University of Birjand

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

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses In Crop Sciences

Vol. 17, No. 1, pp. 73-86 (Spring 2024)

https://dx.doi.org/10.22077/ESCS.2023.5430.2148

Original article

Morphological and physiological responses of black cumin to biochar and different irrigation regimes

H. Kiani[1], Sh. Khalesro[2*], Z. Sharifi[3], A. Mokhtassi-Bidgoli[4]

1. Ph.D. student, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
2. Assistant Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
3. Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
4. Assistant Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received 28 June 2022; Accepted 17 August February 2022

Extended abstract

Introduction

Climate change accelerated the negative effects on plant production; Therefore, agricultural researchers are focused on identifying strategies that minimize the effects of climate change on crop production. Black cumin (*Nigella sativa* L.) is an annual herbal plant belonging to the Ranunculaceae family. It has been used in traditional medicine in the past. Black cumin has a lot of industrial and medicinal uses. Nowadays, regarding the importance of medicinal and aromatic plants, such as black cumin, different strategies should be applied to improve their traits in different conditions. Drought stress is an effective climatic factor. Biochar as an ecological input is introduced in recent years. It was hypothesized that biochar may alleviate drought effects. Accordingly, the aim of this study was to investigate the effect of biochar on morphological characteristics, physiological parameters activity, and yield of black cumin affected by drought stress.

Materials and methods

To evaluate the effect of biochar and different irrigation levels on the morpho-physiological traits of black cumin an experiment was carried out in the greenhouse of the University of Kurdistan in 2018. The experimental factors included three irrigation levels (100%, 70%, and 40% of the field capacity of the soil) and two biochar consumption levels (0, and 15 t ha^{-1}). The experimental design was a factorial based on a completely randomized with three replications. The amounts of field capacity and permanent wilting point were separately calculated for two different levels of biochar. Fourteen seeds of black cumin were sown in each pot. All of the pots were irrigated after sowing. The morpho-physiological traits included relative water content, total chlorophyll, photosystem II efficiency, plant height, flowering and secondary branches number per plant, capsule and seed number per plant, and biological and grain yield were measured. The statistical SAS software (version 9.3; SAS Institute; USA) was used for ANOVA. The mean of treatments was compared with the LSD test.

Results and discussion

The results showed that irrigation and biochar interaction had a significant effect on the morpho-physiological characteristics and yield of black cumin. Biochar application decreased the negative effects

* Corresponding author: Shiva Khalesro; E-Mail: sh.khalesro@uok.ac.ir

© 2024, 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).

of drought stress. The greatest RWC (86.13) belonged to 100% irrigation and biochar application. Given the increased weights of pots containing biochar and increasing the leaf water potential, it can be concluded that biochar application ultimately increased RWC due to increasing water holding capacity. At the 40, 70, and 100% irrigation levels, biochar increased total chlorophyll by 1.43, 13.64, and 5.31% compared with non-application of biochar, respectively. The maximum (83.2%) and minimum (70.72%) photosystem II efficiency were observed in 100% irrigation with biochar and 40% irrigation and non-application of biochar, respectively. Biochar application enhances chlorophyll content consequently increasing photosynthesis compared with no biochar application under drought stress. The highest number of flowering and secondary branches per plant was obtained from 100% irrigation and biochar application and the lowest number of mentioned traits belonged to 40% irrigation and non-application of biochar. Drought stress reduced capsule number per plant. The minimum number of capsules was obtained from 40% irrigation level. Biochar increased capsule number per plant and seed number per plant at 70% and 100% of irrigation levels and 40% and 70% of irrigation levels, respectively. The greatest biological yield belonged to 100% irrigation and biochar application. This treatment increased biological yield due to enhancing morphological traits and yield components. At the 40, 70, and 100% irrigation levels, biochar increased grain yield by 33.51, 34.12, and 10.72% compared with non-application of biochar, respectively.

Conclusion

The usage of biochar improved the relative leaf water content, total chlorophyll content, photosystem II efficiency, morphological traits, biological and grain yield of black cumin under drought stress. Overall it can be said that biochar not only can reduce the negative impacts of drought stress but only improve the growth of black cumin. Therefore, biochar can be used as a useful input in sustainable agricultural systems under drought stress.

Keywords: Biological yield, Chlorophyll, Photosystem II efficiency, Vegetative growth, Water deficits stress

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد هفدهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۳

https://dx.doi.org/10.22077/ESCS.2023.5430.2148

مقاله پژوهشی

پاسخ‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی سیاه‌دانه به بیوچار در رژیم‌های مختلف آبیاری

هاوری کیانی[۱]، شیوا خالص‌رو[۲*]، زاهد شریفی[۳]، علی مختصی‌بیدگلی[۴]

۱. دانشجوی دکتری، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج
۲. استادیار، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج
۳. دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج
۴. استادیار، گروه زراعت، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
تنش کم‌آبی
رشد رویشی
عملکرد بیولوژیک
کارایی فتوسیستم II
کلروفیل

تاریخ دریافت:
۱۴۰۱/۰۴/۰۷

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۱/۰۵/۲۶

تاریخ انتشار:
بهار ۱۴۰۳

۱۷(۱): ۷۳-۸۶

چکیده

تخریب منابع آب و خاک در سیستم‌های کشاورزی رایج، ضرورت استفاده از نهاده‌های طبیعی را به‌ویژه در شرایط کم‌آبی بیش‌ازپیش آشکار می‌سازد. بیوچار با افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک، محققان را امیدوار نموده که می‌تواند علاوه بر بهبود رشد گیاه با تنش خشکی مقابله نماید. در همین راستا به‌منظور بررسی اثر رژیم‌های آبیاری و کاربرد بیوچار بر گیاه دارویی سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.)، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان در سال ۱۳۹۷ به اجرا درآمد. فاکتورهای آزمایش شامل آبیاری در سه سطح ۱۰۰ (آبیاری کامل)، ۷۰ (تنش ملایم خشکی) و ۴۰ (تنش شدید خشکی) درصد ظرفیت زراعی و دو سطح مصرف بیوچار (۰ و ۱۵ تن در هکتار) بودند. نتایج نشان داد افزایش شدت تنش خشکی (کاهش آبیاری) منجر به کاهش محتوای نسبی آب برگ، محتوای کلروفیل کل، کارایی فتوسیستم II، ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی و گل‌دهنده، تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در بوته، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه گردید. از سوی دیگر کاربرد بیوچار سبب تقلیل اثرات منفی تنش خشکی گردید، به‌طوری‌که با حفظ و نگهداشت میزان آب خاک، صفات مورفوفیزیولوژیک را بهبود بخشید. علاوه بر این بیوچار در سطوح آبیاری ۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ عملکرد دانه را به ترتیب ۳۳/۵۱، ۳۴/۱۲ و ۱۰/۷۲ درصد نسبت به شرایط عدم کاربرد بیوچار افزایش داد؛ بنابراین می‌توان گفت بیوچار در کاهش اثرات خشکی مؤثر است.

