

اثر سطوح مختلف بیوچار بر صفات فیزیولوژیک کدو (*Cucurbita pepo* L.) تحت تنش کمبود آب

علیرضا صفاهانی لنگرودی*، رضا نورا

گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۹۶/۴/۲۹ تاریخ پذیرش: ۹۶/۸/۳

چکیده

اخیرا، بیوچار توجه زیادی را به عنوان یک راهبرد قابل قبول برای افزایش بهره‌وری گیاه زراعی به خود جلب کرده است. کمبود آب، بهره‌وری کشاورزی را محدود و یک راه حل ممکن برای این مشکل، استفاده از بیوچار است. هدف از این مطالعه بررسی اثر بیوچار بر فیزیولوژی و عملکرد کدو تخم پوست کاغذی (*Cucurbita pepo* L.) تحت تنش کمبود آب بود. برای این منظور، آزمایشی فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با چهار تکرار در دو سال متوالی (۱۳۹۴-۱۳۹۵) در شهرستان گرگان انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل چهار دور آبیاری ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درصد تخلیه رطوبت قابل استفاده در خاک (I1-I4) و بیوچار با مقادیر ۰، ۵، ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار بود (B0-B20). تشدید کم آبیاری فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و گونه‌های واکنشی اکسیژن در برگ کدو را نسبت به تیمار آبیاری ۴۵ درصد، افزایش داد. در مقابل، تمام فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی، گونه‌های واکنشی اکسیژن و محتوای پرولین برگ کدو در خاک تیمار شده با بیوچار، بویژه در تیمار ۲۰ تن بیوچار در هکتار، کاهش نشان داد و همچنین بیشترین و کمترین صفات مذکور به ترتیب به تیمارهای I4B0 و I1B20 متعلق بود. جالب توجه است که کاربرد بیوچار اثرات منفی کم آبیاری را بر پارامترهای تبادل گازی برگ، کلروفیل و جذب عناصر غذایی، عملکرد محصول، راندمان مصرف آب و وضعیت آبی گیاه را کاهش داد. عملکرد بذر کاهش ۶، ۶ و ۵۸ درصدی در I2، I3 و I4 در مقایسه با تیمار I1 بدون در نظر گرفتن میزان بیوچار استفاده شده، نشان داد. نتایج واقعی و شبیه سازی شده، نشان دهنده سطح آستانه کاربرد بیوچار برای هر تیمار آبیاری با توجه به عملکرد دانه بود. میزان پاسخ به بیوچار در مقادیر پایین بیوچار، با افزایش شدت کم آبیاری کند و متوقف شد. اما واکنش تیمار I2 به بیوچار، در مقدار بالای بیوچار به عنوان بیوچار آستانه (Bcritical)، ۱۴ تن بیوچار در هکتار متوقف شد. این بدان معنی است که تیمار I2 واکنش کدو به بیوچار را بهبود بخشید که با راندمان مصرف آب بالاتری همراه بود. این نتایج نشان می‌دهد که کاربرد بیوچار می‌تواند یک راهبرد موفق برای بهبود بهره‌وری آب و افزایش تولید محصول در منطقه مورد مطالعه (گرگان) باشد.

واژه‌های کلیدی: تنش خشکی، حداکثر درصد تخلیه، راندمان مصرف آب، عملکرد دانه، فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی.

مقدمه

گیاهان متعلق به تیره کدویان به علت تجمع درصد بالایی از پروتئین و به‌ویژه روغن در دانه از ارزش غذایی مناسبی برخوردار هستند. کدو به‌عنوان یک منبع قابل اعتماد در تولید استفاده می‌شود و امنیت غذایی خانوار را برای تولید کنندگان فراهم می‌کند. برگ‌ها، گل‌ها و میوه‌های آن به عنوان سبزیجات و دانه‌های برشته شده به عنوان تنقلات مورد استفاده قرار می‌گیرند (Mwaura et al., 2014). دانه‌های کدو حاوی آنتی‌اکسیدان بتاکاروتن هستند که به بهبود عملکرد سیستم ایمنی کمک می‌کند و خطر ابتلا به سرطان و بیماری‌های قلبی را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، دانه کدو حاوی بسیاری از ویتامین‌ها و مواد مغذی، از جمله کلسیم، آهن، منیزیم، پتاسیم، روی، سلنیوم، اسید نیکوتین، اسید فولیک و ویتامین‌های A، C و E هستند (Ghanbari et al., 2007). ایران از اقلیمی خشک و نیمه خشک برخوردار است و تنش خشکی در راس عوامل محدود کننده تولید کشاورزی قرار داشته و اغلب تاثیر جدی در تعیین عملکرد گیاهان زراعی مختلف در ایران دارد. علاوه بر این، انتشار بیشتر کربن از زمین‌های تخریب شده به هزینه‌های احیای اراضی می‌افزاید. تنش خشکی بر گیاهان اثر منفی می‌گذارد، از جمله آنها می‌توان به کاهش محتوای آب برگ، جذب مواد مغذی، فتوسنتز، رشد و عملکرد گیاهان اشاره کرد (Siddiqui et al., 2015). علاوه بر این، تنش خشکی باعث ایجاد تنش اکسایشی در گیاهان از طریق تولید گونه‌های واکنشی اکسیژن می‌شود (De Carvalho, 2008). بنابراین، مقابله با تنش خشکی یک وظیفه چالش برانگیز برای دستیابی به امنیت غذایی در سراسر جهان است. گرماکافت^۱ زیست توده در شرایط کمبود اکسیژن، منجر به تولید مواد غنی از کربن می‌شود که به نام

1- Pyrolysis

بیوچار شناخته می‌شود. استفاده از بیوچار به دلیل توانایی آن در افزایش حاصلخیزی خاک، انحصار کربن، تولید انرژی زیستی و غیر متحرک کردن آلاینده های آلی و غیر آلی اهمیت زیادی یافته است (Abbas et al., 2017). یکسری از محققین تحقیقات گزارش دادند که کاربرد بیوچار باعث افزایش رشد گیاه و زیست توده و جذب مواد مغذی در شرایط تنش خشکی می‌شود (Kim et al., 2016). بیوچار همچنین باعث بهبود خواص فیزیکوشیمیایی خاک شامل pH خاک، ظرفیت تبادل کاتیون، ساختار خاک و ظرفیت نگهداشت آب تحت تنش‌های غیر زیستی شده است (Lim et al., 2016).

حفاظت از آب همچنین می‌تواند با بهبود بهره وری مصرف آب توسط محصولات، از جمله کشت گیاهانی که کمتر نیازمند آبیاری فصلی هستند، حاصل شود. در این زمینه، کدو تخم کاغذی (*Cucurbita pepo* L.) یکی از این دسته گیاهان است. کدو در شرایط مدیترانه‌ای، نسبت به محصولات دیگر مانند چغندر قند، ذرت و هویج نیاز به مصرف آب کمتری دارد، تاکنون تلاش‌های اندکی به بررسی اثرات اصلاحی بیوچار برای تولید کدو در شرایط تنش خشکی که یکی از مهمترین محصولات باغبانی ایران است انجام گردیده است. هدف از انجام این تحقیق، بررسی اثر کاربرد بیوچار در شرایط تنش کم آبی بر برخی صفات فیزیولوژیک و زراعی در گیاه دارویی کدو پوست کاغذی بود.

مواد و روش‌ها

مشخصات محل آزمایش: این مطالعه در مزرعه آزمایشی دانشکده کشاورزی دانشگاه پیام نور گرگان واقع در استان گلستان در دو فصل زراعی (۱۳۹۵-۱۳۹۶) انجام شد. مزرعه آزمایشی با طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۲۲ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۵۰

برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس درصد تخلیه آب موجود در خاک در منطقه ریشه بود. آب موجود در خاک به عنوان تفاوت بین ذخیره سازی آب منطق ریشه در نقطه ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائمی در نظر گرفته شد. برای تخمین ذخیره آب خاک، محدوده بهره‌وری ریشه گیاه کدو به اندازه ۰-۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (Hossen et al., 2016). رطوبت خاک با اندازه‌گیری وزنی، تعیین شد. مقدار آب به کار رفته، پس از دستیابی به MAD از پیش تعیین شده، طبق روش زیر محاسبه شد (پاندا و همکاران، ۲۰۰۴):

$$V_d = \frac{MAD(\%)(FC - WP)R_c A}{100}$$

که V_d حجم آب آبیاری است، R_z عمق ریشه‌دهی موثر، A مساحت سطح پلات و FC ظرفیت زراعی مزرعه و WP نقطه پژمردگی است. مقدار کل آب در هر دور آبیاری در جدول ۱ برای دو فصل آزمایش نشان داده شده است. بارش و دما طی دو سال آزمایش مشابه و مطابق میانگین منطقه‌ای بود. چهار مقدار بیوچار به کار برده شده عبارت بودند از ۰، ۵، ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار که به ترتیب به‌عنوان شاهد B_0 ، B_5 ، B_{10} و B_{20} نشانه‌گذاری شدند. بیوچار در سطح پلاتها به صورت دستی در ماه‌های اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ قبل از کاشت کدو، پخش و بلافاصله همراه با کودهای پایه و با استفاده از روتاری و گاواهن برگردان‌دار در خاک مخلوط شدند.

عملیات زراعی: کدو تخم کاغذی رقم کاکایی برای این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. بذر کدو در روز ۳۰ فروردین ۱۳۹۴ و ۱ اردیبهشت ۱۳۹۵، به صورت دستی در محل داغاب و در عمق ۳ سانتی‌متری کشت شدند. تعداد بذر در هر کپه ۳ عدد در نظر گرفته شد. پس از جوانه‌زنی و استقرار کامل گیاهچه، هنگامی که چهار برگ کاملاً رشد کردند، بوته‌های اضافی تنک و

درجه و ۳۶ دقیقه شمالی و با ارتفاع ۶۰ متر بالای سطح دریا قرار داشت. با توجه به داده‌های بلند مدت هواشناسی، آب و هوا در این منطقه نیمه خشک با بارش سالانه ۳۱۲ میلی‌متر است. داده‌های هواشناسی در ماه‌های زمان آزمایش در جدول ۱ آورده شده است. دو هفته قبل از کاشت در سال ۱۳۹۴ از عمق ۶۰-۰ سانتی‌متری خاک به منظور تعیین خصوصیات شیمیایی خاک نمونه برداری شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۲ نشان داده شده است.

