



Evaluation of Quantitative Yield of Spinach (*Spinacia oleracea* L.) in Biochar and Mycorrhiza Levels under Greenhouse Conditions

Nima Shahbazi¹, Mohammad Reza Ardakani^{2✉}, Hussein Ghafourian³

1- Department of Agronomy, Faculty of Agriculture & Natural Resources, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran

2- Coresponding Author, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture & Natural Resources, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran. Email: mohammadreza.ardakani@kiaau.ac.ir

3- Department of Marine Chemistry, Faculty of Marine Science and Technology, Islamic Azad University, Tehran, North Brach, Iran

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: August 28, 2022

Received in revised form:

December 14, 2022

Accepted: December 25, 2022

Published online: April 28, 2023

Keywords:

Leaf area,
number of leaves,
nutrients,
organic carbon,
total chlorophyll

ABSTRACT

Nowadays, agricultural products are moving towards organic farming in response to consumers' desire for healthier products. One of the ways to produce and increase yield in these conditions is using biological and organic inputs such as biochar and mycorrhiza. Therefore, this experiment was conducted at Safadasht Golazin Agro-industrial in Safadasht, Tehran, in order to investigate spinach yield. The experiment was carried out as split plots in the form of a randomized complete block design in 3 replications. The experimental treatments included four levels of control, two, four, and six tons per hectare of biochar as the main factor and two inoculation levels with mycorrhiza and control as secondary factors. The results showed that the effect of the investigated treatments on the measured traits was significant. The highest plant height (15.24 cm), total chlorophyll (2.44 mg/g fresh weight), root fresh weight (19.56 g), and shoot (30.95 g) at the application level of mycorrhiza and six tons of biochar per hectare was observed. The effectiveness of mycorrhiza increased with the increase of biochar level. In general, the results showed that the synergism effect of biochar and mycorrhiza increased the yield of spinach traits; this synergy can be one of the strategies to reduce the consumption of chemical fertilizers.

Cite this article: Shahbazi, N., Ardakani, M.R., & Ghafourian, H. (2023). Evaluate quantitative yield of spinach (*Spinacia oleracea* L.) in biochar and mycorrhiza levels under greenhouse conditions. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 54(2), 99-112. DOI: 10.22059/ijfcs.2022.347021.654932.



© The Authors.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijfcs.2022.347021.654932>



ارزیابی عملکرد کمی اسفناج (*Spinacia oleracea* L.) در سطوح بیوچار و مایکوریزا در شرایط کشت گلخانه‌ای

نیما شهبازی^۱، محمد رضا اردکانی^۲، حسین غفوریان^۳

- ۱- گروه زراعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، ایران.
 ۲- نویسنده مسئول، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، ایران.
 رایانامه: mohammadreza.ardakani@kiau.ac.ir
 ۳- گروه شیمی دریا، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	امروزه باتوجه به تمایل مصرف کنندگان به محصولات سالم تر، تولیدات کشاورزی به سمت کشت ارگانیک تمایل پیدا کرده است. یکی از راهکارهای تولید و افزایش عملکرد در این شرایط استفاده از نهاده‌های زیستی و آلی همچون بیوچار و مایکوریزا می‌باشد. بنابراین با هدف بررسی عملکرد اسفناج، این آزمایش در مجموعه کشت و صنعت گل آذین صفادشت واقع در صفادشت تهران اجرا شد. آزمایش به صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل چهار میزان شاهد، دو، چهار و شش تن در هکتار بیوچار به‌عنوان عامل اصلی و دو سطح تلقیح با مایکوریزا و کنترل به‌عنوان عامل فرعی بود. نتایج نشان داد اثر تیمارهای مورد بررسی روی صفات اندازه‌گیری شده معنی‌دار بود. بالاترین ارتفاع بوته (۱۵/۲۴ سانتی‌متر)، کلروفیل کل (۲/۴۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تر)، وزن تر ریشه (۱۹/۵۶ گرم) و اندام هوایی (۳۰/۹۵ گرم) در سطح کاربرد مایکوریزا و شش تن بیوچار در هکتار مشاهده شد. اثرگذاری مایکوریزا با افزایش میزان بیوچار بیشتر شد. به‌طور کلی نتایج نشان داد هم‌افزایی بیوچار و مایکوریزا باعث افزایش عملکرد صفات اسفناج شد، این هم‌افزایی می‌تواند از راهکارهای کاهش مصرف کودهای شیمیایی باشد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۶	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۲۳	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۴	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۲/۰۸	
کلیدواژه‌ها: تعداد برگ، سطح برگ، عناصر غذایی، کربن آلی، کلروفیل کل	

استناد: شهبازی، ن.، اردکانی، م.ر.، و غفوریان، ح. (۱۴۰۲). ارزیابی عملکرد کمی اسفناج (*Spinacia oleracea* L.) در سطوح بیوچار و مایکوریزا در شرایط کشت گلخانه‌ای. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۴ (۲)، ۹۹-۱۱۲.
 DOI: 10.22059/ijfcs.2022.347021.654932



۱. مقدمه

کمبود نسبتاً شدید ریزمغذی‌ها در خاک‌های زراعی کشور ایران سبب کاهش میزان نهایی محصولات می‌شود که برای جبران این کاهش عملکرد و افزایش میزان رشد گیاه، افزایش مطالعه و آگاهی نسبت به تغذیه گیاه و رفع کمبودها به‌ویژه عناصر ریزمغذی ضروری است (Khodabin *et al.*, 2022). اغلب در کشاورزی متداول نیاز غذایی گیاهان با استفاده از کودهای شیمیایی تأمین می‌شود؛ اما مطالعات طولانی‌مدت نشان دادند که مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی به دلیل اسیدی شدن خاک، کاهش فعالیت بیولوژیک، تخریب خصوصیات فیزیکی خاک و کاهش عناصر کم‌مصرف منجر به کاهش تولید گیاهان می‌شود (Kumaraswamy *et al.*, 2021). زیان‌های اقتصادی و زیست‌محیطی ناشی از استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی در کشاورزی به اثبات رسیده است و بدیهی است که باید جایگزینی مناسب برای کاهش این کودها در نظر گرفت (Niemiec *et al.*, 2020). در کشاورزی ارگانیک برای حاصلخیزی خاک و تأمین عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان از نهاده‌های طبیعی همچون کودهای زیستی و آلی استفاده می‌شود (Bruulsema *et al.*, 2012). امروزه تمایل به تولید گیاهان در شرایط کشت ارگانیک و تقاضا برای محصولات طبیعی، در جهان رو به افزایش می‌باشد (Riaz & Chopra, 2018)؛ چرا که سیستم کشت ارگانیک، کیفیت بهتری دارد و می‌توان سلامت آن‌ها را تضمین کرده و احتمال اثرات منفی بر کیفیت مصرف را کاهش می‌دهد (Trisilawati *et al.*, 2020). فرآورده جانبی غنی از کربن را وقتی که زیست‌توده در طی فرایند پیرولیز تولید می‌شود، بیوچار می‌نامند. در بیشتر منابع علمی، بیوچار محصول فرایند تجزیه گرمایی مواد آلی، تحت شرایط محدودیت و یا عدم حضور اکسیژن و در معرض دمای نسبی بالا در نظر گرفته می‌شود (Beiranvandi *et al.*, 2020). به نظر می‌رسد بیوچار با داشتن صفاتی مانند توانایی ویژه در جذب و نگهداری عناصر غذایی و ظرفیت نگهداری آب بالا بتواند جایگزین کودهای شیمیایی در گیاهان شده و مقاومت گیاه به تنش‌های خشکی را افزایش دهد (Beiranvandi *et al.*, 2020). کاربرد بیوچار، با توجه به منافع بالقوه زراعی و زیست‌محیطی که دارد در خاک فقیر از نظر مواد غذایی به‌عنوان یک راهکار خوب و کارا معرفی شده است (Beiranvandi *et al.*, 2020). بیوچار با قلیایی کردن خاک و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی قابلیت دسترسی ریشه به عناصر غذایی در خاک را افزایش می‌دهد (Graber *et al.*, 2014; Osman *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022).

