نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۲۰، مهر - آبان ۱۴۰۵، ص. ۵۴۶-۵۳۳

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.4, Vol. 20, Oct.-Nov. 2026, p. 533-546

مقاله علمی-پژوهشی

اثر کاربرد بیوچار بر گیاه دارویی نعناع فلفلی تحت شرایط تنش آبی

فائزه شریعتی تبار[۱*]، سید رضا هاشمی[۲]، عباس خاشعی سیوکی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۷

چکیده

کمبود منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بهره‌گیری از راهبردهای مدیریتی نوین نظیر کم‌آبیاری و کاربرد اصلاح‌کننده‌های آلی خاک را در کشاورزی اجتناب‌ناپذیر ساخته است. این پژوهش با هدف ارزیابی اثرات اصلی و متقابل تنش کم‌آبیاری و کاربرد بیوچار بر صفات رشدی، عملکردی و کارایی مصرف آب گیاه دارویی نعناع فلفلی به اجرا درآمد. آزمایش به‌صورت گلدانی و در قالب طرح فاکتوریل بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی با دو عامل شامل کم‌آبیاری در سه سطح (تأمین ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه) و بیوچار در سه سطح (صفر، ۵ و ۱۰ درصد حجمی خاک) در سه تکرار در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی کم‌آبیاری بر وزن تر و خشک برگ، ساقه و ریشه و کارایی مصرف آب بر مبنای وزن تر در سطح یک درصد معنی‌دار بود. با کاهش آب آبیاری از ۱۰۰ به ۵۰ درصد نیاز آبی، کاهش معنی‌داری در زیست‌توده اندام‌های هوایی و ریشه مشاهده شد. اثر اصلی بیوچار نیز بر تمامی صفات معنی‌دار گردید و کاربرد ۱۰ درصد حجمی بیوچار، بالاترین مقادیر وزن تر و خشک اندام‌ها و کارایی مصرف آب را به خود اختصاص داد. اثر متقابل دو عامل بر وزن تر و خشک ریشه معنی‌دار بود؛ به‌گونه‌ای که در تنش ملایم و در حضور بیوچار، ریشه پاسخی جبرانی و فراتر از شرایط بدون تنش از خود نشان داد. با این حال، این مکانیسم جبرانی در تنش شدید فرو پاشید. مهم‌ترین یافته کاربردی آن بود که تیمارهای تحت تنش شدید اما حاوی بیوچار، از نظر کارایی مصرف آب بر مبنای وزن خشک، تفاوت معنی‌داری با تیمار آبیاری کامل بدون بیوچار نداشتند. تلفیق کم‌آبیاری با کاربرد بیوچار، راهکاری مؤثر برای کاهش مصرف آب و حفظ کارایی مصرف آب در کشت نعناع فلفلی است و می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد مدیریتی پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک توصیه گردد.

واژه‌های کلیدی: اصلاح‌کننده آلی خاک، بهره‌وری آب، تنش خشکی، زیست‌توده، گیاهان دارویی

مقدمه

کمبود منابع آب شیرین، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، به یکی از جدی‌ترین چالش‌های پیش روی کشاورزی پایدار در قرن حاضر تبدیل شده است. ایران با اقلیمی عمدتاً خشک و نیمه‌خشک، میانگین بارش سالانه‌ای معادل یک‌سوم میانگین جهانی و سرانه منابع آبی کمتر از ۱۴۰۰ متر مکعب، عملاً در آستانه بحران شدید آب قرار دارد و پیش‌بینی‌ها حاکی از کاهش این سرانه به حدود ۸۰۰ متر مکعب تا سال ۲۰۵۰ است (Hajirad et al., 2026). در چنین شرایطی، بخش کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب شیرین (با سهمی بین ۷۰ تا ۸۵ درصد از کل مصارف)، ناگزیر از اتخاذ راهبردهای نوین مدیریتی برای افزایش کارایی مصرف آب است. یکی از مؤثرترین این راهبردها، کم‌آبیاری است که در آن، به گیاه اجازه داده می‌شود تا با دریافت حجمی کمتر از نیاز کامل تبخیر-تعرق خود، ضمن تحمل سطحی از تنش آبی، محصولی با حداکثر درآمد خالص تولید کند. هدف اصلی در کم‌آبیاری، نه لزوماً دستیابی به حداکثر عملکرد در واحد سطح، بلکه بهینه‌سازی سود اقتصادی به ازای واحد حجم آب مصرفی، کاهش آبیاری‌های با بازده پایین و گسترش سطح زیر کشت با آب ذخیره‌شده است (فخرآبادی و خوش‌سیمای چنار، ۱۴۰۰). پژوهش‌های متعدد، اثربخشی کم‌آبیاری را در محصولات مختلف تأیید کرده‌اند (Rowland et al., 2018؛ Ekren et al., 2012؛ آقایاری و همکاران، ۱۳۹۵؛ خوش‌سیمای چنار و همکاران، ۱۴۰۴). هرچند در صورت اعمال تنش در مراحل حساس، کاهش عملکرد نیز دور از انتظار نیست (English, 1989).

با این حال، تنش خشکی ناشی از کم‌آبیاری می‌تواند منجر به

۱- کارشناس ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
۲- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
۳- استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
(*- نویسنده مسئول: F.shariati1369@yahoo.com)
DOI: 10.22034/idj.2026.570569.2674

کاهش پتانسیل آب برگ، بسته شدن روزنه‌ها، افت فتوسنتز و در نهایت کاهش زیست‌توده گیاه گردد. به همین منظور، تلفیق کم‌آبیاری با اصلاح‌کننده‌های آلی خاک نظیر بیوچار به‌عنوان راهکاری هم‌افزا برای کاهش اثرات نامطلوب تنش آبی مطرح شده است (Mumivand et al., 2023). بیوچار ماده‌ای جامد و غنی از کربن پایدار است که از گرماکافت زیست‌توده‌های گیاهی و ضایعات کشاورزی در شرایط اکسیژن محدود تولید می‌شود و به دلیل ساختار متخلخل، سطح ویژه بالا و ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد، به‌عنوان یک اصلاح‌کننده توانمند خاک شناخته می‌شود. از جمله سازوکارهای عملکردی بیوچار می‌توان به افزایش ظرفیت نگهداری آب و عناصر غذایی در خاک، تعدیل pH، بهبود فعالیت میکروبی و در نتیجه افزایش حاصلخیزی و سلامت خاک اشاره کرد (Murad et al., 2022; فخرآبادی و خوش‌سیمای چنار، ۱۴۰۰). این ویژگی‌ها باعث شده است که بیوچار بتوانند در شرایط کمبود آب، با حفظ رطوبت در ناحیه ریشه و بهبود جذب عناصر غذایی، از افت شدید عملکرد جلوگیری کند. مطالعات مروری جدید نشان می‌دهند که افزودن بیوچار به خاک قادر است ضمن کاهش حدود ۲۱ درصدی مصرف آب آبیاری، عملکرد محصولات زراعی را در شرایط کم‌آبیاری حفظ کرده و حتی ارتقا بخشد (Hajirad et al., 2026). به‌طور مشابه، پژوهشی دو ساله در مزارع آفتابگردان نشان داد که کاربرد ۳۰ تن در هکتار بیوچار همراه با کم‌آبیاری (۶۰ درصد نیاز آبی)، وزن خشک اندام هوایی و عملکرد دانه را بین ۱/۱ تا ۳۳/۵ درصد نسبت به تیمار بدون بیوچار افزایش داد و اثرات نامطلوب تنش خشکی بر کیفیت خاک و رشد گیاه را به‌طور معنی‌داری تقلیل داد (Zhang et al., 2025). تحقیقات دیگر نیز مؤید این نکته‌اند که بیوچار با کاهش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت (نظیر پراکسیداز و کاتالاز) در برگ گیاهان تحت تنش، سطح تنش اکسیداتیو را کاهش داده و با بهبود محتوای نسبی آب برگ، پایداری غشاء سلولی و حفظ کلروفیل، تاب‌آوری گیاه را در برابر خشکی افزایش می‌دهد (Beiranvandi et al., 2025).

در میان گیاهان دارویی و معطر، نعناع فلفلی (*Mentha* × *piperita* L.)، هیبریدی علفی و چندساله از خانواده نعناعیان[1]، جایگاه ویژه‌ای در صنایع غذایی، داروسازی، آرایشی و بهداشتی دارد. شهرت جهانی این گیاه مرهون اسانس غنی از منتول[2] و منتون[3] آن است که خواص دارویی متعددی از جمله درمان سرماخوردگی، سردرد، رفع تهوع و اشتها آوری را به همراه دارد (سیف سهندی و همکاران، ۱۳۹۷). نعناع فلفلی به دلیل سطح برگ بالا، دوره رشد نسبتاً کوتاه و نیاز آبی قابل توجه، به تنش کم‌آبی حساس است و عملکرد کمی و کیفی آن به‌شدت تحت تأثیر رطوبت قابل دسترس خاک قرار می‌گیرد. این حساسیت، ضرورت پژوهش در زمینه راهکارهای تعدیل اثرات خشکی بر این گیاه ارزشمند را آشکار می‌سازد. تحقیقات پیشین، اثرات مثبت کاربرد بیوچار بر رشد و عملکرد نعناع فلفلی را تأیید کرده‌اند. در مطالعه‌ای که توسط مومیوند و همکاران انجام شد، کاربرد بیوچار نه‌تنها موجب افزایش معنی‌دار ارتفاع بوته، تعداد شاخه‌های جانبی، قطر تاج پوشش، وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی نعناع فلفلی گردید، بلکه با افزایش سطوح عناصر غذایی نیتروژن، منیزیم، آهن و روی در برگ‌ها، محتوای کلروفیل، کاروتنوئیدها، نرخ فتوسنتز و هدایت روزنه‌ای را نیز بهبود بخشید (Mumivand et al., 2023). نکته حائز اهمیت در این پژوهش، بهبود کیفیت اسانس در نتیجه افزایش درصد منتول و کاهش ترکیبات نامطلوب نظیر پولگون تحت تیمار بیوچار بود (Mumivand et al., 2023). این یافته‌ها بر نقش دوگانه بیوچار در ارتقای هم‌زمان عملکرد کمی و کیفی نعناع فلفلی دلالت دارد.

