

کارایی مصرف آب گندم تحت شرایط تنش همزمان شوری و رطوبتی با کاربرد بایوچار برگ خرما^۱

مهرداد نوروزی^{۱*}، سیدحسین طباطبایی^۲ و محمدرضا نوری^۲

^{۱*} بخش تحقیقات خاک و آب؛ مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان بوشهر؛ سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی؛ بوشهر؛

ایران

^{**} نویسنده مسئول مکاتبات: nowroozi50@yahoo.com

^۲ دانشیار گروه مهندسی آب؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه شهرکرد؛ شهرکرد؛ ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۲۱

چکیده

به منظور بررسی اثر بایوچار برگ خرما بر کارایی مصرف آب و برخی مؤلفه‌های عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.) تحت تنش‌های توأم رطوبتی و شوری، آزمایش گلدانی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار و طی یک فصل زراعی (۹۵-۱۳۹۴) در مرکز تحقیقات کشاورزی استان بوشهر انجام گرفت. تیمارها شامل بایوچار برگ خرما (صفر و ۳ درصد وزنی)، فاصله آبیاری (۳، ۷ و ۱۲ روز) و شوری آب (۱/۱، ۳/۸، ۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) بودند. نتایج نشان داد که اثرات بایوچار برگ کارایی مصرف آب و عملکرد گندم تحت تنش‌های توأم رطوبتی و شوری معنی‌دار ($P < 0.05$) بود. مقادیر عملکرد دانه، وزن خشک ساقه و وزن خشک ریشه به ترتیب ۲۲، ۳۸ و ۲۰ درصد افزایش داشت. مقادیر تبخیر و تعرق، کارایی مصرف آب و رطوبت وزنی خاک قبل از آبیاری به ترتیب ۱۸/۶، ۸/۷ و ۲۳ درصد افزایش داشت. مقادیر پاسخ عملکردی گیاه به تنش رطوبتی (K_p) برای عملکرد دانه، وزن خشک ساقه و وزن خشک ریشه به‌طور قابل توجهی کاهش داشت که بیانگر کاهش حساسیت گیاه به تنش رطوبتی می‌باشد. در اثر کاربرد بایوچار، مقادیر شیب کاهش عملکرد و حد آستانه تحمل به شوری برای عملکرد دانه، وزن خشک ساقه و وزن خشک ریشه کاهش داشت که بیانگر نقش بایوچار در افزایش مقاومت گیاه به تنش شوری می‌باشد. بنابراین، می‌توان بایوچار برگ خرما را یک اصلاح‌کننده مؤثر برای افزایش تولید کشاورزی و بهره‌وری مصرف آب قلمداد نمود. با این وجود، مطالعات بیش‌تری در شرایط مزرعه و خارج از گلدان توصیه می‌شود.

کلید واژه‌ها: بایوچار؛ تنش شوری؛ تنش رطوبتی؛ روابط عملکرد-شوری

مقدمه

شوری نیز از طریق کاهش پتانسیل اسمزی، بروز سمیت یون‌های ویژه (مانند Cl^- ، Na^+ و B) در گیاه و ایجاد اختلال در جذب و انتقال عناصر غذایی و تعادل تغذیه‌ای رشد و عملکرد گیاه را محدود می‌کند (سرائی تیریزی و همکاران، ۱۳۹۴). روش‌های متعددی برای کاهش اثرات منفی تنش‌های شوری و رطوبتی بر رشد و عملکرد گیاه گزارش شده است که در این میان می‌توان به کاربرد افزودنی‌های خاک مانند کود حیوانی و مواد آلی اشاره کرد

کاهش عملکرد گیاهان در اثر تنش رطوبتی که به شدت، مدت و زمان آن بستگی دارد در بسیاری از پژوهش‌ها گزارش شده (Farooq et al., 2009) و تجربه معمول کشاورزان در مناطق خشک و نیمه‌خشک است.

گزارش کردند که اثرات اصلاحی بایوچار بر ویژگی‌های فیزیکی خاک، به شرایط تولید بایوچار، نوع ماده آلی اولیه، ویژگی‌های خاک و مقدار مصرف بایوچار بستگی دارد (Andrenelli *et al.*, 2016). در پژوهش‌های مختلف از اثرات مفید بایوچار بر رشد و عملکرد گیاه گزارش شده است (Vaccari *et al.*, 2011) و این تأثیرگذاری به نوع خاک، شرایط اقلیمی، نوع گیاه (Obia *et al.*, 2016) و نیز ویژگی‌های بایوچار (Van Zwieten *et al.*, 2009) بستگی دارد. طبق تحقیقات Akhtar و همکاران (۲۰۱۴)، کاربرد بایوچار تحت شرایط کم‌آبایی باعث افزایش بهره‌وری مصرف آب و کیفیت محصول می‌شود و به عنوان یک راهکار مفید برای افزایش عملکرد گیاه در خاک‌های تحت تأثیر نمک گزارش شده است (Akhtar *et al.*, 2015). بهبود شرایط رطوبتی و افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت ممکن است از دلایل اصلی افزایش رشد و عملکرد گیاه باشد. با این حال، در پژوهش‌های انجام شده، اثرات کاربرد بایوچار بر عملکرد دانه و زیست توده، بسته به نوع رقم، ویژگی‌های بایوچار و شرایط تغذیه‌ای خاک متفاوت گزارش شده است (Van Zwieten *et al.*, 2009). Vaccari و همکاران (۲۰۱۱) با بررسی اثرات کاربرد بایوچار در خاک بر گندم دوروم گزارش نمودند که کاربرد بایوچار باعث افزایش ۳۰ درصدی عملکرد دانه شد. Uzoma و همکاران (۲۰۱۱) در بررسی گلخانه‌ای اثرات بایوچار کود گاوی بر عملکرد ذرت گزارش کردند که با مصرف بایوچار، جذب عناصر غذایی و کارایی مصرف آب در ذرت افزایش پیدا می‌کند. در استان بوشهر، وجود مقادیر زیاد برگ خشک درخت خرما (حدود ۴۰ هزار هکتار نخلستان و هرس سالانه حدود ۸ برگ از هر درخت) و عدم استفاده قابل توجه از آن، این ایده را تقویت می‌کند که می‌توان از این ضایعات میزان قابل توجهی بایوچار تولید کرده و از آن برای اصلاح ویژگی‌های فیزیکی خاک استفاده نمود.

(Hirich *et al.*, 2014). امروزه نقش مواد آلی در بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند ساختمان، تخلخل و شرایط تهویه‌ای، کاهش فشردگی و مقاومت مکانیکی، هدایت هیدرولیکی و ظرفیت نگهداشت رطوبت به خوبی شناخته شده است (Goldberger, 2008; Albuquerque *et al.*, 2013). همچنین، کاربرد مواد آلی در خاک به عنوان یک روش مؤثر در اصلاح خاک‌های شور به دلیل اصلاح ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیک خاک توسط پژوهش‌گران مختلف گزارش شده است (Wong *et al.*, 2009). در مناطق گرمسیری سطح ماده آلی عموم خاک‌ها پایین است و چون کودهای آلی در اثر دمای بالا سریعاً تجزیه و نابود می‌شود، لازم است هر سال این گونه مواد آلی به خاک اضافه شود (Uzoma *et al.*, 2011). در سال‌های اخیر برای بالا بردن میزان ماده آلی خاک از مواد پایداری مانند بایوچار (Biochar) استفاده می‌شود (Glaser *et al.*, 2002) که در مقابل تجزیه میکروبی بسیار مقاوم است. بایوچار یک ترکیب آلی غنی از کربن است که از طریق فرآیند پیرولیز^۱ (حرارت مواد آلی تحت شرایط بدون اکسیژن یا حضور جزئی آن) به دست می‌آید و ماندگاری چند صد ساله در خاک دارد (Lehmann *et al.*, 2006; Sohi *et al.*, 2010). پژوهش‌ها نشان می‌دهد که بایوچار باعث بهبود ساختمان خاک و پایداری خاکدانه‌ها (Ouyang *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2013)، افزایش تخلخل، کاهش چگالی ظاهری خاک و افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی رطوبت (Andrenelli *et al.*, 2016; Obia *et al.*, 2016) شده است. در تحقیقات Hardie و همکاران (۲۰۱۴) گزارش شده است که بایوچار حاصل از ضایعات سبز درخت آکاسیا باعث افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت خاک می‌شود. Uzoma و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که بایوچار باعث افزایش آب قابل استفاده گیاه در یک خاک شنی می‌شود. Ouyang و همکاران (۲۰۱۳) در تحقیقات خود

^۱ Pyrolysis

S3 و S4) در نظر گرفته شدند. از آنجا که گندم با حد آستانه تحمل به شوری ۶ دسی‌زیمنس بر متر در زمره گیاهان نسبتاً مقاوم نسبت به شوری قلمداد می‌شود (Ayers and Westcott, 1985)، سطوح شوری S1 و S2 پایین‌تر و سطوح شوری S3 و S4 بالاتر از این حد در نظر گرفته شد. تیمار S1 شوری آب لوله (به‌عنوان شاهد) و تیمار S2 شوری آب چاه کشاورزی محل اجرای آزمایش بود. طبق نتایج طرح بررسی تغییرات شوری و سدیمی خاک در پایگاه‌های مطالعاتی پایش کیفیت خاک استان بوشهر، دلیل اصلی شوری منابع آب و خاک استان بوشهر آب دریا و سازندهای نمکی کلرید سدیم است، به طوری که با افزایش شوری آب نسبت جذب سدیم (SAR) شدیداً افزایش پیدا می‌کند (زلفی و همکاران، ۱۳۹۴). بر این اساس، برای تهیه سطوح شوری S3 و S4 از نمک خوراکی (کلرید سدیم) استفاده شد.

