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. 141-158 (Spring 2024)

https://dx.doi.org/10.22077/ESCS.2023.5517.2153

Original article

The effect of biochar and methyl jasmonate on biochemical alterations, yield and yield components of barley (*Hordeum vulgare* L.) under drought stress

S. Nasiri[1*], B. Andalibi[2], A. Tavakoli[3], M.A. Delavar[4], L. Van Zwieten[5]

1. PhD student of Plant Physiology and Crop Production, University of Zanjan, Iran
2. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agricultural, University of Zanjan, Iran
3. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, *Faculty of Agricultural, agronomy, University of Zanjan, Iran*
4. Associate Professor, Department *of soil science, Faculty of Agricultural, University of Zanjan, Iran*
5. Professor, Wollongbar primary industries institute, University of New South Wales, New South Wales, Australia

Received 4 August 2022; Accepted 15 October 2022

Extended abstract

Introduction

Barley (*Hordeum vulgare* L.) is among the most influential cereals, and a wide range of populations in several regions of the world (Sallam et al., 2019). However, there are some restrictions for accomplishment to the potential production, which the most consequential one among them, water shortage, a drastic obstacle in many regions of the world, in particular in arid and semi-arid areas. Water scarcity, results in plenty of disturbances in plant functions like cell division and elongation, water and nutrients relations, photosynthesis, enzymes activity, stomata movement, assimilate partitioning, respiration, oxidative damage, growth, and productivity, as several types of researches show that water shortage in the soil cause many disorders in plant tissues, which in turn leads to a punctual diminish in the photosynthesis rate (Todorova et al., 2022). Under circumstances of water shortage, the electron transport through PSII is prohibited, and the oxygen-evolving complex of PSII is damaged. In repercussion, depends on the times, duration of facing, and stress intensity, developmental stage, and kind of tissue, plant defenses against it differently.

Materials and methods

An experiment as a factorial in a completely randomized block design in five replications at the experimental greenhouse of the University of Zanjan was carried out in two years 2021 and 2022. In this study two regimes of irrigation (D0, regular irrigation as the control, D1, Water Deficit for two weeks immediately after flowering), four levels of biochar (zero% as the control treatment, 0.25, 0.5 and 1 percent of soil weight) and three levels of spraying Methyl Jasmonate (zero µmol as the control treatment, 50 and 100 µmol) at the same time with flowering stage and starting withholding water, were executed.

Results and discussion

Results demonstrated that utilized treatments had significant effects on studied parameters. Results illustrated that, despite the fact that proline content, carbohydrate and quantity of electrolyte leakage

* Corresponding author: Sajjad Nasiri; E-Mail: Sajjadnasiri1989@yahoo.com

© 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).

were elevated as a result of drought stress, and accumulation of photosynthetic pigments were dwindled, however, application of biochar in the soil and foliar spraying of methyl Jasmonate caused modulating the effects of drought stress. Lack of water can reduce the concentration of photosynthetic pigments, mainly chlorophylls and carotenoids, as it causes oxidation which leads to diminishing the biosynthesis of pigments. It is claimed that using biochar ameliorates the reduction of pigments in stressed plants as a result of better surface area, higher water holding capacity, more cation exchange capacity, and useful absorptive features of biochar (Ibrahim et al., 2020). Moreover, the drought stress resulted in a substantial elevation in the concentration of proline (PC) which might be as a result of devastating impacts of drought on the performance of plasma membrane as well as the process which leads to dehydration of cytoplasm, which in turn results in boosting proline concentration in Barley plants under drought situation (Hafez et al., 2020). It is said that biochar reduces proline content, because of its impact on maintenance of plasma membrane in a stable situation, modulating the pressure of water in cell, and enhancing the ability of plants in conserving relative water content (Ahmed et al., 2016). Furthermore, methyl Jasmonate (MJ) may facilitate the strengthening of cell walls and effectively neutralize excessive increase in the level of ROS during further exposure to the stress factor, thereby preventing the damage of cellular membrane structures and changes in their permeability under stress conditions (Hayat and Ahmad, 2007).

Conclusion

The current study represents that Barley can tolerate drought stress through several mechanisms such as modulating some biochemical compounds. In this study drought was shown to have negative impacts on some of the studied physiological and biochemical parameters. Results demonstrated that the use of biochar and Methyl Jasmonate can improve the adaptation ability of Barley plants to water shortage, associated with enhancement in morpho-physiological and biochemical traits. Soil content of biochar at 0.25% w/w and Methyl Jasmonate leaf applies at 50 micro moles protected plants against drought stress. Importantly higher doses of biochar and Methyl Jasmonate had negative impacts, highlighting the need to better understand optimal doses, and mechanisms of action of these amendments.

***Keywords*:** Photosynthetic pigment, Plant growth regulator, Proline, Soluble carbohydrates, Withholding water

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

https://dx.doi.org/10.22077/ESCS.2023.5517.2153

مقاله پژوهشی

اثر بیوچار و متیل جاسمونات بر تغییرات بیوشیمیایی، عملکرد و اجزای عملکرد جو (*Hordeum vulgare* L.) در شرایط تنش خشکی

سجاد نصیری[1*]، بابک عندلیبی[2]، افشین توکلی[3]، محمد امیر دلاور[4]، لوکاس ون زویتن[5]

۱. دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی، دانشگاه زنجان، زنجان
۲. دانشیار گروه ژنتیک و تولید گیاهی، دانشگاه زنجان، دانشکده کشاورزی
۳. دانشیار گروه ژنتیک و تولید گیاهی، دانشگاه زنجان، دانشکده کشاورزی
۴. دانشیار گروه خاک، دانشگاه زنجان، دانشکده کشاورزی
۵. استاد گروه خاک دانشگاه نیوساوت‌ولز، استرالیا

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
پرولین
تنظیم‌کننده رشد گیاهی
رنگ‌دانه فتوسنتزی
قطع آبیاری
کربوهیدرات‌های محلول

تاریخ دریافت:
۱۴۰۱/۰۵/۱۳

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۱/۰۷/۲۳

تاریخ انتشار:
بهار ۱۴۰۳

۱۷(۱): ۱۴۱-۱۵۸

چکیده

آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با پنج تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان در دو سال زراعی متوالی ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ بر روی گیاه جو پائیزه رقم جلگه انجام شد. در این آزمایش دو سطح آبیاری (آبیاری کامل به‌عنوان شاهد و قطع آبیاری در مرحله گلدهی)، چهار سطح بیوچار (بدون بیوچار به‌عنوان شاهد، ۰/۲۵، ۰/۵ و یک درصد وزن خاک) و سه سطح هورمون متیل جاسمونات هم‌زمان با گلدهی و قطع آبیاری (بدون محلول‌پاشی به‌عنوان شاهد، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومول در لیتر متیل جاسمونات) مورداستفاده قرار گرفت. بر اساس نتایج، بیوچار و متیل جاسمونات بر صفات رشدی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی جو تأثیر معنی‌دار گذاشتند. علی‌رغم اینکه غلظت پرولین و کربوهیدرات و میزان نشت الکترولیت در اثر تنش خشکی افزایش و غلظت رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی کاهش یافت، اما استفاده از بیوچار به میزان ۰/۲۵ وزن خاک و محلول‌پاشی متیل جاسمونات به غلظت ۵۰ میکرومول در لیتر در بسیاری از صفات موردمطالعه باعث تعدیل اثرات تنش خشکی شده و درنهایت منجر به بهبود رشد و عملکرد جو شدند. از نتایج به‌دست‌آمده در آزمایش مشخص شد که استفاده از سطوح بالای این مواد ضد تنش در بعضی از موارد نه‌تنها نمی‌توانند اثرات مطلوبی در جلوگیری از اثرات مخرب تنش خشکی داشته باشند، بلکه در مواردی منجر به تشدید این اثرات شده و باعث کاهش رشد و عملکرد گیاه می‌شوند.

مقدمه

جو (*Hordeum vulgare* L.) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین غلات مورد کشت در دنیا، بعد از گندم (*Triticum aestivum*)، ذرت (*Zea mays*) و برنج (*Oryza sativa*) در رتبه چهارم اهمیت و تولید قرار دارد (Thabet et al., 2020; Sallam et al., 2019). جو با تولید سالیانه بیش از ۱۵۰ میلیون تن و سطح زیر کشت بالغبر ۶۰ میلیون هکتار از منابع غذایی مهم انسان و دام به شمار می‌رود و ایران با سطح زیر کشت نزدیک به دو میلیون هکتار و تولید بیش از سه میلیون تن در سال در رده چهاردهم ازلحاظ تولید این محصول استراتژیک قرار دارد (Paknejad et al., 2017).

یکی از مهم‌ترین موانع پیش روی تولید جو وقوع تنش خشکی در مراحل حساس رشد جو است که می‌تواند باعث

* نگارنده پاسخگو: سجاد نصیری. پست الکترونیک: Sajjadnasiri1989@yahoo.com

خسارات جبران‌ناپذیر بر رشد، متابولیسم و درنهایت عملکرد گیاه شود (Todorova et al., 2022). گزارش شده است که تنش خشکی باعث کاهش ۸/۱ درصدی میزان عملکرد جو در جهان در سال زراعی ۲۰۲۲-۲۰۲۱ در مقایسه با سال زراعی قبلی شده است (Shahbandeh, 2022). تنش خشکی و تغییرات آب و هوایی از مهم‌ترین تهدیدهای جهانی برای تولید مواد غذایی هستند که افزایش جمعیت این مشکل را پیچیده‌تر کرده است (Ghaderi et al., 2021). در گیاهان تغییرات مورفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی متعددی در اثر تنش خشکی اتفاق می‌افتد (Yahyaabadi and Dehgani, 2021). وقوع تنش خشکی باعث افزایش غلظت املاح در گیاه شده که این پدیده سبب خروج آب از گیاه می‌شود و درنهایت کمبود آب باعث کاهش ارتفاع بوته، کاهش سطح برگ، کاهش توسعه ریشه و همچنین زیست‌توده گیاه خواهد شد. کاهش فتوسنتز، کاهش تولید رنگدانه‌های فتوسنتزی، افزایش شکل‌گیری رادیکال‌های آزاد اکسیژن، افزایش پراکسیداسیون چربی‌های غشاء، تخریب پروتئین‌ها، بسته شدن روزنه‌ها، تخریب آنزیم‌ها، تجمع پرولین و افزایش نشت الکترولیت‌ها در گیاهان تحت تأثیر تنش از دیگر اثرات رایج مواجهه با تنش خشکی هستند (Yahyaabadi and Dehgani, 2021; Naeemi et al., 2018). تنش خشکی بر توسعه سلولی، روابط تغذیه‌ای گیاه با خاک، توزیع مواد فتوسنتزی، تنفس، رشد و درنهایت عملکرد اقتصادی گیاه تأثیر منفی می‌گذارد (Todorova et al., 2022). حداد و مخلصیان گزارش کردند که تنش خشکی باعث کاهش سطح پروتئین کل، رنگدانه‌های فتوسنتزی و افزایش فعالیت آنزیم‌ها شد (Haddad and Mokhlesian, 2016). در پژوهشی دیگر گزارش شد که تنش خشکی باعث کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی و افزایش سطح پرولین و کربوهیدرات‌های محلول شد (Naeemi et al., 2018). در آزمایشی دیگر پژوهشگران مشاهده کردند تنش خشکی باعث کاهش ارتفاع، ماده خشک کل، وزن هزار دانه، تعداد سنبله در واحد سطح و عملکرد گردید (Paknejad et al., 2017).

