University of Birjand

Environmental Stresses in Crop Sciences

Journal homepage:
https://escs.birjand.ac.ir

https://doi.org/10.22077/escs.2026.9098.2358

Original article

Integrated effect of biochar application and mycorrhizal inoculation on growth and biomass production of *Dracocephalum kotschyi* Bioss. under water-deficit conditions

Marzieh Besharati-Far[1], Gholamreza Khajoei-Nejad[2*], Enayatollah Tohidi-Nejad[3], Jalal Ghanbari[4]

1. *PhD Student in Crop Physiology, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran*
2. *Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran*
3. *Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran*
4. *Seed and Plant Certification and Registration Institute (SPCRI), Agricultural Research, Education & Extension Organization (AREEO), Kerman, Iran*

Received 12 March 2025; Revised 21 May 2025; Accepted 27 May 2025

نسخه پیش از انتشار

Extended abstract

Introduction

Dracocephalum kotschyi Boiss., a member of the Lamiaceae family, is a native species found in central and western Iran and is known locally as Badrandjboie-Dennaie or Zarrin-Giah. It is used in traditional folk medicine, and its aerial parts are rich in essential oils. Recent studies have documented several medicinal properties of *D. kotschyi,* including immunomodulatory, antihyperlipidemic, antinociceptive, and cytotoxic activities (Fallah et al., 2020). Drought stress is the most common abiotic stress affecting plant growth and development (Jaleel, 2009). Some eco-friendly agricultural practices can reduce the harmful effects of drought stress and improve plant growth and production under water-limited conditions. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) can establish symbiotic associations with the roots of the majority of terrestrial plants. AMF promote host plant growth and enhance resistance to drought stress. Moreover, AMF protect host plants against the inhibitory and destructive effects of drought through several mechanisms, including increased water uptake by extraradical hyphae, improved nutritional status, and osmotic adjustment (Ahanger et al., 2014). The main objective of this study was to evaluate the growth and biomass production of D. kotschyi inoculated with mycorrhizal fungi under deficit irrigation.

Materials and methods

This study aimed to evaluate the effects of biochar application (5% w/w of soil) and mycorrhizal inoculation (*Funneliformis mosseae*) on the growth and biomass production of *D .kotschyi* Boiss. under water-deficit conditions in a pot experiment. Irrigation levels included 100, 70, and 40% of field capacity, representing normal irrigation, mild stress, and severe stress, respectively. The experiment was conducted as a factorial arrangement in a completely randomized design (CRD) with three replications under greenhouse conditions at Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. At the end of the experiment, all plants from each pot were harvested. Different growth parameters and root and shoot characteristics, including root volume, root dry weight, plant height, shoot fresh and dry

* Corresponding author: Gholamreza Khajoei-Nejad; E-Mail: khajoei@uk.ac.ir

© 2026, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

weight, relative water content, electrolyte leakage, biomass production, and water use efficiency, were examined.

Results and discussion

The results showed that increasing water-deficit levels reduced biomass production by increasing specific leaf weight and decreasing plant height, leaf number, leaf area, root length, and root weight. However, water-use efficiency (WUE) under mild stress did not differ significantly from that under normal conditions, whereas severe drought stress significantly reduced WUE. Biochar application increased WUE by enhancing growth rate, leaf number, root length, root weight, and root volume. Mycorrhizal inoculation also improved growth rate, leaf number and area, root volume and weight, chlorophyll index, biomass production, and WUE. Mycorrhizal inoculation efficiency decreased under drought stress but increased with biochar application. Despite the significant reduction in biomass production under drought stress, *D. kotschyi* appears to employ stress-avoidance mechanisms. The results indicate that reductions in leaf area, leaf size, and leaf area ratio, together with an increase in specific leaf weight under severe stress, may represent responses that help maintain relative leaf water content under stress conditions. The findings also indicated that although no interaction effect was observed between biochar or mycorrhizal treatments and irrigation levels, biochar application and mycorrhizal inoculation had significant effects on most of the studied traits.

Conclusion

In semi-arid areas, mycorrhizal inoculation and biochar application can be considered as strategies to increase productivity per unit area. Also, under limited irrigation conditions, the favorable response of plants to mild deficit irrigation suggests that applying mild water stress may serve as an effective agricultural strategy to improve the production of D. kotschyi and other medicinal plants in semi-arid regions.

Keywords: Biofertilizer, Drought stress, Inoculation efficiency, Organic fertilizer, Water use efficiency

نسخه پیش از انتشار

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences

https://doi.org/10.22077/escs.2026.9098.2358

مقاله پژوهشی

اثر تلفیقی کاربرد بیوچار و تلقیح با قارچ میکوریزا بر رشد و تولید زیست‌توده زرین‌گیاه (*Dracocephalum kotschyi* Bioss.) در شرایط کم‌آبیاری

مرضیه بشارتی فر[1]، غلامرضا خواجویی نژاد[2*]، عنایت الله توحیدی نژاد[3]، جلال قنبری[4]

۱. دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان
۲. استاد گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان
۳. دانشیار گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان
۴. موسسه تحقیقات ثبت و گواهی بذر و نهال، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
اثربخشی تلقیح
تنش خشکی
کارایی مصرف آب
کود آلی
کود زیستی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۳۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۶

تاریخ انتشار:

چکیده

هدف از این مطالعه بهبود رشد و تولید زیست‌توده زرین‌گیاه (*Dracocephalum kotschyi* Boiss.) با کاربرد بیوچار به میزان ۵ درصد وزنی خاک و تلقیح با میکوریزا (تلقیح و عدم تلقیح با *Funneliformis mosseae*) به منظور تخفیف اثرات کم‌آبیاری در شرایط گلخانه‌ای بود. سطوح آبیاری مختلف شامل ۱۰۰، ۷۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی به ترتیب به عنوان آبیاری نرمال، تنش ملایم و تنش شدید اعمال گردید. نتایج نشان داد که اعمال سطوح کم‌آبیاری با کاهش پارامترهای رشد، افزایش وزن ویژه برگ، کاهش ارتفاع، تعداد و سطح برگ، طول و وزن ریشه، تولید زیست‌توده را کاهش داد. با این وجود، کارایی مصرف آب در تیمار تنش ملایم با شرایط نرمال تفاوت معنی‌داری نشان نداد در حالی‌که اعمال تنش شدید منجر به کاهش کارایی مصرف آب شد. کاربرد بیوچار با بهبود سرعت رشد، تعداد برگ، طول، وزن و حجم ریشه منجر به افزایش کارایی مصرف آب شد. تلقیح با میکوریزا نیز سرعت رشد، تعداد و سطح برگ، حجم و وزن ریشه، شاخص کلروفیل، تولید زیست‌توده و کارایی مصرف آب را بهبود داد. اعمال تنش خشکی کارایی تلقیح میکوریزایی را کاهش داد در حالی که کاربرد بیوچار منجر به افزایش آن شد. به طور کلی کاربرد بیوچار و میکوریزا، با وجود عدم مشاهده اثر متقابل با سطوح تنش، می‌تواند در تولید زرین‌گیاه و دیگر گیاهان دارویی در مناطق نیمه خشک مؤثر واقع شود.

مقدمه

زرین‌گیاه یا بادرنجبویه دنایی (*Dracocephalum kotschyi* Boiss.) از تیره نعنائیان است و از تنوع زیادی در منطقه مدیترانه برخوردار است. این گیاه به عنوان یکی از ۸ گونه جنس *Dracocephalum* از گونه‌های بومی و انحصاری ایران بوده (Rechinger, 1972) که در آب و هوای خنک مناطق کوهستانی رشد می‌کند (Ghahreman, 1983). زرین‌گیاه به یک گیاه دارویی در طب سنتی ایران جهت درمان درد، التهاب، تشنج و تب استفاده می‌شده است و جوشانده آن علاوه بر التیام زخم و رفع دردهای روماتیسمی، در تقویت سیستم ایمنی نیز نقش دارد (Sajjadi et al., 1998) علاوه بر این، برای درمان سردرد و اختلالات کبدی (Fallah et al., 2020)، به عنوان عامل ضد چربی خون، تعدیل سیستم ایمنی، ضد درد، ضد اسپاسم و ضد سرطان نیز استفاده می‌شود. همچنین، زرین‌گیاه به عنوان طعم دهنده در غذاها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Amirghofran et al., 2000). با این وجود، برداشت بیش از حد از زیستگاه‌های طبیعی و کمبود کشت و اهلی‌سازی این گیاه

* نگارنده پاسخگو: غلامرضا خواجویی‌نژاد. پست الکترونیک: khajoei@uk.ac.ir

دلایلی است که این گونه را در معرض خطر انقراض قرار داده است (Jalili and Jamzad, 1999).

خشکی از جمله مهم‌ترین تنش‌های محیطی غیرزیستی است که به عنوان مهم‌ترین عامل محدود کننده رشد و تولید گیاهان زراعی در اکثر نقاط جهان و ایران شناخته شده است (Jaleel et al., 2009; Amiri et al., 2015). بهره‌وری کشاورزی وابسته به استفاده بهینه از میزان آب قابل دسترس است (FAO, 2011). تنش خشکی منجر به ایجاد اختلال در متابولیسم شده و با کاهش رشد ریشه، دسترسی گیاه به آب و مواد غذایی را محدود می‌کند که نتیجه آن کاهش قابل توجه در عملکرد گیاه است (Wang et al., 2003; Assaha et al., 2016; Mona et al., 2017).

در این شرایط، روی آوردن به شیوه‌های مدیریتی جدید، می‌تواند با افزایش کارایی مصرف آب و بهبود کارایی مصرف عناصر خاک، عملکرد محصول را در شرایط کم‌آبی بهبود دهد (Edmeades, 2003). بهینه‌سازی ورودی نهاده‌ها در سیستم‌های کشاورزی و ایجاد نوآوری در مدیریت منابع موجود از مهم‌ترین اهداف کشاورزی پایدار است. استفاده از کودهای زیستی در جهت کاهش کاربرد نهاده‌ها و تعدیل اثرات نامطلوب محیطی بر گیاهان، می‌تواند استراتژی کاربردی برای دستیابی به پایداری باشد (Ahmadi-Rad et al., 2016). بیوچار با ساختار متخلخل و غنی از کربن (۸۹ درصد) قادر به ذخیره آب و عناصرغذایی است. بیوچار با کاهش چگالی ظاهری و افزایش تخلخل و هوادهی خاک، ضمن افزایش حاصل‌خیزی خاک در دانه‌بندی خاک نقش مؤثری دارد که می‌تواند ظرفیت نگهداری آب خاک را افزایش دهد (Yoo et al., 2020).

قارچ‌های میکوریزا در همزیستی با گیاهان میزبان، شبکه گسترده‌ای از هیف را در خاک ایجاد کرده و از طریق گسترش سطح ریشه در خاک، در جذب آب و عناصر غذایی مشارکت می‌کنند. علاوه براین، تلقیح گیاهان با قارچ‌های میکوریزا از طریق تشکیل یک‌سری ارتباط‌های همزیستی بین میزبان و قارچ، تحمل گیاه میزبان را در برابر تنش‌های مختلف، از جمله خشکی، گرما، شوری، فلزات سنگین و حتی بیماری‌ها افزایش می‌دهد (Harrier, 2001).

