



## The Effect of Grapevine Wood Biochar on Maize Response to Water Deficit Stress in Greenhouse Condition

Mohammadtaghi Tirgarsoltani<sup>1</sup>, Hosseinali Bahrami<sup>2✉</sup>, Ali Mokhtassi –Bidgoli<sup>3</sup>

1. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: [tsoltani@ut.ac.ir](mailto:tsoltani@ut.ac.ir)

2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: [bahramih@modares.ac.ir](mailto:bahramih@modares.ac.ir)

3. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: [mokhtassi@modares.ac.ir](mailto:mokhtassi@modares.ac.ir)

### Article Info

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** July. 6, 2022

**Revised:** Aug. 21, 2022

**Accepted:** Sep. 19, 2022

**Published online:** Nov. 22, 2022

**Keywords:**

Soil hydraulic conductivity,  
Stomatal conductance,  
Transpiration rate,  
Water use efficiency,  
Water retention.

### ABSTRACT

A greenhouse study was conducted to investigate the effect of biochar on vegetative and reproductive stages of maize (*Zea mays* L.) under water deficit stress. A biochar produced from the pyrolysis of grapevine wood chips (at 350°C), was mixed with a sandy loam soil (from Alborz province) at the rates of 0, 0.5, 1, 2, 3, 4 and 5 % w/w, which were used for planting maize. The experiment consisted of two deficit irrigation treatments in vegetative (I1) and reproductive (I2) stages and one sufficient daily irrigation treatment throughout the growing season (I3). Plants in the period of deficit irrigation were subjected to successive wetting (via watering up to FC) and drying (via plant transpiration) soil cycles with water content varying between 0.30 and 0.18 cm<sup>3</sup>cm<sup>-3</sup>, respectively. Some plant physiological characteristics including transpiration rate, stomatal conductance and photosynthesis rate were determined during the drying cycles and biomass at the end of experiment. Soil water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity ( $K_h$ ) were measured by a combination of the Sandbox, Pressure plate, and Hyprop apparatus. The results showed that the addition of four percent biochar to the soil increased transpiration rate by 81, 100 and 49% in I1 and 228, 198 and 61% in I2 at soil water contents of 0.18, 0.20 and 0.23 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>, respectively. The effect of biochar on improving the physiological parameters of plants under drought stress in the reproductive stage was greater than the ones in the vegetative stage. Due to this improvement, the harvest index of plants in soils containing biochar increased by 35 and 50% in I1 and I2, respectively. Under the biochar impacts, grain water use efficiency also increased by 42% and 49% in I1 and I2, respectively. Given the small effect of biochar on increasing soil water retention especially in the dry range, it seems that the performance of biochar to keep higher  $K_h$  and matric flux potential were the most important factors to improve transpiration rate in the soil drying cycles.

Cite this article: Tirgarsoltani, M. T., Bahrami, H. A., Mokhtassi-Bidgoli, A. (2022) The effect of grapevine wood biochar on maize response to water deficit stress in greenhouse condition, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345278.669309>, 53 (9), 1979-1996.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345278.669309>



## تأثیر بیوچار چوب انگور بر پاسخ ذرت به تنش کمبود آب در شرایط گلخانه‌ای

محمد تقی تیرگرسلطانی<sup>۱</sup>، حسینعلی بهرامی<sup>۲</sup>، علی مختصی بیدگلی<sup>۳</sup>

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، ایمیل:

[Stoltani@ut.ac.ir](mailto:Stoltani@ut.ac.ir)۲. نویسنده مسئول، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، ایمیل: [bahramih@modares.ac.ir](mailto:bahramih@modares.ac.ir)۳. گروه زراعت، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، ایمیل: [mokhtassi@modares.ac.ir](mailto:mokhtassi@modares.ac.ir)

## اطلاعات مقاله

## چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۴/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۵/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۶/۲۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۹/۱

## واژه‌های کلیدی:

شدت تعرق،  
کارایی مصرف آب،  
نگهداشت آب،  
هدایت روزنه‌ای،  
هدایت هیدرولیکی خاک.