ویژگی‌های خاک و بایوچار مورد استفاده در آزمایش خاک مورد استفاده از عمق (۳۰-۰) سانتیمتر زمین زراعی محل اجرای آزمایش با بافت متوسط (لوم شنی) تهیه شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی این خاک در جدول ۲ ارائه شده است. خاک تهیه شده در هوای آزاد خشک و کوبیده شد و از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شد تا دانه‌های درشت‌تر از آن جدا شود. برای تهیه بایوچار، ابتدا برگ خرما در هوای آزاد خشک و با استفاده از دستگاه خردکن به قطعات ریز (ابعاد کمتر از ۲ سانتیمتر) تبدیل شد.

از آنجا که ویژگی‌های شیمیایی و ترکیب ساختاری ماده آلی اولیه بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بایوچار و به تبع آن بر رفتار، کارکرد و سرنوشت آن در خاک مؤثر است، لذا نوآوری پژوهش حاضر تولید بایوچار از برگ خرما و بررسی نقش آن در افزایش کارایی مصرف آب و تولید کشاورزی است. هدف این پژوهش، بررسی اثرات بایوچار تولید شده از برگ خرما بر کارایی مصرف آب، رشد و عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.) تحت شرایط تنش‌های توأم رطوبتی و شوری بود.

مواد و روش‌ها

محل اجرای پژوهش

این پژوهش در طول یک فصل زراعی (۱۳۹۵-۱۳۹۴) در مرکز تحقیقات کشاورزی استان بوشهر (32°51' E و 35°51'؛ ارتفاع ۱۰۰ متر از سطح دریا) با شرایط آب و هوایی خشک و نیمه خشک اجراء شد. برخی پارامترهای هواشناسی ایستگاه سینوپتیک مجاور محل اجرای آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است.

طرح آزمایش و تیمارها

آزمایش به صورت گلدانی و زیر سقف شفاف (به‌منظور جلوگیری از بارندگی روی گلدان‌ها) به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار اجراء شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل بایوچار برگ خرما در دو سطح ۰ و ۳ درصد وزنی (B0 و B3)، فاصله آبیاری در سه سطح ۰، ۷ و ۱۲ روز (I1، I2 و I3) و شوری آب آبیاری در ۴ سطح ۱/۱، ۳/۸، ۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر (S1، S2،

جدول ۱. برخی پارامترهای هواشناسی ماهانه ایستگاه سینوپتیک مجاور محل اجرای آزمایش

ماه	دما (°C)	رطوبت نسبی (%)	تبخیر از تشت تبخیر		سرعت باد (m.s ⁻¹)	بارندگی (mm)
			کلاس A (mm.day ⁻¹)	ساعات آفتابی (hours)		
آذر	۱۸/۴	۶۳/۵	۳/۳	۸/۱	۲/۵	۱۶/۲
دی	۱۵/۶	۵۹	۳/۷	۶/۶	۲/۰	۱۰/۱
بهمن	۱۵/۶	۵۸	۲/۸	۸/۲	۳/۲	۱۳
اسفند	۲۲/۳	۴۹	۵/۴	۸/۴	۴/۹	۸/۱
فروردین	۲۴/۳	۴۲/۵	۷/۵	۷/۴	۶/۶	۱۰/۳

جدول ۲. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش

ویژگی‌های فیزیکی	واحد	مقدار	ویژگی‌های شیمیایی	واحد	مقدار
Sand	%	۵۳	EC _e	dS.m ⁻¹	۷/۱
Silt	%	۲۹	CEC	cmole ₍₊₎ kg ⁻¹	۸
Clay	%	۱۸	pH	-	۷/۹
ρ _b	g.cm ⁻³	۱/۳۴	Ca ²⁺ +Mg ²⁺	meq.l ⁻¹	۵۸
θ _{FC}	cm ³ .cm ⁻³	۰/۲۸۹	Na ⁺	meq.l ⁻¹	۲۵
θ _{PWP}	cm ³ .cm ⁻³	۰/۰۷۸	Cl ⁻	meq.l ⁻¹	۲۰
K _{sat}	cm.hr ⁻¹	۱/۲۸	HCO ₃ ⁻	meq.l ⁻¹	۴
			SO ₄ ²⁻	meq.l ⁻¹	۵۹
			O.C	%	۰/۴۳
			CCE	%	۶۰

جدول ۳. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بایوچار مورد استفاده در آزمایش

ویژگی	واحد	مقدار	ویژگی	واحد	مقدار
ρ _b	g.cm ⁻³	۰/۳۲	نسبت C:N	-	۲۰۷
EC	dS.m ⁻¹	۷/۶	فسفر	mg.kg ⁻¹	۱۲۳
pH	-	۷/۹	پتاسیم	mg.kg ⁻¹	۱۶۰۵
CEC	cmol ₊ .kg ⁻¹	۴۳/۷	آهن	mg.kg ⁻¹	۱۹۲
راندمان تولید	%	۵۵	روی	mg.kg ⁻¹	۱۶۳
کربن کل	g.kg ⁻¹	۸۶۸	منگنز	mg.kg ⁻¹	۴۸
نیتروژن کل	g.kg ⁻¹	۴/۲	مس	mg.kg ⁻¹	۱۲۸

(Joseph, 2009). بر این اساس بایوچار تولیدی آسیاب و از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بایوچار تولید شده در جدول ۳ ارائه شده است.

آماده سازی و پرکردن گلدان‌ها و کشت بذر گندم

با توجه به فاکتورهای مورد بررسی و اهداف آزمایش، ۷۲ عدد گلدان پلاستیکی به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و قطر متوسط ۲۳ سانتی‌متر تهیه شد. سوراخ‌هایی در کف گلدان‌ها به منظور خروج آب زهکشی تعبیه و یک لایه ۲ سانتی‌متری فیلتر شنی (اندازه قطر دانه‌ها ۲ تا ۴ میلی‌متر) در کف گلدان‌ها قرار داده شد. بایوچار تهیه شده به نسبت وزنی ۳ درصد به صورت دستی و بطور یکنواخت با

برگ خرد شده خرما در داخل پاکت‌هایی از فویل آلومینوم در یک کوره الکتریکی (مدل K- Heraeus; 1252) به مدت ۳ ساعت و در دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد حرارت داده شد. در پژوهش قبلی این شرایط پیرولیز برای تهیه بایوچار برگ خرما مناسب گزارش شده بود (نوروژی و همکاران، ۱۳۹۵). لازم به ذکر است که در غالب پژوهش‌ها برای تهیه بایوچار کشاورزی مدت زمان حرارت دهی ۱ تا ۴ ساعت (Yuan et al., 2011) و درجه حرارت لازم بین ۳۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد (Peng et al., 2012; Wu et al., 2012) گزارش شده است. بایوچار با دانه‌های کوچکتر از ۲ میلی‌متر دارای مناسب‌ترین دانه‌بندی جهت مصارف کشاورزی است (Lehmann and

میزان آبشویی برای همه گلدان‌ها ۲۰ درصد در نظر گرفته شد و آب زهکشی از گلدان‌ها در طول آزمایش به عنوان محلول خاک جمع‌آوری و هدایت الکتریکی آن اندازه‌گیری شد (Sepaskhah and Yarami, 2009). میزان تبخیر و تعرق گیاه در طول اجرای آزمایش بر اساس معادله بیلان رطوبتی زیر محاسبه گردید (Sepaskhah and Yarami, 2009):

$$ET = I - D_p \quad (2)$$

که در آن، ET تبخیر و تعرق گیاه (mm)، I میزان آبیاری (mm) و D_p میزان زهکشی (mm) بین دو آبیاری متوالی می‌باشد. پس از برداشت محصول (۲۵ فروردین ۱۳۹۵)، مؤلفه‌های عملکرد گندم شامل عملکرد دانه، وزن خشک ساقه و وزن خشک ریشه اندازه‌گیری شد. برای این منظور اندام‌های هوایی و ریشه گیاه در تمام گلدان‌ها پس از جداسازی در آن ۶۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک شده و توزین شد. جداسازی ریشه‌ها با شستشوی خاک گلدان انجام گرفت. با داشتن عملکرد دانه و میزان تبخیر و تعرق، کارایی مصرف آب گندم در تمام گلدان‌ها با استفاده از معادله زیر محاسبه شد.

$$WUE = \frac{GY}{ET} \quad (3)$$

در این معادله، WUE کارایی مصرف آب ($kg \cdot m^{-3}$)، GY عملکرد دانه (kg) و ET تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده (m^3) است.

