DOI: 10.29252/ARIDBIOM.2026.4256

تأثیر بیوچار خرما بر استقرار و رشد آتریپلکس (*Atriplex canescens*) در خاک لوم شنی تحت تنش خشکی

(مقالهٔ پژوهشی)

۱- حلیمه پیری*، دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
h_piri2880@uoz.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹
پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۳۰

چکیده

بیوچار به‌عنوان یک اصلاح‌کننده آلی خاک، با بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و فراهمی عناصر غذایی، نقش مهمی در کاهش اثرات تنش خشکی و بهبود رشد گیاهان در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایفا می‌کند. با این حال، اطلاعات محدودی درباره مقدار بهینه مصرف بیوچار برای استقرار و رشد *Atriplex canescens* تحت شرایط کم‌آبی وجود دارد. به‌منظور بررسی اثر سطوح مختلف آبیاری و بیوچار بر رشد، عملکرد، ویژگی‌های فیزیولوژیک و صفات ریشه اتریپلکس، آزمایشی گلدانی در گلخانه پژوهشی در سال ۱۴۰۳ در ایرانشهر اجرا شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. تیمارها شامل سه سطح آب آبیاری ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و چهار سطح بیوچار (صفر، ۱/۲۵، ۲/۵ و ۵ درصد وزنی خاک) بود. بذرها در گلدان‌هایی با قطر ۲۰ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر کشت شدند و پس از ۱۶۰ روز، ارتفاع، قطر ساقه، عملکرد علوفه تر و خشک، محتوای نسبی آب برگ، کارایی مصرف آب آبیاری، طول ریشه، حجم ریشه، وزن تر و خشک ریشه و نسبت ریشه به اندام هوایی اندازه‌گیری شدند. داده‌ها با استفاده از تجزیه واریانس و آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد که اثرات ساده و متقابل سطوح آبیاری و بیوچار بر تمامی صفات مورد بررسی معنی‌دار بود ($P<0/01$). کاهش میزان آب آبیاری موجب کاهش رشد رویشی، عملکرد علوفه، محتوای نسبی آب برگ و توسعه سیستم ریشه شد، درحالیکه نسبت ریشه به اندام هوایی افزایش یافت. کاربرد بیوچار تا سطح ۲/۵ درصد وزنی موجب افزایش معنی‌دار ارتفاع گیاه (۱۰۸/۲ سانتی‌متر)، قطر ساقه (۲۶/۳ میلی‌متر)، عملکرد علوفه تر (۴۵۲/۵ گرم در گلدان)، عملکرد علوفه خشک (۱۷۲/۳ گرم در گلدان)، محتوای نسبی آب برگ (۹۱/۸ درصد)، کارایی مصرف آب آبیاری (۳/۸۲ گرم بر لیتر)، طول ریشه (۵۹/۷ سانتی‌متر)، حجم ریشه (۱۱۵/۵ سانتی‌متر مکعب)، وزن تر ریشه(۲۸۱/۴ گرم) و وزن خشک ریشه (۸۴/۵ گرم) شد. با این حال، افزایش بیوچار به ۵ درصد وزنی سبب کاهش اغلب صفات اندازه‌گیری‌شده گردید. بررسی اثرات متقابل نشان داد که بیشترین رشد و عملکرد در تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و ۲/۵درصد بیوچار حاصل شد، درحالیکه بیشترین کارایی مصرف آب آبیاری در تیمار ۸۰ درصد ظرفیت زراعی و ۲/۵ درصد بیوچار مشاهده گردید. بنابراین، استفاده از ۲/۵ درصد بیوچار همراه با آبیاری در سطح ۸۰ درصد ظرفیت زراعی به‌دلیل افزایش کارایی مصرف آب و حفظ عملکرد مطلوب، به‌عنوان مناسب‌ترین تیمار برای تولید علوفه اتریپلکس کانسنس در مناطق خشک و نیمه‌خشک پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی: عملکرد علوفه، کارایی مصرف آب، ویژگی‌های ریشه.

مقدمه

بیابان‌زایی یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی قرن حاضر است که منجر به کاهش توان تولیدی اراضی، تخریب پوشش‌گیاهی، فرسایش خاک و کاهش پایداری اکوسیستم‌ها می‌شود. مناطق خشک و نیمه‌خشک بیش از ۴۰ درصد سطح خشکی‌های جهان را در بر گرفته‌اند و به‌دلیل محدودیت منابع آب و شکنندگی اکولوژیکی، بیش از سایر مناطق در معرض بیابان‌زایی قرار دارند. ایران نیز با قرارگیری در

کمربند خشک جهان، با مشکلاتی نظیر کاهش بارندگی، افزایش فراوانی خشکسالی و افت کیفیت خاک مواجه است که این عوامل روند بیابان‌زایی را تشدید می‌کنند [۳۴]. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های خاک‌های مناطق بیابانی، به‌ویژه خاک‌های شنی و لوم شنی، ظرفیت پایین نگهداری آب، چگالی ظاهری نامناسب و فقر مواد آلی است. این ویژگی‌ها موجب کاهش استقرار و رشد گیاهان و افزایش آسیب‌پذیری اکوسیستم‌ها در برابر تنش خشکی می‌شوند. ازاین‌رو، استفاده از اصلاح‌کننده‌های خاک به‌منظور بهبود خصوصیات فیزیکی و افزایش کارایی مصرف آب، به‌عنوان یکی از راهکارهای مؤثر در برنامه‌های بیابان‌زدایی مورد توجه قرار گرفته است [۱۲]. بیوچار[1] ماده‌ای غنی از کربن است که از پیرولیز بقایای گیاهی یا سایر مواد آلی در شرایط کمبود اکسیژن تولید می‌شود. ساختار متخلخل، سطح ویژه بالا و پایداری زیاد این ماده باعث شده است که به‌عنوان یکی از اصلاح‌کننده‌های نوین خاک شناخته شود. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که کاربرد بیوچار می‌تواند موجب بهبود ساختار خاک، افزایش تخلخل، کاهش چگالی ظاهری و افزایش ظرفیت نگهداری آب شود [۳۴ و ۱۲]. در تحقیقی بر روی خاک‌های شنی، گزارش شد که کاربرد بیوچار به‌طور متوسط ظرفیت آب قابل استفاده خاک را ۲۸/۵ درصد افزایش داده است و این اثر در خاک‌هایی با درصد شن بالا بیشتر بوده است [۷]. همچنین نتایج یک مرور نظام‌مند نشان داد که در خاک‌های با بافت درشت، بیوچار ظرفیت زراعی را تا ۵۱ درصد و آب قابل استفاده گیاه را تا ۴۵ درصد افزایش داده است [۳۴]. استفاده از بیوچار به‌عنوان یک اصلاح‌کننده خاک در خاک‌های سبک بافت که ظرفیت نگهداری آب کم و تبخیر بالایی دارند، به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک که با مشکل کمبود آب مواجه هستند، راهکار بسیار مناسبی است [۴]. علاوه‌بر بهبود خصوصیات آبی خاک، مطالعات متعددی افزایش رشد گیاه در اثر کاربرد بیوچار را گزارش کرده‌اند. به‌عنوان مثال، استفاده از بیوچار در خاک‌های شنی موجب افزایش توسعه ریشه، افزایش زیست‌توده گیاهی و بهبود استقرار گیاهانی همچون کینوا، کارلا و چای ترش تحت شرایط تنش خشکی شده است [۳۵، ۲۳ و ۲]. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که بخشی از این اثرات ناشی از افزایش ظرفیت نگهداری آب و بهبود محیط رشد ریشه است [۱و۱۷]. خواص ساختاری و عملکردی منحصر به فرد بیوچار، آن را به یک اصلاح‌کننده ارزشمند خاک برای افزایش حاصلخیزی خاک تبدیل می‌کند. در یک مرور نظام‌مند گزارش شد که بیوچار با بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب، بهبود فراهمی عناصر غذایی و تقویت تحمل گیاهان به تنش‌های غیرزیستی، به‌ویژه خشکی و شوری، نقش مهمی در افزایش رشد و پایداری تولید محصولات کشاورزی ایفا می‌کند. همچنین این پژوهش بر ضرورت انجام مطالعات بیشتر برای تعیین مقدار بهینه بیوچار در شرایط مختلف اقلیمی و خاکی تأکید کرد [۳۳]. آتریپلکس[2] از گیاهان خانواده *Chenopodiaceae* است که دارای گونه‌های متنوع یک‌ساله و چندساله می‌باشد. آتریپلکس در شرایطی که سایر گیاهان زراعی قابلیت رشد و تولید را ندارند، می‌تواند در پایداری تولید در مناطق خشک و نیمه خشک جهان مؤثر باشد. بنابراین به‌خاطر رشد سریع و تولید بالای علوفه اهمیت خاصی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان پیدا کرده است [۲۸]. *Atriplex canescens* یکی از مهم‌ترین گونه‌های مورد استفاده در برنامه‌های احیای مراتع، تثبیت شن‌های روان و بیابان‌زدایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. این گونه به‌دلیل تحمل زیاد به خشکی، شوری و خاک‌های فقیر، از مهم‌ترین گونه‌های مورد استفاده در پروژه‌های منابع طبیعی ایران محسوب می‌شود [۶ و ۳۹].

آتریپلکس کانسنس با تولید سالانه ۱۵ تا ۲۲ تن در هکتار زیست توده، ضمن حفظ سطح سبز و بهبود شرایط اکوسیستم مناطق بیابانی و جلوگیری از

[1] . Biochar

[2] . Atriplex

خیزش گردوغبار، می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد مناسب برای گسترش منابع آب و دفع آب شور مناطق خشک و بیابانی کاربرد داشته باشد [۳۵]. آتریپلکس در بهبود عملکرد اکوسیستم و ارتقای موجودات زنده خاک اهمیت دارد و به‌عنوان یک گیاه غذایی برای پستانداران و بندپایان عمل می‌کند [۳۸]. به‌منظور افزایش توان نگهداری آب قابل استفاده گیاه در خاک، تحقیقات مختلفی با استفاده از انواع مواد طبیعی مانند کاه، کلش و مواد معدنی مانند پرلیت و یا مواد مصنوعی مانند هیدروپلاس و سوپرجاذب‌های پلیمری انجام شده است [۲۷]. اما با وجود اهمیت این گونه، اطلاعات محدودی درباره اثر بیوچار بر رشد و استقرار آتریپلکس در خاک‌های لوم شنی بیابانی ایران، به‌ویژه در شرایط کم‌آبی، وجود دارد.