یک مطالعه گلخانه‌ای با هدف بررسی تأثیر بیوچار بر مراحل رشد رویشی و زایشی گیاه ذرت (*Zea mays L.*) تحت تنش کمبود آب انجام شد. بیوچار تولیدشده از پیرولیز خرده‌های چوب درخت انگور (در  $350^{\circ}\text{C}$ )، در نسبت‌های وزنی ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد با یک خاک لوم شنی (نمونه‌برداری شده از استان البرز) مخلوط و به منظور کشت ذرت استفاده شدند. آزمایش شامل دو تیمار کم‌آبیاری در مراحل رویشی (I1) و زایشی (I2) و یک تیمار آبیاری کافی روزانه در طول فصل رشد (I3) بود. گیاهان در دوره کم‌آبیاری در معرض چرخه‌های متوالی تر (آبیاری تا حد ظرفیت مزرعه) و خشک شدن خاک (ناشی از تعرق گیاه) با دامنه نوسان رطوبت  $3\text{ cm}^3\text{ cm}^{-3}$  -  $18\text{ cm}^3\text{ cm}^{-3}$  قرار گرفتند. برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک گیاهان شامل شدت تعرق، هدایت روزنه‌ای و شدت فتوسنتز در طول چرخه‌های خشکی خاک و زیست‌توده در پایان آزمایش اندازه‌گیری شدند. منحنی رطوبتی خاک با استفاده از دستگاه‌های جعبه شنی و صفحات فشاری و هدایت هیدرولیکی غیراشباع ( $K_h$ ) با دستگاه هایپروپ اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد افزودن ۴ درصد بیوچار به خاک، شدت تعرق را ۸۱، ۱۰۰ و ۴۹ درصد در I1، I2 و I3، ۲۲۸، ۱۹۸ و ۶۱ درصد در I2 به ترتیب در رطوبت‌های خاک ۰/۱۸، ۰/۲۰ و  $3\text{ cm}^3\text{ cm}^{-3}$  افزایش داد. میزان تأثیر بیوچار بر بهبود شاخص‌های فیزیولوژیک گیاهان تحت تنش خشکی مرحله زایشی، بیش‌تر از مرحله رویشی بود. در نتیجه‌ی این بهبود، شاخص برداشت گیاهان در خاک‌های حاوی بیوچار برای تیمارهای I1 و I2، به ترتیب ۳۵ و ۵۰ درصد افزایش یافت. راندمان مصرف آب دانه نیز در تیمارهای I1 و I2 تحت تأثیر بیوچار به ترتیب ۴۲ و ۴۹ درصد افزایش یافت. با توجه به تأثیر اندک بیوچار به‌ویژه در محدوده خشک منحنی رطوبتی بر افزایش نگهداشت آب خاک، به نظر می‌رسد، کارکرد بیوچار در بالاتر نگهداشتن  $K_h$  و پتانسیل جریان ماتریک مهم‌ترین عامل بهبود شدت تعرق در چرخه‌های خشک شدن خاک بود.

استناد: تیرگر سلطانی، محمد تقی، بهرامی، حسینعلی، مختصی بیدگلی؛ علی، (۱۴۰۱) تأثیر بیوچار چوب انگور بر پاسخ ذرت به تنش کمبود آب در شرایط گلخانه‌ای، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345278.669309>، ۵۳ (۹)، ۱۹۹۶-۱۹۷۹.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345278.669309>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