روابط عملکرد-شوری و ضریب عکس‌العمل عملکردی گندم به تنش رطوبتی

بر اساس گزارش Maas و Hoffman (۱۹۷۷)، تحت شرایط بدون تنش رطوبتی، پاسخ عملکردی گیاه به شرایط تنش شوری از یک تابع سیگموئیدی تبعیت می‌کند. آنها پیشنهاد کردند که می‌توان این تابع سیگموئیدی را برای گیاهان زراعی با دو خط راست متوالی توصیف کرد. بر این اساس معادله خطی زیر را

خاک مخلوط شد. با توجه به سطوح فاکتور بایوچار، نصف گلدان‌ها از مخلوط خاک و بایوچار با چگالی ظاهری یکسان ($1/22 \text{ g.cm}^{-3}$) و بقیه گلدان‌ها از خاک بدون بایوچار با چگالی ظاهری یکسان ($1/34 \text{ g.cm}^{-3}$) پر شدند، به طوری که وزن خاک تمام گلدان‌ها یکسان ($8/35$ کیلوگرم) باشد. بر اساس توصیه کودی کارشناس تغذیه گیاهی، کودهای شیمیایی پرمصرف شامل فسفر به مقدار ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و پتاسیم به مقدار ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم قبل از پر کردن گلدان‌ها به طور یکنواخت با خاک مخلوط شد. کود اوره به میزان ۲۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم در سه مرحله (۴۰ درصد قبل از پر کردن گلدان، ۴۰ درصد در اواسط مرحله پنجه زنی و ۲۰ درصد در مرحله گلدهی) مصرف شد. بعد از آماده شدن گلدان‌ها، همه آن‌ها به اندازه‌ای که رطوبت خاک به ظرفیت زراعی برسد، آبیاری شدند و بعد از ۲۴ ساعت نسبت به کشت ۱۵ عدد بذر سالم گندم رقم چمران در گلدان‌ها اقدام گردید (۲۳ آذر ۱۳۹۴). تا شروع اعمال تیمارها، آبیاری همه گلدان‌ها با دور آبیاری ۳ روز و با استفاده از آب لوله (سطح شوری S1) انجام و سطح رطوبت خاک گلدان‌ها در حد ظرفیت مزرعه حفظ شد. بعد از ۱۸ روز بوته‌ها تنک و در هر گلدان تعداد ۵ بوته در نظر گرفته شد و از این زمان اعمال تیمارهای دور آبیاری و تنش شوری آغاز شد.

اندازه‌گیری‌ها و تحلیل مؤلفه‌های عملکرد گندم

از شروع اعمال تیمارها تا انتهای آزمایش حجم آب آبیاری، با توزین گلدان‌ها قبل از آبیاری و با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شد (Mostafazadeh-Fard et al., 2008):

$$V_{IW} = \frac{M_{FCi} - M_i}{1 - LR} \quad (1)$$

که در آن، V_{IW} میزان آب آبیاری (کیلوگرم یا لیتر)، M_{FCi} وزن گلدان در ظرفیت مزرعه (کیلوگرم)، M_i وزن گلدان قبل از آبیاری (کیلوگرم) و LR نیاز آبشویی است.

عکس‌العمل عملکردی گیاه به تنش رطوبتی در معادله ۵، رابطه بین کاهش در عملکرد نسبی $(1 - \frac{Y_a}{Y_p})$ و کاهش در تبخیر و تعرق نسبی $(1 - \frac{ET_a}{ET_p})$ برای عملکرد دانه، وزن خشک اندام هوایی و وزن خشک ریشه در تیمار شوری حداقل $(S1 = 1/1 \text{ dS.m}^{-1})$ با تحلیل رگرسیون خطی تعیین شد. برای این منظور تبخیر و تعرق در تیمار دور آبیاری ۳ روز (I1) و تیمار شوری ۱/۱ دسی‌زیمنس بر متر (S1) به عنوان تبخیر و تعرق پتانسیل در نظر گرفته شد (Sepaskhah and Yarami, 2009).

تجزیه و تحلیل آماری

آزمون همگنی و نرمال بودن توزیع داده‌های به دست آمده با استفاده از نرم افزار SPSS 16 انجام شد. تجزیه واریانس دو طرفه داده‌ها (ANOVA) و مقایسه میانگین‌ها بر اساس روش دانکن با استفاده از ماکرووی DSAASTAT نرم افزار MS Excel 2013 انجام گرفت.

نتایج و بحث

عملکرد دانه (GY)، وزن خشک ساقه (SDW) و وزن خشک ریشه (RDW)

طبق بررسی‌های انجام شده، در منطقه اجرای پژوهش دوره رشد گندم بهاره را به لحاظ مدیریت آبیاری می‌توان به دو دوره رشد رویشی (Vegetable Stages) و رشد زایشی (Reproduction Stages) تقسیم نمود که اولی از اواسط آذر تا اوایل بهمن و دومی از اوایل بهمن تا اواخر فروردین ادامه دارد. در این منطقه، گندم در دوره رشد رویشی به دلیل قدرت تبخیر کنندگی کم هوا، به طور معمول با تنش رطوبتی مواجه نیست، ولی در دوره رویشی به دلیل فرا رسیدن زود هنگام گرما حدود ۷۰ درصد تبخیر در این دوره اتفاق می‌افتد (جدول ۱). در این پژوهش، میانگین رطوبت قبل از آبیاری در تیمارهای فواصل آبیاری پیش‌بینی شده (I1، I2 و I3)، به ترتیب ۲۳/۲، ۱۵/۸ و ۱۰/۸ درصد حجمی محاسبه گردید که بیانگر میانگین تخلیه به ترتیب ۲۷، ۶۴ و ۸۹ درصد آب

پیشنهاد کردند که به مدل دو قسمتی Hoffman و Maas (۱۹۷۷) معروف است.

$$Y/Y_{th} = 100 - b(EC_e - EC_{eth}) \quad (4)$$

که در آن Y/Y_{th} عملکرد نسبی (%)، Y_{th} عملکرد در حد آستانه شوری (kg)، EC_e هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (dS.m^{-1}) و EC_{eth} حد آستانه شوری خاک برای شروع کاهش عملکرد (dS.m^{-1}) است. در این پژوهش، روابط عملکرد-شوری گندم مبتنی بر مدل دو قسمتی Hoffman و Maas (۱۹۷۷) در هر دو سطح (B0 و B3) برای عملکرد دانه، وزن خشک ساقه و وزن خشک ریشه تعیین شد. برای این منظور عملکرد نسبی در تیمارهای مختلف به صورت نسبت عملکرد در تیمارهای شوری بدون تنش رطوبتی (I1) بر عملکرد حداکثر (عملکرد در تیمار IIS1) تعیین شد. Babazadeh و همکاران (۲۰۱۶) در بررسی مقاومت به شوری گیاه ریحان گزارش کردند که اگر آبتجویی به میزان کافی انجام شود، تفاوت معنی‌داری بین مدل‌های مبتنی بر شوری عصاره اشباع و مدل‌های مبتنی بر شوری آب آبیاری برای برآورد عملکرد وجود ندارد. در این پژوهش به جای شوری عصاره اشباع خاک از میانگین شوری آب زهکشی استفاده شد و با رگرسیون خطی ساده معادله مربوطه تعیین شد (Sepaskhah and Beirut, 2009).

Stewart و همکاران (۱۹۷۷) معادله زیر را برای محاسبه عملکرد تحت شرایط تنش رطوبتی پیشنهاد کردند:

$$\frac{Y_a}{Y_p} = 1 - K_y \left[1 - \frac{ET_a}{ET_p} \right] \quad (5)$$

در این معادله، Y_a عملکرد واقعی تحت شرایط تنش (Mg.ha^{-1}) ، Y_p حداکثر عملکرد مورد انتظار (Mg.ha^{-1}) ، K_y ضریب عکس‌العمل عملکردی گیاه به تنش رطوبتی، ET_a تبخیر و تعرق واقعی یا تعدیل شده برای شرایط تنش (mm.d^{-1}) و ET_p تبخیر و تعرق پتانسیل (mm.d^{-1}) می‌باشد. در این پژوهش، به منظور تعیین ضریب

در گردید (جدول ۴). کاهش عملکرد گیاهان در اثر تنش رطوبتی در بسیاری از پژوهش‌ها گزارش شده (Farooq et al., 2009). شرایط شوری هم معمولاً با کاهش پتانسیل اسمزی و سمیت یونی باعث اختلال در فیزیولوژی رشد و عملکرد گیاه شده و (Munns and Tester 2008) و در جذب عناصر ضروری گیاه مانند کلسیم، منیزیم، فسفر و پتاسیم اختلال ایجاد می‌کند (Akhtar et al., 2015).

معنی‌داری اثرات متقابل سطوح فاصله آبیاری و شوری آب آبیاری (I×S) بر اجزاء عملکرد گندم بیانگر آن است که افزایش هر کدام از تنش‌های رطوبتی و شوری باعث تشدید اثرات منفی دیگری شده است.