استان سیستان و بلوچستان، به‌ویژه شهرستان ایرانشهر، به‌دلیل اقلیم گرم و خشک، بارندگی اندک، تبخیر و تعرق بالا و محدودیت منابع آب، با چالش‌های جدی در زمینه تولید محصولات کشاورزی و علوفه‌ای مواجه است. در این منطقه، نخل خرما یکی از مهم‌ترین محصولات باغی محسوب می‌شود و سالانه مقادیر قابل توجهی برگ، دمبرگ و سایر بقایای حاصل از هرس نخلستان‌ها تولید می‌شود. بخش عمده این ضایعات به‌دلیل نبود مدیریت مناسب، سوزانده یا در محیط رها می‌شوند که علاوه‌بر ایجاد مشکلات زیست‌محیطی، موجب اتلاف یک منبع ارزشمند زیست‌توده می‌شود. تبدیل این بقایا به بیوچار از طریق فرآیند پیرولیز، راهکاری مؤثر برای مدیریت پایدار ضایعات کشاورزی، کاهش آلودگی محیط‌زیست و تولید یک اصلاح‌کننده ارزشمند خاک به‌شمار می‌رود. با وجود گزارش‌های متعدد درباره نقش بیوچار در بهبود خصوصیات خاک و افزایش تحمل گیاهان به تنش خشکی، اطلاعات اندکی درباره اثر بیوچار حاصل از بقایای برگ خرما بر رشد، ویژگی‌های فیزیولوژیک و توسعه سیستم ریشه *Atriplex canescens* در خاک‌های لوم شنی مناطق خشک ایران وجود دارد. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی اثر سطوح مختلف بیوچار برگ خرما و رژیم‌های مختلف آبیاری بر رشد، عملکرد علوفه، ویژگی‌های فیزیولوژیک و صفات ریشه این گونه اجرا شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در اوایل مهرماه ماه ۱۴۰۳به‌صورت گلخانه‌ای در شهرستان ایرانشهر انجام شد. شهرستان ایرانشهر در طول جغرافیایی ۶۰ درجه و ۴۱ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۷ درجه و ۱۲ دقیقه شمالی و ارتفاع ۵۶۰ متر از سطح دریا در استان سیستان و بلوچستان قرار دارد. این منطقه براساس اقلیم‌نمای آمبرژه دارای اقلیم بیابانی گرم و خشک می‌باشد.

به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک پیش از مراحل آماده سازی زمین نمونه‌های مرکب خاک از اعماق ۰ تا ۳۰ سانتی متری خاک برداشت شد و برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تعیین شد. همچنین از آب مورد استفاده نیز جهت تعیین کیفیت آن نمونه‌برداری شد. برای تهیه بیوچار در این تحقیق از شاخ و برگ خرما استفاده شد. ابتدا ضایعات شاخ و برگ خرما جمع‌آوری، شستشو، خشک و خرد شدند. سپس نمونه‌ها در یک راکتور پیرولیز در شرایط محدودیت اکسیژن با نرخ گرمایش ۱۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه تا دمای ۳۰۰درجه سانتی‌گراد گرم شده و به مدت ۲ ساعت در این دما نگهداری شدند. پس از پایان فرآیند، بیوچار در همان شرایط تا رسیدن به دمای محیط سرد شده و برای انجام آزمایش استفاده شد. نتایج تجزیه آب و خاک و بیوچار مورد استفاه در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، آب و بیوچار

پارامترهای اندازه‌گیری شده	خاک	آب	بیوچار
pH	۸/۱۱	۷/۵۱	۷/۲
هدایت الکتریکیEC (dS/m)	۰/۶۲	۰/۳۲	۶/۱
کربن آلی (درصد)	۰/۱۲	-	۳۸/۵
فسفر (mg/kg)	۸/۵	۰/۲۱	۲۵۶/۳
پتاسیم (mg/kg)	۱۲۴/۸	۰/۳۶	۳۰۷۳/۴
کلسیم محلول(meq/lit)	۰/۴۶	۲/۲۵	۱۵/۴
منیزیم محلول (meq/lit)	۰/۷۸	۲/۴۱	۹/۸
سدیم محلول (meq/lit)	۰/۴۲	۲/۱	۲/۵
نیتروژن کل (درصد)	۰/۰۶	-	۲۷/۴
SAR	-	۱/۳۸	-
بافت- کلاس	لوم شن	C2-S1	-

تحقیق در قالب طرح فاکتوریل کاملا تصادفی در گلخانه اجرا شد. تیمارها شامل سه سطح آبیاری I1، I2 و I3 به‌ترتیب معادل ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک و چهار سطح بیوچار B1، B2، B3 و B4 به‌ترتیب معادل صفر، ۱/۲۵، ۲/۵ و ۵ درصد وزنی خاک بود. با در نظر گرفتن سه سطح آبیاری و چهار سطح بیوچار با سه تکرار در هر تیمار، در مجموع ۳۶ گلدان به ارتفاع ۳۰ و عرض ۲۰ سانتی‌متر تهیه شد. خاک و بیوچار پس از عبور از الک ۲ میلی‌متر در سطوح تعیین شده با یکدیگر مخلوط شدند و سپس گلدان‌ها با مخلوط خاک و بیوچار پر شد. پس از اختلاط خاک و بیوچار و اضافه نمودن آن به گلدان‌ها، گلدان‌ها به‌صورت کامل اشباع شد. سپس روی گلدان‌ها جهت جلوگیری از تبخیر آب پوشانده شد. خروج آب ثقلی از انتهای گلدان در بازه‌های زمانی مشخص تا زمانی که خروج آب ثقلی متوقف شود، اندازه‌گیری شد. وزن گلدان در این حالت به‌عنوان وزن در حالت ظرفیت زراعی در نظر گرفته شد. سپس در هر گلدان سه عدد بذر گیاه آتریپلکس کانسنس کشت شد. پس از جوانه‌زدن و استقرار، تعداد گیاه در هر گلدان به یک عدد کاهش یافت. کلیه گلدان‌ها تا زمان استقرار گیاه به‌صورت کامل و تا حد ظرفیت زراعی آبیاری شدند. سپس گلدان‌ها هر هفت روز یک‌بار توزین شدند. کمبود آب در هر گلدان تا حد رطوبت زراعی گیاه (براساس تغییرات وزن گلدان‌ها و مقدار آب زهکش شده) محاسبه شد و حجم آب محاسبه شده در اختیار گیاه قرار می‌گرفت. میزان کل آب مصرفی طی دوره رشد از مجموع آب مصرفی در تمام روزهای دوره رشد به‌دست آمد.

نمونه‌برداری گیاهی

در پایان دوره آزمایش (۱۶۰ روز پس از کاشت، نیمه اسفند)، گیاهان از سطح خاک برداشت شده و صفات مورفولوژیک و عملکردی اندازه‌گیری شدند. ارتفاع گیاه از سطح خاک تا بلندترین نقطه گیاه با خط‌کش مدرج اندازه‌گیری و بر حسب سانتی‌متر ثبت شد. قطر ساقه در فاصله یک سانتی‌متری از سطح خاک با استفاده از کولیس دیجیتال اندازه‌گیری و بر حسب میلی‌متر ثبت گردید. اندام هوایی هر گیاه از ریشه جدا و وزن تر آن بلافاصله با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند و وزن خشک اندام هوایی ثبت گردید. عملکرد علوفه خشک براساس وزن خشک اندام هوایی هر گلدان (گرم در گلدان) محاسبه شد. برای اندازه‌گیری صفات ریشه، خاک گلدان به‌آرامی شسته شد تا ریشه‌ها بدون آسیب از

خاک جدا شوند. طول بلندترین ریشه با خط‌کش مدرج اندازه‌گیری و بر حسب سانتی‌متر ثبت شد. حجم ریشه با استفاده از روش جابه‌جایی آب در استوانه مدرج تعیین و بر حسب سانتی‌متر مکعب گزارش شد. سپس وزن تر ریشه اندازه‌گیری و نمونه‌ها در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند و وزن خشک ریشه ثبت گردید. نسبت ریشه به اندام هوایی از تقسیم وزن خشک ریشه بر وزن خشک اندام هوایی محاسبه شد. برای تعیین محتوای نسبی آب برگ[3] از هر گلدان یک برگ کاملاً توسعه‌یافته انتخاب شد. ابتدا وزن تر برگ اندازه‌گیری گردید. سپس برگ‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر و در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند تا به وزن اشباع برسند. پس از آن، نمونه‌ها در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک شده و وزن خشک اندازه‌گیری شد. محتوای نسبی آب برگ با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید [۵]:

رابطه (۱): $$RWC = \left[\frac{FW-DW}{TW-DW}\right] \times 100$$

در این رابطه، FW: وزن تر برگ (گرم)، TW وزن اشباع برگ (گرم) و DW وزن خشک برگ (گرم) می‌باشد.

کارایی مصرف آب آبیاری(IWUE)

عبارت است از: نسبت محصول تولید شده به آب آبیاری. از رابطه ۲ به دست آمد [۲۹].

رابطه (۲): $$IWUE = \frac{Y}{IR}$$

در این رابطه، IWUE کارایی مصرف آب آبیاری (گرم بر لیتر) Y: مقدار محصول برداشت شده (گرم در هر گلدان) IR: مقدار آب‌آبیاری (لیتر در هر گلدان)

تجزیه و تحلیل آماری

داده‌های حاصل با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹.۴ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تجزیه واریانس براساس طرح فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. مقایسه میانگین تیمارها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد صورت گرفت. ترسیم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام شد. شکل ۱ شماتیک تحقیق را نشان می‌دهد.

نتایج

نتایج تجزیه واریانس پارامترهای اندازه‌گیری شده در جدول ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد اثر مقدار آب آبیاری، بیوچار و اثرات متقابل آن‌ها بر پارامترها در سطح احتمال یک درصد و پنج درصد معنی‌دار بوده است. شکل ۲ اثرات متقابل پارامترهای اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.