مقدمه

وقوع دوره‌های گرم و خشک، متأثر از فرآیندهای تغییر اقلیم است (Naumann et al., 2018). کمبود آب ناشی از تعداد دفعات کم بارش و یا نامنظم بودن بارش‌ها و همچنین کاهش ذخایر آب‌های زیرزمینی به تهدیدی جدی برای تولید محصولات و امنیت غذایی در بسیاری از نقاط جهان تبدیل شده است (Hussain et al., 2019). دارا بودن پتانسیل رشد تحت شرایط تنش خشکی و ارزش اقتصادی بالای برخی از گیاهان دارویی و معطر سازگار به مناطق خشک، این گیاهان را جایگزین مناسبی برای سایر محصولات در بوم نظام‌های زراعی این مناطق می‌نماید، به‌علاوه این گیاهان سازگاری بیشتری به شرایط محیطی بومی دارند (Maman et al., 2004).

یکی از گیاهان دارویی باارزش، سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) است. این گیاه، علفی، یک‌ساله و متعلق به خانواده آلاله است که در صنایع غذایی، داروسازی و پزشکی مورداستفاده قرار می‌گیرد (Alhaj et al., 2010). وقوع تنش

* نگارنده پاسخگو: شیوا خالص‌رو. پست الکترونیک: sh.khalesro@uok.ac.ir

خشکی باعث کاهش رشد و عملکرد سیاه‌دانه نیز می‌گردد (Haj Seyed Hadi et al., 2016).

یکی از مباحثی که در سال‌های اخیر در ارتباط با بهبود سلامت خاک و احیای خاک‌های تخریب‌شده اهمیت یافته است، کاربرد بیوچار است (Jiang et al., 2020). بیوچار ماده‌ای غنی از کربن است که از فرایند پیرولیز بقایای آلی با منشأ گیاهی یا حیوانی حاصل می‌گردد (Semida et al., 2019). در فرآیند پیرولیز، سوزاندن این مواد در محیط بدون اکسیژن یا با میزان اکسیژن محدود در دمای بالا انجام می‌شود (Ferlito et al., 2020). بیوچار یک نهاده ارزشمند و کاربردی در سیستم‌های کشاورزی پایدار است که سبب بهبود خصوصیات خاک، حفظ رطوبت خاک، افزایش جذب عناصر غذایی، ترسیب کربن و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود (Kloss et al., 2014; Zhang and Ok, 2014). بیوچار علاوه بر بهبود حاصلخیزی خاک، موجب کاهش اثرات منفی تنش‌های زیستی و غیر زیستی نیز می‌گردد (Barrow et al., 2012; Akhtar et al., 2015). تأثیر مثبت بیوچار در شرایط کمبود آب بر رشد و عملکرد محصولات در برخی مطالعات بیان گردیده است (Akhtar et al., 2014). بیوچار موجب افزایش ظرفیت نگهداشت مقدار آب در خاک می‌گردد (Ali et al., 2017). علاوه بر این، کاربرد بیوچار به افزایش محتوای نسبی آب برگ در شرایط کمبود آب منجر می‌شود (Mehmood et al., 2018). بر اساس گزارش پژوهشگران، کاربرد بیوچار محتوای کلروفیل و فتوسنتز را نسبت به عدم کاربرد آن در شرایط تنش خشکی بهبود بخشید (Akhtar et al., 2014). در مطالعه دیگری کاهش عملکرد سیاه‌دانه در اثر بروز تنش خشکی گزارش شد و با کاربرد کودهای بیولوژیک، اثرات منفی تنش خشکی تقلیل و عملکرد افزایش یافت (Merajipoor et al., 2020). یافتن راهکاری که بتواند اثرات کمبود آب بر رشد و عملکرد گیاهان را با توجه به بحران‌های موجود در این حوزه کاهش دهد و موجب بهبود رشد و عملکرد گیاهان گردد، بسیار حائز اهمیت است. در همین ارتباط در پژوهش حاضر، تأثیر کاربرد بیوچار بر رشد رویشی، خصوصیات فیزیولوژیک و عملکرد سیاه‌دانه در شرایط کمبود آب ارزیابی گردید.

مواد و روش‌ها

مطالعه حاضر به‌صورت گلدانی در قالب آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان از ۱۰ خرداد تا ۲۰ شهریورماه ۱۳۹۷ اجرا شد. در طول مدت آزمایش، دمای حداقل و حداکثر گلخانه به ترتیب ۱۸ و ۳۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۲۷ درصد بود. در ابتدا گلدان‌های پلاستیکی به قطر ۳۰ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر (مساحت ۷۰۶/۵ سانتی‌متر و وزن ۴۰۰ گرم) با ۱۱۳۱۶ گرم خاک که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است، پر شدند (۱۱۳۱۶ گرم خاک + ۱۰۵ گرم بیوچار). مقدار ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم برای دو سطح مختلف بیوچار به‌صورت جداگانه محاسبه گردید. در هر گلدان، ۱۴ بذر سیاه‌دانه کشت گردید. تیمارهای آبیاری از یک هفته قبل از گلدهی (در مرحله شروع غنچه‌دهی) اعمال شد و تا ۱۰ روز قبل از برداشت (رسیدگی فیزیولوژیک) ادامه داشت. به‌منظور کاهش خطای حاصل از موقعیت گلدان‌ها در گلخانه، گلدان‌ها در هر نوبت آبیاری جابجا می‌شدند. زمان اعمال تیمار آبیاری (درصد از ظرفیت زراعی) در گلدان‌ها به روش وزنی تعیین شد. به‌منظور تولید بیوچار گاوی، فضولات گاوی خشک‌شده و الک شده (عبور از الک ۲ میلی‌متر) در کوره الکتریکی قرار داده شد و با حرارت ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت، تحت شرایط نبود اکسیژن، فرآیند پیرولیز انجام گردید. ویژگی‌های بیوچار مورداستفاده در جدول ۲ ارائه شده است. اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ به روش جیون (Jeon et al., 2006)، کلروفیل با استفاده از روش آرنون (Arnon, 1967) و کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II توسط دستگاه فتوسنتزمتر (mini PPM-200/300, EARS, Netherlands) انجام گرفت. برای اندازه‌گیری صفات مرتبط با رشد و عملکرد سیاه‌دانه در مرحله رسیدگی، بوته‌های هر گلدان برداشت شد.

جدول ۱. ویژگی‌های خاک مورداستفاده در آزمایش **Table 1. Characteristics of the used soil in the experiment**

بافت Texture	ماده آلی Organic carbon	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC	پتاسیم قابل‌دسترس Available potassium	فسفر قابل‌دسترس Available phosphorous	نیتروژن کل Nitrogen total
	%		ds m^{-1}	---------- ppm ----------		%
Loamy Sand	0.8	7.6	0.41	194.5	1.3	0.09

جدول ۲. خصوصیات بیوچار تولیدی مورداستفاده در آزمایش

Table 2. Characteristics of the used biochar in the experiment

اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC	منیزیم Mg	آهن Fe	منگنز Mn	کلسیم Ca	مس Cu	روی Zn	فسفر P	پتاسیم K	نیتروژن کل Nitrogen Total
	$ds\ m^{-1}$	ppm								%
9.13	7.81	1221	1301	306	8476	27.4	156	2384	18227	1.74

بعد از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها، تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS ver. 9.3 انجام شد. برای مقایسه میانگین تیمارها از آزمون LSD استفاده گردید و شکل‌ها نیز به کمک نرم‌افزار Excel ترسیم شد.