بیوچار: مواد اولیه برای تولید بیوچار، کاه ذرت بود و بیوچار با استفاده از کوره آجرپزی تولید شد. درجه حرارت فرآیند گرماکافت حدود ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد بود که توسط ترموکوپل دیجیتال اندازه‌گیری شد و مدت زمان گرماکافتی ۷ روز بود. قبل از استفاده در مزرعه، توده ذرت تبدیل به ذغال شده، خرد گردید. بیوچار مورد استفاده نیز قبل از مصرف تجزیه شدند تا وضعیت فیزیکی و شیمیایی موجود در آن مشخص گردد (جدول ۲).

طرح آزمایشی و تیمارها: این مطالعه در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در دو سال انجام شد، فاکتورهای آزمایش شامل آبیاری و بیوچار که هر فاکتور دارای چهار سطح بود. دوره‌های آبیاری بر اساس حداکثر تخلیه مجاز^۱ (MAD) کل آب در دسترس خاک^۲ (ASW) برنامه‌ریزی شدند. هر دور آبیاری براساس یک سطح از پیش تعیین شده MAD بود که درصد ثابتی از کل ASW بود. آب آبیاری، زمانی که مقدار آستانه MAD برای تیمار آبیاری مورد نظر حاصل شد، اعمال شد. تیمارهای آبیاری شامل ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درصد MAD از ASW که به صورت II تا I4 نشانه‌گذاری شدند.

1- Maximum allowable depletion

2- Available soil water

بر اساس توصیه کارشناسان کشاورزی منطقه بود. از علف‌کش‌ها و حشره‌کش‌ها در هر پلات در صورت نیاز مورد استفاده قرار گرفتند.

اندازه‌گیری‌ها

سنجش‌های فیزیولوژیکی: در ۵۰ درصد گل دهی گیاهان، حدوداً ۷۰ روز پس از کاشت، از دو ردیف میانی و با حذف اثر حاشیه‌ای از بالا و پایین هر کرت از دو برگ بالایی و به طور کامل گسترش یافته گیاهان هر پلات و در ۸ بوته جداگانه برداشت و پارامترهای تبادل گاز برگ که در ادامه ذکر شدند اندازه‌گیری انجام شد. میزان فتوسنتز خالص، هدایت روزنه‌ای توسط آنالیزر گاز مادون قرمز (Li-6400, Li-) (Cor, Lincoln, NE, USA) در چهار تکرار در هر تیمار از ساعت ۰۹:۳۰ تا ۱۰:۴۰ در یک روز آفتابی قبل از برداشت، اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری‌ها زمانی که ضریب کلی تغییرات کمتر از ۰/۵ درصد بودند، ثبت شد.

تنها یک گیاهچه کدو در هر کپه حفظ شد. برای اطمینان از جوانه زنی و رشد یکنواخت، پس از کاشت، حجم آب آبیاری ۶۲ و ۵۵ میلی‌متر به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ برای تمامی تیمارها مورد استفاده قرار گرفت. فاصله بین و روی ردیف‌های گیاهان به ترتیب ۱۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر بودند. هر پلات دارای چهار ردیف کشت و طول هر ردیف ۱۰ متر (مساحت هر پلات ۵۶ مترمربع) بود. پلات‌ها توسط آب بند احاطه شدند و یک نوار عرضی ۲ متری بین پلات‌های مجاور برای جلوگیری از نفوذ آب استفاده شد و توپوگرافی مزرعه آزمایشی مسطح بود. کود نیتروژن از منبع اوره به میزان ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، ۴۰ درصد قبل از کاشت، ۳۰ درصد در مرحله کشیدگی ساقه و ۳۰ درصد در مرحله گلدهی مورد استفاده قرار گرفت. فسفر و پتاسیم به ترتیب از منبع سوپر فسفات کلسیم و سولفات پتاسیم به ترتیب در مقادیر ۴۰ و ۸۰ کیلوگرم در هکتار به کار رفته که

جدول ۱: نوسانات بارندگی، دما و حجم آبیاری تیمارها در طی ماه‌های تحقیق (۱۳۹۴-۱۳۹۵)

ماه	میانگین دما (سانتی‌گراد)		بارندگی (میلی‌متر)	
	سال اول	سال دوم	سال اول	سال دوم
فروردین	۱۷/۴	۱۸/۴	۴۵	۴۶
اردیبهشت	۱۹/۴	۲۰/۴	۱۰/۲	۸/۵
خرداد	۲۴/۶	۲۳/۵	۵/۷	۳/۷
تیر	۲۴/۳	۲۵/۴	۰/۵	۰/۹
مرداد	۲۶/۶	۲۵/۱	-	۰/۷
شهریور	۱۹/۹	۲۰/۲	۶/۴	۷/۲
تیمار آبیاری	سال اول	سال دوم		
I1, ۴۵ درصد حداکثر تخلیه مجاز	۴۲۵	۴۵۰		
I2, ۶۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز	۳۶۰	۳۸۲		
I3, ۷۵ درصد حداکثر تخلیه مجاز	۲۸۵	۲۹۰		
I4, ۹۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز	۲۳۵	۲۳۸		

محصول (WUE) به‌عنوان رابطه بین عملکرد گیاه و آب مصرفی گیاه در طول دوره تیمار محاسبه شد. برای تعیین مقدار اسید آبسزیک از طریق الایزا (ELISA) و با استفاده از آنتی‌بادی منوکلونال برای ABA (AFRC MAC252) مورد استفاده قرار گرفت (Asch, 2000).

محتوای کلروفیل با کلروفیل متر برگ قابل حمل، اندازه‌گیری شد. شاخص پایداری غشایی با توجه به روش Premchandra و همکاران (۱۹۹۰) که توسط Sairam (۱۹۹۴) اصلاح شد، تعیین شد. محتوای نسبی آب در برگ با توجه به روش Smart (۱۹۷۴)، تعیین شد. راندمان مصرف آب

جدول ۲: برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و بیوچار مورد استفاده از کاه ذرت

خاک						
بافت خاک	اسیدینه	نیتروژن کل (درصد)	فسفر قابل دسترس (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	پتاسیم قابل دسترس (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	وزن مخصوص ظاهری خاک (گرم بر مترمکعب)	کربن آلی (درصد)
لوم سیلتی	۷/۸۸	۰/۰۵۹	۶/۵۶	۱۲۷/۱۲	۷/۸۸	۰/۷۲
بیوچار						
کربن (درصد)	نیتروژن (درصد)	هیدروژن (درصد)	اسیدینه	وزن مخصوص ظاهری خاک (گرم بر مترمکعب)	ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتیمول بار بر کیلوگرم خاک)	سطح ویژه (مترمربع بر گرم)
۴۹/۱۶	۰/۷۹	۱/۶۹	۸/۹	۰/۰۹۸	۵۷/۱	۵۳/۰۳

عملکرد دانه: زمانی که بیش از ۷۵ درصد میوه‌ها به رنگ نارنجی زرد و ساقه و برگ شروع به خشک شدن کردند و دانه‌ها به رنگ سبز تیره و گرد گردید، هشت نمونه تصادفی (میوه) از هر پلات آزمایشی در نیمه اول شهریور ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵، با دست چیده شد. میوه‌های برداشت شده وزن شدند (وزن تر). دانه‌ها به‌صورت دستی از میوه‌ها خارج شده و سپس به‌طور طبیعی توسط نور خورشید تا زمان ثابت شدن وزن، خشک شدند. دانه‌های خشک شده در خورشید به آزمایشگاه منتقل شدند. تمام دانه‌های خشک شده هر پلات شمارش و وزن شدند.

پاسخ‌های مقادیر مختلف بیوچار به دوره‌های آبیاری با استفاده از رگرسیون عملکرد دانه در برابر مقادیر بکار رفته بیوچار با استفاده از مدل سگمندی

ترکیب شیمیایی برگ، مقدار نیتروژن، پتاسیم، فسفر و منیزیم به ترتیب با استفاده از روش کج‌لدال (Bremmer et al., 1982)، فلیم فتومتر، مولیبدن آبی اسید اسکورییک (Philips and Hayman, 1970) و طیف‌سنجی جذب اتمی تجزیه و تحلیل شدند. استخراج و برآورد فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، همانند آسکوربات پراکسیداز (APX)، سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT)، پراکسیداز (POD) و پلی‌فنول اکسیداز (PPO) به ترتیب با توجه به روش (Kumar and Khan, 1982; Nakano and Asada, 1981; Omran, 1980; Singh et al., 2010; Van Rossum et al., 1997) اندازه‌گیری شدند. برای تعیین غلظت مالون دی‌آلدئید، پراکسید هیدروژن و رادیکال آزاد اکسیژن به ترتیب با توجه به روش (Velikova et al., 2000; Wang and Jiao, 2000; Janero, 1990) ارزیابی شدند.

خطی-فلاتی به صورت زیر مورد بررسی قرار گرفت (Soltani et al., 2006).

$$\begin{cases} Y = a + bB \text{ if } B < B_{critical} \text{ (linear part)} \\ Y = a + bB_{critical} \text{ if } B \geq B_{critical} \text{ (Plateau part)} \end{cases}$$

مقایسه با تیمار عدم کاربرد بیوچار افزایش داد؛ با این حال، این افزایش تنها در تیمارهای I1 و I2 در بالاترین میزان کاربرد بیوچار یعنی تیمار B20 مشهود بود (جدول ۳). به طور متوسط مقدار فتوسنتز خالص در مقادیر مختلف بیوچار، در تیمار I1، 15.7 میکرومول دی اکسید کربن بر مترمربع در ثانیه بود. در حالی که مقدار فتوسنتز خالص گیاهان تحت سایر تیمارهای آبیاری I2، I3 و I4 به ترتیب ۹، ۴۰ و ۴۸ درصد نسبت به تیمار I1، کمتر بودند. هدایت روزنه‌ای نیز ۱۶، ۶۸ و ۷۳ درصد به ترتیب در تیمارهای I2، I3 و I4 از تیمار I1 کمتر بودند. مشابه روند هدایت روزنه در مورد تعرق مشاهده شد.