[3] . Relative Water Content

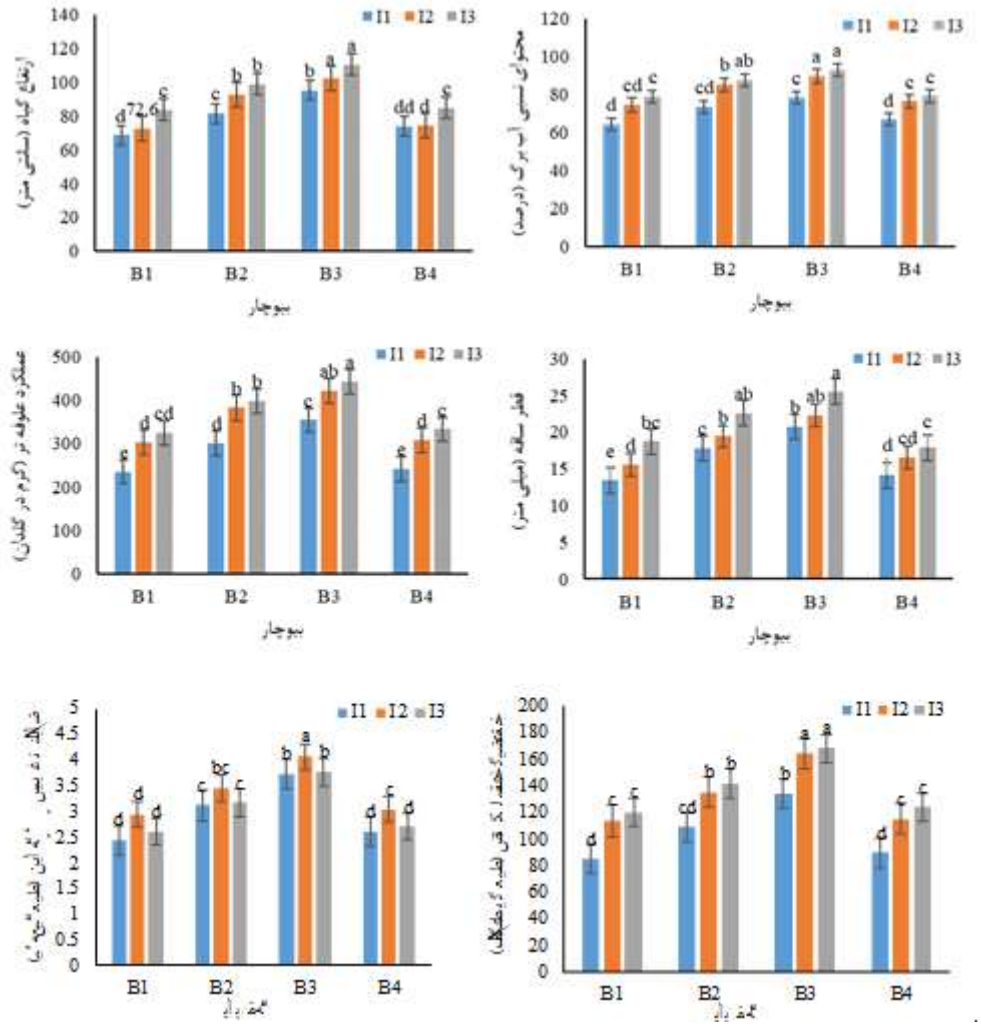


شکل ۱- شماتیک مراحل اجرای آزمایش، اعمال تیمارها و ارزیابی صفات رشد، فیزیولوژیک و ریشه اتریپلکس

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات و درجه آزادی) پارامترهای کمی اندازه‌گیری شده

منابع تغییرات	درجه آزادی	ارتفاع گیاه	قطر ساقه	عملکرد علوفه تر	عملکرد علوفه خشک	محتوای نسبی آب برگ	کارایی مصرف آب آبیاری
آبیاری (A)	۲	۵۴۶/۲۵*	۴۹/۵۶**	۵۸۷/۲۸**	۳۱۶/۵۳**	۲۷/۳۲**	۵۷/۸۲**
بیوچار (B)	۳	۳۸۹/۱۱*	۲۴/۴۱*	۶۴۲/۱۳*	۴۲۱/۳۷*	۳۰/۴۵*	۶۳/۴۹*
اثر متقابل (A*B)	۶	۶۴۱/۳۵*	۵۲/۳۷**	۶۷۲/۸۶*	۴۳۰/۲۴**	۳۱/۷۵**	۷۴/۲۱*
خطا	۲۴	۲۵۳/۲۱	۳۲/۶۵	۴۲۶/۰۵	۲۶۱/۴۲	۱۹/۵۷	۵۹/۶۳
ضریب تغییرات		۸/۱	۷/۸	۱۰/۴	۹/۶	۸/۵	۱۰/۲

*و **معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد



شکل ۲- اثر متقابل بیوچار (B) و مقدار آب آبیاری (I) بر پارامترهای اندازه‌گیری شده گیاه. I1، I2 و I3 به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی مقدار آب آبیاری معادل ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک و B1، B2، B3 و B4 به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی مقدار بیوچار معادل صفر، ۱/۲۵، ۲/۵ و ۵ درصد وزنی خاک است. مقایسه میانگین‌ها براساس آزمون دانکن و با سه تکرار انجام شد. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح P> ۰.۰۵ است.

ارتفاع گیاه: بررسی اثر متقابل آبیاری و بیوچار (شکل ۲) نشان داد که پاسخ ارتفاع گیاه به سطوح مختلف بیوچار تحت تأثیر وضعیت رطوبتی خاک قرار گرفت. بیشترین ارتفاع گیاه (۱۱۰/۴ سانتی‌متر) در تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با ۲.۵ درصد بیوچار (I3B3) و کمترین ارتفاع (۶۸/۵ سانتی‌متر) در تیمار ۶۰ درصد ظرفیت زراعی بدون مصرف بیوچار (I1B1) مشاهده شد. در هر سه سطح آبیاری، افزایش بیوچار تا سطح ۲/۵ درصد موجب افزایش ارتفاع گیاه شد، درحالی‌که کاربرد ۵ درصد بیوچار با کاهش ارتفاع همراه بود. همچنین، اگرچه کاربرد ۲/۵ درصد بیوچار در شرایط محدودیت شدید آب (۶۰ درصد ظرفیت زراعی) موجب بهبود ارتفاع گیاه شد، اما ارتفاع حاصل همچنان کمتر از مقادیر مشاهده‌شده در شرایط آبیاری کافی بود. به‌طورکلی، بیشترین پاسخ ارتفاعی در ترکیب ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و ۲/۵ درصد بیوچار (I3B3) حاصل شد که بیانگر وابستگی پاسخ گیاه به بیوچار به سطح تأمین آب است.

قطر ساقه: همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، پاسخ قطر ساقه به بیوچار به شدت تحت تأثیر سطح آبیاری قرار گرفت و اثر متقابل آبیاری و بیوچار معنی‌دار بود. بیشترین قطر ساقه (۲۵/۵ میلی‌متر) در تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی همراه

با ۲/۵ درصد بیوچار و کمترین مقدار (۱۳/۴میلی‌متر) در تیمار ۶۰ درصد ظرفیت زراعی بدون مصرف بیوچار مشاهده شد. در هر سه سطح آبیاری، افزایش بیوچار تا ۲/۵ درصد موجب افزایش قطر ساقه گردید، اما مصرف ۵ درصد بیوچار سبب کاهش این صفت شد. همچنین روند تغییرات نشان داد که پاسخ گیاه به بیوچار در شرایط تأمین مناسب رطوبت (۸۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) بیشتر از شرایط تنش شدید خشکی بود. در سطح ۶۰ درصد ظرفیت زراعی، کاربرد ۱/۲۵ درصد بیوچار موجب بهبود نسبی قطر ساقه شد، اما افزایش مقدار بیوچار به ۵ درصد نه تنها نتوانست اثرات تنش خشکی را جبران کند، بلکه موجب کاهش مجدد قطر ساقه گردید.

عملکرد علوفه تر و خشک در هر گلدان: همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، پاسخ عملکرد علوفه به بیوچار به شدت تحت تأثیر سطح آبیاری قرار گرفت و اثر متقابل آبیاری و بیوچار معنی‌دار بود. بیشترین عملکرد علوفه تر (۴۴۳/۶ گرم در گلدان) و عملکرد علوفه خشک (۱۶۸/۵ گرم در گلدان) در تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با ۲/۵ درصد بیوچار به دست آمد، درحالیکه کمترین مقادیر این صفات به‌ترتیب ۲۳۵/۶ و ۸۵/۵ گرم در گلدان در تیمار ۶۰ درصد ظرفیت زراعی بدون مصرف بیوچار مشاهده شد. در تمامی سطوح آبیاری، کاربرد بیوچار تا سطح ۲/۵ درصد موجب افزایش معنی‌دار عملکرد علوفه شد، اما افزایش مقدار آن به ۵ درصد باعث کاهش عملکرد گردید. همچنین روند تغییرات نشان داد که اثر مثبت بیوچار در شرایط رطوبتی مناسب (۸۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) بیشتر از شرایط تنش شدید خشکی بود. در سطح ۶۰ درصد ظرفیت زراعی، کاربرد ۲۵ /۱درصد بیوچار تنها بخشی از کاهش عملکرد ناشی از کمبود آب را جبران کرد و افزایش بیشتر بیوچار نتوانست محدودیت ناشی از تنش شدید خشکی را به‌طور کامل برطرف سازد.

محتوای نسبی آب برگ (RWC): نتایج نشان داد که محتوای نسبی آب برگ به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری و بیوچار قرار گرفت (شکل ۲). بیشترین مقدار (۹۲/۹ درصد) در تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با ۲/۵ درصد بیوچار مشاهده شد، درحالیکه کمترین مقدار (۶۴/۲ درصد) مربوط به تیمار ۶۰ درصد ظرفیت زراعی بدون مصرف بیوچار بود. روند تغییرات نشان داد که با کاهش رطوبت خاک، مقدار RWC در تمامی تیمارها کاهش یافت، اما کاربرد بیوچار تا سطح ۲/۵ درصد در هر سه سطح آبیاری توانست این کاهش را به‌طور معنی‌داری تعدیل کند. در مقابل، افزایش مقدار بیوچار به ۵ درصد موجب کاهش RWC نسبت‌به تیمار ۲/۵ درصد شد که بیانگر وجود یک مقدار بهینه برای کاربرد بیوچار است (شکل ۲).

کارایی مصرف آب آبیاری(IWUE): نتایج نشان داد که کارایی مصرف آب آبیاری به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری و بیوچار قرار گرفت (شکل ۲). بیشترین کارایی مصرف آب آبیاری (۴/۰۸ گرم بر لیتر) در تیمار ۸۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با ۲/۵ درصد بیوچار مشاهده شد، درحالی‌که کمترین مقدار (۲/۴۵ گرم بر لیتر) مربوط به تیمار ۶۰ درصد ظرفیت زراعی بدون مصرف بیوچار بود. روند تغییرات نشان داد که در هر سه سطح آبیاری، کاربرد بیوچار تا سطح ۲/۵ درصد موجب افزایش معنی‌دار IWUE شد، اما افزایش مقدار بیوچار به ۵ درصد سبب کاهش این شاخص گردید.