یکی از روش‌های مقابله با آثار مخرب تنش خشکی استفاده از بیوچار است. بیوچار یک ماده گرماکافت (Thermolysis) شده با دوام بالا و مقاوم به تجزیه است و توانایی بالا در جذب و نگهداری آب و عناصر غذایی، جلوگیری از آبشویی عناصر و کاهش آزادسازی گازهای گلخانه‌ای دارد که این خصوصیات، موجب شده است که استفاده از این ماده به‌عنوان یک ماده ضد تنش خشکی در شرایط کمبود آب مطرح شده باشد (Abbaspour et al., 2019). بیوچار به دلیل منافذ وسیع و سطح ویژه بالا، زیستگاه مناسبی برای میکروارگانیسم‌ها در خاک است. با توجه به اینکه میکروارگانیسم‌ها از اجزای مهم طبیعت هستند، می‌توانند با تأثیر بر ساختار فیزیکی، بیولوژیکی و شیمیایی خاک باعث بهبود چرخه عناصر غذایی و درنهایت بهبود رشد گیاه در شرایط عادی و شرایط تنش‌زا، ازجمله خشکی و شوری شوند. استفاده از بیوچار باعث افزایش ارتفاع، تعداد و سطح برگ و محتوای کلروفیل برگ ذرت در شرایط تنش شوری می‌گردد (Kumar Soothar et al., 2021). پژوهشگران در آزمایش‌های خود بر روی گندم مشاهده کردند که بیوچار باعث بهبود وضعیت نشت الکترولیت‌ها، محتوای پرولین، رنگدانه‌های فتوسنتزی، فتوسنتز، کارایی مصرف آب و عملکرد و همچنین فعالیت‌های آنزیمی در شرایط تنش خشکی شد (Hafez et al., 2020). همچنین گزارش شده است استفاده از بیوچار در تنش خشکی علاوه بر بهبود ویژگی‌های زیستی، فیزیکی و شیمیایی خاک باعث افزایش عملکرد اقتصادی و عملکرد بیولوژیک شد (Abbaspour et al., 2019).

جاسمونات‌ها گروهی از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی هستند که در بافت‌های نوک ساقه، برگ‌های جوان، میوه‌های نابالغ، نوک ریشه و گل‌ها تولید و تجمع می‌یابند (Zahedi et al., 2019). این تنظیم‌کننده‌ها ازجمله مولکول‌های علامت دهنده هستند که می‌توانند گیاه را در مقابل تنش‌های زیستی و غیرزیستی محافظت کنند (Memelink, 2009). نتایج تحقیقات نشان از اثرات مثبت محلول‌پاشی هورمون متیل جاسمونات در شرایط تنش خشکی بر کاهش آسیب‌های ناشی از تنش دارد. در آزمایشی مشخص شد که محلول‌پاشی متیل جاسمونات باعث بهبود محتوای نسبی آب برگ، بهبود غلظت رنگدانه‌های فتوسنتزی، کربوهیدرات‌های محلول و پرولین در شرایط تنش خشکی شد و از آسیب‌های ناشی از تنش خشکی به توت‌فرنگی تا حدود زیادی جلوگیری کرد (Zahedi et al., 2019). گزارش شده است که اگرچه تنش خشکی باعث کاهش وزن هزار دانه، تعداد دانه در سنبله، عملکرد و ارتفاع در گندم شد اما محلول‌پاشی برگی متیل جاسمونات سبب بهبود این خصوصیات در شرایط تنش و آبیاری نرمال شد (Javidpour et al., 2019).

با توجه به نتایج تحقیقات و شرایط بحران آبی در کشور و احتمال بروز خشک‌سالی‌های آینده استفاده از ترکیباتی که

بتوانند تا حدودی اثرات این تنش محیطی مهم را کاهش دهند موردتوجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. هدف این مطالعه، بررسی اثرات کاربرد هم‌زمان بیوچار معدنی در خاک و محلول‌پاشی با متیل جاسمونات در مرحله گلدهی در یک آزمایش گلخانه‌ای در دو سال متوالی (۱۴۰۰-۱۳۹۹) بر برخی از ویژگی‌های رشدی، بیوشیمیایی، عملکرد و اجزای عملکرد جو پائیزه در شرایط تنش خشکی بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌صورت فاکتوریل سه عاملی (۳×۴×۲) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با پنج تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان در دو سال متوالی، طی سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ بر روی گیاه جو پائیزه رقم جلگه در گلدان‌هایی با ظرفیت ۱۰ کیلو خاک به ارتفاع ۳۰ و به قطر ۲۵ سانتیمتر انجام شد. عملیات کاشت بذرها در سال اول در تاریخ ۱۹ مهر و در سال دوم در تاریخ ۲۵ مهر با تراکم ۱۷ بوته در گلدان (۳۵۰ بوته در مترمربع) و برداشت محصول در اسفندماه هر دو سال صورت گرفت. تنش خشکی با اعمال دو نوع رژیم آبیاری (آبیاری کامل به‌عنوان شاهد و قطع آبیاری در مرحله گلدهی)، چهار سطح استفاده از بیوچار (بدون کاربرد بیوچار، ۰/۲۵، ۰/۵ و یک درصد وزنی در خاک) و سه سطح محلول‌پاشی با متیل جاسمونات (بدون محلول-پاشی به‌عنوان شاهد، سطوح کاربرد ۵۰ و ۱۰۰ میکرو مول بر لیتر) استفاده شد. بیوچار طبیعی یا معدنی استخراج‌شده از معادن کوهبنان استان کرمان، از شرکت آقای بیوچار کرمان خریداری شد. کاربرد بیوچار در خاک از ابتدای آزمایش و قبل از کاشت بر اساس تیمارهای طراحی‌شده انجام شد. قطع آبیاری، در مرحله گلدهی بر اساس ظرفیت زراعی تعیین‌شده بر گیاهان اعمال شد و هم‌زمان، محلول‌پاشی هورمون متیل جاسمونات بر اساس سطوح غلظت تعیین‌شده انجام شد. برای این کار، ابتدا میزان هورمون لازم برای ایجاد غلظت موردنظر بر اساس مولاریته هورمون متیل جاسمونات تعیین و به‌تدریج در آب مخلوط شد و با استفاده از آبپاش برقی تیمارهای هورمونی اعمال شدند. پس از رسیدن رطوبت خاک به منفی دو مگاپاسکال و اطمینان از وقوع تنش خشکی بر گیاهان، در این مرحله نمونه‌برداری از گیاهان صورت گرفته و نمونه‌های برگی در حالت فریز شده با ازت مایع به آزمایشگاه فیزیولوژی گیاهان زراعی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان منتقل‌شده، در دمای ۸۰- درجه سلسیوس نگهداری و اندازه‌گیری صفات بیوشیمیایی به‌تدریج انجام شد. دمای روزانه و شبانه گلخانه در هر دو سال به ترتیب روی ۲۳ و ۱۸ درجه سانتی‌گراد، میزان دی‌اکسید کربن محیط روی ۴۲۰ قسمت در میلیون و رطوبت گلخانه روی ۶۰ درصد تنظیم شد. اندازه‌گیری صفات رشدی، عملکرد و اجزای عملکرد شامل ارتفاع بوته، وزن خشک کل (شامل وزن خشک ساقه، برگ، سنبله و دانه)، تعداد سنبله بارور در واحد سطح، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت در انتهای فصل رشد صورت گرفت. برای به دست آوردن شاخص برداشت از رابطه زیر استفاده شد (Yang and Zhang, 2010).

$$HI = (GY/BY) \times 100 \quad [۱]$$

در این رابطه GY عملکرد دانه، BY عملکرد بیولوژیک و HI شاخص برداشت است (Yang and Zhang, 2010).

پرولین با کمک روش بیتس (Bates, 1973) اندازه‌گیری شده و میزان جذب نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۵۲۰ نانومتر قرائت شد. برای اندازه‌گیری غلظت کربوهیدرات‌های محلول برگ از روش سوموگی و نلسون (Somogyi and Nelson, 1952) استفاده شد. برای این منظور ۰/۲ گرم نمونه تازه برگی با ازت مایع پودر شده و سه میلی‌لیتر اتانول ۹۵ درصد به آن اضافه شد. پس از مدتی با خالی کردن محلول رویی نمونه مقداری اتانول ۷۰ درصد به فالکون اضافه شد تا حجم آن به ۱۰ میلی-لیتر برسد و بعدازآن نمونه‌ها در ۲۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شده و پس از برداشت ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره ایجادشده همراه با سه میلی‌لیتر محلول آنترون و اسیدسولفوریک میزان جذب نمونه با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۶۲۵ نانومتر قرائت شد. عدد نهایی پرولین و کربوهیدرات محلول با استفاده از رسم نمودار خطی استاندارد و معادله استاندارد محاسبه شد.

درصد نشت الکترولیت‌ها با استفاده از روش لوتس و همکاران (Lutts et al., 1996) اندازه‌گیری شده و مقدار نهایی با استفاده از معادله زیر محاسبه شد (Lutts et al., 1996).

$$EL=L1/L2\times100 \quad [۲]$$

در این رابطه EL نشت الکترولیت، L1 و L2 به ترتیب بیانگر ضریب هدایت الکتریکی اول و دوم هستند.

غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی با استفاده از روش آرنون (Arnon, 1949) اندازه‌گیری شد. برای این منظور با استفاده از استون ۸۰ درصد ۰/۵ گرم نمونه برگی فریز شده هموژنایز

شده و رنگیزه‌ها استخراج شدند و توسط دستگاه اسپکتروفتومتر میزان جذب در سه طول‌موج ۶۶۳، ۶۴۵ و ۴۷۰ نانومتر قرائت گردید و مقدار نهایی رنگیزه‌ها با استفاده از معادلات آرنون (Arnon, 1949) محاسبه شدند.

$$Chl.\ a\ (\mathrm{mg/g\,FW}) = \frac{[12.7(A663)-2.69(A645)]\times V}{1000\times W} \quad [۳]$$

$$Chl.\ b\ (mg/g\ FW) = \frac{[22.9(A645)-4.68(A663)]\times V}{1000\times W} \quad [۴]$$

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

آزمون نرمال بودن داده‌ها به روش Kolmogrove-smirnov انجام شد. داده‌های به‌دست‌آمده به کمک نرم‌افزار SAS نسخه ۹,۱ مـورد تجزیه‌وتحلیل آماری قرار گرفتند. در تجزیه واریانس مرکب، تکرار و سال به‌صورت اثر تصادفی در نظر گرفته شدند، برای انجام آزمون F بر اساس امید ریاضی، منابع اشتباه آزمایشی برای هر منبع تغییر مشخص شد و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

در این آزمایش اثر تنش خشکی بر وزن خشک کل، شاخص برداشت و کاروتنوئید در سطح پنج درصد و نشت الکترولیت در سطح یک درصد معنی‌دار بود و بر بقیه صفات اثر معنی‌داری نگذاشت. کاربرد بیوچار بر ارتفاع، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت و کلروفیل b در سطح پنج درصد و بر وزن خشک کل، کلروفیل a و کلروفیل کل در سطح یک درصد اثر معنی‌دار داشت. هورمون متیل جاسمونات بر وزن خشک کل، در سطح یک درصد و بر کلروفیل a در سطح پنج درصد تأثیر معنی‌دار داشت. اثر متقابل تنش خشکی در بیوچار و همچنین اثر متقابل تنش خشکی و متیل جاسمونات بر هیچ‌کدام از صفات موردمطالعه اثر معنی‌دار نداشت. اثر متقابل بیوچار در متیل جاسمونات تأثیر معنی‌دار در سطح یک درصد بر وزن خشک کل، عملکرد دانه و کلروفیل a گذاشت و باعث ایجاد تغییر معنی‌دار در شاخص برداشت، محتوای پرولین و نشت الکترولیت در سطح پنج درصد شد اما تأثیر آن بر بقیه صفات معنی‌دار نبود. اثر متقابل سه‌گانه تنش خشکی، بیوچار و متیل جاسمونات باعث ایجاد تغییرات معنی‌دار در وزن خشک کل و پرولین در سطح یک درصد و نشت الکترولیت در سطح پنج درصد شد و بر بقیه صفات به‌صورت معنی‌دار مؤثر نبود. اثر متقابل چهارگانه سال، تنش خشکی، بیوچار و متیل جاسمونات نیز باعث ایجاد تغییرات معنی‌دار در کربوهیدرات محلول و کلروفیل b در سطح یک درصد شد اما بر بقیه صفات موردمطالعه غیرمعنی‌دار بود (جدول‌های ۱ و ۲).

مقایسه میانگین اثر سه‌گانه تنش خشکی، بیوچار و متیل جاسمونات نشان داد که بالاترین وزن خشک کل در اثر استفاده از ۰/۲۵ درصد بیوچار و محلول‌پاشی ۵۰ میکرومول بر لیتر متیل جاسمونات در شرایط آبیاری نرمال به دست آمد و پایین‌ترین وزن خشک کل در شرایط تنش خشکی و استفاده از یک درصد وزن خاک بیوچار ایجاد شد (شکل ۱). بر این اساس استفاده از سطوح ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد وزن خاک بیوچار وزن خشک را به‌طور قابل‌توجهی در شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری، نسبت به شاهد بدون بیوچار افزایش داد. این در حالی است که تیمار بیوچار به میزان یک درصد وزن خاک باعث افزایش نه‌چندان زیاد مقدار وزن خشک در مقایسه با تیمار شاهد در هر دو سطح آبیاری شد. در آزمایشی اعمال مشاهده شد که تنش خشکی باعث کاهش وزن خشک کل در بامیه شد اما استفاده از بیوچار باعث افزایش وزن خشک کل هم در گیاهان تنش دیده و هم آبیاری شده نرمال گردید (Batool et al., 2015). مصطفی و همکاران (Mustafa et al., 2010) نیز در گوجه‌فرنگی به همین نتایج دست یافتند. گزارش شده است که دلیل کاهش وزن خشک کل در گیاهان تحت تنش خشکی به خاطر کاهش تنفس، کاهش سطح برگ، همچنین کاهش سرعت فتوسنتز و درنتیجه کاهش ماده سازی و انتقال مواد در این گیاهان است (Sankar et al., 2008; Hossain et al., 2012; Batool et al., 2015).

دلیل افزایش وزن خشک گیاهان تنش دیده و آبیاری شده در شرایط نرمال در اثر استفاده از بیوچار این است که استفاده از بیوچار با کاهش اثرات منفی تنش خشکی مانند جلوگیری از کمبود شدید آب در منطقه توسعه ریشه، اجتناب از وقوع تنش خشکی، بهبود سرعت فتوسنتز و ماده سازی مطلوب، سطح برگ و اندام‌های فتوسنتز کننده توسعه بیشتری نسبت به گیاهان شاهد بدون بیوچار پیدا کرده و درنهایت وزن خشک بیشتری تولید خواهند کرد (Batool et al., 2015). محققین بیان کردند که علت دیگر افزایش وزن خشک گیاهان در شرایط تنش خشکی در اثر استفاده از بیوچار در مقایسه با گیاهان شاهد بدون بیوچار اثر این ماده

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

Table 1. Variance analysis of the effects of stress, methyl jasmonate, and biochar on some growth characteristics, yield, and yield components of barley under drought stress

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	ارتفاع Height	وزن خشک کل Total dry weight	تعداد سنبله بارور Spike number	وزن هزار دانه 1000 grain weight	عملکرد دانه Grain yield	عملکرد بیولوژیک Biological yield	شاخص برداشت Harvest index
سال Year	1	707.27*	0.114^{ns}	473.20*	51.89^{ns}	345.82*	1.99*	3.02^{ns}
بلوک Block (year)	8	31.61	0.048	29.60	105.90	22.01	0.12	181.75
تنش خشکی D	1	0.27^{ns}	2.832*	283.84^{ns}	3026.02^{ns}	612.32^{ns}	1.02^{ns}	6017.0**
بیوچار B	3	187.74*	1.050**	58.52^{ns}	862.02^{ns}	114.07^{ns}	0.60*	467.68*
متیل جاسمونات M	2	9.55^{ns}	0.739**	116.49^{ns}	238.99^{ns}	105.87^{ns}	0.15^{ns}	959.23^{ns}
تنش خشکی و بیوچار D×B	3	10.08^{ns}	0.044^{ns}	4.93^{ns}	43.12^{ns}	4.01^{ns}	0.06^{ns}	127.28^{ns}
تنش خشکی و متیل جاسمونات D×M	2	13.33^{ns}	0.023^{ns}	4.36^{ns}	23.88^{ns}	2.28^{ns}	0.03^{ns}	84.53^{ns}
بیوچار و متیل جاسمونات B×M	6	27.22^{ns}	0.057**	9.48^{ns}	66.09^{ns}	12.39**	0.06^{ns}	247.16*
تنش خشکی، بیوچار و متیل جاسمونات D×B×M	6	8.09^{ns}	0.018**	2.57^{ns}	8.89^{ns}	1.70^{ns}	0.02^{ns}	70.50^{ns}
سال و تنش خشکی Year × D	1	3.27^{ns}	0.001^{ns}	7.00^{ns}	25.61^{ns}	8.30^{ns}	0.03^{ns}	9.40^{ns}
سال و بیوچار Year × B	3	14.74^{ns}	0.011^{ns}	33.47**	110.11**	12.66**	0.03^{ns}	21.80^{ns}
سال و متیل جاسمونات Year × M	2	17.88^{ns}	0.001^{ns}	77.63*	15.50^{ns}	27.87*	0.18**	65.71^{ns}
سال، تنش خشکی و بیوچار Year × D × B	3	12.70^{ns}	0.015^{ns}	1.76^{ns}	14.52^{ns}	2.42^{ns}	0.05^{ns}	44.03^{ns}
سال، تنش خشکی و متیل جاسمونات Year × D× M	2	7.20^{ns}	0.015^{ns}	0.90^{ns}	6.05^{ns}	0.93^{ns}	0.05^{ns}	20.92^{ns}
سال، بیوچار و متیل جاسمونات Year × B × M	6	7.74^{ns}	0.006^{ns}	7.95^{ns}	37.75^{ns}	1.42^{ns}	0.05^{ns}	34.86^{ns}
سال، تنش خشکی،بیوچار و متیل جاسمونات Year×D×B×M	6	13.32^{ns}	0.002^{ns}	1.61^{ns}	6.55^{ns}	0.92^{ns}	0.03^{ns}	23.80^{ns}
خطا Error	184	11.74	0.01	7.36	24.64	2.19	0.04	71.69
ضریب تغییرات CV%	-	*8.16*	*12.18*	*28.56*	*18.38*	*17.61*	*16.23*	*23.71*

ns،* و ** به ترتیب نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد است.