اثرات نامطلوب کاهش شدید آبیاری (یعنی: تیمارهای I3 و I4)، که منجر به تولید مالون دی آلدئید، رادیکال‌های آزاد اکسیژن و پراکسید هیدروژن در برگ‌های کدو می‌شود را می‌توان در جدول ۳ مشاهده کرد. مقدار مالون دی آلدئید در تیمارهای I3 و I4 به ترتیب ۲/۱ و ۳/۸ برابر در مقایسه با تیمار I1، افزایش نشان داد. غلظت پراکسید هیدروژن در تیمارهای I3 و I4 به ترتیب ۱/۷ و ۲/۱ برابر نسبت به تیمار I1 افزایش یافت. در تیمارهای I3 و I4 غلظت رادیکال آزاد اکسیژن ۱/۳ و ۱/۶ برابر افزایش داشت. از سوی دیگر، افزودن بیوچار به خاک باعث کاهش تولید مالون دی آلدئید، رادیکال‌های آزاد اکسیژن و پراکسید هیدروژن می‌شود (جدول ۳). همچنین غلظت مالون-دی آلدئید، پراکسید هیدروژن و رادیکال‌های آزاد اکسیژن در برگ‌ها تغییر قابل ملاحظه‌ای را با استفاده از کاربرد بیوچار در تیمارهای I1 و I2 نشان ندادند. در نتیجه، حداکثر مقادیر پارامترهای ذکر شده، به تیمار I4-B0 تعلق داشت.

که Y عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)، B مقدار بیوچار (تن در هکتار)، $B_{critical}$ نقطه شکست منحنی یا مقدار بیوچار بکار رفته است که در آن حالت فلات منحنی آغاز می‌شود، a و b ضرایب مدل هستند. فلات منحنی حداکثر عملکرد را برآورد کرد و نقطه شکست منحنی، مقدار بیوچار به کار رفته را که در آن حداکثر عملکرد دانه به دست آمده، برآورد می‌کند. این ضرایب رگرسیون غیر خطی با استفاده از روش بهینه سازی تکراری با استفاده از ابزار Solver Add-ins در نرم افزار Excel برآورد شد.

آنالیز واریانس داده‌ها با استفاده از نرم افزار SAS انجام شد و میانگین‌ها با آزمون حداقل اختلاف معنی-دار (LSD) سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شدند. ضمناً به دلیل معنی دار شدن اثر متقابل آبیاری و بیوچار در پارامترهای گیاهی اندازه‌گیری شده، نتایج هر سطح آبیاری جداگانه مقایسه شدند (Soltani, 2005). همچنین، پاسخ به دوره‌های آبیاری و میزان مصرف بیوچار در هر دو سال مشابه بود، لذا در تجزیه و تحلیل که در ادامه اشاره شده است، تمام مقادیر داده شده، بر اساس میانگین داده‌های ۲ سال هستند.

نتایج

پارامترهای فیزیولوژیکی: تیمار آبیاری و اثر متقابل آن با تیمار بیوچار، تأثیر معنی‌داری بر پارامترهای تبادل گازی اندازه‌گیری شده در این تحقیق داشت (جدول ۳). حداکثر مقدار پارامترهای تبادل گازی در تیمار I1 مشاهده شد که بیشتر از تیمارهای I2، I3 و I4 بود، همچنین هیچ اختلاف آماری بین تیمار I1 و I2 وجود نداشت (داده‌ها نشان داده نشد). اساساً، تیمارهای کاربرد بیوچار، پارامترهای ذکر شده را در

جدول ۳. مقایسه میانگین پارامترهای تبادل گازی برگ، محتوی مالوندی آلدهید، رادیکال آزاد اکسیژن و پراکسید هیدروژن در برگ در پاسخ به دوره‌های کم آبیاری و مقادیر بیوجار. (داده‌ها میانگین دو سال ۱۳۹۴-۱۳۹۵).

پراکسید هیدروژن $\mu\text{mol g}^{-1} \text{FW h}^{-1}$	رادیکال آزاد اکسیژن $\mu\text{mol g}^{-1} \text{FW}$	مالوندی آلدهید $\text{mmol g}^{-1} \text{FW}$	تغرق $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$	هدایت روزانه‌ای $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$	فوتوسنتز خالص $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$	تیمار
۰/۸۳a	۰/۸۱a	۱/۳a	۱/۸b	۰/۸۱۵b	۱۴/۳۳b	I1×B0
۰/۸۳a	۰/۸a	۱/۲۴a	۲b	۰/۸۱۲۷ab	۱۵/۰۹b	I1×B5
۰/۸۳a	۰/۰۹a	۱/۲۲a	۲/۵a	۰/۸۳۳ab	۱۶/۳۵ab	I1×B10
۰/۸۱a	۰/۰۹a	۱/۸۹a	۲/۹a	۰/۸۴۷a	۱۷/۳۶a	I1×B20
۰/۸۴a	۰/۸۲a	۱/۵۵a	۱/۵c	۰/۸b	۱۲/۵۵b	I2×B0
۰/۸۴a	۰/۸۱a	۱/۳۵a	۱/۸c	۰/۸۰۷ab	۱۳/۸b	I2×B5
۰/۸۳a	۰/۸a	۱/۳a	۲/۲b	۰/۸۱۲۷ab	۱۴/۸۲ab	I2×B10
۰/۸۳a	۰/۸a	۱/۲a	۲/۸a	۰/۸۲۵a	۱۶/۸۱a	I2×B20
۰/۸۷a	۰/۸۹a	۲/۷۲a	۰/۸b	۰/۸۳۷a	۸/۶a	I3×B0
۰/۸۷a	۰/۸۸ab	۲/۶a	۰/۹ab	۰/۸۴۷a	۹/۸a	I3×B5
۰/۸۸ab	۰/۱۵ab	۵/۵۶a	۱/۲ab	۰/۸۴۴a	۹/۸a	I3×B10
۰/۸۴b	۰/۸۴b	۲/۵a	۱/۴a	۰/۸۴۴a	۱۰/۳۳a	I3×B20
۰/۶۱a	۰/۶۳a	۵/۱۴a	۰/۸a	۰/۸۳۱a	۷/۵۵a	I4×B0
۰/۶a	۰/۶۱ab	۴/۷۷ab	۰/۸a	۰/۸۲۴a	۷/۸۴a	I4×B5
۰/۸۹ab	۰/۸۹ab	۴/۶۳ab	۱a	۰/۸۳۶a	۸/۴a	I4×B10
۰/۸۸ab	۰/۸۸ab	۴/۸۶b	۱/۸a	۰/۸۴۷a	۸/۸۷a	I4×B20
*	*	*	تغرق	هدایت روزانه‌ای	فوتوسنتز خالص	منابع تغیر
ns	ns	ns	*	*	*	آبیاری
*	*	*	*	*	*	بیوجار
*	*	*	*	*	**	آبیاری×بیوجار
ns	ns	ns	تغرق	هدایت روزانه‌ای	فوتوسنتز خالص	دور آبیاری
ns	ns	ns	*	*	*	I1
*	*	*	**	*	*	I2
*	*	*	*	ns	ns	I3
*	*	*	ns	ns	ns	I4

۱۱-۱۴ به ترتیب ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درصد حداکثر تخلیه معجاز رطوبت خاک؛ B0-B20 به ترتیب صفر، ۵، ۱۰ و ۲۰ تن بیوجار در هکتار. *، ** و ns به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۰،۱ درصد و عدم معنی داری است. ا. عددی که در یک حرف کوچک مشترک میباشند از نظر آماری در سطح ۵ درصد آزمون LSD تفاوت معنی داری ندارند.

نشت الکتروولت از غشاء سلولی و تجمع پرولین در برگ‌های گیاهان کدو به طور قابل توجهی در سطوح کم آبیاری شدید، تیمارهای I3 و I4، به میزان قابل توجهی افزایش داشت (جدول ۴). با این وجود، استفاده از بیوچار به طور قابل توجهی نشت الکتروولتی را در گیاهان تحت تنش خشکی خنثی کرد (جدول ۴). از سوی دیگر، کاربرد بیوچار باعث کاهش محتوای پرولین شد. بالاترین مقدار پرولین ۱۳/۸ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک در برگ به تیمار I4-B0 اختصاص داشت.

در این تحقیق، تغییرات در فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، از جمله SOD، APX، POD، PPO و CAT را در پاسخ به تنش کم آبیاری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تشدید کم آبیاری منجر به تقویت فعالیت SOD شد (جدول ۴). اگرچه فعالیت SOD با استفاده از بیوچار تحت تیمار I2 تغییری نیافت، استفاده از بیوچار سبب کاهش فعالیت SOD در I2، I3 و I4 در مقایسه با تیمار B0 شد (جدول ۴). اختلاف قابل توجهی بین سطوح بیوچار از نظر فعالیت SOD در تیمار I2 وجود نداشت. داده‌های مربوط به فعالیت APX در تیمارهای مختلف در جدول ۴ نشان داده شده است. کم آبیاری باعث افزایش میزان فعالیت APX در برگ‌ها می‌شود. در مقابل، فعالیت APX در برگ‌های تحت سطوح مختلف کاربرد بیوچار در مقایسه با تیمار عدم کاربرد بیوچار به طور معنی‌داری پایین‌تر بود. در نتیجه، حداکثر فعالیت APX در برگ در تیمار I4-B0 رخ داد. علاوه بر این، فعالیت APX در تیمار I1 و I2 در هنگام کاربرد بیوچار، اختلاف قابل توجهی نشان نداد. فعالیت POD برگ در گیاهان تحت تیمار I3 و I4 از I1 بیشتر بود. علاوه بر این، فعالیت POD در هنگام افزودن بیوچار به خاک به طور معنی‌داری کاهش یافت (جدول ۴). در نتیجه، در حالیکه کاربرد بیوچار در حالت تشدید کم آبیاری موثرتر از عدم به

کارگیری آن بود، اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای کاربرد بیوچار تحت تیمار I2 وجود نداشت. افزایش فعالیت PPO با افزایش تنش کم آبیاری در برگ‌ها مشاهده شد (جدول ۴). با این وجود فعالیت PPO در برگ پس از کاربرد بیوچار کاهش یافت. در نتیجه، بیشترین فعالیت PPO در برگ ۷/۶ واحد بود که در تیمار I4-B0 مشخص شد. علاوه بر این، فعالیت PPO در برگ کدو در تیمارهای I1 و I2 زمانی که بیوچار به خاک اضافه شد اختلاف قابل توجهی نشان نداد. نتایج حاصل از جدول ۴ نشان داد که فعالیت CAT در سطوح آبیاری اختلاف قابل توجهی دارد. بطور متوسط در سطوح مختلف بیوچار، در فعالیت CAT در گیاهان تحت تیمارهای I3 و I4 در مقایسه با I1 به ترتیب افزایش ۶ و ۸ برابری مشاهده شد. گرچه افزودن بیوچار در سطوح تشدید کم آبیاری باعث کاهش فعالیت CAT برگ شد، اما فعالیت این آنزیم با کاربرد بیوچار در شرایط نرمال آبیاری، I1 تغییری نکرد. در تیمار I4-B0، حداکثر فعالیت CAT در برگ مشخص شد (جدول ۴).