نتایج و بحث

محتوای نسبی آب برگ

اثر متقابل سطوح آبیاری و کاربرد بیوچار بر محتوای نسبی آب برگ معنی‌دار بود ($P<0.05$) (جدول ۳). در مطالعه حاضر، گیاهان تحت سطوح مختلف آبیاری دارای محتوای نسبی آب برگ متفاوتی بودند. تیمار آبیاری کامل با مصرف بیوچار و تیمار آبیاری ۴۰ درصد با عدم کاربرد بیوچار به ترتیب دارای بیشترین (۸۶/۱۳ درصد) و کم‌ترین (۶۰/۱ درصد) محتوای نسبی آب برگ بودند (شکل ۱). احتمالاً به دلیل کاهش پتانسیل آب برگ و کاهش جذب آب از ریشه‌ها در شرایط تنش خشکی، محتوای نسبی آب برگ سیاه‌دانه کاهش یافت (Kabiri et al., 2014).

در سوی مقابل در سطوح ۴۰ و ۷۰ درصد ظرفیت زراعی خاک، کاربرد بیوچار در مقایسه با عدم کاربرد بیوچار سبب افزایش محتوای نسبی آب شد. در مطالعه‌ی تأثیر بیوچار بر محتوای نسبی آب برگ ذرت گزارش شد که در شرایط کمبود آب، کاربرد بیوچار سبب بهبود ۲۸/۵۸ درصدی محتوای نسبی آب برگ نسبت به عدم کاربرد بیوچار شد (Sattar et al., 2019). می‌توان اظهار داشت به‌کارگیری بیوچار با افزایش ظرفیت نگهداری آب درنهایت موجب افزایش محتوای نسبی آب برگ می‌گردد (Mehmood et al., 2018).

محتوای کلروفیل کل

اثر متقابل سطوح آبیاری و کاربرد بیوچار بر محتوای کلروفیل کل برگ معنی‌دار بود ($P<0.01$) (جدول ۳). تنش خشکی، محتوای کلروفیل کل را کاهش داد. در سطوح آبیاری ۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک کاربرد بیوچار نسبت به عدم کاربرد آن به ترتیب ۱/۴۳، ۱۳/۶۴ و ۵/۳۱ درصد محتوای کلروفیل کل برگ بیشتر بود (شکل ۲). با کاهش محتوای نسبی آب برگ (شکل ۱)، به دلیل بروز اثرات تنش خشکی و تشکیل گونه‌های فعال اکسیژن، کلروفیل گیاه (شکل ۲) دچار تخریب می‌گردد (Shimakawa and Miyake, 2018). درواقع کاربرد بیوچار با حفظ محتوای آب

جدول ۳. تجزیه واریانس تأثیر سطوح آبیاری و بیوچار بر خصوصیات فیزیولوژیک، مورفولوژیک و عملکرد سیاه‌دانه

Table 3. Effects of irrigation levels and biochar on physiological, morphological traits and yield of black cumin

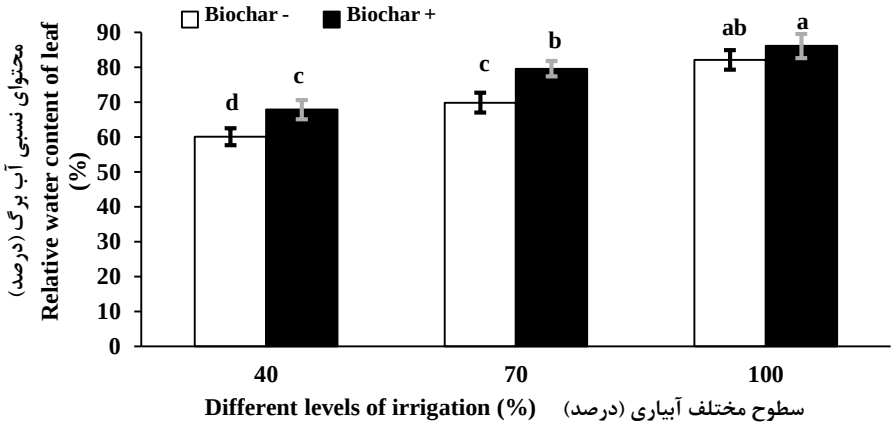
منابع تغییرات S.O.V	df	محتوای نسبی آب برگ RWC	کلروفیل کل Total Chlorophyll	کارایی فتوسیستم PS II Efficiency	ارتفاع بوته Plant height	تعداد شاخه گل‌دهنده Flowering branches No. per plant
تکرار Replication	2	235**	0.21**	183.8**	18.8**	0.21**
سطوح آبیاری Irrigation (I)	2	581**	2.1**	13030.3**	42**	1.5**
سطوح بیوچار Biochar (B)	1	209**	0.14**	317.6**	5.1**	1.3**
اثر متقابل I × B	2	18*	0.03**	75.5**	0.5**	0.2*
خطا Error	10	3.2	0.001	8.8	0.17	0.025
ضریب تغییرات (٪) CV(%)		*2.4*	*1.5*	*3.7*	*1.2*	*3.5*

Table 3. Continued **جدول ۳. ادامه**

منابع تغییرات S.O.V	df	تعداد شاخه فرعی Secondary branches No. per plant	تعداد کپسول در بوته Capsules No. per plant	تعداد دانه در بوته Seeds No. per plant	عملکرد بیولوژیک Biological yield	عملکرد دانه Grain yield
تکرار Replication	2	3.9*	0.14*	471.4*	458.3*	18.7ns
سطوح آبیاری Irrigation (I)	2	166.7**	10.6**	51732**	25712.9**	4268.7**
سطوح بیوچار Biochar (B)	1	7.6*	0.99**	4116**	1344.4**	1071.3**
اثر متقابل I × B	2	13.4**	0.16**	1082**	491.3*	78.7*
خطا Error	10	0.6	0.02	70.4	76.6	14.3
ضریب تغییرات (٪) CV(%)		*4.9*	*3.7*	*3.8*	*4.1*	*5.2*

*، ** و n.s به ترتب معنی‌دار و غیر معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد

ns, * and **: Not-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.



شکل ۱. مقایسه میانگین محتوای نسبی آب برگ سیاه‌دانه در سطوح مختلف آبیاری (۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و کاربرد بیوچار

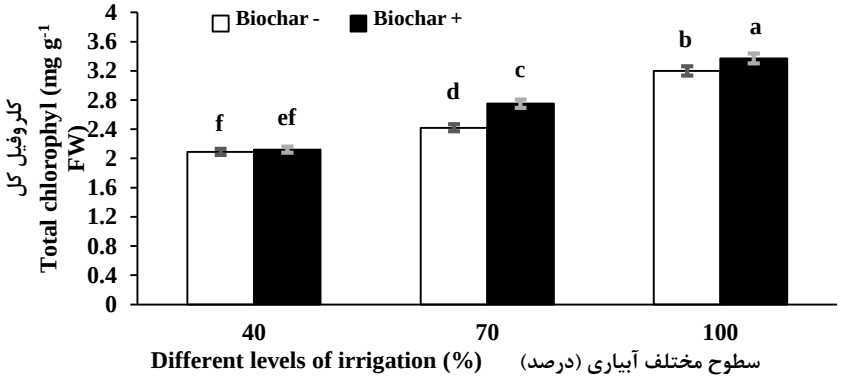
Fig. 1. Mean square comparison relative water content in black cumin under different irrigation levels (40, 70, and 100% of field capacity) and biochar application

گیاه و حفظ پایداری غشاء سلولی سبب جلوگیری از تولید گونه‌های فعال اکسیژن شده و درنهایت سبب ممانعت از تجزیه کلروفیل می‌شود. به‌طورکلی کاربرد بیوچار به دلیل تأثیر مستقیم در جذب Mg سبب افزایش محتوای کلروفیل می‌شود (Abeer et al., 2015). در مطالعه‌ای، کاربرد بیوچار تحت شرایط کمبود آب در گیاه آفتابگردان بررسی شد و نتایج نشان داد که کاربرد بیوچار نسبت به عدم کاربرد آن، سبب افزایش محتوای کلروفیل شد (Seleiman et al., 2019).

