نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۴۰۲، ص. ۵۴-۳۹

Water Management in Agriculture
Vol. 10, No. 2 Autumn And Winter 2024, 39-54

مقاله علمی-پژوهشی

اثر تنش خشکی و اصلاح‌کننده خاک بر برخی صفات مورفوفیزیولوژی گوار (*Cyamopsis tetragonoloba* L.)

منصوره حسین اللهی[۱]، سمیه سلطانی گردفرامرزی*[۲]، ابوالفضل عزیزیان[۳] و حیدر مفتاحی زاده[۴]

چکیده

با توجه به شرایط اقلیمی خشک و کم‌بارش استان یزد و لزوم کشت گیاهان داروئی کم‌آب خواه و صنعتی، گیاه گوار برای بررسی اثر تنش خشکی و اصلاح‌کننده خاک (بیوچار) انتخاب شد. آزمایش به‌صورت کرت‌های دو بار خردشده در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل اصلی سه سطح تنش خشکی I1، I2 و I3 (۱۰، ۱۴ و ۱۷ روز دور آبیاری) و عامل فرعی اول دو گونه بومی و تجاری (V1 و V2) و عامل فرعی دوم سه سطح بیوچار B1، B2 و B3 (صفر، ۰/۵ و ۱ درصد) بود. در پایان آزمایش صفات درصد صمغ، نشت یونی، محتوای نسبی آب برگ، کلروفیل a و b، شاخص کلروفیل (SPAD) و کارایی مصرف آب اندازه-گیری شد. نتایج نشان داد که اثرات اصلی دور آبیاری بر صفات درصد صمغ، محتوای نسبی آب برگ، نشت یونی، کلروفیل a، SPAD و کارایی مصرف آب در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد. درحالی‌که اثرات اصلی نوع واریته تنها بر SPAD و همچنین اثرات اصلی بیوچار بر نشت یونی و SPAD از نظر آماری معنی‌دار بود. اثر متقابل دور آبیاری و واریته نیز فقط بر صفت SPAD معنی‌دار نشان داد؛ اگرچه اثر متقابل دور آبیاری و بیوچار بر صفات کلروفیل a و SPAD معنی‌دار بود. اثر متقابل واریته و بیوچار و همچنین اثر متقابل دور آبیاری، واریته و بیوچار تنها بر صفت SPAD اثر معنی‌دار در سطح ۵ درصد نشان داد. دور آبیاری ۱۷ روز (I3) درصد صمغ و محتوای نسبی آب برگ را در واریته‌های گوار، ۲۴/۲۹ و ۶۴/۱۰ درصدی نسبت به شاهد (I1) کاهش ولی کارایی مصرف آب را ۶۰ درصد افزایش داد. بیش‌ترین درصد نشت یونی مربوط به تیمار I3 (۴۶/۲۵ درصد) بود و کاربرد بیوچار ۱ و ۰/۵ درصد توانست نشت یونی را به ترتیب ۱۷/۹۲ و ۷/۶۳ درصد نسبت به شاهد افزایش دهد. همچنین بیش‌ترین میزان کلروفیل a (۱/۵۳ میکروگرم بر میلی‌لیتر) در تیمار I2 حاصل شد که این پارامتر را ۵۴/۵۵ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. تیمارهای ۱ و ۰/۵ درصد بیوچار به ترتیب باعث افزایش ۱۱/۷۷ و ۴/۸۰ درصدی SPAD نسبت به شاهد شد. به‌طورکلی تنش خشکی درصد صمغ، محتوای نسبی آب برگ را کاهش و نشت یونی را افزایش معنی‌دار داد. همچنین کاربرد بیوچار باعث افزایش معنی‌دار نشت یونی و SPAD شد و دور آبیاری ۱۰ روز با سطح ۱ درصد بیوچار در واریته بومی باعث بالاترین میزان SPAD در گیاه گوار گردید.

واژه‌های کلیدی: داروئی، کم‌آبی، گوار، بیوچار، گونه، مورفوفیزیولوژی

مقدمه

خشکی یکی از شایع‌ترین تنش‌های محیطی و از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید محصولات کشاورزی در سراسر دنیاست. همچنین خشکی از ویژگی‌های بارز جغرافیایی کشور است. قسمت عمده کشور ایران، دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است و بروز خشک‌سالی‌های مختلف، کاهش ریزش‌های جوی، استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و مصرف آب به‌ویژه در قسمت کشاورزی، مدیریت بهینه آبیاری را در این بخش ضروری ساخته است؛ لذا بایستی راهکارهای مناسب جهت کاهش اثرات این تنش محیطی بکار گرفته شود (Soltani-Gerdefaramarzi et al., 2021). در این راستا ابداع

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان
[۲] دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان (*نویسنده مسئول: ssoltani@ardakan.ac.ir)
[۳] استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان
[۴] دانشیار گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۹

روش‌های زراعی برای بهره‌برداری بیشتر از امکانات موجود، به‌ویژه آب‌وخاک، حذف گیاهان پرآب خواه و شناسایی و جایگزین کردن گیاهان کم‌آب خواه به‌جای آن‌ها در مناطق مختلف ازجمله گیاهان دارویی که دوره رویشی کوتاهی دارند و نیاز آبی کمی هم دارند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. کاشت گیاهان دارویی به دلیل پتانسیل بالا تحمل به خشکی و نیاز آبی کم در شرایط خشک‌سالی و قابلیت تولید در زمین‌های کم بازده و حاشیه‌ای، ضمن تأمین نیازهای اقتصادی روستاییان و صنایع مختلف غذایی و دارویی می‌تواند در افزایش بهره‌وری از منابع آب‌وخاک و همچنین جلوگیری از خطر نابودی این گونه‌ها مؤثر واقع گردد. امکان توسعه کشت این گیاهان دارویی–صنعتی نیازمند بررسی قابلیت آن‌ها برای تولید در سطح وسیع و بررسی مقاومت آن‌ها به شرایط نامساعد محیطی ازجمله کمبود آب آبیاری هست (کافی و همکاران، ۱۳۸۶). از طرف دیگر، در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل عدم برخورداری از پوشش گیاهی کافی، خاک از نظر محتوای ماده‌ی آلی دچار فقر هست. از فواید بیوچار می‌توان به تولید انرژی، کاهش حجم مواد زائد (Lehmann and Joseph, 2009) افزایش ارزش غذایی بقایا، افزایش عناصر ضروری و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (Sing et al., 2010)، افزایش عملکرد گیاهان به‌ویژه در خاک‌های مناطق گرم (Vaccari et al., 2011)، بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و حفظ ماده‌ی آلی خاک (Van Zwieten et al., 2010) اشاره کرد. همچنین بیوچار می‌تواند کمک شایانی به مدیریت صحیح برای کاهش آبشویی نیترات از منطقه رشد ریشه و جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی نماید (کوهی و همکاران، ۱۳۹۸). در سال‌های اخیر به دلیل آنکه تولید محصول اغلب متکی به استفاده از کودهای شیمیایی بوده، مسائل زیست‌محیطی مختلفی بروز کرده است که از آن جمله می‌توان به تخریب ساختمان خاک و برهم خوردن تعادل بین عناصر غذایی در خاک اشاره کرد (Guarda et al., 2004). درنتیجه تأمین عناصر غذایی از طریق کودهای زیستی کمک شایانی به کشاورزی پایدار خواهد کرد. گوار یا لوبیای خوشه‌ای با نام علمی (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) از خانواده بقولات است. این گیاه یک‌ساله (با دوره رشد ۲۱۱ روزه) و مقاوم به خشکی است و با شرایط زمین‌های شنی سازگار است (Sij et al., 2002). به دلیل سیستم ریشه‌ای عمیق توانایی رشد در مناطق گرم و خشک را دارد. ریشه گوار مانند سایر گیاهان خانواده بقولات دارای باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن است که به غنی‌تر نمودن خاک از این عنصر کمک می‌کند (MacMillan et al., 2021). برخی از واریته‌های گوار دارای رشد مستقیم و افراشته، بدون شاخه فرعی و برخی دیگر دارای شاخه‌های فرعی زیادی هستند. واریته‌های دارای شاخه فرعی، حدود ۱۰ تا ۴۰ شاخه فرعی داشته، اما در واریته‌های بدون شاخه فرعی، غلاف‌ها در سرتاسر ساقه اصلی به‌صورت خوشه‌ای ظاهر می‌شوند. در مقایسه واریته بومی ایران با واریته تجاری، طول دوره رشد کوتاه‌تر و همچنین ازنظر درصد پروتئین، عملکرد بذر، تعداد غلاف در بوته و وزن بذر دارای عملکرد بهتری است (مفتاحی زاده و عصاره، ۱۳۹۸). تولیدکنندگان اصلی این گیاه در جهان هند، پاکستان، آمریکا، استرالیا و تعدادی از کشورهای آفریقایی هستند. تقاضای جهانی گوار در سال‌های اخیر افزایش چشمگیری داشته که سبب معرفی این گیاه در چندین کشور شده است. در ادامه به برخی از مطالعات انجام‌شده در داخل و خارج کشور پرداخته می‌شود. احمدی و همکاران (۱۳۹۸) به‌منظور بررسی تأثیر غلظت‌های مختلف اسید هیومیک بر عملکرد و میزان جذب عناصر غذایی گیاه گوار در تراکم‌های مختلف کاشت، آزمایشی انجام داد. نتایج نشان داد که مصرف ۱۵ کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک با تراکم ۳۵ بوته در مترمربع سبب افزایش محتوی عناصر نیتروژن، فسفر، روی و آهن در گیاه شد. چمنی و همکاران (۱۳۹۷) در استان کرمان به بررسی اثر تنش خشکی و اسید سالیسیلیک بر برخی صفات مورفوفیزیولوژیکی و زراعی گیاه گوار پرداختند. عامل اصلی دور آبیاری شامل سه سطح (شش، نه و ۱۲ روزه) و عامل فرعی، اسید سالیسیلیک شامل چهار غلظت (صفر، نیم، یک و دو میلی-مولار) بود. نتایج تحقیق نشان داد که در شرایط تنش، ارتفاع بوته، تعداد برگ در بوته و رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی کاهش معنی‌داری داشت. استفاده از اسید سالیسیلیک یک میلی‌مولار