## مقدمه

استفاده از اصلاح‌کننده‌های طبیعی در خاک که منجر به بهبود نگهداشت و توزیع آب در محیط ریشه می‌شوند، به عنوان یک راه‌کار سودمند در کاهش اثرات تنش خشکی بر گیاه مطرح می‌باشد (Khan *et al.*, 2021). در دهه‌های اخیر استفاده از بیوچار (biochar) در خاک به عنوان یک استراتژی چند منظوره با اهداف زیست‌محیطی (کاهش گازهای گلخانه‌ای و افزایش توقف کربن در خاک) و کشاورزی مورد توجه محققین قرار گرفته است (Martos *et al.*, 2020). بیوچار، محصول فرآیند گرماکافت (پیرولیز) بقایای آلی در شرایط کمبود یا فقدان اکسیژن است که دارای ساختار کربنی متخلخل و مقاوم به تجزیه می‌باشد (Gray *et al.*, 2014). نوع مواد آلی ورودی و شرایط پیرولیز تعیین‌کننده ویژگی‌هایی مانند سطح ویژه، جذب آب و تخلخل بیوچار می‌باشند که می‌توانند بر میزان تأثیر بیوچار بر ویژگی‌های خاک موثر باشند. نگهداشت آب، نفوذ و حرکت آب در خاک در شرایط اشباع و غیراشباع می‌تواند تحت تأثیر افزودن بیوچار به خاک بهبود یابد (Blanco-Canqui, 2017; Hussain *et al.*, 2020;). سطح ویژه بالا و تخلخل درونی و بین ذره‌ای (ذرات بیوچار با یکدیگر و با ذرات خاک)، می‌تواند سبب افزایش قابلیت نگهداشت آب، بهبود اتصال منافذ خاک و در نتیجه بهبود حرکت آب و عناصر غذایی به طرف ریشه گیاه شود (Busscher *et al.*, 2010; Zwieten *et al.*, 2012; Prendergast-Miller *et al.*, 2014). به‌طور کلی، افزایش پایداری خاکدانه و بهبود ساختمان خاک (Abrishamkesh *et al.*, 2015)، بهبود تهویه و توزیع تخلخل، کاهش تراکم و جرم ویژه ظاهری خاک (Zhang *et al.*, 2017)، کاهش مقاومت مکانیکی خاک (Zong *et al.*, 2016)، تغییرات هدایت هیدرولیکی (Obia *et al.*, 2016) از اثرات بیوچار بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک برشمرده می‌شوند.

در اراضی زراعی به‌ویژه خاک‌های درشت بافت، با خشک‌شدن خاک در فواصل آبیاری یا بارندگی‌ها، قابلیت فراهمی آب خاک و متعاقباً جذب آب توسط ریشه کاهش می‌یابد. در این شرایط، افت پتانسیل ماتریک خاک در منطقه جذب ریشه که به معنی افزایش انرژی لازم برای استخراج آب از ذرات خاک است و نیز افزایش مقاومت هیدرولیکی خاک اطراف ریشه گیاه که به معنی کاهش هدایت هیدرولیکی خاک در منطقه جذب ریشه است دو عامل اساسی کاهش دسترسی ریشه به آب می‌باشند (Hulugalle & Willatt, 1983; Minasny & Mcbratney, 2003) که ممکن است تحت‌تأثیر افزودن بیوچار به خاک تغییر کنند. اگرچه تاکنون اثر بیوچار بر نگهداشت آب خاک به‌طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است (Blanco-Canqui, 2017) و اغلب گزارشات موجود حاکی از نقش مثبت بیوچار در بهبود نگهداشت آب خاک به‌ویژه در خاک‌های درشت بافت است (Basso *et al.*, 2013; Yu *et al.*, 2017; Batista *et al.*, 2018; Fischer *et al.*, 2019; Gao *et al.*, 2020) با این حال، اطلاعات بسیار کمی از چگونگی تأثیر بیوچار بر هدایت هیدرولیکی غیراشباع ( $K_h$ ) و در نتیجه مقاومت هیدرولیکی خاک و اثر آن بر مراحل مختلف رشد گیاه وجود دارد (Villagra-Mendoza & Horn 2018; Hussain *et al.*, 2020). احتمالاً به دلیل دشواری‌های اندازه‌گیری  $K_h$  به‌ویژه در محدوده خشک خاک، تاکنون تحقیقات انگشت‌شماری اثر بیوچار بر  $K_h$  را کمی نموده‌اند، به‌علاوه در بسیاری موارد نیز نتایج متناقضی از تأثیر بیوچار بر  $K_h$  مشاهده می‌شود. مروری بر گزارشات منتشر شده نشان می‌دهد که بیش‌تر مطالعات به دلیل استفاده از روش‌های غیرمستقیم و یا اندازه‌گیری  $K_h$  صرفاً در نقاط نزدیک اشباع برای تعیین منحنی هدایت هیدرولیکی، اساساً نمی‌توانسته اطلاعات کافی و دقیقی از تأثیر بیوچار بر سرعت جریان آب در شرایط خشکی خاک فراهم نمایند. علاوه بر این، بسیاری از کارهای انجام شده در این زمینه در غیاب گیاه و صرفاً متمرکز بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک تیمار شده با بیوچار بوده و مطالعات کمی، پاسخ گیاه به شرایط تنش خشکی را در ارتباط با ویژگی‌های هیدرولیکی خاک تیمار شده با بیوچار مورد بررسی قرار داده‌اند (Haider *et al.*, 2015; Ali *et al.*, 2017; Zoghi *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2020).