کارایی فتوسیستم II

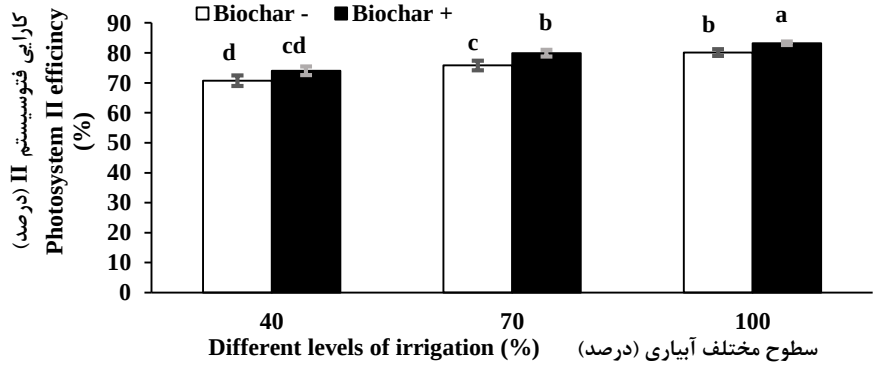
اثر متقابل سطوح آبیاری و کاربرد بیوچار بر درصد کارایی فتوسیستم II معنی‌دار بود (P<0.01) (جدول ۳). بالاترین و پایین‌ترین درصد کارایی فتوسیستم II به ترتیب در آبیاری کامل با کاربرد بیوچار (۸۳/۲ درصد) و تنش شدید خشکی با عدم کاربرد بیوچار (۷۰/۷۲ درصد) مشاهده شد (شکل ۳). برخی محققین بیان داشتند کاهش فتوسنتز یکی از رایج‌ترین اتفاقات طی تنش خشکی است (Joao et al., 2019). تنش خشکی تغییر در محتوای کلروفیل و آسیب به ساختار فتوسنتزی را به دنبال دارد (Ali et al., 2017). کاهش نسبت Fv/Fm در شرایط تنش خشکی می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که انتقال الکترون از فتوسیستم II به فتوسیستم I تحت تأثیر تنش خشکی قرارگرفته و کاهش می‌یابد (Takagi et al., 2017). در ارتباط با تأثیر مثبت بیوچار بر کارایی فتوسیستم II می‌توان اظهار داشت در حقیقت مصرف

بیوچار با حفظ محتوای آب گیاه و حفظ پایداری غشاء سلولی سبب جلوگیری از تولید گونه‌های فعال اکسیژن شده و درنهایت از تجزیه کلروفیل ممانعت به عمل می‌آورد (Akhtar et al., 2015) و حفظ کلروفیل موجب تداوم فتوسنتز می گردد. درواقع کاربرد بیوچار، محتوای کلروفیل (شکل ۲) و به‌تبع آن فتوسنتز را نسبت به عدم کاربرد آن در شرایط تنش خشکی بهبود بخشید (Sattar et al., 2019).



شکل ۲. مقایسه میانگین محتوای کلروفیل کل سیاه‌دانه در سطوح مختلف آبیاری (۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و کاربرد بیوچار

Fig. 2. Mean square comparison of total chlorophyll in black cumin under different irrigation levels (40, 70, and 100% of field capacity) and biochar application



شکل ۳. مقایسه میانگین کارایی فتوسیستم II سیاه‌دانه در سطوح مختلف آبیاری (۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و کاربرد بیوچار

Fig. 3. Mean square comparison of photosystem II efficiency of in black cumin under different irrigation levels (40, 70, and 100% of field capacity) and biochar application

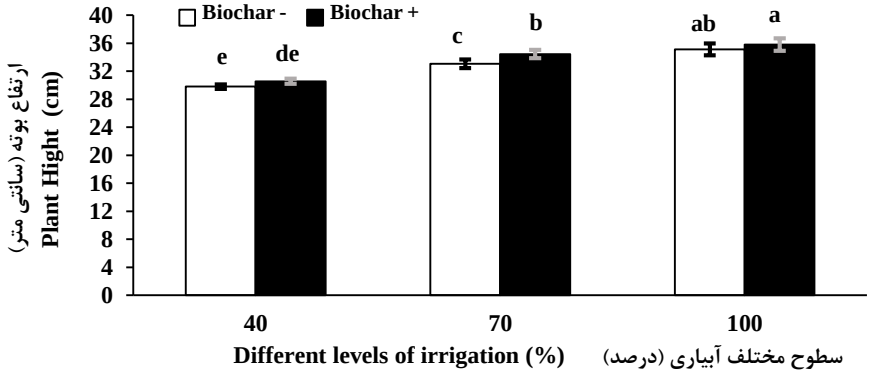
ارتفاع بوته

اثر متقابل سطوح آبیاری و کاربرد بیوچار بر ارتفاع بوته سیاه‌دانه معنی‌دار بود ($P<0.01$) (جدول ۳). بیشترین ارتفاع بوته در تیمار آبیاری کامل و کمترین ارتفاع بوته در تنش خشکی شدید (آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی خاک) مشاهده شد. در سطوح آبیاری ۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک کاربرد بیوچار نسبت به عدم کاربرد آن به ترتیب ۲/۵۸، ۴/۲ و ۱/۹۳ درصد ارتفاع بوته را افزایش داد (شکل ۴). تنش خشکی باعث تغییرات متعددی در گیاهان می‌شود، به‌ویژه تغییرات فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی گیاهان طی تنش خشکی نمود پیدا می‌کند. در شرایط تنش خشکی به دلیل کاهش پتانسیل آب برگ و کاهش جذب آب از ریشه‌ها، محتوای نسبی آب برگ سیاه‌دانه کاهش می‌یابد (Kabiri et al., 2014) و درنتیجه، سلول‌های سیاه‌دانه، چروک خورده و دیواره سلولی پایداری خود را از دست می‌دهد (Haj Seyed Hadi et al., 2016). نهایتاً شرایط کمبود آب باعث کاهش رشد سیاه‌دانه می‌گردد (Rezaei-Chiyaneh et al., 2018). در همین ارتباط پژوهشگران دیگر طی مطالعه‌ای بیان داشتند که تنش خشکی باعث کاهش ارتفاع بوته سیاه‌دانه گردید (Ozer et al., 2020). محققین دیگری عنوان داشتند که

تنش کمبود آب باعث کاهش در محتوای نسبی آب برگ، محتوای کلروفیل و ارتفاع بوته آفتابگردان گردید، درحالی‌که کاربرد بیوچار در مقایسه با عدم کاربرد بیوچار تحت شرایط کمبود آب سبب بهبود محتوای نسبی آب برگ، افزایش محتوای کلروفیل و ارتفاع بوته شد (Seleiman et al., 2019).

