مدیریت اکوسیستم‌های طبیعی
Management of Natural Ecosystems
دوره ۶، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵، ۳۳-۲۲
Volume 6, Issue 3, Atumn 2026, 22-33
http://emj.ardakan.ac.ir/article_742903.html

تاثیرکاربرد بیوچار بر خصوصیات رشدی سرخارگل (*Echinacea purpurea* (L.) Moench) تحت تنش خشکی

حمیده زارع‌زاده[۱]، محمد جواد قانعی بافقی*[۲]، مصطفی شیرمردی[۳]

مقاله پژوهشی

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران.
hazare1371@gmail.com

۲. دانشیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران.
mjghaneib@ardakan.ac.ir
* نویسنده مسئول

۳. دانشیار، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران.
shirmardi@ardakan.ac.ir

شناسه مقاله: ۲۶۰۵-۱۱۷۲
شماره صفحه پیاپی: ۱۴۱۹-۱۴۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۱۹
انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۰۷/۲۴
زمان پذیرش: ۱۳۰ روز

استناددهی:
زارع‌زاده، ح.، قانعی‌بافقی، م. ج.، و شیرمردی، م. (۱۴۰۵). تاثیرکاربرد بیوچار بر خصوصیات رشدی سرخارگل (*Echinacea purpurea* (L.) Moench) تحت تنش خشکی. مدیریت اکوسیستم‌های طبیعی، ۶(۳)، ۲۲-۳۳.

چکیده

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد و عملکرد گیاهان دارویی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. بیوچار به‌عنوان یک ماده آلی پایدار، می‌تواند با بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، اثرات سوء خشکی را کاهش دهد. هدف این پژوهش بررسی تأثیر سطوح مختلف بیوچار (صفر، ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ تن در هکتار) بر ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاه سرخارگل (*Echinacea purpurea*) تحت تنش خشکی در سه سطح (آبیاری در رطوبت ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه به ترتیب به‌عنوان تنش شدید، متوسط و عدم تنش خشکی) بود. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه اجرا شد. نتایج نشان داد که در شرایط بدون تنش و تنش متوسط، سطوح ۵ و ۷/۵ تن در هکتار بیوچار، بیشترین تأثیر را در افزایش ارتفاع، وزن خشک اندام هوایی و ریشه، تعداد گل و بهبود شاخص‌های فتوسنتزی داشتند. در تنش شدید خشکی، سطوح پایین‌تر بیوچار (۲/۵ و ۵ تن در هکتار) نسبت به سطوح بالا (۱۰ تن در هکتار) اثربخشی بهتری داشتند؛ به‌گونه‌ای که مصرف بیش از حد بیوچار در خشکی شدید منجر به افزایش نشت یونی، کاهش نسبت کلروفیل a/b و افت رشد گردید. به‌نظر می‌رسد بیوچار با بهبود نگهداشت آب خاک، افزایش دسترسی به عناصر غذایی و کاهش تنش اکسیداتیو، می‌تواند تحمل سرخارگل به خشکی را افزایش دهد، اما مقدار مصرف آن باید بر اساس شدت تنش رطوبتی مدیریت شود. استفاده از ۵ تا ۷/۵ تن در هکتار بیوچار در شرایط عدم تنش و تنش متوسط و ۲/۵ تا ۵ تن در هکتار در شرایط تنش شدید توصیه می‌شود. نتایج این پژوهش نشان داد که تنش خشکی تأثیر منفی و معنی‌داری بر رشد رویشی و زیرزمینی گیاه سرخارگل دارد، اما کاربرد بیوچار می‌تواند تا حد زیادی این اثرات نامطلوب را کاهش دهد.

واژگان کلیدی:

سرخارگل، بیوچار، تنش خشکی، رشد رویشی، رنگیزه‌های فتوسنتزی، نشت یونی.

شاپا: ۲۸۲۱-۰۱۸۲
DOI: 10.22034/emj.2026.2089685.1172

۱- مقدمه

خشکی یکی از مهم‌ترین و گسترده‌ترین تنش‌های محیطی است که به‌عنوان دومین عامل کاهش عملکرد محصولات کشاورزی پس از بیماری‌های گیاهی شناخته می‌شود (Biglouei et al., 2010). کمبود آب در بسیاری از مناطق جهان، به‌ویژه نواحی خشک و نیمه‌خشک، اصلی‌ترین محدودکننده تولید گیاهان بوده و افزایش شدت آن به‌طور مستقیم باعث افت رشد رویشی، کاهش اجزای عملکرد، کاهش کارایی مصرف آب و اختلال در رنگیزه‌های فتوسنتزی مانند کلروفیل a و b می‌شود (Attarzadeh et al., 2019 ؛Reddy et al., 2004). از سوی دیگر، تغییرات اقلیمی در دهه‌های اخیر موجب کاهش الگوی بارندگی و افزایش فراوانی دوره‌های خشکی شده که این امر تنش خشکی را به مهم‌ترین پیامد مستقیم تغییرات اقلیمی تبدیل کرده است (Gustafson and Sturtevant, 2013). این تنش علاوه‌بر اثرات فیزیولوژی، منجر به تغییر در مسیرهای متابولیت و افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه مانند ترکیبات فنولی و ترپنوئیدی نیز می‌شود (Manukyan et al., 2011؛ Liu et al., 2011؛de Abreu et al., 2005).

یکی از راهکارهای مدیریتی برای مقابله با اثرات منفی خشکی، بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک به کمک اصلاح‌کننده‌های آلی است. مطالعات نشان داده‌اند که افزودن مواد آلی به خاک با بهبود ساختمان خاک، کاهش چگالی ظاهری، افزایش پایداری خاکدانه‌ها و ارتقای ظرفیت نگهداشت آب، به بهبود رشد گیاه و افزایش کارایی مصرف آب کمک می‌کند (Wang et al., 2020). در این میان، بیوچار به‌عنوان یک ماده اصلاحی پایدار و کم‌هزینه که از پیرولیز مواد زیستی تولید می‌شود، طی سال‌های اخیر مورد توجه گسترده پژوهشگران قرار گرفته است (Kim et al., 2021؛ Azzi et al., 2019). بیوچار با برخورداری از تخلخل زیاد، گروه‌های عاملی فعال و ساختمان پایدار، قادر است ظرفیت نگهداشت آب، توان جذب عناصر غذایی و پایداری کربن آلی خاک را بهبود بخشد. همچنین وجود مقدار قابل‌توجهی عناصر غذایی، به‌ویژه پتاسیم، و ویژگی‌های فیزیکی مطلوب این ماده، موجب ارتقای رشد و فعالیت فیزیولوژی گیاهان می‌شود (Tanure et al., 2019 ؛Adams et al., 2013).

در مناطق خشک، که اثرات خشک‌سالی به‌واسطه تغییرات اقلیمی تشدید شده است، انتظار می‌رود کاربرد بیوچار نقش مؤثری در کاهش تنش خشکی، افزایش مقاومت گیاهان به کم‌آبی و افزایش عملکرد داشته باشد (Joseph et al., 2021). بیوچار به‌ویژه از طریق افزایش جذب نیتروژن و پتاسیم، بهبود تثبیت بیولوژیک نیتروژن در گیاهان لگوم (Van Zwieten et al., 2015؛ Mia et al., 2018) و کاهش آبشویی عناصر غذایی، می‌تواند شرایط تغذیه‌ای و زیستی ریشه را بهبود بخشد. با وجود این، اگرچه بیوچار می‌تواند نیاز آبی را کاهش دهد و موجب افزایش توانایی خاک در نگهداشت آب شود، اما قادر نیست اثرات خشکی را به‌طور کامل حذف کند و میزان اثرگذاری آن به سطح تنش و ویژگی‌های خاک وابسته است (Li and Tan, 2021).

گیاه سرخارگل یا اکیناسه (*Echinacea* spp.) از خانواده *Asteraceae*، شامل نه گونه شناخته شده و بومی آمریکای شمالی است (McGregor, 1968). این جنس از نظر اقتصادی و دارویی اهمیت ویژه‌ای دارد و به دلیل دارا بودن طیف وسیعی از متابولیت‌های ثانویه از جمله فنولیک‌ها، آلکامیدها، پلی‌ساکاریدها، آلکالوئیدها، ترپنوئیدها، ویتامین‌ها و فروکتان‌ها به‌طور گسترده برای تقویت سیستم ایمنی، کاهش التهاب و مقابله با عفونت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Bauer et al., 1988؛ Bauer, 1991). در این میان، گونه‌های *E. purpurea*، *E. angustifolia* و *E. pallida* بیشترین اهمیت فارماکولوژی را داشته و به‌عنوان منابع اصلی داروهای محرک ایمنی معرفی شده‌اند (McKeown and Uses, 1999). ترکیبات فعال موجود در این گیاه توانایی تعدیل سلول‌های ایمنی مانند لنفوسیت‌ها، ماکروفاژها و سلول‌های T را از طریق مکانیسم‌های مستقیم و غیرمستقیم دارند و مطالعات اخیر نشان داده‌اند که اکیناسه حتی می‌تواند آثار مفیدی در مدیریت بیماری‌هایی مانند COVID-۱۹ داشته باشد (Meeran et al., 2021).