باعث افزایش تعداد برگ در بوته و غلظت دو میلی‌مولار اسید سالیسیلیک سبب افزایش ارتفاع بوته، کلروفیل کل در گیاه گوار شد و بیشترین میزان عملکرد دانه در غلظت اسید سالیسیلیک یک میلی‌مولار و دور آبیاری شش روز حاصل شد. جزایری و همکاران (۱۳۹۸) تأثیر کودهای آلی و شیمیایی بر رشد شاخص-ها، عملکرد و اجزای عملکرد و تراکم گوار را موردبررسی قرار داد. نتایج نشان داد که تأثیر عوامل بر همه صفات به‌جز تعداد دانه در غلاف، ارتفاع بوته، تعداد شاخه‌های فرعی، تعداد غلاف، غلاف طول و عملکرد دانه در تیمارهای مغذی و تراکم گیاه معنی‌دار بود، اما برهم‌کنش بین سطوح کود و تراکم، به‌جز تعداد غلاف، معنی‌دار نبود. خانزادا و همکاران راندمان فتوسنتز برخی ژنوتیپ‌های گوار را تحت رژیم‌های مختلف آبیاری مطالعه کردند. آزمایش بر چهار ژنوتیپ گوار، تحت رژیم‌های مختلف آب (کنترل، تنش قبل از گلدهی و تنش پایانی) انجام شد. سطح برگ در همه ژنوتیپ‌ها تحت تأثیر تنش آبی قرار گرفت. یافته‌ها نشان می‌دهد که کمبود آب باعث کاهش سطح برگ و محتوای کلروفیل و درنتیجه کاهش عملکرد دانه در هر چهار ژنوتیپ گوار می‌شود (Khanzada et al., 2003). آولا و همکاران طی یک آزمایش میدانی دوساله تأثیر کم‌آبیاری را بر عملکرد بذر و راندمان کاربرد آب ژنوتیپ‌های مختلف گوار مطالعه کردند. در این آزمایش عملکرد، اجزای عملکرد و راندمان مصرف آب در پنج ژنوتیپ گوار موردبررسی قرار گرفت. یافته‌های این مطالعه نشان داد که گونه‌های لوئیس و سانتا کروز عملکرد دانه بیشتری را نسبت به سایر گونه‌ها در شرایط آبیاری کامل و محدودیت آبیاری نشان دادند. همچنین گوار وقتی در ۱۰۰ درصد کمبود آب خاک، دوباره آبیاری شود، دارای پتانسیل عملکرد بالایی است (Avola et al., 2020). نوروزی و همکاران (۱۴۰۰) به‌منظور بررسی اثرات کاربرد سطوح مختلف کود نیتروژن و تلقیح سویه‌های مختلف باکتری ریزوبیوم بر صفات مورفوفیزیولوژیکی، بیوشیمیایی، عملکرد و اجزاء عملکرد گیاه گوار تحت سطوح مختلف تنش خشکی، آزمایشی انجام داد. نتایج نشان داد که اعمال کم آبیاری، به‌جز صفات قندهای محلول و فعالیت آنزیمی کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز، سبب کاهش سایر صفات شد. از طرفی سطوح مختلف کود نیتروژن و تلقیح باکتری ریزوبیوم به‌طور معنی‌داری بر همه صفات اثرگذار و سبب افزایش آن‌ها شدند. مفتاحی زاده و رحمتی احمدآباد (۱۴۰۰) شاخص‌های جوانه‌زنی و خصوصیات رشدی گیاهچه ژنوتیپ‌های گوار تحت سطوح تنش شوری را بررسی کردند. نتایج نشان داد که تیمار شوری، ژنوتیپ و اثر متقابل شوری در ژنوتیپ بر صفات شاخص بنیه بذر، طول ریشه‌چه، طول ساقه چه، طول گیاهچه در سطح یک درصد معنی‌دار شد. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که ژنوتیپ RGC-1008 دارای بیشترین و سراوان کمترین درصد و سرعت جوانه‌زنی داشت. با توجه به بررسی منابع انجام‌شده تاکنون تأثیر اصلاح‌کننده خاک همراه با تنش خشکی بر این گیاه داروئی با ارزش بررسی نشده است. هم‌چنین استان یزد و شهرستان اردکان یکی از مناطق خشک و کم آب ایران است که اکثر زمین‌های زراعی به دلیل کیفیت نامناسب آب آبیاری در این منطقه شور شده است. علاوه بر این، تقاضای جهانی گوار در سال‌های اخیر افزایش چشمگیری داشته که سبب معرفی این گیاه در چندین کشور شده است. همچنین بر اساس تحقیقات به‌عمل‌آمده تاکنون مطالعه‌ای بر روی تأثیر توأمان بیوچار و تنش خشکی بر گوار و همچنین بین واریته‌های بومی و تجاری آن صورت نگرفته است؛ بنابراین در تحقیق حاضر اثر تنش خشکی و بیوچار به‌عنوان یک اصلاح‌کننده خاک بر برخی خصوصیات مورفوفیزیولوژی دو واریتهٔ تجاری و بومی گوار بررسی شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در اول مرداد ماه سال ۱۴۰۰ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه اردکان به‌صورت کرت‌های دو بار خردشده در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل اصلی سطوح تنش خشکی و عامل فرعی اول گونه و عامل فرعی دوم سطوح مختلف بیوچار بود. تأثیر بیوچار (مخلوط پوست گردو و بادام تهیه‌شده در دمای ۴۰۰ درجه) در سه سطح

صفر، ۰/۵ و ۱ درصد معادل حدوداً ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار (B1، B2 و B3) بر روی دو گونه گیاه گوار بومی (سراوان) و گونه تجاری هندی (V1 و V2) در خاک لومی مزرعه با چگالی ۱/۴۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب بررسی شد. کاشت بذور پس از انجام عملیات شخم، دیسک و آماده‌سازی بستر به‌صورت دستی و مخلوط کردن سطوح مختلف بیوچار با خاک سطحی (۰ تا ۱۰ سانتی‌متر) کرت‌ها صورت گرفت. بر اساس مطالعات انجام‌شده دور آبیاری گوار ۱۰ روز است که برای اعمال تنش خشکی دورهای ۱۰، ۱۴ و ۱۷ روز (I1، I2 و I3) در نظر گرفته شد. در پایان هر دور آبیاری از خاک نمونه گرفته‌شده و رطوبت خاک تعیین گردید. اختلاف رطوبت خاک با رطوبت ظرفیت زراعی خاک که قبلاً اندازه‌گیری شده بود، عمق آبی است که باید به هر کرت داده شود. عمق آب در مساحت کرت ضرب شده و حجم آب آبیاری در هر دور آبیاری تعیین گردید. در ابتدای هر کرت یک کنتور حجمی وجود داشت که بر اساس آن آبیاری کرت‌ها انجام می‌شد. میانگین حجم آب مصرفی برای تیمار دور آبیاری ۱۰ روز، ۱۷۱ لیتر بر مترمربع، دور آبیاری ۱۴ روز ۱۳۵ لیتر بر مترمربع و دور آبیاری ۱۷ روز ۱۰۹ لیتر بر مترمربع محاسبه گردید. طول و عرض کرت‌ها (۵۴ کرت) به ترتیب ۱ و ۱/۵ متر با ۲ خط کشت بافاصله ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. فاصله بذور ۲۰ سانتی‌متر بر روی ردیف و با عمق کشت ۱ تا ۳ سانتی‌متر انجام شد. سپس به عمق ۲ سانتی‌متر روی آن ماسه ریخته و بعد از کاشت آبیاری به‌صورت غرقابی انجام گردید. تیمارهای تنش خشکی هم‌زمان با آبیاری سوم و پس از استقرار کامل بوته‌ها زمانی که گیاهان به مرحله چهار یا پنج‌برگی رسیدند و گیاهان ضعیف حذف شدند (۲۵ روز بعد از کاشت)، در مزرعه اعمال گردید. در ابتدای آزمایش برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیائی آب‌وخاک مزرعه نمونه‌های آب و نمونه‌های خاک برداشته و در آزمایشگاه خصوصیات فیزیکی و شیمیائی تعیین شد. در پایان آزمایش صفات درصد صمغ، نشت یونی، محتوای نسبی آب برگ، کلروفیل a و b و شاخص کلروفیل (SPAD) اندازه گرفته شد. شاخص SPAD با استفاده از دستگاه کلروفیل سنج (مدل CCM-200 /Opti-sciences) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری محتوی نسبی آب برگ (RWC)، از روش ریچی و نگوین (Ritchie and Nguyen, 1990) استفاده شد. بدین منظور از هر تکرار از گیاه، برگ کاملاً توسعه‌یافته از شاخه‌های مختلف گیاه جدا و وزن تر (FW) آن‌ها با استفاده از ترازوی حساس اندازه‌گیری شد. سپس جهت محاسبهٔ وزن اشباع (TW)، به مدت ۲۴ ساعت برگ‌ها در داخل ظرف محتوی آب مقطر غوطه‌ور شد. در پایان برگ‌ها را به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجهٔ سانتی‌گراد در داخل آون قرار گرفت و وزن خشک (DW) اندازه‌گیری شد. محتوای نسبی آب برگ از طریق رابطهٔ (۱) محاسبه شد.

