفی به دست آمد؛ بنابراین، با وجود اینکه در تیمار B_6 در سطح آبیاری L_{110} نسبت به سطح آبیاری L_{90} ، افزایش عملکرد میوه گوجه‌فرنگی و مقدار آب مصرفی مشاهده شد؛ اما نسبت افزایش میزان آب مصرفی بیش از مقدار افزایش عملکرد بود و این امر سبب کاهش کارایی مصرف آب در تیمار L_{80} و L_{110} نسبت به L_{90} شد.

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که کارایی مصرف آب با افزایش مصرف زغال‌زیستی به صورت معنی‌داری افزایش یافت. زغال‌زیستی با وجود تخلخل بالا و بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک سبب نگهداشت بیشتر آب در محیط ریشه گیاه می‌شود و از این رو می‌تواند در کاهش مصرف آب مؤثر باشد.



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری و زغال‌زیستی بر کارایی مصرف آب

نوروزی و همکاران (۱۳۹۷) با کاربرد زغال‌زیستی برگ خرما به نسبت سه درصد وزنی در خاک لوم شنی در کشت گیاه گندم بیان کردند که زغال‌زیستی با بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شرایط رطوبتی خاک می‌تواند کارایی مصرف آب را در شرایط تنش افزایش دهد. اوبادی و همکاران (۲۰۲۰) و لیو و همکاران (۲۰۲۱) به ترتیب از زغال‌زیستی بقایای هرس درخت انگور در کشت ذرت و زغال‌زیستی کاه گندم در کشت تنباکو استفاده و گزارش کردند که زغال‌زیستی با بهبود شرایط رطوبتی خاک سبب افزایش کارایی مصرف آب می‌شود. بایمونت و همکاران (۲۰۲۰) نیز با بررسی سه گیاه گندم، سورگوم و گوجه‌فرنگی در شرایط کاهش مصرف آب و کاربرد زغال‌زیستی چند نوع درخت کاج جنگلی اظهار داشتند که

- عملکرد گوجه‌فرنگی تحت شرایط کم‌آبایی. مجله به‌زراعی کشاورزی. ۲۱(۲): ۲۲۱-۲۳۲.
۳. باقری م.، جوانمرد ح.، ر. و نادری م. ر. ۱۴۰۰. واکنش رشد گیاه بابونه آلمانی (*Matricaria chamomilla L.*) به آلودگی کادمیوم و سرب در شرایط گلخانه و مزرعه. دوفصلنامه علوم به‌زراعی گیاهی. ۱۱(۱): ۱۹-۳۴.
۴. بقائی ا. ح. ۱۳۹۷. اثر برهمکنش کمپوست زباله شهری و بیوچار بقایای پسته بر کاهش تنش کادمیوم در گیاه شاهی (مطالعه موردی: کمپوست زباله شهری زرنديه). مجله سلامت و بهداشت. ۹(۳): ۲۷۷-۲۹۰.
۵. جمیلی ت.، عالی نژادیان بیدآبادی ا.، ملکی ع.، فیضیان م. و اکبرپور ا. ع. ۱۴۰۱. بررسی کاربرد بیوچار و سطوح مختلف آبیاری بر ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی و تنفس میکروبی خاک آلوده به کادمیوم در کشت گوجه‌فرنگی. تحقیقات آب و خاک ایران.
۶. دین‌آباد ا. ف.، بیگلویی م. ح.، مجد سلیمی ک. و حسن پور اصل م. ۱۴۰۱. بررسی اثر متقابل رژیم‌های آبیاری تحت فشار بر عملکرد و کارایی مصرف آب گیاه چای در منطقه فومن. مجله پژوهش آب در ایران. ۱۶(۱): ۹-۱.
۷. قربانی م. و امیراحمدی ا. ۱۳۹۷. اثر بیوچار پوسته برنج بر برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک و رشد ذرت در یک خاک لومی. پژوهش‌های خاک. ۳۲(۳): ۳۰۵-۳۱۸.
۸. موسوی رحیمی م.، دلشاد م. و لیاقت ع. ۱۳۹۳. عملکرد و کیفیت میوه گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum L., Cv. Synda*) در کشت بدون خاک تحت تأثیر خشکی‌دهی قسمتی از ریشه و پلیمر هیدروژل. تولیدات گیاهی (مجله علمی کشاورزی). ۳۷(۳): ۲۳-۳۶.
۹. نوروزی م.، طباطبائی س. ح.، نوری م. و متقیان ح. ر. ۱۳۹۵. اثرات کوتاه‌مدت بیوچار حاصل از برگ خرما بر حفظ رطوبت در خاک لوم شنی. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۲: ۱۳۷-۱۵۰.
۱۰. نوروزی م.، طباطبائی س. ح. و نوری م. ر. ۱۳۹۷. کارایی مصرف آب گندم تحت شرایط تنش همزمان شوری و رطوبتی با کاربرد بیوچار برگ خرما. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۷(۳): ۲۲-۳۷.
۱۱. یعقوبی م.، طباطبائی س. ح.، رئیسی ط. و شادنیار.