قابل استفاده بود. با توجه به ضریب آب سهل‌الوصول توصیه شده (۰/۵۵) برای گندم (Allen et al., 1998). می‌توان گفت گیاه در فواصل آبیاری ۷ و ۱۲ روز در طول دوره زایشی با تنش رطوبتی مواجه بوده است. بررسی آماری نتایج بدست آمده نشان داد اثرات اصلی و متقابل سطوح فاصله آبیاری و شوری آب آبیاری بر عملکرد دانه (GY)، وزن خشک ساقه (SDW) و وزن خشک ریشه (RDW) معنی‌دار (P<0.05) بود. مقایسه میانگین‌ها بر اساس آزمون دانکن بیانگر کاهش ۴۸، ۲۹ و ۳۰ درصدی به ترتیب در GY، SDW و RDW در اثر افزایش فاصله آبیاری از ۳ به ۱۲ روز می‌باشد. همچنین، افزایش شوری آب آبیاری از ۱/۱ dS.m⁻¹ به ۱۲ dS.m⁻¹ باعث کاهش ۳۴، ۵۰ و ۴۰ درصدی به ترتیب در RDW، SDW و GY

جدول ۴. مقادیر میانگین عملکرد دانه (GY)، وزن خشک ساقه (SDW) و وزن خشک ریشه (RDW) مربوط به اثرات اصلی و متقابل سطوح فاصله آبیاری و شوری آب آبیاری (I×S)

میانگین	شوری آب آبیاری (dS.m ⁻¹)			فاصله آبیاری (روز)
	(S4)۱۲/۰	(S3)۸/۰	(S2)۳/۸	
	GY (g.plant ⁻¹)			
۴/۱۴ ^A	۳/۱۳ ^d	۳/۵۳ ^c	۴/۸۹ ^a	۳(I1)
۳/۴۵ ^B	۲/۱۸ ^f	۲/۷۴ ^e	۴/۳۶ ^b	۷(I2)
۲/۱۵ ^C	۱/۳۰ ^h	۱/۶۶ ^g	۲/۷۸ ^e	۱۲(I3)
	۲/۲۰ ^C	۲/۶۴ ^B	۴/۰۱ ^A	میانگین
	SDW (g.plant ⁻¹)			
۹/۵۴ ^A	۸/۳۳ ^f	۸/۹۱ ^d	۱۰/۴۸ ^b	۳(I1)
۷/۹۷ ^B	۶/۱۲ ^g	۷/۰۵ ^f	۸/۹۵ ^d	۷(I2)
۶/۶۹ ^C	۵/۶ ^h	۶/۰۷ ^g	۷/۳۲ ^f	۱۲(I3)
	۶/۳۴ ^D	۷/۳۴ ^C	۸/۹۲ ^B	میانگین
	RDW (g.plant ⁻¹)			
۱/۱۱ ^A	۰/۸۳ ^g	۰/۹۷ ^d	۱/۲۹ ^b	۳(I1)
۱/۰۶ ^B	۰/۷۸ ^h	۰/۹۳ ^{ef}	۱/۲۲ ^c	۷(I2)
۰/۷۹ ^C	۰/۵۹ ⁱ	۰/۶۹ ⁱ	۰/۹۱ ^f	۱۲(I3)
	۰/۷۳ ^D	۰/۸۶ ^C	۱/۱۴ ^B	میانگین

میانگین‌هایی که در هر ردیف یا ستون برای هر جزء عملکرد با حروف لاتین بزرگ یا کوچک یکسان مشخص شده‌اند در سطح احتمال ۵٪ تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

شرایط بدون بایوچار (B0) و هم در شرایط مصرف بایوچار (B3) با افزایش فاصله آبیاری مقادیر میانگین اجزاء عملکرد گندم کاهش پیدا کرده است. با این وجود، در تمام سطوح فاصله آبیاری کاربرد بایوچار بطور معنی داری ($P < 0.05$) باعث افزایش مقادیر میانگین GY، SDW شده است (شکل ۱). همچنین، در هر دو سطح بایوچار با افزایش فاصله آبیاری RDW کاهش معنی دار داشته است، ولی در فواصل آبیاری ۳ و ۷ روز سطوح بایوچار تفاوت معنی داری با یکدیگر نداشته اند. این نتیجه بیانگر آن است که وزن خشک ریشه در تنش رطوبتی ملایم کاهش معنی داری پیدا نکرده است. زیرا طبق گزارش‌ها، گیاه در شرایط کمبود رطوبت به تولید ریشه روی آورده و ترجیح می‌دهد بیشتر فعالیت زیستی خود را صرف تجمع ماده خشک در ریشه به جای اندام هوایی کند (Gregory *et al.*, 1991). از طرفی، با توجه به اینکه مقادیر میانگین RDW در فواصل آبیاری ۷ و ۱۲ روز در شرایط کاربرد بایوچار، تفاوت معنی داری با یکدیگر نداشته اند، می‌توان گفت کاربرد بایوچار باعث کاهش و ملایم‌تر شدن تنش رطوبتی شده است.

بررسی اثرات متقابل سطوح بایوچار و تنش شوری ($B \times S$) نیز بیانگر آن است که در هر دو سطح بایوچار (B0 و B3)، با افزایش شوری آب آبیاری مقادیر میانگین اجزاء عملکرد گندم کاهش پیدا کرده است. با این حال، کاربرد بایوچار باعث افزایش معنی دار ($P < 0.05$) مقادیر میانگین GY، SDW و RDW در تمام سطوح شوری آب آبیاری شده است (شکل ۲).

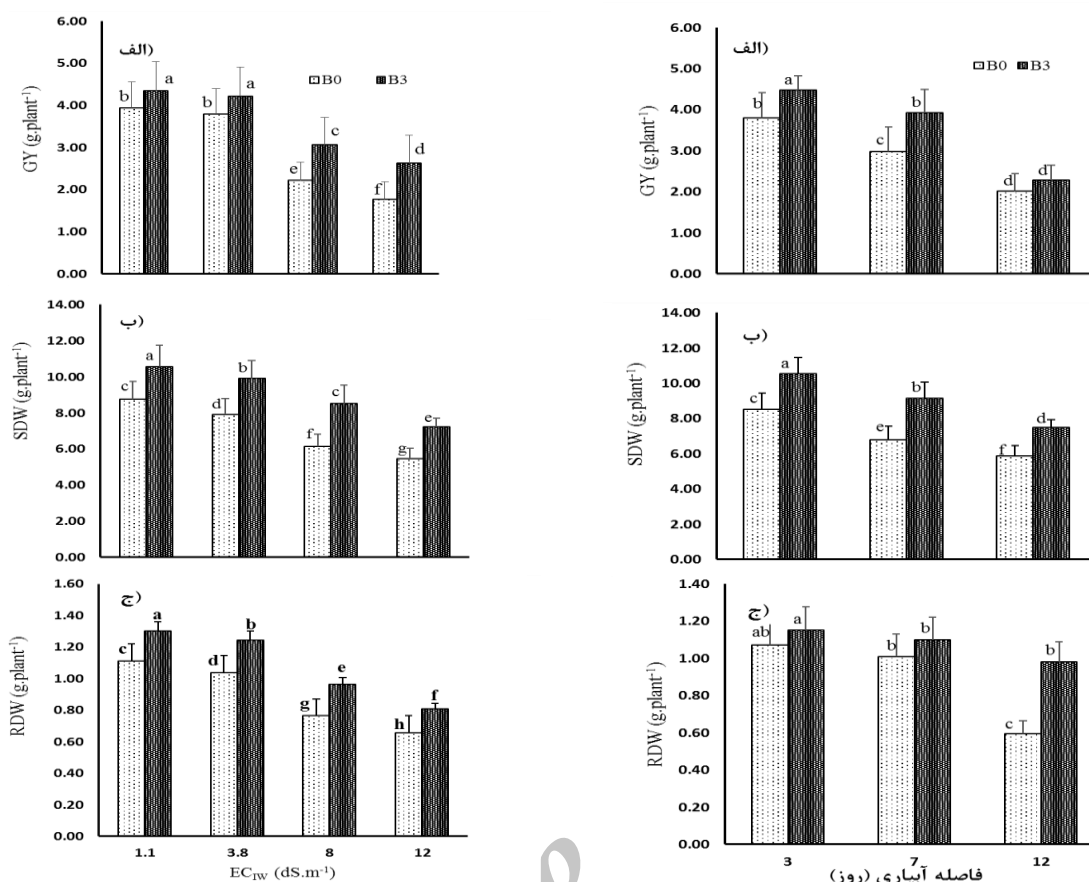
طبق نظر Brown و همکاران (۲۰۰۶) با کم شدن رطوبت خاک (تنش رطوبتی)، غلظت نمک بین خاک و گیاه (تنش شوری) افزایش پیدا می‌کند و وقتی این دو تنش به طور همزمان افزایش پیدا کنند، اثر منفی یکدیگر را تقویت می‌کنند. لذا در جدول ۴ مشاهده می‌شود که در تمام سطوح فاصله آبیاری با افزایش تنش شوری، مقادیر میانگین GY، SDW و RDW بطور معنی داری ($P < 0.05$) کاهش پیدا کرده و در تمام سطوح شوری نیز با افزایش تنش رطوبتی نتیجه مشابه حاصل شده است. با توجه به جدول ۵، اثرات کاربرد بایوچار بر اجزاء عملکرد گندم معنی دار ($P < 0.05$) بود، به طوری که در اثر کاربرد بایوچار مقادیر میانگین GY، SDW و RDW به ترتیب ۲۲، ۳۸ و ۲۰ درصد نسبت به شرایط بدون کاربرد بایوچار افزایش داشت. این نتیجه در تطبیق با نتایج کار پژوهش‌گران دیگری مانند Baronti و همکاران (۲۰۱۴) و Vaccari و همکاران (۲۰۱۱) می‌باشد. آنها گزارش کردند که کاربرد بایوچار باعث افزایش حدود ۳۰ درصدی عملکرد گندم و ذرت می‌شود. Bruun و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که افزودن بایوچار حاصل از کاه گندم در یک خاک شنی، رشد ریشه‌های جو را بهبود بخشیده و باعث افزایش ۲۲ درصدی عملکرد دانه می‌شود. سایر گزارش‌ها نیز از اثرات مثبت بایوچار بر رشد ریشه و اندام‌های هوایی گیاه حکایت دارند (Lehman *et al.*, 2011).