$$\mathrm{RWC} = \frac{\mathrm{FW} - \mathrm{DW}}{\mathrm{TW} - \mathrm{DW}} * 100 \qquad (۱)$$

به‌منظور اندازه‌گیری نشت یونی از روش لوتس و همکاران (Lutts et al., 1995) استفاده شد. از هر تکرار، ۰/۵ گرم از برگ‌های کاملاً توسعه‌یافته جدا و بعد از پاک‌سازی با آب مقطر درون ویال‌های شیشه‌ای حاوی ۲۵ سی‌سی آب مقطر به مدت ۲۴ ساعت روی شیکر با دمای ۲۴ درجهٔ سانتی‌گراد و سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه قرار داده شد. سپس جهت اندازه‌گیری هدایت الکتریکی اولیه (EC1) از دستگاه EC متر دیجیتال (مدل Metrohm 644) استفاده شد. سپس ویال‌ها به مدت ۲۰ دقیقه در داخل اتوکلاو با دمای ۱۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد قرار داده شد و بعد از دو ساعت شیکر شدن، هدایت الکتریکی ثانویه (EC2) اندازه‌گیری شد. درصد نشت یونی از رابطهٔ (۲) محاسبه شد.

$$\text{نشت یونی} = \frac{\mathrm{EC1}}{\mathrm{EC2}} * 100 \qquad (۲)$$

به‌منظور اندازه‌گیری میزان کلروفیل های a و b ابتدا مقدار ۰/۲۵ گرم از ماده تر گیاهی در هاون چینی ریخته شد. ده میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد به نمونه‌ها اضافه شد و سپس محلول حاصل با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. عصاره فوقانی حاصل از سانتریفیوژ به بالن شیشه‌ای منتقل شد. مقداری از نمونه داخل بالن در کووت

اسپکتروفتومتر ریخته شد و درنهایت مقدار جذب در طول موج‌های ۶۶۳ نانومتر (کلروفیل a) و ۶۴۵ نانومتر (کلروفیل b) توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل BT600 Plus Canada) اندازه‌گیری شد و در رابطه (۳) قرار گرفت (Arnon, 1967).

$$\text{Chlorophyll a} = (81.1 * A669 + 1.63 * A645) \quad (۳)$$

$$\text{Chlorophyll b} = (81.3 * A645 - 5.61 * A669) \quad (۴)$$

جداسازی صمغ بر اساس روش صباح الخیر و همکاران (Sabahelkheir et al., 2012) انجام شد. ابتدا بذرها در آب به مدت ۸ ساعت خیسانده شده و سپس با مالش سطحی پوسته بذر جدا شد. در مرحله بعد با فشار دادن بیشتر بذر، صمغ از جنین و آندوسپرم جدا شد. صمغ جداسازی شده در آون به مدت ۸ ساعت و در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد. سپس صمغ حاصله وزن شد تا درصد صمغ نسبت به وزن جنین و آندوسپرم به دست آید. کارایی مصرف آب نیز، از تقسیم وزن خشک گیاه بر میزان آب مصرفی تعیین شد. تجزیه‌وتحلیل داده‌ها در نرم‌افزار SPSS انجام گرفت. برای مقایسه میانگین صفات اندازه‌گیری شده، از آزمون دانکن در سطح ۵ درصد استفاده شد. جدول (۱) و (۲) برخی خصوصیات آب‌وخاک در آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۱- تجزیه شیمیایی آب آبیاری

پارامتر	واحد	
هدایت الکتریکی	دسی زیمنس بر متر	۱/۵
اسیدیته	–	۸/۱۳
کلر	میلی اکی والان بر لیتر	۱۱/۵
پتاسیم	"	۰/۲۳
سدیم	"	۱۰/۹۸
کلسیم	"	۱/۰
منیزیم	"	۲/۸
سولفات	"	۰/۹
بی‌کربنات	"	۲/۶
نسبت سدیم قابل‌جذب	–	۷/۹۶

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی خاک محل اجرای طرح

خصوصیات شیمیایی عصاره اشباع خاک	واحد	عمق خاک (سانتی‌متر)	
		۳۰-۰	۶۰-۳۰
هدایت الکتریکی	دسی زیمنس بر متر	۵/۷۶	۶/۱۷
اسیدیته	–	۷/۷	۷/۷۹
کلسیم	میلی اکی والان بر لیتر	۸۸/۷	۵۳/۶
منیزیم	"	۱۳۶/۰	۴۴/۸
سدیم	"	۷۲۶/۶	۲۸۴/۰
کلر	"	۸۰۹/۹	۲۹۸/۳
بی‌کربنات	"	۸/۷	۳/۹
نسبت سدیم قابل‌جذب	–	۶۸/۶	۴۰/۵
پتاسیم	میلی اکی والان بر لیتر	۸۹۱	۴۰۷
فسفر		۶۹/۷	۲۴/۳
کربن آلی	درصد	۰/۹۸	۰/۳۸
ماده آلی	"	۱/۶۹	۰/۶۵
نیتروژن کل	"	۰/۰۸۵	۰/۰۳۲

نتایج و بحث

نتایج مقایسه میانگین برای صفات معنی‌دار شده نشان داد که بر اساس جدول (۴)، دور آبیاری ۱۷ روز (I3) درصد صمغ را در واریته‌های گوار، ۲۴/۲۹ درصد نسبت به شاهد (I1) کاهش داد، ولی بین تیمارهای I2 و شاهد تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. با توجه به جدول (۴)، بین تیمارهای شاهد و I2 تفاوت معنی‌داری در محتوای نسبی آب برگ وجود نداشت؛ ولی تیمار I3 کاهش ۶۴/۱۰ درصدی این صفت نسبت به شاهد نشان داد. نتایج نشان داد که بین تیمار شاهد و دور آبیاری ۱۴ روز تفاوت معنی‌داری در درصد صمغ و محتوای نسبی آب برگ مشاهده نشد؛ ولی با افزایش دور آبیاری، درصد صمغ نسبت به شاهد کاهش یافت. در گیاهان گوار (بیات، ۱۳۹۶)، مرزنجوش بخارایی (مینایی و همکاران، ۱۳۹۸)، اسطوخودوس (محسن‌زاده و همکاران، ۱۳۹۹)، مریم‌گلی (غیاث و همکاران، ۱۴۰۱) و گندم (Haider et al., 2020) نیز با افزایش تنش خشکی، محتوای نسبی آب برگ کاهش یافت. محتوای نسبی آب برگ، شاخصی مناسب جهت ارزیابی میزان مقاومت گیاه نسبت به خشکی است. کاهش آن در شرایط تنش بیانگر از دست رفتن تورژسانس سلولی است که باعث محدودیت مقدار آب قابل‌دسترس جهت فرآیند توسعهٔ سلولی و درنهایت منجر به کاهش رشد و نموی گیاه می‌گردد (Tátrai et al., 2016). بافت‌هایی که در شرایط کمبود آب قادرند مقادیر بالاتری از محتوای نسبی آب برگ را حفظ کنند، نسبت به دهیدراسیون مقاومت بیش‌تری دارند. مقادیر بالای این پارامتر باوجود تنش رطوبتی می‌تواند ناشی از استحکام بیش‌تر دیوارهٔ سلولی و میزان توانایی آن‌ها جهت تحمل آسیب‌ها و تخریب‌های مکانیکی ناشی از تلفات آب بافت‌ها باشد (Irigoyen et al., 1992).

