University of Birjand

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

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses In Crop Sciences

Vol. 16, No. 2, pp. 561-574 (Summer 2023)

http://dx.doi.org/10.22077/escs.2023.4823.2076

Original article

Investigation the impacts of mineral biochar and methyl jasmonate application on biochemical characteristics and yield of barley under drought stress

S. Nasiri[1*], B. Andalibi[2], A. Tavakoli Zaniani[2], M.A. Delavar[3]

1. PhD student of Plant Physiology and Crop Production, University of Zanjan, Zanjan, Iran
2. Assistant Professor, Departement of Genetics and Plant Production, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran
3. Associate Professor, Departement of Genetics and Plant Production, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran
4. Associate Professor, Departement of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Received 30 October 2021; Accepted 28 November 2021

Extended abstract

Introduction

Barley (*Hordeum vulgare* L.) is among the most important cereal crops and large portions of human populations in many parts of the world depend on them as a source of food and animal feed. Drought is one of the most important environmental stresses which affects yield and yield components of plants significantly which plants respond and adapt to drought stress by means of various morphological, biochemical and physiological changes. Nowadays Biochar has been employed for scientific and commercial usage as a soil amendment for improving the productivity of crops. Results of researchs showes that Biochar makes a great contribution in crop plant's growth. For instance investigations showed that drought stressed chickpea plants exhibited considerable reduction in uptake of nitrogen and phosphorous which was ameliorated by Biochar treatments. Jasmonic acid (JA) and its methyl ester, methyl jasmonate (MeJA) are important cellular regulators involved in many growth, developmental and physiological processes. It was found that exogenous application of MeJA improved tolerance to drought, salinity, chilling (Rehman et al., 2018) and heavy metal stresses in different plant species.

Materials and methods

In order to investigation of the impacts of different levels of mineral biochar and methyl Jasmonate on growth, yield and yield components of spring barley under different levels of drought stress a factorial experiment in randomized complete block design in pots in 5 replications was done in 2019-2020 at the experimental field of university of Zanjan. Reviewed factors included in three levels of drought stress (100% FC as the none stressed, 60% FC as the mild stress and 30% FC as the severe stress), biochar application before cultivation in three levels (without biochar, 1.5% and 3% of the soil weight) and foliar spraying of methyl Jasmonate in three levels (0, 75 and 150 µmol per liter Studied factors included electrolyte leakage, proline and photosynthetic pigments concentration, water use efficiency, relative water content and economical yield.

[*]Corresponding author: Sajjad Nasiri; E-Mail: sajjadnasiri1989@yahoo.com

© 2023, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Results and discussion

Results showed a significant impact of used treats on most of the characteristics. All studied factors in this experiment including WUE, RWC, proline, EL, photosynthetic pigments and yield were affected by drought stress but 1.5% biochar and 75 µmole per liter methyl Jasmonate resulted in enhancement of studied factors of stressed plants both in 60% of FC and in 30% of FC in comparison to untreated plants. But increasing in usage of these materials didn't have any positive impact on studied plants. The highest economical yield was obtained in normal irrigation circumstance with foliage application of 75 µmole per liter of methyl jasmonate and using 1.5% of biochar per soil weight and the lowest yield was obtained when we used 30% of field capacity in irrigation without using methyl jasmonate.

Conclusion

We can find out from these results that as a whole drought in middle and severe levels can be disastrous for both morphological and physiological characteristics of every plant which results in reduction in economical yield. But it's necessary to mention this point that using stress moderator materials whether materials which are used in soil like Biochar or plant growth regulators like methyl Jasmonate which are known as the anti stress substances cause moderation in the catastrophic effects of drought stress which through enhancing some indexes like the relative water content and ameliorating of water use efficiency in comparison to untreated plants with these materials can diminish the severe impacts of stress and eventually through boosting economical yield can dwindle damages of drought. Nevertheless it's absolutely comprehensible from the results of the experiment that using too much of these materials not only do not have any positive effect on growth, physiological or biochemical indicators under drought stress but also can reduce these characteristics even to lower than their quantity in untreated plants.

***Keywords*:** Abiotic stress, Barley, Chlorophyll, Electrolyte leakage, Proline

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد شانزدهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۲

http://dx.doi.org/10.22077/escs.2023.4823.2076

مقاله پژوهشی

بررسی اثرات کاربرد بیوچار معدنی و متیل جاسمونات بر صفات بیوشیمیایی و عملکرد جو تحت شرایط تنش خشکی

سجاد نصیری[۱*]، بابک عندلیبی[۲]، افشین توکلی زانیانی[۳*]، محمد امیر دلاور[۴]

۱. دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی دانشگاه زنجان
۲. استادیار گروه ژنتیک و تولید گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان
۳. دانشیار گروه ژنتیک و تولید گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان
۴. دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
تنش محیطی
جو
پرولین
نشت الکترولیت
کلروفیل

تاریخ دریافت:
۱۴۰۰/۰۸/۰۸

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۰/۰۹/۰۷

تاریخ انتشار:
تابستان ۱۴۰۲

۱۶(۲): ۵۶۱-۵۷۴

چکیده

خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی است که عملکرد و اجزای عملکرد گیاهان را به‌صورت چشمگیری تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌منظور بررسی اثرات سطوح مختلف بیوچار معدنی و هورمون متیل جاسمونات بر رشد، عملکرد و اجزای عملکرد جو بهاره تحت سطوح مختلف تنش خشکی آزمایشی به‌صورت گلدانی به‌صورت فاکتوریل ۳ عاملی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در ۵ تکرار در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه زنجان انجام شد. فاکتورهای موردبررسی شامل سطح تنش خشکی در سه سطح شامل بدون تنش (در حد ظرفیت زراعی)، تنش متوسط (۶۰ درصد ظرفیت زراعی) و تنش شدید (۳۰ درصد ظرفیت زراعی)، کاربرد بیوچار قبل از کشت در سه سطح شامل بدون بیوچار (شاهد) و مقادیر ۱،۵ و ۳ درصد وزن خاک و همچنین محلول‌پاشی متیل جاسمونات در مرحله گلدهی در سه سطح (۰، ۷۵ و ۱۵۰ میکرومول بر لیتر) بود. شاخص‌های اندازه‌گیری شده شامل نشت الکترولیت، غلظت پرولین و رنگیزه‌های فتوسنتزی، کارایی مصرف آب و محتوای نسبی آب برگ و همچنین عملکرد اقتصادی بود. نتایج حاکی از اثر معنی‌دار تیمارهای اعمال‌شده بر اکثر این شاخص‌ها بود. تمامی شاخص‌های موردبررسی در این آزمایش ازجمله کارایی مصرف آب، محتوای نسبی آب برگ، پرولین، نشت الکترولیت، رنگیزه‌های فتوسنتزی و عملکرد تحت تأثیر منفی تنش خشکی قرار گرفتند. بیشترین عملکرد در شرایط آبیاری نرمال و تیمار ۷۵ میکرومول بر لیتر متیل جاسمونات و ۱،۵ درصد وزن خاک بیوچار به دست آمد (۰/۳۷ گرم در بوته) و کمترین میزان عملکرد (۰/۱۹ گرم در بوته) در تنش خشکی ۳۰ درصد ظرفیت زراعی و بدون محلول‌پاشی متیل جاسمونات ایجاد شد. به‌طور مشخص استفاده از مقادیر پایین بیوچار و متیل جاسمونات باعث بهبود وضعیت گیاهان تنش دیده هم در سطح تنش شدید و هم تنش ملایم نسبت به شاهد بدون تیمار شدند؛ اما افزایش سطح استفاده از این دو ماده اثر مثبت چندانی در گیاهان نداشت.