در شرایط کم‌آبایی، کاربرد زغال‌زیستی سبب شد که نیاز آبی گیاه کاهش یافته، کاهش عملکرد گیاه تحت تنش آبی به حداقل برسد و کارایی مصرف آب بهبود یابد. در آزمایش آن‌ها، تأثیر زغال‌زیستی بر افزایش کارایی مصرف آب و افزایش عملکرد در گیاه گندم و گوجه‌فرنگی بیشتر از سورگوم بود.

نتیجه‌گیری

مطابق با نتایج به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت در شرایط رطوبتی یکسان، تیمارهای حاوی زغال‌زیستی پتانسیل ماتریک خاک را افزایش دادند و از این طریق در نگره‌داشت آب در خاک مؤثر بودند. مقدار کادمیوم قابل‌جذب خاک در تیمار B_6L_{110} در مقایسه با تیمار B_0L_{50} کاهش یافت. همچنین رنگدانه‌های فتوسنتزی کلروفیل کل و کاروتنوئید برگ در تیمارهای کاربرد زغال‌زیستی و سطوح آبیاری بالا، افزایش یافتند و در نتیجه مقدار فتوسنتز افزایش یافت. ویژگی‌های بیوشیمیایی میوه گوجه‌فرنگی نیز با افزایش کاربرد زغال‌زیستی و سطوح آبیاری بهبود یافتند و سبب افزایش کیفیت میوه گوجه‌فرنگی شدند. تیمارهای حاوی زغال‌زیستی بویژه در سطوح بالاتر آبیاری (L_{90} ، L_{100} و L_{110})، دارای محتوای ویتامین ث بیشتری بودند، اما آنزیم آنتی‌اکسیدانی کاتالاز در تیمارهای سطح آبیاری پایین (به‌ویژه ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد تخلیه رطوبتی خاک) و عدم مصرف زغال‌زیستی به‌دلیل وجود شرایط تنش‌زا افزایش یافت که این مربوط به سیستم آنتی‌اکسیدانی کارآمد گیاه برای حفاظت گیاه در شرایط تنش است. کارایی مصرف آب به‌صورت مؤثری تحت‌تأثیر مصرف زغال‌زیستی قرار گرفت. بیشترین کارایی مصرف آب در تیمار $L_{90}B_6$ قرار داشت.