هرگونه تغییر در ویژگی‌های هیدرولیکی خاک که بازتوزیع رطوبت در عمق ریشه و دسترسی گیاه به آب را متأثر سازد، می‌تواند بر ویژگی‌های فیزیولوژیک و رشد گیاه تأثیرگذار باشد. به همین دلیل، تعلق نسبی گیاه تحت تنش خشکی، به عنوان شاخص سهل‌الوصولی برای درک بهتر وضعیت جذب آب ریشه در نظر گرفته شده است (Feddes *et al.*, 1978). در تحقیق حاضر، ضمن ارزیابی پاسخ‌های گیاه ذرت به چرخه‌های متوالی تر و خشک شدن طبیعی خاک در مراحل رشد رویشی و زایشی، اثر مقادیر مختلف بیوچار افزوده شده به خاک بر پاسخ‌های گیاه تحت تنش خشکی و بر قابلیت دسترسی آب خاک (نگهداشت آب خاک و سرعت جریان آب مبتنی بر اندازه‌گیری مستقیم  $K_h$  در محدوده وسیع رطوبت خاک)، در شرایط گلخانه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

### آماده‌سازی و تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار

مقدار کافی از سرشاخه‌های خردشده و هواخشک شده انگور بی‌دانه (*Vitis vinifera* L.) به عنوان ماده اولیه تولید بیوچار درون یک کوره الکتریکی قرار داده شد و به روش پیرولیز آهسته به مدت ۱۰۰ دقیقه، بیشینه دمای  $350^{\circ}\text{C}$  با شیب افزایش دمای  $5^{\circ}\text{C}$  در دقیقه و محدودیت فشار اکسیژن حرارت داده شد. بیوچار تولید شده ابتدا خرد و پس از عبور دادن از الک ۱ میلی‌متر به منظور اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و آزمایش گلخانه‌ای مورد استفاده قرار گرفت. ویژگی‌های فیزیکی شامل منحنی توزیع اندازه، میانگین وزنی قطر ( $MWD^1$ ) و قطر میانه ( $D_{50}$ ) بیوچار مورد مطالعه (ذرات کوچکتر از ۱ میلی‌متر) با روش الک خشک و سری الک‌های ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱۲۵ میلی‌متر تعیین شدند. جرم ویژه ظاهری و حقیقی بیوچار با روش استوانه فلزی (به قطر و ارتفاع یکسان ۵ سانتی‌متر) و روش پیکنومتر خلا تعیین شدند. جدول ۱ برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار تولید شده را که براساس رویه‌های استاندارد (ASTM, 1990) انجام شده است، نشان می‌دهد. به منظور تعیین گروه‌های عاملی بیوچار تولید شده، طیف سنجی زیرقرمز (FTIR) به روش Diffuse Reflectance Module با دستگاه مدل Agilent 4100 ExoScan, 4500 و رزولوشن ۱۶ محدوده‌ای مابین اعداد موجی  $4000\text{ cm}^{-1}$  تا  $650\text{ cm}^{-1}$  انجام شد.