مقدمه

جو (*Hordeum vulgare* L.) یکی از مهم‌ترین و قدیمی‌ترین گیاهان زراعی است که بیشترین سازش به شرایط اقلیمی مختلف را نسبت به دیگر گیاهان زراعی نشان می‌دهد و به‌عنوان چهارمین غله مهم از لحاظ تولید بعد از گندم، ذرت و برنج در سراسر دنیا کشت می‌شود (Thabet et al., 2020). یکی از دلایل عملکرد پایین این محصول، کشت آن در مناطق دیم مستعد تنش و نیز بروز تنش رطوبتی در مراحل انتهایی رشد در کشت‌های آبی است (Siosemardeh et al., 2014).

تنش خشکی مهم‌ترین عامل در کاهش عملکرد گیاهان زراعی به شمار می‌آید که عکس‌العمل گیاهان مختلف و حتی ارقام مختلف یک گیاه نسبت به تنش خشکی متفاوت است. اولین واکنش نسبت به تنش خشکی یک واکنش فیزیکی در

* نگارنده پاسخگو: سجاد نصیری. پست الکترونیک: sajjadnasiri1989@yahoo.com

سلول‌هاست که در آن با چروکیده شدن سلول و سست شدن آن توسعه سلولی تحت تأثیر منفی قرار می‌گیرد و با کاهش حجم سلول پتانسیل فشاری کم شده و در این شرایط توسعه سلولی که وابسته به پتانسیل فشاری است کاهش می‌یابد که این منجر به کاهش رشد می‌شود (Thabet et al., 2020). تنش خشکی می‌تواند برخی خصوصیات فیزیولوژیکی برگ-های گیاه مانند میزان فتوسنتز برگ و تعرق و هدایت روزنه‌ای را تحت تأثیر منفی قرار دهد که این موضوع تولید محصول را متوقف می‌کند (Zhang et al., 2020).

به‌طورکلی کم‌آبی باعث بروز دامنه وسیعی از تغییرات بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی می‌شود که شروع آن با کاهش پتانسیل اسمزی در سطح سلولی همراه است (Fifaei et al., 2014). بسیاری از گیاهان با تجمع ترکیبات آلی مانند اسیدآمینه پرولین به تنش آبی پاسخ می‌دهند که تجمع این مواد در سلول‌ها باعث کاهش پتانسیل اسمزی شده و این کاهش باعث بهبود خاصیت جذب آب در سلول و حفظ پتانسیل فشاری می‌شود که این موضوع به‌نوبه خود باعث بهبود کارکرد فیزیولوژیکی گیاه مانند باز و بسته شدن روزنه‌ها، فتوسنتز، رشد و توسعه سلولی می‌شود (Zhang et al., 2015). مشخص شده است که تنش‌های محیطی باعث شکل‌گیری اکسیژن‌های فعال (ROS) می‌شوند که این مولکول‌ها باعث پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء، تخریب پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک شده و محتوای کلروفیل سلول کاهش می‌یابد که این باعث کاهش مقاومت گیاه در برابر تنش می‌شود (Naeemi et al., 2018). علاوه بر آن پرولین در حفاظت ساختار سلولی در برابر خسارات اکسایشی گونه‌های فعال اکسیژن و رادیکال‌های آزاد مؤثر بوده و به‌عنوان منبع ذخیره کربن و نیتروژن برای ادامه رشد گیاه بعد از رهایی از تنش مطرح است (Fifaei et al., 2014).

بیوچار یک ماده زیستی گرماکافت شده است که طی فرایند گرماکافت، مواد آلی در حضور اکسیژن کم یا بدون اکسیژن سوخته و منجر به تشکیل زغال غنی از کربن می‌شود که این نوع زغال بسیار مقاوم به تجزیه است (Azeem et al., 2016). نتایج تحقیقات نشان داده که میانگین زمان اقامت بیوچار در خاک از صدها تا هزاران سال است (Verheijen et al. 2009). نتایج آزمایش عباس‌پور و همکاران (Abbaspour et al., 2019) نشان داد که کاربرد بیوچار به میزان ۱۰ تن در هکتار باعث افزایش کارایی مصرف آب در سیاه‌دانه تحت تنش خشکی شد. در مطالعه‌ای بر روی تأثیر بیوچار و مایکوریزا در تعدیل اثرات تنش خشکی در گیاه نخود مشخص شد که تنش خشکی اثر معنی‌داری بر طول ساقه و ریشه و سطح برگ و تعداد شاخه‌های اولیه و ثانویه نسبت به شاهد بدون بیوچار گذاشت و این شاخص‌ها را به‌شدت کاهش داد اما استفاده از بیوچار در تمامی صفات مورفولوژیک باعث بهبود وضعیت رشدی نسبت به شرایط تنش بدون بیوچار شد (Inal et al., 2015). همچنین در آزمایشی دیگر گزارش شد که استفاده از بیوچار می‌تواند یک روش خوب برای مراقبت از گیاهان در شرایط تنش بوده و باعث جلوگیری از بعضی از اثرات مخرب تنش خشکی شود (Hashem et al., 2019). این موضوع می‌تواند به خاطر تأثیر بیوچار در فعالیت انتقال پروتئین‌هایی که در غشاها قرار دارند و در توسعه دیواره سلولی و طویل شدن سلول نقش دارند باشد (Ahmad et al., 2014; Trupiano et al., 2017).

جاسمونات‌ها و مشتقات آن گروهی از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی محسوب می‌شوند که در طی زمان وقوع تنش خشکی تجمع پیدا می‌کنند و تولید و پیام‌رسانی آن باعث تسریع پاسخ به تنش خشکی می‌شود (Seo et al., 2011; Andrade et al., 2017). نتایج آزمایش‌ها نشان داده که در بسیاری از گونه‌های گیاهی، کاربرد خارجی جاسمونات یا مشتقات متیله شده آن (متیل جاسمونات) در شرایط تنش خشکی، باعث افزایش سرعت فتوسنتز، محتوای نسبی آب برگ، افزایش غلظت کلروفیل، گلایسین بتائین و پرولین و کاهش پراکسیداسیون چربی و خسارت به غشاء شده است. هرچند این تأثیرات بین گونه‌های مختلف گیاهی متفاوت بوده است و همه گیاهان زراعی تحت تنش خشکی نسبت به تیمار متیل جاسمونات پاسخ مثبت نداده‌اند (Anjum et al., 2016; Rohwer and Erwin, 2008; Gao et al., 2004; Riemann et al., 2015). همچنین نتایج تحقیقات دیگری نشان داد که تیمار با متیل جاسمونات در سطح ۱ و ۱۰ میکرومول می‌تواند اثرات تنش متوسط و شدیدی را بر محتوای نسبی آب، فتوسنتز خالص، کربن زیر روزنه و کارایی مصرف آب در چغندرقند کاهش داده و باعث تعدیل تأخیر در پسابیدگی و حفظ کارکرد دستگاه فتوسنتزی در شرایط تنش خشکی شود (Fugate et al., 2018).