مطالعات چندانی اثر تلفیقی بیوچار و میکوریزا را در بهبود رشد و تحمل به خشکی در گیاهان مورد بررسی قرار نداده‌اند. محققین در بررسی اثربیوچار و میکوریزا بر گیاه نخود (*Cicer arietinum* L.) در شرایط تنش خشکی مشاهده کردند که بیوچار اثرات خشکی را تعدیل کرده و عملکرد را به میزان زیادی بهبود بخشید. همچنین میکوریزا و بیوچار باعث افزایش قابل توجه در بازده فتوسنتز خالص و سبب بهبود رشد و خصوصیات فیزیولوژیکی نخود تحت تنش خشکی شدند (Hashem et al., 2019). بر این اساس، هدف از این مطالعه بررسی صفات موفولوژیک زرین‌گیاه در کاربرد منفرد و همزمان بیوچار و قارچ میکوریزا در شرایط تنش خشکی در شرایط گلخانه بود.

مواد و روش‌ها

شرایط آزمایش و تیمارهای مورد بررسی

این آزمایش در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه شهید باهنر کرمان در طول فصل رشد ۱۴۰۰-۱۳۹۹ انجام شد. عوامل مورد بررسی شامل سطوح مختلف آبیاری براساس ۱۰۰، ۷۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی؛ کاربرد بیوچار در دو سطح عدم کاربرد و کاربرد براساس ۵ درصد وزنی خاک مورد استفاده؛ و میکوریزا در دو سطح تلقیح و عدم تلقیح با قارچ آربوسکولار میکوریزا (*Funneliformis mosseae*) در ۴۸ گلدان بود. بر این اساس، آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی با سه عامل در ۴ تکرار به کار گرفته شد.

در این پژوهش بذر زرین گیاه از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه گردید. بذرها قبل از کاشت به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر خیسانده شد و سپس در سینی نشا با بستر کوکوپیت (۴۰ درصد)، پرلیت (۲۰ درصد)، پیت‌ماس (۲۰ درصد) و ورمی کمپوست (۲۰ درصد) کاشته شد. بعد از حدود ۴۵ روز، گیاهچه‌ها با طول حدود ۱۰ سانتی‌متر به گلدان منتقل شدند. گلدان‌ها با خاک استریل شده به نسبت ۱:۳ خاک مزرعه: شن پر شد. در هنگام آماده‌سازی گلدان‌ها برای کاشت، تیمار بیوچار براساس درصد وزنی مورد نظر با خاک مخلوط شد. تلقیح میکوریزا به میزان ۴۰ گرم در هنگام کاشت نشا به گلدان‌ها اضافه شد. تیمارهای آبیاری بعد از استقرار گیاهچه بر اساس ظرفیت زراعی در هر سطح اعمال شد.

صفات مورد بررسی

ارتفاع بوته و طول ریشه بلافاصله پس از برداشت در تاریخ ۳ خرداد ماه با استفاده از خط کش اندازه‌گیری شد. وزن تر بوته نیز بلافاصله پس از برداشت اندازه‌گیری و برگ‌های گیاه جدا شده و توسط دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ (مدل WinArea_UT_11)، سطح برگ گیاهان تعیین شد. سپس

نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شده (Ehsanzadeh et al., 2004) و وزن خشک برگ و ساقه اندازه‌گیری شد. پارامترهای مختلف رشد گیاه با استفاده از روابط زیر تعیین شد (Ghanbari and Khajoei-Nejad, 2022):

$$CGR\ (\text{g plant}^{-1}\ \text{d}^{-1}) = \left(\frac{(W_2 - W_1)}{(t_2 - t_1)}\right) \quad [۱]$$

$$RGR\ (\text{mg g}^{-1}\ \text{plant}^{-1}) = \frac{(ln\ W_2 - ln\ W_1)}{(t_2 - t_1)} \quad [۲]$$

$$SLA: LA/LW \quad [۳]$$

$$\text{SLW: LW/ LA} \quad [۴]$$

$$LAR\ (\text{cm}^2\ \text{g}^{-1}): LA/W_2 \quad [۵]$$

CGR: سرعت رشد محصول؛ RGR: سرعت رشد نسبی؛ SLA: سطح ویژه برگ؛ LA: سطح برگ؛ LW: وزن برگ؛ SLW: وزن ویژه برگ؛ W_2: وزن خشک در مرحله دوم؛ W_1: وزن خشک در مرحله اول.

برای اندازه‌گیری حجم ریشه از یک استوانهٔ مدرج که تا حجم خاصی درون آن آب وجود داشت استفاده شد و تغییر حجم آب بعد از قرار گرفتن ریشهٔ گیاه درون استوانه مدرج، به عنوان حجم ریشه در نظر گرفته شد (Böhm, 1979).

جهت تعیین محتوای نسبی آب برگ (RWC)، ابتدا ۱۰۰ میلی‌گرم برگ وزن (FW) و سپس به لوله حاوی ۱۰ سی‌سی آب مقطر منتقل شد و بعد از ۲۴ ساعت وزن آماس اندازه‌گیری شد (TW). برگ‌ها را درون آون با دما ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک شدند و وزن خشک اندازه‌گیری شد (DW). در نهایت با استفاده از رابطه (۶) محتوای نسبی آب برگ اندازه‌گیری شد (Vafadar et al., 2020).

$$RWC = \frac{FW\text{-}DW}{TW\text{-}DW} \times 100 \quad [۶]$$

برای اندازه‌گیری میزان نشت الکترولیت (EL)، ۱۰۰ میلی‌گرم برگ وزن و با آب مقطر شست و شو داده شد. برگ‌ها به لوله حاوی ۱۰ سی‌سی آب مقطر منتقل و به مدت ۲۴ ساعت بر روی شیکر با سرعت ۲۰۰ rpm در دمای اتاق قرار داده شد. بعد از مراحل انجام شده، EC نمونه‌ها اندازه‌گیری شده (Lt) و سپس به مدت ۲۰ دقیقه در اتوکلاو با دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و پس از سرد شدن در دمال اتاق، مجددا EC اندازه‌گیری شد (L_0). در نهایت میزان نشت الکترولیت از رابطه ۷ محاسبه شد (Vafadar et al., 2020).

$$EL = \frac{Lt}{L_0} \times 100 \quad [۷]$$

در نهایت براساس میزان زیست‌توده تولیدی (BY) و آب مصرفی (W) برای هر تیمار، کارایی مصرف آب (WUE) محاسبه شد (رابطه ۸):

$$WUE = \frac{BY}{W} \quad [۸]$$

جهت ارزیابی کارایی میکوریزا در افزایش زیست‌توده تولیدی در شرایط مختلف تنش خشکی و کاربرد بیوچار، اثربخشی تلقیح میکوریزا[1] (MIE) با استفاده از زیست‌توده کل تولید شده در شرایط تلقیح (BY_i) و عدم تلقیح (BY_0) و از رابطه ۹ حاصل شد:

$$MIE = \frac{BYi - BY0}{BYi} \times 100 \quad [۹]$$

داده‌های حاصل جهت تعیین اختلاف آماری بین سطوح عوامل مورد بررسی و اثر متقابل آن‌ها از نظر آماری با استفاده از نرم افزار SAS ver 9.0 (SAS, Cary, NC, USA) مورد تجزیه و میانگین‌ها توسط آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD; $P \leq 0.05$) مورد مقایسه قرار گرفتند.

نتایج و بحث

شاخص‌های رشد

میزان سرعت رشد محصول در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری قرار گرفت. همچنین بیوچار و میکوریزا نیز اثر معنی‌داری بر سرعت رشد محصول داشتند (جدول ۱). سرعت رشد محصول در شرایط ۴۰ درصد آبیاری نسبت به شرایط نرمال ۶۲ درصد و نسبت به سطح ۷۰ درصد ظرفیت زراعی، ۵۴ درصد کاهش نشان داد (جدول ۲). کاربرد بیوچار منجر به افزایش ۱۶ درصدی سرعت رشد محصول شد (جدول ۳). همچنین تلقیح با میکوریزا سرعت رشد محصول را ۱۸ درصد نسبت به عدم تلقیح افزایش داد (جدول ۴).

سرعت رشد نسبی زرین گیاه به طور معنی‌داری تحت تاثیر سطوح مختلف آبیاری، کاربرد بیوچار و تلقیح با میکوریزا قرار گرفت در حالی‌که اثرات متقابل معنی‌داری بین عوامل مورد بررسی مشاهده نشد (جدول ۱). کاهش میزان آبیاری از ۱۰۰ درصد به ۷۰ و ۴۰ درصد به‌ترتیب موجب کاهش ۴ و ۱۹ درصدی سرعت رشد نسبی شد (جدول ۲). کاربرد بیوچار و میکوریزا منجر به افزایش سرعت رشد نسبی زرین گیاه شد (جداول ۳ و ۴). رابطه مستقیمی بین افزایش میزان تنش خشکی و هرکدام از شاخص‌های رشد گیاه وجود دارد.

[1] Mycorrhizal inoculation effect

نسخه پیش از انتشار

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس اثر سطوح آبیاری، کاربرد بیوچار و تلقیح با میکوریزا بر شاخص‌های رشد زرین گیاه

Table 1. Analysis of variance results of the effect of irrigation levels, biochar application and mycorrhiza inoculation on growth indices of Dracocephalum kotschyi

S.O.V منابع تغییر	درجه آزادی df	سرعت رشد محصول Crop growth rate	سرعت رشد نسبی Relative growth rate	نسبت سطح برگ Leaf area ratio	سطح ویژه برگ Specific leaf area	وزن ویژه برگ Specific leaf weight
Irrigation (I) آبیاری	2	685**	0.000178**	396*	2250*	10.4*
Biochar (B) بیوچار	1	58.8*	0.0000104*	4.8^{ns}	25.9^{ns}	0.040^{ns}
Mycorrhiza (M) میکوریزا	1	77.1*	0.0000127*	271^{ns}	431.6**	0.730^{ns}
I×B آبیاری×بیوچار	2	34.4^{ns}	0.0000035^{ns}	243^{ns}	1488^{ns}	3.24^{ns}
I×M آبیاری×میکوریزا	2	15.6^{ns}	0.0000010^{ns}	109^{ns}	63.0^{ns}	0.010^{ns}
B×M بیوچار×میکوریزا	1	4.83^{ns}	0.0000024^{ns}	135^{ns}	197^{ns}	0.850^{ns}
I×B×M آبیاری × بیوچار × میکوریزا	2	0.070^{ns}	0.0000002^{ns}	71.6^{ns}	68.7^{ns}	0.330^{ns}
Error خطا	36	11.8	0.0000023	101.90	681	2.36
C.V (%) ضریب تغییرات	-	*23.0*	*4.9*	*16.2*	*19.4*	*19.8*

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

**: Significant at 1% probability level, *: Significant at 5% probability level, ^{ns}: Not significant

جدول ۲. اثر سطوح آبیاری بر شاخص‌های رشد زرین گیاه

Table 2. Effect of irrigation levels on growth indices of *Dracocephalum kotschyi*

Irrigation levels	سطوح آبیاری	سرعت رشد محصول Crop growth rate	سرعت رشد نسبی Relative growth rate	نسبت سطح برگ Leaf area ratio	سطح ویژه برگ Specific leaf area	وزن ویژه برگ Specific leaf weight
		mg plant^{-1} d^{-1}	mg g^{-1} plant weight d^{-1}	cm^2 g^{-1}	cm^2 g^{-1}	g cm^{-2}
100%FC	۱۰۰ درصد	20.5 ± 1.31^{a}	0.034 ± 0.0005^{a}	65.4 ± 2.91^{a}	142 ± 6.1^{a}	7.23 ± 0.29^{c}
70%FC	۷۰ درصد	16.7 ± 0.94^{b}	0.032 ± 0.0004^{b}	65.3 ± 2.38^{a}	141 ± 5.0^{a}	7.37 ±0.28^{b}
40%FC	۴۰ درصد	7.73 ± 0.41^{c}	0.027 ± 0.0004^{c}	56.7 ± 2.53^{b}	121 ± 7.5^{b}	8.69 ± 0.48^{a}

برای هر صفت، میانگین‌های (میانگین ± خطای استاندارد) دارای حروف مشترک، فاقد اختلاف آماری معنی‌دار براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD; P ۰/۰۵≥) می‌باشند.