با وجود شواهد موجود، بررسی اثرات متقابل کم‌آبیاری و بیوچار بر گیاهان دارویی و معطر، به‌ویژه نعناع فلفلی، کماکان در مراحل اولیه خود قرار دارد و شکاف اطلاعاتی محسوسی در خصوص پاسخ‌های رشدی، عملکردی و فیزیولوژیک این گیاه به کاربرد تلفیقی این دو راهبرد مدیریتی وجود دارد. ازاین‌رو، هدف اصلی از پژوهش حاضر، ارزیابی تأثیر سطوح مختلف کم‌آبیاری و کاربرد بیوچار و اثر متقابل آن‌ها بر صفات مورفولوژیک، عملکرد و کارایی مصرف آب گیاه دارویی نعناع فلفلی می‌باشد. نوآوری این مطالعه، در بررسی هم‌زمان این دو عامل بر تخصیص زیست‌توده به اندام‌های مختلف (برگ، ساقه و ریشه) و شاخص‌های کارایی مصرف آب، به‌منظور ارائه یک راهکار مدیریتی یکپارچه برای تولید پایدار این گیاه ارزشمند در شرایط کمبود آب است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش با هدف ارزیابی اثرات اصلی و متقابل تنش کم‌آبیاری و کاربرد بیوچار بر صفات رشدی و عملکردی گیاه نعناع فلفلی، در پاییز سال ۱۴۰۱ در شرایط اقلیمی شهر سبزوار اجرا گردید. مختصات جغرافیایی محل آزمایش عبارت است از عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۱ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۵۷ درجه و ۶۶ دقیقه شرقی و ارتفاع ۹۸۳ متر از سطح دریا. بر اساس داده‌های اقلیمی یک دوره آماری ۲۲ ساله، میانگین حداکثر و حداقل دمای سالانه منطقه به‌ترتیب ۲۳/۹ و ۹/۲ درجه سانتی‌گراد و میانگین دمای سالانه ۱۶/۶ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. بیشینه و کمینه مطلق دما در این دوره به‌ترتیب ۳۷/۶ درجه سانتی‌گراد و ۳/۲- درجه سانتی‌گراد است. دامنه نوسان دمای سالانه معادل ۲۷/۱ درجه سانتی‌گراد بوده که

1 Lamiaceae
2 Menthol
3 Menthone

منجر به شکل‌گیری دو فصل گرم و سرد کاملاً متمایز با اختلاف دمای ۱۶/۷ درجه سانتی‌گراد می‌گردد.

به‌منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محیط رشد، نمونه‌برداری از خاک مورد استفاده پیش از اعمال تیمارها صورت پذیرفت. توزیع اندازه ذرات خاک با استفاده از روش هیدرومتری تعیین گردید. بدین منظور، نمونه‌های خاک پس از عبور از الک ۲ میلی‌متری و حذف مواد آلی و آهکی، تحت آنالیز گرانولومتری قرار گرفته و بافت خاک با بهره‌گیری از مثلث بافت USDA (علیزاده، ۱۳۸۷) تعیین شد. همچنین، جرم مخصوص ظاهری خاک با استفاده از نمونه‌های دست‌نخورده با حجم مشخص و پس از خشک کردن در آون اندازه‌گیری گردید که مقدار آن ۱/۳۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب حاصل شد. خلاصه‌ای از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است. این خصوصیات شامل بافت لوم، ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی، هدایت الکتریکی و اسیدیته برای خاک دارای بیوچار و فاقد آن، درصد مواد خنثی‌شونده، کربن آلی، ازت کل و فسفر قابل جذب است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش

بافت خاک	درصد اشباع	ظرفیت زراعی	نقطه پژمردگی	pH (-)		EC (dS/m)		مواد خنثی‌شونده	کربن آلی	ازت کل	فسفر قابل جذب
		% حجمی		با بیوچار	بدون بیوچار	با بیوچار	بدون بیوچار	%			mg/L
لوم	۴۰/۰	۲۲/۳	۱۱/۵	۷/۱۹	۷/۹۶	۱/۶	۰/۹۴	۱۰	۱/۱۷	۹/۸۳	۹۷/۷۶

این آزمایش به‌صورت گلدانی و در قالب طرح آماری فاکتوریل بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی (RCBD[1]) با دو عامل و سه تکرار به اجرا درآمد. شمای کلی طرح در شکل ۱ ارائه شده است. عامل اول، کم‌آبیاری در سه سطح شامل تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه (I1، شاهد بدون تنش)، ۷۵ درصد نیاز آبی (I2، تنش ملایم) و ۵۰ درصد نیاز آبی (I3، تنش شدید) و عامل دوم، بیوچار در سه سطح شامل صفر درصد حجمی (B3، شاهد)، ۵ درصد حجمی (B2) و ۱۰ درصد حجمی (B1). تیمار B3I1 (آبیاری کامل و بدون کاربرد بیوچار) به‌عنوان تیمار شاهد در نظر گرفته شد. مجموعاً ۳۰ گلدان مورد استفاده قرار گرفت که از این تعداد، ۲۷ گلدان به تیمارهای اصلی آزمایش (۹ ترکیب تیماری × ۳ تکرار) اختصاص یافت و ۳ گلدان اضافی نیز به‌عنوان گلدان‌های شاهد برای پایش و محاسبه روزانه تبخیر – تعرق و تعیین زمان آبیاری تخصیص داده شد.

بر اساس آزمون اولیه خاک، ابتدا عملیات کوددهی پایه در خاک باغچه انجام شد. سپس خاک به سه بخش مساوی تفکیک و بیوچار با نسبت‌های حجمی صفر (B3)، ۵ (B2) و ۱۰ (B1) درصد با هر قسمت به‌طور یکنواخت مخلوط گردید. گلدان‌های آزمایشی با ابعاد یکسان (ارتفاع و قطر ۲۰ سانتی‌متر) انتخاب شدند. به‌منظور بهبود زهکشی، لایه‌ای متشکل از شن، خاک‌برگ، لیکوپن و گراول در کف گلدان‌ها تعبیه گردید. وزن خاک خشک هر گلدان ۶ کیلوگرم ثبت شد که پس از اشباع کامل به ۷ کیلوگرم افزایش یافت. جهت تثبیت اولیه ریشه، نشاهای نعناع فلفلی از مزرعه به گلدان‌ها منتقل و بلافاصله به میزان ۱،۵ لیتر آب به‌صورت غرقابی در اختیار هر گلدان قرار گرفت. در این مرحله، گلدان‌ها تا زمان گاورو شدن خاک و استقرار کامل گیاه در محیط باغ نگهداری شدند. سپس در تاریخ ۲۳ آبان ماه، به دلیل برودت و خشکی هوای محیط آزاد، کلیه گلدان‌ها به محیط کنترل‌شده گلخانه واقع در شهر سبزوار منتقل گردیدند.

مدیریت آبیاری بر مبنای روش وزنی و با محاسبه روزانه تبخیر- تعرق از گلدان‌های شاهد صورت پذیرفت. در شروع فاز تنش (۲۳ آبان)، وزن اولیه سه گلدان شاهد (B3I1) اندازه‌گیری و ثبت گردید. متعاقباً، وزن‌کشی این گلدان‌ها به‌صورت روزانه در ساعتی ثابت انجام شد. پس از گذشت ۱۲ روز، کاهش وزن تجمعی از هر گلدان به ۲۰۰ گرم رسید که بیانگر تخلیه رطوبتی خاک بود. در تاریخ ۲ آذر ماه، اعمال تیمارهای کم‌آبیاری با استفاده از ظرف مدرج و بر اساس سطوح از پیش تعریف‌شده (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی) آغاز گردید. بلافاصله پس از آبیاری، گلدان‌های شاهد مجدداً وزن‌کشی شده و پایش روزانه کاهش وزن آن‌ها برای تعیین زمان آبیاری بعدی استمرار یافت. این چرخه پایش و آبیاری تا پایان فصل رشد ادامه پیدا کرد. شایان ذکر است در اندازه‌گیری ظرفیت زراعی اولیه، گلدان حاوی ۱۰ درصد بیوچار (B1) به دلیل افزایش ظرفیت نگهداری آب، کاهش وزن کمتری نسبت به سایر تیمارها از خود نشان داد.

با مشاهده علائم توقف رشد و آغاز پژمردگی در گیاهان و با توجه به طول دوره رشد رویشی نعناع فلفلی (حدود ۴۰-۳۰ روز)، عملیات برداشت نهایی در تاریخ ۸ دی ماه ۱۴۰۱ در مرحله گلدهی کامل انجام پذیرفت. از هر گلدان آزمایشی، پنج بوته به‌عنوان نماینده تیمار به‌طور کامل برداشت شد. برای تفکیک اجزای عملکرد، وزن تر اندام‌های مختلف شامل برگ، ساقه و ریشه با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. به‌منظور تعیین وزن

1 Randomized Complete Block Design

خشک، نمونه‌های تفکیک‌شده گیاهی در پاکت‌های کاغذی مجزا قرار گرفته و به مدت ۷۲ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند (Smart and Bingham, 1974). سپس وزن خشک نهایی هر جزء با همان ترازو ثبت شد. در نهایت، وزن تر و خشک اندازه‌گیری شده و کارایی مصرف آب بر اساس دو مبنای وزن تر و خشک کل اندام هوایی گیاه محاسبه و به همراه سایر صفات، با استفاده از نرم‌افزار SAS و آزمون دانکن مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت.