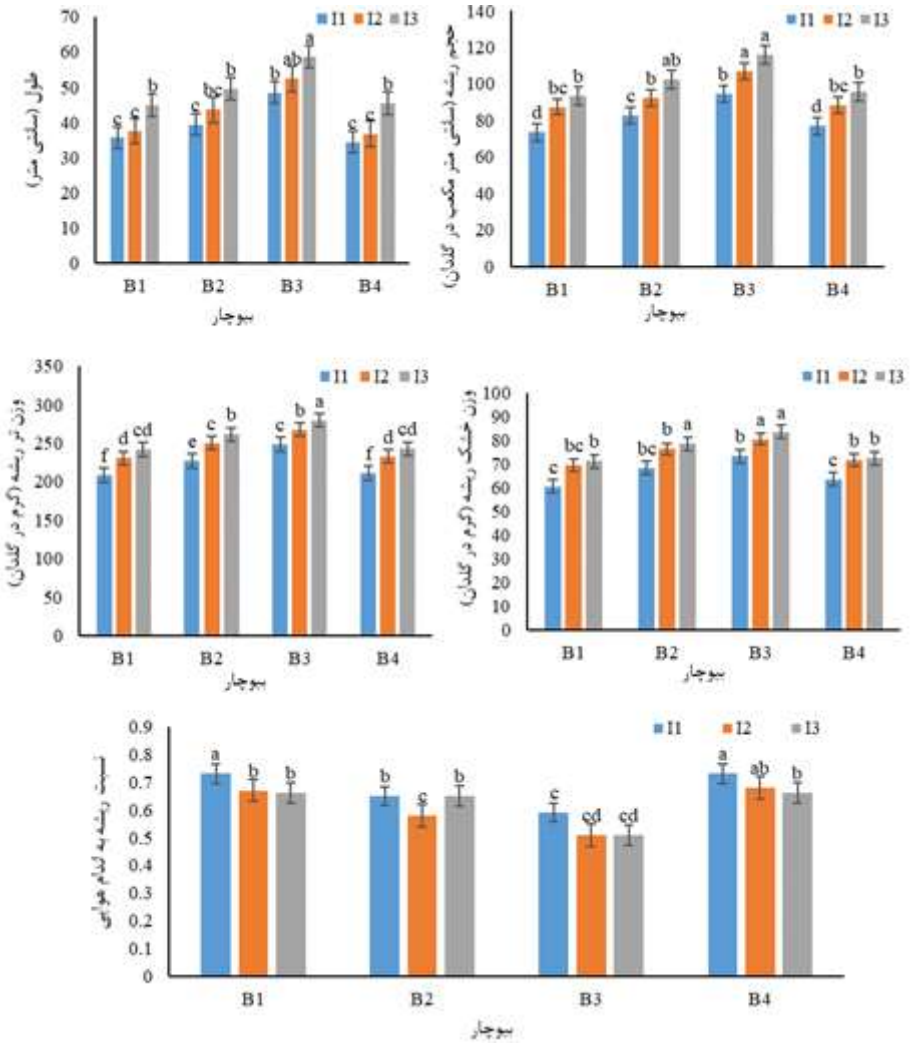
پارامترهای اندازه‌گیری شده ریشه

جدول ۳ نتایج تجزیه واریانس پارامترهای ریشه شامل طول، حجم، وزن تر و خشک ریشه و نسبت ریشه به اندام هوایی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود اثرات مقدار آب آبیاری، بیوچار و اثرات متقابل آن‌ها بر پارامترهای اندازه‌گیری شده ریشه در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بود. شکل ۳ مقایسه میانگین اثرات متقابل مقدار آب آبیاری و بیوچار را بر پارامترهای اندازه‌گیری شده ریشه نشان می‌دهد.

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات و درجه آزادی) پارامترهای ریشه

منابع تغییرات	درجه آزادی	طول	حجم	وزن تر	وزن خشک	نسبت ریشه به اندام هوایی
آبیاری (A)	۲	۹۲/۴**	۷۸/۶**	۱۴۲/۳*	۸۵/۲*	۷۹/۴**
بیوچار (B)	۳	۸۳/۷*	۹۴/۸*	۱۷۵/۵*	۷۶/۵*	۶۴/۳*
اثر متقابل (A*B)	۶	۹۳/۵*	۱۰۹/۳*	۱۹۲/۸**	۸۸/۷*	۷۹/۲*
خطا	۲۴	۴۵/۱	۵۲/۴	۸۵/۷	۷۸/۳	۵۱/۲
ضریب تغییرات		۹/۶	۸/۵	۹/۷	۸/۵	۸/۹

*و **معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد



شکل ۳- اثر متقابل بیوچار (B) و مقدار آب آبیاری (I) بر پارامترهای اندازه‌گیری شده ریشه گیاه. I1، I2 و I3 به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی مقدار آب آبیاری معادل ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک و B1، B2، B3 و B4 به‌ترتیب نشان-دهنده‌ی مقدار بیوچار معادل صفر، ۱/۲۵، ۲/۵ و ۵ درصد وزنی خاک است. مقایسه میانگین‌ها براساس آزمون دانکن و با سه تکرار انجام شد. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۰.۰۵ >P است.

طول ریشه: بررسی اثر متقابل آبیاری و بیوچار (شکل ۳) نشان داد که بیشترین طول ریشه (۵۸/۷

سانتی‌متر) در تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با ۲/۵ درصد بیوچار و کمترین مقدار (۳۴/۴ سانتی‌متر) در تیمار ۶۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با ۵ درصد بیوچار مشاهده شد. در تمامی سطوح آبیاری، کاربرد بیوچار تا سطح ۲/۵ درصد موجب افزایش معنی‌دار طول ریشه شد، اما مصرف ۵ درصد بیوچار باعث کاهش این صفت گردید. همچنین در شرایط تنش شدید (۶۰ درصد ظرفیت زراعی)، کاربرد ۱/۲۵ و ۲/۵ درصد بیوچار توانست بخشی از اثرات منفی کمبود آب را جبران کند، اما افزایش بیوچار به ۵ درصد نه تنها موجب بهبود رشد ریشه نشد، بلکه طول ریشه را تا حدود مقادیر تیمار شاهد کاهش داد.

حجم ریشه: شکل ۳ نشان داد بیشترین حجم ریشه (۱۱۵/۸ سانتی‌متر مکعب) در تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و ۲/۵ درصد بیوچار و کمترین مقدار (۷۳/۵ سانتی‌متر مکعب) در تیمار ۶۰ درصد ظرفیت زراعی و صفر درصد بیوچار مشاهده شد. در هر سه سطح آبیاری، کاربرد بیوچار تا سطح ۲/۵ درصد موجب افزایش معنی‌دار حجم ریشه شد، اما افزایش آن به ۵ درصد سبب کاهش این صفت گردید. همچنین در شرایط تنش شدید (۶۰ درصد ظرفیت زراعی)، مصرف ۱/۲۵ و به‌ویژه ۲/۵ درصد بیوچار توانست بخشی از کاهش حجم ریشه ناشی از کمبود آب را جبران کند، اما کاربرد ۵ درصد بیوچار نتوانست این روند را حفظ کند.

وزن تر و خشک ریشه: بررسی اثر متقابل آبیاری و بیوچار (شکل ۳) نشان داد که پاسخ وزن تر و خشک ریشه به بیوچار به شدت تحت تأثیر وضعیت رطوبتی خاک قرار گرفت. بیشترین وزن تر ریشه (۲۷۹/۷ گرم) و وزن خشک ریشه (۸۳/۵ گرم) در تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و ۲/۵ درصد بیوچار به دست آمد، درحالیکه کمترین مقادیر این صفات به‌ترتیب ۲۰۸/۴ و ۶۰/۵ گرم در تیمار ۶۰ درصد ظرفیت زراعی و صفر درصد بیوچار مشاهده شد. در هر سه سطح آبیاری، افزودن بیوچار تا سطح ۲/۵ درصد موجب افزایش معنی‌دار وزن تر و خشک ریشه گردید، اما کاربرد ۵ درصد بیوچار سبب کاهش هر دو صفت شد. با این حال، شدت پاسخ گیاه به بیوچار در شرایط رطوبتی مختلف یکسان نبود؛ به‌گونه‌ای که در آبیاری کامل، اثر افزایشی بیوچار بر تجمع زیست‌توده ریشه بیشترین مقدار را داشت، درحالیکه در تنش شدید خشکی، اگرچه کاربرد ۱/۲۵ و ۲/۵ درصد بیوچار بخشی از کاهش وزن ریشه را جبران کرد، اما نتوانست محدودیت ناشی از کمبود شدید آب را به‌طور کامل برطرف سازد.

نسبت ریشه به اندام هوایی: بررسی اثر متقابل آبیاری و بیوچار (شکل ۳) نشان داد که پاسخ نسبت ریشه به اندام هوایی به بیوچار تحت تأثیر شرایط رطوبتی قرار گرفت. بیشترین مقدار این شاخص (۰/۷۳) در تیمارهای ۶۰ درصد ظرفیت زراعی و صفر درصد بیوچار و ۶۰ درصد ظرفیت زراعی و ۵ درصد بیوچار مشاهده شد، درحالیکه کمترین مقدار (۰/۵۱) مربوط به تیمارهای ۸۰ درصد ظرفیت زراعی و ۲/۵ درصد بیوچار و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و ۲/۵ درصد بیوچار بود.

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج تحقیق نشان داد مقادیر مختلف آب آبیاری و بیوچار بر پارامترهای رشدی، اندام هوایی و زمینی گیاه آتریپلکس و کارایی مصرف آب آبیاری معنی‌دار بود. ترکیب این دو تیمار در سطوح مختلف نتایج متفاوتی را نشان داد. این نتایج نشان می‌دهد که کارایی بیوچار وابسته به شرایط رطوبتی خاک بوده و اثر مثبت آن زمانی بیشتر نمایان می‌شود که محدودیت آب شدت کمتری داشته باشد.

نتایج نشان داد که پاسخ ارتفاع و قطر ساقه آتریپلکس کانسنس به سطوح مختلف بیوچار در شرایط مختلف آبیاری یکسان نبود و اثر متقابل آبیاری و بیوچار نقش مهمی در تعیین رشد اندام‌های هوایی گیاه داشت. بیشترین ارتفاع گیاه در ترکیب ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و ۲/۵ درصد بیوچار (I3B3) و کمترین مقدار در ترکیب ۶۰ درصد ظرفیت زراعی و بدون مصرف بیوچار (I1B1) مشاهده شد. همچنین، در هر سه سطح آبیاری،