For each trait, the means (mean ± standard error) with common letters are not statistically significantly different based on the least significant difference test (LSD; P≤0.05).

تنش خشکی اثرات وسیعی بر رشد گیاه دارد که از مهمترین اثرات تنش خشکی کاهش سرعت محصول، رشد طولی ساقه و کاهش رشد در برگ بوده که عمدتا به دلیل اثر منفی تنش بر فرایندهای فتوسنتز، تغذیه، روابط هورمونی و آبی گیاه می‌باشد (Zarrin-Torang et al., 2023; Sheikhpoor et al., 2024). تلقیح بذر سیاهدانه با کودهای بیولوژیک باعث افزایش معنی‌دار ارتفاع گیاه، شاخص سطح برگ، حداکثر تجمع ماده خشک و سرعت رشد محصول در مقایسه با شاهد شد که نشان از اثرات مثبت کودهای بیولوژیک بر رشد و عملکرد گیاهان دارویی از جمله سیاه‌دانه دارد (Khorramdel et al., 2011).

نسخه پیش از انتشار

جدول ۳. اثر کاربرد بیوچار بر شاخص‌های رشد زرین گیاه

Table 3. Effect of biochar application on growth indices of *Dracocephalum kotschyi*

Biochar بیوچار	سرعت رشد محصول Crop growth rate	سرعت رشد نسبی Relative growth rate
	mg plant^{-1} d^{-1}	mg g^{-1} plant weight d^{-1}
Non-application کاربرد عدم	13.9 ± 2.1^{b}	0.0307 ± 0.00013^{b}
Biochar application بیوچار کاربرد	16.1 ± 1.5^{a}	0.0316 ± 0.00014^{a}

برای هر صفت، میانگین‌های (میانگین ± خطای استاندارد) دارای حروف مشترک، فاقد اختلاف آماری معنی‌دار براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD; $P\leq$ ۰/۰۵) می‌باشند.

For each trait, the means (mean ± standard error) with common letters are not statistically significantly different based on the least significant difference test (LSD; $P\leq0.05$).

جدول ۴. اثر تلقیح با میکوریزا بر شاخص‌های رشد زرین گیاه

Table 4. Effect of mycorrhizal inoculation on growth indices of *Dracocephalum kotschyi*

Mycorrhiza میکوریزا	سرعت رشد محصول Crop growth rate	سرعت رشد نسبی Relative growth rate
	mg plant^{-1} d^{-1}	mg g^{-1} plant weight d^{-1}
Non-inoculation تلقیح عدم	13.7 ± 1.19^{b}	0.0307 ± 0.00063^{b}
Inoculation میکوریزا با تلقیح	16.2 ± 1.46^{a}	0.0317 ± 0.00067^{a}

برای هر صفت، میانگین‌های (میانگین ± خطای استاندارد) دارای حروف مشترک، فاقد اختلاف آماری معنی‌دار براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD; $P\leq$ ۰/۰۵) می‌باشند.

For each trait, the means (mean ± standard error) with common letters are not statistically significantly different based on the least significant difference test (LSD; $P\leq0.05$).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تنها عامل مؤثر بر نسبت سطح برگ، سطح ویژه برگ و وزن ویژه برگ، اعمال سطوح مختلف آبیاری بود (جدول ۱)، به‌طوری که نسبت سطح برگ و سطح یژه برگ با وجود کاهش سطح آبیاری از ۱۰۰ به ۷۰ کاهش معنی‌داری نشان ندادند، این در حالی بود که اعمال تنش شدید منجر به کاهش ۱۳ و ۱۵ درصدی در پارامترهای مذکور شد (جدول ۲). با این وجود، افزایش سطوح تنش نسبت به آبیاری نرمال به‌طور معنی‌داری منجر به افزایش وزن ویژه برگ شد (جدول ۲).

تورژسانس سلولی با کاهش آب کاهش می‌یابد که در نتیجه آن کاهش رشد و توسعهٔ سلول به خصوص در ساقه و برگ‌ها را به دنبال خواهد داشت. اندام‌ها با کاهش رشد سلول محدود می‌شوند. تنش خشکی با کاهش تقسیمات سلولی، تورژسانس و کاهش ابعاد سلول باعث کاهش سطح برگ می‌شود (Farooq et al., 2009).

خصوصیات موفولوژیک اندام هوایی

ارتفاع بوته زرین گیاه تحت تأثیر سطوح آبیاری قرار گرفت در حالی‌که اثر کاربرد بیوچار و تلقیح با میکوریزا و اثرات متقابل برای این صفت معنی‌دار نبود (جدول ۵). ارتفاع بوته با افزایش تنش کاهش یافت به‌طوری‌که با کاهش میزان آبیاری از ۱۰۰ درصد به ۷۰ و ۴۰ درصد ارتفاع بوته به ترتیب ۹ و ۴۸ درصد کاهش نشان داد (جدول ۶).

با کاهش رطوبت خاک، قابلیت استفاده عناصر غذایی توسط گیاه کاهش می‌یابد و منجر به کاهش معنی‌دار ارتفاع، رشد و عملکرد گیاه می‌شود (Razmjoo et al., 2008). اعمال سطوح مختلف تنش خشکی تأثیر معنی‌داری بر ارتفاع، تعداد شاخه جانبی و وزن خشک گیاهان دارویی شوید، گشنیز و رازیانه نشان داد. با افزایش شدت تنش خشکی از رشد رویشی کاسته می‌شود زیرا قابلیت دسترسی آب بر فاصله میانگره‌ها و تعداد گره‌ها اثر گذاشته و از این طریق ارتفاع گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این شرایط، گیاه با ورود به فاز زایشی دوره رشد خود را زودتر به پایان می‌رساند (Amiri et al., 2012). در تحقیقی با بررسی اثر تنش بر گیاه زنیان (*Trachyspermum ammi* L.) مشاهده شد که ارتفاع گیاه با افزایش سطح تنش کاهش می‌یابد (Azhar et al., 2011). همچنین اعمال تنش خشکی ارتفاع بوته آویشن دنایی را نیز کاهش داده است (Bahreininejad et al., 2013).

اعمال سطوح مختلف آبیاری، کاربرد بیوچار و تلقیح با میکوریزا تاثیر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر تعداد برگ در بوته نشان دادند (جدول ۵). با افزایش سطوح تنش، تعداد برگ در بوته به ترتیب ۱۷ و ۴۲ درصد در سطوح ۷۰ و ۴۰ درصد آبیاری نسبت به آبیاری نرمال کاهش یافت (جدول ۶). کاربرد بیوچار و میکوریزا تعداد برگ در بوته را ۲۶ درصد افزایش دادند (جداول ۷ و ۸). افزایش هورمون اتیلن در اثر مداومت در تنش آبی، موجب تسریع پیری برگ‌ها

جدول ۵. نتایج تجزیه واریانس اثر سطوح آبیاری، کاربرد بیوچار و تلقیح با میکوریزا بر خصوصیات مورفولوژیک اندام هوایی و ریشه زرین گیاه

Table 5. Analysis of variance results of the effect of irrigation levels, biochar application and mycorrhiza inoculation on morphological characteristics of aerial parts and root of *Dracocephalum kotschyi*

S.O.V منابع تغییر	درجه آزادی df	تعداد برگ در بوته Number of leaves per plant	سطح برگ در بوته Leaf area per plant	وزن خشک برگ Leaf dry weight	وزن خشک ساقه Stem dry weight	نسبت برگ به ساقه Leaf to stem ratio
Irrigation (I) آبیاری	2	29324**	75334**	2.99**	5.07**	0.0083*
Biochar (B) بیوچار	1	17768**	7642*	0.323^{ns}	0.275*	0.001^{ns}
Mycorrhiza (M) میکوریزا	1	17402**	12375**	0.637*	0.323*	0.0124*
I×B آبیاری × بیوچار	2	2797^{ns}	4270*	0.071^{ns}	0.424**	0.0065^{ns}
I×M آبیاری × میکوریزا	2	1633^{ns}	785^{ns}	0.027^{ns}	0.168^{ns}	0.0112*
B×M بیوچار × میکوریزا	1	12.3^{ns}	18.2^{ns}	0.037^{ns}	0.008^{ns}	0.0005^{ns}
I×B×M آبیاری× بیوچار×میکوریزا	2	1436^{ns}	285^{ns}	0.010^{ns}	0.015^{ns}	0.0025^{ns}
Error خطا	36	1293	1193	0.090	0.061	0.0025
C.V (%) ضریب تغییرات	-	*22.0*	*24.3*	*28.5*	*20.5*	*16.4*

Table 5. Continued **جدول ۵. ادامه**

S.O.V منابع تغییر	درجه آزادی df	ارتفاع بوته Plant height	طول ریشه Root length	حجم ریشه Root volume	وزن تر ریشه Root fresh weight	وزن خشک ریشه Root dry weight
Irrigation (I) آبیاری	2	1934**	216**	138.92**	289.8**	7.01**
Biochar (B) بیوچار	1	25.3^{ns}	127*	25.04**	28.4**	0.078^{ns}
Mycorrhiza (M) میکوریزا	1	56.0^{ns}	23.8^{ns}	17.39**	28.49**	0.373*
I×B آبیاری × بیوچار	2	46.6^{ns}	2.75^{ns}	7.86*	4.33^{ns}	0.330*
I×M آبیاری × میکوریزا	2	4.5^{ns}	10.9^{ns}	0.46^{ns}	1.97^{ns}	0.037^{ns}
B×M بیوچار × میکوریزا	1	38.8^{ns}	16.9^{ns}	1.99^{ns}	0.0004^{ns}	0.242^{ns}
I×B×M آبیاری × بیوچار × میکوریزا	2	24.0^{ns}	48.4^{ns}	0.20^{ns}	4.50^{ns}	0.083^{ns}
Error خطا		22.3	25.3	1.72	3.37	0.066
C.V (%) ضریب تغییرات	-	*13.4*	*18.4*	*20.9*	*24.8*	*24.0*

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

** :Significant at 1% probability level, *: Significant at 5% probability level, ^{ns}: Not significant

نسخه پیش از انتشار

و ریزش آن‌ها شده که با کاهش تعداد برگ در بوته همراه است (Taiz and Zeiger, 2010). خالصی و همکاران (Khalesi et al., 2015) گزارش کردند که کاربرد بیوچار در شرایط تنش منجر به افزایش تعداد برگ در بوته شده است.

علاوه بر بهبود تغذیه، همزیستی میکوریزایی منجر به بهبود روابط آبی گیاه می‌شود. میکوریزا با افزایش سطح ریشه از طریق تشکیل هیف، سبب افزایش جذب آب و مواد غذایی توسط گیاهان میزبان می‌شود. همچنین فتوسنتز در گیاهان تلقیح شده با میکوریزا افزایش یافته که باعث افزایش رشد، تعداد برگ و سطح برگ می‌گردد (Esmaielpour and Amani, 2014).