با توجه به مشکل روزافزون کم‌آبی و عدم مدیریت صحیح این معضل جهانی، این پژوهش به‌منظور مطالعه تأثیر کاربرد سطوح مختلف بیوچار و محلول‌پاشی متیل جاسمونات بر برخی خصوصیات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و عملکرد جو

بینابین رقم آبیدر در شرایط سطوح ملایم و شدید تنش خشکی در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ انجام شد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی اثرات بیوچار معدنی و هورمون متیل جاسمونات در شرایط تنش خشکی ملایم و شدید آزمایشی به‌صورت آزمایش فاکتوریل ۳ عاملی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۵ تکرار در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان به اجرا درآمد. در این آزمایش سه سطح تنش خشکی یعنی شرایط بدون تنش با ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی (شاهد)، تنش متوسط (۶۰ درصد ظرفیت زراعی) و تنش شدید (۳۰ درصد ظرفیت زراعی) بر گیاهان اعمال شد. گیاهان در مرحله گلدهی کامل توسط سه سطح متیل جاسمونات (صفر، ۷۵ و ۱۵۰ میکرومول بر لیتر) محلول‌پاشی شدند و همچنین در تیمار مربوط به بیوچار سه سطح بدون بیوچار به‌عنوان شاهد، ۱/۵٪ و ۳٪ وزن خاک از ابتدای کاشت در بستر کشت گلدانی اعمال شد. بر این اساس وزن یک هکتار خاک را طبق وزن مخصوص ظاهری خاک منطقه به دست آورده و با نسبت و تناسب ساده ریاضی مقدار بیوچار لازم برای استفاده در ۱۰ کیلو خاک را به دست آوردیم. لازم به توضیح است که وزن مخصوص ظاهری خاک در همه انواع خاک‌ها و مناطق برابر نیست و بنابراین وزن خاک هر منطقه باید بر اساس خصوصیات فیزیکی آن تعیین شود. کشت نیز در گلدان‌های ۱۰ کیلویی انجام شد. یک ماه قبل از کاشت سطوح بیوچار در گلدان‌ها اعمال گردیده و بعد از محاسبه تراکم کشت، تعداد ۳۴ بذر جو کاشته شد و پس از رسیدن به مرحله چهار برگی بوته‌های قوی‌تر ازلحاظ فیزیکی انتخاب و ۱۷ بوته در گلدان باقی ماند. بعد از رسیدن گیاهان به مرحله گلدهی، سطوح تنش خشکی اعمال‌شده و هم‌زمان محلول‌پاشی هورمون متیل جاسمونات انجام شد. پس از رسیدن گلدان‌ها به ظرفیت زراعی موردنظر برای اعمال تنش، نمونه‌برداری از برگ‌های بوته‌های موردمطالعه انجام شد و برخی صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه ازجمله نشت الکترولیت، پرولین، رنگیزه‌های فتوسنتزی، محتوای نسبی آب برگ و کارایی مصرف آب مورد بررسی و مطالعه قرار گرفتند. عملکرد دانه نیز در انتهای فصل رشد با نمونه‌برداری از بوته‌ها انجام شد. شاخص‌های کارایی مصرف آب طبق روش مکاری و همکاران (Mokari et al., 2020) و محتوای نسبی آب برگ بر اساس روش معرفی شده توسط مونه بوش و آلگری (Munne-Bosch and Alegre, 2004) نیز با استفاده از روابط زیر محاسبه شدند.

$$WUE = \text{عملکرد اقتصادی (دانه)} / \text{کل آب مصرفی} \quad [۱]$$

$$RWC\% = (FW-DW / TW-DW)\times 100 \quad [۲]$$

در این معادله DW وزن نمونه خشک برگ، FW وزن‌تر برگ و TW وزن آماس یافته است.

اندازه‌گیری غلظت رنگیزه‌ها با استفاده از روش آرنون (Arnon,1949) انجام شد که در آن با استفاده از استون ۸۰٪ نیم گرم نمونه برگی فریز شده کوبیده شده و رنگیزه‌ها استخراج شدند و توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر میزان جذب در سه طول‌موج ۶۶۳، ۶۴۵ و ۴۷۰ نانومتر قرائت گردید و مقدار نهایی رنگیزه‌ها با استفاده از معادلات زیر محاسبه شدند :

$$Chla\ (mg/g^{-1}\ FW) = ([12.7(A663)-2.69(A645)]\times V)/(1000\times W) \quad [۳]$$

$$Chlb\ (mg/g^{-1}\ FW) = ([22.9(A645)-4.68(A663)]\times V)/(1000\times W) \quad [۴]$$

$$Carotenoid\ (mg/g^{-1}\ FW) = ([(1000\times A470)-(1.82\times chla)-(85.02\times chlb)]\times V) / (198\times 1000\times W) \quad [۵]$$

اندازه‌گیری نشت الکترولیت با استفاده از روش لوتس و همکاران (Lutts et al., 1996) انجام شد و از معادله زیر محاسبه شد.

$$EL=L1/L2\times 100 \quad [۶]$$

جهت اندازه‌گیری میزان پرولین در گیاه، از تمامی گلدان‌ها مقداری برگ در مرحله گلدهی برداشت‌شده و در فریزر ۸۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شد و در نزدیک‌ترین زمان ممکن از برگ‌ها برای اندازه‌گیری میزان پرولین با کمک روش بیتس (Bates, 1973) استفاده شد. مقدار نمونه برگی استفاده‌شده برای اندازه‌گیری این صفت ۰/۲ گرم بود. داده‌های به‌دست‌آمده به کمک نرم‌افزار SAS مورد تجزیه‌وتحلیل آماری قرار گرفتند و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان از تأثیر معنی‌دار تنش خشکی، استفاده از بیوچار و محلول‌پاشی متیل جاسمونات بر شاخص‌های نشت الکترولیت، محتوای پرولین، محتوای نسبی آب برگ، کارایی مصرف آب و رنگیزه‌های فتوسنتزی و

همچنین عملکرد در سطح ۱٪ داشت. اثر متقابل تنش خشکی و متیل جاسمونات نیز در سطح ۱٪ باعث ایجاد تغییر معنی‌دار شاخص‌های نشت الکترولیت، محتوای پرولین و میزان کلروفیل کل شد اما بر محتوای نسبی آب برگ و کارایی مصرف آب تأثیر معنی‌دار نداشت. اثر متقابل تنش خشکی و بیوچار باعث ایجاد تأثیر معنی‌دار در سطح ۵٪ بر شاخص نشت الکترولیت و میزان کلروفیل b شد اما اثر آن بر محتوای پرولین در سطح ۱٪ معنی‌دار بود و بر محتوای نسبی آب برگ و کارایی مصرف آب تأثیر معنی‌داری نداشت. اثر متقابل بیوچار و متیل جاسمونات نیز بر شاخص محتوای پرولین در سطح ۱٪ معنی‌دار بود ولی بر بقیه شاخص‌ها اثر معنی‌دار نداشت. همچنین اثر متقابل سه‌گانه تنش، متیل جاسمونات و بیوچار باعث ایجاد تغییر معنی‌دار در شاخص محتوای پرولین در سطح ۱٪ شد و در بقیه شاخص‌ها تأثیر معنی‌دار ایجاد نکرد (جدول ۱، ۲ و ۳).