بررسی اثرات متقابل سطوح بایوچار و تنش رطوبتی ($B \times I$) بر اجزاء عملکرد گندم بیانگر آن است که هم در

جدول ۵. مقادیر میانگین عملکرد دانه (GY)، وزن خشک ساقه (SDW)، وزن خشک ریشه (RDW)، تبخیر و تعرق گیاه (ET)، کارایی مصرف آب (WUE) و رطوبت وزنی خاک قبل از آبیاری (θ) تحت تأثیر سطوح بایوچار (B0 و B3).

GY (g.plant ⁻¹)	SDW (g.plant ⁻¹)	RDW (g.plant ⁻¹)	ET (mm)	WUE (kg.m ⁻³)	θ (w.w ⁻¹)	سطوح بایوچار (درصد وزنی)
۲/۸۶ ^b	۷/۰۷ ^b	۰/۸۹ ^b	۲۲۶/۳ ^b	۱/۵۰ ^b	۰/۱۲۵ ^b	B0=۰
۳/۵۶ ^a	۹/۰۷ ^a	۱/۰۸ ^a	۲۶۸/۴ ^a	۱/۶۳ ^a	۰/۱۵۴ ^a	B3=۳

میانگین‌هایی که در هر ستون برای هر متغیر دارای حروف لاتین مشترک هستند، در سطح احتمال ۵٪ تفاوت معنی داری با هم ندارند.



شکل ۲. مقادیر میانگین الف) عملکرد دانه (GY)، ب) وزن خشک ساقه (SDW) و ج) وزن خشک ریشه (RDW) مربوط به اثرات متقابل سطوح بايوچار و شوری آب آبیاری (B×S). نوارهای خطا (Error Bars) بیانگر خطای استاندارد است (n=۳).

شکل ۱. مقادیر میانگین الف) عملکرد دانه (GY)، ب) وزن خشک ساقه (SDW) و ج) وزن خشک ریشه (RDW) مربوط به اثرات متقابل سطوح بايوچار و فاصله آبیاری (B×I). نوارهای خطا (Error Bars) بیانگر خطای استاندارد است (n=۴).

شده است (Zhang *et al.*, 2013). Akhtar و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که بايوچار با جذب سدیم اثرات منفی شوری بر سیب زمینی را کاهش داد و باعث افزایش طول و حجم ریشه سیب زمینی گردید.

Bruun و همکاران (۲۰۱۴) نیز در پژوهش‌های خود به نتایج مشابهی دست یافتند. به جز اصلاح ویژگی‌های فیزیکی و شرایط رطوبتی خاک، مکانیزم عمده‌ای که باعث نقش مفید بايوچار در کاهش اثرات منفی شوری می‌شود، به ظرفیت بالای آن در جذب یون سدیم نسبت داده می‌شود (Zhang *et al.*, 2013).

این نتایج با یافته‌های سایر پژوهش‌گران مانند Thomas و همکاران (۲۰۱۳) و Akhtar و همکاران (۲۰۱۵) مطابقت کامل دارد. طبق نظر Thomas و همکاران (۲۰۱۳) توانایی بايوچار و بقایای گیاهی در افزایش آب قابل استفاده خاک، ممکن است تا حدودی باعث جبران اثرات منفی شوری در خاک‌های زراعی شود. در این پژوهش افزایش رشد ریشه و اندام‌های هوایی گیاه در شرایط مصرف بايوچار در تمام سطوح شوری بیانگر نقش بايوچار در اصلاح شرایط فیزیکی و تهویه‌ای خاک می‌باشد. گزارش‌های متعددی در خصوص نقش بايوچار در کاهش اثرات شوری بر رشد و عملکرد گیاه گزارش

تبخیر و تعرق (ET)، کارایی مصرف آب (WUE) و رطوبت وزنی خاک قبل از آبیاری (θ)

بر اساس نتایج تجزیه آماری، اثرات اصلی و متقابل سطوح فاصله آبیاری و شوری آب آبیاری ($I \times S$) بر تبخیر و تعرق (ET)، کارایی مصرف آب (WUE) و رطوبت وزنی خاک قبل از آبیاری (θ) معنی دار ($P < 0.05$) بود. به طوری که با افزایش فاصله آبیاری از ۳ به ۱۲ روز مقادیر میانگین ET، WUE و θ به ترتیب ۲۵، ۳۳ و ۴۸ درصد کاهش داشت. از طرف دیگر، با افزایش شوری آب آبیاری از $1/1 \text{ dS.m}^{-1}$ به 12 dS.m^{-1} ، مقادیر ET و WUE به ترتیب ۲۴ و ۳۵ درصد کاهش داشت، ولی مقدار میانگین θ ۸ درصد افزایش داشت (جدول ۶). معنی داری اثرات متقابل سطوح رطوبتی و شوری بر ET و WUE بیانگر آن است که هر کدام از تنش‌ها باعث تشدید اثرات منفی تنش دیگری شده است. به طوری که، در تمام

فاصله آبیاری با افزایش تنش شوری و نیز در تمام سطوح شوری با افزایش تنش رطوبتی ET و WUE کاهش داشته است. در تمام سطوح شوری آب آبیاری با افزایش فاصله آبیاری مقادیر میانگین θ کاهش پیدا کرده ولی در تمام سطوح فاصله آبیاری با افزایش تنش شوری افزایش داشته است که بیانگر کاهش تبخیر و تعرق با افزایش سطح شوری می‌باشد (جدول ۶).

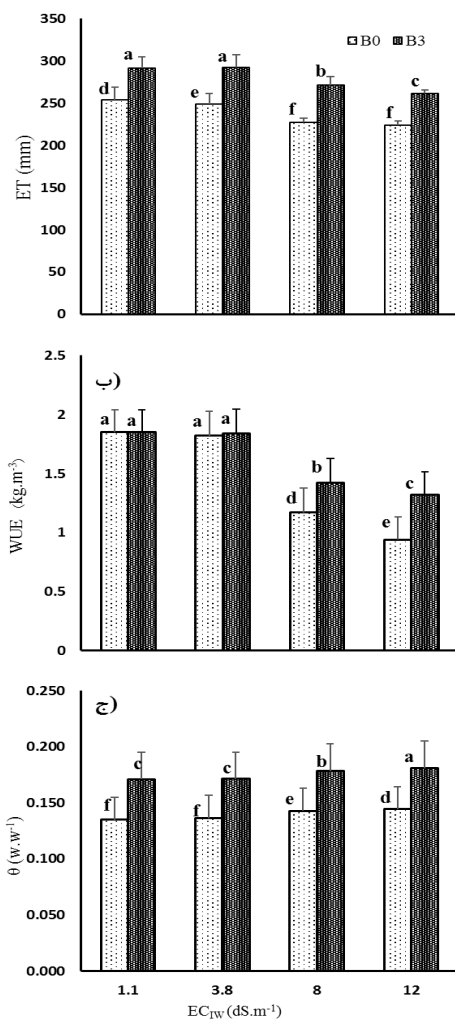
به طور کلی، تنش‌های رطوبتی و شوری هدایت روزنه‌ای و تعرق برگ‌ها را کاهش می‌دهد که در نهایت منجر به کاهش ET می‌شود (Hirich et al., 2014; Akhtar et al., 2015). طبق گزارش‌ها، تجمع آبسیک اسید (ABA) در سلول‌های محافظ برگ مهم‌ترین عامل بسته شدن روزنه‌ها و کاهش هدایت روزنه‌ای در اثر تنش‌های رطوبتی و شوری است (Akhtar et al., 2015).

جدول ۶. مقادیر میانگین تبخیر و تعرق (ET)، کارایی مصرف آب (WUE) و رطوبت وزنی خاک قبل از آبیاری (θ) مربوط به اثرات اصلی و متقابل سطوح فاصله آبیاری و شوری آب آبیاری ($I \times S$)

میانگین	شوری آب آبیاری (dS.m^{-1})				فاصله آبیاری (روز)
	۱۲/۰ (S4)	۸/۰ (S3)	۳/۸ (S2)	۱/۱ (S1)	
	ET (mm)				
۲۷۷/۳ ^A	۲۴۹/۶ ^{ef}	۲۷۳/۵ ^{cd}	۲۹۱/۶ ^{ab}	۲۹۴/۵ ^a	۳(I1)
۲۵۹/۲ ^B	۲۱۵/۳ ^g	۲۵۷/۴ ^{de}	۲۷۵/۴ ^{bc}	۲۷۶/۵ ^{bc}	۷(I2)
۲۰۸/۶ ^C	۱۵۶/۰ ⁱ	۱۹۲/۸ ^h	۲۳۹/۰ ^f	۲۴۶/۵ ^{ef}	۱۲(I3)
	۲۰۷/۰ ^C	۲۴۱/۲ ^B	۲۶۸/۷ ^A	۲۷۲/۵ ^A	میانگین
	WUE (kg.m^{-3})				
۱/۸۵ ^A	۱/۵۵ ^{bc}	۱/۶۶ ^b	۲/۱۱ ^a	۲/۰۹ ^a	۳(I1)
۱/۶۰ ^B	۱/۰۹ ^e	۱/۳۶ ^d	۱/۹۵ ^a	۲/۰۱ ^a	۷(I2)
۱/۲۴ ^C	۱/۰۰ ^e	۱/۰۴ ^e	۱/۴۶ ^{cd}	۱/۴۵ ^{cd}	۱۲(I3)
	۱/۲۱ ^C	۱/۳۵ ^B	۱/۸۴ ^A	۱/۸۵ ^A	میانگین
	θ (w.w^{-3})				
۰/۱۹۰ ^A	۰/۱۹۶ ^a	۰/۱۹۳ ^b	۰/۱۸۷ ^c	۰/۱۸۶ ^c	۳(I1)
۰/۱۳۰ ^B	۰/۱۳۹ ^d	۰/۱۳۲ ^e	۰/۱۲۴ ^f	۰/۱۲۵ ^f	۷(I2)
۰/۰۹۸ ^C	۰/۱۰۳ ^g	۰/۱۰۱ ^g	۰/۰۹۶	۰/۰۹۴ ^h	۱۲(I3)
	۰/۱۴۶ ^A	۰/۱۴۲ ^B	۰/۱۳۵ ^C	۰/۱۳۵ ^C	میانگین