تکرار اول		
B1I1	B1I2	B1I3
B2I1	B2I2	B2I3
B3I1	B3I2	B3I3
تکرار دوم		
B1I1	B1I2	B1I3
B2I1	B2I2	B2I3
B3I1	B3I2	B3I3
تکرار سوم		
B1I1	B1I2	B1I3
B2I1	B2I2	B2I3
B3I1	B3I2	B3I3

شکل ۱- شماتیک طرح آزمایشی (B3I1 = تیمار شاهد آبیاری کامل و فاقد کود بیوچار)

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس برای صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاه نعناع فلفلی در جدول (۲) ارائه شده است. بر اساس این نتایج، اثر اصلی کم‌آبیاری بر تمامی صفات مورد مطالعه شامل وزن تر و خشک برگ، ساقه و ریشه و همچنین کارایی مصرف آب بر مبنای وزن تر و خشک اندام هوایی، از نظر آماری در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. این یافته بیانگر تأثیرپذیری شدید و همه‌جانبه رشد رویشی و تخصیص زیست‌توده گیاه نعناع فلفلی از سطوح مختلف تنش خشکی است. به‌طور مشابه، اثر اصلی بیوچار نیز بر اغلب صفات معنی‌دار ($P < 0.01$) بود؛ با این حال، استثنایی قابل توجه در مورد وزن خشک ساقه مشاهده گردید، جایی که کاربرد بیوچار نتوانست تغییر معنی‌داری در این صفت ایجاد کند. این عدم معنی‌داری ممکن است حاکی از آن باشد که ماده آلی افزوده شده، علیرغم بهبود شرایط ریشه و اندام هوایی، تأثیر محسوسی بر تراکم و تجمع ماده خشک در بافت ساقه‌ای که عمدتاً نقش هدایتی و ساختاری دارد، نداشته است.

جدول ۲- تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده و مورد بررسی گیاه نعناع فلفلی در مطالعه

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات							
		وزن تر			وزن خشک			کارایی مصرف آب بر اساس	
		برگ	ساقه	ریشه	برگ	ساقه	ریشه	وزن تر	وزن خشک
کم‌آبیاری	۲	**	**	**	**	**	**	**	**
بیوچار	۲	**	**	**	**	ns	**	**	**
کم‌آبیاری × بیوچار	۴	ns	ns	*	ns	ns	**	ns	ns
خطا	۱۸	۰/۰۰۷	۰/۰۰۶	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۶
ضریب تغییرات	-	۳/۵۸	۳/۶۲	۹/۷۲	۹/۳۲	۱۱/۴۱	۷/۷۰	۲/۵۸	۷/۱۱

* و ** به ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و ns اختلاف معنی‌دار وجود ندارد.

بررسی اثرات متقابل کم‌آبیاری و بیوچار الگوی پیچیده‌تری را آشکار ساخت. این اثر متقابل برای صفات وزن تر ریشه ($P < 0.05$) و وزن خشک ریشه ($P < 0.01$) معنی‌دار گردید، اما بر سایر اجزای اندام هوایی (وزن تر و خشک برگ و ساقه) و همچنین کارایی مصرف آب

(بر هر دو مبنای وزن تر و خشک اندام هوایی) بی‌تأثیر بود. معنی‌داری اثر متقابل در بخش زیرزمینی گیاه دلالت بر آن دارد که بیوچار توانسته است در شرایط کم‌آبیاری، از طریق اصلاح ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، اثر تعدیل‌کننده و حمایتی ویژه‌ای بر توسعه و رشد ریشه اعمال نماید، در حالی که این هم‌افزایی در اندام‌های هوایی به وضوح ریشه مشهود نبوده است. دقت آزمایش نیز بر اساس مقادیر ضریب تغییرات که از ۲/۵۸ درصد برای کارایی مصرف آب بر مبنای وزن تر تا ۱۱/۴۱ درصد برای وزن خشک ساقه متغیر بود، قابل قبول ارزیابی می‌شود و نشان‌دهنده مدیریت مطلوب عوامل غیرهدف در طول اجرای این مطالعه است.

وزن تر و خشک برگ

بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌های ارائه‌شده در جدول ۳، اثر اصلی کم‌آبیاری بر وزن تر برگ معنی‌دار بوده و با افزایش شدت تنش، کاهش تدریجی و معنی‌داری در این صفت مشاهده گردید. بالاترین وزن تر برگ تک بوته به تیمار آبیاری کامل (I1) با میانگین ۲/۹۵ گرم تعلق داشت و با اعمال تنش ملایم (I2، ۷۵ درصد نیاز آبی) و تنش شدید (I3، ۵۰ درصد نیاز آبی)، این مقدار به ترتیب به ۲/۳۵ و ۱/۹۰ گرم کاهش یافت. این روند کاهشی ۲۰ تا ۳۵ درصدی در وزن تر برگ، با یافته‌های پژوهش‌های پیشین مبنی بر کاهش وزن تر اندام هوایی تحت تنش رطوبتی در گیاهان دارویی نظیر رزماری (ضیایی و همکاران، ۱۳۹۵) ریحان (فخرآبادی و خوش‌سیمای چنار، ۱۴۰۰؛ ضیائی و همکاران، ۱۳۹۳) و لادرشبو (رهبریان و افشارمنش، ۱۳۹۰) همسو است. دلیل اصلی این کاهش را می‌توان به بسته شدن روزنه‌ها در پاسخ به کاهش پتانسیل آب خاک، افت هدایت روزنه‌ای، کاهش جذب دی‌اکسید کربن و متعاقباً کاهش فتوسنتز و انباشت کربوهیدرات‌ها نسبت داد (فخرآبادی و خوش‌سیمای چنار، ۱۴۰۰). همچنین، تنش خشکی با کاهش جریان توده‌ای و انتشار عناصر غذایی در خاک، جذب و انتقال آن‌ها را به برگ‌ها محدود کرده و از توسعه سطح برگ و تقسیم سلولی ممانعت به عمل می‌آورد (Ekren et al., 2012).

جدول ۳- اثر مقدار آب آبیاری بر وزن تر و خشک برگ، ساقه، ریشه و کارایی مصرف آب گیاه نعناع فلفلی

کم‌آبیاری	وزن تر تک بوته (گرم)			وزن خشک تک بوته (گرم)			کارایی مصرف آب بر اساس (کیلوگرم بر مترمکعب)	
	برگ	ساقه	ریشه	برگ	ساقه	ریشه	وزن تر اندام هوایی	وزن خشک اندام هوایی
آبیاری کامل (I1)	۲/۹۵a	۲/۴۰a	۰/۵۷a	۰/۳۸a	۰/۴۹a	۰/۱۸a	۲/۴۸a	۰/۴۰a
۷۵ درصد نیاز آبی (I2)	۲/۳۵b	۲/۰۹b	۰/۵۴a	۰/۲۷b	۰/۴۳b	۰/۱۷a	۲/۲۵b	۰/۳۳b
۵۰ درصد نیاز آبی (I3)	۱/۹۰c	۱/۸۱c	۰/۲۸b	۰/۲۴c	۰/۳۸c	۰/۰۷b	۲/۰۳b	۰/۳۴b

در هر ستون حروف غیرمشابه بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد است.

در ارتباط با اثر اصلی بیوچار (جدول ۴)، کاربرد این ماده آلی به‌طور معنی‌داری وزن تر برگ را افزایش داد. بیش‌ترین میانگین وزن تر برگ (۲/۵۵ گرم) در تیمار B1 (۱۰ درصد حجمی بیوچار) و کم‌ترین آن (۲/۱۵ گرم) در تیمار شاهد بدون بیوچار (B3) ثبت گردید. این افزایش می‌تواند ناشی از ظرفیت نگهداری آب بالای بیوچار در ناحیه ریشه، بهبود فراهمی عناصر غذایی به دلیل افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، و تحریک فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید ریزوسفر باشد که مجموعاً شرایط مطلوب‌تری را برای جذب آب و عناصر غذایی و توسعه سطح برگ فراهم می‌آورند (مرادی و همکاران، ۱۳۹۸؛ صفاری، ۱۳۹۸).

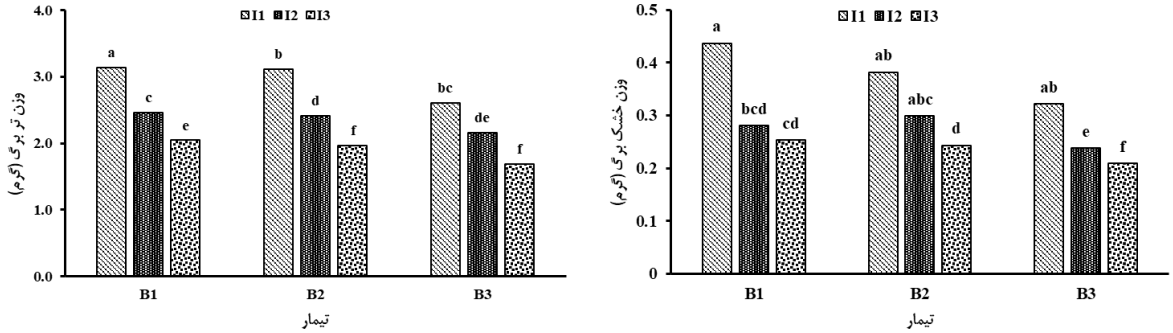
جدول ٤- اثر مقدار کاربرد بیوچار بر وزن تر و خشک برگ، ساقه، ریشه و کارایی مصرف آب گیاه نعناع فلفلی

کاربرد بیوچار	وزن تر تک بوته (گرم)			وزن خشک تک بوته (گرم)			کارایی مصرف آب بر اساس (کیلوگرم بر مترمکعب)	
	برگ	ساقه	ریشه	برگ	ساقه	ریشه	وزن تر اندام هوایی	وزن خشک اندام هوایی
۱۰ درصد حجمی (B1)	۲/۵۵a	۲/۲۰a	۰/۵۱a	۰/۳۲a	۰/۴۷a	۰/۱۶a	۲/۳۲a	۰/۳۹a
۵ درصد حجمی (B2)	۲/۵۰a	۲/۰۹b	۰/۵۰a	۰/۳۱a	۰/۴۳ab	۰/۱۵a	۲/۲۵a	۰/۳۶a
صفر درصد حجمی (B3)	۲/۱۵b	۲/۰۰c	۰/۳۷b	۰/۲۶b	۰/۴۰b	۰/۱۱b	۲/۰۳b	۰/۳۲b

در هر ستون حروف غیرمشابه بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد است.

بررسی اثر متقابل کم‌آبیاری و بیوچار بر وزن تر برگ (شکل ۲) نشان‌دهنده بالاترین عملکرد در تیمار تلفیقی B1I1 (آبیاری کامل + ۱۰ درصد بیوچار) و پایین‌ترین آن در تیمار B3I3 (تنش شدید و بدون بیوچار) بود. نکته قابل تأمل آن‌که در هر سه سطح آبیاری، افزایش سطح بیوچار از صفر به ۱۰ درصد، منجر به بهبود وزن تر برگ گردید، با این حال، شیب این افزایش در شرایط تنش شدید (I3) قابل توجه‌تر

بود. این الگو تلویحاً بیان‌گر آن است که نقش تعدیل‌کنندگی بیوچار در شرایط محدودیت آب، بیش از شرایط بدون تنش بروز می‌یابد؛ به‌عبارت دیگر، بیوچار از طریق بهبود ظرفیت نگهداری رطوبت و کاهش نوسانات مکش ماتریک خاک، افت عملکرد ناشی از تنش خشکی را تا حدی جبران نموده است (Ouyang et al., 2013).