قارچ مایکوریزا آربسکولار بیوتروف همزیستی است که از طریق ساختار قارچی خود یعنی آربوسکول با ریشه بیش از ۸۰ درصد گیاهان همزیستی دارد (Wilkes, 2021). این کودهای بیولوژیکی فسفر و آب را در گیاهان میزبان فراهم می‌کنند و همچنین مقاومت و تحمل گیاهان میزبان به تنش‌های زیستی را بهبود می‌بخشند (Xie *et al.*, 2018; Zardak *et al.*, 2018). قارچ‌های مایکوریزا آربسکولار از فراوان‌ترین ریزموجودات خاک هستند که با داشتن رابطه همزیستی با گیاهان عالی کارکردهای ویژه‌ای در خاک دارند (Wilkes, 2021). کلونیزه شدن ریشه‌ها با قارچ مایکوریزا آربسکولار باعث تغییر در میزان دسترسی گیاه به عناصر گوناگون می‌شود. یکی از اصلی‌ترین کارکردهای قارچ مایکوریزا آربسکولار در سیستم‌های کشاورزی دسترسی ریشه‌های گیاه به عناصر غذایی می‌باشد (Wilkes, 2021). کاربرد بیوچار باعث افزایش ۲۵ درصدی کلروفیل a و ۴۸ درصدی پرولین در سورگوم علوفه‌ای نسبت به شاهد شد (Jalali *et al.*, 2022). همچنین بیوچار می‌تواند اثرات تنش خشکی بر گیاه گل مغربی را تا حدودی تعدیل کند (Mohadesi *et al.*, 2023). بررسی اثر تلقیح قارچ‌های مایکوریزا آربوسکولار و شبه مایکوریزا بر رشد و جذب فسفر گیاه گشنیز نیز نشان داد اثر هر سه گونه قارچ (مایکوریزا و شبه مایکوریزا) بر شاخص‌های رشدی (وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه) و غلظت فسفر در مقایسه با تیمار شاهد معنی‌دار می‌باشد. طبق نتایج این تحقیق می‌توان در کشت سبزی‌ها به‌منظور کاهش مصرف کودهای فسفاته از قارچ‌های مایکوریزا جهت افزایش عملکرد گیاه استفاده کرد (Lotfollahi *et al.*, 2021). کاربرد مایکوریزا بر چغندر قند در شرایط تنش خشکی باعث افزایش بالاترین محتوی آب نسبی برگ، وزن خشک اندام هوایی، عملکرد ریشه، عیار قند و درصد قند خالص نسبت به شاهد شد (Khalili & Hamzeh, 2021). اسفناج (*Spinacia oleracea L.*) یکی از سبزیجات

برگی مهم در رژیم غذایی اکثر مردم جهان است که با برخورداری از آنتی‌اکسیدان‌های فعال از جمله فلاونوئیدها، مشتقات اسیدپیکوماریک و اوردین و همچنین کاروتنوئیدهایی همانند اوتئین، بتاکاروتن و ویتامین‌های مهم از جمله A، C، E و آهن و کلسیم می‌تواند در سلامت انسان نقش مهمی داشته باشد (Goodarzi et al., 2020). بنابراین هدف از این مطالعه، بررسی برهمکنش عواملی بود که بر رشد و بهبود عملکرد اسفناج تأثیر می‌گذارند. به‌ویژه عواملی همچون بیوچار و مایکوریزا که نقش آن‌ها در تولیدات ارگانیک و سلامت‌محور ضروری می‌باشد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

این آزمایش در مجموعه کشت و صنعت گل‌آذین صفادشت واقع در صفادشت تهران با ارتفاع از سطح دریا ۱۱۶۸/۳ متر، طول جغرافیایی ۵۰/۸۴ درجه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۷/۷۰ درجه شمالی اجرا شد. با هدف بررسی تأثیر بیوچار و مایکوریزا بر صفات گیاه اسفناج آزمایشی به صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در ۳ تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل چهار میزان شاهد، دو، چهار و شش تن در هکتار بیوچار به عنوان عامل اصلی و دو سطح تلقیح با مایکوریزا و کنترل به عنوان عامل فرعی بود. پیش از اجرای تحقیق خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک از پنج نمونه تصادفی گرفته‌شده از عمق‌های ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد که در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد. جهت سهولت در کاشت اسفناج ابتدا در سینی‌های کشت حاوی بستر کوکوپیت گیاه تا مرحله ۳ تا ۴ برگ رشد کرد و سپس به زمین گلخانه انتقال یافت. رقم کشت‌شده اسفناج رقم ورامین بود که بیشترین سطح زیر کشت را بین ارقام ایرانی به خود اختصاص داده است. بذره‌های رقم ورامین از شرکت سپاهان رویش تهیه شد. کشت اسفناج در گلخانه با فاصله کشت روی ردیف ۱۲/۵ سانتی‌متر و بین ردیف ۲۰ سانتی‌متر بود. ابعاد هر کرت آزمایشی ۶ متر مربع در نظر گرفته شد. بیوچار و مایکوریزا در مقادیر ذکرشده به خاک اضافه شد. مایه تلقیح قارچ مایکوریزا از شرکت زیست‌فناور توران تهیه شد.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Depth (cm)	pH	EC (ds m ⁻¹)	Organic Carbon (%)	N (%)	P (ppm)	K (pmm)	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)
20-30	7.4	0.68	1.08	0.15	5.5	84	25	49	26

نتایج تجزیه بیوچار

pH	Carbon (%)	N (%)	C/N
8.9	19.20	1.08	17.60

EC: Electrical conductivity, P: Phosphorus, K: Potassium, N: Nitrogen,

جهت تلقیح گیاهچه‌های اسفناج مقدار ۱۰۰ گرم مایه تلقیح قارچ یا پروپاگول (مخلوط اسپور قارچ، میسلیوم‌های خارجی و بخش‌های کلنی‌شده توسط قارچ مایکوریزا) به کار گرفته شد. بیوچار نیز قبل از کاشت با خاک ترکیب شد. آبیاری طرح آزمایشی با استفاده از نوار تیپ انجام گرفت. کنترل علف‌های هرز با توجه به محیط گلخانه‌ای به صورت وجین دستی بود، هرچند تعداد علف‌های هرز بسیار کم و قابل چشم‌پوشی بود، از این‌رو در این تحقیق کنترل شیمیایی علف‌های هرز انجام نگرفت. جهت کنترل آفات نیز از دلتامترین دسیس با نسبت ۱ لیتر در هکتار استفاده شد. پس از رسیدن به مرحله قابل برداشت، صفاتی مثل ارتفاع بوته، تعداد برگ، کلروفیل برگ، وزن تر و خشک ریشه، وزن تر و وزن خشک کل اندازه‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه اسفناج، ۱۰ بوته از هر کرت انتخاب شد. پس از شستشوی ریشه، وزن تر و خشک آن اندازه‌گیری شد. وزن تر اسفناج نیز پس از نمونه‌برداری اندازه‌گیری شد، وزن خشک آن نیز پس از قرارگرفتن در آون و دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد پس از ۷۲ ساعت اندازه‌گیری شد. ارتفاع بوته از سطح خاک تا انتهای‌ترین بخش گیاه اندازه‌گیری شد، تعداد برگ در بوته نیز پس از شمارش برگ ده بوته، میانگین آن در بوته در نظر گرفته شد. کلروفیل برگ نیز با استفاده از روش طیف‌سنجی و دستگاه اسپکتوفتومتر اندازه‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری

کلروفیل برگ یک گرم نمونه تازه را خرد و ساییده و سپس از ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد مخلوط هموژن تهیه شد. یک میلی‌لیتر از مخلوط هموژن را با نه میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد مخلوط کرده و به مدت ۱۵ دقیقه با دور ۸۰۰۰ rpm سانتریفوژ شد. فاز رویی برای اندازه‌گیری کلروفیل جدا شد. سپس فاز جدا شده در کووت ریخته شده و مقادیر کلروفیل a و b به ترتیب در طول موج‌های ۶۶۳ و ۶۴۵ نانومتر قرائت شد. از استون ۸۰ درصد به عنوان شاهد و تنظیم صفر دستگاه استفاده شد. مقدار کلروفیل a و b از طریق روابط زیر به دست آمد (رابطه ۱ و ۲) (Arnon, 1949).

$$\text{Chl. a (mg/g FW)} = [12.7 (A663) - 2.69 (A645)] \times V/W \quad \text{رابطه ۱}$$

$$\text{Chl. b (mg/g FW)} = [22.9 (A645) - 4.68 (A663)] \times V/W \quad \text{رابطه ۲}$$