در *E. purpurea* گل‌آذین‌ها بزرگ و منفرد بر روی دمگل‌های انتهایی با گلچه‌های زبانه‌ای گسترده قرار دارند. براکته‌ها در چندین ردیف قرار گرفته‌اند. براکته‌ها برگ‌مانند، سخت، نوک‌تیز و خاردار بوده و از گلچه‌های دیسکی مخروطی و قائم بلندتر هستند. گلچه‌های متمایل به قرمز یا گاهی سفید، برجسته و قابل توجه هستند. گلچه‌های زبانه‌ای معمولاً عقیم و حدود ۳ سانتی‌متر طول دارند. معمولاً یک گیاه علفی چندساله است و تا حدود ۴۵ سانتی‌متر رشد می‌کند. برگ‌ها بزرگ، منفرد، متقابل یا متناوب و با حاشیه صاف هستند. طول آن‌ها ۷ تا ۲۰ سانتی‌متر بوده و سطحی زبر دارند. برگ‌ها با حاشیه کامل و بر روی دمبرگ‌های باریک قرار دارند. برش عرضی ریزوم پوسته‌ای نازک و چوبی زردرنگ و متخلخل را نشان می‌دهد که با لکه‌های سیاه مشخص شده است. اکیناسه بومی مناطق مرکزی ایالات متحده و شرق آن بوده و در اروپا نیز کشت می‌شود (Gruenwald et al., 2000).

با توجه به اهمیت دارویی و اقتصادی گیاه اکیناسه و حساسیت آن به تنش خشکی، بررسی راهکارهای مدیریتی مانند کاربرد بیوچار که می‌تواند اثرات منفی خشکی را تعدیل کند، ضروری به‌نظر می‌رسد. بنابراین، این پژوهش با هدف ارزیابی اثر بیوچار و تنش خشکی بر ویژگی‌های رشدی گیاه سرخارگل انجام شد.

۲- مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در گلخانه تحقیقاتی شهرک صنعتی میبد در استان یزد اجرا شد. شهرستان میبد در طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۲ دقیقه و ۱۰ ثانیه و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۱۴ دقیقه و ۴ ثانیه واقع شده است که با متوسط بارندگی سالانه ۶۲ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه ۱۹ درجه سانتی‌گراد، جزء مناطق گرم و خشک ایران به حساب می‌آید. آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار روی گیاه سرخارگل اجرا شد.

تیمارهای آزمایش شامل بیوچار در پنج سطح (صفر، ۲/۵، ۵ ، ۷/۵ و ۱۰ تن در هکتار) و تنش خشکی در سه سطح (آبیاری در ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد ظرفیت مزرعه به ترتیب به عنوان شرایط عدم تنش، تنش متوسط و تنش شدید) با سه تکرار اجرا شد.

بیوچار مورد نیاز، از ضایعات حاصل از هرس درختان انار در دمای ۵۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد در شرایط بدون هوا تهیه و پس از خرد کردن از الک ۲ میلی‌متر عبور داده و بر اساس تیمارهای مورد نظر با عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک مخلوط گردید. بافت خاک به روش هیدرومتری، رطوبت ظرفیت مزرعه (FC) با دستگاه صفحات فشاری، pH و هدایت الکتریکی خاک (EC) در عصاره اشباع اندازه‌گیری شد. EC و pH بیوچار در عصاره یک به یک اندازه‌گیری شد.

عملیات کاشت در کرت‌هایی با ابعاد ۱/۵×۱/۵ متر با فاصله ۳۰ سانتی‌متر روی ردیف و بین ردیف‌ها انجام شد. با شش برگی شدن بوته‌ها اعمال تنش خشکی آغاز شد. برای اعمال تنش خشکی، با استفاده از دستگاه TDR، زمان آبیاری تعیین می‌شد (Bitterlich et al., 2018). به این ترتیب که کرت‌ها به صورت غرقابی آبیاری می‌شد و پس از آن روزانه رطوبت حجمی خاک با TDR تعیین و با داشتن مقدار FC و وزن مخصوص ظاهری خاک، زمانی که رطوبت به ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد FC می‌رسید آبیاری انجام می‌گرفت (Teixeira et al., 2024). اعمال تنش سه ماه به طول انجامید. برخی از پارامترها قبل از پایان دوره تعیین شدند و در پایان دوره همهٔ بوته‌ها از محل طوقه جدا و ریشه‌ها از بستر کشت جدا شد.

۲-۱- اندازه‌گیری پارامترهای مورفوفیزیولوژی

محتوای نسبی آب برگ (RWC): از هر پایه پنج برگ کاملا توسعه تهیه و وزن برگ تازه با ترازوی دقیق تعیین شد. سپس برگ‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر غوطه‌ور شدند و پس از این مدت وزن برگ اشباع اندازه‌گیری شد. برگ‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و وزن خشک برگ به دست آمد. با استفاده از رابطه (۱) RWC تعیین شد (Korkmaz et al., 2010). در این رابطه FW، DW و TW به ترتیب وزن برگ تازه، وزن برگ خشک و وزن برگ اشباع است.

$$RWC = \frac{FW - DW}{TW - DW} * 100$$ رابطه (۱)

جهت اندازه‌گیری شاخص سطح، طول و محیط برگ از دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ (مدل WinArea_UT_11 ساخت ایران) استفاده شد.

در پایان دوره تنش تعداد گل و شاخه جانبی برای هر تکرار شمارش شد.

جهت اندازه‌گیری شاخص نشت یونی از روش (۱۹۹۶) استفاده شد. بدین منظور از هر تکرار، آخرین برگ کاملاً توسعه‌یافته جدا و از هر یک، دو قطعه با ابعاد ۰/۵ سانتی‌متر مربع تهیه شد. نمونه‌ها درون فالکون‌تیوب‌هایی حاوی ۲۵ میلی‌لیتر آب مقطر به‌مدت ۲۴ ساعت روی شیکر قرار داده شد. سپس به وسیلهٔ دستگاه EC متر دیجیتالی (مدل Metrohm 644)، هدایت الکتریکی اولیه (EC_1) به‌دست آمد. نمونه‌ها به‌مدت ۲۰ دقیقه در داخل اتوکلاو با دمای ۱۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد قرار داده و بعد از دو ساعت شیک شدن، مجدداً هدایت الکتریکی (EC_2) آن‌ها اندازه‌گیری شد، درصد نشت یونی از طریق رابطهٔ (۲) محاسبه شد.

$$\text{درصد نشت یونی} = \frac{EC1}{EC2} * 100$$ رابطه (۲)

پس از جداسازی اندام هوایی از ریشه، به‌منظور اندازه‌گیری وزن خشک، بوته و ریشه به‌صورت مجزا در پاکت‌های کاغذی قرار داده شد و به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۵ درجهٔ سانتی‌گراد درون آون قرار گرفت تا کاملا خشک شوند، سپس با ترازوی حساس وزن شد. ارتفاع گیاه در پایان دوره‌ی تنش اندازه‌گیری شد. پس از جداسازی گل از ساقه مربوط به هر تکرار (به‌صورت مجزا) هر گل در پاکت‌های کاغذی قرار داده شد و به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد در آون قرار گرفت تا کاملاً خشک شوند. سپس با ترازوی حساس وزن شد. در پایان دوره تنش برای اندازه‌گیری قطر یقه از دستگاه کولیس دیجیتال استفاده شد.

کلروفیل a، b و کل و کارتنوئید به روش Arnon (۱۹۶۷) و اندازه‌گیری جذب به ترتیب در طول موج‌های ۶۶۳، ۶۴۵ و ۴۷۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل BT600 Plus Canada) انجام شد و در روابطه (۳ تا ۵) قرار گرفت (Arnon, 1967).

رابطه (۳-۵): کلروفیلa و b

$$\text{Chlorophyll a} = (81.1 \times A669 + 1.63 \times A654)$$ رابطه (۳)

$$\text{Chlorophyll b} = (81.3 \times A654 - 5.61 \times A669)$$ رابطه (۴)

$$\text{Carotenoides} = 100(A470) - 3.27(\text{mg chl. a}) - 104(\text{mg chl. b})/227$$ رابطه (۵)

آنالیز واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.2 صورت گرفت و مقایسهٔ میانگین‌ها به روش آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

۳- نتایج

۳-۱- ویژگی‌های خاک و بیوچار مورد استفاده

ویژگی‌های بیوچار و خاک مورد استفاده به شرح جدول (۱) می‌باشد.

جدول(۱): خصوصیات خاک و بیوچار آزمایش

پارامتر	واحد اندازه‌گیری	خاک	بیوچار
pH	---	۷/۸	۹/۹۷
EC	$mS.cm^{-1}$	۱/۷	۳/۲۱
OC	درصد	۰/۵۴	۳۵/۵
رس	درصد	۳۲/۶	-
سیلت	درصد	۴۹	-
شن	درصد	۸/۴	-
Texture		Silty Clay Loam	-
FC	درصد	۲۹/۸	
وزن مخصوص ظاهری خاک	g/cm^3	۱/۴۲	۰/۸۷
Ash content	درصد	-	۶۴/۵
Biochar yield	درصد	-	۳۵/۵

۳-۲- صفات مورفولوژی

نتایج آنالیز واریانس نشان داد اثر متقابل تیمارها بر تمام صفات مورد بررسی در سطح یک درصد معنی دار بود. اثر بیوچار بر طول ریشه، طول و محیط و مساحت برگ معنی‌دار نبود ولی بر وزن خشک گل و تعداد شاخه جانبی در سطح پنج درصد و سایر پارامترها در سطح یک درصد معنی‌دار بود. اثر خشکی بر متغیرهای ارتفاع گیاه، وزن خشک گل و متغیرهای طول و محیط و سطح برگ معنی‌دار نبود ولی در سایر صفات مورد بررسی در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲).