در هر ستون حروف غیرمشابه بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد است.

شکل ۲- اثر متقابل (برهمکنش) مقدار آب آبیاری و بیوچار بر وزن تر و خشک برگ گیاه نعناع فلفلی

مطابق با جدول ۳، کم‌آبیاری اثر کاهشی معنی‌داری بر وزن خشک برگ داشت. بیش‌ترین وزن خشک برگ در تیمار I1 (۰/۳۸ گرم) و کم‌ترین آن در I3 (۰/۲۴ گرم) مشاهده شد که کاهش حدود ۳۷ درصدی را نشان می‌دهد. افت وزن خشک برگ در اثر تنش آبی، بازتاب مستقیم کاهش فتوسنتز خالص به دلیل محدودیت تبادلات گازی و کاهش سطح برگ فتوسنتزکننده است که در نهایت به کاهش تجمع ماده خشک منجر می‌شود (Ekren et al., 2012). در خصوص بیوچار (جدول ۴)، وزن خشک برگ به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر کاربرد این اصلاح‌کننده قرار گرفت، به‌طوری‌که حداکثر ماده خشک برگ در تیمار B1 (۰/۳۲ گرم) و حداقل آن در تیمار B3 (۰/۲۶ گرم) ثبت شد. این نتیجه مؤید نقش بیوچار در بهبود شرایط تغذیه‌ای و آبی گیاه است که از طریق حفظ تعادل اسمزی، افزایش محتوای نسبی آب برگ و تأخیر در پیری زودرس برگ‌ها، تولید و تخصیص مواد فتوسنتزی به برگ را افزایش می‌دهد (فخرآبادی و خوش‌سیمای چنار، ۱۴۰۰؛ Ouyang et al., 2013).

همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، بیش‌ترین میانگین وزن خشک برگ به تیمار B1I1 (۰/۴۳۷ گرم) اختصاص داشت که با تیمار B2I1 (۰/۳۸۲ گرم) اختلاف معنی‌داری نشان نداد. این عدم تفاوت معنی‌دار در شرایط آبیاری کامل، حاکی از آن است که در غیاب تنش، افزایش دُز بیوچار از ۵ به ۱۰ درصد حجمی، مزیت افزوده چندانی برای تولید ماده خشک برگ به همراه ندارد و احتمالاً گیاه در این وضعیت، به دلیل عدم محدودیت منابع، به سقف عملکرد ژنتیکی خود نزدیک شده است. در مقابل، در تیمارهای تحت تنش (I2 و I3)، تفکیک اثر بیوچار بارزتر بوده و تیمارهای دارای بیوچار در مقایسه با شاهد بدون بیوچار در همان سطح آبیاری، وزن خشک برگ بالاتری را حفظ کردند. پایین‌ترین وزن خشک برگ در تیمار B3I3 (۰/۲۰۹ گرم) با بیش‌ترین سطح تنش و بدون بیوچار ثبت گردید. این مشاهدات بیان‌گر آن است که منافع بیوچار در شرایط تنش، فراتر از اثر صرف تأمین عناصر غذایی بوده و عمدتاً به نقش آن در بهبود روابط آبی گیاه (افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک و حفظ آماس سلولی) مرتبط است. با این وجود، اثر متقابل برای وزن خشک برگ معنی‌دار نشده بود که این امر می‌تواند ناشی از همبستگی بالای این صفت با پایداری روزنه‌ای و ظرفیت ذاتی گیاه در تنظیم اسمزی باشد که تا حدی مستقل از اثرات متقابل عمل می‌کنند (آقایاری و همکاران، ۱۳۹۵؛ نادریان‌فر، ۱۳۹۵).

به‌طور خلاصه، وزن تر و خشک برگ نعناع فلفلی به‌طور هم‌جهت و معنی‌داری توسط تنش کم‌آبیاری کاهش و توسط کاربرد بیوچار افزایش یافتند. بیوچار با ایفای نقش اصلاحی در خاک، اثرات نامطلوب تنش آبی را به‌ویژه در سطوح متوسط و شدید کم‌آبیاری تخفیف داد؛ با این حال، پاسخ ماده خشک برگ به اثر متقابل دو عامل، از حساسیت کمتری نسبت به وزن تر برخوردار بود که می‌تواند نشان‌دهنده مقاومت نسبی فرآیندهای تخصیص ماده خشک در مقایسه با محتوای آب سلولی در این گیاه باشد.

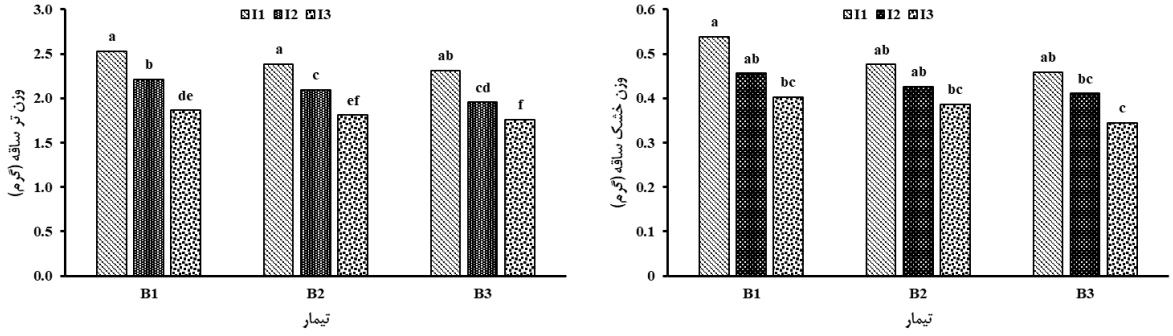
وزن تر و خشک ساقه

ساقه به‌عنوان اندام هدایتی و ساختاری گیاه، نقشی محوری در انتقال آب، عناصر غذایی و مواد فتوسنتزی و همچنین حفظ استحکام و ایستایی بوته ایفا می‌کند. بررسی هم‌زمان وزن تر و خشک ساقه در این پژوهش، الگوهای متمایزی را از تأثیرپذیری محتوای آبی و زیست‌توده ساختاری این اندام تحت تیمارهای آزمایشی آشکار نمود. بر اساس نتایج اثرات ساده ارائه شده در جدول ۳، تنش کم‌آبیاری به‌طور معنی‌داری موجب کاهش وزن تر و خشک ساقه گردید.

بیش‌ترین مقادیر وزن تر (۲/۴۰ گرم) و وزن خشک ساقه (۰/۴۹ گرم) در تیمار آبیاری کامل (I1) ثبت شد که با اعمال تنش ملایم I2 و تنش شدید I3، وزن تر به‌ترتیب به ۲/۰۹ و ۱/۸۱ گرم و وزن خشک به ۰/۴۳ و ۰/۳۸ گرم تقلیل یافت. مقایسه درصد کاهش در تنش شدید نسبت به شاهد نشان می‌دهد که وزن تر ساقه (حدود ۲۵ درصد) بیش از وزن خشک آن (حدود ۲۲ درصد) آسیب دیده است. این اختلاف، هرچند اندک، گویای آن است که تنش خشکی ابتدا محتوای آب بافت ساقه را کاهش داده و متعاقباً با تداوم تنش، فرآیندهای تولید و انباشت ماده خشک ساختاری را نیز متأثر ساخته است. از منظر فیزیولوژیک، کاهش پتانسیل آب خاک و متعاقباً افت آماس سلولی (تورژسانس) در بافت‌های ساقه، نخستین ضربه را به رشد طولی و شعاعی سلول‌ها وارد می‌کند. هم‌زمان، محدودیت هدایت هیدرولیکی آوندهای چوبی و اختلال در جذب عناصر غذایی (به‌ویژه نیتروژن و پتاسیم که در استحکام دیواره‌های سلولی نقش دارند)، سنتز کربوهیدرات‌های ساختاری و توسعه بافت‌های آوندی و فیبری را با مشکل مواجه می‌سازد (آقایاری و همکاران، ۱۳۹۵).

در نقطه مقابل، کاربرد بیوچار اثرات مثبت معنی‌داری بر هر دو صفت وزن تر و خشک ساقه داشت، اما با الگوهای پاسخی متفاوت. برای وزن تر ساقه، یک روند افزایشی خطی و وابسته به دُز مشاهده شد؛ به‌گونه‌ای که تیمارهای B1 (۱۰ درصد بیوچار)، B2 (۵ درصد بیوچار) و B3 (بدون بیوچار) به‌ترتیب با میانگین‌های ۲/۲۰، ۲/۰۹ و ۲/۰۰ گرم، هر سه در گروه‌های آماری مجزا قرار گرفتند. این پاسخ کاملاً وابسته به مقدار بیوچار، نشان‌دهنده آن است که افزایش بیوچار به‌طور پیوسته ظرفیت نگهداری آب در خاک را بهبود بخشیده و به حفظ محتوای رطوبتی و آماس سلولی ساقه کمک کرده است. اما برای وزن خشک ساقه، الگوی پاسخ آستانه‌ای بود؛ سطح کاربرد B1 با ۰/۴۷ گرم در گروه a و سطح کاربرد B3 با ۰/۴۰ گرم در گروه b قرار گرفتند، در حالی که سطح کاربرد B2 با ۰/۴۳ گرم در گروه میانی ab جای داشت و با هیچ‌یک تفاوت معنی‌دار نشان نداد. این الگو تلویحاً بیان‌گر آن است که تبدیل مزیت رطوبتی بیوچار به ماده خشک ساختاری ساقه، صرفاً تابع افزایش دُز بیوچار نبوده و در سطوح میانی به اشباع پاسخ نزدیک می‌شود. به بیان دیگر، وزن تر ساقه (محتوای آب) به‌طور مستقیم از خاصیت فیزیکی بیوچار در نگهداری آب منتفع می‌شود، اما افزایش وزن خشک مستلزم فرآیندهای بیوشیمیایی پیچیده‌تری نظیر فتوسنتز، تخصیص کربن و سنتز دیواره سلولی است که احتمالاً تحت تأثیر پتانسیل ژنتیکی گیاه و طول دوره رشد، محدودیت‌هایی را تجربه می‌کند (Hajirad et al., 2026).