جدول ۳- نتایج آنالیز واریانس اثر تیمارها بر صفات درصد صمغ، محتوای نسبی آب برگ، نشت یونی، کلروفیل a و b و SPAD و کارایی مصرف آب

منابع تغییر	درجه	درصد صمغ	محتوای نسبی آب برگ	نشت یونی	کلروفیل a	کلروفیل b	SPAD	کارایی مصرف
بلوک	۲	۷۵/۰۹	۰/۰۰۸	۸/۵۲	۰/۵۳	۰/۲۳	۳۶/۵۷*	۰/۰۰۳*
فاکتور اصلی (دور آبیاری)	۲	۶۳۵/۹۴*	۲/۸۵*	۱۵۷۱/۶۳*	۲/۶۵*	۰/۱۹	۲۵۲۲/۰۵*	۰/۰۱*
خطای اصلی (Ea)	۴	۶۹/۹۰	۰/۰۷۳	۱۴/۲۴	۰/۳۶	۰/۲۷	۱۳/۱۶	۰/۰۰۳
کرت‌های اصلی	۸	۷۸۰/۹۳	۲/۹۳	۱۵۹۴/۳۹	۳/۵۴	۰/۶۹	۲۵۷۱/۷۸	۰/۰۰۱
فاکتور فرعی (واریته)	۱	۷۴/۱۱	۰/۰۰۸	۳/۸۹	۰/۲۶	۰	۱۵۵۴/۱۹*	۰/۰۰۱
دور آبیاری* واریته	۲	۱۶/۵۸	۰/۰۰۵	۸/۲۰	۰/۳۷	۰/۰۸	۱۵۴/۷۵*	۰/۰۰۱
خطای فرعی (Eb)	۶	۹۵/۵۵	۰/۰۱۷	۶۳/۵۸	۰/۶۱	۰/۱۵	۳۸/۴۳	۰/۰۰۲
کرت‌های فرعی	۹	۱۸۶/۲۴	۰/۰۳	۷۵/۶۷	۱/۲۴	۰/۲۳	۱۷۴۷/۳۷*	۰/۰۰۴
فاکتور فرعی (بیوچار)	۲	۶۸/۵۲	۰/۰۵۲	۳۹۶/۹۲*	۰/۶	۰/۰۵	۱۳۷۵/۳*	۰/۰۰۵
دور آبیاری*بیوچار	۴	۱۱/۲۱	۰/۰۳	۲۵/۷۸	۱/۴۸*	۰/۵۵	۸۱۸/۶۹*	۰/۰۰۴
واریته*بیوچار	۲	۱۴/۶۷	۰/۰۰۳	۰/۲۷	۰/۰۷	۰/۱۴	۴۰۲/۵*	۰
دور آبیاری*واریته*بیوچار	۴	۴/۶۵	۰/۰۲	۴/۶۶	۰/۱۶	۰/۰۳	۵۱۲/۵۸*	۰/۰۰۱
خطای فرعی (Ec)	۲۴	۶۶۷/۰۷	۰/۱۸۴	۲۰۳/۹۳	۲/۶۹	۱/۴۴	۱۳۶/۳۷	۰/۰۱
کرت‌های فرعی	۳۶	۷۶۶/۱۲	۰/۲۸۹	۶۳۱/۵۶	۵	۲/۲۱	۳۲۴۵/۴۴	۰/۰۲
کل	۵۳	۱۷۳۳/۳۱	۳/۲۵	۲۳۰۱/۶۳	۹/۷۸	۳/۱۳	۷۵۶۴/۵۹	۰/۰۲۵

* بیانگر معنی‌داری در سطح پنج درصد

بر اساس نتایج جدول (۴)، بیش‌ترین درصد نشت یونی مربوط به تیمار I3 (۴۶/۲۵ درصد) بود و کم‌ترین میزان در تیمار شاهد (۳۳/۱۱ درصد) به‌دست آمد. تیمارهای I3 و I2 به ترتیب باعث افزایش ۳۹/۶۹ و ۲۳/۶۲ درصدی نسبت به شاهد شد. همچنین بیش‌ترین و کم‌ترین درصد نشت یونی به ترتیب با کاربرد بیوچار ۱ درصد (۴۳/۵۷ درصد) و شاهد (۳۶/۹۵ درصد) حاصل شد. کاربرد بیوچار ۱ و ۰/۵ درصد توانست این پارامتر را به ترتیب ۱۷/۹۲ و ۷/۶۳ درصد نسبت به شاهد افزایش دهد. این افزایش می‌تواند به دلیل افزایش بعضی از ترکیبات فعال اکسیژن مانند رادیکال‌های هیدرواکسیل، پراکسید هیدروژن و رادیکال‌های سوپراکسید در شرایط تنش باشد که باعث آسیب غشای سلولی و تراوش الکترولیت‌های سلول به بیرون می‌شود (پروانک، ۱۳۹۸). نشت یونی بیانگر پایداری غشای سیتوپلاسمی است. وقتی سلول در شرایط تنش قرار می‌گیرد، آب خود را از دست می‌دهد. در این حالت، پروتوپلاست چروکیده شده، فسفولیپیدهای غشا کروی شکل و غشا دارای منفذ می‌شود و مواد به خارج از سلول نشت پیدا می‌کند (Hernández et al., 2016). لیپیدها یکی از فراوان‌ترین اجزای غشای سلولی هستند که دارای نقش مهمی در مقاومت سلول‌های گیاهی نسبت به تنش‌های محیطی می‌باشند. تنش خشکی منجر به ایجاد اختلال در ارتباط بین پروتئین‌ها و چربی‌های غشاء و فرآیندهای غشایی و نیز انتقال مواد از خلال غشا می‌گردد (Rahdari and Hoseini, 2012).

در گیاهان زوفا (رسام و همکاران، ۱۳۹۳)، مریم‌گلی سهندی (پروانک، ۱۳۹۸) و مریم‌گلی (غیاث و همکاران، ۱۴۰۱) نیز تنش خشکی باعث افزایش نشت یونی شد. با افزایش غلظت بیوچار، این پارامتر روند افزایشی نشان داد. بیوچار ظرفیت تبادل کاتیونی و حاصلخیزی خاک را افزایش می‌دهد و از این طریق موجب توسعهٔ ریشه و افزایش قدرت نگهداری عناصر غذایی توسط گیاه و درنتیجه افزایش پایداری غشا و گیاه می‌گردد. تأثیر بیوچار بر خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی گیاه، به عواملی نظیر نوع گیاه، خصوصیات فیزیکوشیمیایی بیوچار و دمای تولید آن و بافت و وضعیت حاصلخیزی اولیهٔ خاک بستگی دارد. استفاده از بیوچار در خاک‌هایی که کیفیت کم‌تری دارند (خاکی با مواد آلی کم‌تر و ظرفیت نگهداری عناصر غذایی پایین‌تر)، عملکرد گیاه را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، نوع بیوچار و مقدار مصرف آن نیز بر نحوهٔ اثرگذاری آن روی گیاهان مؤثر است؛ بنابراین، تفاوت در نتایج پژوهش‌های مذکور می‌تواند ناشی از نوع گیاه، خصوصیات خاک و نوع و ویژگی‌های بیوچار مصرفی باشد (بیرانوندی و همکاران، ۱۳۹۹).

مطابق با جدول (۴)، بیش‌ترین میزان کلروفیل a (۱/۵۳ میکروگرم بر میلی‌لیتر) در تیمار I2 حاصل شد که این پارامتر را ۵۴/۵۵ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. بین تیمار شاهد و I3 تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. مطابق با نتایج شکل (۱) بیش‌ترین میزان کلروفیل a در تیمار I2B3 (۱/۷۳ میکروگرم بر میلی‌لیتر) مشاهده شد. بااین‌حال با تیمارهای I2B1 (۱/۷۲ میکروگرم بر میلی‌لیتر) و I1B3 (۱/۳۵ میکروگرم بر میلی‌لیتر) تفاوت معنی‌داری نداشت. در آبیاری شاهد و ۱۷ روز، کاربرد سطوح مختلف بیوچار تفاوت معنی‌داری در میزان کلروفیل a نشان نداد. در آبیاری ۱۴ روز، بین بیوچار شاهد و ۱ درصد تفاوت معنی‌داری وجود نداشت ولی کاربرد بیوچار ۰/۵ درصد باعث کاهش ۳۴/۸۸ درصدی نسبت به شاهد شد. مطابق با جدول (۴)، بیش‌ترین میزان این پارامتر در تیمار I2 (۴۷/۹۸) مشاهده گشت که باعث افزایش ۱۵/۵۵ درصدی نسبت به شاهد شد. بین تیمار شاهد و I3 تفاوت معنی‌داری تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. در پژوهش رسام و همکاران (۱۳۹۳) نیز تنش خشکی در غلظت‌های شدید و متوسط در گیاه زوفا باعث کاهش کلروفیل a نسبت به شاهد شد. طباطبایی و همکاران (۱۳۹۹) نیز بیان کردند که بیش‌ترین میزان کلروفیل a در گیاه کلپوره مربوط به تیمار ۵۰ درصد بود. در گیاهان گوار (چمنی و همکاران، ۱۳۹۷)، مریم‌گلی سهندی (پروانک، ۱۳۹۸)، مرزنجوش بخارایی (مینایی و همکاران، ۱۳۹۸)، زیرهٔ سبز (سورنی و همکاران، ۱۳۹۹)، گوار (Khanzada et al., 2003) و آویشن (Tátrai et al., 2016) نیز با افزایش تنش خشکی، این پارامتر نسبت به شاهد کاهش یافت. کاهش کلروفیل a در شرایط تنش رطوبتی نشانه‌ای بارز از اکسیداسیون نوری رنگ‌دانه‌ها و زوال کلروفیل است. این کاهش می‌تواند ناشی از کاهش ساخت و یا افزایش تخریب این