جدول (۲): نتایج آنالیز واریانس اثر تیمارها بر صفات مورد ارزیابی در سرخارگل

منابع تغییر	درجهٔ آزادی (df)	میانگین مربعات					
		ارتفاع گیاه	وزن خشک اندام هوایی	طول ریشه	وزن خشک ریشه	تعداد گل	وزن خشک گل
بیوچار	۴	۵۲۵/۴۳**	۱۱۴۲/۷۹**	۳۳/۸^{ns}	۳۱/۳۶**	۳۹۱/۴۱**	۱/۴۵*
خشکی	۲	۷۵/۵۴^{ns}	۳۳۴۷/۸**	۹۴/۱۶**	۱۴۴/۵۹**	۴۱۵/۶۱**	۰/۱۹^{ns}
بیوچار×خشکی	۸	۳۸۲/۳۲**	۱۸۷۰/۵۱**	۶۸/۹۱**	۸۷/۰۹**	۲۳۷/۱۲**	۲/۳۱**
تکرار	۲	۷/۷۱^{ns}	۲۰۸/۲۹^{ns}	۵/۵۱^{ns}	۵/۶^{ns}	۱۲/۱۱^{ns}	۰/۱۶^{ns}
خطا	۲۸	۱۱۱/۱۷	۱۵۹/۴۳	۱۴/۴۸	۳/۸	۱۴/۹۶	۰/۴۷
کل	۴۴	–	–	–	–	–	–
CV (درصد)	–	۱۶/۶	۲۵/۶۳	۱۸/۶۴	۲۲/۹۶	۲۸/۷	۲۷/۷۹

^{ns}: عدم معنی‌دار، **: معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، *: معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد

ادامه جدول (۲): نتایج آنالیز واریانس اثر تیمارها بر صفات مورد ارزیابی در سرخارگل

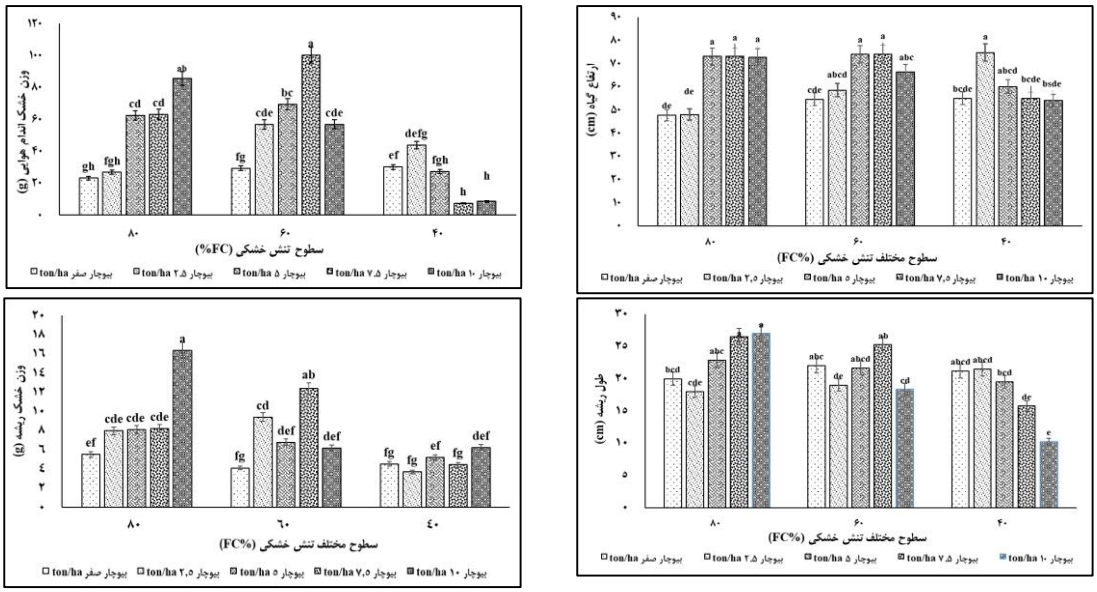
منابع تغییر	درجهٔ آزادی (df)	میانگین مربعات				
		قطر یقه	تعداد شاخه جانبی	طول برگ	محیط برگ	مساحت برگ
بیوچار	۴	۱۴۹/۵۱**	۱۰/۴۹*	۶۸۵/۳۴^{ns}	۲۲۹۰/۹۲^{ns}	۶۴۶۰۱۲/۰۲^{ns}
خشکی	۲	۶۶۹/۴۳**	۳۷/۶۴**	۲۷۸/۵۷^{ns}	۴۰۵۷/۹۵^{ns}	۲۸۸۷۸۷/۰۷^{ns}
بیوچار×خشکی	۸	۱۱۶/۸۹**	۱۷/۷۹**	۱۳۹۶/۲۳**	۹۲۰۹/۲۳**	۲۲۵۱۹۴۰/۴**
تکرار	۲	۴/۸۴^{ns}	۱/۹۴^{ns}	۱۲۰/۱۳^{ns}	۴۲۸۴/۰۳^{ns}	۷۳۱۹۶۸/۵^{ns}
خطا	۲۸	۳۵/۳	۳/۰۱	۲۷۷/۴۹	۱۹۱۴/۸۷	۴۲۷۹۱۱/۹۴
کل	۴۴	–	–	–	–	–
cv (درصد)	–	۲۰/۷۱	۲۴/۸۳	۱۵/۰۴	۱۴/۶۶	۲۷/۴۵

^{ns}: عدم معنی‌دار، **: معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، *: معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد

۳-۳- ارتفاع، وزن خشک اندام هوایی، طول ریشه و وزن خشک ریشه

ارتفاع شاخساره تحت شرایط خشکی کاهش یافت، اما کاربرد بیوچار توانست این کاهش را تعدیل کند. در سطح ۸۰ درصد FC، کاربرد بیوچار ۵ و ۷/۵ و ۱۰ تن موجب افزایش ۶۰ درصدی نسبت به شاهد شد. در سطح ۶۰ درصد FC نیز روند مشابهی دیده شد و تیمارهای بیوچار ۵ و ۷/۵ تن بیشترین ارتفاع (۷۰ و ۷۲ سانتی‌متر) را داشتند که افزایش ۱۷ درصدی را نشان می‌دهد. در شدت خشکی ۴۰ درصد FC، بیشترین ارتفاع در تیمارهای ۲/۵ و ۵ تن (۷۴ و ۶۰ سانتی‌متر) مشاهده شد که به ترتیب ۳۰ و ۶ درصد نسبت به شاهد افزایش داشتند (شکل ۱).

نتایج نشان داد که تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی سرخارگل شد. در شرایط ۸۰ درصد FC، وزن خشک اندام هوایی از ۲۳ گرم در شاهد به بیش از ۸۵ گرم (حدود دویست درصد) در تیمار بیوچار ۱۰ تن افزایش یافت. در ۶۰ درصد FC نیز بیشترین مقدار وزن خشک در تیمار ۷/۵ تن بیوچار (۱۰۰ گرم) مشاهده شد. در شدت خشکی ۴۰ درصد FC، وزن خشک اندام هوایی به‌طور قابل توجهی کاهش یافت و مقادیر کمتر از ۱۰ گرم در تیمار شاهد و بیوچار ۱۰ تن ثبت شد، اما تیمار ۲/۵ تن بیوچار همچنان افزایش نسبی وزن خشک (۴۰ درصد) را نسبت به شاهد نشان داد (شکل ۱).



شکل (۱): مقایسهٔ میانگین اثر متقابل تیمارهای بیوچار و تنش خشکی بر ارتفاع گیاه، وزن خشک اندام هوایی، طول ریشه و وزن خشک ریشه بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد و حروف لاتین مشترک، نشان‌دهندهٔ عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین تیمارها است.

طول ریشه نیز الگوی مشابهی را نشان داد. نتایج مقایسه میانگین نشان داد که در ۸۰ درصد FC، تیمارهای بیوچار ۵ و ۷/۵ و ۱۰ تن بیشترین طول ریشه (۳۵ درصد افزایش نسبت به شاهد) را ایجاد کردند. در سطح ۶۰ درصد FC، بیشترین طول ریشه در تیمار ۷/۵ تن ثبت شد (۳۰ درصد افزایش نسبت به شاهد). در شدت خشکی ۴۰ درصد FC، طول ریشه در تمام تیمارها کاهش یافت و تیمار بیوچار ۱۰ تن پایین‌ترین مقدار (۵۰ درصد کاهش نسبت به شاهد) را نشان داد (شکل ۱).

وزن خشک ریشه نیز به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تنش خشکی و بیوچار قرار گرفت. در ۸۰ درصد FC، تیمار بیوچار۱۰ تن با بیش از ۱۶ گرم بیشترین وزن خشک را داشت و نسبت به شاهد اختلاف معنی‌دار نشان داد. در ۶۰ درصد FC، بیشترین وزن خشک ریشه در تیمار بیوچار ۷/۵ تن (حدود ۱۳ گرم) بود. در ۴۰ درصد FC، وزن خشک ریشه کاهش یافت و به ۳–۶ گرم رسید، با این حال تیمار بیوچار ۱۰ تن توانست مقدار بیشتری نسبت به شاهد ایجاد کند (شکل ۱).