جدول ۶. اثر سطوح آبیاری بر خصوصیات مورفولوژیک ساقه و ریشه و تولید زیست‌توده زرین گیاه

Table 6. Effect of irrigation levels on morphological characteristics of shoot and root and biomass production of *Dracocephalum kotschyi*

Irrigation levels (FC)	آبیاری سطوح (ظرفیت زراعی)	ارتفاع بوته Plant height	برگ در بوته تعداد Number of leaves per plant	خشک برگ وزن Leaf dry weight	ریشه طول Root length	ریشه وزن تر Root fresh weight
		cm		g plant^{-1}	cm	g plant^{-1}
100%FC	**۱۰۰ درصد**	43.3 ± 1.30^{a}	203 ± 14.7^{a}	1.41 ± 0.093^{a}	28.2 ± 1.56^{a}	11.8 ± 0.71^{a}
70%FC	**۷۰ درصد**	39.4 ± 1.15^{b}	168 ± 11.6^{b}	1.17 ± 0.089^{b}	30.4 ± 1.38^{a}	7.11 ± 0.51^{b}
40%FC	**۴۰ درصد**	22.6 ± 1.20^{c}	118 ± 6.1^{c}	0.57 ± 0.045^{c}	23.3 ± 0.81^{b}	3.31 ± 0.27^{c}

Table 6. Continued **جدول ۶. ادامه**

Irrigation levels (FC)	سطوح آبیاری (ظرفیت زراعی)	نشت الکترولیت Electrolyte leakage	اندام هوایی وزن تر Shoot fresh weight	زیست توده Biomass	کارایی مصرف آب Water use efficiency
		%	g plant^{-1}	g plant^{-1}	g L^{-1}
100%FC	**۱۰۰ درصد**	53.8 ± 2.10^{b}	14.2 ± 1.07^{a}	3.09 ±0.23^{a}	0.143 ± 0.0090^{a}
70%FC	**۷۰ درصد**	59.5 ± 2.28^{ab}	12.7 ± 0.74^{a}	2.52 ±0.14^{b}	0.142 ± 0.0079^{a}
40%FC	**۴۰ درصد**	63.4 ± 1.36^{a}	5.23 ± 0.26^{b}	1.18 ±0.06^{c}	0.081 ±0.0040^{c}

برای هر صفت، میانگین‌های (میانگین ± خطای استاندارد) دارای حروف مشترک، فاقد اختلاف آماری معنی‌دار براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD; $P\leq$ ۰/۰۵) می‌باشند.

For each trait, the means (mean ± standard error) with common letters are not statistically significantly different based on the least significant difference test (LSD; $P\leq0.05$).

جدول ۷. اثر کاربرد بیوچار بر خصوصیات مورفولوژیک اندام هوایی و ریشه و کارایی مصرف آب زرین گیاه

Table 7. Effect of biochar application on morphological characteristics of shoot and root and water use efficiency of *Dracocephalum kotschyi*

Biochar بیوچار	برگ در بوته تعداد Number of leaves per plant	ریشه وزن تر Root fresh weight	ریشه طول Root length	کارایی مصرف آب Water use efficiency
		g plant^{-1}	cm	g L^{-1}
Non-application کاربرد عدم	144 ± 8.83^{b}	6.64 ± 0.76^{b}	25.7 ± 1.29^{b}	0.114 ± 0.0077^{b}
Biochar application بیوچار کاربرد	182 ± 12.9^{a}	8.18 ± 0.88^{a}	28.9 ± 1.04^{a}	0.131 ± 0.0087^{a}

برای هر صفت، میانگین‌های (میانگین ± خطای استاندارد) دارای حروف مشترک، فاقد اختلاف آماری معنی‌دار براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD; $P\leq$ ۰/۰۵) می‌باشند.

For each trait, the means (mean ± standard error) with common letters are not statistically significantly different based on the least significant difference test (LSD; $P\leq0.05$).

نسخه پیش از انتشار

جدول ۸. اثر تلقیح با میکوریزا بر خصوصیات مورفولوژیک ساقه و ریشه و تولید زیست‌توده زرین گیاه

Table 7. Effect of mycorrhiza inoculation on morphological characteristics of shoot and root, biomass production and water use efficiency of *Dracocephalum kotschyi*

Mycorrhiza میکوریزا	برگ در تعداد بوته Number of leaves per plant	برگ سطح Leaf area	خشک وزن برگ Leaf dry weight	وزن خشک ساقه Stem dry weight	ریشه حجم Root volume	ریشه وزن تر Root fresh weight
		$cm^2\ plant^{-1}$	$g\ plant^{-1}$	$g\ plant^{-1}$	$cm^3\ plant^{-1}$	$g\ plant^{-1}$
Non-inoculation تلقیح عدم	144 ± 9.49^b	126 ± 13.0^b	0.94 ± 0.084^b	1.12 ± 0.10^b	5.69 ± 0.59^b	6.64 ± 0.79^b
Inoculation تلقیح	182 ± 12.4^a	158 ± 14.7^a	1.17 ± 0.103^a	1.28 ± 0.12^a	6.89 ± 0.59^a	8.18 ± 0.86^a

Table 8. Continued

جدول ۸. ادامه

Mycorrhiza میکوریزا	ریشه وزن خشک Root dry weight	شاخص کلروفیل Chlorophyll Index	وزن تر اندام هوایی Shoot fresh weight	زیست توده Biomass	کارایی مصرف آب Water use efficiency
	$g\ plant^{-1}$	SPAD	$g\ plant^{-1}$	$g\ plant^{-1}$	$g\ L^{-1}$
Non-inoculation تلقیح عدم	0.98 ± 0.14b	53.8 ± 0.98b	9.29 ± 0.83b	2.07 ± 0.18b	0.114 ± 0.0075b
Inoculation تلقیح	1.16 ± 0.12a	57.6 ± 1.39a	12.2 ± 1.12a	2.45 ± 0.23a	0.131 ± 0.0089a

برای هر صفت، میانگین‌های (میانگین ± خطای استاندارد) دارای حروف مشترک، فاقد اختلاف آماری معنی‌دار براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD; $P\leq$ ۰/۰۵) می‌باشند.

For each trait, the means (mean ± standard error) with common letters are not statistically significantly different based on the least significant difference test (LSD; $P\leq0.05$).

سطح‌برگ در بوته تحت تأثیر سطوح آبیاری، کاربرد بیوچار و تلقیح با میکوریزا و همچنین اثر متقابل سطوح آبیاری در بیوچار قرار گرفت (جدول ۵). تلقیح با میکوریزا سطح برگ در بوته را ۲۵ درصد نسبت به عدم تلقیح بهبود داد (جدول ۸). در حالی‌که با اعمال سطوح کم‌آبیاری سطح برگ کاهش یافت، کاربرد بیوچار تنها در شرایط آبیاری نرمال منجر به افزایش معنی‌دارسطح برگ در بوته شد و در شرایط کم‌آبیاری از کارایی لازم در افزایش سطح برگ برخوردار نبود. البته اعمال سطح ۷۰ درصد ظرفیت زراعی تفاوت معنی‌داری با سطح نرمال آبیاری و عدم کاربرد بیوچار نشان نداد. این در حالی بود که اعمال سطح ۴۰ درصد آبیاری سطح برگ در بوته را به‌طور معنی‌داری نسبت به سایر سطوح آبیاری کاهش داد (شکل ۱).

در بسیاری از گونه‌های گیاهی، تنش خشکی عمدتاً رشد برگ و درنتیجه سطح برگ را کاهش می‌دهد (Farooq et al., 2009). در همین راستا، تنش خشکی منجر به کاهش سطح برگ آویشن دنایی شده است (Bahreininejad et al., 2013). از طرف دیگر، کاربرد بیوچار در خاک از طریق تاثیر بر نگهداری عناصر غذایی در خاک، می‌تواند بر شاخص‌های رشدی مهم گیاه از قبیل سطح برگ اثر مثبت داشته و در نهایت افزایش رشد گیاه را منجر شود. بررسی‌های انجام شده توسط محققین نشان داد که با مصرف بیوچار سطح برگ افزایش می‌یابد. سطح برگ یک فاکتور کلیدی در دریافت تشعشع خورشیدی و تبادل انرژی و آب در گیاه می‌باشد. در نتیجه افزایش در سطح برگ می‌تواند منجر به افزایش زیست‌توده گیاهی شود (de Jesus et al., 2001).

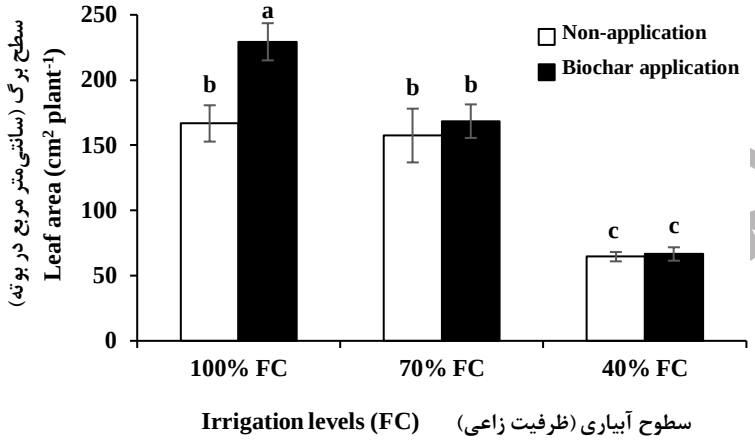
وزن خشک برگ تحت تأثیر سطوح‌آبیاری و تلقیح با میکوریزا قرار گرفت (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که اعمال سطوح کم‌آبیاری به‌ترتیب ۱۷ و ۶۰ درصد وزن خشک برگ را کاهش داد (جدول ۶).

اثر تنش خشکی در کاهش وزن خشک گیاه به علت کاهش پرتو نوری جذب شده توسط گیاه و یا کاهش بازده فتوسنتز و یا ترکیبی از این دو می‌باشد (Tesfaye et al., 2006). تلقیح با میکوریزا وزن خشک برگ زرین گیاه را ۲۴ درصد در مقایسه با عدم تلقیح افزایش داد. میکوریزا باعث افزایش فعالیت فتوسنتزی و تثبیت CO_2 و تولید سطح برگ

نسخه پیش از انتشار

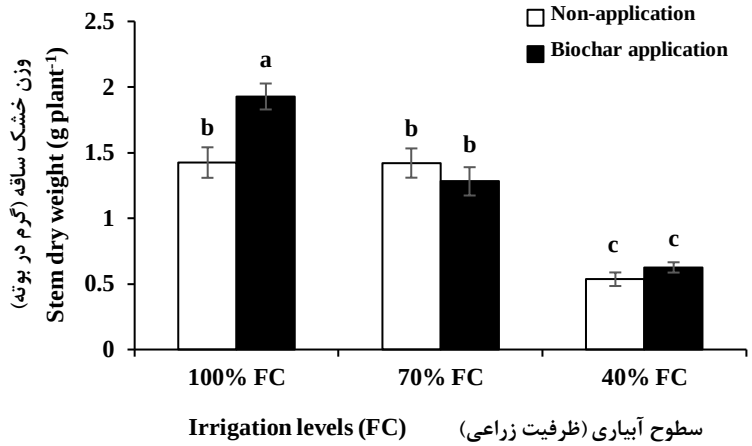
بیشتر می‌شود، که در نهایت با افزایش تثبیت CO_2 تولید زیست‌توده راافزایش می‌دهد (Smith and Read, 2008).

اثر اعمال سطوح آبیاری، کاربرد بیوچار، تلقیح با میکوریزا و اثر متقابل کاربرد بیوچار در سطوح آبیاری بر وزن خشک ساقه معنی‌دار بود (جدول ۵). در آبیاری نرمال، کاربرد بیوچار منجر به افزایش معنی‌دار در وزن خشک ساقه شد در حالی‌که در سایر سطوح آبیاری، اثر معنی‌داری از کاربرد بیوچار مشاهده نشد (شکل ۲). تلقیح با میکوریزا ۱۴ درصد وزن خشک ساقه را افزایش داد (جدول ۸).