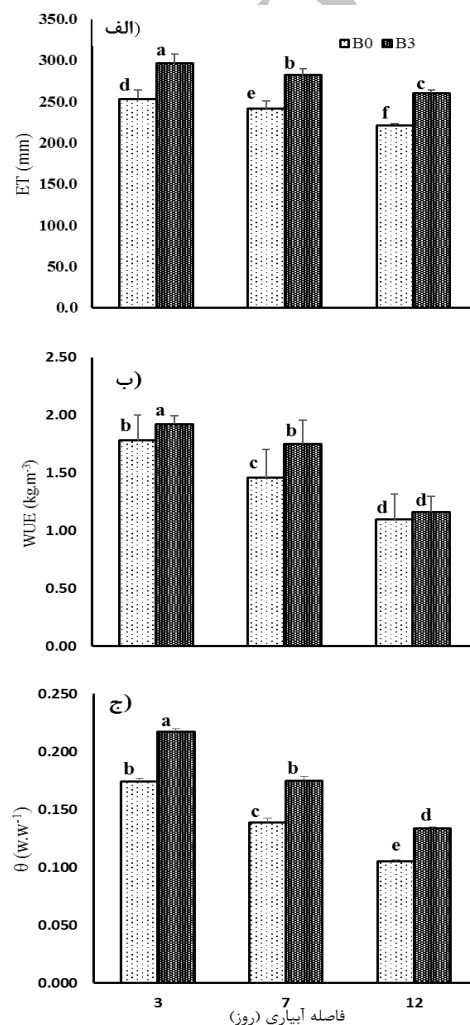
میانگین‌هایی که در هر ردیف یا ستون برای هر جزء عملکرد با حروف لاتین بزرگ یا کوچک یکسان مشخص شده‌اند در سطح احتمال ۵٪ تفاوت معنی داری با یکدیگر ندارند.

شوری و تنش رطوبتی، مقادیر میانگین ET کاهش پیدا کرد، ولی در همه سطوح فاصله آبیاری و شوری آب آبیاری با کاربرد بایوچار، ET بطور معنی داری نسبت به شرایط بدون بایوچار افزایش داشت (شکل های ۳ و ۴). در هر دو سطح (B0 و B3) با افزایش تنش شوری و تنش رطوبتی نتایج مشابهی برای WUE بدست آمد، به جز تیمار آبیاری I3 و تیمارهای شوری S1 و S2 (شکل های ۳ و ۴).



شکل ۴. مقادیر میانگین الف) تبخیر و تعرق (ET)، ب) کارایی مصرف آب (WUE) و ج) رطوبت وزنی خاک قبل از آبیاری (θ) مربوط به اثرات متقابل سطوح بایوچار و شوری آب آبیاری (B×S). نوارهای خطا (Error Bars) بیانگر خطای استاندارد است (n=۳)

طبق نتایج بدست آمده، کاربرد بایوچار اثرات معنی دار ($P<0.05$) بر ET، WUE و θ تحت شرایط تنش هم زمان رطوبتی و شوری داشت، به طوری که مقادیر میانگین آنها به ترتیب ۱۸/۶، ۸/۷ و ۲۳ درصد نسبت به شرایط بدون بایوچار افزایش داشت (جدول ۵). بعلاوه، اثرات متقابل بایوچار و تنش رطوبتی (B×I) و نیز اثرات متقابل بایوچار و تنش شوری (B×S) بر ET و WUE معنی دار ($P<0.05$) بود. در هر دو سطح بایوچار (B0 و B3) با افزایش تنش



شکل ۳. مقادیر میانگین الف) تبخیر و تعرق (ET)، ب) کارایی مصرف آب (WUE) و ج) رطوبت وزنی خاک قبل از آبیاری (θ) مربوط به اثرات متقابل سطوح بایوچار و فاصله آبیاری (B×I). نوارهای خطا (Error Bars) بیانگر خطای استاندارد است (n=۴).

افزایش افزایش (بیش از ۲۰ درصد) منافذ بزرگ‌تر از $0.2\mu\text{m}$ خاک بود که به لحاظ ذخیره رطوبت قابل استفاده گیاه حائز اهمیت است. این یافته‌ها که در مطابقت با سایر گزارش‌ها (Andrenelli et al., 2016) است، تأکیدی است بر اینکه بایوچار با اصلاح خصوصیات ساختمانی و تخلخل درشت خاک باعث بهبود رفتار رطوبتی خاک می‌شود. لذا می‌توان گفت بایوچار رطوبت خاک را تا آبیاری بعدی در سطح بالاتری حفظ کرده و با افزایش قابلیت دسترسی ریشه‌ها به رطوبت، اثرات منفی تنش رطوبتی را کاهش داده که منجر به افزایش ET و WUE می‌شود. Akhtar و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که یک رابطه معنی‌دار منفی بین هدایت روزنه‌ای و غلظت ABA وجود دارد. آنها عنوان کردند که با مصرف بایوچار، غلظت ABA در برگ‌ها کاهش می‌یابد و آن را به جذب یون سدیم محلول خاک در بایوچار و کاهش تنش اسمزی نسبت دادند. بر این اساس می‌توان گفت در پژوهش حاضر بایوچار با کاهش غلظت نمک در محلول خاک و کاهش تنش اسمزی باعث افزایش جذب رطوبت توسط ریشه‌ها و هدایت روزنه‌ای و تعرق بیشتر در برگ‌ها شده که در نهایت منجر به افزایش ET و WUE شده است. روابط بین عملکرد نسبی GY، SDW و RDW و میانگین شوری آب زهکشی از گلدانها مبتنی بر مدل دو قسمتی Maas و Hoffman (۱۹۷۷) به کمک تحلیل رگرسیونی خطی تعیین شد (جدول ۷).

این معادله‌ها نشان داد که شیب کاهش عملکرد نسبی برای GY، SDW و RDW در اثر کاربرد بایوچار به ترتیب ۲۳، ۲۵ و ۸/۷ درصد کاهش داشت. همچنین، حد آستانه هدایت الکتریکی محلول خاک برای شروع کاهش این اجزای عملکرد بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش داشت. این نتیجه بیانگر کاهش حساسیت گیاه به شوری در اثر کاربرد بایوچار است که با سایر گزارش‌ها مطابقت دارد (Thomas et al., 2013).

این نتیجه تأییدی بر نتایج پژوهش‌های Uzoma و همکاران (۲۰۱۱) بر روی اثر بایوچار بر رشد و عملکرد ذرت، Akhtar و همکاران (۲۰۱۴) بر روی اثر بایوچار بر عملکرد کمی و کیفی گوجه‌فرنگی تحت شرایط کم آبیاری و Baronti و همکاران (۲۰۱۴) بر روی اثر بایوچار بر روابط آبی گیاه در انگور می‌باشد. همچنین، این نتیجه با نتایج پژوهش‌های Thomas و همکاران (۲۰۱۳) بر روی نقش بایوچار در کاهش اثرات منفی شوری بر دو گونه گیاه علفی و Akhtar و همکاران (۲۰۱۵) بر نقش بایوچار در کاهش اثرات سوء شوری بر سیب زمینی مطابقت دارد. در هر دو سطح بایوچار (B0 و B3)، با افزایش فاصله آبیاری، مقادیر میانگین θ کاهش معنی‌دار پیدا کرد، ولی کاربرد بایوچار بطور معنی‌داری ($P < 0.05$) سبب افزایش آن شد (شکل ۳). از طرفی، در هر دو سطح بایوچار با افزایش تنش شوری θ افزایش معنی‌دار داشته است ولی کاربرد بایوچار سبب شده است تا در همه سطوح شوری آب آبیاری θ افزایش معنی‌دار ($P < 0.05$) نسبت به شرایط بدون مصرف بایوچار داشته باشد.