اثر دوره‌های آبیاری بر میزان N، K، Mg و P معنی‌دار نبود، اگر چه روند کاهشی با تشدید کم آبیاری ثبت شد (جدول ۴). کاربرد بیوچار موجب افزایش این عناصر معدنی نسبت به گیاهان بدون کاربرد بیوچار شد، به جز نیتروژن، که با افزایش میزان بیوچار روند کاهشی ناچیزی را نشان داد (جدول ۴). بیوچار تأثیرات ناشی از تنش خشکی را به میزان مشخصی کاهش داد (جدول ۴).

شاخص محتوای کلروفیل (CCI) گیاهان در تیمارهای بیوچار افزایش یافت، اما معنی‌دار نبود. در دو تیمار کم آبیاری شدید، به ترتیب I3 و I4، کاهش قابل توجهی در CCI رخ داد (جدول ۵). میزان پایین فتوسنتز خالص در گیاهان کدو با مقدار پایین CCI، پایداری پایین غشاء، محتوی نسبی پایین آبا برگ و محتوای پرولین بالاتر همزمان بود.

جدول ۴: مقایسه میانگین فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان، پایداری غشا، پرولین و محتوی عناصر معدنی در برگ کدو در پاسخ به دوره‌های کم آبیاری و مقادیر بیوجار. (داده‌ها میانگین دوسال ۱۳۹۴-۱۳۹۵).

Mg درصد	K درصد	P درصد	N درصد	شاخص پایداری غشا درصد	پرولین mg g ⁻¹ DW	کاتالاز U g ⁻¹ FW	پلی فنی اکسیداز U g ⁻¹ FW min ⁻¹	پراکسیداز U g ⁻¹ FW	آسکوربات پراکسیداز U g ⁻¹ FW	سوپراکسید دیسمنتاز U g ⁻¹ FW	تیمار
۰/۶۲b	۲/۷۹b	۰/۸۹c	۲/۴۴	۸۹/۹۸	۴/۹۸	۰/۴۸	۰/۸۱a	۰/۲۲a	۰/۳۱a	۰/۶۱a	II×B0
۰/۶۲b	۲/۸۹ab	۰/۷۲c	۲/۴۳	۹۱/۲۸	۴/۹۸	۰/۳۷a	۰/۸۸	۰/۲۱a	۰/۲۹a	۰/۵۷a	II×B5
۰/۶۵a	۲/۹۵a	۰/۲۲a	۲/۴۲	۹۳/۵۸	۴/۸۸	۰/۳۱a	۰/۸۹a	۰/۲۸	۰/۳۸	۰/۵۷a	II×B10
۰/۶۹a	۲/۹۹a	۰/۲۴a	۲/۳۹	۹۵/۱۸	۴/۸۸	۰/۳۱a	۰/۸۹a	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۵۶a	II×B20
۰/۶۱b	۲/۶۲b	۰/۸۸b	۲/۴	۷۲/۷۸	۵/۵۸	۰/۴۹a	۱/۵۹a	۱/۸۸a	۲/۳۳a	۱/۱۹a	I2×B0
۰/۶۲ab	۲/۶۶ab	۰/۸۹ab	۲/۳۸	۷۶/۱۸	۵/۴ab	۰/۴۵a	۱/۵۸	۰/۹۸a	۲/۰۱ab	۰/۹۸a	I2×B5
۰/۶۲ab	۲/۷۴ab	۰/۲۸	۲/۳۴	۸۱/۸ab	۵/۲ab	۰/۳۹a	۱/۰۷a	۰/۸۱a	۱/۹۸ab	۰/۸۷ab	I2×B10
۰/۶۴a	۲/۷۹a	۰/۲۲a	۲/۳۱	۸۷/۹b	۵/۲b	۰/۳۸a	۰/۹۸a	۰/۶۲b	۱/۷۸b	۰/۷۵b	I2×B20
۰/۵۶a	۲/۵۱a	۰/۸۵a	۲/۳۱	۵۴/۲b	۱/۰۸a	۲/۹۶a	۴/۸۴a	۲/۷۵a	۴/۹۸a	۲/۷۴a	I3×B0
۰/۵۶a	۲/۵۳a	۰/۸۶a	۲/۳	۶۲/۳ab	۹/۷ab	۲/۴۵b	۳/۸۴a	۱/۵۵b	۴/۴۳a	۱/۹۷ab	I3×B5
۰/۵۷a	۲/۵۹a	۰/۸۶a	۲/۲۵	۶۸/۹a	۹/۴۲b	۱/۸۵c	۲/۹۲b	۱/۰۷b	۳/۴۲b	۱/۴۷b	I3×B10
۰/۵۹a	۲/۶۸a	۰/۸۶a	۲/۲۲	۷۱/۸a	۹/۴۵b	۱/۳۴d	۲/۸۲b	۰/۹۲b	۲/۸۹b	۱/۳۷b	I3×B20
۰/۵۳a	۲/۴۴a	۰/۱a	۲/۲۲	۴۹/۵c	۱۳/۸a	۲/۸۶a	۷/۸۴a	۴/۳۷a	۶/۸۸a	۲/۷۵a	I4×B0
۰/۵۳a	۲/۴۳a	۰/۸۱a	۲/۲۱	۵۲/۳bc	۱۳/۷a	۳/۰۷b	۶/۶۲b	۲/۸۳a	۶/۱۷b	۳/۰۱b	I4×B5
۰/۵۴a	۲/۴۴a	۰/۸۱a	۲/۸۸	۶۰/۸ab	۱۳/۸b	۲/۵b	۴/۳c	۳/۰۹b	۵/۲۴c	۲/۶۲bc	I4×B10
۰/۵۵a	۲/۵۱a	۰/۸۲a	۲/۸۵	۶۴/۷a	۱۲/۹b	۱/۶۳c	۳/۰۹c	۲/۹۲b	۵/۰۱c	۲/۳۴c	I4×B20
Mg ns	K ns	P ns	N ns	شاخص پایداری غشا *	پرولین *	کاتالاز *	پلی فنی اکسیداز *	پراکسیداز *	آسکوربات پراکسیداز *	سوپراکسید دیسمنتاز *	منابع تغییر
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	آبیاری
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	بیوجار
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	آبیاری×بیوجار
Mg ns	K ns	P ns	N ns	شاخص پایداری غشا ns	پرولین ns	کاتالاز ns	پلی فنی اکسیداز ns	پراکسیداز ns	آسکوربات پراکسیداز ns	سوپراکسید دیسمنتاز ns	دور آبیاری
*	*	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	I1
*	*	*	ns	*	*	ns	ns	*	*	*	I2
ns	ns	ns	ns	*	*	*	*	*	*	*	I3
ns	ns	ns	ns	**	*	*	*	*	**	**	I4

ns و ns* به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۵، ۱ درصد و عدم معنی داری است. اعدادی که در یک حرف کوچک مشترک میباشند از نظر آماری در سطح ۵ درصد آزمون LSD تفاوت معنی داری ندارند.

جدول ۵: مقایسه میانگین محتوی نسبی آب برگ، شاخص کلروفیل، آبسزیک اسید، تعداد دانه، راندمان مصرف آب و عملکرد دانه گیاه کدو در پاسخ به دوره‌های کم آبیاری و مقادیر بیوچار. (داده‌ها میانگین دوسال ۱۳۹۴-۱۳۹۵).

تیمار	محتوی نسبی آب برگ	شاخص محتوی کلروفیل	آبسزیک اسید ng g ⁻¹ FW	تعداد دانه	راندمان مصرف آب kg m ⁻³
I1×B0	۹۰b	۶۹/۸۷c	۹۸a	۲۴۵a	۰/۳b
I1×B5	۹۱ab	۷۰/۰۱c	۹۴a	۲۴۶a	۰/۳۲a
I1×B10	۹۵ab	۷۰/۸۵b	۸۵a	۲۴۹a	۰/۳۲a
I1×B20	۹۷a	۷۱/۹a	۷۹a	۲۵۰a	۰/۳۳a
I2×B0	۸۰b	۶۷/۰۹c	۱۷۹a	۲۲۸b	۰/۳۴b
I2×B5	۸۳ab	۶۷/۸۹b	۱۶۸ab	۲۳۰ab	۰/۳۵ab
I2×B10	۸۸ab	۶۸/۲۱b	۱۴۵b	۲۳۵ab	۰/۳۶a
I2×B20	۹۰a	۶۸/۷۹a	۱۲۰c	۲۳۸a	۰/۳۷a
I3×B0	۷۵c	۵۹/۹۷b	۲۳۵a	۱۶۹b	۰/۲۴b
I3×B5	۷۷bc	۶۰/۲۱b	۲۱۲ab	۱۷۵ab	۰/۲۶ab
I3×B10	۸۲ab	۶۰/۸۸a	۱۹۹bc	۱۸۰ab	۰/۲۷a
I3×B20	۸۴a	۶۱/۱۲a	۱۸۳c	۱۸۸a	۰/۲۸a
I4×B0	۶۵c	۵۴/۲۳c	۳۴۵a	۱۵۰a	۰/۲a
I4×B5	۷۳b	۵۴/۷۵b	۳۱۰ab	۱۵۲a	۰/۲۱a
I4×B10	۷۶ab	۵۵/۰۱ab	۲۷۸bc	۱۵۷a	۰/۲۲a
I4×B20	۷۹a	۵۵/۳۶a	۲۶۵c	۱۶۳a	۰/۲۲a

منابع تغییر	محتوی نسبی آب برگ	شاخص محتوی کلروفیل	آبسزیک اسید	تعداد دانه	راندمان مصرف آب	عملکرد دانه
آبیاری	**	*	*	*	**	**
بیوچار	*	ns	*	ns	**	*
آبیاری×بیوچار	*	*	*	*	**	**

برش دهی اثر متقابل: سطوح بیوچار در هر سطح کم آبیاری

دور آبیاری	محتوی نسبی آب برگ	شاخص محتوی کلروفیل	آبسزیک اسید	تعداد دانه	راندمان مصرف آب	عملکرد دانه
I1	*	*	ns	ns	*	*
I2	*	**	*	*	*	*
I3	**	*	*	*	*	*
I4	**	**	*	ns	ns	*

I1-I4 به ترتیب ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبت خاک؛ B0-B20 به ترتیب صفر، ۵، ۱۰ و ۲۰ تن بیوچار در هکتار. *، ** و ns به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۱، ۵ درصد و عدم معنی داری است. اعدادی که در یک حرف کوچک مشترک میباشند از نظر آماری در سطح ۵ درصد آزمون LSD تفاوت معنی داری ندارند.