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

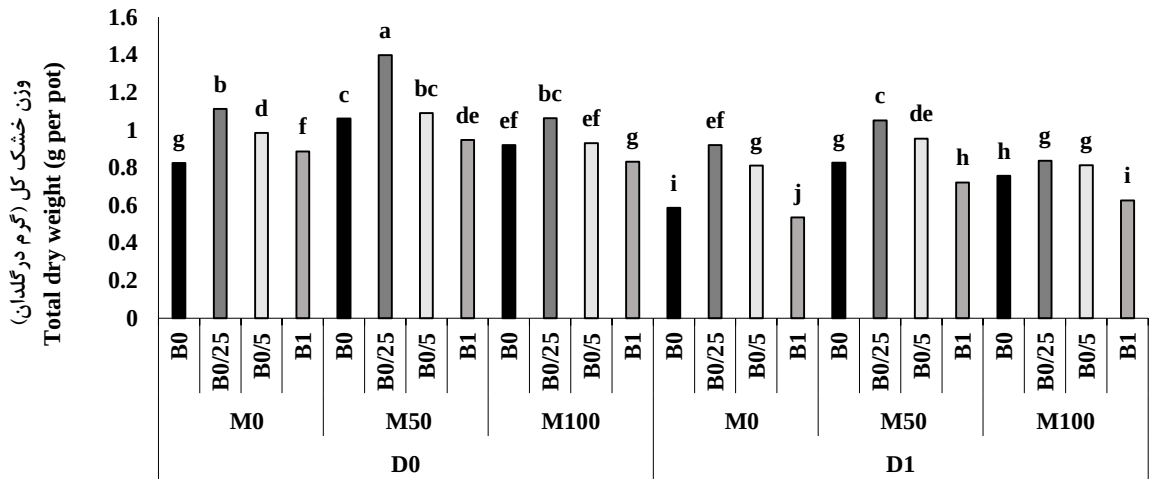
جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس اثر تنش، متیل جاسمونات و بیوچار بر برخی صفات بیوشیمیایی جو در شرایط تنش خشکی

Table 2. Variance analysis of the effects of stress, methyl Jasmonate and Biochar on some biochemical traits of barley under drought stress

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	پرولین proline	کربوهیدرات Carbohydrate	نشت الکترولیت Electrolyte leakage	کلروفیل Chlorophyll a	کلروفیل Chlorophyll b	کلروفیل Chlorophyll Total	کاروتنوئید Carotenoid
سال Year	1	0.472**	11914.50*	1097.82*	1.77^{ns}	47.17**	29.54*	5.80**
بلوک Block (year)	8	0.004	1259.61	81.99	1.38	0.31	3.42	0.36
تنش خشکی D	1	4.626^{ns}	445257^{ns}	11630.16**	235.62^{ns}	51.52^{ns}	504.02^{ns}	20.71*
بیوچار B	3	0.578^{ns}	37712.04^{ns}	2384.46^{ns}	75.58**	14.03*	155.33**	4.61^{ns}
متیل جاسمونات M	2	0.060^{ns}	13360.39^{ns}	1666.53^{ns}	39.18*	4.90^{ns}	42.12^{ns}	2.49^{ns}
تنش خشکی و بیوچار D×B	3	0.269^{ns}	18810.35^{ns}	107.22^{ns}	2.20^{ns}	0.60^{ns}	2.90^{ns}	0.26^{ns}
تنش خشکی و متیل جاسمونات D×M	2	0.006^{ns}	1642.09*	387.65**	1.46^{ns}	0.30^{ns}	2.37^{ns}	0.09^{ns}
بیوچار و متیل جاسمونات B×M	6	0.060^{ns}	826.77^{ns}	289.43^{ns}	6.36^{ns}	1.29^{ns}	9.17^{ns}	0.33^{ns}
تنش خشکی، بیوچار و متیل جاسمونات D×B×M	6	0.044**	383.43^{ns}	236.95*	1.64^{ns}	0.44^{ns}	3.11*	0.11^{ns}
سال و تنش خشکی Year × D	1	0.122**	7361.55**	1.03^{ns}	4.70*	2.99**	15.50**	0.02^{ns}
سال و بیوچار Year × B	3	0.087**	4680.81**	586.76**	1.70^{ns}	1.26**	4.15^{ns}	0.85*
سال و متیل جاسمونات Year × M	2	0.008^{ns}	824.04^{ns}	140.06^{ns}	0.41^{ns}	2.73**	5.15^{ns}	0.20^{ns}
سال، تنش خشکی و بیوچار Year × D × B	3	0.044**	2687.25**	101.13^{ns}	1.10^{ns}	0.16^{ns}	1.41^{ns}	0.21^{ns}
سال، تنش خشکی و متیل جاسمونات Year × D× M	2	0.001^{ns}	1904.28*	32.07^{ns}	1.39^{ns}	0.68^{ns}	2.60^{ns}	0.02^{ns}
سال، بیوچار و متیل جاسمونات Year × B × M	6	0.009*	1192.00*	37.05^{ns}	0.49^{ns}	1.06**	2.51^{ns}	0.09^{ns}
سال، تنش خشکی،بیوچار و متیل جاسمونات Year×D×B×M	6	0.004^{ns}	2321.55**	53.09^{ns}	0.61^{ns}	1.05**	0.39^{ns}	0.15^{ns}
خطا Error	184	0.004	521.37	60.85	1.17	0.29	2.08	0.24
ضریب تغییرات CV%	–	*16.16*	*26.2*	*23.96*	*18.45*	*26.56*	*18.24*	*28.49*

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

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



شکل ۱. اثر متقابل سه‌گانه تنش خشکی، بیوچار و متیل جاسمونات بر تغییرات وزن خشک کل در جو. در این شکل، B مخفف بیوچار، M مخفف متیل جاسمونات و D مخفف تنش خشکی می‌باشد.

Fig. 1. Three-way interaction of drought stress, biochar and methyl jasmonate on changes of the total dry weight in barley. In this figure, the letter B stands for biochar, M stands for methyl jasmonate and D stands for drought stress.

در افزایش جذب، فراهمی و انتقال فسفر و درنتیجه بهبود ماده سازی در گیاهان تنش دیده است (Kartika et al., 2021). همچنین گزارش شده است که متیل جاسمونات از طریق تغییر در فیتوهورمون‌ها، پلی آمین‌ها و پروتئین‌های گیاه می‌تواند باعث جلوگیری از اثرات منفی تنش خشکی در گیاهان زراعی شود (Miranshahi and Sayyari, 2016). این هورمون که در شرایط وقوع تنش، تولید بیشتری پیدا می‌کند، با بستن روزنه‌ها و جلوگیری از خروج آب از شدت تنش کاسته و وزن خشک و رشد گیاه را در شرایط نزدیک به مطلوب حفظ می‌کند (Ghasem et al., 2012).

در این آزمایش، بیوچار و متیل جاسمونات هم در شرایط کاربرد مستقل و هم با کاربرد هم‌زمان باعث افزایش عملکرد دانه در مقایسه با شرایط عدم استفاده از این دو ماده شدند (جدول ۳). بر اساس نتایج مشاهده‌شده، بیشترین عملکرد دانه (۹/۵۱ گرم در گلدان) در اثر استفاده هم‌زمان از بیوچار به میزان ۰/۲۵ وزن خاک و محلول‌پاشی متیل جاسمونات با غلظت ۵۰ میکرومول در لیتر و کمترین عملکرد دانه (۴ گرم در گلدان) در اثر عدم استفاده از این دو ماده ایجاد شد. تأثیر استفاده از بیوچار در افزایش عملکرد گندم توسط آلبرکوئرک (Alburguergue et al., 2017) نیز گزارش شده است. دلیل تأثیر بیوچار در افزایش عملکرد گیاهان زراعی به دلیل تأثیر مثبت آن در تغییر خصوصیات خاک، قابلیت هدایت الکتریکی خاک، ظرفیت زراعی خاک و همچنین فراهمی عناصر غذایی است (Chan et al., 2007; Alburguergue et al., 2017). جاویدپور و همکاران (Javidpour et al., 2019) گزارش کردند که در آزمایش آن‌ها استفاده از متیل جاسمونات به میزان ۱۰۰ میکرومول در لیتر باعث افزایش طول دوره رشد، تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک و درنتیجه افزایش نسبی عملکرد در مقایسه با شرایط عدم محلول‌پاشی می‌شود. همچنین گزارش شده است که متیل جاسمونات با بستن روزنه، تنظیم تولید اسمولیت های سازگار و فعالیت آنزیمی باعث جلوگیری یا کاهش شدت تنش‌های محیطی شده و از کاهش عملکرد گیاهان زراعی جلوگیری می‌نماید (Abdoli and Saeidi, 2012). در این آزمایش مشاهده شد که استفاده توأم از بیوچار و متیل جاسمونات در مقادیر بهینه باعث بهبود وضعیت شاخص برداشت به‌عنوان تابعی از میزان عملکرد دانه، نسبت به تیمارهای شاهد بدون بیوچار و متیل جاسمونات شد به‌نحوی‌که بیشترین شاخص برداشت در اثر استفاده از بیوچار ۰/۲۵ درصد وزن خاک و محلول‌پاشی ۵۰ میکرو مول بر لیتر متیل جاسمونات و کمترین با استفاده از بیوچار یک درصد بدون متیل جاسمونات مشاهده شد (جدول ۳). پژوهش‌های دیگری نیز افزایش شاخص برداشت را در اثر استفاده از بیوچار تولیدشده از نیشکر گزارش کردند (Huang et al., 2019; Lin et al., 2015; Lashari et al., 2013). همچنین در آزمایشی دیگر محلول‌پاشی متیل جاسمونات باعث افزایش عملکرد دانه و همچنین شاخص برداشت در گندم شد (Javidpour et al., 2019). افزایش شاخص برداشت و عملکرد دانه گیاهان زراعی در شرایط استفاده از

بیوچار به‌عنوان نشانه‌ای بر تأثیر این ماده در افزایش تشکیل و بهبود پر شدن دانه در اثر عدم ورود جدی تنش به گیاه و فراهمی نسبی آب برای فرآیند انتقال مواد فتوسنتزی در شرایط تنش بیان شده است (Huang et al., 2019). همچنین گزارش شده است که استفاده از متیل جاسمونات از طریق افزایش طول دوره رشد گیاه، افزایش فتوسنتز، توان مخزن در ساقه و احتمالاً افزایش انتقال مجدد مواد فتوسنتزی باعث افزایش تعداد دانه، وزن دانه و همچنین نسبت عملکرد اقتصادی به عملکرد بیولوژیک گیاه و درنتیجه افزایش شاخص برداشت می‌شود (Javaidpour et al., 2019).

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر متقابل بیوچار و متیل جاسمونات بر برخی از صفات جو. در این جدول، B مخفف بیوچار و M مخفف متیل جاسمونات می‌باشد.

Table 3. Mean comparisons of the interaction between biochar and Methyl Jasmonate on some parameters of barley. In this table, the letter B stands for biochar and M refers to methyl jasmonate.