محتوای نسبی آب برگ

بالاترین میزان محتوای نسبی آب برگ در تیمار شاهد بدون تنش و با استفاده از ۱/۵ درصد وزن خاک بیوچار به دست آمد (۸۱ درصد) و کمترین میزان محتوای نسبی آب برگ (۵۹ درصد) در تنش ۳۰ درصد ظرفیت زراعی و بدون تیمار متیل جاسمونات و بیوچار ایجاد شد (جدول ۲). به‌طورکلی محتوای نسبی آب برگ با استفاده از متیل جاسمونات و بیوچار افزایش یافت اما با افزایش سطح استفاده از این دو ماده ضد تنش، درصد محتوای نسبی برگ کاهش نشان داد به‌نحوی‌که در بعضی از تیمارها میزان آن حتی به پایین‌تر از تیمارهای شاهد بدون متیل جاسمونات و بیوچار رسید. محتوای نسبی آب برگ، شاخصی برای نشان دادن آسیب‌های ناشی از تنش خشکی معرفی شده است. نتایج این آزمایش با نتایج آزمایش‌های دیگر مطابقت دارد (Keshavarznia et al., 2014). همچنین در آزمایشی دیگر نیز مشاهده شد که تنش باعث کاهش کارایی مصرف آب و محتوای نسبی آب برگ در مقایسه با شاهد بدون تنش شد (Bagheri, 2009). به نظر می‌رسد که در شرایط تنش خشکی پتانسیل اسمزی کم محلول خاک باعث کاهش آب بافت‌ها می‌شود و در نتیجه آماس گیاه کم شده و پتانسیل آب بیشتر از پتانسیل اسمزی کاهش می‌یابد و همین عامل باعث کاهش محتوای نسبی آب برگ خواهد شد (Bagheri, 2009). دلیل بهبود شرایط گیاهان تنش دیده در اثر استفاده از بیوچار این است که این ماده باعث افزایش عناصر خاک ازجمله کربن می‌شود که این موضوع باعث بهبود کیفیت خاک خواهد شد و در نتیجه محتوای نسبی آب برگ و متعاقب آن ارتفاع گیاه، تعداد برگ‌ها و همچنین سطح برگ افزایش می‌یابد (Hafez et al., 2020).

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس اثر تنش، متیل جاسمونات و بیوچار بر برخی خصوصیات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی جو در شرایط تنش خشکی

Table 1. Variance analysis of effects of stress, methyl Jasmonate and Biochar on some physiological and biochemical characteristics and yield of barley under drought stress

S.O.V	منابع تغییرات	درجه آزادی df	کارایی مصرف آب Water use efficiency	محتوای نسبی آب برگ Relative water content	نشت الکترولیت EL	پرولین Proline	عملکرد دانه Grain yield
Block	**بلوک**	4	0.0485^{**}	52.84^{ns}	197.20^{**}	0.10^{ns}	0.0234^{**}
Stress (S)	**تنش**	2	0.5453^{**}	2146.67^{**}	11552.76^{**}	62.36^{**}	0.2169^{**}
Methyl Jasmonat (MJ)	**متیل جاسمونات**	2	0.0473^{**}	390.51^{**}	1107.89^{**}	2.53^{**}	0.0230^{**}
Biochar (B)	**بیوچار**	2	0.1586^{**}	611.12^{**}	747.62^{**}	4.34^{**}	0.0246^{**}
S × MJ	**تنش× متیل جاسمونات**	4	0.0013^{ns}	65.04^{ns}	174.37^{**}	1.21^{**}	0.0007^{ns}
S × B	**تنش × بیوچار**	4	0.0040^{ns}	28.01^{ns}	116.90^{*}	1.60^{**}	0.0002^{ns}
B × MJ	**بیوچار× متیل جاسمونات**	4	0.0028^{ns}	85.15^{ns}	31.04^{ns}	0.24^{**}	0.0010^{ns}
S × Mj × B	**تنش× متیل جاسمونات×بیوچار**	8	0.0008^{ns}	9.40^{ns}	26.65^{ns}	0.34^{**}	0.0003^{ns}
Error	**خطا**	104	0.004	61.50	45.07	0.26	0.002
CV (%)	**ضریب تغییرات**	-	*15.87*	*11.64*	*14.16*	*18.65*	*15.34*

^{ns}،* و ** به ترتیب نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

ns, * and ** are non-significant and significant at 5% and 1% probability levels

جدول ۲. مقایسه میانگین خصوصیات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و عملکرد تحت تأثیر تنش خشکی، متیل جاسمونات و بیوچار
Table 2. Mean comparison of physiological and biochemical characteristics and yield affected by drought stress and using methyl Jasmonate and Biochar

تیمار treatment	سطح level	پرولین Proline	نشت الکترولیت EL	محتوای نسبی آب برگ Relative water content	کارایی مصرف آب Water use efficiency	عملکرد Grain yield
		Mmol mg^{-1} FW	---------- % ----------		g kg^{-1}	g.$plant^{-1}$
تنش خشکی Drought stress	بدون تنش Normal irrigation	0.19c	31.41c	74.97a	0.46a	0.339a
	۶۰ ٪ ظرفیت زراعی 60% FC	1.02b	47.40b	65.71b	0.49a	0.313b
	۳۰٪ ظرفیت زراعی 30% FC	2.52a	63.46a	61.46c	0.29b	0.208c
متیل جاسمونات Methyl Jasmonate	بدون محلول‌پاشی Without spraying	1.48a	52.23a	65.60b	0.39b	0.274b
	۷۵ میکرومول 75 µmol	1.00c	42.32b	70.78a	0.45a	0.312a
	۱۵۰ میکرومول 150 µmol	1.25b	47.71ab	65.76b	0.39b	0.272b
بیوچار (٪) Biochar (%)	بدون بیوچار Without biochar	1.39a	50.31a	65.39b	0.38b	0.281b
	۱/۵٪ وزن خاک 1.5% soil weight	0.89b	42.76b	71.63a	0.48a	0.312a
	۳٪ وزن خاک 3% soil weight	1.45a	49.20a	65.12b	0.38b	0.266b

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند
Means with similar letters based on LSD test showed no significant difference at 5% probability level.

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس اثر تنش خشکی، متیل جاسمونات و بیوچار بر رنگیزه‌های فتوسنتزی
Table 3. Variance analysis of effects of drought stress, methyl Jasmonate and Biochar on photosynthetic pigments

S.O.V منابع تغییرات	درجه آزادی df	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	نسبت کلروفیل a/b	کلروفیل کل Total chlorophyll	کاروتنوئید Carotenoid
بلوک Block	4	3.86**	0.14ns	0.68ns	7.06**	0.37**
تنش Stress	2	132.79**	2.24**	12.59**	169.33**	17.29**
متیل جاسمونات Methyl Jasmonat	2	14.44**	2.56**	5.49*	18.88**	1.74**
بیوچار Biochar	2	16.83**	1.56**	13.42**	25.35**	2.10**
تنش× متیل جاسمونات S × mJ	4	1.50ns	0.24*	3.45ns	5.04**	0.09ns
تنش × بیوچار S × B	4	0.25ns	0.21*	2.45ns	0.56ns	0.04ns
بیوچار× متیل جاسمونات B × mJ	4	1.23ns	0.04ns	2.15ns	1.38ns	0.14ns
تنش× متیل جاسمونات×بیوچار S × Mj × B	8	0.16ns	0.10ns	1.68ns	0.10ns	0.15ns
خطا Error	104	0.66	0.23	2.09	1.19	0.10
ضریب تغییرات (CV٪)	-	*14.44*	*18.90*	*34.71*	*15.39*	*17.66*

ns، * و ** به ترتیب نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد است.
ns, * and ** are non-significant and significant at 5% and 1% probability levels