۳-٤- تعداد گل، وزن خشک گل، قطر یقه،تعداد شاخه جانبی

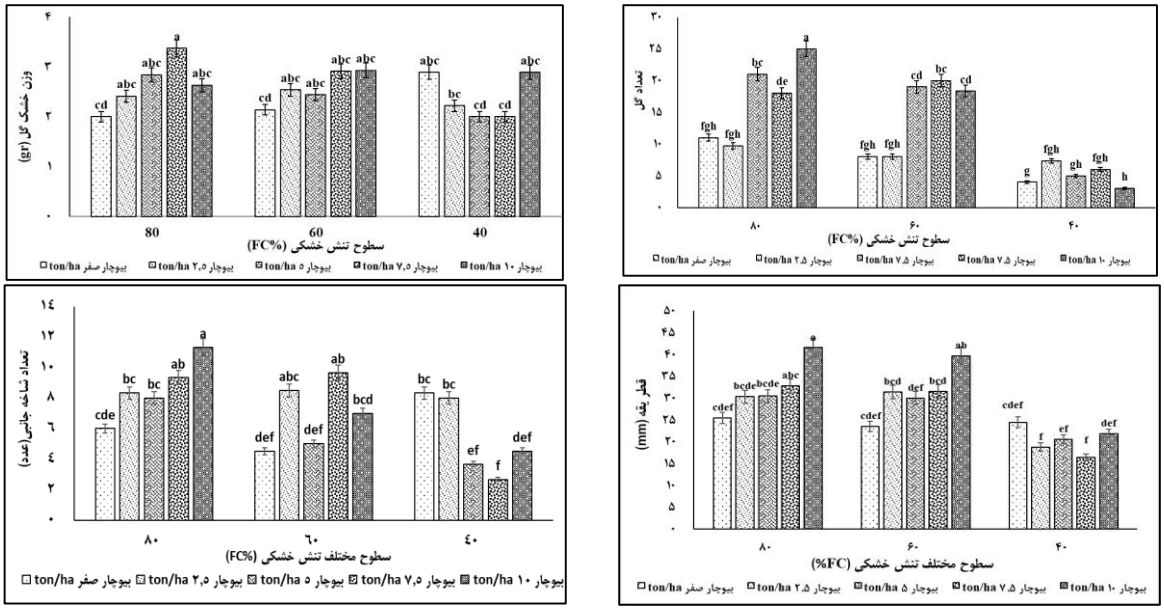
بر اساس نتایج مقایسهٔ میانگین اثر متقابل تیمارها، بیش‌ترین تعداد گل به‌ترتیب در تیمار بدون تنش خشکی و ۱۰ تن بر هکتار بیوچار (۳۸ عدد) حاصل شد. در این سطح از خشکی کاربرد سایر تیمارهای ۵ و ۷/۵ تن بر هکتار بیوچار نیز افزایش بیش از ۱۰۰ درصدی تعداد گل نسبت به شاهد را ایجاد کرد. در خشکی متوسط ۶۰ درصد رطوبت ظرفیت مزرعه، نیز مشابه شرایط بدون خشکی بود و سه تیمار ۵، ۷/۵ و ۱۰ تن بر هکتار بیوچار افزایش معنی‌داری در تعداد گل نسبت به شاهد ارائه کردند. در تیمار خشکی شدید یعنی ۴۰ درصد رطوبت ظرفیت مزرعه، هیچ یک از تیمارهای بیوچار بطور معنی‌داری تعداد گل را نسبت به شاهد افزایش نداند. در مجموع کاهش چشم‌گیر تعداد گل را با افزایش تنش خشکی می‌توان دید (شکل ۲). تیمار ۷/۵ تن بر هکتار بیوچار، وزن خشک گل را در شرایط عدم تنش نسبت به شاهد افزایش داد. در تنش‌های خشکی ۶۰ و ۴۰ درصد ظرفیت مزرعه، کاربرد بیوچار اثر معنی‌داری نداشت (شکل ۲).

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین مقدار قطر یقه در تیمارهای بدون خشکی و خشکی متوسط با کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوچار مشاهده شد. سایر تیمارهای بیوچار در این دو تیمار و تیمار خشکی شدید با شاهد تفاوت معنی‌داری نشان ندادند (شکل ۲). بیشترین تعداد شاخه جانبی در تیمار ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه مشاهده شد و در این سطح تنش خشکی، تیمارهای ۷/۵ و ۱۰ تن در هکتار بیوچار، به‌طور معنی‌داری تعداد شاخه را نسبت به شاهد افزایش داد. در خشکی متوسط تعداد شاخه جانبی به‌جز در تیمار ۵ تن بر هکتار در بقیه تیمارها نسبت به شاهد افزایش معنی‌دار نشان شد و در خشکی شدید، به‌جز تیمار ۲/۵ بر هکتار بیوجار، تمام تیمارها نسبت به شاهد کاهش معنی‌داری داشتند (شکل ۲).

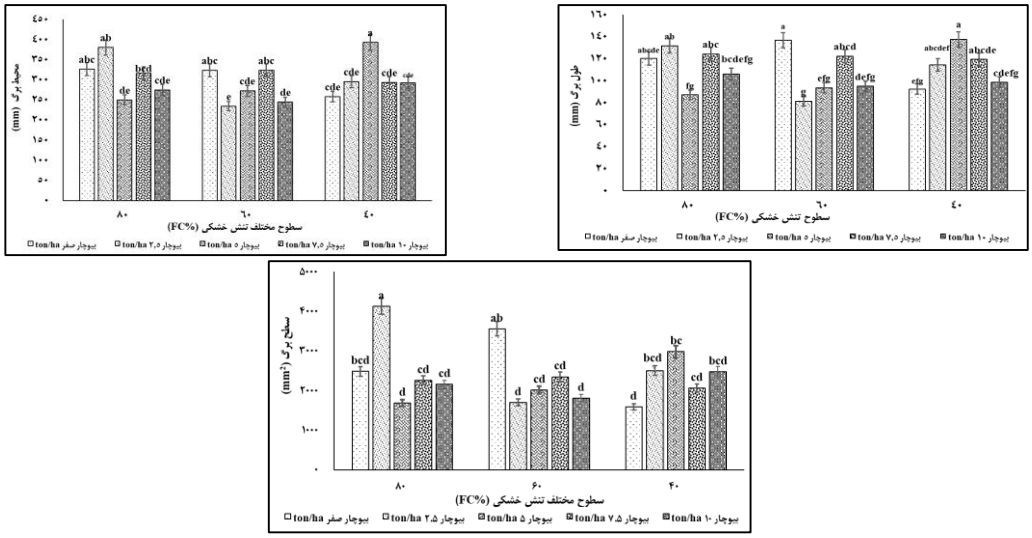
۳-۵- طول، محیط و سطح برگ

نتایج مقایسهٔ میانگین اثر متقابل تیمارها نشان می‌دهد که افزایش معنی‌دار طول و محیط برگ نسبت به شاهد فقط در خشکی شدید و کاربرد ۵ تن در هکتار بیوچار مشاهده شد. در تنش شدید خشکی، با کاربرد ۵ تن در هکتار بیوچار، طول برگ و محیط برگ به ترتیب ۴۸/۶۵ و ۵۲/۴۲ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. این تیمار محیط برگ را نیز نسبت به شاهد افزایش داد (شکل ۳). در شرایط عدم تنش، کاربرد ۲/۵ تن در هکتار بیوچار سطح

برگ را نسبت به شاهد ۶۶/۴۳ درصد افزایش داد. در خشکی متوسط، تمام تیمارها نسب به شاهد کاهش معنی دار داشتند. در خشکی شدید، کاربرد ۵ تن در هکتار بیوچار، توانست این صفت را ۸۷/۷۸ درصد نسبت به شاهد افزایش دهد (شکل ۳).



شکل (۲): مقایسهٔ میانگین اثر متقابل تیمارهای بیوچار و تنش خشکی بر تعداد گل، وزن خشک گل، قطر یقه و تعداد شاخه جانبی بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد و حروف لاتین مشترک، نشان‌دهندهٔ عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین تیمارها است.



شکل (۳): مقایسهٔ میانگین اثر متقابل تیمارهای بیوچار و تنش خشکی بر طول برگ، محیط برگ و سطح برگ بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد و حروف لاتین مشترک، نشان‌دهندهٔ عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین تیمارها است.

۳-۵- صفات فیزیولوژی

آنالیز واریانس داده‌ها نشان داد اثر متقابل تیمارها و اثر اصلی خشکی بر صفت محتوای نسبی آب برگ در سطح احتمال پنج درصد و بر نشت یونی و کاروتنوئید در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. اثر اصلی بیوچار بر هرسه صفت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳).