افزایش بیوچار تا سطح ۲/۵ درصد موجب بهبود ارتفاع و قطر ساقه شد، درحالی‌که کاربرد ۵ درصد بیوچار با کاهش این صفات همراه بود. این الگو نشان می‌دهد که اثر مثبت بیوچار به میزان تأمین آب وابسته بوده و کاربرد مقدار بهینه بیوچار در شرایط رطوبتی مناسب، بیشترین اثر را بر پارامترهای رشدی گیاه داشته است. تفاوت پاسخ گیاه در ترکیب‌های مختلف آبیاری و بیوچار را می‌توان به اثر همزمان وضعیت آب خاک و ویژگی‌های اصلاحی بیوچار نسبت داد. در شرایط محدودیت شدید آب، کاهش رطوبت خاک موجب افت پتانسیل آب خاک و کاهش فشار تورژسانس سلول‌ها شده و در نتیجه تقسیم و طویل شدن سلول‌های مریستمی و رشد طولی ساقه محدود می‌شود. علاوه‌بر این، بسته شدن روزنه‌ها، کاهش هدایت روزنه‌ای، محدود شدن جذب دی‌اکسیدکربن و کاهش فتوسنتز، تولید مواد فتوسنتزی را کاهش داده و در نهایت رشد اندام‌های هوایی را محدود می‌کند. همچنین، تنش خشکی با افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن(ROS)، پراکسیداسیون لیپیدها و کاهش پایداری غشاهای سلولی، فرآیندهای رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۳۹، ۱۲]. کاهش رطوبت خاک و محدود شدن رشد سلولی و توسعه ساقه در شرایط تنش آبی نیز با نتایج گزارش‌شده در مطالعات پیشین مطابقت دارد [۱۳]. بنابراین، کاهش ارتفاع و قطر ساقه در ترکیب‌های دارای محدودیت شدید آب، به‌ویژه در غیاب بیوچار، می‌تواند ناشی از محدودیت همزمان آب، فتوسنتز و رشد سلولی باشد. در مقابل، افزایش ارتفاع و قطر ساقه در ترکیب‌های حاوی ۲/۵ درصد بیوچار، به‌ویژه در شرایط تأمین آب کافی، می‌تواند ناشی از توانایی بیوچار در افزایش ظرفیت نگهداری آب، بهبود تخلخل و ساختمان خاک، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، کاهش آبشویی عناصر غذایی و فراهم کردن شرایط مناسب‌تر برای توسعه سیستم ریشه باشد. ساختار متخلخل بیوچار همچنین می‌تواند محیط مناسبی برای فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید خاک فراهم کرده و از طریق افزایش معدنی شدن مواد آلی و بهبود دسترسی عناصر غذایی، رشد گیاه را تقویت کند [۱۹، ۳۲ و ۲۴]. در نتیجه، هنگامی که مقدار کافی آب همراه با مقدار بهینه بیوچار فراهم شد، بهبود همزمان شرایط فیزیکی خاک و دسترسی به آب و عناصر غذایی توانست محدودیت‌های رشد ناشی از تنش را کاهش داده و بیشترین رشد ارتفاعی و قطری را ایجاد کند. با این حال، کاهش ارتفاع و قطر ساقه در سطح ۵ درصد بیوچار، حتی در شرایط آبیاری مناسب، نشان می‌دهد که افزایش مقدار بیوچار الزاماً به بهبود بیشتر رشد منجر نمی‌شود. این کاهش احتمالاً می‌تواند با افزایش هدایت الکتریکی محیط ریشه، تغییر pH، برهم خوردن تعادل عناصر غذایی و کاهش قابلیت جذب برخی عناصر کم‌مصرف مرتبط باشد [۲۶]. بنابراین، پاسخ مثبت گیاه به بیوچار دارای یک دامنه بهینه بوده و افزایش مقدار مصرف بیش از این سطح ممکن است بخشی از مزایای ناشی از بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را کاهش دهد. الگوی مشاهده‌شده در این پژوهش با گزارش سایر محققین نیز مطابقت دارد. نتایج مطالعات پیشین نشان داده است که کاربرد مقدار بهینه بیوچار موجب افزایش رشد و ارتفاع گیاه ذرت شده، درحالیکه مقادیر بالاتر بیوچار می‌تواند اثر بازدارنده داشته باشد [۹]. همچنین، کاربرد مقدار مناسب بیوچار از طریق بهبود خصوصیات فیزیکی خاک و افزایش جذب آب و عناصر غذایی موجب بهبود رشد رویشی و قطر ساقه گیاه می‌شود [۱۰]. از سوی دیگر، میزان پاسخ گیاه به بیوچار به مقدار مصرف، نوع بیوچار، بافت خاک و شدت تنش محیطی وابسته است و افزایش مقدار مصرف بیوچار الزاماً به افزایش رشد گیاه منجر نمی‌شود [۳۲ و ۲۶]. در مجموع، نتایج نشان داد که پاسخ ارتفاع و قطر ساقه آتریپلکس کانسنس حاصل برهم‌کنش وضعیت آبیاری و مقدار بیوچار بود و اثر بیوچار را نمی‌توان مستقل از شرایط رطوبتی خاک تفسیر کرد. بیشترین رشد در ترکیب آبیاری کافی و ۲/۵ درصد بیوچار حاصل شد، درحالی‌که تحت محدودیت شدید آب، حتی کاربرد مقدار بهینه بیوچار نیز تنها بخشی از کاهش رشد را

جبران کرد. این یافته بیانگر آن است که اثربخشی بیوچار در بهبود رشد اندام‌های هوایی آتریپلکس به وضعیت آب خاک وابسته بوده و استفاده از مقدار بهینه بیوچار همراه با مدیریت مناسب آبیاری می‌تواند راهکار مؤثرتری برای حفظ رشد گیاه تحت شرایط محدودیت آب باشد.

نتایج نشان داد که پاسخ عملکرد علوفه آتریپلکس به سطوح مختلف بیوچار تحت تأثیر وضعیت رطوبتی خاک قرار گرفت و بیشترین عملکرد در ترکیب تأمین آب کافی و مقدار بهینه بیوچار حاصل شد. این الگو بیانگر آن است که اثر بیوچار بر تولید زیست‌توده مستقل از شرایط آبیاری نبوده و میزان پاسخ گیاه به بیوچار با شدت محدودیت آب تغییر کرده است. در شرایط محدودیت شدید رطوبت، کاهش آب قابل دسترس موجب کاهش سطح برگ، تسریع پیری برگ‌ها، افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن، تخریب کلروفیل و کاهش فعالیت آنزیم‌های فتوسنتزی می‌شود که در نهایت تجمع ماده خشک و تولید زیست‌توده را محدود می‌کند [۱۳، ۳۹]. بنابراین، کاهش عملکرد در ترکیب‌های دارای محدودیت شدید آب را می‌توان به محدود شدن همزمان رشد اندام‌های هوایی، فعالیت فتوسنتزی و تولید و انتقال مواد فتوسنتزی نسبت داد. در مقابل، افزایش عملکرد علوفه در ترکیب‌های حاوی ۲/۵ درصد بیوچار، به‌ویژه در شرایط آبیاری کافی، احتمالاً ناشی از اثر همزمان بیوچار و فراهم بودن آب بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک است. بیوچار با افزایش ظرفیت نگهداری آب، بهبود ساختمان و تخلخل خاک، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، کاهش آبشویی عناصر غذایی و افزایش فراهمی عناصر پرمصرف، شرایط مناسب‌تری برای توسعه ریشه و جذب آب و عناصر غذایی فراهم می‌کند. علاوه‌بر این، ساختار متخلخل بیوچار می‌تواند محیط مناسبی برای فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید خاک ایجاد کرده و از طریق بهبود چرخه عناصر غذایی و افزایش کارایی فتوسنتز، تولید زیست‌توده را افزایش دهد [۱، ۲۰]. بنابراین، زمانی که مقدار کافی آب همراه با مقدار بهینه بیوچار فراهم شد، اثرات مکمل این دو عامل توانست شرایط مناسب‌تری برای رشد ریشه، توسعه اندام‌های هوایی و در نهایت تولید علوفه ایجاد کند. با این حال، کاهش عملکرد در سطح ۵ درصد بیوچار نشان داد که افزایش مقدار بیوچار الزاماً به افزایش بیشتر تولید زیست‌توده منجر نمی‌شود. این کاهش احتمالاً ناشی از افزایش هدایت الکتریکی محیط ریشه، تغییر pH، برهم خوردن تعادل عناصر غذایی و افزایش فشار اسمزی محلول خاک است که می‌تواند موجب افزایش هزینه متابولیکی گیاه برای تنظیم اسمزی و حفظ عملکرد سلولی شود و در نتیجه سهم کمتری از مواد فتوسنتزی به تولید ماده خشک اختصاص یابد [۲۰]. بنابراین، پاسخ عملکرد علوفه به بیوچار دارای یک سطح بهینه بوده و عبور از این سطح، حتی در شرایط تأمین آب مناسب، می‌تواند از مزایای حاصل از کاربرد بیوچار بکاهد. الگوی مشاهده‌شده در این پژوهش با نتایج مطالعات پیشین مطابقت دارد که نشان داده‌اند کاربرد مقادیر بهینه بیوچار از طریق افزایش ظرفیت نگهداری آب، بهبود جذب عناصر غذایی و افزایش فتوسنتز، موجب افزایش تولید زیست‌توده گیاه می‌شود [۲۰]. همچنین، گزارش شده است که بیوچار در شرایط محدودیت رطوبت، با بهبود خصوصیات هیدرولیکی خاک می‌تواند بخشی از اثرات منفی تنش خشکی بر عملکرد گیاه را کاهش دهد [۱]. از سوی دیگر، محققین نشان داده‌اند که پاسخ گیاه به بیوچار به مقدار مصرف، نوع خاک و شرایط محیطی وابسته است و افزایش مقدار بیوچار بیش از سطح بهینه همواره موجب افزایش عملکرد نمی‌شود [۷]. این یافته‌ها با الگوی مشاهده‌شده در پژوهش حاضر، یعنی بهبود عملکرد در مقدار بهینه بیوچار و کاهش آن در سطح بالاتر، همخوانی دارد. در مجموع، نتایج نشان داد که افزایش عملکرد علوفه آتریپلکس حاصل برهم‌کنش مناسب بین تأمین رطوبت و کاربرد مقدار بهینه بیوچار بود. اگرچه کاربرد بیوچار توانست بخشی از اثرات منفی محدودیت آب را کاهش دهد، اما شدت این بهبود به وضعیت رطوبتی خاک وابسته بود و بیشترین تولید علوفه زمانی حاصل شد که مقدار

بهینه بیوچار همراه با آبیاری کافی به کار گرفته شد. بنابراین، اثربخشی بیوچار در افزایش تولید زیست‌توده آتریپلکس را نمی‌توان مستقل از مدیریت آبیاری در نظر گرفت و کاربرد آن باید متناسب با میزان دسترسی گیاه به آب و با توجه به سطح بهینه مصرف بیوچار مدیریت شود.