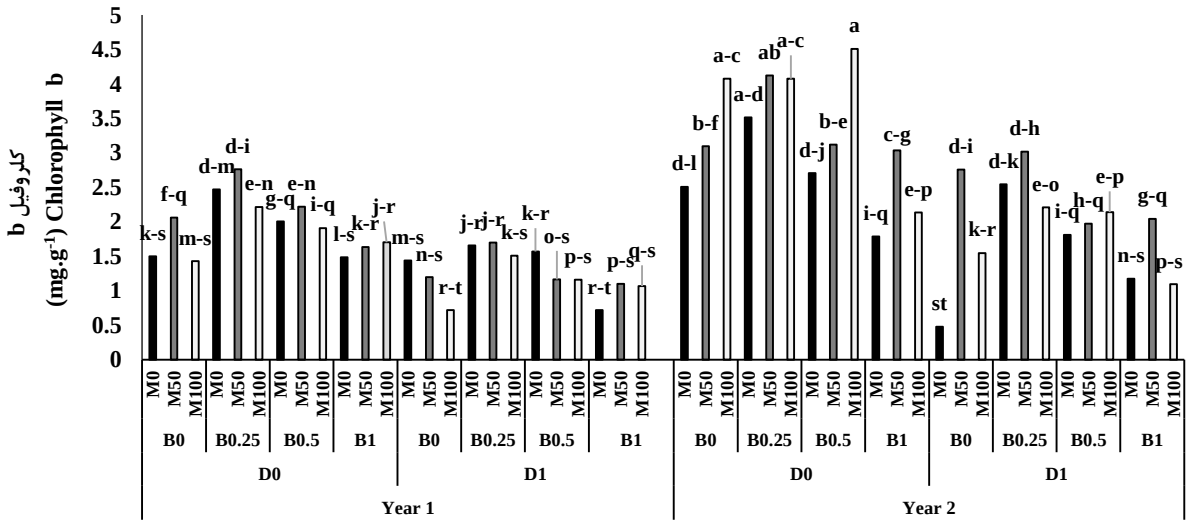
BIO (%)	MJ	شاخص برداشت HI	عملکرد دانه Seed yield	کلروفیل a Chlorophyll a
	µmol/liter	%	g per pot	$mg.g^{-1}$
B0	M_0	26.74^{e}	4^{g}	3.93^{f}
	M_{50}	41.35^{ab}	7.5^{b}	6.33^{bcd}
	M_{100}	38.7^{bc}	5.56^{d}	5.66^{de}
B0.25	M_0	37.64^{bcd}	8.05^{b}	6.85^{b}
	M_{50}	46.3^{a}	9.51^{a}	8.34^{a}
	M_{100}	39.63^{bc}	6.53^{c}	6.58^{bc}
B0.5	M_0	36.69^{bcd}	5.59^{d}	6.05^{cde}
	M_{50}	38.08^{bcd}	7.35^{bc}	6.52^{bc}
	M_{100}	37.3^{bcd}	4.95^{def}	6.18^{bcd}
B1	M_0	32.97^{d}	4.39^{fg}	4.36^{f}
	M_{50}	35.51^{cd}	5.37^{de}	5.43^{e}
	M_{100}	36.53^{bcd}	4.5^{efg}	4.27^{f}

میانگین‌ها با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی دار ندارند.

Means with similar letters in each column are not significantly different at the 5% level based on the LSD test.

نتایج مقایسات میانگین اثر متقابل بیوچار در متیل جاسمونات نشان داد که استفاده از بیوچار و متیل جاسمونات به‌صورت تنها و توام باهم باعث بهبود غلظت کلروفیل a شد (جدول ۳ و شکل ۲). در این آزمایش مشاهده شد که بیشترین غلظت کلروفیل a در شرایطی به دست آمد که مقدار ۰/۲۵ درصد وزن خاک بیوچار همراه با ۵۰ میکرو مول بر لیتر متیل جاسمونات استفاده شد و کمترین مقدار غلظت این رنگیزه‌ها زمانی بود که گیاهان تحت تیمار بیوچار و متیل جاسمونات قرار نگرفتند (جدول ۳). بیشترین غلظت کلروفیل b نیز در سال دوم و در شرایطی ایجاد شد که آبیاری نرمال همراه با استفاده از ۰/۵ درصد وزن خاک بیوچار و ۱۰۰ میکرو مول بر لیتر محلول‌پاشی متیل جاسمونات استفاده شد (شکل ۲). کاهش سطح غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی در شرایط تنش‌های محیطی مانند تنش خشکی در مطالعات متعددی گزارش شده است. محققین گزارش کردند که تنش خشکی باعث کاهش غلظت کلروفیل و کاروتنوئید شده اما استفاده از بیوچار باعث بهبود محتوای این رنگیزه‌ها گردید (Hafez et al., 2020). کومار سوتار و همکاران (Kumar Soothar et al., 2021) بهبود غلظت کلروفیل در گیاهان تنش دیده را گزارش کردند. کاهش غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی در شرایط تنش خشکی به اثرات منفی آن در فعالیت آنزیم‌های فتوسنتزی مانند آنزیم‌های مخصوص چرخه کالوین و تجمع رادیکال‌های آزاد اکسیژن مربوط می‌شود که باعث تأثیر منفی بر کلروپلاست و درنتیجه کاهش اسیمیلاسیون کربن و درنهایت کاهش تولید رنگیزه‌ها می‌شود (Abdelaal et al., 2014; Hafez et al., 2020). بهبود غلظت کلروفیل در شرایط استفاده از بیوچار به دلیل افزایش محتوای کربن خاک، افزایش نیتروژن خاک در اثر افزایش جمعیت میکروبی خاک و همچنین بهبود نگهداری آب در خاک است که درنتیجه محتوای نسبی آب برگ افزایش پیداکرده و منجر به جلوگیری از وقوع تنش خشکی یا جبران اثرات منفی آن می‌شود (Wei et al., 2020; Hafez et al., 2020). همچنین گزارش شده

است که علت افزایش غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی در اثر استفاده از بیوچار بهبود اسیدیته خاک و درنتیجه افزایش فراهمی عناصر غذایی در منطقه توسعه ریشه است که باعث افزایش تولید رنگیزه‌های فتوسنتزی خواهد شد (Hafez et al., 2020). پژوهشگران در آزمایشی گزارش کردند که با کاربرد متیل جاسمونات، اثرات منفی تنش خشکی در توت‌فرنگی بر غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی کاهش داده است (Zahedi et al., 2019). همچنین افزایش غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی در اثر استفاده از متیل جاسمونات در آزمایش‌های مختلفی روی سویا (Mohamed and Latif, 2017)، ذرت (Tayyab et al., 2020) و لوبیا (Mohi-Ud-Din et al., 2021) گزارش شده است. دلیل این موضوع نقش محافظتی جاسمونات‌ها در کنترل تولید پروتئین و آنزیم‌ها و همچنین جلوگیری از تخریب شدن کلروفیل‌ها و کارتنوئیدها عنوان شده است (Saiprasad et al., 2004; Rudell and Fellman, 2005). علیخانی و همکاران (Alikhani et al., 2019) عنوان کردند که متیل جاسمونات باعث تنظیم تولید آنتی‌اکسیدان‌ها و جلوگیری از تنش اکسیداتیو شده و از تخریب کلروپلاست‌ها و کاهش غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی جلوگیری می‌کنند. همچنین گزارش شده است که ازآنجایی‌که جاسمونیک اسیدها توانایی محافظت از RNA و DNA و همچنین تولید پروتئین و کنترل عمل آنزیم‌ها را دارند بنابراین می‌توانند از نابود شدن رنگیزه‌ها و آنتوسیانین ها در گیاه جلوگیری کنند (Zahedi et al., 2019). ضمن اینکه احتمالاً جاسمونیک اسید با افزایش تولید هورمون‌های دیگر گیاهی، آنزیم‌ها و افزایش سوخت‌وساز گیاه، تولید رنگیزه ها را افزایش داده و از این طریق بر افزایش فتوسنتز اثر می گذارد (Capitani et al., 2005).



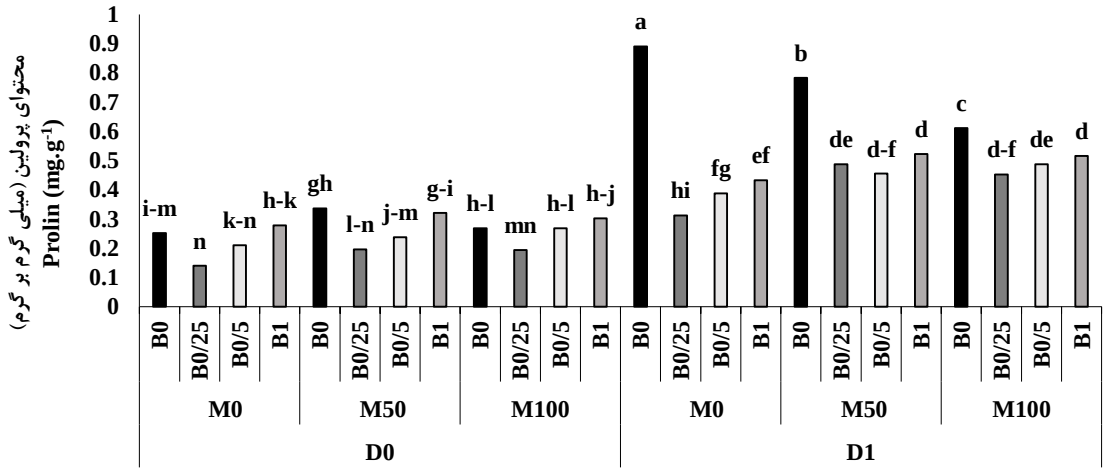
شکل ۲. اثر متقابل چهارگانه سال، تنش خشکی، بیوچار و متیل جاسمونات بر تغییرات غلظت کلروفیل b در جو. در این شکل، B مخفف بیوچار، M مخفف متیل جاسمونات و D مخفف تنش خشکی می‌باشد.

Fig. 2. Four-way interaction of year, drought stress, biochar and methyl jasmonate on changes of the concentration of chlorophyll b in barley. In this figure, the letter B stands for biochar, M stands for methyl jasmonate and D stands for drought stress.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مشاهده شد که استفاده از بیوچار باعث تقلیل اثرات منفی تنش خشکی بر محتوای پرولین و کاهش میزان پرولین شد، به‌نحوی‌که استفاده از بیوچار هم در شرایط تنش خشکی و هم در شرایط آبیاری نرمال محتوای پرولین برگ را کاهش داده و بیشترین مقدار پرولین در شرایط تنش خشکی و بدون استفاده از بیوچار و متیل جاسمونات و کمترین غلظت پرولین در اثر آبیاری نرمال به همراه ۰/۲۵ درصد وزنی خاک بیوچار مشاهده شد (شکل ۳).