شکل ۱. سطح برگ زرین گیاه تحت تأثیر اثر متقابل سطوح آبیاری و کاربرد بیوچار

Fig. 1. Leaf area of the Dracocephalum kotschyi affected by the interaction of irrigation levels and biochar application



شکل ۲. وزن خشک ساقه زرین گیاه تحت تأثیر اثر متقابل سطوح آبیاری و کاربرد بیوچار

Fig. 2. Stem dry weight of Dracocephalum kotschyi affected by the interaction of irrigation levels and biochar application

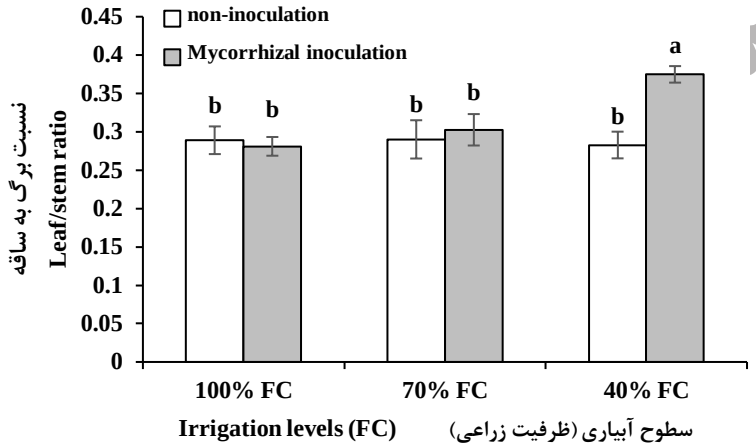
در بررسی سطوح تنش در برخی گیاهان دارویی همچون شوید، گشنیز و رازیانه، نتایج نشان داد که در شرایط نرمال آبیاری، تولید ماده خشک به دلیل رشد بهتر اندام هوایی و تأمین سطوح فتوسنتزی کارآمد، افزایش یافت (Amiri et al., 2012). همچنین بررسی‌های انجام شده نشان داد که با اعمال تنش خشکی بر گیاهان ریحان و بادرشبو نتایج مشابه حاصل شد (Hassani, 2006). در پژوهشی دیگر، افزایش وزن خشک اندام هوایی گیاه در شرایط کاربرد بیوچار را به دلیل رشد بهتر اندام هوایی و تامین سطح فتوسنتزی گیاه، گزارش کردند (Quilliam et al., 2013).

نسبت برگ به ساقه تحت تأثیر سطوح آبیاری، کاربرد میکوریزا و اثر متقابل آن‌ها قرار گرفت (جدول ۵). تلقیح با میکوریزا در شرایط نرمال آبیاری و تنش ملایم اثری بر نسبت برگ به ساقه نداشت اما در شرایط تنش شدید نسبت برگ به

ساقه را ۳۲ درصد افزایش داد. بیشترین نسبت برگ به ساقه نیز از شرایط کاربرد مایکوریزا در تنش شدید حاصل شد (شکل ۳).

خصوصیات موفولوژیک ریشه

طول ریشه به‌ترتیب در سطح احتمال یک درصد و پنج درصد تحت تاثیر تیمارهای مختلف آبیاری و کاربرد بیوچار قرار گرفت (جدول ۵). با وجود افزایش نسبی و غیر معنی‌دار طول ریشه با اعمال سطح متوسط تنش (۷۰ درصد ظرفیت زراعی)، اعمال تنش شدید (۴۰ درصد ظرفیت زراعی) منجر به کاهش ۱۷ درصدی طول ریشه نسبت به آبیاری نرمال شد. طبق مطالعات انجام شده تنش آبی در گیاهان باعث کاهش رشد ریشه می‌شود (Chalker-Scott, 2002). نتایج مشابه در کاهش طول ریشه با اعمال کم‌آبیاری در آویشن دنایی گزارش شده است (Bahreininejad et al., 2013). کاهش ارتفاع بوته، سطح برگ، طول ریشه و وزن خشک تحت تنش آبی ممکن است به دلیل کاهش بزرگ شدن سلول و پیری بیشتر برگ ناشی از کاهش فشار آماس باشد (Shao et al., 2008).



شکل ۳. نسبت برگ به ساقه زرین گیاه تحت تأثیر اثر متقابل سطوح آبیاری و تلقیح با میکوریزا

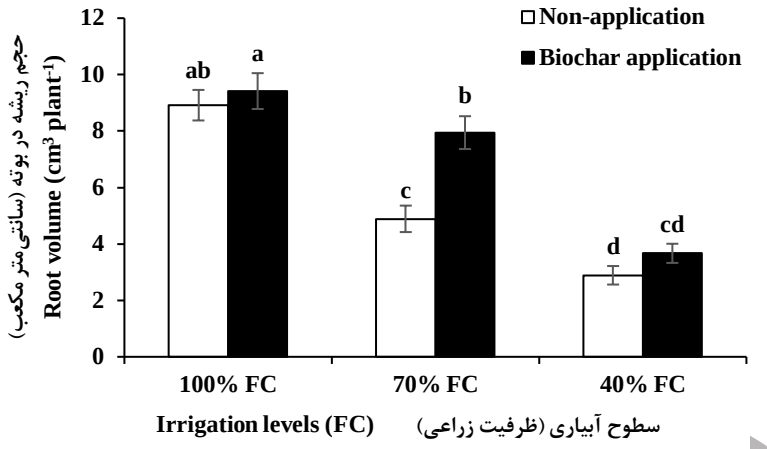
Fig. 3. Leaf to stem ratio of Dracocephalum kotschyi affected by the interaction of irrigation levels and mycorrhizal inoculation

کاربرد بیوچار طول ریشه زرین گیاه را ۱۲ درصد نسبت به عدم کاربرد افزایش داد (جدول ۷). طول ریشه تحت تأثیر تلقیح با میکوریزا و اثر متقابل عوامل مورد بررسی، قرار نگرفت (جدول ۵).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر سطوح آبیاری، کاربرد بیوچار، تلقیح با میکوریزا و اثر متقابل بیوچار در سطوح آبیاری بر حجم ریشه زرین گیاه معنی‌دار بود (جدول ۵). ضمن اینکه بیشترین حجم ریشه از شرایط نرمال آبیاری به دست آمد، کاربرد بیوچار تنها در سطح تنش متوسط منجر به افزایش معنی‌دار حجم ریشه شد و تفاوت معنی‌داری با عدم کاربرد بیوچار در شرایط نرمال آبیاری نشان نداد. کاربرد بیوچار در سطوح دیگر آبیاری اثر معنی‌داری بر حجم ریشه نشان نداد (شکل ۴).

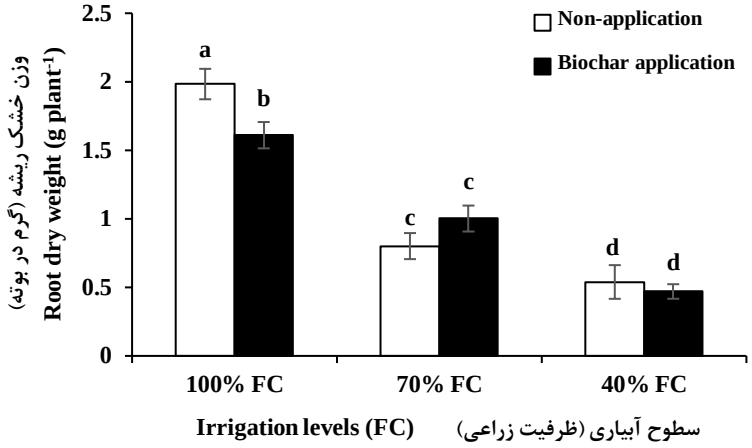
حجم ریشه با افزایش جذب رطوبت توسط گیاه همراه است که باعث جذب آب و عناصر غذایی بیشتر خواهد شد که در نتیجه منجر به افزایش عملکرد اندام‌های رویشی گیاه می‌شود (Singh and Ramesh, 2000).

وزن تر ریشه در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر سطوح آبیاری، کاربرد بیوچار و تلقیح با میکوریزا قرار گرفت (جدول ۵). این در حالی بود که وزن خشک ریشه تحت تأثیر سطوح آبیاری، تلقیح با میکوریزا و اثر متقابل سطوح آبیاری در بیوچار قرار گرفت (جدول ۵). اعمال سطح ۷۰ درصد آبیاری با کاهش ۳۹ درصدی و اعمال سطح ۴۰ درصد با کاهش ۷۱ درصدی در وزن تر ریشه همراه بود (جدول ۶). در حالی‌که کاربرد بیوچار وزن تر ریشه را ۱۸ درصد نسبت به عدم کاربرد افزایش داد (جدول ۷)، کاربرد بیوچار در سطح نرمال آبیاری منجر به کاهش معنی‌دار وزن خشک ریشه شد (شکل ۵). در سایر سطوح آبیاری بیوچار اثر معنی‌داری بر وزن خشک ریشه نداشت (شکل ۵). تلقیح با میکوریزا منجر به افزایش۲۳ درصدی در وزن تر و ۱۸ درصدی در وزن خشک ریشه نسبت به عدم تلقیح شد (جدول ۸).



شکل ۴. حجم ریشه زرین گیاه تحت تأثیر اثر متقابل سطوح آبیاری و کاربرد بیوچار

Fig. 4. Root volume of Dracocephalum kotschyi affected by the interaction of irrigation levels and biochar application



شکل ۵. وزن خشک ریشه زرین گیاه تحت تأثیر اثر متقابل سطوح آبیاری و کاربرد بیوچار

Fig. 5. Root dry weight of *Dracocephalum kotschyi* affected by the interaction of irrigation levels and biochar application

با افزایش تنش خشکی، وزن خشک به دلیل اختلال در فتوسنتز، تعرق و فرایندهای متابولیکی گیاه کاهش می‌یابد (Sarker et al., 2005). در آزمایش تنش خشکی بر روی ریحان مشاهده شد که وزن گیاه در شرایط کمبودآب کاهش می‌یابد (Alishah et al., 2006). بررسی‌های انجام شده روی گیاهان گشنیز (*Coriandrum sativum*)، شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum*) و هویج (*Daucus carrota*) تلقیح شده با میکوریزا در خاک لومی شنی مواجه با کمبود مواد غذایی، نشان داد که تلقیح با میکوریزا با تشکیل شبکه گسترده ریسه‌های قارچ، افزایش جذب آب و عناصر غذایی را برای گیاه به همراه داشته که منجر به افزایش وزن خشک شاخساره شد (Gaur et al., 2000). در مطالعه‌ای مشاهده شد که وزن تر و خشک ساقه، ریشه و سطح برگ با اضافه کردن بیوچار افزایش یافت (de la Riva et al., 2016). همچنین، تلقیح با قارچ میکوریزا علاوه بر افزایش رشد اندام هوایی سبب افزایش معنی‌دار در شاخص‌های رشد ریشه ریحان شده است (Turjaman et al., 2006). همچنین، گزارش شده که اگرچه تنش رطوبتی باعث کاهش پارامترهای رشد آویشن باغی شد، اما تلقیح با میکوریزا تا حدودی اثرات نامطلوب تنش آبی را کاهش داد و این اثرات در صفات ریشه آشکارتر بود (Arpanahi and Feizian, 2019).