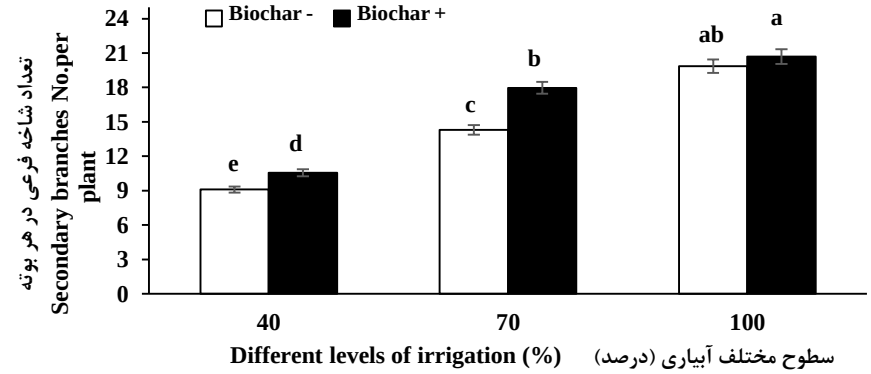
تعداد شاخه فرعی

اثر متقابل سطوح آبیاری و کاربرد بیوچار بر تعداد شاخه فرعی معنی‌دار بود ($P<0.01$) (جدول ۳). کم‌ترین تعداد شاخه فرعی در تیمار آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی خاک و بیشترین تعداد شاخه فرعی در آبیاری کامل مشاهده شد، درواقع با تشدید کمبود آب تعداد شاخه‌های فرعی کاهش یافت و از سوی دیگر کاربرد بیوچار سبب افزایش تعداد شاخه فرعی شد (شکل ۵). کاهش رشد رویشی در مواجه با تنش می‌تواند ناشی از بسته شدن روزنه‌ها و کاهش فتوسنتز (شکل ۳) باشد (Ali et al., 2017). تنش کمبود آب تسریع گذر گیاه از مرحلـه رشـد رویشـی به مرحله رشد زایشی را در پی دارد و به‌تبع تعداد شاخه‌های فرعـی گیـاه در شرایط تنش شدید کمبود آب کاهش می‌یابد (Bodner et al., 2015). درحالی‌که کاربرد بیوچار با افزایش باروری خاک و افزایش سطح برگ موجبات افزایش رشد رویشی *Phragmites karka* را فراهم کرد (Abideen et al., 2020).



شکل ۴. مقایسه میانگین ارتفاع بوته سیاه‌دانه در سطوح مختلف آبیاری (۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و کاربرد بیوچار

Fig. 4. Mean square comparison of plant height in black cumin under different irrigation levels (40, 70, and 100% of field capacity) and biochar application

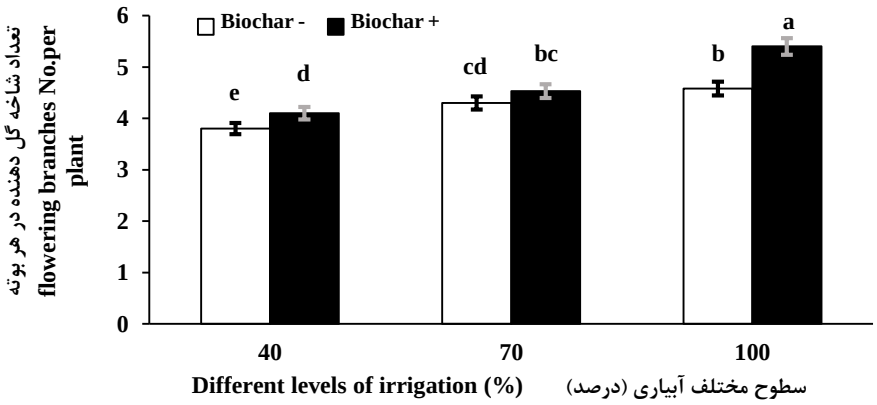


شکل ۵. مقایسه میانگین تعداد شاخه فرعی سیاه‌دانه در سطوح مختلف آبیاری (۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و کاربرد بیوچار

Fig. 5. Mean square comparison of secondary branches number in black cumin under different irrigation levels (40, 70, and 100% of field capacity) and biochar application.

تعداد شاخه گل دهنده

بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس اثر متقابل سطوح آبیاری و کاربرد بیوچار بر تعداد شاخه گل دهنده معنی‌دار بود (جدول ۳). تنش خشکی باعث کاهش تعداد شاخه گل دهنده در گیاه سیاه‌دانه شد و کم‌ترین تعداد شاخه گل دهنده در آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی خاک و عدم کاربرد بیوچار (۲/۳ شاخه گل دهنده در بوته) و بیشترین تعداد شاخه گل دهنده در آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و کاربرد بیوچار (۵/۴ شاخه گل دهنده در بوته) مشاهده شد (شکل ۶). در نتایج تحقیقات قبلی نیز، محققین عنوان داشتند در شرایط آبیاری مطلوب همبستگی مثبتی بین تعداد شاخه گل‌دهنده در گیاه با پتانسیل ژنتیکی گیاه وجود داشت، به‌طوری‌که آبیاری مناسب موجب رشد رویشی بهتر و افزایش تعداد شاخه گل‌دهنده سیاه‌دانه گردید (Bannayan et al., 2008).



شکل ۶. مقایسه میانگین تعداد شاخه گل دهنده سیاه‌دانه در سطوح مختلف آبیاری (۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و کاربرد بیوچار

Fig. 6. Mean square comparison of flowering branches number in black cumin under different irrigation levels (40, 70, and 100% of field capacity) and biochar application.

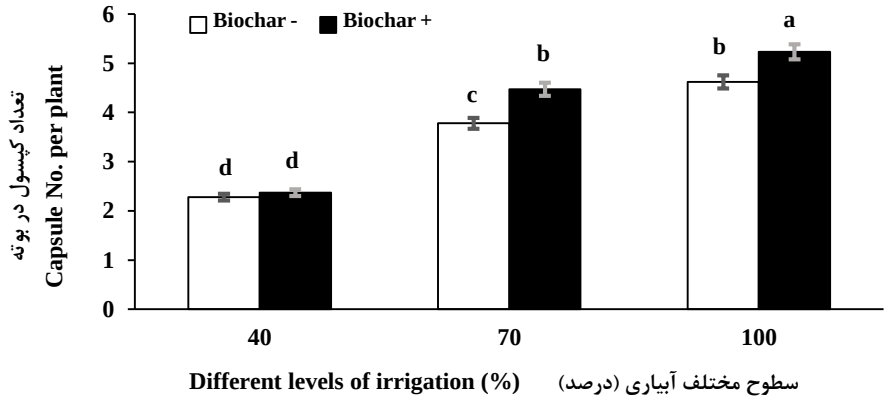
تعداد کپسول در بوته

اثر متقابل سطوح آبیاری و کاربرد بیوچار بر تعداد کپسول در بوته سیاه‌دانه معنی‌دار بود ($P<0.01$) (جدول ۳). تنش خشکی باعث کاهش تعداد کپسول در بوته شد و کمترین تعداد کپسول در بوته در تیمار آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی خاک مشاهده شد. در سطح آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی میان کاربرد و عدم کاربرد بیوچار اختلاف معنی‌دار وجود نداشت اما در سطوح آبیاری ۷۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی بین کاربرد و عدم کاربرد بیوچار تفاوت وجود داشت به‌طوری‌که کاربرد بیوچار سبب افزایش تعداد شاخه فرعی شد. در سطوح آبیاری ۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک کاربرد بیوچار نسبت به عدم کاربرد آن به ترتیب ۳/۹۵، ۱۸/۲۵ و ۱۳/۲ درصد تعداد کپسول در بوته را افزایش داد (شکل ۷). تعداد کپسول در بوته تا حدودی از تعداد شاخه گل‌دهنده تبعیت می‌کند، با توجه به اینکه تعداد شاخه گل-دهنده در تیمار آبیاری کامل بیشتر از تیمارهای آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی خاک بود (شکل ۶)، درنتیجه تعداد کپسول در بوته بیشتری داشت. در همین راستا پژوهشگران بیان داشتند که تنش خشکی با تغییر در خصوصیات فیزیولوژیکی سبب کاهش تعداد کپسول در سیاه‌دانه گردید (Ozer et al., 2020).