اثر متقابل کم‌آبیاری و بیوچار که نتایج آن در شکل ۳ ارائه شده است، الگوهای متفاوتی را برای وزن تر و خشک ساقه آشکار ساخت. برای وزن تر ساقه، بالاترین مقادیر در تیمارهای B1I1 و B2I1 (به‌ترتیب ۲/۵۳ و ۲/۳۹ گرم، گروه a) ثبت شد و تیمار B3I1 با ۲/۳۱ گرم در گروه ab، کاهش نسبی را در غیاب بیوچار حتی در شرایط آبیاری کامل نشان داد. با حرکت به سمت تنش، تیمارهای دارای بیوچار در I2 (B1I2 و B2I2) هرچند در گروه‌های پایین‌تری (b و c) نسبت به شرایط بدون تنش قرار گرفتند، اما همچنان برتر از تیمار B3I2 (گروه cd) بودند. در تنش شدید (I3)، تمام تیمارها به کمینه خود رسیدند، اما همچنان B1I3 (۱/۸۶ گرم، گروه de) وضعیتی بهتر از B3I3 (۱/۷۶ گرم، گروه f) داشت. این روند به وضوح نشان می‌دهد که بیوچار در تمام سطوح تنش، اثر حفاظتی نسبی بر وزن تر ساقه اعمال کرده، اما توان جبران‌کنندگی آن در تنش‌های شدید کاهش می‌یابد.



در هر ستون حروف غیرمشابه بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد است.

شکل ۳- اثر متقابل (برهمکنش) مقدار آب آبیاری و بیوچار بر وزن تر و خشک ساقه گیاه نعناع فلفلی

برای وزن خشک ساقه، اثر متقابل از قدرت تفکیک‌کنندگی کمتری برخوردار بود. تیمار B1I1 با ۰/۵۴ گرم به‌تنهایی در گروه a ایستاد و تیمارهای B2I1، B3I1 و B1I2 همگی در گروه ab گرد آمدند. این هم‌پوشانی گسترده گروه‌ها نشان می‌دهد که در غیاب تنش شدید، وزن خشک ساقه ثبات نسبی داشته و حساسیت چندانی به سطوح مختلف بیوچار یا تنش ملایم نشان نمی‌دهد. با این حال، در

تنش شدید (I3)، تیمار B3I3 با ۰/۳۴ گرم در گروه c، پایین‌ترین مقدار را ثبت کرد، در حالی که B1I3 و B2I3 (۰/۴۰۳ و ۰/۳۸۷ گرم) در گروه bc اندکی بهبود یافتند. این یافته تأکید می‌کند که نقش اصلی بیوچار در حفظ وزن خشک ساقه، نه در شرایط بهینه، بلکه در جلوگیری از سقوط شدید ماده خشک در تنش‌های شدید بروز می‌یابد و دُز بالای بیوچار برای تحقق این نقش حفاظتی ضروری است.

در یک جمع‌بندی کلی از اندام ساقه، می‌توان اذعان داشت که وزن تر و خشک ساقه، دو بُعد متفاوت از پاسخ به تیمارهای آزمایشی را نمایندگی می‌کنند: وزن تر ساقه، شاخصی سریع‌الاثر و حساس از وضعیت لحظه‌ای آب بافتی و آماس سلولی است که به‌شدت به نوسانات رطوبت خاک و نقش تعدیلی بیوچار وابسته می‌باشد و پاسخی خطی و وابسته به مقدار بیوچار نشان می‌دهد. در مقابل، وزن خشک ساقه، شاخصی با لختی بیش‌تر و تابع فرآیندهای بلندمدت‌تر فتوسنتز، تخصیص کربن و سنتز ساختاری است که در شرایط تنش ملایم از ثبات نسبی برخوردار بوده و تنها در تنش‌های شدید و در حضور سطوح بالای بیوچار، مزیت حفاظتی معنی‌داری را آشکار می‌سازد. این دوگانگی در الگوی پاسخ، لزوم تفکیک این دو صفت در مطالعات تنش خشکی و کاربرد مواد اصلاحی خاک را برجسته می‌کند و نشان می‌دهد که ساقه به‌عنوان پل ارتباطی میان ریشه (منبع جذب) و برگ (منبع تولید)، تابعی از موازنه پیچیده میان عرضه و تقاضای آب و کربن در گیاه است.

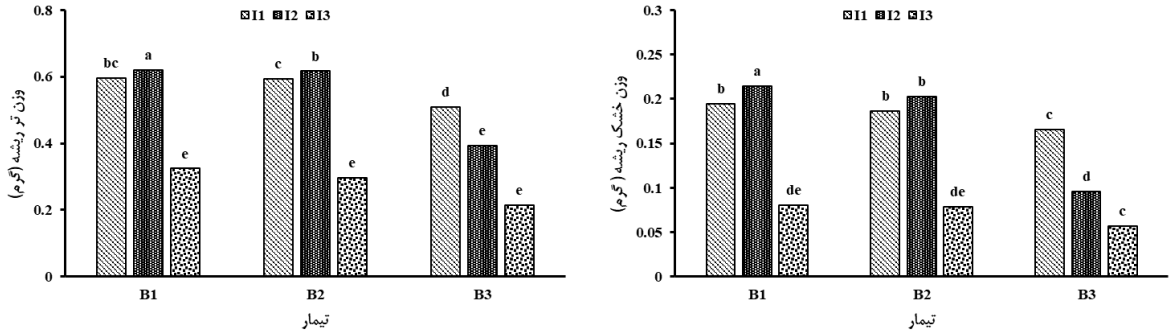
وزن تر و خشک ریشه

ریشه به‌عنوان اندام اصلی جذب آب و عناصر غذایی و نیز محل سنتز هورمون‌های تنظیم‌کننده رشد، نقشی محوری در پاسخ گیاه به تنش‌های محیطی ایفا می‌کند. تحلیل هم‌زمان وزن تر و خشک ریشه در این پژوهش، الگوهای پیچیده و گاه متمایزی را نسبت به اندام‌های هوایی آشکار ساخت که در ادامه به تفصیل بررسی می‌شود. نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که وزن تر ریشه در تیمارهای آبیاری کامل (I1) و تنش ملایم (I2) به‌ترتیب با میانگین‌های ۰/۵۷ و ۰/۵۴ گرم، در یک گروه آماری (a) قرار داشته و تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند. اما با تشدید تنش به ۵۰ درصد نیاز آبی (I3)، وزن تر ریشه به‌طور معنی‌دار و محسوسی به ۰/۲۸ گرم (گروه b) سقوط می‌کند که نشان‌دهنده کاهشی در حدود ۵۰ درصد نسبت به تیمار شاهد است. این الگو حاکی از آستانه تحمل نسبتاً بالای ریشه به کاهش ملایم رطوبت خاک است؛ به‌گونه‌ای که گیاه در تنش ۷۵ درصد، همچنان قادر به حفظ توسعه و آماس بافت‌های ریشه بوده، اما عبور از این آستانه به ۵۰ درصد، فروپاشی ساختارهای سلولی و کاهش شدید محتوای آبی ریشه را به دنبال داشته است. در مقابل، وزن خشک ریشه روندی مشابه اما با حساسیت بیشتری در تنش ملایم نشان داد. وزن خشک ریشه در تیمارهای I1 و I2 (به‌ترتیب ۰/۱۸ و ۰/۱۷ گرم) تفاوت معنی‌داری نداشتند (هر دو در گروه a)، اما در تیمار I3، این مقدار به ۰/۰۷ گرم کاهش یافت (گروه b) که معادل کاهش ۶۱ درصدی نسبت به شاهد است. این کاهش شدید در ماده خشک ریشه نسبت به وزن تر آن، نشان می‌دهد که تنش شدید، فراتر از کاهش آب بافتی، به‌طور جدی زیست‌توده ساختاری ریشه را نیز تحلیل برده است. توقف رشد ریشه‌های مویین، کاهش تقسیم سلولی در مریستم انتهایی و حتی مرگ بخشی از ریشه‌های جذبی در پاسخ به کمبود شدید رطوبت و عناصر غذایی، از دلایل احتمالی این افت چشمگیر هستند (فرزانه و همکاران، ۱۳۸۹).

بر مبنای جدول ۴، اثر اصلی بیوچار بر وزن تر ریشه، الگویی دوگانه را به نمایش گذاشت. تیمارهای B1 (۱۰ درصد بیوچار) و B2 (۵ سطح بیوچار) با میانگین‌های ۰/۵۱ و ۰/۵۰ گرم در گروه a، به‌طور معنی‌داری برتر از تیمار شاهد B3 با میانگین ۰/۳۷ گرم (گروه b) بودند. این مشاهده بیان‌گر آن است که حضور بیوچار، حتی در سطح ۵ درصد، برای تحریک رشد و حفظ آماس ریشه کفایت می‌کند و افزایش دُز به ۱۰ درصد، مزیت افزوده معنی‌داری ایجاد نمی‌کند. روند مشابهی برای وزن خشک ریشه مشاهده شد: تیمارهای B1 و B2 (به‌ترتیب ۰/۱۶ و ۰/۱۵ گرم) بدون اختلاف معنی‌دار با یکدیگر، در گروه a جای گرفته و تیمار B3 (۰/۱۱ گرم) در گروه b، به‌طور معنی‌داری کم‌ترین ماده خشک ریشه را دارا بود. این هم‌راستایی میان وزن تر و خشک ریشه در پاسخ به بیوچار، نشان می‌دهد که ماده آلی مذکور نه‌تنها از طریق افزایش ظرفیت نگهداری آب، محتوای رطوبتی ریشه را بهبود بخشیده، بلکه با فراهمی عناصر غذایی و بهبود ساختمان خاک، سنتز مواد ساختمانی و توسعه زیست‌توده ریشه را نیز تقویت کرده است (Aller et al., 2017). نکته قابل تأمل، عدم تفاوت بین سطوح ۵ و ۱۰ درصد بیوچار است که می‌تواند به اشباع پاسخ ریشه به این اصلاح‌کننده در دُزهای بالاتر اشاره داشته باشد.