در این فرمول‌ها A جذب نوری نمونه‌ها، V حجم نهایی استون مصرفی و W وزن بافت تر می‌باشد. سطح برگ نهایی نیز در مرحله برداشت با استفاده از دستگاه برگ‌سنج مدل DELAT-TDEVICESlat-England برآورد شد. داده‌های آزمایش با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 تجزیه شد و نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Microsoft Office (۲۰۱۳) ترسیم شد.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳-۱. ارتفاع بوته

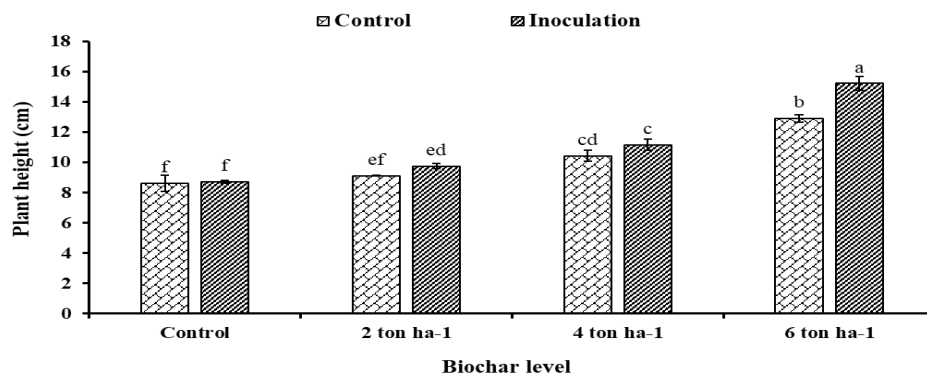
نتایج تجزیه واریانس آزمایش نشان داد اثرات اصلی و متقابل بیوچار و مایکوریزا بر صفت ارتفاع بوته معنی‌دار بود (جدول ۲). برش‌دهی اثرات متقابل نیز معنی‌داری سطوح مایکوریزا را در میزان ۶ تن در هکتار بیوچار نشان داد (جدول ۳). بررسی مقایسه میانگین اثرات متقابل نشان داد بالاترین ارتفاع بوته اسفناج با ۱۵/۲۴ سانتی‌متر در میزان ۶ تن در هکتار بیوچار و کاربرد مایکوریزا به دست آمد که نسبت به عدم کاربرد مایکوریزا در همان میزان ارتفاع بوته ۱۸/۰۵ درصد بالاتر بود (شکل ۱). همچنین در شرایط کنترل کاربرد ۶ تن در هکتار بیوچار نسبت به ۴ تن صفت ارتفاع بوته ۲۳/۶۶ درصد بالاتر بود (شکل ۱). کمترین ارتفاع بوته نیز در سطح شاهد در هر دو تیمار به دست آمد (شکل ۱). در شرایط عدم کاربرد بیوچار نیز عملکرد در شرایط استفاده از مایکوریزا بالاتر از عدم مصرف آن بود، باین‌حال این برتری معنی‌دار نبود (شکل ۱). با توجه به برش‌دهی اثرات متقابل و مقایسه میانگین صرفاً در میزان ۶ تن در هکتار میان دو سطح مایکوریزا و شاهد اختلاف معنی‌دار بود (شکل ۱). بالاترین همبستگی ارتفاع بوته نیز با صفات تعداد برگ (**۰/۸۸) و وزن تر اندام هوایی (**۰/۸۴) بود (جدول ۴). نتایج نشان داد اثر تیمارهای کاربردی بر این صفت مؤثر می‌باشد، این اثرگذاری به دلیل ماهیت تیمارهای بیوچار و مایکوریزا در فراهمی عناصر غذایی در محیط خاک و بهبود شرایط رشد گیاه می‌باشد (Beiranvandi *et al.*, 2020; Rahimi *et al.*, 2020) به طوری که کاربرد بیوچار در کارایی استفاده و جذب نیتروژن و فسفر مؤثر بوده و این امر منجر به رشد بهتر اسفناج شد (Zibaei *et al.*, 2019).

بررسی دیگری نشان داد بالاترین ارتفاع بوته در گیاه گشنیز در شرایط کاربرد مایکوریزا به دست آمد که از دلایل افزایش ارتفاع فراهمی عناصر غذایی کافی و افزایش فتوسنتز در شرایط کاربرد مایکوریزا عنوان شد (Zolfaghari *et al.*, 2022). بیوچار با افزایش جذب عناصر غذایی منجر به بهبود معنی‌دار ارتفاع بوته گیاه ذرت نسبت به شاهد شد (Delavarnia *et al.*, 2021). افزودن بیوچار به خاک می‌تواند منجر به افزایش کربن آلی خاک شود که در این شرایط عملکرد گیاه نیز افزایش می‌یابد (Zhang *et al.*, 2022). کاربرد بیوچار باعث افزایش ۱۸/۹ درصدی ارتفاع بوته باقلا شد (Poormansour *et al.*, 2019). بررسی کاربرد مایکوریزا بر ارتفاع بوته سویا نیز نشان داد که در شرایط کاربرد مایکوریزا ارتفاع بوته افزایش یافت که از دلایل این افزایش بهبود شرایط تغذیه‌ای گیاه و افزایش رشد رویشی بود (Aboutalebian & Malmir, 2018).

۳-۲. تعداد برگ در بوته

تجزیه واریانس آزمایش معنی‌داری اثرات اصلی و متقابل تیمارهای مورد بررسی بر صفت تعداد برگ در بوته را نشان داد (جدول ۲). همچنین برش‌دهی اثرات متقابل سطوح مایکوریزا در هر میزان از بیوچار نشان داد صرفاً در میزان کنترل تفاوت

معنی‌دار نمی‌باشد (جدول ۳). مقایسه میانگین برهمکنش مایکوریزا در بیوچار نشان داد که بیشترین تعداد برگ در بوته با ۱۰/۲۸ در شرایط کاربرد مایکوریزا و ۶ تن در هکتار بیوچار به‌دست آمد که نسبت به شرایط کنترل ۱۶/۲۲ درصد برتری داشت (جدول ۵). کاربرد ۶ تن در هکتار بیوچار نسبت به ۴ تن منجر به افزایش ۲۰/۷۱ درصدی، ۴ تن نسبت به ۲ تن ۱۲ درصد و ۲ تن نسبت به کنترل ۶/۶۸ درصدی تعداد برگ در بوته شد (جدول ۵). کمترین تعداد برگ در بوته اسفناج با ۶/۱۳ برگ در بوته نیز در میزان کنترل بیوچار و مایکوریزا به‌دست آمد (جدول ۵). به‌طور کلی با افزایش میزان بیوچار تعداد برگ در بوته افزایش یافت و اثرگذاری مایکوریزا نیز بهبود یافت (جدول ۵). بالاترین همبستگی تعداد برگ در بوته نیز با صفت وزن تر اندام هوایی (۰/۹۴**) و سطح برگ اسفناج (۰/۸۷**) بود، کمترین میزان همبستگی نیز با وزن خشک ریشه (۰/۱۸^{ns}) به‌دست آمد (جدول ۴).



شکل ۱. اثرات متقابل سطوح بیوچار در مایکوریزا بر صفت ارتفاع بوته اسفناج.

جدول ۴. ضرایب همبستگی بین صفات مورد بررسی اسفناج

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1- Plant height	1									
2- Number of leaves	0.88**	1								
3- Leaf area	0.78**	0.85**	1							
4- Chlorophyll a	0.72**	0.61**	0.91**	1						
5- Chlorophyll b	0.53*	0.77**	0.83**	0.81**	1					
6- Chlorophyll Total	0.51*	0.69**	0.91**	0.94**	0.92**	1				
7- Root Fresh Weight	0.54*	0.24 ^{ns}	0.69**	0.27 ^{ns}	0.29 ^{ns}	0.24 ^{ns}	1			
8- Root dry Weight	0.49*	0.18 ^{ns}	0.70**	0.25 ^{ns}	0.31 ^{ns}	0.19 ^{ns}	0.96**	1		
9- Shoot Fresh Weight	0.84**	0.94**	0.88**	0.84**	0.79**	0.81**	0.47*	0.51*	1	
10- Shoot dry Weight	0.81**	0.83**	0.84**	0.81**	0.76**	0.80**	0.52*	0.53*	0.93**	1

ns, *, ** به ترتیب نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار، معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد می‌باشد.