تعداد دانه در بوته

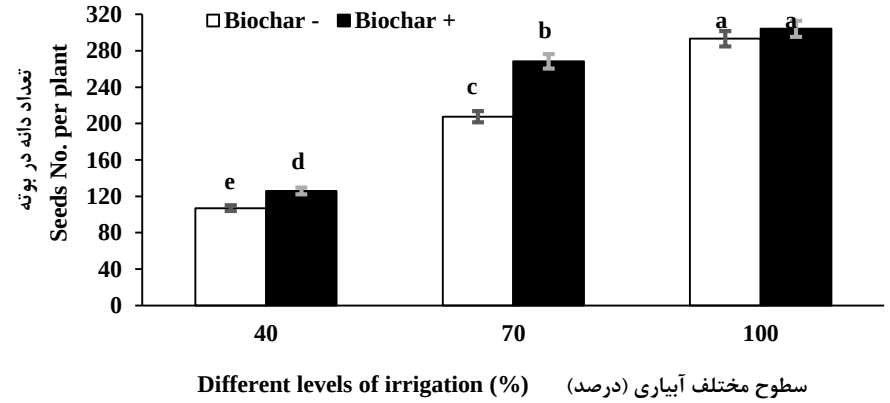
اثر متقابل سطوح آبیاری و کاربرد بیوچار بر تعداد کپسول در بوته سیاه‌دانه معنی‌دار بود (جدول ۳). در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی میان کاربرد و عدم کاربرد بیوچار اختلاف معنی‌دار وجود نداشت اما در سطوح آبیاری ۴۰ و ۷۰ درصد ظرفیت زراعی بین کاربرد و عدم کاربرد بیوچار تفاوت وجود داشت. در سطوح آبیاری ۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک، کاربرد بیوچار نسبت به عدم کاربرد آن به ترتیب ۱۷/۵۹، ۲۹/۳۶ و ۳/۷۲ درصد تعداد دانه در بوته را افزایش داد (شکل ۸). کاهش تعداد دانه در بوته سیاه‌دانه در اثر تشدید کمبود آب بیشتر متأثر از کاهش تعداد کپسول در بوته و کاهش دانه‌بندی است. سایر محققین در بررسی تأثیر کاربرد

بیوچار بر سیاه‌دانه تحت شرایط کمبود آب بیان داشتند، بیوچار به دلیل توانایی بیوچار در جذب و نگهداری عناصر غذایی و جلوگیری از آبشویی آن‌ها و درنتیجه دسترسی بهتر گیاه به مواد غذایی و رشد بهینه سیاه‌دانه، سبب افزایش تعداد دانه در بوته شد (Abbaspour et al., 2017).



شکل ۷. مقایسه میانگین تعداد کپسول در بوته سیاه‌دانه در سطوح مختلف آبیاری (۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و کاربرد بیوچار

Fig. 7. Mean square comparison of capsule number per plant in black cumin under different irrigation levels (40, 70, and 100% of field capacity) and biochar application.



شکل ۸. مقایسه میانگین تعداد دانه در بوته سیاه‌دانه در سطوح مختلف آبیاری (۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و کاربرد بیوچار

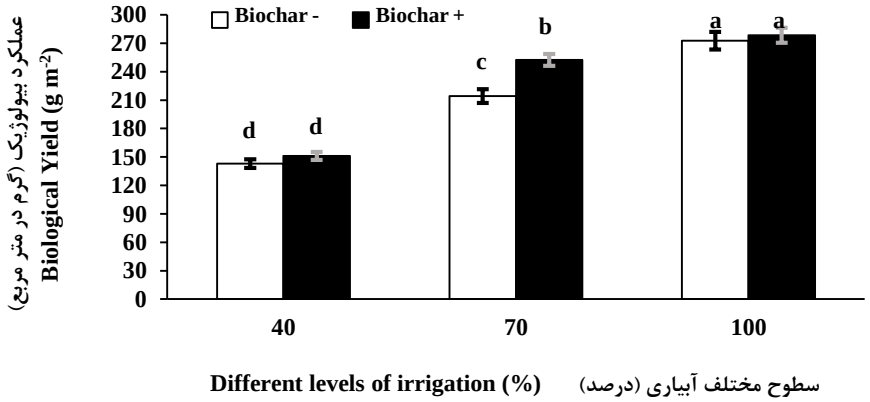
Fig. 8. Mean square comparison of seed number per plant in black cumin under different irrigation levels (40, 70, and 100% of field capacity) and biochar application

.

عملکرد بیولوژیک

اثر متقابل سطوح آبیاری و کاربرد بیوچار بر عملکرد بیولوژیک سیاه‌دانه معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین عملکرد بیولوژیک با کاربرد بیوچار و در شرایط آبیاری کامل به دست آمد و بروز تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار عملکرد بیولوژیک گردید. در سطوح آبیاری ۴۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی میان کاربرد و عدم کاربرد بیوچار اختلاف معنی‌دار وجود نداشت اما در سطح آبیاری ۷۰ درصد ظرفیت زراعی بین کاربرد و عدم کاربرد بیوچار تفاوت وجود داشت (شکل ۹). تنش خشکی با کاهش محتوای نسبی آب برگ (شکل ۱)، باعث تجزیه کلروفیل (شکل ۲) و کاهش در میزان فتوسنتز (شکل ۳) گردید. کاهش رشد رویشی ناشی از کاهش فتوسنتز منجر به کاهش ارتفاع گیاه سیاه‌دانه (شکل ۴) و کاهش در تعداد شاخه های فرعی و گل دهنده (شکل‌های ۵ و ۶) گردید. درنهایت مجموع این عوامل باعث کاهش تولید ماده خشک سیاه‌دانه شد که با نتایج تحقیقات سایر پژوهشگران همخوانی دارد (Ozer et al., 2020). از سوی دیگر بیوچار به دلیل جلوگیری از خروج آب از بافت‌ها (افزایش محتوای نسبی آب

برگ که در شکل ۱ مشاهده شد) و ممانعت از فعالیت برخی از عوامل تخریب‌کننده فتوسنتز (جلوگیری از تجزیه کلروفیل و افزایش کارایی فتوسنتز که در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده شد)، موجب افزایش تولید ماده خشک نسبت به عدم کاربرد بیوچار در شرایط تنش خشکی شد. رشد و عملکرد گیاهان معمولاً طی تنش خشکی کاهش می‌یابند، درحالی‌که کاربرد بیوچار تحت شرایط تنش خشکی، رشد و عملکرد بیولوژیک گیاه را افزایش می‌دهد، کاربرد بیوچار در خاک موجب افزایش فتوسنتز، جذب مواد مغذی و بهبود ویژگی‌های تبادل گازی در گیاهان می‌گردد (Ali et al., 2017). نتایج سایر تحقیقات نشان داد کاربرد بیوچار در خاک با بافت شنی تحت شرایط کمبود آب سبب افزایش عملکرد بیولوژیک گندم گردید (Ibrahim et al., 2015).