افزایش یافت، اما افزودن بیوچار باعث کاهش مقدار ABA در تنش کم آبیاری در مقایسه با عدم کاربرد بیوچار B0 شد. حساسیت بالاتر هدایت روزنه‌ای به

جدول ۵، محتوای اسید آبسزیک ABA برگ کدو را تحت تأثیر آبیاری و بیوچار نشان می‌دهد. محتوای ABA برگ با افزایش کم آبیاری به‌طور معنی داری

تنش کم آبی با افزایش سطح ABA همراه است همانطور که در این تحقیق مشاهده شد که محتوای ABA برگ (جدول ۵) در تیمارهای کم آبیاری شدید، بالاتر بود. با این حال، هدایت روزنه‌ای و فتوسنتز خالص بالاتر و محتوای پایین تر ABA، در تیمارهای کاربرد بیوچار ممکن است به شرایط مطلوب آب خاک مرتبط باشد.

محتوای نسبی آب برگ RWC گیاه کدو به‌طور قابل ملاحظه‌ای با بیوچار و دور آبیاری تغییر کرد (جدول ۵). RWC به تدریج با کاهش آبیاری افت کرد (جدول ۵). با این حال، گیاهان تحت تیمار بیوچار، بدون در نظر گرفتن سطوح کم آبیاری، RWC بالاتر را حفظ کردند که با تیمار I1-B0 قابل قیاس بودند.

راندمان مصرف آب، WUE: راندمان مصرف آب تحت تأثیر تیمارها قرار گرفت (جدول ۵). نتایج نشان داده که بیشترین میزان بهره‌وری استفاده از آب در تیمار I2 کسب شد. راندمان مصرف آب از I1 به I2 افزایش یافت. اما از I3 به I4 به دلیل تاخیر در آبیاری راندمان مصرف آب کاهش نشان داد (جدول ۵). راندمان کمتر تیمار I1 در مقایسه با تیمار I2 ظاهراً مربوط به افزایش مقدار آب آبیاری در تیمار I1 است که باعث افزایش تبخیر و تعرق شد، اما راندمان مصرف آب را کاهش داد. راندمان پایین تر مصرف آب در ارتباط با مقدار بیشتر آب آبیاری می‌تواند به دلیل تلفات بیشتر آب توسط تبخیر و تعرق نسبت به افزایش تولید دانه باشد. کاهش راندمان مصرف آب با افزایش فواصل آبیاری بیش از تیمار I2 می‌تواند به دلیل کاهش عملکرد دانه با افزایش دوره تنش خشکی باشد.

عملکرد دانه: کاربرد بیوچار، دوره‌های آبیاری و اثر متقابل ارتباط آن‌ها اثر معنی‌داری بر عملکرد دانه

داشت (جدول ۵). عملکرد دانه به مقادیر مختلف کاربرد بیوچار به شکل منحنی پاسخ داد (شکل ۱). مدل خطی-فلاتی نشان داد که عملکرد دانه با افزایش میزان کاربرد بیوچار تا بیوچار آستانه $B_{critical}$ افزایش یافت (شکل ۱). فراتر از $B_{critical}$ ، پاسخ عملکرد به مقادیر کاربردی بیوچار به طور کلی متوقف شده و یا میزان افزایش عملکرد کاهش یافت. عرض از مبدا نمودار، حداقل عملکردی که در اکثر موارد اتفاق بدون کاربرد بیوچاری ایجاد می‌شود، نشان داد (جدول ۶). $B_{critica}$ منحنی، میزان کاربرد بیوچار را که حداکثر عملکرد دانه به دست می‌آید، تخمین زده، در حالی که فلات منحنی حداکثر عملکرد را برآورد کرده است (جدول ۶). تیمار I2، واکنش‌پذیرترین دور آبیاری به کاربرد بیوچار (بیشترین مقدار شیب خط، b) از نظر عملکرد دانه بود. پایین‌ترین و بیشترین $B_{critica}$ به ترتیب برای تیمارهای I4 و I2 بود (جدول ۶). مقادیر بیوچار توصیه شده، مختص هر مکان است و این تحت تاثیر شرایط محیطی است. بنابراین شناخت وضعیت فیزیکی خاک‌های کشاورزی، مواد اولیه بیوچار، روابط خاک-گیاه و نیازهای مختص هر گیاه زراعی به منظور بهینه‌سازی توصیه‌های بیوچار مورد نیاز است.

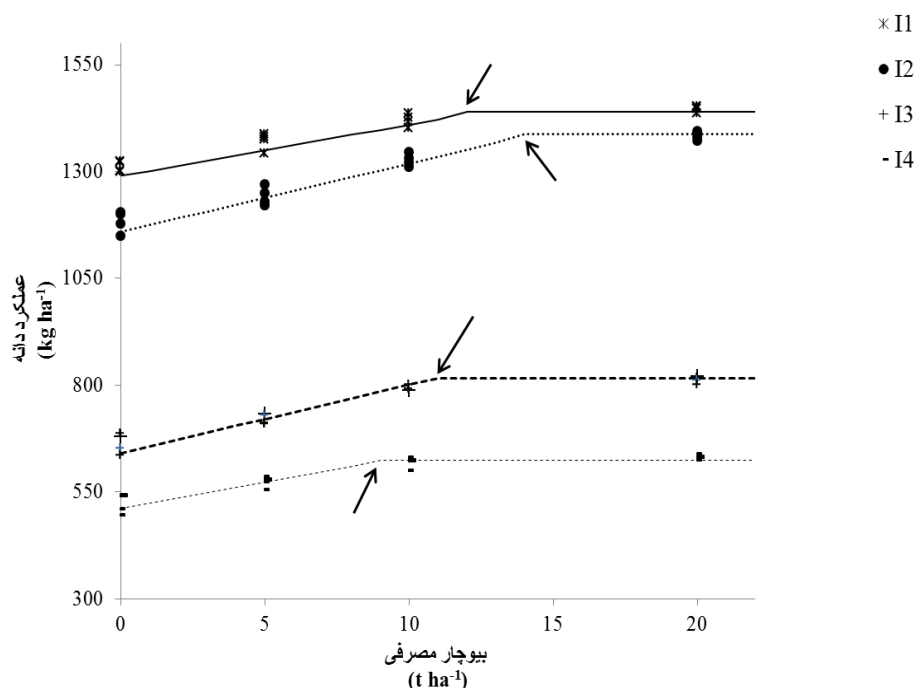
مدل سگمندی خطی-فلاتی نشان داد که کاهش عملکرد دانه از I1 تا I2 ناچیز بود، که این به علت اثر کم تنش رطوبت بین تیمارهای I1 و I2، می‌باشد (شکل ۱). با این حال، کاهش عملکرد دانه بعد از تیمار I2، یعنی تیمارهای I3 و I4 برجسته بود. این امر می‌تواند ناشی از این واقعیت باشد که سطح رطوبت خاک بعد از 60% MAD برای محدود کردن جذب آب توسط ریشه‌ها کافی است، بنابراین در تشکیل دانه‌ها تأثیر می‌گذارد. این روند در طول دو آزمایش مشابه بود.

جدول ۶: خلاصه رگرسیون عملکرد دانه در برابر مقادیر بکار رفته بیوچار با استفاده از مدل سگمتمی خطی-فلاتی، (داده‌ها میانگین دو سال ۱۳۹۴-۱۳۹۵).

R ²	بیوچار آستانه* t ha ⁻¹	شیب خط	عرض از مبدا kg ha ⁻¹	دور آبیاری
۰/۹۴	۱۲	۷/۹۲	۱۲۹۰	I1
۰/۹۵	۱۴	۹/۲۶	۱۱۵۹	I2
۰/۹۳	۱۰	۷/۲	۶۴۱	I3
۰/۹۷	۹	۵/۳	۵۱۳	I4

I1-I4 به ترتیب ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبت خاک؛

* مقدار بیوچار آستانه (نقطه شکست منحنی یا مقدار بیوچار بکار رفته است که در آن حالت فلات منحنی آغاز می‌شود).



شکل ۱: رگرسیون غیر خطی عملکرد دانه تولید شده در برابر دوره‌های مختلف کم آبیاری. پیکان‌ها، بیوچار آستانه (نقطه شکست منحنی یا مقدار بیوچار بکار رفته است که در آن حالت فلات منحنی آغاز می‌شود) را نشان می‌دهند، به جدول ۶ رجوع شود؛ I1-I4 به ترتیب ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبت خاک (داده‌ها میانگین دو سال ۱۳۹۴-۱۳۹۵).

طور قابل توجهی میزان تثبیت CO₂ در کدو را کاهش می‌دهد. کاهش فتوسنتز خالص در واکنش به تنش خشکی برای گونه‌های مختلف گیاهی گزارش شده است (Afshar et al. 2016; Akhtar et al., 2014) که عمدتاً به محدودیت‌های روزنه‌ای و غیر روزنه‌ای مربوط می‌شود (Alvarez and Sanchez-Blanco

بحث در مطالعات اندکی واکنش‌های فیزیولوژیکی گیاهان به کاربرد بیوچار گزارش شده است (Kammann et al., 2011). کاهش منابع آب، فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه را آسیب می‌رساند و این باعث کاهش شدید عملکرد می‌شود. تنش خشکی به

سنتز پلی فنول، گیاهان را از بازدارندگی نوری محافظت می کند.