جدول ۲. تجزیه واریانس سطوح بیوچار و مایکوریزا بر صفات مورد بررسی اسفناج

S.O.V.	df	Probability Level									
		Plant Height	Number of Leaves	Leaf Area	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Chlorophyll Total	Root Fresh Weight	Root Dry Weight	Shoot Fresh Weight	Shoot Dry Weight
Block	2	0.103	0.1372	0.0053	0.0085	0.0132	0.0035	0.1895	0.0002	0.0065	0.0009
Biochar (B)	3	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Block×B	6	0.5303	0.7309	0.1068	0.0527	0.0166	0.1669	0.4351	0.6497	0.05	0.6901
Mycorrhiza (M)	1	0.0021	0.0005	0.0009	0.0008	0.0001	0.0001	0.0001	<.0001	<.0001	<.0001
B×M	3	0.0293	0.0313	0.0419	0.1023	0.0763	0.0423	0.0214	0.0002	0.0084	0.0003
Error	8										
C.V.	-	4.85	4.02	4.44	3.78	2.91	2.94	7.51	6.11	5.76	6.84

S.O.V: Source of variation, df: degree of freedom, C.V.: Coefficient of variation. Significant at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

جدول ۳. برش‌دهی سطوح مایکوریزا در هر میزان از بیوچار بر صفات مورد بررسی اسفناج

Biochar level	df	Probability Level							
		Plant Height	Number of Leaves	Leaf Area	Chlorophyll Total	Root Fresh Weight	Root Dry Weight	Shoot Fresh Weight	Shoot Dry Weight
Control	1	0.8202	0.7074	0.6423	0.3904	0.377	0.1386	0.1506	0.0714
2 ton ha ⁻¹	1	0.1712	0.044	0.09	0.0153	0.0352	0.0006	0.0094	0.0018
4 ton ha ⁻¹	1	0.119	0.0246	0.0426	0.0082	0.0048	<.0001	0.0013	0.0002
6 ton ha ⁻¹	1	0.0006	0.0004	0.0006	0.0003	0.0002	<.0001	<.0001	<.0001

df: degree of freedom. Significant at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

بررسی دیگری نشان داد که افزودن ماده آلی و بهبود خاک با ورمی کمپوست نیز منجر به افزایش ۲۴/۴ درصدی تعداد برگ در اسفناج شد (Abdoosi, 2018). همچنین کاربرد مایکوریزا منجر به افزایش تعداد برگ در بوته فلفل دلمه‌ای شد (Enjili et al., 2018). کاربرد مایکوریزا باعث افزایش تعداد برگ کاهو شد، به طوری که بیشترین تعداد برگ در این شرایط به دست آمد (Badvi et al., 2015). بررسی دیگری نشان داد که کاربرد مایکوریزا می‌تواند تعداد برگ در بوته سویا را ۳۲/۰۳ درصد افزایش دهد (Aboutalebian & Malmir, 2018). بررسی‌ها نشان می‌دهد مایکوریزا با تحریک و افزایش تولید فیتوهورمون‌های رشدی در گیاه از جمله ایندول استیک اسید و اکسین می‌تواند باعث رشد و افزایش ارتفاع بوته و تعداد برگ شود (Al-Arjani et al., 2020; Cheng et al., 2022; Liu et al., 2018). بررسی کاربرد بیوچار و مایکوریزا بر زعفران نشان داد بالاترین تعداد برگ، وزن تر و وزن خشک برگ در شرایط کاربرد همزمان بیوچار و مایکوریز به دست آمد (Habibi et al., 2021).

۳-۳. سطح برگ نهایی

صفت سطح برگ نهایی در مرحله برداشت محصول تحت تأثیر معنی‌داری اثرات اصلی و متقابل آن‌ها قرار گرفت (جدول ۲). برش‌دهی برهمکنش سطوح مایکوریزا در هر میزان از بیوچار نشان داد صرفاً اثرات متقابل آن در میزان ۴ و ۶ تن در هکتار معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین سطح برگ اسفناج با ۲۲۷/۶۷ سانتی‌متر مربع در میزان ۶ تن در هکتار بیوچار و کاربرد مایکوریزا به دست آمد، که نسبت به میزان کنترل ۱۷/۶۲ درصد سطح برگ بالاتری داشت (جدول ۵). کمترین سطح برگ نیز با ۱۴۲/۲۴ سانتی‌متر در شرایط عدم کاربرد بیوچار و مایکوریزا مشاهده شد (جدول ۵). کاربرد بیوچار در میزان ۶ تن در هکتار نسبت به ۴ تن در هکتار باعث افزایش ۲۰/۷۱ درصد، ۴ تن در هکتار نسبت به ۲ تن در هکتار منجر به افزایش ۱۱/۲۶ درصدی و در شرایط کاربرد ۲ تن در هکتار نسبت به عدم کاربرد بیوچار منجر به افزایش ۶/۳۴ درصدی شد (جدول ۵). نتایج نشان می‌دهد با افزایش میزان بیوچار سطح برگ نهایی افزایش یافت، همچنین اثرگذاری مایکوریزا نیز بهبود یافت (جدول ۵). نتایج همبستگی سطح برگ نهایی اسفناج نشان داد بیشترین همبستگی با وزن تر اندام هوایی (**۰/۸۸) و تعداد برگ در بوته (**۰/۸۷) بود و کمترین میزان نیز با وزن تر ریشه (**۰/۶۹) به دست آمد (جدول ۴). بررسی‌های دیگر نیز نشان داد با افزودن بیوچار به خاک سطح برگ باقلا ۳۶/۵ درصد افزایش یافت (Poormansour et al., 2019). بررسی‌ها نشان می‌دهد مایکوریزا با افزایش جذب عناصر غذایی و فتوسنتز می‌تواند در بهبود شرایط رشد گیاه نقش مهمی داشته باشد، همچنین مایکوریزا از طریق همزیستی با ریشه گیاه سبب گرفتن حجم بیشتر از خاک توسط ریشه همراه با هیف‌های مایکوریزا می‌شود و این شرایط باعث ایجاد یک سیستم ریشه‌ای نازک‌تر شده که می‌تواند به منافذ باریک خاک نفوذ کرده و با افزایش سطح جذب ریشه و به دنبال آن جذب آب رشد رویشی گیاه را به همراه دارد (Zolfaghari et al., 2022). کاربرد مایکوریزا روی گیاه کاهو نیز منجر به افزایش معنی‌دار سطح برگ شد (Badvi et al., 2015). بررسی دیگری نشان داد کاربرد بیوچار به افزایش ۲۶ درصدی سطح برگ اسفناج منجر شد (Gavili et al., 2016).

جدول ۵. مقایسه میانگین اثرات متقابل سطوح بیوچار در مایکوریزا بر صفات مورد بررسی اسفناج

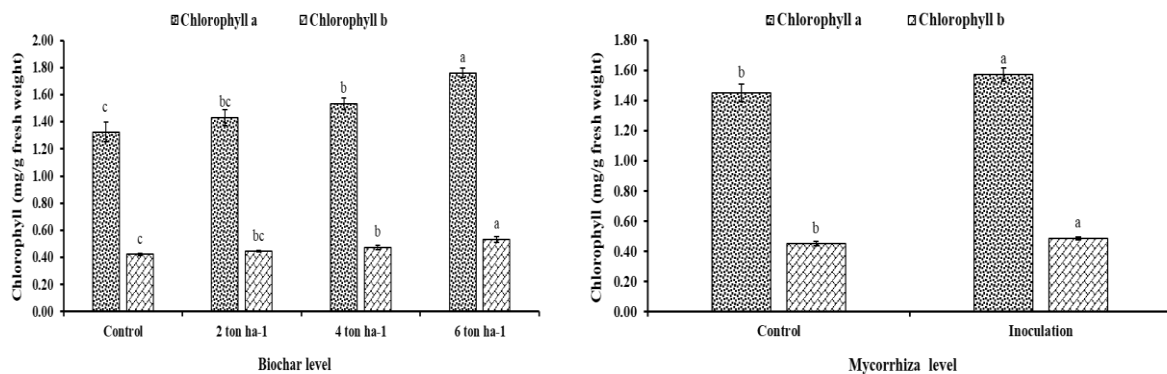
Biochar Level	Mycorrhiza Level	Number of Leaves Per Plant	Leaf Area (cm ²)	Chlorophyll Total (mg/g fresh weight)	Root Dry Weight (g plant ⁻¹)	Shoot Dry Weight (g plant ⁻¹)
Control	Control	6.13 e	142.24 e	1.73 d	5.32 e	6.62 e
	Inoculation	6.23 e	145.48 e	1.77 d	5.41 de	6.86 de
2 ton ha ⁻¹	Control	6.54 e	151.09 de	1.81 d	5.45 d	6.93 d
	Inoculation	7.14 d	163.39 cd	1.95 c	5.72 c	7.45 c
4 ton ha ⁻¹	Control	7.33 d	168.41 c	1.93 c	5.79 c	7.45 c
	Inoculation	8.01 c	183.13 b	2.09 b	6.24 b	8.21 b
6 ton ha ⁻¹	Control	8.85 b	193.89 b	2.15 b	6.29 b	8.31 b
	Inoculation	10.28 a	227.67 a	2.44 a	6.98 a	9.78 a

Means followed by similar letters in columns are not significantly different at 5% probability level by LSD test.