فرآیند تعرق گیاه و جذب آب ریشه به طور مستقیم به فراهمی رطوبت برای ریشه‌ها بستگی دارد و هرچه سطح رطوبت خاک در محیط ریشه بیشتر باشد، گیاه برای جذب رطوبت انرژی کم‌تری صرف می‌کند. در این پژوهش، افزایش ET و WUE در اثر کاربرد بایوچار بیانگر رشد بهتر گیاه نسبت به شرایط بدون بایوچار می‌باشد، ولو اینکه تحت شرایط تنش رطوبتی و شوری باشد. این نتیجه با یافته‌های Akhtar و همکاران (۲۰۱۵) مطابقت دارد. در بررسی‌های قبلی نویسندگان (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۵) در اثر کاربرد بایوچار برگ خرما، آب قابل دسترس (AW) و ظرفیت مزرعه (FC) خاک به ترتیب ۲۰/۱ و ۲۳/۴ درصد افزایش داشت، ولی نقطه پژمردگی دائم (PWP) تغییرات معنی‌داری نداشت. همچنین، داده‌های منحنی مشخصه رطوبتی خاک بیانگر

جدول ۷. روابط عملکرد-شوری برای GY, SDW و RDW در مقابل شوری محلول خاک تحت شرایط کاربرد بایوچار برگ خرما

مؤلفه عملکرد	درصد (%) ($w.w^{-1}$)	معادله رگرسیون	R ²	SE	P
GY	۰	$(Y_a/Y_{th})_{GY} = 100 - 3.25(EC_{SS} - 7.99)$	۰/۹۴	۰/۰۵۹	$۲/۸ \times 10^{-۷}$
	۳	$(Y_a/Y_{th})_{GY} = 100 - 2.51(EC_{SS} - 9.88)$	۰/۹۱	۰/۰۵۵	$۱/۱۴ \times 10^{-۶}$
SDW	۰	$(Y_a/Y_{th})_{SDW} = 100 - 2.43(EC_{SS} - 7.17)$	۰/۹۸	۰/۰۲۶	$۱/۲۶ \times 10^{-۹}$
	۳	$(Y_a/Y_{th})_{SDW} = 100 - 1.82(EC_{SS} - 7.57)$	۰/۸۶	۰/۰۵۶	$۱/۳۲ \times 10^{-۵}$
RDW	۰	$(Y_a/Y_{th})_{RDW} = 100 - 2.64(EC_{SS} - 8.5)$	۰/۹۹	۰/۰۲۲	$۱/۵۳ \times 10^{-۱۰}$
	۳	$(Y_a/Y_{th})_{RDW} = 100 - 2.41(EC_{SS} - 9.37)$	۰/۹۲	۰/۰۴۷	$۸/۸۴ \times 10^{-۷}$

Kassam و Doorenbos (۱۹۷۹) این مقادیر را به ترتیب ۰/۴، ۱/۵ و ۰/۵ برآورد کرده بودند. بنابر این ضریب عکس‌العمل گیاه به تنش رطوبتی ممکن است علاوه بر کمبود رطوبت، تحت تأثیر عوامل دیگری مانند ویژگی‌های خاک، شرایط آب و هوایی، طول دوره رشد و مدیریت آبیاری و زراعی تغییر کند (Vaux and Pruitt, 1983).

نتیجه‌گیری

در این آزمایش گلدانی، کاربرد بایوچار حاصل از برگ خرما به نسبت وزنی ۳ درصد و به صورت پودری و آسیاب شده در یک خاک لوم شنی باعث کاهش اثرات منفی تنش‌های رطوبتی و شوری بر رشد و عملکرد گندم شد. با کاربرد بایوچار تحت شرایط تنش‌های هم‌زمان رطوبتی و شوری، مقادیر میانگین عملکرد دانه، وزن خشک ساقه و وزن خشک ریشه به ترتیب ۲۲، ۳۸ و ۲۰ درصد و همچنین، مقادیر تبخیر و تعرق، کارایی مصرف آب و رطوبت وزنی خاک قبل از آبیاری به ترتیب ۱۸/۶، ۸/۷ و ۲۳ درصد افزایش داشت. این نتایج، بیانگر نقش بایوچار برگ خرما در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شرایط رطوبتی خاک می‌باشد که منجر به افزایش کارایی مصرف آب، رشد و عملکرد گیاه تحت شرایط تنش‌های نوام رطوبتی و شوری شده است. مقادیر پاسخ عملکردی گیاه به تنش رطوبتی (K_y) در معادله Stewart و همکاران

خصوصیات فیزیکی و رطوبتی خاک، مدیریت آبیاری و زراعی و شرایط اقلیمی از جمله عوامل مهم تأثیرگذار بر مقاومت به شوری گیاه گزارش شده است (Maas and Hoffman, 1977). لذا در این پژوهش، می‌توان نتیجه گرفت که بایوچار برگ خرما با اصلاح شرایط ساختمانی و رفتار رطوبتی خاک، باعث کاهش حساسیت به شوری گیاه شده است. این نتیجه با گزارش Akhtar و همکاران (۲۰۱۵) مطابقت دارد.

روابط بین کاهش عملکرد نسبی ($1 - Y_a/Y_p$) و کاهش تبخیر و تعرق نسبی ($1 - ET_a/ET_p$) با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی تعیین شد (جدول ۸). تعیین K_y برای گیاهان مختلف و در شرایط مختلف بیانگر دامنه وسیع مقادیر K_y برای گیاهان مختلف و حتی ارقام مختلف یک گیاه می‌باشد. Rao و همکاران (۲۰۱۳) مقدار K_y را برای گندم بین ۰/۸۷ تا ۱/۰۹ بدست آوردند، در حالیکه Kassam و Doorenbos (۱۹۷۹) این ضریب را برای گندم بهاره ۱/۱۵ تعیین کرده بودند. Pejić و همکاران (۲۰۰۹) مقادیر K_y را برای آفتابگردان ۰/۰۷ تا ۰/۲۹ برآورد کردند که خیلی کم‌تر از مقدار ۰/۹۵ (Doorenbos and Kassam, 1979) بود. همین‌طور Igbadun و همکاران (۲۰۰۷) K_y برای مراحل رشد رویشی، گلدهی و پر شدن دانه‌ها در ذرت را به ترتیب ۰/۲۱، ۰/۸۶ و ۰/۴۹ برآورد کردند، در حالیکه

آب مخصوصاً تحت شرایط تنش رطوبتی و شوری باشد. با این وجود، برای حصول نتایج قطعی‌تر در شرایط واقعی، مطالعات بیشتری در شرایط مزرعه و خارج از گلدان توصیه می‌شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه شهرکرد به خاطر تأمین بخشی از هزینه‌های پژوهش صمیمانه تشکر می‌نمایند. همچنین، بخشی از هزینه‌ها توسط سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (AREEO) تأمین شد که سپاسگزاریم.

(۱۹۷۷) برای عملکرد دانه، وزن خشک ساقه و وزن خشک ریشه بطور قابل توجهی کاهش داشت که بیانگر کاهش حساسیت گیاه به تنش رطوبتی در اثر کاربرد بایوچار می‌باشد. بعلاوه، در اثر کاربرد بایوچار، مقادیر شیب کاهش عملکرد و حد آستانه تحمل به شوری در مدل دو قسمتی Maas و Hoffman (۱۹۷۷) برای عملکرد دانه، وزن خشک ساقه و وزن خشک ریشه کاهش داشت که بیانگر نقش بایوچار در افزایش مقاومت گیاه به تنش شوری می‌باشد. بنابر این، در این آزمایش ثابت شد که بایوچار برگ خرما می‌تواند یک اصلاح کننده مؤثر ویژگی‌های فیزیکی و رطوبتی خاک و یک راهکار امیدبخش برای افزایش تولید کشاورزی و کارایی مصرف

منابع مورد استفاده

زلفی، ب.، پوزش شیرازی، م.، نوروژی م. ۱۳۹۴. بررسی تغییرات شوری و سدیمی خاک در پایگاه‌های مطالعاتی پایش کیفیت خاک در استان بوشهر. طرح تحقیقاتی به شماره مصوب ۹۰۰۰۶-۹۰۰۲-۱۰-۱۰-۱۴ سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (در دست انتشار).

سرائی تبریزی، م.، همایی، م.، بابازاده، ح.، کاوه، ف.، پارسی‌نژاد، م. ۱۳۹۴. مدل‌سازی پاسخ ریحان (*Ocimum basilicum* L.) به تنش‌های توأمان شوری و کمبود نیتروژن. نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، سال نوزدهم، شماره هفتاد و سوم، صفحات ۴۵ تا ۵۷.

نوروژی، م.، طباطبائی، س. ح.، نوری، م. ر.، متقیان، ح. ر. ۱۳۹۵. اثرات کوتاه مدت بایوچار برگ خرما بر حفظ رطوبت در خاک لوم شنی. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال ششم، شماره دوم، صفحات ۱۳۷ تا ۱۵۰.

Albuquerque, J.A., Salazar, P., Villar, R., Barrón, V., Torrent, J., Del Campillo, M.C., and Gallardo, A. 2013. Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels. *Agronomy for Sustainable Development* 33(3): 475-484.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. Irrigation and Drainage Paper, No. 56, Food and Agriculture Organization (FAO), Rome, Italy. 300p.

Akhtar, S.S., Andersen, M.N., Liu, F. 2015. Residual effects of biochar on improving growth, physiology and yield of wheat under salt stress. *Agricultural Water Management*, 158, 61-68.

Akhtar, S.S., Li, G.T., Andersen, M.N. and Liu, F.L. 2014. Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation. *Agricultural Water Management*, 138:37-44.