۳-۶- نشت یونی و کاروتنوئید

نتایج نشان داد که نشت یونی برگ سرخارگل به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تنش خشکی و سطوح بیوچار قرار گرفت. در شرایط عدم تنش، تیمار شاهد بدون بیوچار بیشترین نشت یونی را نشان داد. با کاربرد بیوچار در سطوح ۲/۵ و ۵ تن در هکتار، نشت یونی به‌طور قابل توجهی کاهش یافت اما کاربرد ۷ و ۱۰ تن در هکتار مجدداً افزایش نسبی نشت یونی را منجر شد (شکل ۴). در سطح تنش متوسط، نشت یونی در تیمارهای مختلف با شاهد اختلاف

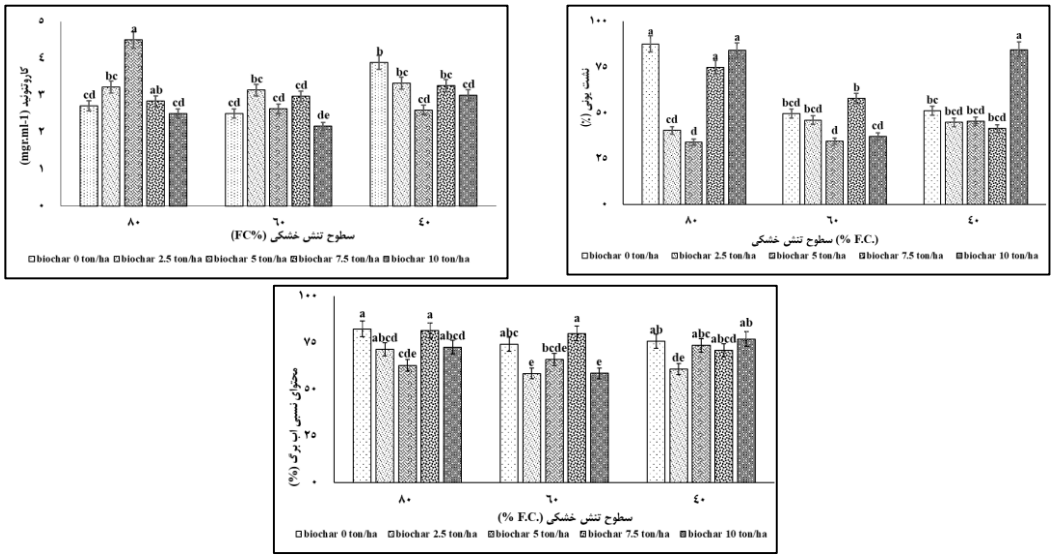
معنی‌داری نشان ندادند. در تنش شدید، تیمارهای کاربرد ۲/۵، ۵ و ۷/۵ تن در هکتار بیوچار اختلاف معنی‌داری با شاهد نشان ندادند در حالی‌که بیوچار ۱۰ تن نشت یونی را به‌طور معنی‌داری افزایش داد (۶۰ درصد افزایش) (شکل ۴).

جدول (۳): نتایج آنالیز واریانس اثر تیمارها بر صفات نشت یونی, محتوای نسبی آب برگ و کاروتنوئید

منابع تغییر	درجهٔ آزادی (df)	میانگین مربعات		
		نشت یونی	کاروتنوئید	محتوای نسبی آب برگ
بیوچار	۴	۱۵۰۲/۹۶**	۱/۲۹**	۳۴۴/۳۴**
خشکی	۲	۱۳۸۳/۶۸**	۵/۳۲**	۱۷۳/۳۶*
بیوچار*خشکی	۸	۸۰۴/۶۲**	۱۰/۷۴**	۱۲۲/۷۲*
تکرار	۲	۹۲/۶۲ns	۰/۴ns	۲۶/۲۴ns
خطا	۲۸	۹۶/۳	۰/۲۶	۴۹/۴۵
کل	۴۴	–	–	–
cv (درصد)	–	۱۸/۱	۱۶/۷۳	۹/۹

ns: عدم معنی‌دار، **: معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، *: معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد

کاروتنوئید برگ نیز به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثر متقابل تنش خشکی و بیوچار قرار گرفت. در ۸۰ درصد FC، بیشترین مقدار کاروتنوئید در سطح بیوچار ۵ تن در هکتار مشاهده شد (شکل ۴). در تنش متوسط و شدید کاربرد بیوچار اثر مثبتی نشان نداد (شکل ۴). محتوای نسبی آب برگ نیز به‌طور معنی‌دار تحت تأثیر اثر متقابل خشکی و بیوچار قرار گرفت. حضور بیوچار به همراه افزایش تنش خشکی خصوصا در خشکی شدید (۴۰ درصد FC) از کاهش معنی‌دار محتوای نسبی آب برگ جلوگیری کرد. با این وجود کاهش معنی‌داری در محتوای نسبی آب برگ در تیمار بدون خشکی (۸۰ درصد FC) و خشکی متوسط (۶۰ درصد FC) در تیمارهای ۲/۵، ۵ و ۱۰ تن بر هکتار مشاهده شد (شکل ۴).



شکل (٤): مقایسهٔ میانگین اثر متقابل تیمارهای بیوچار و تنش خشکی بر نشت یونی، محتوای نسبی آب برگ و کاروتنوئید بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد و حروف لاتین مشترک، نشان‌دهندهٔ عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین تیمارها است.

۳-۷- کلروفیل a و b

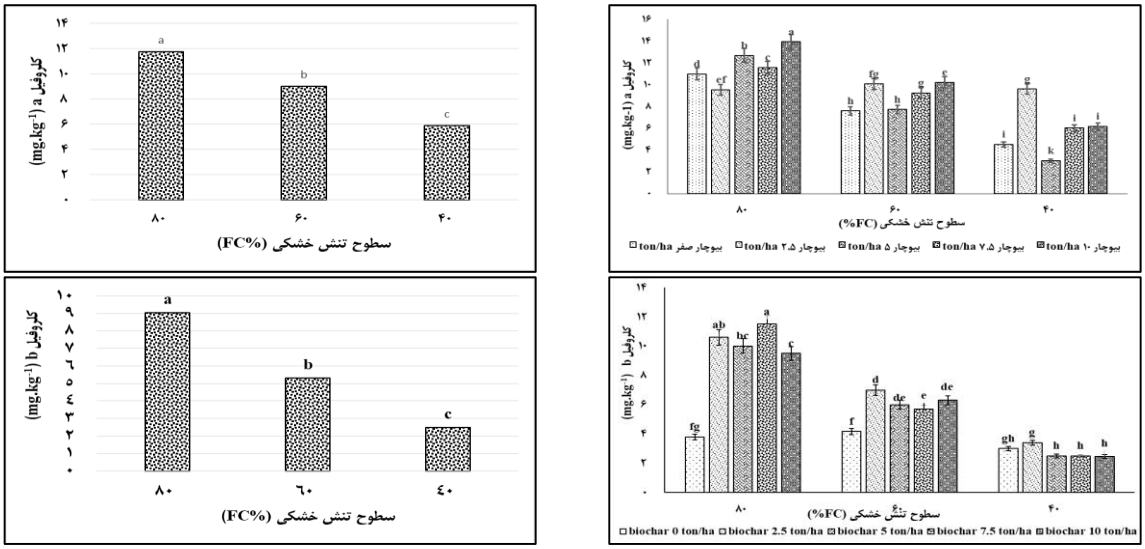
با توجه به جدول (۴)، نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد که اثر متقابل تیمارهای بیوچار و خشکی و همچنین اثر اصلی این تیمارها بر صفات کلروفیل a، کلروفیل b در سطح یک درصد معنی‌دار است.

نتایج نشان داد که با کاهش رطوبت خاک از شرایط بدون تنش به حداکثر تنش مقدار کلروفیل a به طور معنی‌داری کاهش یافت. در شرایط رطوبتی مناسب، بیشترین مقدار کلروفیل a در تیمارهای دارای سطوح بالاتر بیوچار مشاهده گردید. در شرایط تنش متوسط نیز تیمارهای کاربرد ۲/۵، ۷/۵ و ۱۰ تن در هکتار بیوچار مقادیر بیشتری از کلروفیل a نسبت به شاهد نشان دادند. در تنش شدید، مقدار کلروفیل a با کاربرد بیوچار کاهش یافت فقط در تیمار ۲/۵ تن بر هکتار افزایش نشان داد. بیشترین مقدار کلروفیل b در شرایط عدم تنش و کمترین مقدار در تنش شدید مشاهده شد. کاربرد بیوچار در تنش بدون خشکی و خشکی متوسط باعث افزایش کلروفیل b شد و در سطح تنش خشکی شدید نیز استفاده از بیوچار توانست از کاهش کلروفیل b جلوگیری کند (شکل ۵).

جدول (٤): نتایج آنالیز واریانس، اثر تیمارها بر صفات کلروفیل a و کلروفیل b

منابع تغییر	درجهٔ آزادی (df)	میانگین مربعات	
		کلروفیل a	کلروفیل b
بیوچار	۴	۱۲/۷۹**	۴۸/۷۱**
خشکی	۲	۳۳/۹۲**	۸۹/۸۳**
بیوچار*خشکی	۸	۸۷/۱۷**	۳۱/۴۷**
تکرار	۲	۰/۱۵ns	۰/۱۱ns
خطا	۲۸	۰/۱	۰/۱۳
کل	۴۴	–	–
CV (درصد)	–	۳/۳۱	۶/۰۹

ns: عدم معنی‌دار، **: معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، *: معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد



شکل (٥): مقایسهٔ میانگین اثر متقابل تیمارهای بیوچار و تنش خشکی بر کلروفیل a و b بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد. حروف لاتین مشترک، نشان‌دهندهٔ عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین تیمارها است.

٤- بحث

در تحقیق حاضر با هدف بررسی اثر سطوح مختلف بیوچار بر خصوصیات رشدی سرخارگل در شرایط تنش خشکی، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه طراحی شد که مشتمل بر تیمارهای صفر (شاهد)، ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد وزنی بیوچار در خاک تحت سه وضعیت تنش خشکی شامل ۸۰ (بدون تنش)، ۶۰ و ۴۰ درصد رطوبت ظرفیت مزرعه (F.C) بود و ویژگی‌های رشدی این گیاه پس از اندازه‌گیری مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت.