رنگ‌دانه‌ها (در اثر افزایش آنزیم کلروفیلاز ناشی از افزایش بعضی تنظیم‌کننده‌های رشد مانند اسید آبسیزیک و اتیلن) (Draikewicz, 2004) و نیز ایجاد اختلال در فعالیت‌های آنزیمی مسئول ساخت آن‌ها در اثر کمبود آب باشد. تحریک گونه‌های فعال اکسیژن نظیر رادیکال‌های پراکسید و پراکسید هیدروژن، از دلایل دیگر کاهش و تخریب کلروفیل در شرایط تنش است (Tátrai et al., 2016). در سودائی‌زاده و همکاران (۱۳۹۵)، تنش خشکی در گیاهان به‌لیمو و آویشن دره‌باغی باعث افزایش کلروفیل a نسبت به شاهد شد که نشان‌دهندهٔ مقاومت رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی نسبت به تنش خشکی است (Schütz and Fangmeier, 2004). در تیمار شاهد و دور آبیاری ۱۷ روز، کاربرد سطوح مختلف بیوچار تفاوت معنی‌داری در میزان کلروفیل a نشان نداد. در آبیاری ۱۴ روز بااینکه بین بیوچار شاهد و ۱ درصد تفاوت معنی‌داری وجود نداشت ولی کاربرد بیوچار ۰/۵ درصد این پارامتر را نسبت به شاهد کاهش داد. جباروا و همکاران (۲۰۲۱)، نشان دادند که بیوچار، محتوای کلروفیل a را در شرایط تنش به‌طور قابل‌توجهی افزایش داد (Jabborova et al., 2021). زعفریان و همکاران (۱۳۹۸) نیز بیان کردند که استفاده از بیوچار باعث افزایش کلروفیل a در گیاه نعناع فلفلی شد. هم‌چنین بیش‌ترین و کم‌ترین کارایی مصرف آب به ترتیب در تیمار I3 (۰/۰۸ گرم بر لیتر) و شاهد (۰/۰۵ گرم بر لیتر) به دست آمد. تیمارهای I3 و I2 به ترتیب باعث افزایش ۶۰ و ۴۰ درصدی کارایی مصرف آب نسبت به تیمار شاهد شد. جدول (۵) نیز نتایج مقایسهٔ میانگین اثرات اصلی بیوچار بر صفات نشت یونی و SPAD همچنین اثر اصلی واریته بر SPAD بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد را ارائه می‌دهد. بیش‌ترین و کم‌ترین میزان SPAD، به ترتیب با کاربرد بیوچار یک درصد (۹۵/۱۸) و شاهد (۸۵/۱۶) به دست آمد. تیمارهای ۱ و ۰/۵ درصد بیوچار به ترتیب باعث افزایش ۱۱/۷۷ و ۴/۸۰ درصدی SPAD نسبت به شاهد شد (جدول ۵). مطابق با نتایج شکل (۲) بیش‌ترین میزان SPAD مربوط به تیمار I2B3 (۱۰۲/۴۳) بود گرچه با تیمار I2B1 (۹۵/۱۸) تفاوت معنی‌داری نشان نداد. همچنین واریته بومی (۹۲/۲۵) نسبت به واریته تجاری (۸۷/۴۸) دارای مقادیر بیشتری از SPAD را نشان داد.

جدول ٤- نتایج مقایسهٔ میانگین اثرات اصلی دور آبیاری بر صفات درصد صمغ، محتوای نسبی آب برگ، نشت یونی، کلروفیل a و SPAD و کارایی مصرف آب بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد

صفات	واحد اندازه‌گیری	تیمار آبیاری		
		I_1	I_2	I_3
درصد صمغ	درصد	۳۳/۳۹^{a}	۳۱/۲۴^{a}	۲۵/۲۸^{b}
محتوای نسبی آب برگ	درصد	۰/۷۸^{a}	۰/۷۵^{a}	۰/۲۸^{b}
نشت یونی	درصد	۳۳/۱۱^{c}	۴۰/۹۳^{b}	۴۶/۲۵^{a}
کلروفیل a	میکروگرم بر میلی‌لیتر	۱/۲۰^{b}	۱/۵۳^{a}	۰/۹۹^{b}
SPAD	-	۸۳/۷۷^{b}	۹۸/۴۷^{a}	۸۷/۳۶^{b}
کارایی مصرف آب	گرم بر لیتر	۰/۰۵^{c}	۰/۰۷^{b}	۰/۰۸^{a}

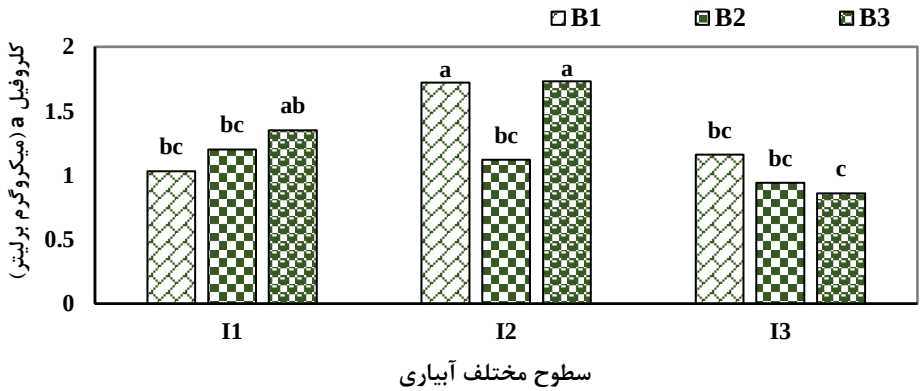
حروف لاتین مشترک حاکی از عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها است.I_1 ،I_2 ،I_3 به ترتیب بیانگر آبیاری در سطح ۱۰، ۱۴ و ۱۷ روز است.

جدول ۵- نتایج مقایسهٔ میانگین اثرات اصلی بیوچار بر صفات نشت یونی و SPAD و واریته بر SPAD بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد

صفات	واحد اندازه‌گیری	تیمار بیوچار		
		B_1	B_2	B_3
نشت یونی	درصد	۳۶/۹۵^{c}	۳۹/۷۷^{b}	۴۳/۵۷^{a}
SPAD	-	۸۵/۱۶^{c}	۸۹/۲۵^{b}	۹۵/۱۸^{a}
صفات	واحد اندازه‌گیری	تیمار واریته		
		V_1		V_2
SPAD	-	۹۲/۲۵^{a}		۸۷/۴۸^{b}

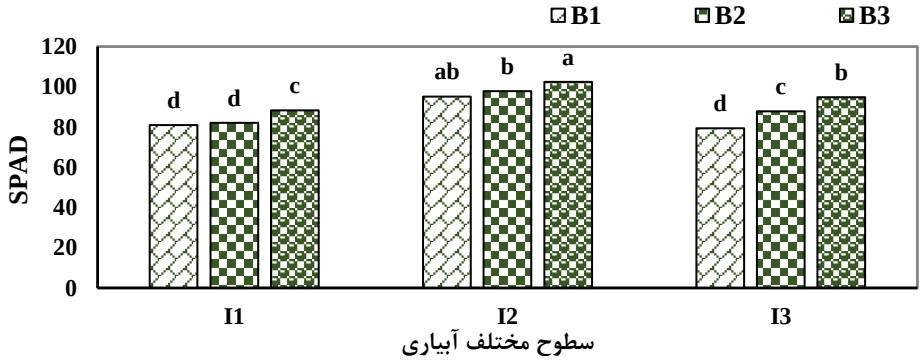
حروف لاتین مشترک حاکی از عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها است. B_1، B_2 و B_3 به ترتیب بیانگر بیوچار در سطح صفر، ۰/۵ و ۱ درصد است