نتایج نشان داد که پاسخ محتوای نسبی آب برگ (RWC) به سطوح مختلف بیوچار تحت تأثیر وضعیت رطوبتی خاک قرار گرفت و شدت اثر بیوچار در شرایط مختلف آبیاری یکسان نبود. کاهش RWC در ترکیب‌های دارای محدودیت شدید آب نشان‌دهنده افت وضعیت آبی گیاه و کاهش توانایی سلول‌ها در حفظ فشار تورژسانس است. با کاهش رطوبت خاک، پتانسیل آب محیط ریشه کاهش یافته و جذب آب توسط گیاه محدود می‌شود؛ در نتیجه، میزان آب موجود در بافت برگ کاهش یافته و فرآیندهای فیزیولوژیکی از جمله فتوسنتز، رشد سلولی و انتقال مواد فتوسنتزی تحت تأثیر قرار می‌گیرند [۳۹]. بنابراین، کاهش RWC در شرایط آبیاری محدود را می‌توان به کاهش دسترسی ریشه به آب و در پی آن اختلال در حفظ وضعیت آبی بافت‌های برگ نسبت داد. در مقابل، افزایش RWC در ترکیب‌های حاوی ۲/۵ درصد بیوچار، به‌ویژه تحت شرایط محدودیت آب، نشان داد که پاسخ گیاه به بیوچار به میزان تأمین رطوبت خاک وابسته است. ساختار متخلخل بیوچار موجب افزایش ظرفیت نگهداری آب، بهبود تخلخل و نفوذپذیری خاک شده و در نتیجه می‌تواند مقدار بیشتری آب را در ناحیه ریشه برای جذب گیاه حفظ کند [۱ و ۳۲]. علاوه‌بر این، توسعه بهتر سیستم ریشه در حضور بیوچار می‌تواند جذب آب و عناصر غذایی را افزایش داده و به حفظ وضعیت آبی گیاه در شرایط محدودیت رطوبت کمک کند [۱۷]. بنابراین، در شرایط کم‌آبی، بهبود ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در اثر کاربرد مقدار بهینه بیوچار می‌تواند بخشی از محدودیت آب قابل دسترس برای ریشه را جبران کرده و از کاهش شدید RWC جلوگیری کند. نکته قابل توجه در الگوی اثر متقابل آبیاری و بیوچار آن است که مزیت کاربرد ۲/۵ درصد بیوچار در شرایط محدودیت شدید آب آشکارتر بود. به‌گونه‌ای که در سطح ۶۰ درصد ظرفیت زراعی، کاربرد ۲/۵ درصد بیوچار نسبت به تیمار بدون بیوچار موجب بهبود RWC شد و نشان داد که بیوچار می‌تواند بخشی از کاهش وضعیت آبی ناشی از کمبود آب را جبران کند. با این حال، افزایش مقدار بیوچار به ۵ درصد در سطوح مختلف آبیاری با کاهش RWC نسبت‌به سطح ۲/۵ درصد همراه بود. این کاهش احتمالاً به افزایش هدایت الکتریکی محیط ریشه، تغییر pH، افزایش فشار اسمزی محلول خاک یا برهم خوردن تعادل عناصر غذایی در اثر مصرف بیش از حد بیوچار مربوط است؛ شرایطی که می‌تواند جذب آب توسط ریشه را محدود کرده و بخشی از مزایای ناشی از کاربرد بیوچار را کاهش دهد [۱۹، ۲۴]. بنابراین، الگوی مشاهده‌شده نشان می‌دهد که اثر بیوچار بر حفظ وضعیت آبی برگ دارای یک سطح بهینه بوده و پاسخ آن به شرایط رطوبتی خاک وابسته است. نتایج این پژوهش با سایر تحقیقات همخوانی دارد که نشان داده‌اند بیوچار با افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک می‌تواند وضعیت آبی گیاه را بهبود داده و مقدار RWC را در شرایط تنش خشکی افزایش دهد. بیوچار از طریق بهبود روابط آبی گیاه، کاهش تنش اکسیداتیو و حفظ پایداری غشاهای سلولی می‌تواند اثرات منفی خشکی را کاهش دهد [۳۹]. این سازوکار می‌تواند توضیح دهد که چرا اثر مثبت بیوچار بر RWC در شرایط محدودیت شدید آب بیشتر نمایان شده است؛ زیرا در چنین شرایطی، هرگونه افزایش در ذخیره و دسترسی آب در ناحیه ریشه می‌تواند نقش مهم‌تری در حفظ آب برگ داشته باشد. در مجموع، نتایج نشان داد که تغییرات RWC آتریپلکس کانسنس حاصل برهم‌کنش وضعیت آبیاری و مقدار بیوچار بود. کاربرد ۲/۵ درصد بیوچار، به‌ویژه در شرایط کم‌آبی، مؤثرترین سطح برای حفظ محتوای نسبی آب برگ و بهبود وضعیت آبی گیاه بود، درحالیکه افزایش مقدار بیوچار به ۵ درصد مزیت بیشتری ایجاد نکرد و حتی موجب کاهش این

شاخص شد. بنابراین، اثربخشی بیوچار در حفظ وضعیت آبی آتریپلکس را نمی‌توان مستقل از شرایط آبیاری تفسیر کرد و کاربرد مقدار بهینه بیوچار همراه با مدیریت مناسب آبیاری می‌تواند راهکار مؤثرتری برای کاهش اثرات منفی محدودیت آب بر روابط آبی گیاه باشد.

نتایج نشان داد که کارایی مصرف آب آبیاری (IWUE) به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثر متقابل آبیاری و بیوچار قرار گرفت و پاسخ گیاه به کاربرد بیوچار در سطوح مختلف آبیاری یکسان نبود. بیشترین کارایی مصرف آب در ترکیب ۸۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با ۲/۵ درصد بیوچار حاصل شد (شکل ۲). این الگو نشان می‌دهد که حداکثر IWUE الزاماً در شرایط بیشترین تأمین آب یا شدیدترین محدودیت آبی حاصل نمی‌شود، بلکه زمانی به دست می‌آید که بین میزان آب مصرفی و تولید زیست‌توده تعادل مناسبی برقرار باشد. در شرایط آبیاری کامل، اگرچه تولید علوفه بیشتر بود، مصرف حجم بیشتری از آب موجب کاهش کارایی مصرف آب شد. در مقابل، محدودیت شدید آب در سطح ۶۰ درصد ظرفیت زراعی موجب کاهش فتوسنتز، محدود شدن رشد و افت تولید ماده خشک شد و در نتیجه افزایش بهره‌وری ناشی از کاهش مصرف آب نتوانست کاهش تولید زیست‌توده را جبران کند. بنابراین، شرایط ۸۰ درصد ظرفیت زراعی، به‌ویژه در ترکیب با ۲.۵ درصد بیوچار، تعادل مناسب‌تری بین مصرف آب و تولید علوفه ایجاد کرد [۸ و ۱۴]. افزایش IWUE در ترکیب‌های حاوی ۲/۵ درصد بیوچار را می‌توان به اثر همزمان بیوچار و سطح مناسب آبیاری بر روابط آب و خاک نسبت داد. بیوچار با افزایش ظرفیت نگهداری آب، بهبود تخلخل و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و کاهش اتلاف آب، می‌تواند مقدار بیشتری از آب را در ناحیه ریشه حفظ کرده و دسترسی گیاه به آب را بهبود بخشد. علاوه‌بر این، توسعه بهتر سیستم ریشه، افزایش جذب عناصر غذایی، بهبود فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید خاک و افزایش کارایی فتوسنتز می‌تواند به تولید ماده خشک بیشتر به ازای واحد آب مصرفی منجر شود [۱ و ۲۰]. در نتیجه، هنگامی که آبیاری در سطح ۸۰ درصد ظرفیت زراعی انجام شد، کاربرد ۲/۵ درصد بیوچار توانست بخشی از محدودیت ناشی از کاهش آب آبیاری را جبران کرده و با حفظ تولید علوفه، مصرف آب را کارآمدتر کند. در مقابل، در سطح ۵ درصد بیوچار، کاهش IWUE نسبت‌به سطح ۲/۵ درصد نشان داد که افزایش مقدار بیوچار فراتر از سطح بهینه الزاماً موجب بهبود بهره‌وری مصرف آب نمی‌شود. این کاهش احتمالاً ناشی از افزایش هدایت الکتریکی محیط ریشه، تغییر pH، افزایش فشار اسمزی محلول خاک یا برهم خوردن تعادل عناصر غذایی است که می‌تواند جذب آب و عناصر غذایی را محدود کرده و بخشی از مواد فتوسنتزی را به جای تولید زیست‌توده، صرف فرایندهای سازگاری با تنش کند [۲۰ و ۲۴]. بنابراین، پاسخ IWUE به بیوچار دارای یک دامنه بهینه بوده و مقدار ۲/۵ درصد در شرایط این پژوهش مناسب‌تر از سطح ۵ درصد بود. بررسی الگوی اثر متقابل نشان داد که مزیت کاربرد ۲/۵ درصد بیوچار در شرایط کم‌آبی ملایم بیشتر نمایان شد. در سطح ۸۰ درصد ظرفیت زراعی، ترکیب این مقدار بیوچار توانست با بهبود نگهداری و دسترسی آب در ناحیه ریشه، کاهش آب آبیاری را تا حد زیادی جبران کرده و بیشترین IWUE را ایجاد کند. در مقابل، در شرایط تنش شدید، اگرچه کاربرد بیوچار موجب بهبود IWUE نسبت‌به تیمار بدون بیوچار شد، شدت کمبود آب به اندازه‌ای بود که کاهش رشد و تولید علوفه را به‌طور کامل جبران نکرد. از سوی دیگر، در آبیاری کامل، افزایش آب مصرفی موجب شد که با وجود تولید بیشتر علوفه، مقدار آب بیشتری برای تولید هر واحد زیست‌توده مصرف شود و در نتیجه IWUE نسبت‌به شرایط آبیاری ۸۰ درصد ظرفیت زراعی کمتر باشد. این الگو نشان می‌دهد که اثر بیوچار بر بهره‌وری مصرف آب به شدت به سطح تأمین آب وابسته بوده و بیشترین مزیت آن در شرایطی حاصل شد که محدودیت آب در حد متوسط و قابل‌تحمل برای گیاه بود. نتایج این پژوهش با

یافته‌های سایر محققان مطابقت دارد. هدف اصلی مدیریت آبیاری، افزایش تولید ماده خشک به ازای هر واحد آب مصرفی است، نه صرفاً افزایش مصرف آب [۸]. اعمال کم‌آبی کنترل‌شده می‌تواند بدون کاهش شدید عملکرد، موجب افزایش کارایی مصرف آب شود [۱۴]. از سوی دیگر، بیوچار با افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک و بهبود روابط آب و خاک و گیاه، می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری مصرف آب در گیاهان شود. بیوچار همچنین از طریق بهبود وضعیت آبی گیاه، افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی و کاهش اثرات تنش خشکی، می‌تواند به افزایش بهره‌وری مصرف آب کمک کند [۳۹]. نتایج تحقیقات نیز نشان داده است که کاربرد بیوچار در شرایط تنش خشکی می‌تواند کارایی مصرف آب را در گیاه کارلا افزایش دهد. همچنین، پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که کاربرد مقادیر بهینه بیوچار می‌تواند ضمن حفظ عملکرد گیاه، کارایی مصرف آب را افزایش داده و نیاز آبی محصولات را در شرایط محدودیت منابع آب کاهش دهد[۴۰]. در مجموع، نتایج نشان داد که بیشترین کارایی مصرف آب آبیاری در نتیجه برهم‌کنش مناسب سطح آبیاری و مقدار بیوچار حاصل شد و اثر بیوچار را نمی‌توان مستقل از وضعیت آبیاری تفسیر کرد. ترکیب ۸۰ درصد ظرفیت زراعی و ۲/۵ درصد بیوچار بهترین تعادل را بین مصرف آب و تولید زیست‌توده ایجاد کرد و بیشترین IWUE را به همراه داشت، درحالیکه تنش شدید آب توانایی گیاه برای جبران کاهش تولید را محدود کرد و آبیاری کامل نیز به‌دلیل مصرف بیشتر آب، کارایی پایین‌تری ایجاد کرد. همچنین، افزایش مقدار بیوچار از ۲/۵ به ۵ درصد مزیت بیشتری ایجاد نکرد و حتی موجب کاهش IWUE شد. بنابراین، تعیین همزمان سطح مناسب آبیاری و مقدار بهینه بیوچار برای افزایش کارایی مصرف آب آتریپلکس کانسنس، به‌ویژه در شرایط محدودیت منابع آب، اهمیت زیادی دارد.