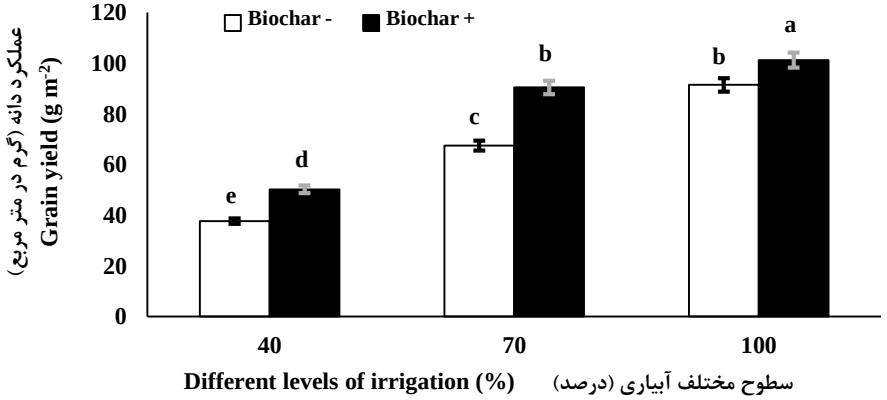


شکل ۹. مقایسه میانگین عملکرد بیولوژیک سیاه‌دانه در سطوح مختلف آبیاری (۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و کاربرد بیوچار

Fig. 9. Mean square comparison of biological yield in black cumin under different irrigation levels (40, 70, and 100% of field capacity) and biochar application.

عملکرد دانه

اثر متقابل سطوح آبیاری و کاربرد بیوچار بر عملکرد دانه سیاه‌دانه معنی‌دار بود (جدول ۳). عملکرد دانه سیاه‌دانه تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری قرار گرفت، به‌نحوی‌که افزایش شدت تنش خشکی باعث کاهش عملکرد دانه شد. بیشترین عملکرد دانه به تیمار آبیاری کامل و کاربرد بیوچار (۱۰۱/۲ گرم در مترمربع) تعلق داشت و کمترین عملکرد دانه از تنش خشکی شدید و عدم کاربرد بیوچار (۳۷/۶ گرم در مترمربع) حاصل شد. در سطوح آبیاری ۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک، کاربرد بیوچار نسبت به عدم کاربرد آن به ترتیب ۳۳/۵۱، ۳۴/۱۲ و ۱۰/۷۲ درصد، عملکرد دانه را افزایش داد (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. مقایسه میانگین عملکرد دانه سیاه‌دانه در سطوح مختلف آبیاری (۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و کاربرد بیوچار

Fig. 10. Mean square comparison of grain yield in black cumin under different irrigation levels (40, 70, and 100% of field capacity) and biochar application.

تنش خشکی موجب یک توالی از اتفاقات ازجمله کاهش محتوای نسبی آب برگ، تجزیه کلروفیل و درنهایت کاهش فتوسنتز شد می‌توان اظهار داشت که تنش خشکی با تأثیر منفی بر فتوسنتز، موجبات کاهش رشد و عملکرد را فراهم نمود. دراین‌ارتباط محققان دیگری نیز عنوان داشتند که تنش خشکی باعث کاهش عملکرد سیاه‌دانه شد (Rezaei-Chiyaneh et al., 2018; Haj Seyed Hadi et al., 2016). از سوی دیگر بیوچار با توجه به رهاسازی آهسته عناصر غذایی، سبب بهبود کارایی عناصر غذایی گشته و درنهایت افزایش عملکرد سیاه‌دانه را در پی داشته است (Ali et al., 2017). بر اساس گزارش محققین، کاربرد بیوچار بهبود شرایط خاک را در پی دارد که منجر به کاهش تأثیر منفی کم‌آبیاری و افزایش رشد رویشی، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه می‌گردد (Abideen et al., 2020). ازآنجایی‌که در مطالعه حاضر تأثیر کاربرد بیوچار نسبت به عدم کاربرد آن در سطح ۷۰ درصد ظرفیت زراعی نسبت به سایر سطوح آبیاری سبب افزایش بیشتر عملکرد دانه شده است و با توجه به عدم اختلاف معنی‌دار تیمار ۷۰ درصد ظرفیت زراعی همراه بیوچار با تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی بدون بیوچار (شکل ۱۰) و هم‌چنین با توجه به مسئله بحران آب، به نظر می‌رسد تیمار توأم بیوچار و سطح دوم ظرفیت زراعی با نگرشی همه‌جانبه و توجه به مدیریت منابع ارزشمندی چون آب، گزینه برتر ازلحاظ عملکرد دانه باشد.

نتیجه‌گیری نهایی

بر اساس نتایج این پژوهش، کاربرد بیوچار توانست با افزایش نگهداشت آب، اثرات زیان‌بار تنش خشکی را تقلیل دهد و خصوصیات مورفوفیزیولوژیک و عملکرد سیاه‌دانه را بهبود بخشد؛ بنابراین بیوچار می‌تواند به‌عنوان نهاده‌ای مفید برای دستیابی به اهداف کشاورزی پایدار و کاهش اثرات تنش خشکی، در تحقیقات بیشتری به‌ویژه در سطح مزارع کشور موردبررسی قرار گیرد.

قدردانی

از دانشگاه کردستان جهت حمایت مالی این پژوهش قدردانی می‌گردد.

منابع

Abbaspour, F., Asghari, H.R., Rezvani Moghaddam, P., Abbasdokht, H., Shabahang, J., Baig Babaei, A., 2017. Effects of biochar application on yield and yield components of black seed (*Nigella sativa* L.) under low irrigation conditions. Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants. 33, 837-852. [In Persian]. https://doi.org/10.22067/GSC.V17I1.63344

Abeer, H., Abd_Allah, E.F., Alqarawi, A.A., Egamberdieva, D., 2015. Induction of salt stress tolerance in cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) by arbuscular mycorrhizal fungi. Legume Research. 38, 579-88. https://doi.org/10.18805/lr.v38i5.5933

Abideen, Z., Koyro, H.W., Huchzermeyer, B., Ansari, R., Zulfiqar, F., Gul, B., 2020. Ameliorating effects of biochar on photosynthetic efficiency and antioxidant defence of Phragmites karka under drought stress. Plant Biology. 22, 259-266. https://doi.org/10.1111/plb.13054

Akhtar, S.S., Andersen, M.N., Liu, F., 2014. Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation. Agriculture of Water Management. 138, 37-44. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.02.016

Akhtar, S.S., Andersen, M.N., Liu, F., 2015. Residual effects of biochar on improving growth, physiology and yield of wheat under salt stress. Agriculture of Water Management. 158, 61-68. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.04.010

Akhtar, S.S., Andersen, M.N., Liu, F., 2015. Biochar mitigates salinity stress in potato. Journal of Agronomy and Crop Science. 201, 368–378. https://doi.org/10.1111/jac.12132