کم‌ترین میزان در تیمار I3B1 (۷۹/۳۵) مشاهده شد بااین‌حال، با تیمارهای I1B1 (۸۰/۹۵) و I1B2 (۸۲/۱۳) تفاوت معنی‌داری نداشت. در آبیاری ۱۰ روز باوجوداینکه بین بیوچار شاهد و ۰/۵ درصد تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد؛ ولی با کاربرد بیوچار یک درصد، این پارامتر ۸/۹۹ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. کاربرد بیوچار در آبیاری ۱۴ روز، تفاوت معنی‌داری نسبت به شاهد نشان نداد. در آبیاری ۱۷ روز، بیوچار ۰/۵ و ۱ درصد به ترتیب باعث افزایش ۱۰/۸۷ و ۱۹/۵۷ درصدی نسبت به شاهد شد. تیمار B3V1، بیش‌ترین میزان SPAD (۹۸/۸۶) را نشان داد. کم‌ترین میزان این پارامتر در تیمار B1V2 (۸۳/۸۳) مشاهده شد گرچه با تیمارهای B1V1 (۸۶/۴۹) و B2V2 (۷۸/۱۰) تفاوت معنی‌داری نداشت. با کاربرد بیوچار صفر و ۰/۵ درصد، تفاوت معنی‌داری بین دو واریته حاصل نشد ولی با کاربرد بیوچار یک درصد، این پارامتر در واریتهٔ بومی ۸/۰۳ درصد بیش‌تر از هندی بود (شکل ۳). جدول (۶) نتایج مقایسهٔ میانگین اثر متقابل دور آبیاری، بیوچار و واریته بر SPAD بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جدول، بیش‌ترین میزان SPAD در تیمار I2B3V1 (۱۰۸/۹۷) مشاهده شد. کم‌ترین میزان مربوط به تیمار I3B1V2 (۷۷/۰۳) بود ولی با تیمارهای I1B1V2 (۴۰/۷۹)،I1B2V2 (۳۷/۸۱)، I3B1V1 (۶۷/۸۱)،I1B1V1 (۵۰/۸۲) I1B2V1، (۹۰/۸۲)،I3B2V2 (۸۴/۴۳) و I1B3V2 (۸۵/۷۷) تفاوت معنی‌داری نشان نداد. عزیزآبادی و همکاران (۱۳۹۳) نیز بیان کردند که تنش خشکی باعث افزایش عدد کلروفیل متر در برگ گیاهان گندم، گلرنگ و یونجه شد که این افزایش می‌تواند به دلیل کاهش سطح برگ و افزایش غلظت کلروفیل در واحد سطح برگ باشد. در گیاهان گلرنگ (عرب بافرانی و همکاران، ۱۳۹۹) و مریم‌گلی (غیاث و همکاران، ۱۴۰۱) با افزایش تنش خشکی، این پارامتر کاهش یافت. با افزایش غلظت بیوچار، میزانSPAD افزایش یافت. همبستگی مثبت بین نیتروژن و شاخص سبزینگی باعث می‌شود تا در اثر افزودن بیوچار به خاک و درنتیجه اضافه شدن نیتروژن به خاک، میزان جذب این عنصر توسط گیاه افزایش یابد و منجر به افزایش سبزینگی شود (Smeal and Zhang, 1994). کریمی و همکاران (۱۳۹۹) و عباس‌نسب و همکاران (۱۴۰۰)، بیان کردند که کاربرد سطوح مختلف بیوچار در گیاهان همیشه‌بهار و علف پشمکی نتوانست تفاوت معنی‌داری نسبت به شاهد نشان دهد. در آبیاری شاهد، بین بیوچار شاهد و ۰/۵ درصد تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد؛ ولی بیوچار یک درصد این پارامتر را نسبت شاهد افزایش داد. در دور آبیاری ۱۴ روز، کاربرد بیوچار ۰/۵ و یک‌درصدی تفاوت معنی‌داری نسبت به شاهد نشان نداد. در آبیاری ۱۷ روز، با افزایش غلظت بیوچار، این پارامتر روند افزایشی داشت. با کاربرد بیوچار شاهد و ۰/۵ درصد تفاوت معنی‌داری بین دو واریته در میزان SPAD حاصل نشد؛ ولی با کاربرد بیوچار یک درصد، این پارامتر در واریتهٔ بومی بیش‌تر از هندی بود. بیش‌ترین میزان SPAD، در واریتهٔ بومی و با کاربرد بیوچار یک درصد در دور آبیاری ۱۴ روز به دست آمد.



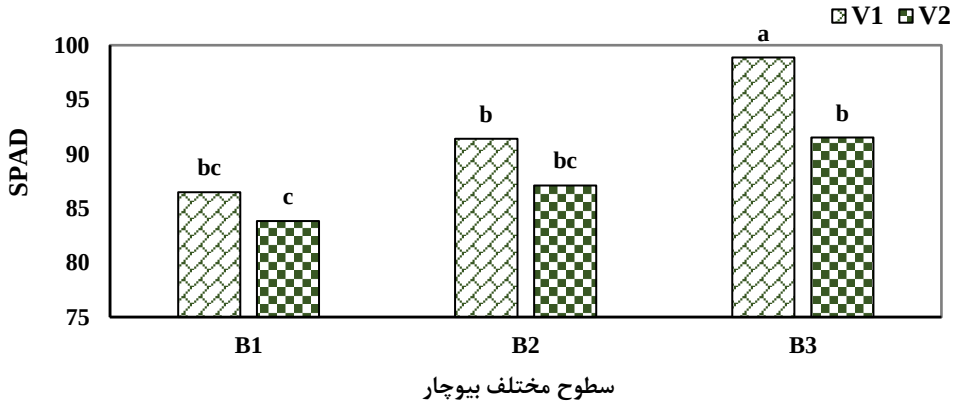
شکل ۱- نتایج مقایسهٔ میانگین اثر متقابل تیمارهای آبیاری و بیوچار بر کلروفیل a

بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد. حروف لاتین مشترک حاکی از عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها است. I_1، I_2 و I_3 به ترتیب بیانگر آبیاری در سطح ۱۰، ۱۴ و ۱۷ روز و B_1، B_2 و B_3 به ترتیب بیانگر بیوچار در سطح صفر، ۰/۵ و ۱ درصد است.



شکل ۲- نتایج مقایسهٔ میانگین اثر متقابل تیمارهای آبیاری و بیوچار بر SPAD

بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد. حروف لاتین مشترک حاکی از عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها است. I_1، I_2 و I_3 به ترتیب بیانگر آبیاری در سطح ۱۰، ۱۴ و ۱۷ روز و B_1، B_2 و B_3 به ترتیب بیانگر بیوچار در سطح صفر، ۰/۵ و ۱ درصد است.



شکل ۳-نتایج مقایسهٔ میانگین اثر متقابل تیمارهای بیوچار و واریته بر SPAD

بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد. حروف لاتین مشترک حاکی از عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها است. B_1، B_2 و B_3 به ترتیب بیانگر آبیاری در سطح ۱۰، ۱۴ و ۱۷ روز و V_1 و V_2 به ترتیب بیانگر واریتهٔ بومی و هندی است.

ns، * و ** به ترتیب نشان‌دهنده‌ی عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح یک و پنج درصد است.

جدول ٦- نتایج مقایسهٔ میانگین اثر متقابل دور آبیاری، بیوچار و واریته بر SPAD بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد.

تیمار	SPAD	تیمار	SPAD	تیمار	SPAD
$I_3B_1V_1$	۸۱/۶۷^{fg}	$I_2B_1V_1$	۹۵/۳۰^{bc}	$I_1B_1V_1$	۸۲/۵۰^{efg}
$I_3B_1V_2$	۷۷/۰۳^{g}	$I_2B_1V_2$	۹۵/۰۷^{bc}	$I_1B_1V_2$	۷۹/۴۰^{g}
$I_3B_2V_1$	۹۱/۲۳^{bcde}	$I_2B_2V_1$	۱۰۰/۰۷^{b}	$I_1B_2V_1$	۸۲/۹۰^{efg}
$I_3B_2V_2$	۸۴/۴۳^{defg}	$I_2B_2V_2$	۹۵/۵۰^{bc}	$I_1B_2V_2$	۸۱/۳۷^{g}
$I_3B_3V_1$	۹۶/۹۰^{bc}	$I_2B_3V_1$	۱۰۸/۹۷^{a}	$I_1B_3V_1$	۹۰/۷۰^{cdef}
$I_3B_3V_2$	۹۲/۸۷^{bcd}	$I_2B_3V_2$	۹۵/۹۰^{bc}	$I_1B_3V_2$	۸۵/۷۷^{defg}

حروف لاتین مشترک حاکی از عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها است. I_1، I_2 و I_3 به ترتیب بیانگر آبیاری در سطح ۱۰، ۱۴ و ۱۷ روز، B_1، B_2 و B_3 به ترتیب بیانگر آبیاری در سطح ۱۰، ۱۴ و ۱۷ روز و V_1 و V_2 به ترتیب بیانگر واریتهٔ بومی و هندی است.

نتیجه‌گیری

در کشور ایران با توجه به کمبود منابع آبی جهت کاشت گیاهان و لزوم در صرفه‌جویی آب و بهره‌برداری بهینه از آن، شناخت و کاشت گیاهان با نیاز آبی کم و دارای مقاومت مناسب به تنش خشکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به خصوصیات منحصر به فرد گیاه گوار به‌عنوان گیاه دارویی-صنعتی که دارای کاربردهای مختلف در صنایع دارویی، غذایی، آرایشی، بهداشتی، نساجی (تولید پارچه) و غیره است، بررسی اثر بیوچار و رژیم‌های مختلف آبیاری بر برخی خصوصیات مورفوفیزیولوژی در واریته-های مختلف گیاه گوار (بومی سیستان و بلوچستان و هندی) ازجمله اهداف این مطالعه بودند. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که با افزایش دور آبیاری و کاهش مصرف آب تا ۳۶ درصد، صفات درصد صمغ و محتوای نسبی آب برگ کاهش و درصد نشت یونی افزایش یافت. در مورد صفت SPAD و کلروفیل a، در دور آبیاری ۱۴ روز و کاهش آب مصرفی حدود ۲۱ درصد مقدار این دو صفت نسبت به شاهد کاهش یافت ولی بین تیمار شاهد و دور آبیاری ۱۷ روز تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. با افزایش دور آبیاری، کارایی مصرف آب روند افزایشی نشان داد؛ به‌طوری‌که دور آبیاری ۱۷ و ۱۴ روز به ترتیب باعث افزایش ۶۰ و ۴۰ درصدی کارایی مصرف آب نسبت به تیمار شاهد شد. استفاده از بیوچار باعث افزایش درصد نشت یونی و SPAD شد. کاربرد بیوچار ۰/۵ درصد در دور آبیاری ۱۴ روز، کلروفیل a را نسبت به شاهد کاهش داد؛ ولی بین سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. میزان SPAD نیز در دور آبیاری ۱۷ روز با کاربرد بیوچار ۰/۵ و یک درصد و در آبیاری شاهد، با کاربرد بیوچار یک درصد نسبت شاهد افزایش یافت. با کاربرد بیوچار یک درصد، SPAD در واریتهٔ بومی بیش‌تر از واریته هندی بود. به‌طورکلی دور آبیاری ۱۰ روز با سطح یک درصد بیوچار در واریته بومی باعث بالاترین میزان SPAD و کلروفیل در گیاه گوار گردید. همچنین دور آبیاری ۱۴ روز همراه با کاهش ۲۱ درصد حجم آب مصرفی و کاربرد حدود ده هزار کیلوگرم در هکتار بیوچار به‌عنوان اصلاح‌کننده، نتایج بهتری بر صفات مورفوفیزیولوژی گیاه گوار نسبت به دور آبیاری ۱۰ روز به همراه داشت. پیشنهاد می‌گردد در تحقیقات آینده سطوح بیشتری از بیوچار در خاک‌های مناطق خشک که معمولاً حاصلخیزی کمی دارند، موردبررسی قرار گیرد.