نتایج نشان داد که پاسخ صفات ریشه آتریپلکس کانسنس به سطوح مختلف بیوچار تحت تأثیر وضعیت رطوبتی خاک قرار گرفت و شدت پاسخ ریشه در شرایط مختلف آبیاری یکسان نبود. افزایش طول، حجم، وزن تر و خشک ریشه در ترکیب‌های حاوی ۲/۵ درصد بیوچار، به‌ویژه در شرایطی که آب کافی یا محدودیت آب در حد قابل تحمل برای گیاه فراهم بود، نشان‌دهنده اثر مثبت کاربرد مقدار بهینه بیوچار بر توسعه سیستم ریشه است. این پاسخ را می‌توان به بهبود همزمان خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک نسبت داد. بیوچار با افزایش تخلخل، کاهش مقاومت مکانیکی خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و بهبود تهویه محیط ریشه، شرایط مناسب‌تری برای گسترش ریشه، افزایش تعداد ریشه‌های فرعی و افزایش سطح تماس ریشه با خاک فراهم می‌کند و در نتیجه جذب آب و عناصر غذایی را بهبود می‌بخشد. اثر مثبت بیوچار بر توسعه ریشه می‌تواند از طریق بهبود خصوصیات شیمیایی و زیستی خاک نیز تقویت شود. افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و فراهمی عناصر غذایی، به‌ویژه نیتروژن، فسفر و پتاسیم، می‌تواند رشد ریشه را تحریک کند. همچنین، ساختار متخلخل بیوچار محیط مناسبی برای استقرار و فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید خاک فراهم می‌کند و از این طریق می‌تواند شرایط مناسب‌تری برای توسعه سیستم ریشه ایجاد نماید [۲۱ و ۲۰]. بنابراین، هنگامی که مقدار بهینه بیوچار با سطح مناسب آبیاری همراه شد، بهبود همزمان دسترسی ریشه به آب، عناصر غذایی و شرایط فیزیکی مناسب خاک، امکان توسعه بیشتر سیستم ریشه را فراهم کرد. در شرایط محدودیت شدید آب، کاهش طول و حجم ریشه در مقایسه با شرایط آبیاری مناسب را می‌توان به کاهش دسترسی ریشه به آب و افزایش فشار اسمزی محیط نسبت داد. با این حال، کاربرد ۲/۵ درصد بیوچار در این شرایط توانست بخشی از محدودیت رشد ریشه را کاهش دهد که احتمالاً ناشی از افزایش نگهداری آب در ناحیه ریشه و بهبود شرایط فیزیکی خاک است. این موضوع نشان می‌دهد که بیوچار می‌تواند در شرایط کم‌آبی با حفظ آب قابل دسترس در محیط ریشه، بخشی از اثرات منفی محدودیت رطوبت بر توسعه ریشه را جبران کند. با

این حال، شدت تنش شدید به اندازه‌ای است که حتی کاربرد مقدار بهینه بیوچار نیز لزوماً نمی‌تواند رشد ریشه را به سطح شرایط آبیاری مناسب برساند. در مقابل، کاهش طول، حجم، وزن تر و خشک ریشه در ترکیب‌های حاوی ۵ درصد بیوچار، به‌ویژه تحت تنش شدید خشکی، نشان داد که افزایش مقدار بیوچار فراتر از سطح بهینه می‌تواند اثر متقابل نامطلوبی با شرایط محدودیت آب ایجاد کند. این کاهش احتمالاً ناشی از افزایش هدایت الکتریکی محیط ریشه، برهم خوردن تعادل عناصر غذایی و افزایش فشار اسمزی محلول خاک است. در چنین شرایطی، بخش قابل توجهی از انرژی گیاه صرف سازگاری با تنش اسمزی شده و منابع کمتری برای رشد و توسعه سیستم ریشه باقی می‌ماند. بنابراین، پاسخ صفات ریشه به بیوچار دارای یک دامنه بهینه بوده و افزایش مقدار مصرف از ۲/۵ به ۵ درصد، به‌ویژه در شرایط محدودیت شدید آب، نه‌تنها مزیت بیشتری ایجاد نکرده بلکه می‌تواند بخشی از اثرات مثبت بیوچار بر رشد ریشه را کاهش دهد. نتایج این پژوهش با گزارش سایر پژوهشگران همخوانی دارد که بیان کردند توسعه سیستم ریشه یکی از مهم‌ترین سازوکارهای گیاهان برای افزایش جذب آب و عناصر غذایی و تحمل تنش خشکی است [۳۶، ۹ و ۲۲]. همچنین گزارش شده است که شدت تنش خشکی تعیین‌کننده پاسخ ریشه بوده و تنش ملایم ممکن است رشد ریشه را تحریک کند، درحالیکه تنش شدید موجب محدود شدن رشد آن می‌شود [۱۸]. این یافته‌ها با الگوی مشاهده‌شده در پژوهش حاضر مطابقت دارد و نشان می‌دهد که پاسخ ریشه نه‌تنها به مقدار بیوچار، بلکه به وضعیت رطوبتی خاک نیز وابسته است. در مجموع، نتایج نشان داد که توسعه سیستم ریشه آتریپلکس کانسنس حاصل برهم‌کنش وضعیت آبیاری و مقدار بیوچار بود و اثر مثبت بیوچار تنها در یک دامنه مصرف بهینه و در شرایط رطوبتی مناسب‌تر آشکار شد. کاربرد ۲/۵ درصد بیوچار توانست با بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، شرایط مناسب‌تری برای توسعه ریشه فراهم کند، درحالیکه افزایش آن به ۵ درصد، به‌ویژه تحت تنش شدید خشکی، موجب کاهش مزیت حاصل از بیوچار شد. بنابراین، مدیریت همزمان آبیاری و مقدار بیوچار برای دستیابی به توسعه مناسب سیستم ریشه و افزایش توانایی آتریپلکس در جذب آب و عناصر غذایی اهمیت دارد.

در شرایط تنش شدید خشکی، حتی با کاربرد بیوچار، نسبت ریشه به اندام هوایی نسبتاً بالا باقی ماند که نشان‌دهنده تخصیص بخش بیشتری از مواد فتوسنتزی به حفظ و توسعه سیستم ریشه برای افزایش توان جذب آب است. در مقابل، در شرایط آبیاری مطلوب و کاربرد ۲/۵ درصد بیوچار، رشد اندام هوایی با شدت بیشتری نسبت‌به رشد ریشه افزایش یافت و در نتیجه این نسبت کاهش پیدا کرد. این نتایج نشان می‌دهد که بیوچار زمانی بیشترین کارایی را در تغییر الگوی تخصیص زیست‌توده دارد که همراه با تأمین رطوبت کافی یا تنش ملایم استفاده شود. افزایش نسبت ریشه به اندام هوایی در شرایط کم‌آبی یکی از مهم‌ترین پاسخ‌های سازشی گیاهان به تنش خشکی محسوب می‌شود. در این شرایط، رشد اندام هوایی بیش از رشد ریشه محدود شده و گیاه برای افزایش احتمال بقا، سهم بیشتری از مواد فتوسنتزی را به توسعه و حفظ سیستم ریشه اختصاص می‌دهد تا ظرفیت جذب آب افزایش یابد [۳۲ و ۱۵]. در مقابل، کاهش این نسبت در تیمار ۲/۵ درصد بیوچار را نباید به معنای کاهش رشد ریشه دانست، بلکه بیانگر آن است که بهبود وضعیت آبی و تغذیه‌ای خاک، رشد اندام هوایی را با شدت بیشتری نسبت‌به ریشه افزایش داده است. بیوچار با افزایش ظرفیت نگهداری آب، بهبود ساختمان خاک، افزایش فراهمی عناصر غذایی و توسعه سیستم ریشه، شرایط مطلوب‌تری برای رشد گیاه فراهم می‌کند؛ در نتیجه، محدودیت‌های محیطی کاهش یافته و گیاه بخش بیشتری از زیست‌توده تولیدی را به رشد ساقه و برگ اختصاص می‌دهد [۱]. بنابراین، کاهش نسبت ریشه به اندام هوایی در تیمار ۲/۵ درصد بیوچار را می‌توان نشانه‌ای از بهبود شرایط رشد و افزایش تعادل بین

رشد ریشه و اندام هوایی دانست، نه کاهش کارایی سیستم ریشه. نتایج این پژوهش با یافته‌های سایر پژوهشگران مطابقت دارد که تغییر نسبت ریشه به اندام هوایی را یکی از مهم‌ترین پاسخ‌های گیاهان به تغییرات محیطی، به‌ویژه تنش خشکی، معرفی کرده‌اند [۳۱]. همچنین گزارش شده است که در شرایط محدودیت آب، گیاهان با تغییر الگوی تخصیص زیست‌توده، سهم بیشتری از ماده خشک را به سیستم ریشه اختصاص می‌دهند تا توانایی جذب آب افزایش یابد [۱۵]. از سوی دیگر، کاربرد مقادیر بهینه بیوچار با بهبود روابط آبی و وضعیت تغذیه‌ای گیاه، موجب افزایش رشد اندام هوایی و کاهش نسبت ریشه به اندام هوایی می‌شود که با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد [۱].

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش خشکی موجب کاهش معنی‌دار رشد، عملکرد علوفه، وضعیت آبی گیاه و توسعه سیستم ریشه اتریپلکس کانسنس شد، درحالیکه کاربرد بیوچار برگ خرما توانست بخش قابل توجهی از این اثرات منفی را تعدیل کند. در میان سطوح مختلف بیوچار، کاربرد ۲/۵ درصد وزنی بیشترین تأثیر را بر بهبود ارتفاع گیاه، قطر ساقه، عملکرد علوفه، محتوای نسبی آب برگ، کارایی مصرف آب آبیاری و صفات ریشه داشت، اما افزایش آن به ۵ درصد موجب کاهش اغلب صفات اندازه‌گیری‌شده گردید. بررسی اثرات متقابل نیز نشان داد که بیشترین رشد و عملکرد در تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با ۲/۵ درصد بیوچار حاصل شد، درحالیکه بیشترین کارایی مصرف آب آبیاری در تیمار ۸۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با ۲/۵ درصد بیوچار به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که بیوچار از طریق بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و تقویت توسعه سیستم ریشه، مقاومت گیاه به تنش خشکی را افزایش می‌دهد. بنابراین، کاربرد ۲/۵ درصد وزنی بیوچار همراه با آبیاری در سطح ۸۰ درصد ظرفیت زراعی، به‌دلیل افزایش بهره‌وری مصرف آب همراه با حفظ عملکرد مطلوب، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مدیریتی مناسب برای تولید علوفه اتریپلکس کانسنس در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌ویژه جنوب شرق ایران، پیشنهاد شود.

سپاسگزاری

این مقاله با حمایت مالی دانشگاه زابل کد پژوهانه UOZ-GR-1837 انجام شده است.

References

[1]. Agegnehu, G., Srivastava, A. K., & Bird, M. I. (2017). The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review. Applied Soil Ecology, 119, 156–170. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.008

[2]. Albalsmeh, A., & Piri, H. (2024). Mitigating water stress effects on roselle production: Effects of Conocarpus biochar and nitrogen fertilizer on soil nutrients and yield. Plant and Soil, 498, 617–635. https://doi.org/10.1007/s11104-023-06459-9.