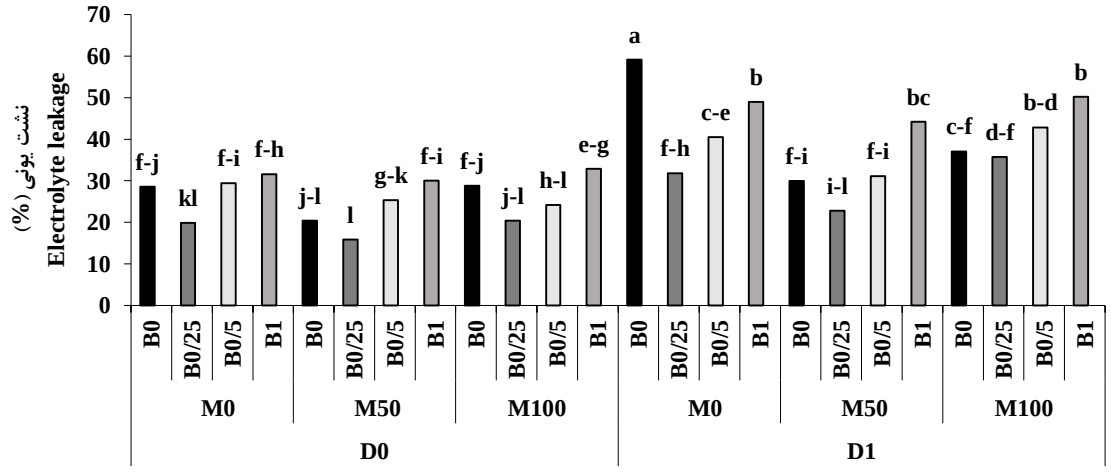
بررسی اثر متقابل سه‌گانه تنش خشکی، بیوچار و متیل جاسمونات بیانگر افزایش نشت الکترولیت‌ها در اثر اعمال تنش خشکی بود به‌نحوی‌که با اعمال تنش خشکی و در اثر عدم استفاده از بیوچار و متیل جاسمونات بیشترین مقدار نشت الکترولیت‌ها در گیاهان تحت تنش مشاهده شد؛ اما بر

اساس نتایج، استفاده از بیوچار و متیل جاسمونات هم در شرایط تنش و هم در شرایط آبیاری نرمال باعث کاهش نشت الکترولیت‌ها شد. بالاترین میزان نشت الکترولیت‌ها در شرایط تنش خشکی و بدون استفاده از بیوچار و متیل جاسمونات و کمترین مقدار در اثر استفاده از ۰/۲۵ درصد بیوچار و ۵۰ میکرومول بر لیتر متیل جاسمونات در شرایط آبیاری نرمال مشاهده شد (شکل ۴).



شکل ۳. اثر متقابل سه‌گانه تنش خشکی، بیوچار و متیل جاسمونات بر تغییرات محتوای پرولین در جو. در این شکل، B مخفف بیوچار، M مخفف متیل جاسمونات و D مخفف تنش خشکی می‌باشد.

Fig. 3. Three-way interaction of drought stress, biochar and methyl Jasmonate on proline content alterations of barley. In this figure, the letter B stands for biochar, M stands for methyl jasmonate and D stands for drought stress.



شکل ۴. اثر متقابل سه‌گانه تنش خشکی، بیوچار و متیل جاسمونات بر تغییرات نشت الکترولیت در جو. در این شکل، B مخفف بیوچار، M مخفف متیل جاسمونات و D مخفف تنش خشکی می‌باشد.

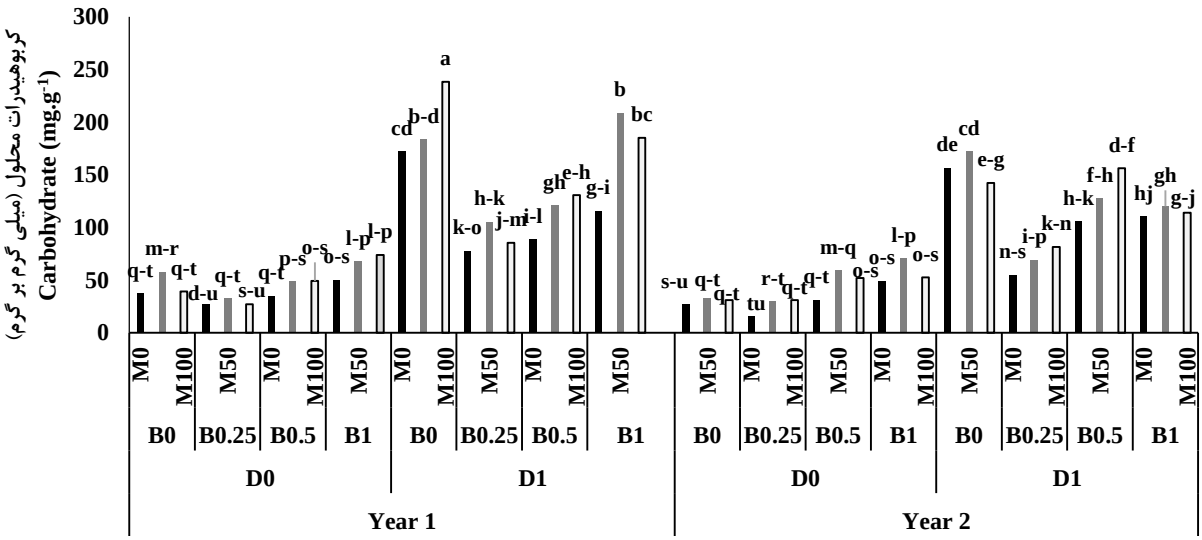
Fig.4. Three-way interaction **of drought stress, biochar and methyl Jasmonate on electrolyte leakage alterations of barley. In this figure, the letter B stands for biochar, M stands for methyl jasmonate and D stands for drought stress.**

در آزمایشی با نتایج مشابه نیز مشاهده شد که علی‌رغم افزایش غلظت پرولین و نشت الکترولیت در گیاهان موردمطالعه جو در اثر وقوع تنش خشکی، استفاده از بیوچار به‌تنهایی و یا به‌صورت توأم با سالیسیلیک اسید باعث کاهش نسبتاً زیاد غلظت پرولین و نشت الکترولیت شد (Hafez et al., 2020). در آزمایشی در بوته‌های تحت تنش جو در شرایط خشکی، محتوای پرولین و نشت الکترولیت افزایش یافت اما در اثر استفاده از بیوچار، بدون و یا همراه با ماده کیتوسان اثرات منفی تنش خشکی در گیاهان موردمطالعه کاهش یافت (Hafez et al., 2020). در آزمایش‌های دیگر

بر روی جو (*Hordeum vulgare* L.)، آفتابگردان (Helianthus) و آرابیدوپسیس (*Arabidopsis thaliana*)، نیز افزایش در محتوای پرولین و نشت الکترولیت در اثر تنش خشکی گزارش شده است (Abdelaal et al., 2014; Hussain et al., 2008, Gurrieri et al., 2020). دلیل این تغییرات، اثر منفی تنش خشکی بر عملکرد غشای پلاسمایی و از دست رفتن آب سیتوپلاسم عنوان شده است که درنتیجه منجر به افزایش نشت الکترولیت، پراکسیداسیون چربی‌های غشاء و همچنین محتوای پرولین در گیاهان آسیب‌دیده می شود (Hafez et al., 2020). همچنین در شرایط تنش خشکی پرولین در حفظ پتانسیل اسمزی، حذف رادیکال‌های آزاد، حفاظت از درشت مولکول‌ها از تغییر ساختار و تنظیم اسیدیته نقش دارد و به‌عنوان منبع نیتروژن و کربن برای گیاهان تحت تنش عمل می‌کند که این موضوع توان گیاه برای مقاومت در مقابل تنش را افزایش می‌دهد (Zahedi et al., 2019). دلیل اثرات مثبت کاربرد بیوچار در گیاهان تنش دیده در کاهش اثرات منفی تنش خشکی بر محتوای پرولین و نشت الکترولیت به خاطر اثر مثبت آن در حفاظت پایداری غشای پلاسمایی از طریق حفظ تعادل آب در گیاه، تنظیم فشار آب در سلول‌ها و بهبود محتوای نسبی آب و همچنین کاهش تنش اکسیداتیو است که درنتیجه منجر به کاهش این اثرات می‌شود (Ahmed et al., 2016; Hafez et al., 2020). در شرایط تنش‌های محیطی تغییر در سیال بدون فسفولیپیدهای غشاهای زیستی و غیرفعال کردن آن‌ها باعث کاهش سرعت یا اختلال در عملکرد غشا شده و نشت یونی افزایش می‌یابد (Bazl et al., 2015). ضمن اینکه تنش اکسایش ناشی از تنش‌های محیطی که درنتیجه افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن است باعث افزایش صدمه به غشا می شود که متیل جاسمونات با جلوگیری یا تقلیل شدت تنش باعث کاهش این اثرات و کاهش نشت یونی می‌شود (Hana and Bischoff, 2004). پژوهشگران گزارش کردند که استفاده از متیل جاسمونات در شرایط تنش خشکی باعث افزایش غلظت پرولین در برگ‌های موز به‌عنوان یک مکانیسم دفاعی در برابر تنش‌های محیطی می‌شود (Mahmood et al., 2012). به نظر می‌رسد متیل جاسمونات در القای آنزیم های تولیدکننده پرولین باعث افزایش سطح آن در گیاهان تنش دیده شود و از این طریق باعث افزایش مقاومت گیاه در شرایط تنش‌های محیطی می‌گردد (Zahedi et al., 2019; Fedina and Banderliev, 2000).