در تحقیق حاضر، کاهش آبیاری همچنین فتوسنتز خالص، تعرق و هدایت روزنه‌ای را در تمام تیمارهای کاربرد بیوچار و عدم کاربرد کاهش داد. با این حال، گیاهان تحت تیمار کاربرد بیوچار به طور معنی داری فتوسنتز خالص، تعرق و هدایت روزنه‌ای بالاتری از گیاهان بدون کاربرد بیوچار در سطوح مختلف آبیاری نشان دادند (جدول ۳). مطالعات نشان داده است که در طول تنش غیر زیستی، گیاهان تحت تیمار بیوچار اغلب میزان تبادل گازی بیشتری نسبت به گیاهان بدون بیوچار دارند (Kammann et al., 2011). این اثرات مثبت نیز ممکن است به احتمال زیاد از طریق افزایش تثبیت دی اکسید کربن در تنش خشکی منجر به افزایش رشد گیاهان با تیمار کاربرد بیوچار شود. مقادیر بالاتر فعالیت فتوسنتزی در گیاهان همراه با بیوچار نشان می دهد که دستگاه‌های فتوسنتزی این گیاهان کمتر تحت آسیب تنش خشکی قرار می گیرند (Kammann et al., 2011).

نتایج نشان داد که خشکی منجر به تنش اکسیداتیو در برگهای کدو شد که با افزایش سطوح مالون دی آلدئید، رادیکال‌های آزاد اکسیژن و پراکسید هیدروژن نشان داده شد. در تیمار I4، فعالیت آنتی اکسیدانی، غلظت‌های مالون دی آلدئید، رادیکال‌های آزاد اکسیژن، پراکسید هیدروژن و اسمولیت افزایش می یابد. تنش‌های زیستی و غیرزیستی می تواند باعث تشکیل و انباشت گونه‌های واکنش پذیر اکسیژن ROS، از جمله مالون دی آلدئید، رادیکال‌های آزاد اکسیژن و پراکسید هیدروژن می شود، که معمولاً از چند مسیر متابولیکی ایجاد می شود (Kanazawa et al., 2000). ROS بر روی بسیاری از عملکردهای سلولی با آسیب رساندن به اسیدهای نوکلئیک، اکسیداسیون پروتئین‌ها

(2013). گیاهانی که با تنش خشکی روبرو می شوند، قابلیت هدایت روزنه را کاهش می دهند تا مانع از تلفات اساسی رطوبت از طریق تعرق شوند که در نتیجه فتوسنتز خالص را محدود می کند و این واکنش ممکن است منجر به بهبود راندمان مصرف آب شود (Nar et al., 2009). در این تحقیق، در تیمار I2، مقادیر هدایت روزنه‌ای حدود ۰/۰۹ مول آب بر مترمربع در ثانیه بود، که به نظر می رسد به اندازه کافی برای محدود کردن تعرق، بالا بود، در حالی که سطح رضایتبخشی از CO₂ داخلی را تامین می کند؛ که میزان فتوسنتز در سطحی قابل قبول باشد. محققین گزارش دادند که کارآمدترین مقادیر هدایت روزنه‌ای نزدیک به ۱۰۰ میلی مول بر مترمربع در ثانیه است، زیرا مقادیر بالاتر، افزایش قابل توجهی در فتوسنتز خالص نشان ندادند و به طور فزاینده‌ای کمتر کارآمد هستند (Alvarez and Sanchez-Blanco 2013). از سوی دیگر، اگر گیاهان هدایت روزنه‌ای کمتر از ۱۰۰ میلی مول بر مترمربع در ثانیه را برای مدت زمان طولانی داشته باشند، محدودیت‌های غیر روزنه‌ای می تواند تا حدی مسئول کاهش فتوسنتز خالص باشد. ظاهراً در سطح ملایم تنش خشکی، تیمار I2، کاهش فتوسنتز خالص در برگ‌های کدو به محدودیت روزنه مرتبط است. همانطور که کمبود آب تشدید می شود، محدودیت‌های غیر روزنه‌ای، مانند محدودیت‌های بیوشیمیایی نیز ممکن است در کاهش فتوسنتز خالص سهمیم باشند. در یک تحقیق مزرعه‌ای، افزایش قابل توجهی در ترکیبات پلی فنولیکی گیاه ماریتیغال (*Silybum marianum*) تحت کم آبیاری مشاهده شد (Afshar et al., 2016) و آنها فرض کردند که چنین افزایشی در پلی فنل‌ها سبب بسته شدن روزنه، که باعث کاهش غلظت دی اکسید کربن داخل برگ و در نتیجه محدودیت فعالیت فتوسنتزی می گردد. افزایش

بالای PPO تحت تنش نشان می‌دهد که توانایی برای اکسیداسیون و تخریب مواد سمی مانند ترکیبات فنلی دارد که به طور کلی انباشت آن در طول تنش خشکی گزارش شده است (Singh et al., 2010).

نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که محتوای پرولین در گیاهان تحت تنش خشکی بیشتر از گیاهان تحت دور آبیاری نرمال، تیمار II، است. تعدیل اسمزی یک سازوکار مهم است که گیاهان را قادر به تحمل تنش خشکی می‌کند (Kiani et al., 2007). پرولین آزاد پیشنهاد شده است که به عنوان یک محافظ اسمزی، یک پایدار کننده پروتئینی، یک کلات فلزی، مهار کننده پراکسیداسیون لیپید، و دفع کننده OH^- و $\text{O}_2^{\bullet-}$ عمل می‌کند (Trovato et al., 2008). تنش محرک تجمع اسمولیت دارای دو پاسخ فیزیولوژیکی ممکن است: ۱- برای کاهش پتانسیل اسمزی سلول و ۲- برای تثبیت غشاء و یا ساختار ماکرومولکولی (Buchanan et al., 2000). نفوذ پذیری غشا معمولاً به عنوان نشانه الکترولیتی ارزیابی می‌شود که یک شاخص کلیدی برای یکپارچگی غشا در گیاهان تحت شرایط تنش است (Datta and Kulkarni, 2014). هنگامی که کم آبیاری تشدید می‌شود، شاخص پایداری غشا در برگ کدو روند رو به کاهشی را دنبال می‌کند. فرض شده است که در شرایط تنش خشکی، با توجه به پراکسیداسیون لیپید غشاء و تشکیل ترکیبات خاص مانند مالون‌دی‌آلدئید و اتیلن، پایداری غشاء اغلب کاهش می‌یابد (Liu and Huang 2000).

در این تحقیق، استفاده از بیوجار باعث کاهش غلظت مالون‌دی‌آلدئید، رادیکال‌های آزاد اکسیژن و پراکسید هیدروژن در برگ تحت تنش خشکی شد. مطالعات نشان داده است که کاربرد بیوجار در خاک می‌تواند با بهبود خواص شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی خاک باعث افزایش کارایی گیاهان شود

و ایجاد پراکسیداسیون لیپید، تاثیر می‌گذارد (Foyer and Noctor, 2005). اکسیژن یکتایی^۱، $\text{O}_2^{\bullet-}$ اولین حالت الکترونیکی برانگیخته O_2 است، و یک ROS غیر عادی است، زیرا با انتقال الکترون به O_2 ارتباطی ندارد. افزایش تولید پراکسید هیدروژن در گیاهان اغلب در پاسخ به تحریکات تنش مشاهده می‌شود پراکسیداسیون لیپیدها به عنوان یکی از مخرب‌ترین فرآیندهای شناخته شده که در هر موجود زنده رخ می‌دهد، شناخته می‌شود. آسیب غشایی گاهی به عنوان یک پارامتر تنها برای تعیین سطح تخریب چربی‌ها تحت تنش‌های مختلف در نظر گرفته می‌شود. پراکسیداسیون لیپید زمانی اتفاق می‌افتد که سطوح بالای ROS ایجاد شود، بنابراین نه تنها به طور مستقیم بر عملکرد نرمال سلولی تاثیر می‌گذارد، بلکه همچنین باعث تشدید تنش اکسایشی از طریق تولید رادیکال‌های حاصل از لیپیدها می‌شود (Montillet et al., 2005). در مقابل، سیستم آنتی‌اکسیدانی آنزیمی که حاوی بسیاری از مواد رابنده^۲ مانند CAT، APX، POD و SOD است، آنزیم‌های کلیدی برای ربایش ROS در گیاهان هستند. SOD با کاتالیز دیسموتاسیون $\text{O}_2^{\bullet-}$ باعث از بین بردن آن می‌شود، و با احیاء $\text{O}_2^{\bullet-}$ به پراکسید هیدروژن تبدیل می‌شود. CAT یک آنزیم دارای ۴ گروه هم^۳ که پتانسیل تبدیل مستقیم پراکسید هیدروژن به آب و اکسیژن را دارد و برای سم زدایی ROS در شرایط تنش ضروری است (Garg and Manchanda, 2009). به نظر می‌رسد که APX نقش حیاتی در دفع ROS، به ویژه پراکسید هیدروژن و محافظت از سلول‌ها در گیاهان عالی داشته باشد. POD عمدتاً در فضای آپوپلاستیک و واکوئل قرار دارد و نقش مهمی در کاتالیزوری پراکسید هیدروژن به آب و اکسیژن دارد (Gratao et al., 2005). فعالیت

- 1- Singlet Oxygen
- 2- Scavenger
- 3- Heme

مالون‌دی‌آلدئید، رادیکال‌های آزاد اکسیژن و پراکسید هیدروژن در تیمار II مشاهده نشد.

با توجه به نتایج، واضح است که کاربرد بیوچار جذب مواد مغذی در برگ را بیش از تیمار کنترل افزایش داد. این امر می‌تواند به ظرفیت تبادل کاتیونی بالای بیوچار مربوط باشد (Lehmann et al., 2011). با توجه به تخلخل بالا و نسبت سطح/حجم بالا، می‌تواند جذب مواد مغذی گیاهی و در دسترس بودن آن در خاک را بهبود بخشد (Chan et al., 2008). ممکن است دو دلیل برای کاهش N تحت تیمار بیوچار وجود داشته باشد. اول، ممکن است به جذب NH_4^+ بر روی سطح بیوچار نسبت داده شود (Lehmann et al., 2011) که ممکن است منجر به کاهش قابلیت دسترسی N برای گیاه شود، همانطور که در این تحقیق مشاهده شد. کاهش محتوای N برگ در گیاه تیمار شده با بیوچار مطابق با نظر سایر محققین بود (Kammann et al., 2011). دوم اینکه ممکن است به علت افزایش نسبت کربن به نیتروژن خاک با افزودن بیوچار، سبب عدم تحرک N خاک و در نتیجه باعث کاهش جذب N توسط گیاهان شود. با وجود کاهش محتوای N برگ، عملکرد دانه تحت تاثیر منفی قرار نگرفت که ممکن است به دلیل افزایش جذب آب و بهبود فیزیولوژی گیاه با افزودن بیوچار باشد.