میزان نشت الکترولیت

به‌طورکلی تنش خشکی در هر دو سطح ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی باعث افزایش نشت الکترولیت شد اما استفاده از بیوچار و متیل جاسمونات باعث کاهش مقدار نشت الکترولیت شد. بیشترین مقدار نشت الکترولیت‌ها در شرایط تنش ۳۰ درصد ظرفیت زراعی و بدون تیمار متیل جاسمونات (۷۲/۶ درصد) و کمترین مقدار در شرایط بدون تنش و با استفاده از بیوچار به میزان ۱/۵ درصد وزن خاک ایجاد شد (۲۴/۹ درصد). دلیل افزایش میزان نشت الکترولیت در شرایط تنش‌های محیطی ازجمله تنش خشکی این است که تحت تنش خشکی، غشای سلولی پایداری خود را از دست می‌دهد (Sairam et al., 2002). نتایج آزمایشی دیگر نشان داد که تنش خشکی باعث افزایش نشت الکترولیت در لوبیا شد و با افزایش شدت و مدت تنش مقدار نشت الکترولیت به میزان بیشتری افزایش یافت که در اثر افزایش آسیب به غشای سلولی در نتیجه تنش‌های وارد شده بود (Boroujerdnia et al., 2016). پژوهشگران بیان کردند که علی‌رغم افزایش مقدار نشت الکترولیت گیاهان تنش دیده، استفاده از بیوچار باعث کاهش معنی‌دار در نشت الکترولیت و بهبود مقاومت گیاه در برابر تخریب غشاء سلولی در شرایط تنش شد و درواقع استفاده از بیوچار باعث افزایش پایداری غشاء پلاسمایی، تنظیم فشار آب و بهبود محتوای نسبی آب و در نتیجه کاهش تنش اکسیداتیو می‌شود که همه این عوامل به‌صورت زنجیروار منجر به کاهش نشت الکترولیت و پراکسیداسیون چربی‌های غشاء می‌شوند (Hafez et al., 2020).

غلظت پرولین

اعمال تنش در هر دو سطح ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی باعث افزایش محتوای پرولین در گیاهان موردمطالعه شد. بیشترین غلظت پرولین در شرایط تنش ۳۰ درصد ظرفیت زراعی و بدون استفاده از محلول‌پاشی متیل جاسمونات ایجاد شد (۳/۰۷ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ) و کمترین مقدار آن (۰/۱۵ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ) در شرایط بدون تنش و با استفاده از بیوچار به میزان ۱/۵ درصد وزن خاک مشاهده شد (جدول ۲). تنظیم اسمزی یکی از مؤلفه‌های اصلی فیزیولوژیکی در گیاهان در پاسخ به تنش خشکی است (Ganji et al., 2016). افزایش مواد اسمزی به دو صورت جذب مواد معدنی به‌ویژه پتاسیم و یا تولید ترکیبات آلی مانند برخی از اسیدهای آمینه مانند پرولین امکان‌پذیر است که در شرایط تنش غلظت این مواد افزایش می‌یابد و انباشت آن‌ها در شرایط تنش علاوه بر تأمین انرژی و جلوگیری از مرگ گیاه، باعث کاهش پتانسیل اسمزی سلول شده و از طریق تنظیم اسمزی باعث بالاتر نگه‌داشته شدن میزان آب نسبی در گیاه تنش دیده می‌شود و به‌این‌ترتیب باعث مقاومت نسبی به شرایط تنش می‌شود (Hafez et al., 2020). نتایج این آزمایش با نتایج حاصل از مشاهدات گنجی و همکاران (Ganji et al., 2016) و همچنین شادمند و افکاری (Shadmand and Afkari, 2019) مطابقت دارد. در آزمایشی دیگر نیز مشاهده شد که استفاده از بیوچار باعث کاهش تجمع پرولین و در شرایط تنش شد که در این آزمایش بهترین نتایج در گیاهانی مشاهده شد که محدودیت آبیاری نداشته و خاک آن‌ها حاوی بیوچار بود (Hafez et al., 2020). همچنین فوگیت و همکاران (Fugate et al., 2018) گزارش کردند که مقدار غلظت پرولین تحت تنش خشکی ۳۳۵ درصد افزایش یافت اما استفاده از غلظت‌های مختلف متیل جاسمونات باعث کاهش اثرات تنش و کاهش تجمع پرولین در گیاهان موردمطالعه شد اما در شرایط عدم تنش هیچ‌کدام از غلظت‌های متیل جاسمونات تأثیری بر میزان تجمع پرولین نداشتند. به نظر می‌رسد که متیل جاسمونات پس از تحریک اولیه تولید پرولین و در پی کاهش شدت تنش، با مهار القای آنزیم‌های تولیدکننده پرولین اثر کاهشی خود را القاء کرده و تجزیه پرولین یا کاهش تولید آن در پی کاهش تنش ممکن است خود تأمین‌کننده عوامل موردنیاز فسفوریلاسیون اکسیداتیو میتوکندریایی و تولید ATP برای ترمیم صدمات ناشی از تنش باشد (Norastehnia and Yousefzadeh, 2017).

رنگیزه‌های فتوسنتزی

اعمال تنش خشکی در هر دو سطح ملایم و شدید باعث کاهش غلظت کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید شد اما استفاده از بیوچار ۱/۵ درصد و متیل جاسمونات ۷۵ میکرومول باعث افزایش مقدار آن‌ها هم در شرایط بدون تنش و هم سطوح تنش ملایم و شدید شد. هرچند افزایش سطوح استفاده از هورمون متیل جاسمونات به ۱۵۰ میکرومول بر لیتر و بیوچار به ۳ درصد وزن خاک اثر مثبت چندانی بر این شاخص‌ها نگذاشتند و در بعضی از موارد باعث کاهش مقدار این رنگیزه‌ها شدند. بیشترین مقدار کلروفیل a در شرایط

بدون تنش و با استفاده از بیوچار به میزان ۱/۵ درصد وزن خاک ایجاد شد (۸/۱۷ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ) درحالی‌که کمترین مقدار در اثر تیمار تنش شدید (۳۰ درصد ظرفیت زراعی) و استفاده از بیوچار ۳ درصد مشاهده شد (۳/۵۸ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ). بالاترین غلظت کلروفیل b در شرایط بدون تنش و با استفاده از ۷۵ میکرومول بر لیتر متیل جاسمونات به دست آمد (۲ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ) و کمترین مقدار در شرایط تنش ۳۰ درصد ظرفیت زراعی و عدم استفاده از بیوچار ایجاد شد (۱/۰۱ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ). بیشترین غلظت کاروتنوئید در شرایط بدون تنش و با استفاده از بیوچار ۱/۵ درصد ایجاد شد (۲/۷۲ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ) و کمترین مقدار در اثر اعمال تنش شدید و استفاده از بیوچار ۳ درصد مشاهده شد. بیشترین مقدار کلروفیل کل در شرایط بدون تنش و با استفاده از بیوچار ۱/۵ درصد (۱۰/۱۴ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ) و بعدازآن در شرایط بدون تنش و محلول‌پاشی ۷۵ میکرومول بر لیتر متیل جاسمونات (۱۰/۰۵ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ) ایجاد شد. کمترین مقدار نیز در شرایط تنش شدید ۳۰ درصد ظرفیت زراعی و عدم استفاده از بیوچار مشاهده شد. (۴/۹۵ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ) (جدول ۴).