۳-۴. کلروفیل a و b

تجزیه واریانس آزمایش نشان داد صرفاً اثرات اصلی کاربرد مایکوریزا و بیوچار بر صفات ذکر شده معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین این بررسی نشان داد کاربرد بیوچار منجر به افزایش میزان کلروفیل a و b شد، به طوری که با افزایش میزان بیوچار از ۲، ۴

و ۶ تن در هکتار میزان کلروفیل a نسبت به کنترل به ترتیب ۸/۰۵، ۱۵/۷۲ و ۳۲/۹۶ درصد افزایش یافت، این میزان در کلروفیل b به ترتیب ۵/۳۲، ۱۲/۳۸ و ۲۶/۳۷ درصد بود (شکل ۲). نتایج نشان داد میان میزان کنترل و ۲ تن در هکتار بیوپچار از نظر آماری تفاوتی در کلروفیل a و b مشاهده نشد، این عدم معنی داری میان میزان ۲ تن و ۴ تن در هکتار بیوپچار نیز مشاهده شد (شکل ۲). با این حال افزایش بیوپچار از ۲ به ۴ تن در هکتار منجر به افزایش ۷/۱۰ و ۶/۷۰ درصدی کلروفیل a و b شد (شکل ۲). این افزایش در میزان ۶ تن نسبت به ۴ تن در هکتار در کلروفیل a و b به ترتیب ۱۴/۸۹ و ۱۲/۴۶ درصد بود (شکل ۲). کاربرد مایکوریزا نیز به افزایش ۸/۴۴ و ۷/۹۳ درصدی کلروفیل a و b منجر شد (شکل ۲). به طور کلی بالاترین کلروفیل a و b با ۱/۷۶ و ۰/۵۳ میلی گرم بر گرم وزن تر در میزان ۶ تن در هکتار بیوپچار و کمترین آن نیز به ترتیب با ۱/۳۳ و ۰/۴۲ میلی گرم بر گرم وزن تر در سطح کنترل مشاهده شد (شکل ۲). همچنین در شرایط کاربرد مایکوریزا بالاترین و کمترین میزان نیز در میزان کنترل مشاهده شد (شکل ۲). به طور کلی افزایش میزان بیوپچار به افزایش کلروفیل کل از طریق افزایش کلروفیل های a و b شد، همچنین کاربرد مایکوریزا نسبت به عدم مصرف آن در میزان کاربردی بالاتر بیوپچار اثرگذاری بیشتری داشت (جدول ۵). این افزایش نسبت شاهد می تواند به دلیل ترکیبات بالاتر بیوپچار همچون درصد نیتروژن نسبت به خاک (جدول ۱) باشد. بالاترین همبستگی کلروفیل های a و b به ترتیب با کلروفیل کل و سطح برگ اسفناج بود، کمترین نیز با وزن تر و خشک ریشه به دست آمد (جدول ۴). کاربرد بیوپچار و مایکوریزا می تواند با بهبود شرایط رشد گیاه از طریق فراهمی عناصر غذایی منجر به افزایش عملکرد گیاه شود. این افزایش عملکرد از طریق افزایش فتوسنتز و سنتز کلروفیل می باشد (Badvi et al., 2015; Guo et al., 2020; Kulczycki et al., 2020). دیگر بررسی ها نشان می دهد کاربرد کودهای زیستی می تواند منجر به افزایش کلروفیل های a، b و کلروفیل کل شود (Goshasbi et al., 2021). بررسی ها نشان داد کاربرد بیوپچار با افزایش میزان محتوی نیتروژن برگ می تواند منجر به افزایش شاخص سبزیگی اسفناج شود (Gavili et al., 2016). بررسی دیگری نشان داد کاربرد بیوپچار و باکتری های محرک رشد غلظت عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم و منیزیم را در اسفناج افزایش داد، این افزایش می تواند باتوجه به همبستگی میان کلروفیل و این عناصر به افزایش میزان کلروفیل منجر شود (Bolhassani et al., 2019).



شکل ۲. اثرات اصلی سطوح بیوپچار و مایکوریزا بر صفات کلروفیل a و b برگ. اثرات اصلی در یک شکل ادغام شده است.

۵-۳. کلروفیل کل

نتایج نشان داد اثر تیمارهای اصلی و برهمکنش آن ها بر صفت کلروفیل کل معنی دار بود (جدول ۲). همچنین برش دهی برهمکنش آن ها نیز نشان داد صرفاً در میزان اول بیوپچار (کنترل) این برهمکنش معنی دار نمی باشد و در دیگر سطوح بیوپچار میان دو سطح مایکوریزا تفاوت معنی دار است (جدول ۳). نتایج این بررسی نشان داد بالاترین میزان کلروفیل کل با ۲/۴۴ میلی گرم بر گرم وزن تر در میزان ۶ تن در هکتار بیوپچار و کاربرد مایکوریزا به دست آمد (جدول ۵). کمترین میزان نیز با ۱/۷۳ میلی گرم بر گرم وزن تر در شرایط عدم کاربرد هر دو تیمار بود (جدول ۵). بررسی ها نشان داد در میزان ۶ تن در هکتار بیوپچار کاربرد مایکوریزا منجر به افزایش ۱۳/۳۸ درصدی کلروفیل کل شد، این میزان در میزان ۴ و ۲ تن به ترتیب ۸/۴۹ و ۷/۷۱ درصد بود (جدول ۵). همچنین افزایش میزان بیوپچار از ۲ به ۴ و ۶ تن در هکتار به ترتیب منجر به افزایش ۴/۶۷، ۶/۶۰ و ۱۱/۷۰ درصدی کلروفیل کل نسبت به

میزان ما قبل خود شد (جدول ۵). با افزایش میزان کلروفیل a و b به دلایل ذکر شده، کلروفیل کل نیز در بوته افزایش یافت. بالاترین همبستگی کلروفیل کل نیز کلروفیل a ($0/94^{***}$) و کمترین آن با وزن خشک ریشه ($0/19^{ns}$) بود (جدول ۴). دیگر بررسی نشان داد کاربرد مایکوریزا در فلفل دلمه‌ای باعث افزایش ۱۷/۶۱ درصدی کلروفیل شد که از دلایل آن افزایش میزان فتوسنتز و سنتز کلروفیل بود (Enjili et al., 2018). افزایش جذب عناصر غذایی از طریق فراهمی بهتر آن در حضور مایکوریزا و بیوچار می‌تواند منجر به افزایش سطح فتوسنتز و سنتز کلروفیل شود (Cui et al., 2013). بررسی تأثیر مایکوریزا بر کلروفیل کل کاهو نیز نشان از معنی‌داری اثر آن در افزایش کلروفیل کل دارد (Badvi et al., 2015). بررسی‌ها نشان داد کاربرد بیوچار در شرایط تنش‌های رطوبتی سبب کاهش اثرات منفی تنش رطوبتی بر اسفناج شد، به طوری که بیوچار با افزایش جذب عناصر غذایی همچون نیتروژن باعث افزایش فعالیت کلروفیل در برگ می‌شود، چرا که میان میزان نیتروژن برگ و فعالیت کلروفیل‌ها همبستگی وجود دارد (Gavili et al., 2016).