Alhaj, N.A., Shamsudin, M.N., Alipiah, N.M., Zamri, H.F., Bustamam, A., Ibrahim, S., Abdullah, R., 2010. Characterization of *Nigella sativa* L. Essential oil-loaded solid lipid nanoparticles. American Journal of Pharmacology and Toxicology. 5, 52-57. https://doi.org/10.3844/ajptsp.2010.52.57

Ali, S., Rizwan, M., Qayyum, M.F., Ok, Y.S., Ibrahim, M., 2017. Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants: a critical review. Environmental Science and Pollution Research. 24, 1270-1277. https://doi.org/10.1007/s11356-017-8904-x

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

Bannayan, M., Nadjafi, F., Azizi, M., Tabrizi, L., Rastgoo, M., 2008. Yield and seed quality of *Plantago ovate* and *Nigella sativa* under different irrigation treatments. Industrial Crops and Products. 27, 11-16. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.05.002

Barrow, C.J., 2012. Biochar: potential for countering land degradation and for improving agriculture. Applied Geography. 34, 21–28. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.09.008

Bodner, G., Nakhforoosh, A., Kaul, H.P., 2015. Management of crop water under drought: a review. Agronomy for Sustainable Development. 35, 401-442. https://doi.org/10.1007/s13593-015-0283-4

Ferlito, F., Torrisi, B., Allegra, M., Stagno, F., Caruso, P., Fascella, G. 2020. Evaluation of conifer wood biochar as growing media component for citrus nursery. Applied Sciences. 10, 1618. https://doi.org/10.3390/app10051618

Haj Seyed Hadi, M.R., Darzi, M.T., Riazi, G.H., 2016. Black cumin (*Nigella sativa* L.) yield affected by irrigation and plant growth promoting bacteria. Journal of Medicinal Plants and By-Products. 2, 125-133. https://doi.org/10.22092/JMPB.2016.109388

Hussain, H.A., Men, S., Hussain, S., 2019. Interactive effects of drought and heat stresses on morpho-physiological attributes, yield, nutrient uptake and oxidative status in maize hybrids. Scientific Reports. 9, 30-39. https://doi.org/10.1038/s41598-019-40362-7

Ibrahim, O.M., Bakry, A.B., El-Kramany, M.F., Elewa, T.A., 2015. Evaluating the role of biochar application under two levels of water requirements on wheat production under sandy soil conditions. Global Journal of Advanced Research. 2, 411-418.

Jeon, M.W., Ali, M.B., Hahn, E.J., Paek, K.Y., 2006. Photosynthetic pigments, morphology and leaf gas exchange during ex-vitro acclimatization of micropropagated CAM Doritaenopsis plantlets under relative humidity and air temperature. Environmental and Experimental Botany. 55, 183-194. https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2004.10.014

Jiang, Z., Lian, F., Wang, Z., Xing, B., 2020. The role of biochars in sustainable crop production and soil resiliency. Journal of Experimental Botany. 71, 520-542. . https://doi.org/10.1093/jxb/erz301

João, V.A.C., Joaquim, A.G.S., Fabrício, E.L.C., Juliana, R.C., Milton, C.L.N., 2019, The regulation of P700 is an important photoprotective mechanism to NaCl-salinity in Jatropha curcas. Physiologia Plantarum. 167, 404-417. https://doi.org/10.1111/ppl.12908.

Kabiri, R., Nasibi, F., Farahbakhsh, H., 2014, Effect of exogenous salicylic acid on some physiological parameters and alleviation of drought stress in *Nigella sativa* plant under hydroponic culture. Plant Protection Science. 50, 43-51. https://doi.org/10.17221/56/2012-PPS

Kloss, S., Zehetner, F., Wimmer, B., Buecker, J., Rempt, F., Soja, G., 2014. Biochar application to temperate soils: effects on soil fertility and crop growth under greenhouse conditions. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 177, 3–15. https://doi.org/10.1002/jpln.201200282

Maman, N., Mason, S.C., Lyon, D.J., Dhungana, P., 2004. Yield components of pearl millet and grain sorghum across environments in the Central Great Plains. Crop Science. 44, 2138-2145. https://doi.org/10.2135/cropsci2004.2138

Mehmood, S., Saeed, D.A., Rizwan, M., Khan, M.N., Aziz, O., Bashir, S., Ibrahim, M., Ditta, A., Akmal, M., Mumtaz, M.A., 2018. Impact of different amendments on biochemical responses of sesame (*Sesamum indicum* L.) plants grown in lead-cadmium contaminated soil. Plant Physiology Biochemestry. 132, 345-355. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.09.019

Merajipoor, M., Movahhedi Dehnavi, M., Salehi, A., Yadavi, A., 2020. Improving grain yield, water and nitrogen use efficiency of Nigella sativa with biological and chemical nitrogen under different irrigation regimes. Scientia Horticulturae. 260, 1-8. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108869

Naumann, G., Alfieri, L., Wyser, K., Mentaschi, L., Betts, R. A., Carrao, H., 2018. Global changes in drought conditions under different levels of warming. Geophysical Research Letters, 45, 3285-3296. https://doi.org/10.1002/2017GL076521

Ozer, H., Cobana, F., Sahinb, U., Orsb S., 2020. Response of black cumin (*Nigella sativa* L.) to deficit irrigation in a semi-arid region: Growth, yield, quality, and water productivity. Industrial Crops and Products, 144, 11-18. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.112048

Rezaei-Chiyaneh, E., Seyyedi, S., Ebrahimian, M., Siavash, E., Moghaddam, S., Damalas, C.A., 2018. Exogenous application of gamma-aminobutyric acid (GABA) alleviates the effect of water deficit stress in black cumin (*Nigella sativa* L.). Industrial Crops and Products, 112, 741-748. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.067

Sattar, A., Sher, A., Ijaz, M., Irfan, M., Butt, M., Abbas1, T., Hussain, S., Abbas, A., Ullah, M.S., Cheema. M.A., 2019. Biochar Application Improves the Drought Tolerance in maize Seedlings. Phyton, International Journal of Experimental Botany. 88, 379-388. https://doi.org/10.32604/phyton.2019.04784

Seleiman, M.F., Refary, Y., Al-Suhaibani, N., Al-Ashkar, I., El-Hendawy, S., Hafez, E.M., 2019. Integrative effects of rice-straw biochar and silicon on oil and seed quality, yield and physiological traits of *Helianthus annuus* L. grown under water deficit stress. Agronomy. 9, 637.https://doi.org/10.3390/agronomy9100637

Semida, W.M., Beheiry, H.R., Setamou, M., Simpson, C.R., Abd El-Mageed, T.A., Rady, M.M., Nelson, S.D., 2019. Biochar implications for sustainable agriculture and environment: A review. South African Journal of Botany. 127, 333-347. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.11.015

Shimakawa, G., Miyake, C., 2018. Oxidation of P700 Ensures Robust Photosynthesis. Frontiers in Plant Science. 172, 1443-1450. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01617

Takagi, D., Ishizaki, K., Hanawa, H., Mabuchi, T., Shimakawa, G., Yamamoto, H., Miyake, C., 2017. Diversity of strategies for escaping reactive oxygen species production within photosystem I among land plants: P700 oxidation system is prerequisite for alleviating photoinhibition in photosystem I. Physiology Plant. 161, 56-74. https://doi.org/10.1111/ppl.12562

Zhang, M., Ok, Y.S., 2014. Biochar soil amendment for sustainable agriculture with carbon and contaminant sequestration. Carbon Management. 5, 255–257. https://doi.org/10.1080/17583004.2014.973684