نتایج نشان داد که تنش خشکی اثر منفی و معنی‌داری بر کلیه صفات رشدی سرخارگل، شامل وزن خشک اندام هوایی، ارتفاع شاخساره، وزن خشک ریشه و طول ریشه دارد. کاهش رطوبت خاک موجب کاهش فشار تورگور، محدودیت تقسیم و طویل‌شدن سلولی، کاهش فتوسنتز خالص و کاهش انتقال مواد فتوسنتزی می‌شود (Abdelaal et al., 2022). بنابراین، افت رشد هوایی و زیرزمینی گیاه در شدت‌های بالاتر تنش کاملاً قابل انتظار است. کاربرد بیوچار نقش مهمی در کاهش اثرات منفی خشکی داشت. بیوچار در سطوح ۵ و ۷/۵ تن در هکتار مؤثرترین عملکرد را در اغلب صفات نشان داد، به‌ویژه در شرایط بدون تنش و تنش متوسط. بهبود وزن خشک اندام هوایی و ارتفاع شاخساره در این تیمارها را می‌توان به افزایش ظرفیت نگهداشت آب، بهبود ساختار خاک، افزایش تخلخل مفید و فراهمی عناصر غذایی نسبت داد (کیانی و همکاران، ۱۴۰۳؛ Alotaibi et al., 2023). همچنین، افزایش فعالیت میکروبی در حضور بیوچار می‌تواند فرآیند معدنی‌سازی و دسترسی به نیتروژن را تقویت کرده و در نتیجه، رشد بخش هوایی را بهبود بخشد (واحدی و همکاران، ۱۳۹۸).

در مورد ریشه، بیوچار موجب افزایش قابل توجه طول و وزن خشک ریشه شد. این اثر احتمالاً ناشی از کاهش مقاومت فیزیکی خاک، بهبود تهویه و ایجاد شرایط مناسب برای رشد و گسترش ریشه است (Alotaibi et al., 2023). افزایش رشد ریشه موجب افزایش سطح جذب آب و مواد غذایی و در نهایت بهبود رشد شاخساره می‌شود (حسین اللهی و همکاران، ۱۴۰۲).

نکته قابل توجه این که در شرایط خشکی با شدت بالا (۴۰ درصد ظرفیت مزرعه)، سطوح ۲/۵ یا ۵ تن بیوچار نسبت به سطوح بالاتر عملکرد بهتری از بسیاری از صفات ارائه دادند. این موضوع به این دلیل است که کاربرد بیوچار در سطوح بالا ممکن است با افزایش بیش از حد تخلخل، افزایش pH و عدم فراهمی برخی عناصر منجر به کاهش رشد گیاه شود (منصوری و همکاران، ۱۴۰۴) بنابراین، بیوچار می‌تواند ابزار مناسبی برای افزایش تحمل

سرخارگل به خشکی و بهبود رشد گیاه در مناطق خشک باشد. به طور کلی، نتایج نشان داد که سطوح ۵ و ۷/۵ تن در هکتار بیوچار در شرایط تنش متوسط و بدون تنش عملکرد بهتری ارائه می‌دهند، در حالی که در شرایط تنش شدید، سطوح پایین‌تر (۲/۵ تا ۵ تن) مناسب‌تر هستند.

افزایش نشت یونی تحت تنش، بیانگر آسیب غشاء سلولی و افزایش نفوذپذیری آن است؛ پدیده‌ای که معمولاً در نتیجه تجمع گونه‌های فعال اکسیژن، پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی و کاهش پایداری ساختارهای فسفولیپیدی رخ می‌دهد (Abdelaal et al., 2022). در این مطالعه، بالاترین میزان نشت یونی در شرایط خشکی شدید و در تیمار بیوچار ۱۰ تن مشاهده شد که نشان می‌دهد کاربرد بیش از حد بیوچار، به‌ویژه در رطوبت پایین، نه تنها نقش حفاظتی واضحی ندارد، بلکه ممکن است با تغییر خواص فیزیکوشیمیایی خاک (مانند افزایش بیش از حد تخلخل و pH و تغییر تعادل یونی) حساسیت غشاء را تشدید کند. از سوی دیگر، کاربرد بیوچار در سطوح متوسط (۲/۵ تا ۵ تن در هکتار) در بسیاری از موارد توانست نشت یونی را کاهش دهد؛ به‌ویژه در شرایط ۸۰ و ۶۰ درصد ظرفیت مزرعه که کمترین مقادیر نشت یونی در این تیمارها مشاهده شد. این موضوع احتمالاً ناشی از بهبود وضعیت رطوبتی ریزمحیط ریشه، افزایش ظرفیت نگهداشت آب و فراهمی بهتر عناصر غذایی است که در نهایت موجب حفظ یکپارچگی غشاء و کاهش آسیب اکسیداتیو می‌شود. مشابه این نتایج در مطالعات مختلف روی گیاهان دارویی و زراعی گزارش شده که بیوچار با بهبود شرایط آبی و تغذیه‌ای، پایداری غشاء را در شرایط خشکی افزایش می‌دهد (حسین الهی و همکاران، ۱۴۰۴؛ دیندارلو و مدن دوست، ۱۴۰۴).

الگوی تغییرات RWC نیز این یافته‌ها را تأیید می‌کند. کاهش RWC در تیمار شاهد تحت تنش نشان‌دهنده اختلال در روابط آب و کاهش توانایی گیاه در حفظ وضعیت آبداری برگ است. کاربرد بیوچار به‌ویژه در سطح ۷/۵ تن در شرایط خشکی متوسط موجب افزایش معنی‌دار RWC شد که بیانگر نقش بیوچار در بهبود جذب آب و کاهش پتانسیل آب خاک است. بیوچار با داشتن سطح ویژه بالا و تخلخل مناسب، همانند یک اسفنج عمل کرده و آب خاک را در دسترس ریشه نگه می‌دارد؛ در نتیجه، گیاه در دوره‌های تنش کوتاه‌مدت یا متوسط قادر به حفظ وضعیت آبداری برگ و تداوم فعالیت فتوسنتزی است (حسنی‌پور و همکاران، ۱۴۰۴). محققین زیادی بر بهبود شرایط رشدی گیاه با کاربرد بیوچار تأکید کرده‌اند (محدثی و همکاران، ۱۴۰۲؛ Siddiqui et al., 2015؛ Nadeem et al., 2017؛ Langeroodi et al., 2019) با این حال، در تنش شدید (۴۰ درصد FC)، تفاوت بین تیمارها کمتر شد و تنها توانستند تا حدودی RWC را در سطحی قابل قبول حفظ کنند، که نشان می‌دهد در کمبود شدید رطوبت، ظرفیت جبرانی بیوچار نیز محدود است.

رفتار کاروتنوئیدها در این تحقیق تا حدی پیچیده‌تر بود. در رطوبت مطلوب (۸۰ درصد FC)، سطح بیوچار ۵ تن باعث بیشترین تجمع کاروتنوئید شد. کاروتنوئیدها نقش کلیدی در حفاظت فتوسیستم‌ها در برابر تنش اکسیداتیو دارند و افزایش آنها در شرایط تنش (مانند نور زیاد یا کمبود آب) می‌تواند نشانه‌ای از افزایش پاسخ آنتی‌اکسیدانی گیاه باشد (Demmig-Adams et al., 2025). در تنش متوسط، کاروتنوئیدها در آستانه ثابتی حفظ شدند، اما در تنش شدید، شاهد بالاترین مقدار کاروتنوئید را نشان داد. این افزایش در شرایط خشکی شدید احتمالاً یک پاسخ سازگاری است که طی آن گیاه کاروتنوئید بیشتری سنتز می‌کند. در عین حال، بیوچار در این سطح خشکی نتوانست افزایش قابل توجهی در کاروتنوئید ایجاد کند، شاید به این دلیل که بخشی از اثر حفاظتی آن از طریق بهبود وضعیت آبی و کاهش تنش اعمال شده و نیازی به افزایش شدید کاروتنوئید در حضور بیوچار احساس نمی‌شود. افزایش کاروتنوئید در حضور تنش خشکی توسط محققین قبلی مانند Jahns and Holzwarth (۲۰۱۲) نیز اشاره شده است.

کاهش محتوای کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل در شرایط تنش خشکی احتمالاً به دلیل تخریب رنگیزه‌های فتوسنتزی و آسیب به ساختار کلروپلاست‌ها است. تنش خشکی با افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن و تشدید تنش اکسیداتیو، موجب تخریب مولکول‌های کلروفیل و کاهش پایداری غشاهای کلروپلاستی می‌شود. Alberte et al. (۱۹۷۷) در تنش خشکی ذرت (*Zea mayzs*) افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن و تشدید تنش اکسیداتیو و در پی آن تخریب مولکول‌های کلروفیل و کاهش پایداری غشاهای کلروپلاستی را مشاهده کردند. در نتیجه، ظرفیت فتوسنتزی گیاه کاهش یافته و میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی در برگ‌ها کم می‌شود. منابع علمی مرتبط مستقیم با این بخش، به‌طور کلی کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی تحت تنش را گزارش کرده‌اند (Zhang et al., 2024).