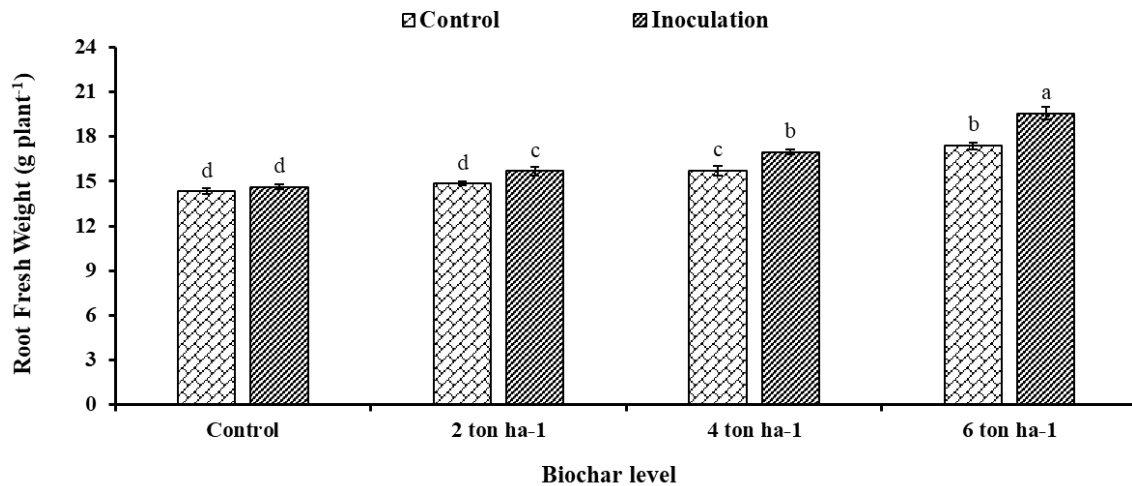
۳-۶. وزن تر و خشک ریشه

نتایج جدول تجزیه واریانس آزمایش نشان داد اثرات اصلی و متقابل آن‌ها بر صفات وزن تر و خشک ریشه معنی‌دار بود (جدول ۲). همچنین برش‌دهی برهمکنش تیمارها در هر دو صفت نشان داد در میزان کنترل بیوچار، میان سطوح مایکوریزا تفاوت معنی‌دار نمی‌باشد (جدول ۳). بررسی برهمکنش تیمارها بر صفت وزن تر ریشه نشان داد بالاترین و کمترین وزن به ترتیب با ۱۹/۵۶ و ۱۴/۳۲ گرم در میزان ۶ تن در هکتار به همراه کاربرد مایکوریزا و سطح کنترل و عدم کاربرد مایکوریزا به دست آمد (شکل ۳). نتایج نشان داد با افزایش میزان کاربرد بیوچار وزن تر ریشه افزایش یافت، به طوری که وزن تر ریشه در سطوح ۲، ۴ و ۶ تن در هکتار بیوچار نسبت به میزان قبلی خود به ترتیب ۳/۷۰، ۵/۸۱ و ۱۰/۶۹ درصد افزایش یافت (شکل ۳). اثرگذاری مایکوریزا نیز بر این صفت با افزایش میزان بیوچار بیشتر شد، به طوری که در سطح شاهد منجر به افزایش ۲/۱۴ درصدی و در سطح ۲، ۴ و ۶ تن در هکتار بیوچار منجر به افزایش ۵/۵۹، ۸/۰۶ و ۱۲/۴۶ درصدی شد که نشان از افزایش کارایی در شرایط برهمکنش بود (شکل ۳). بررسی مقایسه میانگین برهمکنش تیمارها بر صفت وزن خشک ریشه نیز نشان داد بالاترین وزن خشک با ۶/۹۸ گرم در سطح ۶ تن در هکتار بیوچار و کاربرد مایکوریزا به دست آمد، در حالی که کمترین مقدار نیز با ۵/۳۲ گرم در سطح شاهد و عدم کاربرد مایکوریزا بود (جدول ۵). افزایش کاربرد بیوچار از میزان شاهد به ۲ تن در هکتار منجر به افزایش ۲/۳۲ درصدی وزن خشک ریشه شد، این افزایش از میزان ۲ به ۴ و ۴ به ۶ تن در هکتار به ترتیب منجر به افزایش ۶/۲۴ و ۸/۷۰ درصدی وزن خشک ریشه شد (جدول ۵). نتایج نشان داد اثرگذاری مایکوریزا با افزایش میزان بیوچار بیشتر شد، به طوری که به ترتیب در سطوح شاهد، ۲، ۴ و ۶ تن در هکتار بیوچار اثرگذاری مایکوریزا به ترتیب ۱/۵۷، ۵/۰۲، ۷/۷۸ و ۱۱/۰۲ درصد بود که نشان از برهمکنش سازنده دو تیمار دارد (جدول ۵). همبستگی وزن خشک ریشه با وزن تر ریشه ($0/91^{**}$) بیشترین و با کلروفیل کل ($0/19^{ns}$) بود (جدول ۴).

به طور کلی بررسی‌های متعدد پیرامون کاربرد بیوچار و مایکوریزا نشان می‌دهد این تیمارها با بهبود جذب عناصر غذایی و ویژگی‌های خاک همچون خنثی‌سازی اسیدیته خاک منجر به بهبود رشد ریشه و افزایش وزن تر و خشک آن می‌شود، این نتایج نشان می‌دهد بیوچار و مایکوریزا با افزایش جذب نیتروژن، فسفر، آهن، منگنز، مس و کارایی استفاده از آن‌ها باعث بهبود رشد اسفناج شد (Zibaei et al., 2019). میزان اسیدیته بیوچار (۸/۹) مصرف شده نیز بالاتر از خاک محل آزمایش بود، این امر می‌تواند با قلیایی کردن خاک و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی قابلیت دسترسی ریشه به عناصر غذایی در خاک را افزایش می‌دهد (Graber et al., 2022; Zhang et al., 2022; Osman et al., 2022). بررسی دیگری نشان داد کاربرد بیوچار به همراه باکتری محرک رشد منجر به افزایش وزن خشک ریشه و شاخساره گیاه شد (Delavarnia et al., 2021). در این تحقیق نشان داده شد کاربرد همزمان بیوچار و باکتری سودوموناس منجر به هم‌افزایی اثرات آن‌ها می‌شود (Delavarnia et al., 2021). بررسی دیگری نشان داد کاربرد توام بیوچار و باکتری همزیست منجر به افزایش وزن خشک اسفناج شد (Bolhassani et al., 2019).

۳-۷. وزن تر و خشک اندام هوایی

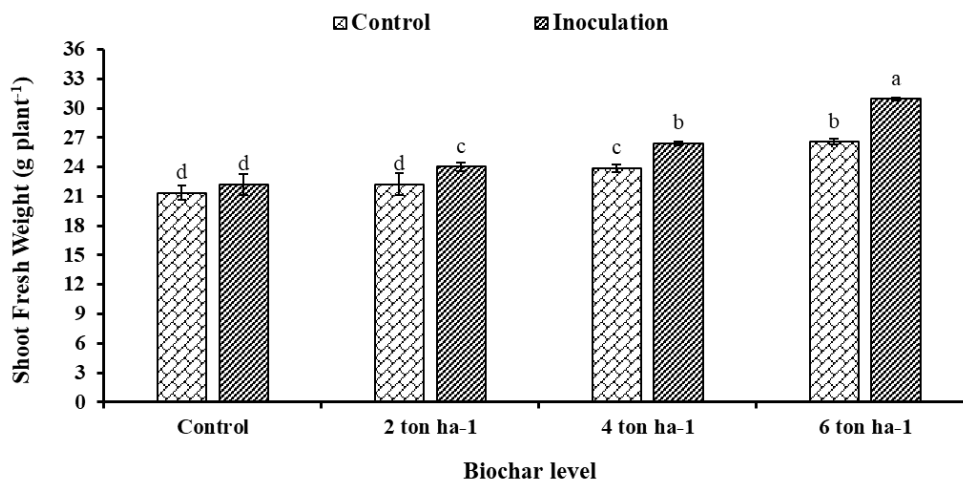
بررسی اثرات اصلی و متقابل تیمارهای مایکوریزا و بیوچار بر صفات وزن تر و خشک اندام هوایی نشان از معنی‌داری آن‌ها دارد (جدول ۲). برش‌دهی برهمکنش سطوح مایکوریزا در هر میزان از بیوچار نیز نشان داد بجز میزان کنترل بیوچار، دیگر سطوح



شکل ۳. اثرات متقابل سطوح بیوجار در مایکوریزا بر صفت وزن تر ریشه اسفناج.

معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین برهمکنش تیمارها بر صفت وزن تر اندام هوایی نشان داد بالاترین وزن تر با ۳۰/۹۵ گرم در میزان ۶ تن در هکتار بیوجار و کاربرد مایکوریزا و کمترین نیز با ۲۱/۳۹ گرم در سطح شاهد و عدم کاربرد مایکوریزا بود (شکل ۴). افزایش میزان بیوجار از شاهد به ۲ تن در هکتار منجر به افزایش ۴/۰۵ درصدی وزن تر اندام هوایی شد، این افزایش از میزان ۲ به ۴ تن در هکتار ۷/۲۰ درصد و از میزان ۴ به ۶ تن در هکتار ۱۱/۴۲ درصد بود (شکل ۴). همچنین در شرایط شاهد، تأثیر مایکوریزا بر افزایش وزن تر اندام هوایی ۳/۹۱ درصد بود، در حالی این افزایش در میزان ۲ تن، ۸/۰۳ درصد، در میزان ۴ تن ۱۰/۷۲ درصد و در میزان ۶ تن در هکتار بیوجار ۱۶/۴۶ درصد بود (شکل ۴). بالاترین وزن خشک اندام هوایی با ۹/۷۸ گرم در ۶ تن بیوجار در هکتار و کاربرد مایکوریزا به دست آمد، کمترین نیز با ۶/۶۲ گرم در میزان شاهد بود (جدول ۵). وزن خشک اندام هوایی با افزایش میزان بیوجار افزایش یافت، به طوری که میزان ۲ تن در هکتار بیوجار نسبت به عدم مصرف بیوجار ۴/۶۳ درصد، ۴ تن نسبت به ۲ تن در هکتار بیوجار ۷/۵۵ درصد و ۶ تن نسبت به ۴ تن در هکتار بیوجار ۱۱/۵۴ درصد وزن خشک را افزایش داد (جدول ۵). اثر افزایشی مایکوریزا بر وزن خشک اندام هوایی در میزان ۶ تن در هکتار بیوجار ۱۷/۶۴ درصد بود، در حالی که در سطوح بیوجار ۲، ۴ و شاهد به ترتیب ۱۰/۱۱، ۷/۴۶ و ۳/۵۲ درصد می‌باشد که نشان از کارایی بالاتر مایکوریزا در سطوح بالاتر بیوجار دارد (جدول ۵). بالاترین همبستگی صفت وزن خشک اندام هوایی با وزن تر اندام هوایی و سطح برگ بود، کمترین میزان نیز با صفت وزن و خشک ریشه به دست آمد (جدول ۴). به نظر می‌رسد باتوجه به دارابودن عناصر غذایی پرمصرف به‌ویژه نیتروژن، فسفر، کلسیم و عناصر کم‌مصرف در بیوجار این ماده نقش مهمی در رشد گیاه دارد، همچنین کاربرد مایکوریزا به همراه بیوجار می‌تواند به دلیل فراهمی بهتر و اصلاح شرایط خاک منجر به افزایش فعالیت آن شود. ترکیبات بیوجار به کار برده شده نیز نشان از بالاتر بودن نیتروژن و کربن نسبت به خاک محل آزمایش دارد که این امر می‌تواند در بهبود عملکرد معنی‌دار باشد. بررسی دیگری نشان داد کاربرد بیوجار می‌تواند وزن تر اسفناج را تا ۲۷ درصد افزایش دهد، این افزایش می‌تواند به دلیل بهبود جذب فسفر و نیتروژن باشد (Zibaei *et al.*, 2019). بررسی دیگری نیز نشان داد بیوجار می‌تواند جذب نیتروژن را از طریق تسریع در فرآیند نیترات‌سازی خاک و فعالیت میکروارگانیسم‌ها تا ۴۶/۶ درصد افزایش دهد که این امر منجر به افزایش عملکرد گیاه می‌شود (Liu *et al.*, 2017). کاربرد بیوجار و تلقیح باکتری منجر به افزایش ۴۵ درصدی وزن خشک کل ذرت شد (Delavarnia *et al.*, 2021). تحقیق دیگری نشان داد بالاترین وزن خشک اندام هوایی باقلا در تیمار کاربرد بیوجار به دست آمد (Poormansour *et al.*, 2019). مطالعات نشان می‌دهد کاربرد همزمان بیوجار و تلقیح با محرک‌های رشد می‌تواند با افزایش محتوای کربن و نیتروژن، بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، تحریک جوامع میکروبی، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، جذب و حذف فلزات سنگین از خاک به طور مستقیم و غیر مستقیم زیست‌توده گیاهان را بهبود بخشد (Amoah-Antwi *et al.*, 2020; Guo *et al.*, 2020; Kocsis *et al.*, 2022; Kulczycki *et al.*, 2020; Osman *et al.*, 2022). نتایج کاربرد توأم بیوجار و باکتری همزیست بر وزن تر

اسفناج نشان داد عملکرد گیاه افزایش یافت؛ این افزایش با فراهمی و افزایش میزان عناصر غذایی همچون نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم همراه بود (Bolhassani *et al.*, 2019).



شکل ۴. اثرات متقابل سطوح بیوچار در میکوریزا بر صفت وزن تر اندام هوایی اسفناج.

۴. نتیجه گیری

به طور کلی نتایج این بررسی نشان داد کاربرد بیوچار و میکوریزا می تواند صفات سطح برگ، کلروفیل، وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه اسفناج را افزایش دهد. این افزایش در سطوح بالاتر بیوچار مشاهده شد. میکوریزا در سطوح بالای بیوچار اثرگذاری بیشتری بر صفات اندازه گیری شده اسفناج داشت. این اثرگذاری می تواند از طریق اصلاح خاک، افزایش جذب عناصر غذایی از طریق ریشه و افزایش عناصر در اختیار ریشه باتوجه به ترکیبات بیوچار باشد. بیوچار و میکوریزا از طریق هم افزایی خود می تواند یکی از راهکارهای مناسب جهت افزایش عملکرد محصول باشد. این هم افزایی می تواند به تولید محصولات سلامت محور با عملکرد بالا در شرایط کشت گلخانه منجر شود. باتوجه به نقش مخرب کودهای شیمیایی در آلودگی های زیست محیطی و همچنین سلامت انسان، می توان از بیوچار و میکوریزا به عنوان جایگزین کامل یا حداقل بخش زیادی از کودهای شیمیایی استفاده کرد. همچنین می توان با برآورد آثار اقتصادی و زیست محیطی شیوه های متفاوت تولید اسفناج تأثیر کشت ارگانیک و یا مکمل را نسبت به شیوه های مرسوم کشت بررسی کرد که نتایج آن می تواند تکمیل کننده مباحث عملکردی باشد.

۵. منابع

- Abdoosi, S. (2018). Study of the effects of cadmium and vermicompost on some growth parameters of spinach (*Spinacea oleracea* L.). *Horticultural Plants Nutrition*, 1(2), 25–36.
- Aboutalebian, M.A., & Malmir, M. (2018). Effect of mycorrhiza and bradyrhizobium on yield and yield components of soybean in different amounts of nitrogen fertilizer. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 48(4), 901–911.
- Al-Arjani, A.B.F., Hashem, A., & Abd_Allah, E.F. (2020). Arbuscular mycorrhizal fungi modulates dynamics tolerance expression to mitigate drought stress in *Ephedra foliata* Boiss. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(1), 380–394.
- Amoah-Antwi, C., Kwiatkowska-Malina, J., Thornton, S.F., Fenton, O., Malina, G., & Szara, E. (2020). Restoration of soil quality using biochar and brown coal waste: A review. *Science of The Total Environment*, 722, 137852.
- Arnon, D.I., 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24(1).
- Badvi, H., Alemzade Ansari, N., Mahmoodi Soresani, M., & Eskandari, F. (2015). Effects of drought stress and mycorrhizal fungi on some morphophysiological characteristics of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Plant Productions*, 38(3), 27–39.
- Beiranvandi, M., Akbari, N., Ahmadi, A., Mumivand, H., & Nazarian, F. (2020). Interaction of biochar and superabsorbent on the composition of *Satureja rechingeri* Jamzad essential oil under drought stress. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 36(5), 780–793.