### آزمایش گلدانی (آماده‌سازی تیمارها و کشت گیاه)

به منظور بررسی تأثیر بیوچار بر رشد ذرت در شرایط تنش خشکی، یک پژوهش گلخانه‌ای در تابستان ۱۳۹۷ در دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. آزمایش گلدانی به صورت فاکتوریل با سه تکرار ( $3 \times 7$ ) در قالب طرح کامل تصادفی شامل هفت تیمار مخلوط بیوچار و خاک و سه تیمار آبیاری انجام شد. خاک مورد استفاده از لایه ۱۰ سانتی‌متر سطحی یک زمین زراعی بایر در استان البرز جمع‌آوری شد. بافت خاک مورد مطالعه لوم شنی و بر اساس سیستم طبقه‌بندی امریکایی USDA، با نام coarse-loamy, mixed, thermic superactive, typic Haploxerepts رده‌بندی شد (Soil Survey Staff, 2014). نمونه خاک مورد مطالعه پس از انتقال به آزمایشگاه و هواخشک شدن از الک ۲ و  $4/75$  میلی‌متر به ترتیب به منظور استفاده در آزمون‌های فیزیکی-شیمیایی خاک و آزمایش گلخانه‌ای عبور داده شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۲ نشان داده شده است. بیوچار تولید شده در هفت نسبت وزنی ۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد به خوبی با خاک مخلوط و سپس همه این مخلوط‌ها با یک شیوه معین و یکسان درون گلدان‌های مربوطه که به صورت لوله‌های PVC یک سر مسدود (زهکش‌دار) به طول و قطر ۴۹ و ۱۹ سانتی‌متر بودند، ریخته شدند. جرم ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده در گلدان‌ها برای تیمارهای بیوچار به ترتیب  $1/50$ ،  $1/47$ ،  $1/45$ ،  $1/40$ ،  $1/36$ ،  $1/31$  و  $1/28$  بود. این گلدان‌ها قبل از شروع آزمایش، در رطوبت خاک کافی و دمای هوای  $30^{\circ}\text{C}$  به مدت ۶۰ روز قرار داده شدند. به منظور به حداقل رساندن تبخیر سطحی در گلدان‌ها، سطح خاک با لایه‌ای از سنگریزه به ضخامت دو سانتی‌متر پوشانده شد. به منظور انجام نمونه‌برداری دست‌نخورده و تعیین منحنی‌های رطوبتی و هدایت هیدرولیکی خاک و رطوبت ظرفیت مزرعه (FC)، گلدان‌های مشابهی با شرایط یادشده بالا، آماده‌سازی و به همراه گلدان‌های اصلی تا پایان آزمایش در شرایط یکسانی قرار گرفتند. مکش ماتریک در رطوبت ظرفیت مزرعه (FC) از روش Assouline & Or (2014) و مبتنی بر معادله منحنی رطوبتی و ننگوختن (van Genuchten, 1980) تعیین گردید.

$$h_{FC} = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{n-1}{n} \right)^{1-2n/n} \quad \text{رابطه ۱}$$

که  $h_{FC}$  مکش ماتریک در رطوبت FC و  $\alpha$  ( $\text{kPa}^{-1}$ ) و  $n$  ضرایب شکل معادله و ننگوختن هستند.

مقادیر  $h_{FC}$  برای هر یک از تیمارهای بیوچار به‌طور جداگانه محاسبه و رطوبت متناظر آنها براساس منحنی رطوبتی خاک تعیین شد (جدول ۳). با توجه به اینکه مقدار رطوبت حجمی ( $\theta_{FC}$ ) تیمارها در مکش‌های به دست آمده تفاوت اندکی داشتند (جدول ۳)، مقدار  $\theta_{FC}$  برای همه تیمارها  $0/30\text{ cm}^3\text{ cm}^{-3}$  (۳۰ درصد حجمی) در نظر گرفته شد. در طول دوره کشت، هیچ آب زهکشی پس از آبیاری گلدان‌ها مشاهده نشد.

تعداد سه عدد بذر ذرت واریته سینگل کراس ۷۰۴ (*Zea mays* L. cv. SC704) در عمق سه سانتی‌متری خاک گلدان‌ها کاشته و پس از ۱۵ روز با خارج کردن دو گیاه ضعیف‌تر، یک نهال در هر گلدان نگه‌داشته شد. طول دوره کشت ۹۲ روز بود و همه گیاهان تا رسیدن