کاهش محتوای کلروفیل به عنوان نشانه‌ای از تنش خشکی در گیاهان محصولات مختلف از قبیل ماریتیغال (Afshar et al., 2016) و آفتابگردان (Ghobadi et al., 2013) گزارش شده است، که به علت جلوگیری از سنتز کلروفیل و یا تشدید تجزیه کلروفیل می‌باشد که در نهایت منجر به جذب نور کمتر در شرایط تنش خشکی می‌شود. کاربرد بیوچار باعث افزایش محتوای کلروفیل، به دلیل تاثیر مستقیم

(Asai et al., 2009). اثرات سودمند کاربرد بیوچار باعث کاهش غلظت مالون‌دی‌آلدئید، رادیکال‌های آزاد اکسیژن و پراکسید هیدروژن شده و منجر به افزایش وزن خشک ساقه و ریشه کدو در گیاهان تحت تنش خشکی گردید (داده‌ها نشان داده نشده). این پاسخ‌های مطلوب به بیوچار در تیمارهای B10 و B20 نسبت به B5 بیشتر بود. Akhtar و همکاران (۲۰۱۴) گزارش دادند که بیوچار کاملاً پایدار در خاک همچنین می‌تواند اثرات تنش خشکی را کاهش دهد. تعادل بین تولید و تخریب ROS برای حفظ عملکرد متابولیسم سلولی در شرایط تنش لازم است، بنابراین آسیب‌های اکسایشی به حداقل می‌رسند. سیستم آنتی‌اکسیدان می‌تواند سطح ROS را در بافت‌های گیاهی را کنترل کند (Schutzendubel and Polle, 2002). بر اساس اطلاعات این تحقیق، گیاهان در خاک‌های تیمار شده با بیوچار، به خصوص در تیمارهای B10 و B20، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شامل CAT، POD، APX و SOD در شرایط تنش خشکی کاهش یافت. افزودن بیوچار به طور قابل توجهی کاهش وزن خشک ساقه در تیمار I2 را خنثی کرد (داده‌ها نشان داده نشد). همچنین کاربرد بیوچار باعث کاهش رادیکال آزاد اکسیژن و پراکسید هیدروژن و جلوگیری از پراکسیداسیون لیپیدها در سلول‌های گیاهی شد. در واقع، بیوچار سطح رادیکال آزاد اکسیژن و پراکسید هیدروژن را به عنوان ROS در برگ کدو تحت تیمار کم آبیاری کاهش داد که این باعث کاهش فعالیت برخی از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شد. به عبارت دیگر، کاهش اثرات تنش خشکی با افزودن بیوچار به خاک، باعث کاهش سطح رادیکال آزاد اکسیژن و پراکسید هیدروژن شد که منجر به کاهش فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی می‌شود. جالب است که در برگ کدو، اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای بیوچار با توجه به فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی، پرولین، غلظت

آن در جذب Mg می باشد که جزء مهمی از رنگدانه کلروفیل است (Abeer et al., 2015).

به خوبی درک می شود که وضعیت آب برگ همیشه با هدایت روزنه ای در تعامل است و همبستگی خوبی بین پتانسیل آب برگ و هدایت روزنه ای همیشه حتی در شرایط تنش خشکی وجود دارد. نشان داده شده است که کاهش RWC باعث بسته شدن روزنه و به دنبال آن محدود کردن میزان فتوسنتز می شود (Lawlor, 2002). نتیجه تحقیق حاضر نشان داد که اضافه کردن بیوچار به خاک باعث افزایش مقدار آب خاک در سطوح کم آبیاری می شود. این با یافته های سایر محققین سازگار است، آنها گزارش کردند که ظرفیت نگهداری آب به دلیل ظرفیت جذب بالا و ساختار متخلخل بیوچار است. علاوه بر این، کاربرد بیوچار به طور قابل توجهی وضعیت آب گیاه را افزایش می دهد، همان طور که با بهبود RWC و WUE نشان داده شده است.

در یک سطح خاص از آبیاری، تبخیر و تعرق بیشتر در پلات های تحت تیمار بیوچار اساساً مربوط به تحریک رشد گیاه و افزایش شاخص سطح برگ و ماده خشک با جذب بیشتر اشعه خورشیدی (Mandal and Sinha, 2004)، و همچنین افزایش بیوماس، طول و حجم ریشه بود. بنابراین، استفاده از مواد مغذی بر راندمان مصرف آب تاثیر مثبت دارد. افزایش بیشتر عملکرد دانه در تیمارهای B5، B10 و B20 نسبت به B0 و به نسبت افزایش کمتر در تبخیر و تعرق مربوط به هر سطح بیوچار، به وضوح موجب افزایش راندمان مصرف آب با تیمار I2، به ویژه در تیمار B20 شد.

تنش آب معمولاً باعث کاهش رشد، سطح برگ، تسریع در رسیدگی و کاهش تعداد دانه می شود (Yavuz et al., 2015)، بنابراین عملکرد دانه کاهش می یابد. داده های حاصل از این تحقیق مطابق با داده های Ghanbari و همکاران (۲۰۱۷) است که اعلام

کردند افزایش فواصل زمانی آبیاری به طور معنی داری کاهش تعداد دانه در هر میوه و در نتیجه کاهش عملکرد دانه در واحد سطح را در پی دارد. اغلب پیشنهاد می شود که کاربرد بیوچار در خاک می تواند بهره وری کشاورزی را افزایش دهد. با توجه به مقدار بیوچار افزوده شده، بهبود قابل ملاحظه در بهره وری گیاهان بین ۲۰ تا ۲۲۰ درصد بدست آمد (Major et al., 2010). همانند این تحقیق، افزایش منابع غذایی گیاهی مانند K و P (Vaccari et al., 2011). از طریق افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و نسبت کربن اکسیژن و بهبود وضعیت آبی گیاه (Lehmann et al., 2011)، گزارش کردند که منجر به پایداری نسبی عملکرد تحت تنش کم آبیاری ملایم، تیمار I2، پس از کاربرد بیوچار شد. بیوچار ممکن است به عنوان کودی که آهسته عناصر غذایی را آزاد می کند، عمل کرده که موجب بهبود کارایی مصرف عناصر غذایی و بهبود عملکرد اقتصادی می شود (Major et al., 2010). افزایش عملکرد دانه و کاهش میزان کاه در تیمارهای کاربرد بیوچار نسبت به عدم کاربرد آن، ممکن است به دلیل توزیع بهتر و جابجایی کل ترکیبات فتوسنتزی موجود به سمت عملکرد اقتصادی باشد (Shaleh et al., 2011). در اینجا نشان داده شد که اثربخشی تیمار I2 با افزودن بیوچار بیشتر شده است. بر این اساس، افزایش راندمان مصرف آب با افزودن بیوچار نیز از جمله مواردی است که توسط سایر محققین گزارش شده است (Kammann et al., 2011). از این رو، هر دو فرضیه این تحقیق در ارتباط با بهبود عملکرد و وضعیت آبی گیاه در گیاهان کدو تحت کاربرد بیوچار، به واقعیت رسید.

نتیجه گیری نهایی

نتایج تحقیق به وضوح نشان داد که اضافه کردن بیوچار به خاک تحت کم آبیاری، بر فیزیولوژی و

بهره‌وری گیاه کدو باشد. در نهایت، استفاده از بیوچار سبب افزایش عملکرد دانه و راندمان مصرف آب شد. با این وجود، مطالعات اضافی برای روشن شدن اثرات افزودن انواع مختلف بیوچار به انواع مختلف خاک بر روی وضعیت رطوبت خاک و میزان آب موجود در گیاه در حضور دوره‌های مختلف آبیاری مورد نیاز است.

عملکرد کدو موثر است. علاوه بر این، تحت تنش کم آبیاری ملایم، تیمار I2 و با کاربرد بیوچار، عملکرد گیاهان به میزان قابل توجهی بالاتر از گیاهان تحت تیمار I3 و I4 بود که با تیمار I1 قابل قیاس است. بنابراین، در محدودیت منابع آبی، استفاده از تیمار I2 در ترکیب با بیوچار ممکن است یک روش امیدوار کننده برای صرفه جویی در مصرف آب و افزایش

References

- Abbas, T., Rizwan, M., Ali, S., Rehman, M.Z., Qayyum, M.F., Abbas, F., Hannan, F., Rinklebe, J. and Ok, Y.S. (2017). Effect of biochar on cadmium bioavailability and uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in a soil with aged contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 140:37-47.
- Abeer, H., Abd Allah, E.F., Alqarawi, A.A. and Egamberdieva, D. (2015). Induction of salt stress tolerance in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) by arbuscular mycorrhizal fungi. *Legume Research*. 38:579-88.
- Afshara, R.K., Hashemi, M., DaCosta, M., Spargo, J. and Sadeghpour, A. (2016). Biochar Application and Drought Stress Effects on Physiological Characteristics of *Silybum marianum*. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*. 47(6):743-752.
- Akhtar, S., Li, G., Andersen, M.N. and Liu, F. (2014). Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation. *Agricultural Water Management*. 138:37-44.
- Alvarez, S. and Sanchez-Blanco, M.J. (2013). Changes in growth rate, root morphology and water use efficiency of potted *Callistemon citrinus* plants in response to different levels of water deficit. *Scientia Horticulture*. 156:54-62.
- Asch, F. (2000). Determination of abscisic acid by indirect enzyme linked immunosorbent assay (ELISA). Technical Report. Laboratory for Agrohydrology and Bioclimatology, Department of Agricultural Sciences, the Royal Veterinary and Agricultural University, Taastrup, Denmark.
- Asai, H., Samson, B.K., Stephan, H.M., Songyikhangsuthor, K., Homma, K., Kiyono, Y., Inoue, Y., Shiraiwa, T. and Horie, T. (2009). Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. *Field Crops Research*. 111: 81-84.
- Bamminger, C., Poll, C., Sixt, C., Högy, P., Wüst, D., Kandeler, E. and Marhan, S. (2016). Short-term response of soil microorganisms to biochar addition in a temperate agroecosystem under soil warming. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 233:308-317.
- Bates, L. S., Waldren, R.P. and Teare, I.D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*. 39:205-07.
- Bremner, J.M. and Mulvaney, C.S. (1982). Nitrogen-total. In: A.L. Page, R.H. Miller, and D.R. Keeney (eds.) *Methods of soil analysis*. Part 2. Chemical and microbiological properties. 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA. pp. 595- 624.
- Buchanan, B.B., Gruissem, W. and Jones, R.L. (2000). *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*. American Society of plant physiologists, Rockville.
- Chan, K.Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A. and Joseph, S. (2008). Using poultry litter biochars as soil amendments. *Australian Journal of Soil Research*. 46:437-444.
- Datta, P. and Kulkarni, M. (2014). Arbuscular mycorrhizal colonization improves growth and biochemical profile in *Acacia Arabica* under salt stress. *Journal of Bioscience and Biotechnology*. 3:235-45.