[3]. Askari-Dehno, S., Hassanpour, F., Piri, H., & Khamari, A. (2025). Effect of brown seaweed extract on mitigating the adverse effects of drought stress in bell pepper. Water and Irrigation Management, 15(1), 147–164. [in Farsi]

[4]. Barahooi, F., Piri, H., & Naserin, A. (2023). Effect of the amount and particles size of Conocarpus Biochar on physical and hydraulic properties and evaporation from loam sandy soil surface. Journal of Water and Soil Conservation, 30 (2), 97-117. https://doi.org/10.22069/jwsc.2023.21149.3633. [in Farsi]

[5]. Barrs, H. D., & Weatherley, P. E. (1962). A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. Australian Journal of Biological Sciences, 15, 413–428. 10.1071/BI9620413

[6]. Blanco-Canqui, H. (2021). Does biochar improve all soil ecosystem services? GCB Bioenergy, 13, 291–304.

[7]. Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and soil physical properties. Soil Science Society of America Journal, 81(4), 687–711. https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017

[8]. Blum, A. (2009). Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. Field Crops Research, 112, 119–123. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.03.009

[9]. Comas, L. H., Becker, S. R., Cruz, V. M. V., Byrne, P. F., & Dierig, D. A. (2013). Root traits contributing to plant productivity under drought. Frontiers in Plant Science, 4, 442. https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00442

[10]. Cong, M., Hu, Y., Sun, X., et al. (2023). Long-term effects of biochar application on the growth and physiological characteristics of maize. Frontiers in Plant Science, 14, 1172425. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1172425

[11]. Dehdari, S., Jafari, M., Hamedanian, F., & Tavili, A. (2008). Investigation on Allelopathic effects of Atriplex canescens (fourwing sultbush) on seed germination of Salsola rigida. Pajouhesh & Sazandegi, 81, 145-151. [in Farsi]

[12]. Edeh, I. G., Mašek, O., & Buss, W. (2020). A meta-analysis on biochar's effects on soil water properties – New insights and future research challenges. Science of the Total Environment, 714, 136857. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136857

[13]. Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. Agronomy for Sustainable Development, 29, 185–212. https://doi.org/10.1051/agro:2008021

[14]. Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. Journal of Experimental Botany, 58, 147–159. https://doi.org/10.1093/jxb/erl165

[15]. Freschet, G. T., Valverde-Barrantes, O. J., Tucker, C. M., et al. (2017). Climate, soil and plant functional types as drivers of global fine-root trait variation. Journal of Ecology, 105(5), 1182–1196. https://doi.org/10.1111/1365-2745.12769

[16]. Godlewska, P., Schmidt, H. P., Ok, Y. S., & Oleszczuk, P. (2017). Biochar for composting improvement and contaminants reduction: A review. Bioresource Technology, 246, 193–202. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.095

[17]. Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde, M., & Bastos, A. C. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. Agriculture, Ecosystems & Environment, 144(1), 175–187. https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.015

[18]. Koevoets, I. T., Venema, J. H., Elzenga, J. T. M., & Testerink, C. (2016). Roots withstanding their environment: Exploiting root system architecture responses to abiotic stress. Frontiers in Plant Science, 7, 1335. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01335

[19]. Kumar, J. A., Sathish, S., Prabu, D., Renita, A. A., Saravanan, A., Deivayanai, V. C., ... & Hosseini-Bandegharaei, A. (2023). Agricultural waste biomass for sustainable bioenergy production: Feedstock, characterization and pre-treatment methodologies. Chemosphere, 331, 138680. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138680

[20]. Lehmann, J., & Joseph, S. (2024). Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation (3rd ed.). Routledge, London.

[21]. Liu, X., Ma, Y., Manevski, K., Andersen, M. N., Li, Y., Wei, Z., & Liu, F. (2022). Biochar and alternate wetting-drying cycles improving rhizosphere soil nutrients availability and tobacco growth by altering root growth strategy in

Ferralsol and Anthrosol. Science of the Total Environment, 806, 150513. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150513

[22]. Lynch, J. P. (2019). Root phenotypes for improved nutrient capture: An underexploited opportunity for global agriculture. New Phytologist, 223(2), 548–564. https://doi.org/10.1111/nph.15738

[23]. Mir, A., Piri, H., & Naserian, A. (2021). Effects of different wheat biochar levels and water stress on quantitative and qualitative characteristics of bitter melon (Momordica charantia L.) under pot conditions. Agricultural Water Research, 35(2), 170–185. [in Farsi]

[24]. Murtaza, G., Ahmed, Z., Eldin, S. M., et al. (2023). Biochar–soil–plant interactions: A cross talk for sustainable agriculture under changing climate. Frontiers in Environmental Science, 11, 1059449. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1059449

[25]. Nath, H., Sarkar, B., Mitra, S., & Bhaladhare, S. (2022). Biochar from biomass: A review on biochar preparation, its modification and impact on soil, including soil microbiology. Geomicrobiology Journal, 39(3–5), 373–388.https://doi.org/10.1080/01490451.2022.2028942

[26]. Nepal, J., Ahmad, W., Munsif, F., Khan, A., & Zou, Z. (2023). Advances and prospects of biochar in improving soil fertility, biochemical quality, and environmental applications. Frontiers in Environmental Science, 11, 1114752. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1114752

[27]. Olawuyi, B. J., Saka, R. O., Nduka, D. O. & Babafemi, A. J. (2019). Comparative study of superabsorbent polymers and pre-soaked pumice as internal curing agents in rice husk ash based highperformance concrete. 3rd International Conference on Application of Superabsorbent Polymers & Other New Admixtures towards Smart Concrete, pp 75-84. 25-26 November 2019, Skukuza, South Africa. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33342-3_9.

[28]. Osmond, C.B., Björkman, O., & Anderson, D.J. (2012). Physiological processes in plant ecology: toward a synthesis with Atriplex. Springer Science & Business Media.

[29]. Payero J.O., Melvin S.R., Irmak S., & Tarkalson D. (2009). Yield response of corn to deficit irrigation in a semiarid climate. Agricultural Water Managent. 84, 101–112. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.01.009

[30]. Piri, H., & Mir, A. (2025). Effects of biochar on irrigation water use efficiency and nitrogen use efficiency of bitter melon under water deficit conditions. Water and Irrigation Management, 14(2), 357–373. [in Farsi]

[31]. Poorter, H., Niklas, K. J., Reich, P. B., Oleksyn, J., Poot, P., & Mommer, L. (2012). Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta-analyses of interspecific variation and environmental control. New Phytologist, 193, 30–50. https://doi.org/10.1111/j.14698137.2011.03952.x

[32]. Premalatha, R. P., Poorna Bindu, J., Nivetha, E., Malarvizhi, P., Manorama, K., Parameswari, E., & Davamani, V. (2023). A review on biochar's effect on soil properties and crop growth. Frontiers in Energy Research, 11, 1092637. https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1092637

[33]. Rathinapriya, P., Maharajan, T., Jothi, R., Prabakaran, M., Lee, I.-B., Yi, P.-H., & Jeong, S. T. (2025). Unlocking biochar impacts on abiotic stress dynamics: A systematic review of soil quality and crop improvement. Frontiers in Plant Science, 15, 1479925. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1479925.

[34]. Razzaghi, F., Obour, P. B., & Arthur, E. (2020). Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. Geoderma, 361, 114055. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114055

[35]. Soliz, D., Glenn, E. P., Seaman, R., Yoklic, M., Nelson, S. G. & Brown., P.(2011). Water consumption, irrigation efficiency and nutritional value of Atriplex lentiformis grown on reverse osmosis brine in a desert district. Agriculture, Ecosystem and Environment, 140(3): 473-483. https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.012

[36]. Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2018). Plant Physiology and Development (7th ed.). Sinauer Associates.

[37]. Tourajzadeh, A., Piri, H., Naserian, A., & Chari, M. M. (2024). Effects of biochar and irrigation water salinity on yield components and grain protein content of quinoa under deficit irrigation conditions. Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 17(4), 597–610. [in Farsi]

[38]. Walker, D. J., Lutts, S., Sánchez-García, M. & Correal, E.(2014). Atriplex halimus L.: Its biology and uses. Journal of Arid Environments, 100-101:111-121. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2013.09.004

[39]. Wu, Y., Wang, X., Zhang, L., et al. (2023). The critical role of biochar in mitigating the adverse impacts of drought and salinity stress in plants. Frontiers in Plant Science, 14, 1163451. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1163451

[40]. Zhang, D., Jie, H., Zhang, W., Gao, Y., Rao, W., Li, D., & Wang, D. (2023). Effect of biochar amendment on soil water retention and crop drought resistance: A review. Science of Soil and Water Conservation, 21(6), 144–150. https://doi.org/10.16843/j.sswc.2023.06.015

Effect of Date Palm Biochar on the Establishment and Growth of *Atriplex canescens* in Sandy Loam Soil under Drought Stress

(Research Paper)

1 -Halimeh Piri*, Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran.

h_piri2880@uoz.ac.ir

Received: 30 Jun. 2026
Accepted: 21 Sep. 2026

Abstract

Biochar, as an organic soil amendment, plays an important role in mitigating the adverse effects of drought stress and improving plant growth in arid and semi-arid regions by enhancing the physical, chemical, and biological properties of soil, increasing water-holding capacity, and improving nutrient availability. However, information regarding the optimum application rate of biochar for the establishment and growth of *Atriplex canescens* under water-deficit conditions remains limited. A pot experiment was conducted in a research greenhouse in Iranshahr, Iran, during 2024 to evaluate the effects of different irrigation regimes and biochar application on growth, forage yield, physiological characteristics, and root traits of *Atriplex canescens*. The experiment was arranged as a factorial based on a completely randomized design (CRD) with three replications. The first factor consisted of three irrigation levels based on field capacity (60%, 80%, and 100% of field capacity), while the second factor included four biochar application rates (0, 1.25, 2.5, and 5% w/w of soil). Seeds were directly sown in pots (20 cm diameter × 30 cm height), and after 150 days, plant height, stem diameter, fresh and dry forage yield, relative leaf water content (RLWC), irrigation water use efficiency (IWUE), root length, root volume, root fresh weight, root dry weight, and root-to-shoot ratio were measured. Data were subjected to analysis of variance (ANOVA), and treatment means were compared using Duncan's multiple range test at the 5% probability level. The results showed that both the main effects and the interaction effects of irrigation levels and biochar application were significant for all measured traits ($P < 0.01$). Reducing irrigation significantly decreased vegetative growth, forage yield, relative leaf water content, and root development, whereas the root-to-shoot ratio increased under water deficit conditions. Application of biochar up to 2.5% (w/w) significantly increased plant height (108.2 cm), stem diameter (26.3 mm), fresh forage yield (452.5 g pot^{-1}), dry forage yield (172.3 g pot^{-1}), relative leaf water content (91.8%), irrigation water use efficiency (3.82 g L^{-1}), root length (59.7 cm), root volume (115.5 cm^3), root fresh weight (281.4 g), and root dry weight (84.5 g). However, increasing the biochar rate to 5% resulted in a decline in most measured traits. Interaction analysis revealed that the highest growth and forage production were obtained under 100% field capacity combined with 2.5% biochar, whereas the highest irrigation water use efficiency was achieved under 80% field capacity combined with 2.5% biochar. Therefore, the application of 2.5% biochar combined with irrigation at 80% of field capacity is recommended as the optimum treatment for sustainable forage production of *Atriplex canescens* in arid and semi-arid regions.

Keywords: Forage yield, Irrigation water use efficiency, Root traits.