پارامترهای فیزیولوژیک و تولید زیست‌توده

محتوای نسبی آب برگ تحت تأثیر عوامل آزمایش و اثر متقابل آن‌ها قرار نگرفت (جدول ۹). نشت الکترلیت برگ در

سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر سطوح آبیاری قرار گرفت (جدول ۹). در حالی‌که تفاوت معنی‌داری بین سطح تنش ملایم با تنش شدید و آبیاری نرمال مشاهده نشد اعمال تنش شدید نشت الکترولیت برگ زرین گیاه را ۱۸ درصد نسبت به سطح نرمال آبیاری افزایش داد (جدول ۶). گزارش شده که تنش خشکی محتوای نسبی آب و شاخص پایداری غشاء را در نخود کاهش داده در حالی که تیمار با بیوچار و میکوریزا به صورت جداگانه یا ترکیبی، اثرات مضر را تا حد قابل‌توجهی کاهش داده و باعث افزایش قابل توجهی در این شاخص‌ها در شرایط نرمال آبیاری شد (Hashem et al., 2019). با وجود گزارشات متعدد در زمینه کاهش محتوای نسبی آب برگ با اعمال تنش خشکی، در این آزمایش تحت تأثیر سطوح آبیاری قرار نگرفت. همان‌طور که نتایج نشان داد، به نظر می‌رسد واکنش زرین گیاه به اعمال تنش خشکی با کاهش اندازه برگ‌ها، کاهش نسبت سطح برگ و افزایش وزن ویژه برگ همراه باشد (جدول ۲).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که شاخص کلروفیل از بین عوامل مورد بررسی و اثر متقابل آن‌ها تنها تحت تأثیر تلقیح با میکوریزا قرار گرفت (جدول ۹). عدم تأثیر پذیری محتوای کلروفیل از تنش خشکی در زرین گیاه نیز مشابه با تغییرات در محتوای نسبی آب برگ می‌تواند به دلیل کاهش اندازه برگ‌ها و کاهش نسبت سطح برگ باشد (جدول ۶). همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد (جدول ۸)، تلقیح با میکوریزا شاخص کلروفیل را ۷ درصد بهبود داد. افزایش سنتز کلروفیل در گیاهان تیمار شده با میکوریزا گزارش شده است که این افزایش کلروفیل منجر به افزایش قابل توجهی در بازده فتوسنتز خالص شده است (Hashem et al., 2019). تلقیح رازیانه با *G. mosseae* در مقایسه با عدم تلقیح و همچنین در مقایسه با گیاهان رازیانه تلقیح شده با *G. intraradices* که در شرایط تنش خشکی رشد کرده بودند، منجر به افزایش محتوای کلروفیل برگ شد (Zardak et al., 2018). نتایج مشابه از بهبود رنگیزه‌های فتوسنتزی با تلقیح با میکوریزا در بادرشبو گزارش شده است (Ghanbarzadeh et al., 2020). به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهد که گیاهان تلقیح شده با میکوریزا اغلب کلروفیل برگ بیشتری نسبت به گیاهان تلقیح نشده سنتز می‌کنند. مکانیسم افزایش محتوای کلروفیل توسط همزیستی میکوریزایی توسط شنگ و همکاران (Sheng et al., 2008) تحقیق شده و نشان داده شد که افزایش جذب مواد معدنی به ویژه منیزیم می‌تواند یکی از مهم‌ترین دلایل باشد. همچنین افزایش جذب نیتروژن توسط همزیستی میکوریزایی می‌تواند دلیل دیگری در افزایش محتوای کلروفیل باشد (Zardak et al., 2018).

وزن تر اندام هوایی و تولید زیست‌توده تحت تأثیر سطوح آبیاری و تلقیح با میکوریزا قرار گرفت (جدول ۹). وزن تر اندام هوایی و تولید زیست‌توده در سطح ۷۰ درصد آبیاری به ترتیب ۱۱ و ۱۸ درصد و در سطح ۴۰ درصد آبیاری به ترتیب ۶۳ و ۶۲ درصد کاهش نشان دادند (جدول ۶). تلقیح با میکوریزا نسبت به عدم تلقیح به ترتیب ۳۱ و ۱۸ درصد وزن تر اندام هوایی و تولید زیست‌توده را افزایش داد (جدول ۸).

هم‌راستا با بسیاری از گزارشات علمی موجود، تنش خشکی موجب کاهش عملکرد و زیست‌توده بسیاری گیاهان دارویی از جمله بادرشبویه (Ghanbarzadeh et al., 2020)، آویشن باغی (Arpanahi and Feizian, 2019)، آویشن دنایی (Bahreininejad et al., 2013)، رازیانه (Zardak et al., 2018)، شیرین بیان (Zarrin-Torang et al., 2023؛ Xie et al., 2018) و ... شده است. تنش خشکی با کاهش پارامترهای رشد در این مطالعه شامل سرعت رشد محصول، سرعت رشد نسبی، نسبت سطح برگ، سطح ویژه و وزن ویژه برگ منجر به کاهش سطح برگ و تولید زیست توده زرین گیاه شد. این ممکن است به دلیل محدوده وسیعی از فعل و انفعالات شامل کاهش جذب آب و مواد مغذی، کاهش هدایت روزنه‌ای و ظرفیت فتوسنتزی گیاه باشد (Quiroga et al., 2018). کاهش وزن تر و خشک در نتیجه کاهش رشد ریشه (کاهش طول، حجم و وزن تر و خشک ریشه همان‌طور که در نتایج مشاهده شد) باشد که در نتیجه جذب کمتر عناصر غذایی و آب را به همراه داشته و منجر به کاهش زیست‌توده شده است (Bahreininejad et al., 2013).

تخصیص فرآورده‌های فتوسنتزی به ریشه‌ها نسبت به شاخه‌ها در شرایط تنش افزایش می‌یابد و با طولانی شدن مدت زمان تنش آبی، با بسته شدن روزنه‌ها رشد پیکر روشی کاهش یافته و در نتیجه با کاهش وزن خشک شاخه و برگ همراه است. کاهش تولید بیوماس در گیاه مواجه با تنش در اثر کاهش مواد فتوسنتزی اتفاق می‌افتد. کاهش فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، بیوماس، رشد و در نهایت عملکرد گیاه از آثار تنش خشکی محسوب می‌شود (Jaleel et al., 2009). در بررسی اثر تنش خشکی بر گیاه زنیان مشاهده شد که وزن تر و وزن خشک گیاه با افزایش سطح تنش کاهش یافت (Azhar et al., 2011).

نسخه پیش از انتشار

جدول ۹. نتایج تجزیه واریانس اثر سطوح آبیاری، کاربرد بیوچار و تلقیح با میکوریزا بر خصوصیات فیزیولوژیک برگ، تولید زیست‌توده و کارایی مصرف آب زرین گیاه

Table 9. Analysis of variance results of the effect of irrigation levels, biochar application and mycorrhiza inoculation on leaf physiological characteristics, biomass production and water use efficiency of *Dracocephalum kotschyi*

S.O.V منابع تغییر	درجه آزادی df	محتوای نسبی آب برگ Leaf relative water content	نشت الکترولیت Electrolyte leakage	شاخص کلروفیل Chlorophyll Index	وزن تر اندام هوایی Shoot fresh weight	زیست توده Biomass	کارایی مصرف آب Water use efficiency
Irrigation (I) آبیاری	2	61.6 ^{ns}	378**	71.9 ^{ns}	372**	15.41**	0.0202**
Biochar (B) بیوچار	1	0.10 ^{ns}	136 ^{ns}	34.5 ^{ns}	20.2 ^{ns}	1.324 ^{ns}	0.0036*
Mycorrhiza(M) میکوریزا	1	6.85 ^{ns}	105 ^{ns}	176*	99.9**	1.735*	0.0036*
I×B آبیاری × بیوچار	2	62.2 ^{ns}	15.5 ^{ns}	23.6 ^{ns}	9.38 ^{ns}	0.773 ^{ns}	0.0019 ^{ns}
I×M آبیاری × میکوریزا	2	52.5 ^{ns}	12.5 ^{ns}	54.3 ^{ns}	13.5 ^{ns}	0.351 ^{ns}	0.0006 ^{ns}
B×M بیوچار×میکوریزا	1	3.94 ^{ns}	40.5 ^{ns}	28.9 ^{ns}	0.031 ^{ns}	0.109 ^{ns}	0.0003 ^{ns}
I×B×M آبیاری×بیوچار×میکوریزا	2	9.50 ^{ns}	25.0 ^{ns}	24.1 ^{ns}	12.5 ^{ns}	0.002 ^{ns}	0.000005^{ns}
Error خطا	36	45.7	65.7	32.8	6.47	0.349	0.0007
C.V (%) ضریب تغییرات	-	*9.9*	*13.8*	*10.3*	*23.7*	*26.1*	*21.8*

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

** :Significant at 1% probability level, *: Significant at 5% probability level, ^{ns}: Not significant

گزارش‌های زیادی وجود دارد که تلقیح گیاهان با قارچ‌های میکوریزا رشد و میزان جذب مواد غذایی را در گیاه افزایش داده و به دنبال آن مقاومت به تنش‌های محیطی و بیماری‌ها و همچنین عملکرد گیاه افزایش یافته است (Porras-soriano et al., 2009). نتایج این مطالعه نشان داد که کاربرد میکوریزا در بسیاری صفات اندازه‌گیری شده اثر بهبود دهندگی نشان داد. میکوریزا به دلیل افزایش محتوای کلروفیل و بهبود فعالیت فتوسنتزی از یک طرف و گسترش هیف‌ها و توسعه سیستم ریشه از طرف دیگر، با افزایش فراهمی آب منجر به تولید و تجمع ماده خشک بیشتری در گیاه می شود که با نتایج مطالعات دیگر همخوانی دارد (Quiroga et al., 2018). همچنین گزارش شده که گیاهان تلقیح شده با میکوریزا از طریق تنظیم هورمونی تنظیم روزنه‌ای را بهبود بخشیدند (Amiri et al., 2015). افزایش جذب آب و عناصر غذایی یکی از مهم‌ترین نقش‌های میکوریزا برای گیاهان است تا راندمان مصرف آب و زیست‌توده را نسبت به گیاهان غیر میکوریزایی تحت تنش خشکی حفظ کنند (Xie et al., 2018). نقش میکوریزا در بهبود عملکرد گیاهان تحت تنش خشکی در گیاهان شیرین بیان (Xie et al., 2018؛ Zarrin-Torang et al., 2023)، آویشن باغی (Arpanahi and Feizian, 2019)، رازیانه (Zardak et al., 2018)، بادرشبو (Ghanbarzadeh et al., 2020) و گیاهان اسطوخدوس، آویشن باغی و رزماری (Pirzad and Mohammadzadeh, 2018) گزارش شده است. به نظر می‌رسد اثر بهبود دهندگی میکوریزا تحت شرایط نرمال آبیاری و تنش خشکی بسته به گونه قارچ و گونه گیاهی متفاوت باشد (Tarraf et al., 2015). در این مطالعه با وجود اینکه اثر متقابل معنی‌داری بین تلقیح با میکوریزا و سطوح مختلف آبیاری مشاهده نشد اما به طور کلی اثر بهبود دهندگی میکوریزا مشاهده شد.

بهبود رشد در گیاهان تیمار شده با بیوچار و میکوریزا ممکن است به دلیل تأثیر آن‌ها بر فعالیت پروتئین‌های حامل واقع در غشاهای درگیر در کنترل تقسیم سلولی، گسترش دیواره و افزایش طول سلول باشد (Hashem et al., 2019).