- De Carvalho, M.H.C. (2008).** Drought stress and reactive oxygen species: production, scavenging and signaling. *Plant Signaling and Behavior*. 3:156–165.
- Foyer, C.H. and Noctor, G. (2005).** Redox homeostasis and antioxidant signaling: a metabolic interface between stress perception and physiological responses. *Plant Cell*. 17:1866–1875.
- Garg, N. and Manchanda, G. (2009).** ROS generation in plants: boon or bane? *Plant Biosystems*. 143:88–96.
- Ghanbari, A., Nadjafi, F. and Shabahang, J. (2007).** Effects of irrigation regimes and row arrangement on yield, yield components and seed quality of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). *Asian Journal of Plant Sciences*. 6:1072–1079.
- Ghobadi, M., Taherabadi, S., Ghobadi, M.F., Mohammadi, G.R. Jalali-Honarmand, S. (2013).** Antioxidant capacity, photosynthetic characteristics and water relations of sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars in response to drought stress. *Industrial Crops and Products*. 50:29–38.
- Gratao, P.L., Polle, A., Lea, P.J. and Azevedo, R.A. (2005).** Making the life of heavy metal stressed plants a little easier. *Functional Plant Biology*. 32:481–494.
- Hossen, S.H., Yosef Zade, S., Yrytsayan, S. and Hemmati, K. (2016).** Growth analysis and qualitative traits pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) affected by application of chemical and organic fertilizers. *Journal of Plant Production Research*. 23(1):131-155. (in Persian).
- Janero, D.R. (1990).** Malondialdehyde and thiobarbituric acid-reactivity as diagnostic indices of lipid peroxidation and peroxidative tissue injury. *Free Radical Biology and Medicine*. 9:515–540.
- Kammann, C.I., Sebastian, L., Johannes, W.G. and Hans-Werner, K. (2011).** Influence of biochar on drought tolerance of *Chenopodium quinoa* Willd and on soil-plant relations. *Plant Soil*. 345:195–210.
- Kanazawa, S., Sano, S., Koshihara, T. and Ushimaru, T. (2000).** Changes in antioxidative enzymes in cucumber cotyledons during natural senescence: comparison with those during dark-induced senescence. *Physiologia Plantarum*. 109:211–216.
- Kiani, S.P., Grieu, P., Maury, P., Hewezi, T., Gentzbittel, L. and Sarrafi, A. (2007).** Genetic variability for physiological traits under drought conditions and differential expression of water stress-associated genes in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Theoretical and Applied Genetics*. 114:193–207.
- Kim, H.S., Kim, K.R., Yang, J.E., Ok, Y.S., Owens, G., Nehls, T., Wessolek, G. and Kim, K.H. (2016).** Effect of biochar on reclaimed tidal land soil properties and maize (*Zea mays* L.) response. *Chemosphere*. 142:153–159.
- Kumar, K.B. and Khan, P.A. (1982).** Peroxidase and polyphenol oxidase in excised ragi (*Eleusine corocana* cv PR 202) leaves during senescence. *Indian Journal of Experimental Biology*. 20:412–416.
- Lawlor, D. W. (2002).** Limitation to photosynthesis in water stressed leaves: Stomata vs. metabolism and the role of ATP. *Annals of Botany*. 89:871–85.
- Lehmann, J., Rillig, M.C., Thies, J., Masiello, C.A., Hockaday, W.C. and Crowley, D. (2011).** Biochar effects on soil biota—a review. *Soil Biology and Biochemistry*. 43:1812–1836.
- Li, S.X., Wang, Z.H., Li, S.Q., Gao, Y.J. and Tian, X.H. (2013).** Effect of plastic sheet mulch, wheat straw mulch, and maize growth on water loss by evaporation in dryland areas of China. *Agricultural Water Management*. 116:39–49.
- Lim, T.J., Spokas, K.A., Feyereisen, G. and Novak, J.M. (2016).** Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. *Chemosphere*. 142:136–144.
- Liu, X. and Huang, B. (2000).** Heat stress injury in relation to membrane lipid peroxidation in creeping bentgrass. *Crop Science*. 40:503–10.
- Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S. J. and Lehmann, J. (2010).** Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant Soil*. 333:117–128.

- Mandal, K.G. and Sinha, A.C. (2004).** Nutrient management effects on light interception, photosynthesis, growth, dry-matter production and yield of Indian mustard (*Brassica juncea*). *Journal of Agronomy and Crop Science*. 190:119–129.
- Montillet, J.L., Chamnongpol, S., Rustérucci, C., Dat, J., Van de Cotte, B., Agnel, J.P., Battesti, C., Inzé, D., Van Breusegem, F. and Triantaphylides, C. (2005).** Fatty acid hydroperoxides and H₂O₂ in the execution of hypersensitive cell death in tobacco leaves. *Plant Physiology*. 138:1516–1526.
- Mwaura, M.M., Isutsa, D.K., Ogweno, J.O. and Kasina, M. (2014).** Interactive effects of irrigation rate and leaf harvest intensity on edible leaf and fruit yields of multipurpose pumpkin. *International Journal of Science and Nature*. 5:199–204.
- Nakano, Y. and Asada, K. (1981).** Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and Cell Physiology*. 22:867–880.
- Nar, H., Saglam, A., Terzi, R., Varkonyi, Z. and Kadioglu, A. (2009).** Leaf rolling and photosystem II efficiency in *Ctenanthe setosa* exposed to drought stress. *Photosynthetica*, 47:429–36.
- Olsen, S.R. and Sommers, L.E. (1982).** Phosphorus. In: A.L. Page, R.H. Miller, and D.R. Keeney (eds.). *Methods of soil analysis*. Part 2. Chemical and microbiological properties. 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA. pp. 403-30.
- Omran, R.G. (1980).** Peroxide levels and the activities of catalase, peroxidase, and indoleacetic acid oxidase during and after chilling cucumber seedlings. *Plant Physiology*. 65:407–408.
- Panda, R.K., Behera, S.K. and Kashyap, P.S. (2004).** Effective management of irrigation water for maize under stressed conditions. *Agricultural Water Management*. 66:181–203.
- Premchandra, G.S., Saneoka, H. and Ogata, S. (1990).** Cell membrane stability, an indicator of drought tolerance as affected by applied nitrogen in soybean. *The Journal of Agricultural Science*. 115:63–66.
- Sairam, R.K. (1994).** Effect of moisture stress on physiological activities of two contrasting wheat genotypes. *Indian Journal of Experimental Biology*. 32:594–597.
- SAS Institute. (1999).** SAS Online Doc. v. 8, SAS Institute, Cary, NC.
- Schutzendubel, A. and Polle, A. (2002).** Plant responses to abiotic stresses: heavy metal induced oxidative stress and protection by mycorrhization. *Journal of Experimental Botany*. 53:1351–1365.
- Shaleh, S.A., Ahmed, M.A., Al-Kordy, M.A. and Shalaby, M.A.F. (2011).** Genetic analysis of energy production in yellow maize hybrids cultivated in newly cultivated sandy land. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 5:104–114.
- Siddiqui, M.H., Al-Khaishany, M.Y., Al-Qutami, M.A., Al-Whaibi, M.H., Grover, A., Ali, H.M., Al-Wahibi, M.S. and Bukhari, N.A. (2015).** Response of different genotypes of faba bean plant to drought stress. *International Journal of Molecular Sciences*. 16:10214–10227.
- Singh, B.K., Sharma, S.R. and Singh, B. (2010). Antioxidant enzymes in cabbage: variability and inheritance of superoxide dismutase, peroxidase and catalase. *Scientia Horticulturae*. 124:9–13.
- Smart, R.E. (1974).** Rapid estimate of relative water content. *Plant Physiology*. 53:258–260.
- Soltani, A. (2005).** Re-consideration of application of statical methods in agricultural researches. *Jahad Daneshgahi of Mashhad Press*.
- Soltani, A., Robertson, M.J., Mohammad-Nejad, Y. and Rahemi-Karizaki, A. (2006).** Modeling chickpea growth and development: leaf production and senescence. *Field Crop Research*. 99:14–23.
- Trovato, M., Mattioli, R. and Costantino, P. (2008).** Multiple roles of proline in plant stress tolerance and development. *Rendiconti Lincei*. 19:325–346.
- Vaccari, F.P., Baronti, S., Lugato, E., Genesio, L., Castaldi, S., Fornasier, F. and Miglietta, F. (2011).** Biochar as a

strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat. *European Journal of Agronomy*. 34:231–238.

Velikova, V., Yordanov, I. and Edreva, A. (2000). Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants: protective role of exogenous polyamines. *Plant Science*. 151:59–66.

Wang, S.Y. and Jiao, H. (2000). Scavenging capacity of berry crops on superoxide radicals, hydrogen peroxide, hydroxyl radicals, and singlet oxygen. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 48:5677–5684.

Yavuz, D., Seymen, M., Yavuz, N. and Türkmen, Ö. (2015). Effects of irrigation interval and quantity on the yield and quality of confectionary pumpkin grown under field conditions. *Agricultural Water Management*. 159:290-298.

Zhang, Y.Q., Kendy, E., Yu, Q., Liu, C.M., Shen, Y.J. and Sun, H.Y. (2004). Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China Plain. *Agricultural Water Management*. 64:107–122.