به مرحله هشت برگی (حدوداً ۳۰ روز پس از کاشت بذر) روزانه به‌طور منظم و به مقدار کافی آبیاری شدند. در طول دوره، دمای گلخانه بین ۲۵ تا ۳۵ درجه سانتیگراد، نور ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ میکرومول بر متر مربع ثانیه، و رطوبت نسبی بین ۵۵ تا ۶۵ درصد متغیر بودند. آزمایش گلخانه‌ای شامل دو تیمار کم آبیاری شامل تیمار I1، کم آبیاری در دوره رویشی از هشت برگی (روز ۳۰ پس از کاشت) تا قبل از ظهور گل‌های نر (روز ۶۲ پس از کاشت) و تیمار I2، شروع کم آبیاری بلافاصله پس از ظهور گل‌های نر تا پایان آزمایش (از روز ۶۴ تا ۹۲ پس از کاشت)، و یک تیمار آبیاری کافی روزانه یک بار در تمام فصل رشد (I3) بود. کم آبیاری در هر یک از مراحل رشد یادشده از طریق ایجاد چرخه‌های تر و خشک شدن طبیعی خاک به شرح زیر انجام شد. بر این اساس در طول دوره تنش، با انجام آبیاری کافی تا حد ظرفیت مزرعه (FC) و سپس قطع آبیاری اجازه داده شد تا رطوبت گلدان‌ها بر اثر تبخیر و تعرق به حدود ۶۰ درصد FC کاهش یابد ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) (۰/۱۸) و سپس، دوباره آبیاری کافی انجام شد. مقدار آب لازم برای آبیاری کافی هر گلدان (گرم) با روش وزنی و از طریق محاسبه اختلاف وزن فعلی آن گلدان با وزن اولیه در رطوبت FC ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) (۰/۳۰) محاسبه شد. مقدار و فواصل آبیاری‌ها با توجه به وزن گلدان و براساس دامنه نوسان رطوبتی از پیش تعیین شده ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) (۰/۳۰ و  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) (۰/۱۸) به عنوان حد بالا و پایین تنظیم و اجرا گردید. به منظور کاهش احتمال بروز کمبود عناصر غذایی، کوددهی بر اساس نتایج تجزیه خاک و با استفاده از کود تجاری شرکت گرین ایتالیا ( $20^{+TE}$ ) (۲۰-۲۰) و سولفات آمونیم داخلی (۲۴-۰۰-۰۰) هر یک به ترتیب به مقادیر پنج و سه گرم به ازای هر گلدان، منقسم در چهار مقطع زمانی و به صورت محلول در آب آبیاری انجام شد. در طول آزمایش هیچ گونه علائم کمبود عناصر غذایی و آسیب ناشی از آفات و بیماری‌ها مشاهده نشد.

#### تعیین ویژگی‌های فیزیولوژیک و شاخص‌های رشد ذرت

در مطالعه حاضر، داده‌های شدت تعرق (روزانه) به عنوان معیار جذب آب توسط ریشه در نظر گرفته شد و گیاهان رشد کرده در تیمارهای مختلف بیوجار بر اساس شدت تعرق، هدایت روزنه‌ای و شدت فتوسنتز در چرخه‌های تر و خشک شدن خاک مورد مقایسه قرار گرفتند. درصد رطوبت حجمی خاک به روش وزنی برای هر گلدان محاسبه شد و کاهش وزن هر گلدان در دو توزین متوالی نیز به عنوان تلفات آب از طریق تبخیر و تعرق در نظر گرفته شد. داده‌های به دست آمده از آزمون اولیه پیش از کشت نشان داد که استفاده از سنگریزه سطحی به دلیل قطع جریان موئینگی (Zhang et al., 2016) به میزان قابل توجهی تبخیر از سطح خاک را کاهش می‌دهد و بنابراین با چشم‌پوشی از تبخیر سطحی در مقابل بزرگی مقادیر تعرق گیاه، اختلاف وزن گلدان در دو توزین متوالی در فاصله زمانی یک شبانه روز (۲۴ ساعت) به عنوان شدت تعرق روزانه (بر حسب سانتی‌مترمکعب بر روز) در نظر گرفته شد. همچنین، افزایش وزن گلدان ناشی از رشد روزانه گیاه در مقابل کاهش وزن گلدان ناشی از تعرق گیاه نیز ناچیز فرض شد.

ویژگی‌های تبادل گازی برگ شامل هدایت روزنه و شدت فتوسنتز با استفاده از دستگاه لایکور (Li-Cor, LI-6400, Inc., Lincoln, NE, USA) در فاصله زمانی ساعت ۱۰ تا ۱۳ زیر تابش خورشید انجام شدند. سطح محفظه برگ دستگاه (leaf chamber) روی  $6 \text{ cm}^2$  تنظیم و در طول اندازه‌گیری، دمای این محفظه  $35^\circ\text{C}$ ، مقدار  $\text{CO}_2$  مرجع  $350 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$  و تشعشع فعال فتوسنتز  $1100 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  بود. قبل از شروع اندازه‌گیری، آنالیزور مادون قرمز گاز به صورت دستی تنظیم و سطح  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{O}$  مرجع ثابت شدند. بالاترین برگ با سایز مناسب درون محفظه قرار داده شد و پس از سه دقیقه با ثابت شدن سرعت جذب گاز، شدت فتوسنتز و هدایت روزنه ثبت شدند. اندازه‌گیری‌ها برای هر تیمار در مقاطع زمانی شروع و پایان هر چرخه خشک شدن خاک در روزهای ۵۹، ۶۲، ۷۰ و ۷۳ پس از کاشت انجام شد.