افزایش محتوای کلروفیل در تیمارهای دارای بیوچار می‌تواند ناشی از بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک باشد. بیوچار با افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک، بهبود تخلخل و افزایش دسترسی به عناصر غذایی به ویژه نیتروژن و پتاسیم، شرایط مناسب‌تری را برای سنتز و پایداری رنگیزه‌های فتوسنتزی فراهم می‌کند. علاوه‌بر این، بیوچار می‌تواند با کاهش شدت تنش اکسیداتیو و بهبود وضعیت آنتی‌اکسیدانی گیاه، از تخریب کلروفیل‌ها جلوگیری کند. این نتایج در راستای نتایج کیانی و همکاران (۱۴۰۳) است.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کاربرد بیوچار می‌تواند تا حد زیادی اثرات منفی تنش خشکی بر رنگیزه‌های فتوسنتزی سرخارگل را کاهش دهد. بهبود وضعیت رطوبت خاک، افزایش دسترسی به عناصر غذایی و کاهش تنش اکسیداتیو از جمله مهم‌ترین مکانیسم‌هایی هستند که از طریق آن‌ها بیوچار موجب حفظ رنگیزه‌های فتوسنتزی و بهبود عملکرد فیزیولوژیک گیاه در شرایط تنش خشکی می‌شود.

محققان گزارش کردند که نسبت کلروفیل a به b می‌تواند برای ارزیابی مقاومت به خشکی ارقام مختلف ذرت استفاده شود و این نسبت در گیاهان تحت تنش در مقایسه با شاهد کاهش یافت (Liu et al., 2019). بیوچار نقش مهمی در بهبود محتوای کلروفیل‌های a و b و نسبت این دو داشته و افزایش آن می‌تواند به بهبود کارایی فتوسنتزی تعبیر شود (Alotaibi et al., 2023). Zulfiqar et al. (۲۰۲۲) نشان دادند که کاربرد بیوچار به‌طور

معنی‌داری محتوای کلروفیل a و کلروفیل b گندم (*Triticum aestivum*) را تحت شرایط خشکی بهبود می‌بخشد و با کاهش شاخص‌های تنش اکسیداتیو، پایداری رنگیزه‌های فتوسنتزی را افزایش می‌دهد. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که استفاده از بیوچار در شرایط تنش متوسط بسیار مفید است، اما در مدیریت تنش‌های شدید، باید نسبت به مقدار مصرف بیوچار دقت نظر بیشتری داشت تا از اثرات بازدارنده آن بر دستگاه فتوسنتزی جلوگیری شود.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش خشکی تأثیر منفی و معنی‌داری بر رشد رویشی و زیرزمینی گیاه سرخارگل دارد، اما کاربرد بیوچار می‌تواند تا حد زیادی این اثرات نامطلوب را کاهش دهد. بیوچار با بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک (افزایش نگهداشت آب، تخلخل مفید و فراهمی عناصر غذایی) و نیز کاهش تنش اکسیداتیو (کاهش نشست یونی و حفظ یکپارچگی غشاء)، موجب افزایش رشد اندام هوایی و ریشه، بهبود محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی) کلروفیل a، b و کلروفیل کل و حفظ نسبی محتوای نسبی آب برگ (RWC) می‌شود.

مؤثرترین سطوح بیوچار، بسته به شدت تنش، متفاوت بود: در شرایط بدون تنش و تنش متوسط، سطوح ۵ و ۷/۵ تن در هکتار بهترین عملکرد را داشتند، در حالی که در تنش شدید (FC ۴۰ درصد)، سطوح پایین‌تر (۲/۵ تا ۵ تن در هکتار) نسبت به مقادیر بالاتر (۱۰ تن در هکتار) مؤثرتر بودند. کاربرد بیش‌ازحد بیوچار، به‌ویژه در خشکی شدید، با افزایش بیش از حد تخلخل، تغییر pH، عدم تعادل یونی و تشدید آسیب غشایی، اثرات بازدارنده بر رشد و دستگاه فتوسنتزی گیاه دارد. به‌طور کلی، بیوچار ابزاری کارآمد برای افزایش تحمل به خشکی و بهبود رشد سرخارگل در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود، اما مدیریت مقدار مصرف آن بر اساس سطح تنش رطوبتی ضروری است تا از اثرات منفی دوزهای بالا جلوگیری شود.

منابع:

حسنی‌پور، ر.، شمس‌الدین سعید، م.، و ابوالحسنی زراعتکار، م. (۱۴۰۴). ارزیابی برخی شاخص‌های رشدی و بیوشیمیایی گیاه دارویی رازیانه (*Foeniculum vulgare* L.)تحت اثر اسید هیومیک و بیوچار هسته خرما. خاک و توسعه پایدار، (۱)۸، ۱۵-۱.

حسین اللهی، م.، سلطانی گردفرامرزی، س.، عزیزیان، ا.، و مفتاحی‌زاده، ح. (۱۴۰۲). اثر تنش خشکی و اصلاح کننده خاک بر برخی صفات مورفوفیزیولوژی گوار (*Cyamopsis tetragonoloba* L.). مدیریت آب در کشاورزی، (۲)۱۰، ۵۴-۳۹.

دیندارلو اینالو، س.، و مدن دوست، م. (۱۴۰۴). اثر بیوچار و اسید سالیسیلیک بر رشد و صفات فیزیولوژیکی زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) در شرایط آلودگی خاک به کادمیوم. پژوهش‌های گیاهی (زیست‌شناسی ایران)، (۱)۳۸، ۸۱-۶۵.

کیانی، ه.، خالص رو، ش.، شریفی، ز.، و مختصی بیدگلی، ع. (۱۴۰۳). پاسخ‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی سیاهدانه به بیوچار در رژیم‌های مختلف آبیاری. تنش‌های محیطی در علوم زراعی، (۱)۱۷، ۸۶-۳۷.

محدثی، ع.، شیرمردی، م.، مفتاحی‌زاده ح.، و غلام‌نژاد، ج. (۱۴۰۲). مقایسه تأثیر بیوچار و ورمی‌کمپوست بر برخی خصوصیات مورفوفیزیولوژیک گل مغربی (*Oenothera biennis*) تحت تنش خشکی. دانش کشاورزی وتولید پایدار، (۱)۳۳، ۵۱-۳۵.

منصوری، س.، رمرودی م.، محکمی ز.، اصغری‌پور، م.، و سیدآبادی، ا. (۱۴۰۴). تأثیر بیوچار و زئولیت بر برخی ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) در پاسخ به تنش خشکی. تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک، (۲)۷، ۳۱۳-۲۹۵.

واحدی، ر.، و میرحسن، ب. (۱۳۹۸). تأثیر بیوچار ضایعات هرس درختان میوه بر برخی خصوصیات بیولوژیکی خاک در شرایط رایزوباکس. علوم آب و خاک، (۱)۲۱، ۳۳۶-۳۲۱.

Abdelaal, K., Alamrey, S., Attia, K.A., Elrobh, M., Elnahhas, N., Abou El-Yazied, A., and Ibrahim, M. A. (2022). The pivotal role of biochar in enhancement soil properties, morphophysiological and yield characters of barley plants under drought stress. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 50(2), 12710-12710.

Adams, M.M., Benjamin, T.J., Emery, N.C., Brouder, S.J., and Gibson, K.D. (2013). The effect of biochar on native and invasive prairie plant species. Invasive Plant Science and Management, 6(2), 197-207.

Alberte, R.S., Thornber, J.P., and Fiscus, E.L. (1977). Water stress effects on the content and organization of chlorophyll in mesophyll and bundle sheath chloroplasts of maize. Plant Physiology, 59(3), 351-353.

Alotaibi, M.O., Ikram, M., Alotaibi, N.M., Hussain, G.S., Ghoneim, A.M., Younis, U., Naz, N and Danish, S. (2023). Examining the role of AMF-Biochar in the regulation of spinach growth attributes, nutrients concentrations, and antioxidant enzymes in mitigating drought stress. *Plant Stress*, *10*, 100205.

Arnon, A.N. (1967). Method of extraction of chlorophyll in the plants. Agronomy Journal, 23(1), 112-121.

Attarzadeh, M., Balouchi, H., Rajaie, M., Dehnavi, M.M., and Salehi, A. (2019). Improvement of Echinacea purpurea performance by integration of phosphorus with soil microorganisms under different irrigation regimes. Agricultural Water Management, 221, 238-247.

Azzi, E.S., Karltun, E., and Sundberg, C. (2019). Prospective life cycle assessment of large-scale biochar production and use for negative emissions in Stockholm. Environmental science & technology, 53(14), 8466-8476.

Bauer, R., Khan, I.A., and Wagner, H. (1988). TLC and HPLC Analysis of Echinacea pallida and E. angustifolia Roots1. Planta Medica, 54(05), 426-430.

Bauer, R. (1991). Echinacea species as potential immunostimulatory drugs. Economic and Medical Plant Research, 253-321.

Biglouei, M.H., Assimi, M.H., and Akbarzadeh, A. (2010). Effect of water stress at different growth stages on quantity and quality traits of Virginia (flue-cured) tobacco type. Plant, Soil and Environment, 56(2), 67-75.

Bitterlich, M., Sandmann, M., and Graefe, J. (2018). Arbuscular mycorrhiza alleviates restrictions to substrate water flow and delays transpiration limitation to stronger drought in tomato. Frontiers in Plant Science, 9, 154.