مقایسه میانگین اثر چهارگانه سال، تنش خشکی، بیوچار و متیل جاسمونات نشان داد که تنش خشکی در هر دو سال باعث افزایش شدید تجمع قندهای محلول در گیاهان تنش دیده شد (شکل ۵). افزایش غلظت قندهای محلول در اثر مواجه‌شدن با تنش‌های محیطی و به‌خصوص خشکی در آزمایش‌های مختلف گزارش شده است (Ghaffari et al., 2022; Hafez et al., 2020; Gurrieri et al., 2020; Zhu et al., 2019). گزارش شده است که افزایش غلظت قندهای محلول ارتباط نزدیکی با محتوای نسبی آب برگ و توان تحمل به تنش گیاهان دارد (Ghaffari et al., 2022; Zeighami et al., 2020). نتایج نشان داد که با وقوع تنش خشکی در هر دو سال آزمایش، غلظت قندهای محلول افزایش یافت اما در گیاهانی که بستر کشت آن‌ها حاوی بیوچار بود غلظت قندهای محلول کاهش نشان داد. افزایش قندهای محلول در شرایط تنش در اثر کاهش رشد و درنتیجه کاهش نیاز به مواد فتوسنتزی و همچنین تخریب کربوهیدرات‌های نامحلول است (Zahedi et al., 2019). این موضوع باعث حفظ تورژسانس سلول‌های برگ، حفاظت غشاهای سلولی و بازدارندگی تخریب پروتئین‌ها می‌شود و از راه تأمین انرژی موردنیاز گیاه از مرگ حتمی آن جلوگیری می‌کند (Xue et al., 2008). محلول‌پاشی متیل جاسمونات باعث افزایش غلظت قندهای محلول در شرایط تنش نسبت به شاهد بدون تنش شد. بیشترین غلظت کربوهیدرات محلول در سال اول و در شرایط تنش خشکی و با استفاده از ۱۰۰ میکرو مول در لیتر متیل جاسمونات مشاهده شد (۲۳۸/۱ میلی‌گرم بر گرم) درحالی‌که کمترین غلظت در سال دوم، در شرایط آبیاری نرمال و با استفاده از کاربرد بیوچار ۰/۲۵ درصد ایجاد شد (۱۵/۶ میلی‌گرم بر گرم). در آزمایش‌های مختلفی گزارش شده است که استفاده از بیوچار باعث کاهش غلظت قندهای محلول در شرایط تنش خشکی می‌شود که به نظر می‌رسد نشانه‌ای بر عدم ورود تنش خشکی به درون سلول-های گیاه باشد و این کاهش غلظت کربوهیدرات، به دلیل تأثیر مثبت بیوچار در نگهداری آب در خاک و تأمین به‌موقع و تقریباً دائمی آب برای گیاه و درنتیجه تعدیل پتانسیل آب در سلول و حفاظت غشای پلاسمایی از تخریب باشد که درنهایت توانایی گیاه در حفظ سطح محتوای نسبی آب و کاهش تنش‌های اکسیداتیو را افزایش می‌دهد (Ahmed at al., 2016). در پژوهشی دیگر عنوان شد که محلول‌پاشی متیل جاسمونات باعث افزایش غلظت قندهای محلول در

گیاهان تنش دیده می‌شود که این عامل باعث افزایش مقاومت گیاهان در مقابل از دست دادن سریع آب، کاهش خسارت به غشای سلولی و تسریع رشد گیاه در شرایط تنش خشکی می‌شود. ازآنجایی‌که جاسمونات‌ها از طریق آوند چوب و آبکش انتقال داده می‌شوند و در غشای سلول می‌توانند به‌عنوان نوعی قند انتقال یابند، باعث افزایش انرژی غشای پلاسمایی شده و توان گیاه را در مقابل تنش‌های مختلف افزایش می‌دهند (Hayat and Ahmad., 2007). همچنین گزارش شده است که متیل جاسمونات با فعال کردن آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و افزایش غلظت قندهای محلول از تخریب کلروفیل‌ها و کاهش فتوسنتز جلوگیری کرده و باعث بهبود رشد و عملکرد گیاه در شرایط تنش خشکی می‌شود (Ehdaie et al., 2006).



شکل ۵. اثر متقابل چهارگانه سال، تنش خشکی، بیوچار و متیل جاسمونات بر تغییرات غلظت کربوهیدرات محلول در جو. در این شکل، B مخفف بیوچار، M مخفف متیل جاسمونات و D مخفف تنش خشکی می‌باشد.

Fig.5. Four-way interaction **of year, drought stress, biochar and methyl Jasmonate on changes of the accumulation of soluble carbohydrate in barley. In this figure, the letter B stands for biochar, M stands for methyl jasmonate and D stands for drought stress.**

نتیجه‌گیری نهایی

در این آزمایش مشاهده شد که با استفاده از بیوچار و متیل جاسمونات در سطوح مطلوب می‌توان با کاهش اثرات منفی تنش خشکی بر ترکیبات مؤثر در گیاه ازجمله پرولین، کربوهیدرات محلول، رنگیزه‌های فتوسنتزی و کاهش نشت الکترولیت‌ها و همچنین بهبود پر شدن دانه و افزایش وزن دانه‌های تشکیل‌شده درنهایت باعث افزایش عملکرد در شرایط تنش خشکی شد. بهترین تیمار بیوچار و متیل جاسمونات در بسیاری از صفات موردمطالعه، چه در شرایط تنش خشکی و چه در شرایط آبیاری کامل استفاده از ۰/۲۵ وزن خاک بیوچار به همراه ۵۰ میکرومول بر لیتر متیل جاسمونات تعیین شد که می‌توانند به‌طور مؤثری در ترکیب باهم استفاده قرار گیرند. مشاهده شد که با افزایش سطح استفاده از این مواد ضد تنش در بعضی از صفات موردمطالعه امکان واکنش منفی نیز وجود دارد؛ بنابراین توصیه می‌شود که ضمن مطالعه گسترده‌تر و متعدد بر روی تیمارهای فوق در گیاهان مختلف زراعی، آزمایش‌های بیشتری در جهت یافتن مناسب‌ترین سطح استفاده از بیوچار و محلول‌پاشی متیل جاسمونات در کاهش اثرات منفی تنش خشکی مشخص و برای افزایش کارایی فعالیت‌های کشاورزی، به کشاورزان توصیه 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]. https://doi.org/10.22067/GSC.V17I1.63344

Abdelaal, K.A.A., Hafez, Y.M., Badr, M.M., Youseef, W.A., Esmaeil, S.M., 2014. Biochemical, histological and molecular changes in susceptible and resistant wheat cultivars inoculated with stripe rust fungus *Puccinia striiformis* f. sp. tritici. Egyptian Journal of Pest Control. 24, 421–429.

Abdoli, M., Saeidi, M., 2012. Using different indices for selection of resistant wheat cultivars to post anthesis water deficit in the west of Iran. Annals of Biological Research. 3, 1322–1333.

Ahmed, A.H.H., Nesiem, M.R.A.E., Allam, H.A., El-Wakil, A.F., 2016. Effect of preharvest chitosan foliar application on growth, yield and chemical composition ofWashington navel orange trees grown in two different regions. African Journal of Biochemistry Research. 10, 59–69. https://doi.org/10.5897/AJBR2016.0908

Alburguergue, J.A., Salazar, P., Barron V., Torrent, J., Del Carmen Del Campillo, M., Gallardo, A., Villar, R., 2013. Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels. Journal of Agronomy for Sustainable Development. 33, 475-484. https://doi.org/10.1007/s13593-012-0128-3

Alikhani, O., Abbaspour, H., Safipour afshar, A., Motevalizadeh Kakhaki, A.R., 2019. Effects of methyl jasmonate on cadmium accumulation, antioxidant capacity and some physiological traits of wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.). Iranian Journal of Plant Biology 32, 886-897. [In Persian]. https://dorl.net/dor/20.1001.1.23832592.1398.32.4.2.1

Arnon, D.I., 1940. Copper enzymes in isolated chloroplast polyphenol oxidase. Journal of Plant Physiology 45, 100-114. https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1

Bates, L., Waldren, P.P., Teare, J.D., 1973., Rapid determination of the free proline of water stress studies. Journal of Plant Soil. 39, 205-201. https://doi.org/10.1007/BF00018060

Batool, A., Taj, S., Rashid, A., Khalid, A., Qadeer, S., Saleem, A., Ghufran, M., 2015. Potential of soil amendments (biochar and gypsum) in increasing water use efficiency of *abelmoschus esculentus* l. Moench. Frontiers in Plant Science. 6, 1-14. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00733

Bazl, S., Karimi, R., Ershadi, A., Shahbodaghlo, A.R., Rasouli, M., 2015. Effect of foliar application of methyl jasmonate in cold tolerance improvement of greenhouse-grown cucumber cv. 'Negin' seedlings. Journal of Crops Improvement. 15, 442-455. https://doi.org/10.22059/jci.2015.55192

Capitani, F., Biondi, S., Falasca, G. Ziosi, V., 2005. Methyl jasmonate disrupts shoot formation in tobacco thin cell layers by over - inducing miotic activity and cell expatsion. Planta 22, 507-519. https://doi.org/10.1007/s00425-004-1362-y

Chan, KY., Van, Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., Joseph, S., 2007. Agronomic values of green waste biochar as a soil amendment. Australian Journal of Soil Research. 45, 629–634. https://doi.org/10.1071/SR07109

Ehdaie, B., Alloush, G.A., Madore, M.A., Waines, J.G., 2006. Genotypic variation for stem reserves and mobilization in wheat. Journal of Crop science. 46, 2093 -2103. https://doi.org/10.2135/cropsci2006.01.0013

Fedina, I.S., Benderliev, K.M., 2000. Response of Scenedesmus incrassatulus to salt stress as affected by methyl jasmonate. Biologia Plantarum. 43, 625-627. https://doi.org/10.1023/A:1002816502941

Ghaderi, K., Mohammadi, S., Dadashi, M., Majidi, A., 2021. The response of barley (*hordeum vulgare* l.) genotypes to nitrogen fertilizer application under normal irrigation and drought stress conditions. Journal of Environmental Stresses in Crop Sciences. 13, 73-84. [In Persian]. https://doi.org/10.22077/escs.2018.1375.1296

Ghaffari, H., Tadayon, M.R., Bahador, M., Razmjoo., J., 2022. Biochemical and yield response of sugar beet to drought stress and foliar application of vermicompost tea. Journal of Plant Stress. 5, 1-8. https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100087

Ghasem, F., Poustini, K., Besharati, F., Mohammadi, H.V.A., Abooei Mehrizi, F., Goettfert, M., 2012. Pre-incubation of sinorhizobium meliloti with luteolin, methyl jasmonate and genistein affecting alfalfa (*medicago sativa* l.) growth, nodulation and nitrogen fixation under salt stress conditions. Journal of Agricultural Science and Technology. 14 (6), 1255-1264. https://dorl.net/dor/20.1001.1.16807073.2012.14.6.18.8

Gurrieri, L., Merico, M., Trost, P., Forlani, G., Sparla, F., 2020. Impact of drought on soluble sugars and free proline content in selected arabidopsis mutants. Journal of Biology. 9. 367. 1-14. https://doi.org/10.3390/biology9110367

Haddad, R., Mokhlesian, S., 2016. Effect of Silicon on the peroxidase gene expression and morphological traits of barley under drought stress. Journal of Cell and Tissue. 6, 451-460. https://doi.org/10.52547/JCT.6.4.451

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 of water-stressed barley plants. Journal of Agronomy. 10, 1-18. https://doi.org/10.3390/agronomy10050630

Hafez. E.M., Kheir, A.M.S., Badawy, S.A., Rashwan, E., Farig, M., Osman, H.S., 2020. Differences in physiological and biochemical attributes of wheat in response to single and combined salicylic acid and biochar subjected to limited water irrigation in saline sodic soil. Journal of Plants. 9, 1-21. https://doi.org/10.3390/plants9101346

Hayat, S., Ahmad, A., 2007. Salicylic Acid: A Plant Hormone. Springer, Netherlands. https://doi.org/10.1007/1-4020-5184-0

Hana, B., Bischoff, J.C., 2004. Direct cell injury associated with eutectic crystallization during freezing. Journal of Cryobiology. 48, 8-21. https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2003.11.002

Hossain, M.D., Hanafi, M.M., Saleh, G., Foroughi, M., Behmaram, R., Noori, Z., 2012. Growth, photosynthesis and biomass allocation of different kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) accessions grown on sandy soil. Australian Journal of Crop Science. 6, 480–487.