جدول ۴: مقایسه میانگین تغییرات غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی در اثر تنش خشکی و استفاده از متیل جاسمونات و بیوچار

Table 4. Mean comparison of changes in concentration of photosynthetic pigments affected by drought stress and using methyl Jasmonate and Biochar (mg/gr leaf fresh weight)

تیمار treatment	سطح level	کلروفیل a Chlorophyll a (میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ)	کلروفیل b Chlorophyll b (میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ)	نسبت کلروفیل a/b	کلروفیل کل Total chlorophyll (میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ)	کاروتنوئید (میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ)
		----------mg.g^{-1} FW----------				
تنش خشکی Drought stress	بدون تنش Normal irrigation	7.49^{a}	1.72^{a}	4.57^{a}	9.21^{a}	2.49^{a}
	۶۰ درصد ظرفیت زراعی 60% FC	5.30^{b}	1.41^{b}	4.13^{ab}	6.70^{b}	1.69^{b}
	۳۰٪ ظرفیت زراعی 30% FC	4.11^{c}	1.28^{b}	3.79^{b}	5.39^{c}	1.27^{c}
متیل جاسمونات Methyl Jasmonate	بدون محلول‌پاشی Without spraying	5.52^{b}	1.40^{b}	4.02^{a}	6.92^{b}	1.77^{b}
	۷۵ میکرومول 75 µmol	6.25^{a}	1.74^{a}	3.69^{b}	7.82^{a}	2.04^{a}
	۱۵۰ میکرومول 150 µmol	5.13^{c}	1.28^{c}	4.39^{ab}	6.57^{b}	1.65^{b}
بیوچار (٪) Biochar (%)	بدون بیوچار Without biochar	5.56^{b}	1.30^{b}	4.65^{a}	6.86^{b}	1.84^{b}
	۱/۵٪ وزن خاک 1.5% soil weight	6.28^{a}	1.67^{a}	3.84^{b}	7.94^{a}	2.03^{a}
	۳٪ وزن خاک 3% soil weight	5.06^{c}	1.45^{b}	3.61^{b}	6.50^{b}	1.60^{c}

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند

Means with similar letters based on LSD test showed no significant difference at 5% probability level

نتایج آزمایش‌های دیگر نشان داد که با اعمال تنش خشکی و افزایش شدت آن مقدار غلظت کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید کاهش می‌یابد Shadmand and Afkari, 2019). کاهش این رنگیزه‌های مهم فتوسنتزی می‌تواند به علت اختلال در جذب عناصر غذایی ضروری در سنتز رنگیزه‌های فتوسنتزی باشد. تنش موجب افزایش تولید انواع اکسیژن واکنش‌گر می‌شود و کاهش میزان کلروفیل، نشان‌دهنده وسعت آسیب‌های اکسیداتیو است (Shadmand and Afkari, 2019). این کاهش می‌تواند به دلیل بازدارندگی مراحل مختلف بیوسنتز کلروفیل باشد و یا

اینکه کاهش غلظت کلروفیل در گیاهان تحت تنش ممکن است در ارتباط با افزایش شدت فعالیت آنزیم کلروفیلاز و در نتیجه تجزیه کلروفیل باشد (Hashem et al., 2019; Goldani, 2012). با مطالعه تأثیر کاربرد بیوچار و قارچ مایکوریزا بر رشد و خصوصیات بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی نخود دریافتند که کاربرد بیوچار و مایکوریزا باعث افزایش غلظت کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید هم در شرایط آبیاری نرمال و هم در شرایط تنش خشکی می‌شود. اعمال تنش همچنین باعث کاهش شاخص سبزینگی (SPAD) در بوته‌های جو شد اما استفاده از تیمار بیوچار و متیل جاسمونات اثر منفی تنش‌های شدید و ملایم را تا حدودی خنثی کرد. بیشترین شاخص سبزینگی در شرایط بدون تنش و با استفاده از محلول‌پاشی متیل جاسمونات ۷۵ میکرومول بر لیتر و بیوچار ۱/۵ درصد (به ترتیب ۴۲/۹۱ و ۴۲/۹) ایجاد شد درحالی‌که کمترین مقدار این شاخص در اثر تنش شدید ۳۰٪ ظرفیت زراعی و بدون محلول‌پاشی متیل جاسمونات به دست آمد (۱۹/۵۴). حافظ و همکاران (Hafez et al., 2020) بیان کردند که در شرایط تنش علی‌رغم کاهش مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی، گیاهانی که با بیوچار تیمار شدند مقدار بیشتری از کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید را در مقایسه با گیاهانی که تحت تیمار بیوچار نبودند تولید کردند. گزارش شده است که که باوجود کاهش مقدار کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید تحت شرایط تنش خشکی، اما استفاده از متیل جاسمونات باعث جبران روند کاهشی مقادیر آن‌ها شد به نحوی‌که غلظت رنگیزه‌ها در گیاهچه‌های موردمطالعه توتون در شرایط تنش خشکی افزایش یافت (Norastehnia et al., 2017). همچنین این نتایج با نتایج آزمایش فابریکی و شهاب‌زاده (Fabriki and Shahabzadeh, 2019) مطابقت دارد. کاهش رنگیزه‌ها در طی تنش خشکی به علت بسته شدن روزنه‌ها، کاهش فتوسنتز و افزایش تشکیل رادیکال‌های فعال اکسیژن در کلروپلاست رخ می‌دهد که این امر باعث اکسید شدن آن‌ها توسط اکسیژن فعال و تخریب ساختار آن‌ها می‌شود (Sharma and Dubey., 2005). محققین گزارش کردند که استفاده از متیل جاسمونات باعث افزایش تولید رنگیزه‌های فتوسنتزی در شرایط تنش خشکی شد (Fugate et al., 2018). نتایج تحقیقات نشان می‌دهند که متیل جاسمونات نه در مدت کوتاه و بلکه با گذشت زمان و در غلظت‌های بالای ۲۰ میکرومول می‌تواند با افزایش مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی ازجمله کلروفیل و کاروتنوئید نقش حفاظتی خود را انجام داده و به بهبود فتوسنتز کمک کند که این مربوط به نقش متیل جاسمونات در بیان مجموعه‌ای از ژن‌های مربوط به آنزیم‌های کلیدی در بیوسنتز کلروفیل از طریق تشکیل آمینولوولینیک اسید می‌شود (Ahmadi and Sio-Se Mardeh, 2004).

عملکرد

اعمال تنش خشکی هم در سطح ۶۰ درصد و هم ۳۰ درصد ظرفیت زراعی باعث کاهش چشمگیر میزان عملکرد شد. بیشترین عملکرد در شرایط بدون تنش و تیمار ۷۵ میکرومول بر لیتر متیل جاسمونات و ۱,۵ درصد وزن خاک بیوچار به دست آمد (۰/۳۷ گرم در بوته) و کمترین میزان عملکرد (۰/۱۹ گرم در بوته) در تنش خشکی ۳۰ درصد ظرفیت زراعی و بدون محلول‌پاشی متیل جاسمونات ایجاد شد (جدول ۲). همچنین نتایج نشان داد که میزان عملکرد با افزایش سطوح بیوچار و متیل جاسمونات کاهش داشته و در بعضی از موارد حتی به پایین‌تر از میزان عملکرد بوته‌های تنش دیده و بدون تیمار بیوچار و متیل جاسمونات رسید اما استفاده از بیوچار ۱/۵ درصد و متیل جاسمونات ۷۵ میکرومول باعث بهبود وضعیت عملکرد بوته‌های تنش دیده در مقایسه با شاهد شدند که این نتایج با نتایج آزمایش‌های دیگر در این راستا مطابقت دارد (Hafez et al., 2020; Tajalli et al., 2013; Karami et al., 2005). در آزمایشی بر روی گندم مشخص شد که در مرحله زایشی گیاهان حساسیت ویژه‌ای به کمبود آب دارند. دو هفته تا ۱۰ روز قبل از گلدهی که در آن تقسیم میوزی نیز انجام می‌یابد، حساسیت به تنش بیشتر است و اثر قابل‌ملاحظه‌ای بر کاهش تعداد و وزن دانه در سنبله می‌گذارد، وزن دانه نیز بیشترین اثر را بر عملکرد دانه دارد و به‌عنوان یک صفت مهم در انتخاب برای مقاومت به خشکی است به‌طوری‌که وزن دانه و عملکرد با افزایش تعداد آبیاری به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد (Paknezhad et al., 2008). همچنین خشکی در طی مرحله پر شدن دانه، به‌ویژه اگر با گرما نیز همراه باشد، موجب تسریع پیری، کاهش دوره پر شدن دانه و کاهش وزن دانه می شود (Paknezhad et al., 2017).