منابع

۱. اسماعیل‌پور ب. و اکبری م. ۱۳۹۲. ارزیابی تأثیر کم‌آبایی بر خصوصیات رشدی، عملکرد و کیفیت پس از برداشت دو رقم گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum mill*) در شرایط آب‌وهوایی میاندوآب. نشریه بوم‌شناسی کشاورزی. ۵(۲): ۱۷۸-۱۸۷.
۲. اصلانی ش.، برزگر ط. و نیکبخت ج. ۱۳۹۸. اثر اسید هیومیک بر شاخص‌های فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و

22. Ebrahimi M. Souri M. K. Mousavi A. and Sahebani N. 2021. Biochar and vermicompost improve growth and physiological traits of eggplant (*Solanum melongena* L.) under deficit irrigation. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*: 8(1): 1-14.
23. Ehtesham Nia A. Taghipour Sh. and Siahmansour S. 2021. Pre-harvest application of chitosan and postharvest Aloe vera gel coating enhances quality of table grape (*Vitis vinifera* L. cv. 'Yaghouti') during postharvest period. *Food Chemistry*. 347: 129012.
24. Eykelbosh A. J. Johnson M. S. Santos de Queiroz E. Dalmagro H. J. and Guimarães Couto E. 2014. Biochar from sugarcane filtercake reduces soil CO₂ emissions relative to raw residue and improves water retention and nutrient availability in a highly-weathered tropical soil. *PLoS one*. 9(6): e98523.
25. Guo L. Yu H. Kharbach M. Zhang W. Wang J. and Niu W. 2021. Biochar Improves Soil-Tomato Plant, Tomato Production, and Economic Benefits under Reduced Nitrogen Application in Northwestern China. *Plants*. 10: 759.
26. Jangid K. K. and Dwivedi P. 2017. Physiological and biochemical changes by nitric oxide and brassinosteroid in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under drought stress. *Acta Physiologiae Plantarum*. 39(3): 1-10.
27. Klunklin W. and Savage G. 2017. Effect on quality characteristics of tomatoes grown under well-watered and drought stress conditions. *Foods*. 6: 1-10.
28. Li L. Zhang Y. J. Novak A. Yang Y. and Wang J. 2021. Role of Biochar in Improving Sandy Soil Water Retention and Resilience to Drought. *Water*. 13: 407.
29. Lichtenthaler H. K. and Buschmann C. 2001. Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. In: *Current protocols in food analytical chemistry*, F4.3.1-F4.3.8. John Wiley and Sons, Inc. New York.
30. 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.
31. Lyu S. Du G. Liu Z. Zhao L. and Lyu D. 2016. Effects of biochar on photosystem function and activities of protective enzymes in *Pyrus ussuriensis* Maxim. Under drought stress. *Acta Physiol. Plant*. 38(9): 220.
۱۳۹۸. بررسی اثر قرارگیری لایه بایوچار در محیط متخلخل بر منحنی رخنه و پروفیل توزیع نیترات. *مجله پژوهش آب ایران*. ۳۵: ۱۵۷-۱۶۷.
12. Abid M. Danish S. Zafar-Ul-Hye M. Shaaban M. Iqbal M. M. Rehim A. Qayyum M. F. and Naqqash M. N. 2017. Biochar increased photosynthetic and accessory pigments in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants by reducing cadmium concentration under various irrigation waters. *Environ. Sci. Pollut. Res*. 24: 22111-22118.
13. Agbna G. H. D. Dongli S. Zhipeng L. Elshaikh N. A. Guangcheng Sh. and Timm L. C. 2017. Effects of deficit irrigation and biochar addition on the growth, yield, and quality of tomato. *Scientia Horticulturae*. 222: 90-101.
14. Almaroai Y. A. and Eissa M. A. 2020. Effect of biochar on yield and quality of tomato grown on a metal-contaminated soil. *Scientia Horticulturae*. 265: 109210.
15. AOAC. 1990. Association of Official Analytical Communities. *Official Method of Analysis*. (18th ed.), Washington DC: USA.
16. Atkinson C. J. 2018. How good is the evidence that soil-applied biochar improves water-holding capacity? *Soil Use and Management*. 34(2): 177-186.
17. 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.
18. 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: 419-428.
19. Chance B. and Maehly A. C. 1995. Assay of catalase and peroxidase. In: *Culowic, S.P. and Kaplan, N.O. (eds.), Methods in enzymology*, Vol. 2. pp. 764-765. Academic Press. Inc. New York, USA.
20. Dad K. Nawaz M. Hassan R. Javed K. Shaheen A. Zhao F. Imran M. Shah S. Anwar M. and Aurangzaib M. 2021. Impact of biochar on the growth and physiology of tomato grown in the cadmium contaminated soil. *Pakistan Journal of Agricultural Research*. 34(2): 454-462.
21. Danish S. Zafar-ul-Hye M. Mohsin F. and Hussain M. 2020. ACC-deaminase producing plant growth promoting rhizobacteria and biochar mitigate adverse effects of drought stress on maize growth. *PLoS One*: 15(4): e0230615.