الگوی اثر متقابل کم‌آبیاری و بیوچار بروزن تر ریشه (شکل ۴)، یکی از بارزترین و پیچیده‌ترین نتایج این مطالعه را به تصویر می‌کشد. بر خلاف روند عمومی کاهشی با افزایش تنش، تیمارهای B1I2 (۰/۶۲۱ گرم) و B2I2 (۰/۶۱۷ گرم) نه‌تنها کاهش نیافتند، بلکه در گروه‌های آماری a و b، بالاترین مقادیر وزن تر ریشه را در کل آزمایش به خود اختصاص دادند و به‌طور معنی‌داری از تیمارهای مشابه در آبیاری کامل (I1) نیز فراتر رفتند. این پدیده جالب توجه، می‌تواند ناشی از نوعی رشد جبرانی یا استراتژی تخصیص ترجیحی منابع به ریشه تحت تنش ملایم در حضور بیوچار باشد. در شرایط تنش ملایم (I2)، گیاه با دریافت سیگنال‌های هورمونی (به‌ویژه افزایش آبسیزیک اسید و اکسین)، منابع کربنی خود را بیش‌تر به سمت توسعه سیستم ریشه‌ای هدایت می‌کند تا بتواند حجم بیش‌تری از خاک را برای یافتن رطوبت کاوش نماید (فخرآبادی و خوش‌سیمای

چنار، ۱۴۰۰). حضور بیوچار با ایجاد میکروسایت‌های غنی از آب و عناصر غذایی در اطراف ریشه، این استراتژی را تشدید کرده و موجب تحریک مضاعف رشد ریشه شده است (Aller et al., 2017). در مقابل، تیمار B3I2 (بدون بیوچار و ۷۵ درصد نیاز آبی) با میانگین ۰/۳۹۳ گرم در گروه e، افت شدیدی را نسبت به تیمارهای دارای بیوچار در همان سطح آبیاری نشان داد. این تضاد آشکار، قدرت تعدیل‌کنندگی بیوچار را برجسته می‌سازد: در غیاب بیوچار، حتی تنش ملایم نیز می‌تواند به کاهش وزن تر ریشه منجر شود، اما حضور بیوچار، این تهدید را به فرصتی برای توسعه ریشه تبدیل می‌کند. تیمارهای تحت تنش شدید (I3) در هر سه سطح بیوچار، همگی در گروه e (پایین‌ترین سطح) سقوط کردند، که نشان می‌دهد در ۵۰ درصد نیاز آبی، ظرفیت حمایتی بیوچار نیز مغلوب شدت تنش شده و توان حفظ ساختار ریشه را از دست می‌دهد.



در هر ستون حروف غیرمشابه بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد است.

شکل ٤- اثر متقابل (برهمکنش) مقدار آب آبیاری و بیوچار بر وزن تر و خشک ریشه گیاه نعناع فلفلی

برای وزن خشک ریشه نیز الگویی همراستا اما با شدت کمتر مشاهده شد. تیمار B1I2 با میانگین ۰/۲۱۴ گرم، به‌طور مشترک با تیمارهای B1I1 و B2I2 در بالاترین گروه‌های آماری (a و b) قرار گرفت. جالب آن‌که مشابه وزن تر، تیمارهای دارای بیوچار در تنش ملایم (I2) وزن خشک ریشه‌ای معادل یا حتی بالاتر از تیمارهای آبیاری کامل تولید کردند، در حالی که B3I2 با میانگین ۰/۰۹۶ گرم در گروه d، سقوطی ۵۵ درصدی نسبت به همتایان دارای بیوچار خود تجربه کرد. این اختلاف فاحش، مجدداً بر نقش تعیین‌کننده بیوچار در حفظ و حتی ارتقای زیست‌توده ساختاری ریشه تحت تنش ملایم صحه می‌گذارد. تیمارهای تحت تنش شدید (I3) در تمام سطوح بیوچار، در گروه‌های de و c (پایین‌ترین سطوح) گرد هم آمدند که مؤید غلبه تنش شدید بر مزایای بیوچار است.

ریشه نعناع فلفلی، پویاترین و پیچیده‌ترین پاسخ را در میان اندام‌های مورد مطالعه به نمایش گذاشت. بر خلاف اندام هوایی که کاهشی خطی با افزایش تنش داشتند، ریشه در تنش ملایم (I2) و در حضور بیوچار، پاسخی جبرانی و حتی فراتر از شرایط بدون تنش از خود نشان داد. این پدیده که هم در وزن تر و هم در وزن خشک ریشه مشهود بود، بر نقش دوگانه بیوچار به‌عنوان بستری مغذی و مخزنی رطوبتی تأکید دارد که استراتژی طبیعی گیاه برای توسعه ریشه تحت تنش ملایم را تقویت می‌کند. با این وجود، در تنش شدید (۵۰ درصد نیاز آبی)، این مکانیسم جبرانی فرو می‌پاشد و حتی بیوچار نیز قادر به جلوگیری از تحلیل رفتن شدید زیست‌توده ریشه نیست. این آستانه بحرانی، نشان‌دهنده محدودیت ذاتی ظرفیت اصلاحی بیوچار در شرایط کمبود مطلق آب است و بر لزوم مدیریت دقیق سطوح کم‌آبیاری در تلفیق با این ماده آلی تأکید می‌ورزد.

کارایی مصرف آب

کارایی مصرف آب (WUE) یکی از مهمترین شاخص‌های فیزیولوژیک و زراعی در ارزیابی موفقیت نظام‌های تولیدی، به‌ویژه در شرایط محدودیت منابع آبی، محسوب می‌شود. این شاخص از نسبت زیست‌توده تولیدی (عملکرد) به میزان آب مصرفی حاصل می‌شود و در پژوهش حاضر به تفکیک برای دو مبنای وزن تر و وزن خشک اندام هوایی نعناع فلفلی بررسی گردید. تحلیل هم‌زمان این دو معیار، بینش جامعی از چگونگی تأثیر تیمارهای کم‌آبیاری و بیوچار بر بهره‌وری فیزیولوژیک ارائه می‌نماید. اثرات ساده تیمارها حاکی از پاسخ‌های متمایز این دو مبنا بود. کم‌آبیاری تأثیر معنی‌داری بر کارایی مصرف آب بر مبنای وزن تر داشت، به‌گونه‌ای که میانگین این شاخص از ۲/۴۸ کیلوگرم بر مترمکعب در آبیاری کامل (I1) به ۲/۰۳ در تنش شدید (I3) کاهش یافت (جدول ۳). این کاهش ۱۸ درصدی نشان می‌دهد که با کاهش آب در دسترس، نسبت زیست‌توده تر تولیدی به آب مصرفی به دلیل افت محتوای آب بافتی، کاهش سطح برگ و بسته شدن روزنه‌ها تقلیل یافته است (فخرآبادی و

خوش‌سیمای چنار، ۱۴۰۰). اما نکته بسیار جالب توجه، عدم معنی‌داری اثر کم‌آبیاری بر کارایی مصرف آب بر مبنای وزن خشک بود؛ مقادیر این شاخص برای تیمارهای I1، I2 و I3 به‌ترتیب ۰/۴، ۰/۳۳ و ۰/۳۴ کیلوگرم بر مترمکعب ثبت شد که از نظر آماری در یک گروه قرار گرفتند. این پایداری نسبی در WUE خشک، پدیده‌ای فیزیولوژیک به نام هومئوستازی کارایی مصرف آب را منعکس می‌سازد: در شرایط تنش خشکی، اگرچه زیست‌توده خشک کاهش می‌یابد، اما حجم آب مصرفی نیز به همان نسبت (و مطابق با تیمارهای از پیش تعریف‌شده) کاسته می‌شود و در نتیجه نسبت ماده خشک تولیدی به آب مصرفی، تا یک آستانه بحرانی، ثبات خود را حفظ می‌کند. این پدیده بیانگر انعطاف‌پذیری ذاتی گیاه در تنظیم کارایی مصرف آب از طریق کنترل روزنه‌ای و تعدیل سطح تعرق است (Koushki et al., 2021).

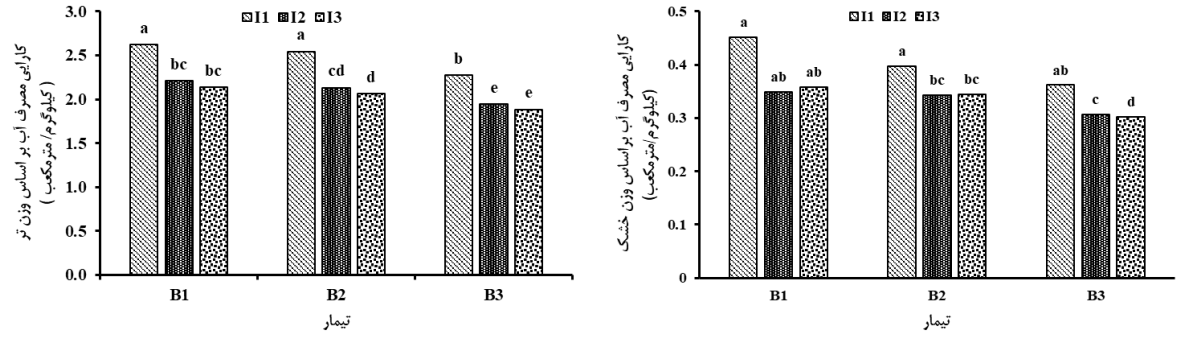
در مقابل، کاربرد بیوچار اثرات مثبت قابل توجهی بر هر دو شاخص کارایی مصرف آب داشت. میانگین WUE تر در سطح کاربرد بیوچار B1 با ۲/۳۲، سطح کاربرد B2 ۲/۲۵ و سطح کاربرد B3 (بدون بیوچار) با ۲/۰۳ کیلوگرم بر مترمکعب، روندی افزایشی و معنی‌دار را نشان دادند. الگوی مشابهی برای WUE خشک نیز مشاهده شد: تیمار B1 با ۰/۳۹ و تیمار B3 با ۰/۳۲ کیلوگرم بر مترمکعب به‌ترتیب در گروه‌های a و b قرار گرفتند. این افزایش در کارایی مصرف آب در پاسخ به بیوچار، با یافته‌های پژوهش‌های پیشین مبنی بر بهبود WUE از طریق افزودن بیوچار به خاک هم‌خوانی دارد. مکانیسم این بهبود، چندوجهی است: بیوچار با ساختار متخلخل خود، ظرفیت نگهداری آب قابل استفاده گیاه (PAW[1]) را در خاک افزایش می‌دهد و از تلفات تبخیری و نفوذ عمقی می‌کاهد (Aller et al., 2017). همچنین با بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، شرایط ریشه را برای جذب کارآمدتر آب و عناصر غذایی مساعدتر می‌سازد (Hajirad et al., 2026؛ Aller et al., 2017). پژوهش‌ها روی گونه‌های مختلف نعناع نیز نشان داده‌اند که بیوچار با ذرات ریز (کمتر از یک میلیمتر) می‌تواند کارایی مصرف آب و بهره‌وری آب را به‌طور معنی‌داری افزایش دهد (Amer et al., 2021).