منابع

احمدی، ف.، مرادی، م.، سیادت، س. و مشتطی، ع. ۱۳۹۸. تأثیر غلظت‌های مختلف اسید هیومیک بر عملکرد و میزان

جذب عناصر غذایی گیاه گوار *Cyamopsis tetragonoloba* (L.) در تراکم‌های مختلف کاشت. تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی. ۹(۱): ۴۹-۳۳.

بیات، س. ۱۳۹۶. بررسی روابط آبی و مقاومت به خشکی گیاه گوار (*Cyamopsis tetragonoloba*) تحت تیمارهای مختلف رطوبتی. پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ کشاورزی و کویرشناسی دانشگاه یزد، ۱۰۸ ص.

بیرانوندی، م.، اکبری، ن.، احمدی, ع.، مومیوند، ح. و نظریان، ف. ۱۳۹۹. برهم‌کنش بیوچار و سوپرجاذب بر ترکیب‌های تشکیل‌دهنده اسانس مرزه رشینگری (*Satureja rechingeri Jamzad*) در شرایط تنش خشکی. تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران. ۳۶(۵): ۷۸۰-۷۹۳.

پروانک، ک. ۱۳۹۸. بررسی اثر تنش خشکی بر برخی شاخص‌های فیزیولوژیک، درصد و اسانس گونهٔ مریم‌گلی سهندی (*Salvia sahendica* L.). تنش‌های محیطی در علوم زراعی. ۱۲ (۴): ۱۲۴۹-۱۲۳۷.

جزایری، س.، موسوی نیک، س.، بحرینی نژاد، ب. و قنبری، س. ۱۳۹۸. تأثیر کودهای آلی و شیمیایی بر شاخص‌های رشدی، عملکرد و اجزای عملکرد گیاه دارویی گوار (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) در تراکم‌های مختلف بوته. تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران. ۳۵(۳): ۴۲۳-۴۰۸.

چمنی، ف.، توحیدی نژاد، ع. و مهیجی، م. ۱۳۹۷. اثر تنش خشکی و اسید سالیسیلیک بر برخی صفات مرفوفیزیولوژیکی و زراعی گیاه گوار (*Cyamopsis tetragonoloba* L.). فصلنامه علمی پژوهشی فیزیولوژی گیاهان زراعی. ۱۰(۴۰): ۵-۱۸.

رسام، ق. ع. دادخواه، ع. ر. و خشنود یزدی، ا. ۱۳۹۳. ارزیابی تأثیر کمبود آب بر صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاه دارویی زوفا. دانش زراعت. ۵ (۱۰): ۱۲-۱.

زعفریان، ف. اکبرپور، و. حبیبی، م. و کاوه، م. ۱۳۹۸. تأثیر بیوچار و کودهای زیستی بر رنگیزه‌های فتوسنتزی، عملکرد و محتوای عناصر غذایی نعنا فلفلی. به‌زراعی کشاورزی. ۲۱ (۴): ۴۲۲-۴۰۷.

سودائی‌زاده، ح. شمسایی، م. تجملیان، م. میرمحمدی میبدی، س. ع. م. و حکیم‌زاده، م. ع. ۱۳۹۵. ارزیابی برخی صفات فیزیولوژیکی گیاه دارویی آویشن قره‌باغی (Thymus fedtschenco) تحت تأثیر سطوح مختلف تنش خشکی. تنش‌های محیطی در علوم زراعی. ۹ (۴): ۴۲۷-۴۲۳.

سورنی، ج. روستاخیز، ج. سلیمی، خ. و نوری، م. ۱۳۹۹. اثر تنش خشکی بر صفات عملکردی، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و درصد اسانس برخی اکوتیپ‌های گیاه دارویی زیرهٔ سبز (*Cuminum cyminum* L.). تنش‌های محیطی در علوم زراعی. ۱۳ (۴): ۱۱۳۴-۱۱۲۵.

طباطبایی، م. ا. کریمیان، ع. ا. متینی‌زاده، م. راد، م. ه. و صباغ، س. ک. ۱۳۹۹. بررسی پاسخ‌های مورفوفیزیولوژیک گیاه داروئی کلپوره (*Teucrium polium* L.) به تنش خشکی. مرتع‌داری ایران. ۱۴ (۳): ۴۶۱-۴۵۲.

عباس‌نسب، ز. عابدی، م. و ساداتی، س. ا. ۱۴۰۰. اثر بیوچار بر برخی صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی دو کونهٔ (علف پشمکی) Bromus tomentellus و (یونجه) Medicago sativa. فرآیند و کارکرد گیاهی. ۱۰ (۴۱): ۱۵۵-۱۴۵.

عرب بافرانی، ز. قانعی بافقی، م. ج. و شیرمردی، م. ۱۳۹۹. اثر بیوچار ضایعات شاخ و برگ درخت پسته بر خصوصیات رشدی گیاه گلرنگ. مدیریت خاک و تولید پایدار. ۱۰ (۳): ۹۳-۷۳.

عزیزآبادی، ا. گلچین، ا. و دلاور، م. ا. ۱۳۹۳. تأثیر پتاسیم و تنش خشکی بر شاخص‌های رشد و غلظت عناصر غذایی برگ گیاه گلرنگ. علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای. ۵ (۱۹): ۷۹-۶۵.

غیاث، ش. شیرمردی، م. مفتاحی‌زاده، ح. و دهستانی اردکانی، م. ۱۴۰۱. تأثیر بیوچار و هیدروژل بر خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی مریم‌گلی (*Salvia*

officinalis L.) تحت تنش خشکی. تولیدات گیاهی. ۴۵ (۱): ۸۰-۶۷.

کافی، و. و مهدوی دامغانی، ع. ۱۳۸۶. مکانسیم‌های مقاومت گیاهان به تنش‌های محیطی. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۴۷۲ صفحه.

کریمی، ا. شیرمردی، م. دهستانی اردکانی، م. کریمی، م. و غلام‌نژاد، ج. ۱۳۹۹. تأثیر بیوچار و قارچ میکوریز بر خصوصیات رشدی و تغذیهٔ گیاه همیشه‌بهار (*Calendula officinalis* L.). تحقیقات کاربردی خاک. ۸ (۲): ۱۲۸-۱۱۲.

کوهی، ز.، فراستی، م.، سیدیان، س. ۱۳۹۸. اثر بیوچار کلزا، گندم و ترکیب آن‌ها بر جذب و آبشویی نیترات از خاک. پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک. ۲۶(۶): ۲۶۱-۲۴۷.

محسن‌زاده، م. حسینخانی هزاوه، م. و زمانپور شاه‌منصوری، ح. ۱۳۹۹. برخی خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه دارویی اسطوخودوس (Lavandula anjustifulia) در پاسخ به تنش خشکی و کود کمپوست و ورمی کمپوست. پژوهش‌های تولید گیاهی. ۲۷ (۳): ۱۶۲-۱۴۹.

محمدی، ع. ابراهیم‌زاده، ح. هادیان، ج. و میرمعصومی، م. ۱۳۹۴. واکاوی اثر تنش خشکی بر برخی پارامترهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه به‌لیمو (Lippia citriodora H.B.K). پژوهش‌های گیاهی. ۲۸ (۳): ۶۲۸-۶۱۷.

مفتاحی زاده، ح.، عصاره، م. ۱۳۹۸. مقایسه توده های بومی گیاه گوار (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) با واریته های تجاری از نظر اجزای عملکرد، عملکرد و خصوصیات کیفی تحت شرایط فصول مختلف کشت. تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران. ۳۵(۳): ۴۷۰-۴۵۶.

مفتاحی زاده، ح. و رحمتی احمد آباد، ز. ۱۴۰۰. ارزیابی شاخص‌های جوانه‌زنی و خصوصیات رشدی گیاهچه ژنوتیپ های گوار (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) تحت سطوح تنش شوری. علوم و فناوری بذر ایران. ۱۰(۲): ۹۷-۱۰۹.