کارایی مصرف آب اقتصادی

این شاخص با اعمال تنش ملایم یک افزایش جزئی نشان داد و با افزایش سطح تنش به میزان ۳۰ درصد ظرفیت زراعی

یک کاهش شدید ایجاد کرد. به‌نحوی‌که بیشترین مقدار کارایی مصرف آب به میزان ۵۶ گرم در مترمکعب در شرایط بدون تنش با استفاده از بیوچار به میزان ۱/۵ درصد وزنی خاک به دست آمد و کمترین کارایی مصرف آب در اثر اعمال تنش ۳۰ درصد ظرفیت زراعی و با استفاده از بیوچار ۳ درصد ایجاد شد (جدول ۲). در آزمایش (Abbaspour et al., 2019) اعمال تنش باعث کاهش کارایی مصرف آب شد اما استفاده از بیوچار به میزان ۲۰ تن در هکتار باعث افزایش کارایی مصرف آب در شرایط تنش شد که به نظر می‌رسد افزایش کارایی مصرف آب با بالا بودن عملکرد و همچنین کاهش میزان آب مصرفی در شرایط استفاده از بیوچار مرتبط است. همچنین افزایش مقاومت به تنش خشکی و افزایش کارایی مصرف آب با کاربرد بیوچار در آزمایش‌های دیگر به اثبات رسیده است (Akhtar et al., 2014; Abubakari et al., 2015). پژوهشگران گزارش کردند که استفاده از بیوچار کاهش کارایی مصرف آب در سویا در اثر تنش خشکی و شوری را تقلیل داده و باعث بهبود این شاخص در گیاهان تنش دیده می‌شود (Zhang et al., 2020). دیگر محققین نیز گزارش کردند که محلول‌پاشی متیل جاسمونات قبل از اعمال تنش خشکی باعث بهبود سرعت فتوسنتز، شاخص‌های بیوشیمیایی و کارایی مصرف آب در گیاهان تنش دیده در مقایسه با گیاهان تیمار نشده می‌شود (Fugate et al., 2018). دلیل افزایش کارایی مصرف آب با استفاده از بیوچار، کاهش نیاز آبی در گیاهان در اثر استفاده از بیوچار است که این به خاطر افزایش تخلخل خاک‌های حاوی بیوچار و افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک است (Pourmansour et al., 2019).

نتیجه‌گیری نهایی

می‌توان از نتایج این آزمایش استنباط کرد که به‌طورکلی تنش خشکی در سطوح ملایم و شدید آن می‌تواند خصوصیات رشدی و فیزیولوژیکی در گیاه را به‌شدت تحت تأثیر قرار داده و باعث کاهش مقدار عملکرد اقتصادی گیاه شود؛ اما نکته قابل‌ذکر این است که استفاده از مواد تعدیل‌کننده تنش خشکی چه مواد خاک مصرف مثل بیوچار و چه مواد هورمونی مثل متیل جاسمونات که به‌عنوان مواد ضدتنش شناخته‌شده‌اند باعث تعدیل اثرات تنش شده و با کاهش ویژگی‌هایی مثل نشت الکترولیت، کاهش غلظت پرولین و افزایش سطح رنگیزه‌های فتوسنتزی، بهبود وضعیت محتوای نسبی آب برگ و بهبود کارایی مصرف آب در مقایسه با گیاهان تیمار نشده با این مواد می‌توانند اثرات شدید تنش را کاهش داده و درنهایت با افزایش عملکرد باعث کاهش خسارات تنش شوند. هرچند همان‌طور که از نتایج این آزمایش مشخص است که بالا بودن سطح استفاده از این مواد نه‌تنها اثر مثبت بر بهبود شاخص‌های رشدی و فیزیولوژیکی گیاه در شرایط تنش نخواهند داشت بلکه در بعضی از موارد ممکن است باعث کاهش این شاخص‌ها حتی به پایین‌تر از مقدار آن‌ها در گیاهان تیمار نشده با این مواد منجر شود.

منابع

Abbaspour, F., Asghari, H.R., Rezvani Moghaddam, P., Abbasdokht, H., Shabahang, J., Baig Babaei, A., 2019. Effects of biochar on soil fertility and water use efficiency of black seed (*Nigella sativa* L.) under water stress conditions. Iranian Journal of Field Crop Research. 17, 39-52. [In Persian with English summary].

Ahmad, P., Hameed, A., Abd-Allah, E.F., Sheikh, S.A., Wani, M.R., Rasool, S., Jamsheed, S., Kumar, A., 2014. Biochemical and molecular approaches for drought tolerance in plants. In: Ahmad, P., Wani, M.R. Physiological Mechanisms and Adaptation Strategies in Plants Under Changing Environment. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8600-8_1

Ahmadi, A., Siosemardeh, A., 2004. The effects of water stress on soluble carbohydrates, chlorophyll and proline contents of four iranian wheat cultivars under different moisture regimes. Iranian Journal of Agriciculture Science. 35(3), 753-763. [In Persian with English summary].

Amini, Z., Haddad, R., 2013. Role of photosynthetic pigments and antioxidant enzymes against oxidative stress. Iranian Journal of Biology. 26(3), 251-256. [In Persian with English summary].

Andrade, A., Escalante, M., Vigliocco, A., Tordable, M.D.C., Alemano, S., 2017. Involvement of jasmonates in responses of sunflower (*Helianthus annuus*) seedlings to moderate water stress. Journal of Plant Growth Regulation. 83, 501–511.

Anjum, S.A., Tanveer, M., Hussain, S., Tung, S.A., Samad, R.A., Wang, L., Shahzad, B., 2016. Exogenously applied methyl jasmonate improves the drought tolerance in wheat imposed at early and late developmental stages. Acta Physiologiae Plantarum. 38(25), 1-11. https://doi.org/10.1007/s11738-015-2047-9

Azeem, M., Hayat, R., Hussain, Q., Ahmed, M., Imran, M., Crowley, D., 2016. Effect of biochar amendment on soil microbial biomass, abundance, and enzyme activity in the mash bean field. Journal of Biodiversity and Environmental Sciences. 8(6), 1-13.

Bagheri, A.R., 2009. The effect of drought stress on germination, growth, absorbtion efficiency and relative water content of hull-less barley genotypes. Environmental Stress in Plant Sciences. 1(1), 39-53. [In Persian with English summary].

Bates, L.S., Waldern, R.P., Tear, I.D., 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. Plant and Soil. 39, 205-207.

Boroujerdnia, M., Bihamta, M., AlamiSaid, K., Abdossi, V., 2016. Effect of drought tension on proline content, soluble carbohydrates, electrolytes leakage and relative water content of bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Crop Physiology Journal. 29(8), 23-41. In Persian with English summary].

Fabriki ourang, S., Shahabzadeh, H.S., 2019. The effect of abiotic elicitors on antioxidants and phytochemical traits of celandine (*Chelidonium majus*) under drought stress. Iranian Journal of Field Crop Science. 50, 139-150. [In Persian with English summary].