اثر متقابل کم‌آبیاری و بیوچار، مهم‌ترین و کاربردی‌ترین یافته‌های این بخش را آشکار ساخت. برای WUE بر مبنای وزن تر، بالاترین مقادیر به تیمارهای B1I1 (۲/۶۲۴ کیلوگرم بر مترمکعب) و B2I1 (۲/۵۴۴ کیلوگرم بر مترمکعب) تعلق داشت که هر دو در گروه a قرار گرفتند. تیمار B3I1 (آبیاری کامل بدون بیوچار) با ۲/۲۷۳ کیلوگرم بر مترمکعب در گروه b واقع شد. نکته راهبردی آن‌که تیمارهای B1I2 (۲/۲۱ کیلوگرم بر مترمکعب) و B1I3 (۲/۱۳ کیلوگرم بر مترمکعب) در گروه bc، کارایی مصرف آبی معادل یا بالاتر از تیمار B3I1 (آبیاری کامل بدون بیوچار) را نشان دادند. این بدان معناست که کاربرد بیوچار در سطوح ۵ و ۱۰ درصد، توانسته است کاهش ۲۵ تا ۵۰ درصدی آب آبیاری را از منظر WUE تر جبران نماید.

برای WUE بر مبنای وزن خشک، الگوی اثر متقابل حتی آموزنده‌تر بود. تیمار B1I3 (۰/۳۵۹ کیلوگرم بر مترمکعب) و B2I3 (۰/۳۴۴ کیلوگرم بر مترمکعب) نه‌تنها از تیمار B3I3 (۰/۳۰۳ کیلوگرم بر مترمکعب) برتر بودند، بلکه با تیمار B3I1 (۰/۳۶۲ کیلوگرم بر مترمکعب) نیز تفاوت معنی‌داری نشان ندادند. این هم‌پوشانی آماری، یک دستاورد عملی برجسته را نمایان می‌سازد. به این‌صورت که با کاربرد بیوچار، می‌توان ۵۰ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی کرد، بدون آن‌که کارایی مصرف آب بر مبنای ماده خشک، کاهش معنی‌داری نسبت به شرایط آبیاری کامل و بدون اصلاح‌کننده خاک نشان دهد. این یافته، مؤید نتایج مطالعات پیشین روی نعناع فلفلی است که در آن‌ها کاربرد بیوچار (۶ تن در هکتار) وزن تر و خشک اندام هوایی، ارتفاع بوته و محتوای کلروفیل را به‌طور معنی‌داری نسبت به تیمار بدون بیوچار افزایش داده است (Koushki et al., 2021). به‌ویژه، پژوهش‌های جدیدتر نیز تأیید کرده‌اند که بیوچار علاوه بر بهبود رشد رویشی، کیفیت و کمیت اسانس نعناع فلفلی را نیز از طریق افزایش منتول و کاهش ترکیبات نامطلوب نظیر پولگون ارتقا می‌بخشد (Mumivand et al., 2023). از منظر فیزیولوژیک، مکانیسم پشت این برهم‌کنش مثبت را می‌توان در تعدیل منحنی آزادسازی رطوبت خاک توسط بیوچار و بهبود هدایت هیدرولیکی در ناحیه ریشه جستجو کرد. بیوچار با افزایش تخلخل و نگهداشت آب در خاک، عملاً فراهمی آب را در طول دوره رشد، به‌ویژه در مراحل حساس که گیاه با تنش مواجه است، تداوم می‌بخشد (Aller et al., 2017). این امر به گیاه امکان می‌دهد تا تعرق خود را در سطوح مطلوب‌تری حفظ کرده و از افت شدید فتوسنتز جلوگیری نماید. همچنین، بهبود جذب عناصر غذایی (به‌ویژه نیتروژن و فسفر) در حضور بیوچار ، کارایی مصرف آب را از طریق افزایش نرخ فتوسنتز به ازای واحد آب تعرق شده ارتقا می‌دهد (نادریان‌فر، ۱۳۹۵).

با این حال، شایان ذکر است که پاسخ WUE به بیوچار، وابسته به بافت خاک و نوع بیوچار بوده و ممکن است در همه شرایط یکسان نباشد (Aller et al., 2017). در پژوهش حاضر، بافت لوم خاک و بیوچار مورد استفاده، شرایط مساعدی را برای بهبود کارایی مصرف آب فراهم آورده است. با این وجود، در تنش‌های شدید (۵۰ درصد نیاز آبی)، مزیت بیوچار عمدتاً در حفظ WUE در سطحی قابل قبول (نه لزوماً افزایش آن) بروز یافت که نشان‌دهنده محدودیت ذاتی ظرفیت اصلاحی بیوچار در شرایط کمبود مطلق آب است.

1 Plant Available Water



در هر ستون حروف غیرمشابه بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد است.

شکل ۵- اثر متقابل (برهمکنش) مقدار آب آبیاری و بیوچار بر کارایی مصرف آب بر اساس وزن تر و خشک اندام هوایی گیاه نعناع فلفلی

کارایی مصرف آب به‌عنوان یک صفت تلفیقی و تعیین‌کننده، نشان داد که کارایی مصرف آب بر مبنای وزن تر شاخصی حساس‌تر به تنش رطوبتی و منعکس‌کننده محتوای آب بافتی گیاه است که با اعمال کم‌آبیاری کاهش و با بیوچار افزایش می‌یابد. کارایی مصرف آب بر مبنای وزن خشک، به دلیل هومئوستازی فیزیولوژیک گیاه، از پایداری نسبی در برابر کاهش آب آبیاری برخوردار بوده و اثرات مثبت بیوچار در بهبود آن، عمدتاً در سطوح بالای کاربرد (۱۰ درصد حجمی) و در شرایط تنش معنی‌دار می‌شود. مهم‌ترین یافته کاربردی آن است که تیمارهای B1I3 و B2I3 (تنش ۵۰ درصد + بیوچار ۵ یا ۱۰ درصد) از نظر WUE خشک، تفاوت معنی‌داری با تیمار B3I1 (آبیاری کامل بدون بیوچار) نداشتند. این نتیجه، استراتژی تلفیق کم‌آبیاری با بیوچار را به‌عنوان یک رویکرد مؤثر برای دستیابی به تولید پایدار با نهاده آب کمتر در کشت گیاه دارویی نعناع فلفلی تثبیت می‌کند و می‌تواند الگویی برای مدیریت آب در سایر گیاهان دارویی مناطق خشک و نیمه‌خشک باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر به‌خوبی نشان داد که تلفیق دو راهبرد مدیریتی کم‌آبیاری و کاربرد بیوچار، می‌تواند رویکردی اثربخش و پایدار برای کشت گیاهان دارویی در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم آورد. بررسی پاسخ‌های فیزیولوژیک و رشدی گیاه نعناع فلفلی در این مطالعه، تصویری جامع از رفتار این گیاه ارزشمند در برابر تنش خشکی و اثرات تعدیلی یک اصلاح‌کننده آلی خاک ترسیم نمود. بر اساس یافته‌ها، تنش کم‌آبی به‌طور طبیعی موجب کاهش رشد اندام‌های هوایی و افت عملکرد گیاه می‌گردد که این امر از طریق سازوکارهایی نظیر بسته شدن روزنه‌ها، کاهش فتوسنتز و اختلال در جذب عناصر غذایی قابل تبیین است. با این وجود، مشاهده پاسخ جبرانی و توسعه سیستم ریشه‌ای در سطوح ملایم تنش، گویای ظرفیت تطبیقی ذاتی این گیاه است که می‌توان با مدیریت صحیح آن را در جهت منافع تولید هدایت نمود. در این میان، نقش بیوچار به‌عنوان یک اصلاح‌کننده آلی خاک، بسیار برجسته و تعیین‌کننده ارزیابی گردید. این ماده با ساختار متخلخل خود، ظرفیت نگهداری رطوبت در خاک را بهبود بخشیده و با افزایش فراهمی عناصر غذایی و تحریک فعالیت‌های زیستی در ناحیه ریشه، بستری مساعد برای رشد و تاب‌آوری گیاه در برابر تنش فراهم می‌نماید. نکته حائز اهمیت آنکه مزایای بیوچار در شرایط تنش رطوبتی، به‌مراتب چشمگیرتر از شرایط آبیاری کامل ظاهر گردید؛ به‌گونه‌ای که این ماده توانست از افت شدید عملکرد در گیاهان تحت تنش جلوگیری کرده و آن‌ها را در سطح قابل قبولی حفظ نماید. مهم‌ترین دستاورد کاربردی این تحقیق در مفهوم کارایی مصرف آب تبلور یافت. نتایج حاکی از آن بود که با کاربرد بیوچار در خاک، می‌توان حجم آب آبیاری را به میزان قابل توجهی کاهش داد، بدون آن‌که کارایی تبدیل آب به ماده خشک گیاهی کاهش معنی‌داری نسبت به شرایط آبیاری کامل و بدون اصلاح‌کننده خاک نشان دهد. به بیان دیگر، بیوچار امکان تولید محصول با بهره‌وری مشابه اما با نهاده آب کمتر را فراهم می‌سازد. این یافته برای مناطق خشک و نیمه‌خشکی که با بحران کمبود آب مواجه‌اند، پیامی امیدبخش به همراه دارد و می‌تواند الگویی برای مدیریت پایدار منابع آب در کشاورزی باشد.