نسخه پیش از انتشار

گزارش‌های علمی در مورد اثر ترکیبی میکوریزا و بیوچار بسیار اندک هستند و تیمار ترکیبی تأثیر بیشتری در کاهش اثر منفی تنش نسبت به تیمار هر کدام می‌تواند داشته باشد (Hashem et al., 2019). بهبود ظرفیت نگهداری عناصر توسط بیوچار و متعاقبا افزایش در جذب آن توسط میکوریزا می تواند دلایل احتمالی برای افزایش رشد باشد (Hashem et al., 2019). از طرف دیگر نتایج نشان می‌دهد که بیوچار می‌تواند تاثیر مضر تنش آبی را در خاک با حفظ آب موجود در شرایط تنش و غیر تنش کاهش دهد. علاوه بر بهبود ساختار خاک، ریز منافذ موجود در بیوچار ممکن است به حفظ آب موجود برای ریشه گیاهان کمک کند (Yoo et al., 2020).

کارایی مصرف آب

سطوح آبیاری، کاربرد بیوچار و تلقیح با میکوریزا کارایی مصرف آب را تحت تأثیر قرار دادند (جدول ۹). بیشترین میزان کارایی مصرف آب در سطح نرمال و تنش ملایم حاصل شد در حالی که افزایش شدت تنش خشکی کارایی مصرف آب را به طور معنی‌داری (۴۳ درصد) کاهش داد (جدول ۶). این کاهش با وجود کاهش میزان آب مصرفی، عمدتا به دلیل کاهش قابل توجه تولید زیست‌توده با اعمال این سطح آبیاری بود (جدول ۶). کاربرد بیوچار و تلقیح با میکوریزا کارایی مصرف آب را ۱۵ درصد نسبت به عدم کاربرد و عدم تلقیح بهبود دادند (جداول ۷ و ۸).

در پژوهش بحرینی نژاد و همکاران (Bahreininejad et al., 2013) کارایی مصرف آب در گیاه آویشن دنایی در سال اول آزمایش در سطوح متوسط تنش تفاوتی با شرایط نرمال نداشت در حالی‌که با اعمال تنش شدید کاهش معنی‌داری را نشان داد. همچنین در مطالعه‌ای با بررسی سطوح مختلف آبیاری بر گونه‌های مختلف گیاهان دارویی نشان داده شد که کارایی مصرف آب در اسطوخدوس در بین تیمارهای مختلف تغییر معنی‌داری نشان نداد در حالی‌که در آویشن و رزماری با اعمال تنش کاهش یافت (Pirzad and Mohammadzadeh, 2018). شاه حسینی و همکاران (Shahhosseini et al., 2012) بیان کردند که تلقیح میکوریزا کارایی مصرف آب ذرت را به‌طور معنی‌دار افزایش داد. بیوچار با بهبود اندازه خلل و فرج و افزایش ذخیره آب در خاک می‌تواند باعث بهبود شرایط رشد ریشه شود. بهبود شرایط خاک برای بهبود رشد ریشه می‌تواند با افزایش کارایی جذب عناصر غذایی منجر به افزایش رشد و تولید زیست‌توده و کارایی مصرف آب شود.

اثربخشی تلقیح با میکوریزا

کارایی تلقیح میکوریزایی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد میکوریزا در بهبود تولید عملکرد و زیست‌توده گیاهان است. نتایج نشان داد که کارایی تلقیح میکوریزا تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری و کاربرد بیوچار قرار گرفت (شکل ۶). با کاهش سطح آبیاری اثر بخشی تلقیح میکوریزا کاهش معنی‌داری نشان داد. با افزایش سطح تنش (اعمال ۴۰ درصد ظرفیت زراعی) اثر بخشی تلقیح با افزایش اندک نسبت به سطح ۷۰ درصد همراه بود (شکل ۶-الف). کاربرد بیوچار کارایی تلقیح میکوریزا را نسبت به عدم کاربرد ۲۵ درصد افزایش داد (شکل ۶-ب).

مطالعه قنبرزاده و همکاران (Ghanbarzadeh et al., 2020) نشان داد که محدودیت آب باعث کاهش کلونیزاسیون ریشه توسط قارچ میکوریزا شد که با گزارش های قبلی نیز هم‌خوانی دارد (Ghanbarzadeh et al., 2019). این کاهش احتمالاً به دلیل محدودیت دسترسی به آب و ذخایر کربن برای رشد و جوانه‌زنی اسپورهای قارچ در گیاهان میزبان است (Amiri et al., 2015). بنابراین تنش آبی می‌تواند به طور بالقوه موجب کاهش کارایی تلقیح میکوریزایی شود.

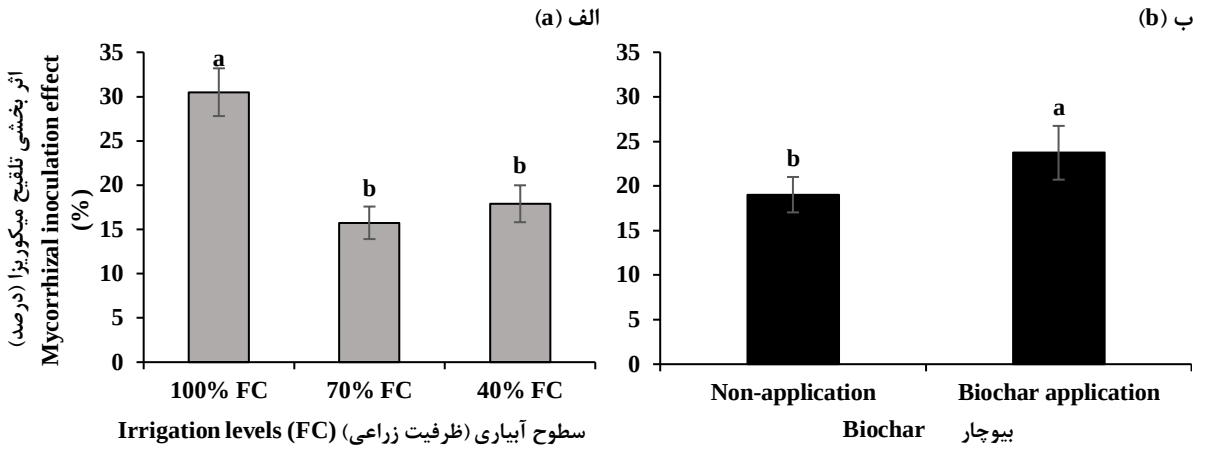
در مورد بهبود کارایی میکوریزا در تیمار بیوچار، گزارش شده که ریز منافذ موجود در بیوچار ممکن است ضمن نگهداری آب برای ریشه گیاهان، در تأمین آب برای میکروارگانیزم‌های خاک نیز مشارکت داشته باشد (Yoo et al., 2020).

نتیجه‌گیری نهایی

بر اساس نتایج آزمایش، می‌توان گفت که با وجود کاهش معنی‌دار زیست‌توده زرین گیاه تحت تنش خشکی، به نظر می‌رسد این گیاه دارای مکانیزم‌های اجتناب از تنش باشد. همان‌طور که نتایج نشان داد کاهش سطح برگ و اندازه برگ، کاهش نسبت سطح برگ و افزایش وزن ویژه برگ تحت تنش شدید از جمله این واکنش‌ها می‌تواند باشد که منجر به عدم کاهش محتوای نسبی آب برگ در شرایط تنش شد. نتایج همچنین بیانگر این بود که با وجود عدم مشاهده اثر متقابل بین بیوچار یا میکوریزا با سطوح مختلف آبیاری، کاربرد بیوچار و تلقیح با میکوریزا بر اغلب صفات مورد مطالعه اثر قابل

نسخه پیش از انتشار

توجهی داشت. بنابراین، در مناطق نیمه خشک، می‌توان تلقیح میکوریزایی و کاربرد بیوچار برای افزایش بهره‌وری از واحد سطح مد نظر قرار داد. همچنین در موارد محدودیت آب آبیاری، به دلیل واکنش مناسب زرین گیاه، اعمال سطوح کم‌آبیاری خفیف را می‌توان به عنوان یک استراتژی زراعی برای بهبود عملکرد در این گیاه و دیگر گیاهان دارویی و معطر مورد استفاده قرار داد.



شکل ۶. اثربخشی تلقیح میکوریزایی تحت تأثیر اثر سطوح آبیاری (الف) و کاربرد بیوچار (ب)

Fig. 6. Mycorrhizal inoculation effect affected by irrigation levels (a) and biochar application (b)

منابع

Ahanger, M.A., Hashem, A., Abd-Allah, E.F., Ahmad, P., 2014. Arbuscular mycorrhiza in crop improvement under environmental stress. Emerging technologies and management of crop stress tolerance. Academic Press, 69-95. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800875-1.00003-X

Ahmadi-Rad, S., Gholamhoseini, M., Ghalavand, A., Asgharzadeh, A., Dolatabadian, A., 2016. Foliar application of nitrogen fixing bacteria increases growth and yield of canola grown under different nitrogen regimes. Rhizosphere. 2, 34-37. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2016.08.006

Alishah, H.M., Heidari, R., Hassani, A., Dizaji, A.A., 2006. Effect of water stress on some morphological and biochemical characteristics of purple basil (*Ocimum basilicum*). Journal of Biological Sciences. 6, 763-767. https://doi.org/10.3923/jbs.2006.763.767

Amirghofran, Z., Azadbakht, M., Karimi, M.H., 2000. Evaluation of the immunomodulatory effects of five herbal plants. Journal of Ethnopharmacology. 72, 167-172. https://doi.org/10.1016/S0378-8741(00)00234-8

Amiri, R., Nikbakht, A., Etemadi, N., 2015. Alleviation of drought stress on rose geranium [*Pelargonium graveolens* L. Herit.] in terms of antioxidant activity and secondary metabolites by mycorrhizal inoculation. Scientia Horticulturae. 197, 373-380. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.062

Amiri, S.R., Rezvani Moghaddam, P., Ehyaee, H.R., 2012. The effects of drought stress on morphological traits and yield of three medicinal plants (*Coriandrum sativum*, *Foeniculum vulgare* and *Anethum graveolens*) in greenhouse conditions. Iranian Journal of Field Crops Research. 10, 116-124. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22067/gsc.v10i1.14479

Arpanahi, A.A., Feizian, M., 2019. Arbuscular mycorrhizae alleviate mild to moderate water stress and improve essential oil yield in thyme. Rhizosphere. 9, 93-96. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2018.10.003

پیش از انتشار

Assaha, D.V., Liu, L., Ueda, A., Nagaoka, T., Saneoka, H., 2016. Effects of drought stress on growth, solute accumulation and membrane stability of leafy vegetable, huckleberry (*Solanum scabrum* Mill.). Journal of Environmental Biology. 37, 107–114. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26930867/

Azhar, N.A.Z.I.L.A., Hussain, B., Ashraf, M.Y., Abbasi, K.Y., 2011. Water stress mediated changes in growth, physiology and secondary metabolites of desi ajwain (*Trachyspermum ammi* L.). Pakistan Journal of Botany. 43, 15-19. https://www.researchgate.net/publication/236287958

Bahreininejad, B., Razmjoo, J., Mirza, M., 2012. Influence of water stress on morpho-physiological and phytochemical traits in *Thymus daenensis*. International Journal of Plant Production. 7, 151-166. https://doi.org/10.22069/ijpp.2012.927

Böhm, W., 1979. Root parameters and their measurement. In: Böhm, W. (ed.), Methods of Studying Root Systems. Ecological Studies, vol 33. Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 125–138 https://doi.org/10.1007/978-3-642-67282-8_12