42. Zeeshan M. Ahmad W. Hussain F. Ahamd W. Numan M. Shah M. and Ahmad I. 2020. Phytostabilization of the heavy metals in the soil with biochar applications, the impact on chlorophyll, carotene, soil fertility and tomato crop yield. *Journal of Cleaner Production*. 255: 120318.
43. Zhang Q. Song Y. Wu Z. Yan X. Gunina A. Kuzyakov Y. and Xiong Z. 2020. Effects of six-year biochar amendment on soil aggregation, crop growth, and nitrogen and phosphorus use efficiencies in a rice-wheat rotation. *Journal of Cleaner Production*. 242: 118435.
32. Maham S. G. Rahimi A. Subramanian S. and Smith D. L. 2020. The environmental impacts of organic greenhouse tomato production based on the nitrogen-fixing plant (*Azolla*). *J Clean Prod*. 245: 1-9.
33. Mansoor S. Kour N. Manhas S. Zahid S. Wani O. A. Sharma V. Wijaya L. Alyemini N. M. Alshhi A. A. El-Serehy H. A. Paray B. A and Ahmad P. 2020. Biochar as a tool for effective management of drought and heavy metal toxicity. *Chemosphere*. 129458.
34. Moradi N. and Karimi A. 2021. Fe-modified common reed biochar reduced cadmium (Cd) mobility and enhanced microbial activity in a contaminated calcareous soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 21(1): 329-340.
35. Munir M. Alhajhoj M. R. Mohammed M. E. Ghazzawy H. S. Elgarawany M. M. El-Habbab M. S. and Al-Bahigan A. M. 2020. Effects of Date Palm Biochar on Growth, Yield and Photosynthetic Capacity of Cucumber (*Cucumis sativus* L.) Under Glasshouse Conditions. *Pakistan Journal of Life and Social Sciences*. 18(1).
36. 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(13): 1-12.
37. Pandey D. Daverey A. and Arunachalam K. 2020. Biochar: production, properties and emerging role as a support for enzyme immobilization. *Journal of Cleaner Production*. 255: 1-9.
38. Turkian K. K. and Wedepohl K. H. 1961. Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust. *Geol Soc Am Bull*, 72: 175-192.
39. Wang L. Wang Y. Ma F. Tankpa V. Bai S. Guo X. and Wang X. 2019. Mechanisms and reutilization of modified biochar used for removal of heavy metals from wastewater: A review. *Science of the Total Environment*. 668: 1298-1309.
40. Wang Y. Zheng K. Zhan W. Huang L. Liu Y. Li T. Yang Z. Liao Q. Chen R. and Zhang C. 2021. Highly effective stabilization of Cd and Cu in two different soils and improvement of soil properties by multiple-modified biochar. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 207: 111294.
41. Xu C. Zhao J. Yang W. He L. Wei W. Tan X. Wang J. and Lin A. 2020. Evaluation of biochar pyrolyzed from kitchen waste, corn straw, and peanut hulls on immobilization of Pb and Cd in contaminated soil. *Environmental Pollution*. 261: 114133.