بر مبنای این نتایج، توصیه می‌گردد در کشت گیاهان دارویی حساس به تنش آبی مانند نعناع فلفلی، از بیوچار به‌عنوان یک مکمل خاکی در کنار برنامه‌های کم‌آبیاری کنترل‌شده (در سطح تنش ملایم) استفاده شود. این راهبرد تلفیقی، ضمن صرفه‌جویی در مصرف آب و حفظ عملکرد گیاه، به بهبود بلندمدت سلامت و حاصلخیزی خاک نیز کمک شایانی خواهد نمود. بی‌تردید، توسعه و بسط این رویکرد در مزارع و تلفیق آن با سایر روش‌های مدیریت به‌زراعی، می‌تواند نقشی مؤثر در تأمین پایدار امنیت غذایی و دارویی کشور تحت شرایط دشوار

اقلیمی ایفا نماید.

منابع

آقایاری، ف.، خلیلی، ف. و اردکانی، م. ر. ۱۳۹۵. تأثیر کم‌آبیاری، آبیاری موضعی و پلیمر سوپرجاذب بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت هیبرید سینگل‌کراس ۷۰۳. حفاظت منابع آب و خاک. ۶ (۱): ۱-۱۴.

خوش‌سیمای چنار، م.، لیاقت، ع.، نوری، ح.، سلطانی صالح‌آبادی، ف. و متشرع‌زاده، ب. ۱۴۰۴. تأثیر سطوح مختلف شوری و مقادیر آب آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری آب خیار گلخانه‌ای در دو دوره کشت پاییز – زمستان و بهار – تابستان. مدیریت آب در کشاورزی، ۲(۱۲): ۱۲۸-۱۱۱.

رهبریان، پ. و افشارمنش، غ. ر. ۱۳۹۰. اثر کم‌آبیاری و کود دامی بر عملکرد و برخی صفات مورفولوژیکی گیاه دارویی لادرشبو در جیرفت. نشریه علمی اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی، دوره ۵، ۱(۱۷): ۵۲-۴۱.

سیف سهندی، م.، مهرآفرین، ع.، خلیقی سیگارودی، ف.، شریفی، م. و نقدبادی، ح. ۱۳۹۷. مروری بر خصوصیات آناتومیکی، فیتوشیمیایی و فارماکولوژیکی گیاه دارویی نعناع فلفلی (Mentha piperita L. ×). فصلنامه گیاهان دارویی، ۱۸(۶۹): ۳۳-۱۶.

صفاری، م. ۱۳۹۸. ارزیابی رفتار کادمیوم در یک خاک آهکی متأثر از بیوچارهای بقایای پوست گردو پوشش داده شده با نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۰(۶): ۱۴۵۱-۱۴۳۷.

ضیایی، ع.، مقدم، م. و کاشفی، ب. ۱۳۹۵. تأثیر پلیمرهای سوپر جاذب بر خصوصیات مورفولوژیک گیاه رزماری در شرایط تنش خشکی. فصلنامه علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای، ۷(۲۶): ۱۱۱-۹۹.

ضیائی، م.، شریفی، م.، نقدی‌بادی، ح. ع. تحصیلی، ژ. و قربانی-نهوجی، م. ۱۳۹۳. مروری بر گیاه ریحان با تأکید بر عمده‌ترین ترکیبات ثانویه و ویژگی‌های زراعی و دارویی آن. فصلنامه گیاهان دارویی. ۱۴(۵۲): ۴۰-۲۶.

علیزاده، ا. ۱۳۸۷. رابطه آب، خاک و گیاه. مؤسسه چاپ و انتشارات آستان قدس رضوی، چاپ هشتم، مشهد، ایران.

فخرآبادی، ح. و خوش‌سیمای چنار، م. ۱۴۰۰. اثر کم‌آبیاری و بیوچار بر روی خصوصیات کمی و کیفی گیاه دارویی ریحان. آبیاری و زهکشی ایران، ۱۵(۴): ۹۴۱-۹۵۴.

فرزانه، ا.، غنی، ع. و عزیزی، م. ۱۳۸۹. تأثیر تنش آبی بر ویژگی‌های ظاهری، عملکرد و درصد اسانس در گیاه ریحان (رقم کشکنی لو لو). مجله پژوهش‌های تولید گیاهی، ۱۷(۱): ۱۱۱-۱۰۳.

مرادی، ن.، رسولی صدقیانی، م. ر. و سپهر، ا. ۱۳۹۸. تأثیر بیوچارهای تولید شده از بقایای گیاهی (هرس درختان و کاه و کلش) بر برخی شاخص‌های میکروبیولوژیکی در خاک‌های آهکی. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۰(۶): ۱۳۹۴-۱۳۸۱.

نادریان‌فر، م. ۱۳۹۵. تعیین تابع تولید گیاه ریحان تحت شرایط کم‌آبیاری و استفاده از نانو کود. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۳(۱۰): ۳۷۶-۳۶۵.

Aller, D., Rathke, S., Laird, D., Cruse, R. and Hatfield, J. 2017. Impacts of fresh and aged biochars on plant available water and water use efficiency. Geoderma. 307: 114-121.

Amer, M.A., Noreldin, T. and Amer, A. 2021. Biochar particles size influenced the yield and water productivity of two mint (*Mentha* sp.) varieties under drip irrigation. Moroccan Journal of Agricultural Sciences. e-ISSN: 2550-553X.

Beiranvandi, M., Akbari, N., Ahmadi, A., Mumivand, H., Nazarian Firouzabadi, F. and Argento, S. 2025. Impact of biochar and hydroretentive polymers on the biochemical and physiological traits of *Satureja rechingeri* Jamzad under water deficit stress. Horticulturae. 11(2): 169.

Ekren, S., Sönmez, Ç., Özçakal, E., Kurttaş, Y.S.K., Bayram, E. and Gürgülü, H. 2012. The effect of different irrigation water levels on yield and quality characteristics of purple basil (*Ocimum basilicum* L.). Agricultural Water Management. 109: 155-161.

English, M. and Nakamura, B. 1989. Effects of deficit irrigation and irrigation frequency on wheat yields. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 115(2): 172-184.

Hajirad, I., Pourmohammad, P. and Ahmadaali, J. 2026. A systematic review of the potential of soil amendments in mitigating drought stress in crops. Discover Agriculture. 4(1): 28.

Koushki, A., Alinejadian-Bidabadi, A. and Maleki, A. 2021. Effects of rice husk biochar and different irrigation regimes on growth, essential oil percentage, and concentration of some nutrients in peppermint (*Mentha piperita* L.). Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research. 37(5): 733-752. doi: 10.22092/ijmapr.2021.354663.2994.

Mumivand, H., Izadi, Z., Amirizadeh, F., Maggi, F. and Morshedloo, M.R. 2023. Biochar amendment improves growth and the essential oil quality and quantity of peppermint (*Mentha* × *piperita* L.) grown under waste water and reduces environmental contamination from waste water disposal. Journal of

potential to improve culinary herb crop quality with deficit irrigation. Scientia Horticulturae. 242: 44-50.

Smart, R.E. and Bingham, G.E. 1974. Rapid estimates of relative water content. Plant Physiology. 53: 258-260.

Zhang, R., Qu, Z., Wang, L., Yang, W., Zhang, D., Zhao, Y. and Li, J. 2025. Enhancing soil microbial diversity, quality, and crop growth through deficit irrigation combined with biochar application. Frontiers in Sustainable Food Systems. 9: 1528044.

Hazardous Materials. 446: 130674.

Murad, H.A., Ahmad, M., Bundschuh, J., Hashimoto, Y., Zhang, M., Sarkar, B. and Ok, Y.S. 2022. A remediation approach to chromium-contaminated water and soil using engineered biochar derived from peanut shell. Environmental Research. 204: 112125.

Ouyang, L., Wang, F., Tang, J., Yu, L. and Zhang, R. 2013. Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties. Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 13(4): 991-1002.

Rowland, L.S., Smith, H.K. and Taylor, G. 2018. The

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.4, Vol. 20, Oct.-Nov. 2026, p. 533-546

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۲۰، مهر - آبان ۱۴۰۵، ص. ۵۴۶-۵۳۳

The Effect of Biochar Application on the Medicinal Plant Peppermint under Water Stress Conditions

F. Shariati Tabar[1*], S. R. Hashemi[2], A. Khashaei Siouki[3]
Recived: Feb.22, 2026 Accepted: Jun.07, 2026

Abstract

Water scarcity in arid and semi-arid regions necessitates the adoption of innovative management strategies such as deficit irrigation and the application of organic soil amendments in agriculture. This study aimed to evaluate the main and interactive effects of deficit irrigation and biochar application on growth traits, yield components, and water use efficiency of peppermint. A pot experiment was conducted using a factorial arrangement based on a randomized complete block design with three replications under greenhouse conditions. The first factor was deficit irrigation at three levels (supplying 100%, 75%, and 50% of the plant's water requirement), and the second factor was biochar at three levels (0, 5, and 10% by soil volume). Analysis of variance revealed that the main effect of deficit irrigation on fresh and dry weights of leaves, stems, and roots, as well as water use efficiency based on fresh weight, was significant at the one percent probability level. A significant reduction in the biomass of aerial organs and roots was observed as the irrigation water decreased from 100% to 50% of the water requirement. The main effect of biochar was also significant on all traits, with the highest values of organ fresh and dry weights and water use efficiency obtained with 10% biochar application. The interaction effect of the two factors on root fresh and dry weights was significant, such that under mild stress and in the presence of biochar, the roots exhibited a compensatory response exceeding that observed under non-stress conditions. However, this compensatory mechanism collapsed under severe stress. The most important practical finding was that treatments under severe stress but amended with biochar showed no significant difference in water use efficiency based on dry weight compared to the fully irrigated treatment without biochar. The integration of deficit irrigation with biochar application is an effective strategy for reducing water consumption while maintaining water use efficiency in peppermint cultivation and can be recommended as a sustainable management approach in arid and semi-arid regions.

Keywords: Biomass, Drought stress, Medicinal plants, Organic soil amendment, Water productivity.

1- MSc, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran
2- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran
3- Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran
(*- Corresponding Author Email: F.shariati1369@yahoo.com**)**