Demmig-Adams, B., Hodges, A.K., Polutchko, S.K., and Adams III, W.W. (2025). Zeaxanthin and other carotenoids: roles in abiotic stress defense with implications for biotic defense. Plants, 14(17), 2703.

de Abreu, I.N., and Mazzafera, P. (2005). Effect of water and temperature stress on the content of active constituents of Hypericum brasiliense Choisy. Plant Physiology and Biochemistry, 43(3), 2414159-248.
Gustafson, E.J., and Sturtevant, B.R. (2013). Modeling forest mortality caused by drought stress: implications for climate change. Ecosystems, 16(1), 60-74.
Gruenwald, J., Brendler, T., and Jaenicke, C. (Eds.). (2000). PDR for herbal medicines (2nd ed.). Medical Economics Company.
Jahns, P., and Holzwarth, A. R. (2012). The role of the xanthophyll cycle and of lutein in photoprotection of photosystem II. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics, 1817(1), 182-193.
Joseph, S., Cowie, A.L., Van Zwieten, L., Bolan, N., Budai, A., Buss, W., ... and Lehmann, J. (2021). How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. Global Change Biology Bioenergy, 13(11), 1731-1764.
Kim, Y.J., Hyun, J., Yoo, S.Y., and Yoo, G. (2021). The role of biochar in alleviating soil drought stress in urban roadside greenery. Geoderma, 404, 115223.
Korkmaz, A., Korkmaz, Y., and Demirkıran, A.R. (2010). Enhancing chilling stress tolerance of pepper seedlings by exogenous application of 5-aminolevulinic acid. Environmental and Experimental Botany, 67(3), 495-501.
Langeroodi, A.R.S., Campiglia, E., Mancinelli, R., and Radicetti, E. (2019). Can biochar improve pumpkin productivity and its physiological characteristics under reduced irrigation regimes? Scientia Horticulturae, 247(1), 195-204.
Li, H., and Tan, Z. (2021). Preparation of high water-retaining biochar and its mechanism of alleviating drought stress in the soil and plant system. Biochar, 3(4), 579-590.
Liu, J., Guo, Y. Y., Bai, Y. W., Li, H. J., Xue, J. Q., and Zhang, R. H. (2019). Response of photosynthesis in maize to drought and re-watering. *Russian Journal of Plant Physiology*, *66*(3), 424-432.
Liu, H., Wang, X., Wang, D., Zou, Z., and Liang, Z. (2011). Effect of drought stress on growth and accumulation of active constituents in Salvia miltiorrhiza Bunge. Industrial Crops and Products, 33(1), 84-88.
Lutts, S., Kinet, J.M., and Bouharmont, J. (1996). NaCl-induced senescence in leaves of rice (Oryza sativa L.) cultivars differing in salinity resistance. Annals of Botany, 78(3), 389-398.
Manukyan, A. (2011). Effect of growing factors on productivity and quality of lemon catmint, lemon balm and sage under soilless greenhouse production: I. Drought stress. Medicinal and Aromatic Plant Science and Biotechnology, 5(2), 119-125.
McGregor, R.L. (1968). The taxonomy of the genus Echinacea (Compositae). The University of Kansas Science Bulletin, 48(4), 113-142.
McKeown, K.A. (1999). A review of the taxonomy of the genus Echinacea. Perspectives on New Crops and New Uses, 482, 489.
Meeran, M.N., Javed, H., Sharma, C., Goyal, S.N., Kumar, S., Jha, N.K., and Ojha, S. (2021). Can Echinacea be a potential candidate to target immunity, inflammation, and infection-The trinity of coronavirus disease 2019. Heliyon, 7(2), e05990.
Mia, S., Dijkstra, F.A., and Singh, B. (2018). Enhanced biological nitrogen fixation and competitive advantage of legumes in mixed pastures diminish with biochar aging. Plant and Soil, 424(1), 639-651.
Nadeem, S.M., Imran, M., Naveed, M., Khan, M.Y., Ahmad, M., Zahir, Z.A., and Crowley, D.E. (2017). Synergistic use of biochar, compost and plant growth-promoting rhizobacteria for enhancing cucumber growth under water deficit conditions. Journal of the Science of Food and Agriculture, 97(15), 5139-5145.
Reddy, A.R., Chaitanya, K.V., and Vivekanandan, M. (2004). Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. Journal of Plant Physiology, 161(11), 1189-1202.
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(5), 10214-10227.
Tanure, M.M.C., da Costa, L.M., Huiz, H.A., Fernandes, R.B.A., Cecon, P.R., Junior, J.D. P., and da Luz, J.M.R. (2019). Soil water retention, physiological characteristics, and growth of maize plants in response to biochar application to soil. Soil and Tillage Research, 192, 164-173.
Teixeira, G. C. M., Gonzalez-Porras, C. V., Messias Ferreira, P., Prado, R. D. M., Silva Oliveira, K., Carvalho, L. T. D. S., and Palaretti, L. F. (2024). Increased absorption and use of nutrients induced by Si is an indicator for tolerance to water deficit in a common bean cultivar cultivated in the field with and without application of K. *Frontiers in Plant Science*, *15*, 1421615.
Van Zwieten, L., Rose, T., Herridge, D., Kimber, S., Rust, J., Cowie, A., and Morris, S. (2015). Enhanced biological N2 fixation and yield of faba bean (Vicia faba L.) in an acid soil following biochar addition: dissection of causal mechanisms. Plant and Soil, 395(1), 7-20.
Wang, L., Li, Q., Coulter, J.A., Xie, J., Luo, Z., Zhang, R., Deng, X., and Li, L. (2020). Winter wheat yield and water use efficiency response to organic fertilization in northern China: A meta-analysis. Agricultural Water Management, 229, 105934.
Zhang, W., Niu, W., and Luo, H. (2024). Effect of biochar amendment on the growth and photosynthetic traits of plants under drought stress: a meta-analysis. *Agronomy*, *14*(12), 2952.
Zulfiqar, B., Raza, M.A. S., Saleem, M.F., Aslam, M.U., Iqbal, R., Muhammad, F., Amin, J., Ibrahim, M.A. and Khan, I.H. (2022). Biochar enhances wheat crop productivity by mitigating the effects of drought: Insights into physiological and antioxidant defense mechanisms. PLoS One, 17(4), e0267819.

Management of Natural Ecosystems
Volume 6, Issue 3, Atumn 2026, 22-33
http://emj.ardakan.ac.ir/article_742903.html

The Effect of Biochar Application on the Growth Characteristics of *Echinacea purpurea* under Drought Stress

Hamideh Zarezadeh[1], Mohammad Javad Ghaneei-Bafghi[2*], Mostafa Shirmardi[3]

CC BY

Research Article

1. M.Sc. Graduate, Department of Nature Engineering, Faculty of Agriculture & Natural Resources, Ardakan University, Ardakan, Iran.
hazare1371@gmail.com

2. Associate Professor, Department of Nature Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University, Ardakan, Iran.
mjghaneib@ardakan.ac.ir
* Corresponding author

3. Associate Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University, Ardakan, Iran.
shirmardi@ardakan.ac.ir

Article Code: 2605-1172
Countinus Pagination: 1419-1430

Received: 04 June 2026
Accepted: 11 October 2026
Online: 16 October 2026
Review speed: 130 days

Citation:
Zarezadeh, H., Ghaneei-Bafghi, M. J., and Shirmardi, M. (2026). The Effect of Biochar Application on the Growth Characteristics of Echinacea purpurea under Drought Stress. Management of Natural Ecosystems, 6(3), 22-33.

Abstract

Drought stress is one of the most important limiting factors affecting the growth and yield of medicinal plants, particularly in arid and semi-arid regions. Biochar, as a stable organic material, can mitigate the adverse effects of drought by improving the physical and chemical properties of the soil. This study aimed to investigate the effect of different biochar levels (0, 2.5, 5, 7.5, and 10 t ha^{-1}) on the morphological and physiological characteristics of purple coneflower (*Echinacea purpurea*) under three levels of drought stress (irrigation at 40%, 60%, and 80% of field capacity corresponding to severe drought stress, moderate drought stress, and no drought stress, respectively).The experiment was conducted using a factorial arrangement in a completely randomized design with three replications under greenhouse conditions.The results showed that under no stress and moderate stress conditions, biochar levels of 5 and 7.5 t ha^{-1} had the greatest effect on increasing plant height, shoot and root dry weight, flower number, and improving photosynthetic indices. Under severe drought stress, lower biochar levels (2.5 and 5 t ha^{-1}) were more effective than higher levels (10 t ha^{-1}), withexcessive biochar application under severe drought leading toincreased electrolyte leakage, reduced chlorophyll a/b ratio, and decreased growth. It appears that biochar can enhance the drought tolerance of*E. purpurea* by improving soil water retention, increasing nutrient availability, and reducing oxidative stress; however, the application rate should be managed based on the severity of water stress. The application of 5–7.5 t ha^{-1} of biocharis recommended under no stress and moderate stress conditions, and 2.5–5 t ha^{-1} under severe drought stress. This study demonstrated that drought stress had significant and negative effectsboth shoot and root growth in *E. purpurea*, whereas biochar supplementation was capable of largely reducethese negative effects.

Key Words:

Echinacea purpurea, Biochar, Drought stress, Vegetative growth, Photosynthetic pigments, Electrolyte leakage.

DOI: 10.22034/emj.2026.2089685.1172
ISSN: 2821-0182