- Bolhassani, Z., Ronaghi, A.M., Ghasemi, R., & Zarei, M. (2019). Influence of rice-husk derived biochar and growth promoting rhizobacteria on the yield and chemical composition of spinach in soil under salinity stress. *Iranian Journal of Soil Research*, 33(3), 335–348.
- Bruulsema, T., Heffer, P., Welch, R., Cakmak, I., & Moran, K. (2012). Fertilizing crops to improve human health: A scientific review. *Better Crops with Plant Food*, 96(2), 29–31.
- Cheng, S., Jiang, J.W., Tan, L.T., Deng, J.X., Liang, P.Y., Su, H., Sun, Z.X., & Zhou, Y. (2022). Plant growth-promoting ability of mycorrhizal *Fusarium* Strain KB-3 enhanced by its IAA producing endohyphal bacterium, *Klebsiella aerogenes*. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1151.
- Delavarnia, F., Zaefarian, F., hasanpour, R., & Pirdashti, H. (2021). Evaluating the effect of organic amendment and growth-promoting bacteria in the phytoremediation process of maize (*Zea mays L.*) under cadmium heavy metal stress. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 31(4), 147–162.
- Enjili, M., Esmailpour, B., Fatemi, H., & Jalilvand, P. (2018). Effects of mycorrhizal fungi on growth and yield of sweet pepper (*Capsicum annuum L.*) under drought stress conditions. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 9(2), 39–53.
- Gavili, E., Mousavi, A.K., & Kamgar, A.K. (2016). Effect of cattle manure biochar and drought stress on the growth characteristics and water use efficiency of spinach under greenhouse conditions. *Journal of Water Research in Agriculture*, 30(2), 243–259.
- Goodarzi, F., Delshad, M., Soltani, F., & Mansouri, H. (2020). Changes in some growth and yield indices of spinach (*Spinacia oleracea L.*) under nitrogen fertilization and plant density. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 51(2), 183–198.
- Goshasbi, F., Heidari, M., Sbbagh, S.K., & Makarian, H. (2021). Effect of water deficit stress and bio and non-biofertilizers on flowering branches yield, photosynthetic pigments and concentration of macro elements in thyme (*Thymus vulgaris L.*). *Iranian Journal of Field Crop Science*, 52(2), 157–172.
- Graber, E.R., Frenkel, O., Jaiswal, A.K., & Elad, Y. (2014). How may biochar influence severity of diseases caused by soilborne pathogens? *Carbon Management*, 5(2), 169–183.
- Guo, M., Song, W., & Tian, J. (2020). Biochar-facilitated soil remediation: Mechanisms and efficacy variations. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 183.
- Habibi, M., Zaefarian, F., Rejali, F., & Bagheri, N. (2021). Effect of irrigation regimes and arbuscular mycorrhizal fungus on some agronomic traits of saffron (*Crocus sativus L.*) in different planting media. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 52(4), 115–126.
- Jalali, S.A., Zaefarian, F., hasanpour, R., & Abbasian, A. (2022). Improvement of physiological and biochemical traits of sorghum (*Sorghum bicolor L.*) by application of biochar and salicylic acid in soils contaminated with lead heavy metal. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*. Articles in Press, Accepted Manuscript, Available Online from 23 October 2022
- Khalili, M., & Hamzeh, H. (2021). Effect of different soil amendment treatments on quantitative and qualitative characteristics of sugar beet (*Beta vulgaris L.*) under different irrigation regimes. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 31(1), 171–192.
- Khodabin, G., Lightburn, K., Hashemi, S.M., Moghadam, M.S.K., & Jalilian, A. (2022). Evaluation of nitrate leaching, fatty acids, physiological traits and yield of rapeseed (*Brassica napus*) in response to tillage, irrigation and fertilizer management. *Plant and Soil*, 1–18.
- Kocsis, T., Ringer, M., & Biró, B. (2022). Characteristics and applications of biochar in soil & ash; plant systems: A short review of benefits and potential drawbacks. *Applied Sciences*, 12(8), 4051.
- Kulczycki, G., Magnucka, E.G., Oksińska, M.P., Kucińska, J., Kobyłecki, R., Pawęska, K., Zarzycki, R., Kacprzak, A., & Pietr, S.J. (2020). The effect of various types of biochar mixed with mineral fertilization on the development and ionome of winter wheat (*Triticum aestivum L.*) seedlings and soil properties in a pot experiment. *Agronomy*, 10(12), 1903.
- Kumaraswamy, R.V., Saharan, V., Kumari, S., Chandra Choudhary, R., Pal, A., Sharma, S.S., Rakshit, S., Raliya, R., & Biswas, P. (2021). Chitosan-silicon nanofertilizer to enhance plant growth and yield in maize (*Zea mays L.*). *Plant Physiology and Biochemistry*, 159, 53–66.
- Cui, L., Yan, J., Yang, Y., Li, L., Quan, G., & Ding, C. (2013). Influence of biochar on microbial activities of heavy metals contaminated paddy fields. *BioResources*, 8(4), 5536–5548.
- Liu, C.Y., Zhang, F., Zhang, D.J., Srivastava, A., Wu, Q.S., & Zou, Y.N. (2018). Mycorrhiza stimulates root-hair growth and IAA synthesis and transport in trifoliate orange under drought stress. *Scientific Reports*, 8(1), 1–9.
- Liu, Z., Cheng, X., Sun, D., Meng, J., & Chen, W. (2017). Maize stover biochar increases urea (15 N isotope) retention in soils but does not promote its acquisition by plants during a 4-year pot experiment. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 77(4), 382–389.
- Lotfollahi, A., Bolandnazar, S., Aliasgharzad, N., Khoshru, B., & siami, A. (2021). Effects of inoculation with arbuscular mycorrhiza and mycorrhiza-like fungi on growth and phosphorus uptake of coriander. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 31(1), 87–101.

- Mohadesi, A., Shirmardi, M., Meftahizadeh, H., & Gholamnezhad, J. (2023). Comparison of the effect of biochar and vermicompost on some morphophysiological characteristics of *Oenothera biennis* under drought stress. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*. Articles in Press, Accepted Manuscript, Available Online from 30 April 2023.
- Niemiec, M., Chowaniak, M., Sikora, J., Szelag-Sikora, A., Gródek-Szostak, Z., & Komorowska, M. (2020). Selected properties of soils for long-term use in organic farming. *Sustainability*, 12(6), 2509.
- Osman, A.I., Fawzy, S., Farghali, M., El-Azazy, M., Elgarahy, A.M., Fahim, R.A., Maksoud, M.I.A.A., Ajlan, A.A., Yousry, M., Saleem, Y., & Rooney, D.W. (2022). Biochar for agronomy, animal farming, anaerobic digestion, composting, water treatment, soil remediation, construction, energy storage, and carbon sequestration: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(4), 2385–2485.
- Poormansour, S., Razzaghi, F., Sepaskhah, A.R., & Moosavi, A.A. (2019). Different levels of biochar and irrigation influence on faba bean growth, yield and yield components. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 50(2), 89–99.
- Rahimi, A., Dovlati, B., Amirnia, R., & Heydarzade, S. (2020). Effect of application of mycorrhizal fungus and azotobacter on physiological characteristics of *Trigonella foenum-graecum* L. under water stress conditions. *Iranian Journal of Plant Biology*, 11(4), 1–18.
- Riaz, G., & Chopra, R. (2018). A review on phytochemistry and therapeutic uses of *Hibiscus sabdariffa* L. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 102, 575–586.
- Trisilawati, O., Rizal, M., & Pribadi, E. (2020). Organic cultivation of medicinal crops in the efforts to support the sustainable availability of Jamu raw materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 418(1), 012077.
- Wilkes, T.I. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi in agriculture. *Encyclopedia*, 1(4), 1132–1154.
- 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(3), 285–300.
- 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.
- Zhang, G., Dou, S., Meng, F., Yin, X., & Zhou, X. (2022). Transformation of biochar into extracted humic substances under short-term laboratory incubation conditions: Evidence from stable carbon isotopes. *Soil and Tillage Research*, 215, 105189.
- Zibaei, Z., Ghasemi-Fasaee, R., & Ostovar, P. (2019). Effects of crop residues, rice husk biochar, and urea application on growth, chemical composition, and nitrogen use efficiency of spinach in a calcareous soil. *Iranian Journal of Soil Research*, 33(1), 75–87.
- Zolfaghari, M., Tolideh, S., Sedighi Dehkordi, F., & Mahmoodi Sourestani, M. (2022). Evaluation of growth, yield and essential oil of coriander (*Coriandrum sativum* L.) under mycorrhiza, vermicompost and chemical fertilizer treatments. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 32(1), 35–46.