Fugate, K.K., Lafta, A.M., Eide, D.J., Li, G., Lulai, E.C., Olson, L.L., Deckard, E,L., Khan, M.F.R., Finger, L.F., 2018. Methyl jasmonate alleviates drought stress in young sugar beet (*Beta vulgaris* L.). Journal of Agronomy and Crop Sciences. 204, 566-576.

Ganji, M., Farahmandfar, E., Shahbazi, M., Zahravi, M., 2016. Biochemical characterization and grain yield of selected genotypes of wild barley (*Hordeum vulgare* ssp. spontaneum) different levels of drought stress. Journal of Plant Process and Function. 5, 75-90. [In Persian with English summary].

Gao, X.P., Wang, X.F., Lu, Y.F., Zhang, L.Y., Shen, Y.Y., Liang, Z., Zhang, D.P., 2004. Jasmonic acid is involved in the water-stressedinduced betaine accumulation in pear leaves. Plant, Cell and Environment. 27 (4), 497–507.

Goldani, M., 2012. Effect of irrigation intervals on some growth indices ecotypes basil (*Ocimum basilicum* L.). Iranian Journal of Field Crop Research. 10 (2), 412-420. In Persian with English summary].

Hafez, Y., Attia, K., Alamery. S., Ghazy., AL-Doss, A., Ibrahim, E., Rashwan, E., El-maghrraby, L., Awad, A., Abdelaal, KH., 2020. Beneficial effects of biochar and chitosan on antioxidative capacity, osmolytes accumulation, and anatomical characters ofwater-stressed barley plants. Journal of Agronomy. 10, 1-18.

Hashem, A., Kumar, A., Al-Dbass, A.M., Alqarawi, A.A., Al-Arjani, A., 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.

Inal, A., Gunes, A., Sahin, O., Taskin, M.B. Kaya, E.C., 2015. Impacts of biochar and processed poultry manure, applied to a calcareous soil, on the growth of bean and maize. Journal of Field Crop Science. 31, 106–113.

Karami, A., Ghanadha, M.R., Naghavi, M.R., Mardi, M., 2005. An evaluation of drought resistance in barley. Iranian Journal of Agriculture Science. 36 (3), 547-560. [In Persian with English summary].

Keshavarznia, R., Shahbazi, M., Mohammadi, V., Hosseini Salekdeh, G., Ahmadi, A., Mohseni Fard, A., 2015. The impact of barley root structure and physiological traits on drought response. Iranian Journal of Field Crop Science. 45(4), 553-563. [In Persian with English summary].

Mokari, M., Abdinpour, M., Dehgan, J., 2020. Effect of drought stress and planting date on grain yield and water use efficiency of autumn wheat in kashmar region. Journal of Water Research in Agriculture. 34(2), 167-186. [In Persian with English summary].

Munne-Bosch, S., Penuelas, J., 2003. Photo and antioxidant protection during summer leaf

senescence in *Pistscia lentiscus* L. grown under Mediterranean field conditions. Annals of Botany. 92, 385-391. https://doi.org/10.1093/aob/mcg152

Naeemi, T., Fahmideh, L., Fakheri Barat, A., 2018. The impact of drought stress on antioxidant enzymes activities, containing of proline and carbohydrate in some genotypes of durum wheat (*triticum turgidu* L.) at seedling stage. Journal of Crop Breeding. 10, 22-31. [In Persian with English summary].

Norastehnia, A., Yousefzadeh, G., 2017. Improving the growth of tobacco (N*icotiana tabacum* L.) seedling by methyljasmonate under drought stress. Nova Biologica Reperta. 3, 20-33.

Paknezhad, F., Jami Al-Ahmadi, M., Pazouki, A., Mohammadi, M., 2008. Investigation of the drought stress effects on yield and yield components in wheat cultivars. Environmental Stresses in Crop Sciences. 1, 1-14. [In Persian with English summary].

Paknezhad, F., Fatemi Rika, Z., Ilikaei Dehno, N., 2017. Investigation the impact of late season stress on yield and yield component of ten variety of barley. Environmental Stress in Crop Sciences. 10, 391-401. [In Persian with English summary].

Pourmansou, S., Razzaghi, F., Sepaskhah, A.R. Mousavi, A.A., 2019. Wheat growth and yield investigation under different levels of biochar and deficit irrigation under greenhouse conditions. Journal of Water and Irrigation Management. 9, 15-28. [In Persian with English summary].

Riemann, M., Dhakerey, R., Hazman, M., Miro, B., Hohli, A., Nick, P., 2015. Exploring jasmonates in the hormonal network of drought and salinity responses. Frontiers in Plant Science. 6, 1077.

Sairam, R.K., Srivastava, G.C., 2001. Water stress tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.): Variations in hydrogen peroxide accumulation and antioxidant activity in tolerant and susceptible genotypes. Journal of Agronomy and Crop Science. 186, 63-70. https://doi.org/10.1046/j.1439-037x.2001.00461.x

Seo, J.S., Joo, J., Kim, M.J., Kim, Y.K., Nahm, B.H., Song, S.I., Choi, Y.D., 2011. OsbHLH148, a basic helix-loop-helix protein, interacts with OsJAZ proteins in a jasmonate signaling pathway leading to drought tolerance in rice. The Plant Journal. 65, 907–921. https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2010.04477.x

Shadmand, H., Afkari, A., 2018. The Effect of superabsorbent polymer application on some biochemical traits and relative water content of bean cultivars under drought stress. Crop Physiology Journal. 10, 61-77. [In Persian with English summary].

Sharma, P., Dubey, R.S., 2005. Drought induces oxidative stress and enhances the activities activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings. Plant Growth Regulations. 46, 209-221. https://doi.org/10.1007/s10725-005-0002-2

Siosemardeh, A., Fateh, H., Badakhshan, H., 2014. Responses of photosynthesis rate. Membrance stability and antioxidant enzymes activity to the drought stress and Nitrogen fertilizer in to variety of barley under controlled condition. Iranian Journal of Field Crops Research. 12(2), 215-228. [In Persian with English summary].

Tajalli, H., Mousavi, G., Baradaran, R., Saberi, M.H., Arazmjoo, A., 2012. Assessment of drought resistance in promising barley genotypes using stress tolerance indices. Journal of Crop Production Research. 3(4), 339-349. [In Persian with English summary].

Thabet, S., Moursi, Y., Karam, M., Börner, A., Alqudah, A., 2020. Natural variation uncovers candidate genes for barley spikelet number and grain yield under drought stress. Journal of Genes. 11, 1-23.

Trupiano, D., Cocozza, C., Silvia Baronti, S., Carla Amendola, C., Vaccari, F.P., Lustrato, G., Di Lonardo, S., Fantasma, F., Tognetti, R., Scippa, G.S., 2017. The effects of biochar and its combination with compost on lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth, soil properties, and soil microbial activity and abundance. International Journal of Agronomy. 2017, 3158207.

Verheijen, F.G.A., Jeffery, S., Bastos, A.C., Van Der Velde, M. I. Diafas, I., 2009. Biochar Application to Soils: a critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. Publisher: Office for the Official Publications of the European Communities., Luxembourg. pp. 165.

Zhang, M., Zhu-Qun, J., Zhao, J., Zhang, G., Wu, F., 2015. Physiological and biochemical responses to drought stress in cultivated and

Tibetan wild barley. Journal of Plant Growth Regulation. 75, 567-574.

Zhang, Y., Ding, J., Wang, H., Su, L., Zhao, C., 2020. Biochar addition alleviate the negative effects of drought and salinity stress on soybean productivity and water use efficiency. Journal of BMC Plant Biology. 20, 288, 1-12