Huang, M., Zhang, Z., Zhai, Y., Lu, Y., Zhu, C., 2019. Effect of straw biochar on soil properties and wheat production under saline water irrigation. Journal of Agronomy. 9. 457. 1-15. https://doi.org/10.3390/agronomy9080457

Hussain, M., Malik, M.A., Farooq, M., Ashraf, M.Y. Cheema, M.A., 2008. Improving drought tolerance by exogenous application of glycinebetaine and salicylic acid in sunflower. Journal of Agronomy and Crop Science. 194, 193–199.

Ibrahim, M.H., Adam, Y.A.A., Aboagla, M.I.E., Guisheng, Z., Nimir, E.A.N., Irshad, A., Eltyeb, S.M.S., Safiya, B.M.E., 2020. Biochar improved sorghum germination and seedling growth under salinity stress. Agronomy Journal. 112, 911–920. https://doi.org/10.1002/agj2.20026

Javidpour, Z., Balouchi H., Movahhedi Dehnavi, M., Yadavi, A., 2019. Roles of methyl jasmonate in improving growth and yield of two varieties of bread wheat (T*riticum aestivum*) under different irrigation regimes. Journal of Agricultural Water Management. 222,336-346. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.06.011

Kartika, K., Sakagami, J., Lakitan, B., Yabuta, S., Akagi, I., Ilman Widuri, L., Siaga, E., Iwanaga, H., Haq Izzawati Nurrahma, A., 2021. Rice husk biochar effects on improving soil properties and root development in rice (*Oryza glaberrima* Steud.) exposed to drought stress during early reproductive stage. Journal of Agriculture and Food. 6, 737-751. https://doi.org/10.3934/agrfood.2021043

Kumar Soothar, M., Kader Mounkaila Haman, A., Kumar Sootahar, M., Sun, J., Yang, G., Maseeh Bhatti, S., Traore, A., 2021. Assessment of acidic biochar on the growth, physiology and nutrients uptake of maize (*zea mays* l.) seedlings under salinity stress. Journal of sustainability. 13, 1-16. https://doi.org/10.3390/su13063150

Lashari, M.S., Liu, Y., Li, L., Pan, W., Fu, J., Pan, G., Zheng, J., Zheng, J., Zhang, X., Yu, X., 2013. Effects of amendment of biochar-manure compost in conjunction with pyroligneous solution on soil quality and wheat yield of a salt-stressed cropland from Central China Great Plain. Journal of Field Crops Research. 144, 113–118. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.015

Lin, X., Xie, Z., Zheng, J., Liu, Q., Bei, Q., Zhu, J., 2015. Effects of biochar application on greenhouse gas emissions, carbon sequestration and crop growth in coastal saline soil. European Journal of Soil Science. 66, 329–338. https://doi.org/10.1007/s42773-023-00244-8

Lutts, S., Kinet, J.M. Bouharmont, J., 1996. NaCl- induced senescence in leaves of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. Journal of Annals of Botany. 78, 389-398. https://doi.org/10.1006/anbo.1996.0134

Mahmood, M., Shirani Bidabadi, S., Ghobadi, C., Gray, D., 2012. Effect of methyl jasmonate treatments on alleviation of polyethylene glycol -mediated water stress in banana (*Musa acuminata* cv. 'Berangan', AAA) shoot tip cultures. Journal of Plant Growth Regulation. 68, 161-169.

Memelink, J. 2009. Regulation of gene expression by jasmonate hormones. Journal of Phytochemistry. 70, 1560-1570. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2009.09.004

Miranshahi, B., Sayyari, M. 2016. Methyl jasmonate mitigates drought stress injuries and affects essential oil of summer savory. Journal of Agricultural Science and Technology. 18, 1635-1645. https://dorl.net/dor/20.1001.1.16807073.2016.18.6.11.9

Mohamed, H.I,, Latif, H.H., 2017. Improvement of drought tolerance of soybean plants by using methyl jasmonate. Physiology and Molecular Biology of Plants. 23: 545–556. https://doi.org/10.1007/s12298-017-0451-x

Mohi-Ud-Din, M., Talukder, D., Rohman, M., Ahmed, J., Jagadish, S.V.K., Islam, T., Hasanuzzaman, M., 2021. Exogenous application of methyl jasmonate and salicylic acid mitigates drought-induced oxidative damages in french bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Journal of Plants. 10, 1-17. https://doi.org/10.3390/plants10102066

Mustafa, K.H., Strezov, V., Chin, K.Y., Nelson, P.F., 2010. Agronomic properties of wastewater sludge and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicum esculentum*). Journal of Chemosphere. 78, 1167–1171. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.01.009

Naeemi, N., Fahmideh, L., Fakheri, B. 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 Breading. 10 (26), 22-31. https://dorl.net/dor/20.1001.1.22286128.1397.10.26.4.7

Paknejad, F., Fatemi Rika, Z., Elkaee Dehno, M., 2017. Investigation end season drought effect on yield and yield components of ten Barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars in Karaj region. Journal of Environmental Stresses in Crop Sciences. 10, 391-401. [In Persian]. https://doi.org/10.22077/escs.2017.137.1034

Rudell, D.R., Fellman, J., 2005. Pre harvest application of methyl jasmonate to "Funji" apples enhances red coloration and affects fruit size, splitting, and bitter pit incidence. Horticultural Science 40, 1760-1762. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.40.6.1760

Saiprasad, G.V.S., Raghuveer, P., Khetarpal, S., Chandra, R., 2004. Effect of various polyamines on production of protocorm- like bodies in orchid *Denarobium esonia*. Science Horticulturea 100, 161-168. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2003.08.017

Sallam, A., Algudah, A.M., Dawood, M.F., Baenziger, P.S., Borner, A., 2019. Drought stress tolerance in wheat and barley: advances in physiology, breeding and genetics research. International Journal of Molecular Sciences. 20, 1-36. https://doi.org/10.3390/ijms20133137

Sankar, B., Jaleel, C.A., Manivannan, P., Kishorekumar, A., Somasundaram, R., and Panneerselvam, R., 2008. Relative efficacy of water use in five varieties of *Abelmoschus esculentus* L. under water limited conditions. Colloids Surf. B Biointerfaces. 62, 125–129. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2007.09.025

Shahbandeh, M., 2022. World barley production from 2008/2009 to 2021/2022. Retrieved September 20, 2022 https://www.statista.com/statistics/271973/world-barley-production-since-2008

Somogyi, J., Nelson, D., 1952. A critical examination of the Nelson–Somogyi method for the determination of reduced sugar. Analytical Biochemistry. 15, 373-381. https://doi.org/10.1016/0003-2697(66)90098-4

Tayyab, N., Naz, R., Yasmin, H., Nosheen, A., Keyani, R., Sajjad, M. Hassan, M.N., Roberts,

T.H., 2020. Combined seed and foliar pre–treatments with exogenous methyl jasmonate and salicylic acid mitigate drought induced stress in maize. Plos One. 15, 1-18. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232269

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. https://doi.org/10.3390/genes11050533

Todorova, D., Aleksandrov, V., Anev, S., Sergiev, I., 2022. Photosynthesis alterations in wheat plants induced by herbicide, soil drought or flooding. Journal of Agronomy. 12, 1-13. https://doi.org/10.3390/agronomy12020390

Wei, W., Yang, H., Fan, M., Chen, H., Guo, D., Cao, J., Kuzyakov, Y., 2020. Biochar e_ects on crop yields and nitrogen loss depending on fertilization. Science of the Total Environment. 702, 134423. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134423

Xue, G. P., McIntyre, C. L., Glassop, D., Shorter, R., 2008. Use of expression analysis to dissect alterations in carbohydrate metabolism in wheat leaves during drought stress. Journal of Plant Molecular Biology. 67, 197 -214. https://doi.org/10.1007/s11103-008-9311-y

Yahyaabadi, M., Dehghani, M., 2021. Effect of drought stress and consumption of organic fertilizers on yield and yield components of potato (Case Study of Isfahan Province). Iranian Journal of Soil and Water Research. 52, 483-495. [In Persian]. https://doi.org/10.22059/IJSWR.2021.309642.668730

Yang, J., Zhang, J., 2010. Crop management techniques to enhance harvest index in rice. Journal of Experimental Botany. 61, 3177-3189. https://doi.org/10.1093/jxb/erq112

Zahedi. S.M., Sadat Hosseini, M., Moharrami, F., 2019. The effect of methyl jasmonate on some physiological and biochemical characteristics of strawberry (Fragaria × ananassa cv. Paros) under drought stress. Journal of Plant Process and Function. 8, 249-261. [In Persian].

Zeighami Nejad, K., Ghasemi, M., Shamili, M., Damizadeh, Gg.r., 2019. Effect of mycorrhiza and vermicompost on drought tolerance of lime seedlings (*Citrus aurantifolia* Cv. Mexican Lime). International Journal of Fruit science. 20, 646-657. https://doi.org/10.1080/15538362.2019.1678448

Zhu, Q., Kong, L.J., Shan, Y.Z., Yao, X.D., Zhang, H.J., Fu, T.X., Ao, x., 2019. Effect of biochar on grain yield and leaf photosynthetic physiology of soybean cultivars with different phosphorus efficiencies. Journal of Integrative Agriculture 18, 2242-2254. https://doi.org/10.1016/S2095-3119