Chalker-Scott, L., 2002. Do anthocyanins function as osmoregulators in leaf tissues? Advances in Botanical Research. 37, 103-106. https://doi.org/10.1016/S0065-2296(02)37046-0

de Jesus, W.C., do Vale, F.X.R., Coelho, R.R., Costa, L. C., 2001. Comparison of two methods for estimating leaf area index on common bean. Agronomy Journal. 93, 989-991. https://doi.org/10.2134/agronj2001.935989x

de la Riva, E.G., Olmo, M., Poorter, H., Ubera, J.L., Villar, R., 2016. Leaf mass per area (LMA) and its relationship with leaf structure and anatomy in 34 Mediterranean woody species along a water availability gradient. PloS one. 11, e0148788. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0148788

Edmeades, D.C., 2003. The long-term effects of manures and fertilisers on soil productivity and quality: a review. Nutrient Cycling in Agroecosystems. 66, 165–180. https://doi.org/10.1023/A:1023999816690

Esmaielpour, B., Amani, N., 2014. Investigating the effect of mycorrhizal inoculation on growth and uptake of nutrients in *lactuca sativa* cv Syaho. Journal of Soil Management and Sustainable Production. 4, 49-69. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/20.1001.1.23221267.1393.4.2.3.9

Fallah, S., Mouguee, S., Rostaei, M., Adavi, Z., Lorigooini, Z., 2020. Chemical compositions and antioxidant activity of essential oil of wild and cultivated *Dracocephalum kotschyi* grown in different ecosystems: A comparative study. Industrial Crops and Products. 143, 111885. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111885

FAO, 2011. The State of Food and Agriculture - Women in Agriculture, Closing the Gender Gap for Development. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome https://www.fao.org/4/i2050e/i2050e.pdf

Farooq, M., Basra, S., Wahid, A., Ahmad, N., Saleem, B.A., 2009. Improving the drought tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) by exogenous application of salicylic acid. Journal of Agronomy and Crop Science. 195, 237-246. https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2009.00365.x

Gaur, A., Adholeya, A., Mukerji, K. G., 2000. On farm production of VAM inoculums and vegetable crops in marginal soil amended with organic matter. Tropical Agriculture. 77, 21-26. https://journals.sta.uwi.edu/ojs/index.php/ta/article/view/1432

Ghahreman, A., 1983. Colored flora of Iran. Research Institute of Forests and Rangelands press. Iran. [In Persian].

Ghanbari, J., Khajoei-Nejad, G., 2022. Relationships between growth indices, dry matter production, and nutrient use efficiency in saffron: Integrative effect of mycorrhizal inoculation and nutrient resources. Journal of Plant Nutrition. 45, 2077-2095. https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2063138

Ghanbarzadeh, Z., Mohsenzadeh, S., Rowshan, V., Zarei, M., 2020. Mitigation of water deficit stress in *Dracocephalum moldavica* by symbiotic association with soil microorganisms. Scientia Horticulturae. 272, 109549. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109549

Harrier, L. A., 2001. The arbuscular mycorrhizal symbiosis: a molecular review of the fungal dimension. Journal of Experimental

Botany. 52, 469-478. https://doi.org/10.1093/jexbot/52.suppl_1.469

Hashem, A., Kumar, A., Al-Dbass, A.M., Alqarawi, A.A., Al-Arjani, A.B.F., Singh, G., Farooq, M., Abd_Allah, E.F., 2019. Arbuscular mycorrhizal fungi and biochar improves drought tolerance in chickpea. Saudi Journal of Biological Sciences. 26, 614-624. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2018.11.005

Hassani, A., 2006. Effect of Water Deficit Stress on Growth, Yield and Essential Oil Content of *Dracocephalum moldavica*. Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research. 22, 256-261. [In Persian with English Summary].

Jaleel, C.A., Manivannan, P., Wahid, A., Farooq, M., Al-Juburi, H.J., Somasundaram, R., Panneerselvam, R., 2009. Drought stress in plants: A review on morphological characteristics and pigments composition. International Journal of Agriculture and Biology. 11, 100-105. https://www.fspublishers.org/published_papers/84178_..pdf

Jalili, A., Jamzad, Z., 1999. Red data book of Iran: a preliminary survey of endemic, rare and endangered plant species of Iran. Research Institute of Forests and Rangelands, Tehran, IR. 748p. [In Persian].

Khalesi, K., Amerian, M., Asghari, H., Rahimi, M., 2015. The effect of biochar and nitrogen on some quantitative traits of corn under deficit irrigation conditions. International conference on sustainable development, strategies and challenges with a focus on Agriculture, Natural Resources, Environment and Tourism. 25 May 2015. Tabriz, Iran. [In Persian]. https://civilica.com/doc/355176.

Khorramdel, S., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Ghorbani, R., 2011. Effect of biofertilizers on the yield and yield components of black cumin (*Nigella sativa* L.). Journal of Iranian Field Crop Research. 8, 758-766. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22067/GSC.V8I5.8017

Mona, S.A., Hashem, A., Abd_Allah, E.F., Alqarawi, A.A., Soliman, D.W.K., Wirth, S., Egamberdieva, D., 2017. Increased resistance of drought by *Trichoderma harzianum* fungal treatment correlates with increased secondary metabolites and proline content. Journal of Integrative Agriculture. 16, 1751-1757. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61695-2

Pirzad, A., Mohammadzadeh, S., 2018. Water use efficiency of three mycorrhizal Lamiaceae species (*Lavandula officinalis*, *Rosmarinus officinalis* and *Thymus vulgaris*). Agricultural Water Management. 204, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.020

Porras-Soriano, A., Soriano-Martín, M. L., Porras-Piedra, A., Azcón, R., 2009. Arbuscular mycorrhizal fungi increased growth, nutrient uptake and tolerance to salinity in olive trees under nursery conditions. Journal of Plant Physiology. 166, 1350-1359. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2009.02.010

Quilliam, R.S., Glanville, H.C., Wade, S.C., Jones, D.L., 2013. Life in the 'charosphere'– Does biochar in agricultural soil provide a significant habitat for microorganisms?. Soil Biology and Biochemistry. 65, 287-293. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.06.004

Quiroga, G., Erice, G., Aroca, R., Zamarreño, Á.M., García-Mina, J.M., Ruiz-Lozano, J.M., 2018. Arbuscular mycorrhizal symbiosis and salicylic acid regulate aquaporins and root hydraulic properties in maize plants subjected to drought. Agricultural Water Management. 202, 271-284. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.012

Razmjoo, K., Heydarizadeh P., Sabzalian, M.R., 2008. Effect of salinity and drought stress on growth parameters and essential oil content of Matricaria chamomile. International Journal of Agriculture and Biology. 10, 451-454.

Rechinger, K.H., 1972. Flora Iranica. Akademische Druck-u. Verlagsanstalt, Graz. vol, 150.

Sajjadi, S.E., Atar, A.M., Yektaian, A., 1998. Antihyperlipidemic effect of hydroalcoholic extract, and polyphenolic fraction from *Dracocephalum kotschyi* Boiss. Pharmaceutica Acta Helvetiae. 73, 167-170. https://doi.org/10.1016/S0031-6865(98)00016-8

Sarker, B.C., Hara, M., Uemura, M., 2005. Proline synthesis, physiological responses and biomass yield of eggplants during and after repetitive soil moisture stress. Scientia Horticulturae.103, 387-402. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2004.07.010

Shahhosseini, Z., Gholami, A., Asghari, H.A., 2012. Effect of arbuscular mycorrhizae and humic acid on water use efficiency and physiological growth indices of maize under water deficit condition. Journal of Arid

Biome. 2, 39-57. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/20.1001.1.2008790.1391.2.1.4.9.

Shao, H.B., Chu, L. Y., Jaleel, C.A., Zhao, C.X., 2008. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. Comptes Rendus Biologies. 331, 215-25. https://doi.org/10.1016/j.crvi.2008.01.002

Sheikhpoor, S., Tohidi-Nejad, E., Ghanbari, J., 2024. Investigating the effect of mycorrhiza on growth, phosphorus nutrition, and biomass production in *Thymus vulgaris* and *Zataria multiflora* under drought stress conditions. Irrigation and Water Engineering. 14, 262-281. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22125/iwe.2023.405514.1730.

Sheng, M., Tang, M., Chen, H., Yang, B., Zhang, F., Huang, Y., 2008. Influence of arbuscular mycorrhizae on photosynthesis and water status of maize plants under salt stress. Mycorrhiza. 18, 287-296. https://doi.org/10.1007/s00572-008-0180-7

Singh, M., Ramesh, S., 2000. Effect of irrigation and nitrogen on herbage, oil yield and water-use efficiency in rosemary grown under semi-arid tropical conditions. Journal of Medicinal of Aromatic Plant Sciences. 22, 659-662.

Smith, S.E., Read, D., 2008. Mycorrhizal Symbiosis, Ed. 3. New York. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370526-6.X5001-6

Taiz, L., Zeiger, E., 2010. Plant Physiology. 5th Edition, Sinauer Associates Inc., Sunderland, MA, USA, 782 p.

Tarraf, W., Ruta, C., De Cillis, F., Tagarelli, A., Tedone, L., De Mastro, G., 2015. Effects of mycorrhiza on growth and essential oil production in selected aromatic plants. Italian Journal of Agronomy. 10, 633. https://doi.org/10.4081/ija.2015.633

Tesfaye, K., Walker, S., Tsubo, M., 2006. Radiation interception and radiation use efficiency of three grain legumes under water deficit conditions in a semi-arid environment. European Journal of Agronomy. 25, 60-70. https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.04.014

Turjaman, M., Tamai, Y., Santoso, E., Osaki, M., Tawaraya, K., 2006. Arbuscular mycorrhizal fungi increased early growth of two nontimber forest product species *Dyera polyphylla* and *Aquilaria filaria* under greenhouse conditions. Mycorrhiza, 16, 459-464. https://doi.org/10.1007/s00572-006-0059-4

Vafadar, F., Amooaghaie, R., Ehsanzadeh, P., Ghanati, F., Sajedi, R.H., 2020. Crosstalk between melatonin and Ca^{2+}/CaM evokes systemic salt tolerance in *Dracocephalum kotschyi*. Journal of Plant Physiology. 252, 153237. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2020.153237

Wang, W., Vinocur, B., Altman, A., 2003. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance. Planta, 218, 1-14. https://doi.org/10.1007/s00425-003-1105-5

Xie, W., Hao, Z., Zhou, X., Jiang, X., Xu, L., Wu, S., Zhao, A., Zhang, X., Chen, B., 2018. Arbuscular mycorrhiza facilitates the accumulation of glycyrrhizin and liquiritin in *Glycyrrhiza uralensis* under drought stress. Mycorrhiza. 28, 285-300. https://doi.org/10.1007/s00572-018-0827-y

Yoo, S.Y., Kim, Y.J., Yoo, G., 2020. Understanding the role of biochar in mitigating soil water stress in simulated urban roadside soil. Science of The Total Environment. 738,139798. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139798

Zardak, S.G., Dehnavi, M.M., Salehi, A., Gholamhoseini, M., 2018. Effects of using arbuscular mycorrhizal fungi to alleviate drought stress on the physiological traits and essential oil yield of fennel. Rhizosphere. 6, 31-38. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2018.02.001

Zarrin-Torang, A.A., Khajoei-Nejad, G., Ghanbari, J., 2023. Investigation of Photosynthesis, Growth, and Water Use Efficiency of Licorice (*Glycyrrhiza glabra* L.) Plant Affected by Gibberellic Acid Priming and Mycorrhiza Inoculation under Water-Limited Conditions. Irrigation and Water Engineering. 13, 347-367. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22125/iwe.2023.173324.