Andrenelli, M.C., Maienzab, A., Genesiob, L., Miglietta, F., Pellegrini, S., Vaccari, F.P. and Vignozzi, N. 2016. Field application of pelletized biochar: Short-term effect on the hydrological properties of a silty clay loam soil. *Agricultural Water Management*, 163: 190-196.

Ayers, R.S. and Westcott, D.W. 1985. Water quality for agriculture: Irrigation and Drainage Paper, No. 29. FAO. Rome. Italy. 174p.

Babazadeh, H., Sarai Tabrizi, M. and Hassanpour Darvishi, H. 2016. Adopting adequate leaching requirement for practical response models of basil to salinity, *International Agrophysics* 30: 275-283.

Baronti, S., Vaccari, F.P., Miglietta, F., Calzolari, C., Lugato, E., Orlandini, S., Pini, R., Zulian, C. and Genesio, L. 2014. Impact of biochar application on plant water relations in *Vitis vinifera* (L.). *European Journal of Agronomy* 53: 38-44.

- Brown, C.E., Pezeshki, S.R. DeLaune, R.D. 2006. The effects of salinity and soil drying on nutrient uptake and growth of *Spartina alterniflora* in a simulated tidal system. *Environmental and Experimental Botany* 58, 140-148.
- Bruun, E.W., Petersen, C.T., Hansen, E., Holm, J.K. and Hauggaard-Nielsen, H. 2014: Biochar amendment to coarse sandy subsoil improves root growth and increases water retention. *Soil Use Management* 30: 109-118.
- Doorenbos, J., Kassam, A.H. 1979. Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper No. 33. FAO. Rome. Italy. 193p.
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D. and Basra, S.M.A. 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29: 185-212.
- Glaser, B. Lehmann, J. and Zech, W. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. *Biology and Fertility of Soils* 35: 219-230.
- Goldberger, J.R. 2008. Diffusion and adoption of non-certified organic agriculture: a case study from semi-arid Makueni District. Kenya. *Journal of Sustainable Agriculture*, 32(4): 597-609.
- Hardie, M., Clothier, B., Bound, S., Oliver, G. and Close, D. 2014. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? *Plant Soil* 376: 347-361.
- Hirich, A., Shoukr-Allah, R. and Jacobsen, S.E. 2014. Deficit Irrigation and Organic Compost Improve Growth and Yield of Quinoa and Pea. *Journal of Agronomy and Crop science*, 200(5): 390-398.
- Igbadun, H.E., Tarimo, A.K., Salim, B.A. and Mahoo, H.F. 2007. Evaluation of selected crop water production functions for an irrigated maize crop. *Agricultural Water Management*, 94:1-10.
- Lehmann, J., Gaunt, J. and Rondon, M. 2006. Biochar sequestration in terrestrial ecosystem sea review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11: 403-427.
- Lehmann, J. and Joseph, S. 2009. *Biochar for Environmental Management. Science and Technology*. James & James. Earthscan. London. U.K. pp.67-84.
- 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.
- Liu, X., Han, F., Liu, W., Wang, Z., Zhao, X. and Zhang, X. 2016. Impacts of Biochar Amended Soils on Ryegrass (*Lolium perenne* L.) Growth under Different Water Stress Conditions. *Intentional Journal of Agriculture and Biology*, 18: 630-636.
- Maas, E.V. and Hoffman, G.J. 1977. Crop salt tolerance -current assessment. *Journal of Irrigation and Drainage Division ASCE*, 103:115-134.
- Mostafazadeh-Fard, B., Heidarpour, M., Aghakhani, A. and Feizi, M. 2008. Effects of leaching on soil desalinization for wheat crop in an arid region. *Plant Soil Environment*, 54(1): 20-29.
- Munns, R. and Tester, M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology* 59: 651-681.
- Obia, A., Mulder, J., Martinsen, V., Cornelissen, G. and Børresen, T. 2016. In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils. *Soil and Tillage Research*, 155: 35-44.
- Ouyang, L. Wang, F. Tang, J. Yu, L. and Zhang, R. 2013. Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 13 (4): 991-1002.
- Pejić, B., Maksimović, L., Škorić, D., Milić, S., Stričević, R. and Čupina, B. 2009. Effect of water stress on yield and evapotranspiration of sunflower. *Helia*, 32 (51):19-32.
- Peng, F. He, P.W. Luo, Y. Lu, X. Liang, Y. and Fu, J. 2012. Adsorption of phosphate by biomass char deriving from fast pyrolysis of biomass waste. *Clean-Soil Air Water* 40: 493-498.
- Rao, S.S., Regar, P.L., Tanwar, S.P.S. and Singh, Y.V. 2013. Wheat yield response to line source sprinkler irrigation and soil management practices on medium-textured shallow soils of arid environment. *Irrigation Science*, 31:1185-1197.
- Sohi, S.P. Krull, E., Lopez-Capel, E. and Bol, R. 2010. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy* 105: 47-82.
- Sepaskhah, A.R. and Beirouti, Z. 2009. Effect of irrigation interval and water salinity on growth of madder (*Rubina tinctorum* L.). *International Journal of Plant Production* 3(3): 1-16.
- Sepaskhah, A.R. and Yarami, N. 2009. Interaction effects of irrigation regime and salinity on flower yield and growth of saffron. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 84(2): 216-222.
- Stewart, J.I., Danielson, R.E., Hanks, R.J., Jackson, E.B., Hagan, R.M., Pruitt, W.O., Franklin, W.T. and Riley, J.P. 1977. Optimizing Crop Production through Control of Water and Salinity Levels in the Soil. Utah Water Research Laboratory Progress Report No. 151. Logan. Utah. 191p.
- Thomas, S.C., Frye, S., Gale, N., Garmon, M., Launchbury, R., Machado, N., Melamed, S., Murray, J., Petroff, A. and Winsborough, C. 2013. Biochar mitigates negative effects of salt additions on two plant species. *Journal of Environmental Management*, 129: 62-68.

- Uzoma, K.C., Inoue, M, Andry, H., Fujimaki, H., Zahoor, A. and Nishihara, E. 2011. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil Use Management*. 27:205-212.
- 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.
- Van Zwieten, L., Singh, B., Joseph, S., Kimber, S., Cowie, A. and Chan, K.Y. 2009. Biochar and emissions of non-CO₂ greenhouse gases from soil. P. 227–249. In J. Lehmann and S. Joseph (ed.) *Biochar for Environmental Management*. Earthscan. London.405 pp.
- Vaux, H.J. and Pruitt, W.O. 1983. Crop-water production functions. P. 61-93. In D. Hillel (ed.) *Advances in Irrigation*. Academic Press. New York. 336p.
- Wong, V.N.L. Dalal, R.C. and Greene, R.S.B. 2009. Carbon dynamics of sodic and saline soil following gypsum and organic material additions: laboratory incubation. *Applied Soil Ecology* 41: 29–40.
- Wu, W., Yang, M., Feng, Q., McGrouther, K., Wang, H., Lu, H. and Chen, Y. 2012. Chemical characterization of rice straw-derived biochar for soil amendment. *Biomass Bioenergy*, 47: 268–276.
- Yuan, J. Xu, R. and Zhang, H. 2011. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource Technology* 102: 3488-3497.
- Zhang, H., Xiao, R., Jin, B., Shen, D., Chen, R. and Xiao G. 2013. Catalytic fast pyrolysis of straw biomass in an internally interconnected fluidized bed to produce aromatics and olefins: effect of different catalysts. *Bioresource Technology* 137: 82–8.

Archive of SID



ISSN 2251-7480

Water use efficiency of wheat under simultaneous water and salinity stress conditions by using date palm leaves biochar

Mehrdad Nowroozi^{1*}, Seyed Hassan Tabatabaei³ and Mohamad Reza Nouri³

^{1*} Department of Soil and Water Research, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Bushehr Province, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Bushehr, Iran

*Corresponding author email: nowroozi50@yahoo.com

²⁾ Associate Professor, Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Received: 25-07-2017

Accepted: 11-01-2018

Abstract

A pot experiment carried out to study the effects of date palm leaves biochar on WUE and some other performance components of wheat (*Triticum aestivum* L.) under conjunctive water and salinity stress conditions. The experiment was factorial based on a randomized complete design (RCD) with three replications during one growing season (2015-16). The treatments included biochar application rates (0 and 3% w/w), irrigation interval levels (3, 7 and 12 days) and water salinity levels (1.1, 3.8, 8 and 12 dS/m). The results showed significant ($P < 0.05$) effects of biochar on wheat WUE and yield components under conjunctive water and salinity stress conditions. Mean values of grain yield (GY), shoot dry weight (SDW) and root dry weight (RDW) increased 22%, 38% and 20% respectively, due to biochar addition. Also, mean values of evapotranspiration (ET), water use efficiency (WUE) and soil gravimetric water content before irrigation increased 18.6%, 8.7% and 23% respectively. Values of crop yield response factors to water stress (K_y) for GY, SDW and RDW noticeably decreased in biochar treated pots, indicating reduced crop sensitivity to water deficiency. In addition, biochar addition reduced the slopes of yield reduction and thresholds of soil solution salinity for GY, SDW and RDW indicating the increased crop tolerance to salinity. Therefore, biochar of date palm leaves, might be an effective conditioner to improve crop performance and water productivity particularly under water and salinity stress, although, further studies under field conditions is recommended to verify these results.

Keywords: biochar, salinity stress, water stress, yield-salinity relationships