مینایی، ا. حسنی، ع. ناظمیه، ح. و بشارت، س. ۱۳۹۸. تأثیر تنش خشکی بر برخی خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی و فیتوشیمیایی مرزنجوش بخارایی (*Origanum vulgare* L. ssp. gracile). تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران. ۳۵ (۲): ۲۶۵-۲۵۲.

نوروزی، س.، اکبری، غ.، اله دادی، ا.، سلطانی، ا. و نوروزیان، م. ۱۴۰۰. تأثیر کود نیتروژن و سویه‌های مختلف باکتری همزیست بر صفات کمی و کیفی گیاه گوار (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) تحت رژیم‌های مختلف آبیاری. دانش کشاورزی و تولید پایدار. ۳۱(۲): ۳۵۹-۳۳۹.

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

Avola, G., Riggi, E., Trostle, C., Sortino, O. and Gresta, F. 2020. Deficit Irrigation on Guar Genotypes (Cyamopsis tetragonoloba (L.) Taub.): Effects on Seed Yield and Water Use Efficiency. Agronomy. 10(6): 789.

Draikewicz, M. 2004. Chlorophylase occurrence functions, mechanism of action, effect of extra and internal factors. Photosynthetica. 30 (6): 321-337.

Guarda, G., Padovan, S. and Delogu, G. 2004. Grain yield, nitrogen-use efficiency and baking quality of old and modern Italian bread-wheat cultivars grown at different nitrogen levels. European Journal of Agronomy. 21(2): 181-192.

Haider, I., Raza, M.A.S., Iqbal, R., Aslam, M.U., Habib-ur-Rahman, M., Raja, S., Khan, M.T., Aslam, M.M., Iaqas, M. and Ahmad, S. 2020. Potential effects of biochar application on mitigating the drought stress implications on Iheat (Triticum aestivum L.) under various groIth stages. Journal of Saudi Chemical Society. 24 (12): 974-981.

Hernández, T., Chocano, C., Moreno, J.L. and García, C. 2016. Use of compost as an alternative to conventional inorganic fertilizers in intensive lettuce (Lactuca sativa L.) crops-Effects on soil and plant. Soil and tillage research. 160: 14-22.

Jabborova, D., Annapurna, K., Al-Sadi, A.M., Alharbi, S.A., Datta, R. and Zuan, A.T.K. 2021.

(Abelmoschus esculentus) plant groIth, root

Schütz, M. and Fangmeier, A. 2001. Growth and yield responses of spring wheat (Triticum aestivum L. cv. Minaret) to elevated CO2 and water limitation. Environmental Pollution. 114(2):187-194.

Sij, J. W., Ott, J. P., Baughman, T. A. and Olosn, B. L. S. 2002. Simulated hail damage on guar at different stages of growth. Annual Report Texas University, USA.

Singh, B., Singh, B. P. and Cowie, A. L. 2010. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment. Soil Research. 48(7): 516-525.

Smeal, D. and Zhang, H. 1994. Chlorophyll meter evaluation for nitrogen management in corn. Communications in soil science and plant analysis. 25(9-10):1495-1503.

Soltani-Gerdefaramarzi, S., Beik-Khormizi, V., Azizian, A. and Yarami, N. 2021. Effect of Deficit Irrigation with Treated Wastewater on Water Use Efficiency, Nutrient Uptake, and Growth of Pistachio Seedlings in an Arid Area. Journal of Soil Science and Plant Nutrition. pp.1-11.

Tátrai, Z.A., Sanoubar, R., Pluhár, Z., Mancarella, S., Orsini, F. and Gianquinto, G. 2016. Morphological and physiological plant responses to drought stress in Thymus citriodorus. International Journal of Agronomy. 2016: 4165750.

Vaccari, F. P., Baronti, S., Lugato, E., Genesio, L., Castaldi, S., Fornasier, F., Miglietta, F. 2011. Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat. European journal of agronomy. 34(4): 231-238.

Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K. Y., Downie, A., Rust, J. and Cowie, A. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. Plant and soil. 327(1): 235-246.

Biochar and Arbuscular mycorrhizal fungi mediated enhanced drought tolerance in Okra morphological traits and physiological properties. Saudi Journal of Biological Sciences. 28(10): 5490-5499.

Irigoyen, J.J., Einerich, D.W. and Sánchez Díaz, M. 1992. Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (Medicago sativd) plants. Physiologia plantarum. 84(1):55-60.

Khanzada, B., Ashraf, M. Y., Shirazi, M. U., Alam, S. M., Samo, K. B. and Mujtaba, S. M. 2003. Study of photosynthetic efficiency of some guar (Cyamopsis tetragonoloba L., Taub) genotypes grown under different water regimes. Asian Journal of Plant Science. 2(1): 127-131.

Lehmann J. and Joseph S. 2009. Biochar for environmental management: an introduction (Ch. 1). Biochar for Environmental Management: Science and Technology, Lehmann J, Joseph S (eds). Earthscan: London, 1-12.

Lutts, S., Kinet, J.M. and Bouharmont, J. 1995. Changes in plant response to NaCl during development of rice (Oryza sativa L.) varieties differing in salinity resistance. Journal of Experimental Botany. 46: 1843–1852.

MacMillan, J., Shrestha, R., Adams, C. B., Hinson, P. O. and Trostle, C. 2021. The root system of guar: Spatial and temporal analysis of root and nodule development. Annals of Applied Biology. 179(3):278-87.

Rahdari, P. and Hoseini S.M. 2012. Drought stress: a review. International Journal of Agronomy and Plant Production. 3(10): 443-446.

Ritchie, S.W., Nguyan, H.T. and Holaday, A.S. 1990. Leaf Water content and gas exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. Crop Science. 30:105-111.

Sabahelkheir, M., Abdalla Abdelwahab K. and Nouri Sulafa, H. 2012. Quality assessment of guar gum (Endosperm) of guar (Cyamopsis tetragonoloba). ISCA Journal of Biological Sciences. 1(1): 67-70.

Water Management in Agriculture
Vol. 10, No. 2 Autumn And Winter 2024, 39-54

نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۴۰۲، ص. ۵۴-۳۹

Effect of Drought Stress and Soil Amendment on Some Morphophysiological Traits of Guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.)

M. Hoseinollahi[1], S. Soltani Gerdefaramarzi[2*], A. Azizian[3] and H. Meftahizadeh[4]

Abstract

Considering the climatic conditions of Yazd province and the need to cultivate low water-demanding and industrial medicinal plants, Guar plant was chosen to investigate the effect of drought stress and biochar as a soil conditioner. The experiment was carried out in the form of split split plots in a randomized complete block design with three replications. The main factor was three levels of drought stress I1, I2 and I3 (7, 10 and 14 days of irrigation cycle) and the first secondary factor was two commercial and local species and the second secondary factor was three levels of biochar (0, 0.5 and 1%). At the end of the experiment, the traits of gum percentage, ion leakage, relative leaf water content, chlorophyll a and b, chlorophyll index (SPAD) and water use efficiency were measured. The results showed that the main effects of irrigation period on the traits of gum percentage, relative leaf water content, ion leakage, chlorophyll a, SPAD and water use efficiency were significant at the five percent probability level. While the main effects of variety were statistically significant only on SPAD and the main effects of biochar on ion leakage and SPAD. The interaction effect of irrigation period and variety was also significant only on the SPAD trait; although the interaction effect of irrigation cycle and biochar on chlorophyll a and SPAD traits was significant. The interaction effect of variety and biochar, as well as the interaction effect of irrigation period, variety and biochar only showed a significant effect on SPAD trait at the level of 5%. Irrigation period of 17 days (I3) reduced the percentage of gum and the relative content of leaf water in guar varieties by 24.29 and 64.10% compared to the control (I1) although the water use efficiency increased by 60%. The highest percentage of ion leakage was related to I3 treatment (46.25%) and the application of 1 and 0.5% biochar could increase ion leakage by 17.92 and 7.63%, respectively, compared to the control. Also, the highest amount of chlorophyll a (1.53 µg/ml) was obtained in I2 treatment, which increased this parameter by 54.55% compared to the control. Biochar treatments of 1 and 0.5% increased SPAD by 11.77 and 4.80%, respectively, compared to the control. In general, drought stress decreased the percentage of gum, the relative content of leaf water and significantly increased ion leakage. In addition, the application of biochar caused a significant increase in ion leakage and SPAD, and a 10-day irrigation cycle with a level of 1% biochar in the native variety caused the highest amount of SPAD in the guar plant.

Keywords: Medicine, deficit water, guar, biochar, species, morphophysiological

[1] M.Sc. Student of Irrigation and Drainage, Department of Water Sciences and Engineering, Collage of Agriculture and Natural Resource, Ardakan University, Ardakan, Iran
[2] Associate Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Collage of Agriculture and Natural Resource, Ardakan University, Ardakan, Iran (* Corresponding Author Email: ssoltani@ardakan.ac.ir).
[3] Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Collage of Agriculture and Natural Resource, Ardakan University, Ardakan, Iran
[4] Associate Professor, Department of Horticultural Sciences and Engineering, Collage of Agriculture and Natural Resource, Ardakan University, Ardakan, Iran
Received: 26 Dec 2022
Accepted: 18 Feb 2023