سطح برگ به روش غیرتخریبی (Pearce et al. 1975)، و حجم ریشه پس از برداشت و انتقال اجزای گیاهان به آزمایشگاه به روش غوطه‌وری در آب تعیین شدند. وزن خشک اندام هوایی، دانه و ریشه نیز پس از خشک کردن در  $70^\circ\text{C}$  (۷۲ ساعت) تعیین شدند. نسبت وزن خشک دانه به کل اندام هوایی به عنوان شاخص برداشت ( $HI^1$ ) تعیین شد. همچنین، راندمان مصرف آب ( $WUE^2$ ) براساس کل زیست‌توده گیاه و نیز براساس عملکرد دانه از تقسیم وزن خشک کل گیاه و یا وزن خشک دانه بر کل آب مصرف شده در طول دوره (تعرق تجمعی کل دوره) به ترتیب به عنوان راندمان مصرف آب گیاه ( $WUE_{\text{plant}}$ ) و راندمان مصرف آب دانه ( $WUE_{\text{grain}}$ ) تعیین شدند.

#### تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک

۱ - Harvest index

۲ - Water use efficiency

در پایان آزمایش گلدانی، به منظور تعیین منحنی رطوبتی خاک، نمونه‌های دست‌نخورده با استفاده از استوانه‌های فلزی به قطر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر از گلدان‌ها برداشت و پس از اشباع از کف برای تعیین نقاط رطوبتی در مکش‌های ۰، ۲۰، ۶۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر در داخل جعبه شنی (Sand box) قرار داده شدند. در هر مکش، پس از حصول اطمینان از تعادل رطوبتی نمونه‌ها توزین و در پایان آزمایش رطوبت حجمی نمونه‌ها تعیین شد. سایر نقاط رطوبتی در مکش‌های ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر با استفاده از دستگاه صفحات فشاری اندازه‌گیری شدند (Bittelli & Flury 2009). هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک به دلیل محدودیت، فقط برای تیمارهای ۰، ۲، ۳ و ۴ درصد بیوپار با روش مبتنی بر تبخیر سطحی خاک<sup>۱</sup> (Pertassek *et al.* 2015) و با استفاده از دستگاه Hyprop (METER Group) به شرح زیر اندازه‌گیری شد. نمونه خاک دست‌نخورده درون سیلندر ویژه دستگاه به قطر ۸ و ارتفاع ۵ سانتی‌متر اشباع شدند. در شروع آزمایش و به همراه ایجاد جریان تبخیر از سطح نمونه اشباع زمان، پتانسیل ماتریک و رطوبت حجمی نمونه در دو نقطه به فاصله عمودی ۲ سانتی‌متر ثبت شدند. طول دوره اندازه‌گیری برای هر نمونه ۲۰ روز بود. جریان تبخیر<sup>۲</sup> و پتانسیل ماتریک به منظور شبیه‌سازی جریان آب در خاک در حال خشک‌شدن مورد استفاده قرار گرفتند. جریان غیراشباع آب در خاک با حل معادله ریچاردز به روش ایمپلیسیت اولر (Fully implicit Euler time discretization) و تفاضل محدود (Centered finite difference space discretization) در نرم‌افزار متلب (Celia & Binning, 1992) تعیین شد. همچنین، منحنی‌های رطوبتی و هدایت هیدرولیکی نمونه‌ها با استفاده از برازش مدل VG-PDI (Iden & Durner, 2014) بر داده‌ها کمی شدند. شایان ذکر است که در مدل VG-PDI علاوه بر در نظر گرفته شدن سهم موینگی خاک، سهم جذبی در نگهداشت آب خاک (Adsorptive water retention) و سهم غشایی آب در هدایت هیدرولیکی خاک (Film conductivity) نیز لحاظ شده است و به همین جهت نسبت به سایر مدل‌های متداول از اعتبار و دقت بالاتری در کمی‌کردن منحنی‌های رطوبتی و هدایت هیدرولیکی در محدوده مکش‌های ناحیه خشک خاک برخوردار است (Peters, 2013; Durner 2008; Peters, 2013). رابطه (۲) و (۳) شکل‌های بسته مدل VG-PDI (Peters, 2013) را نشان می‌دهند که در پژوهش حاضر به ترتیب برای کمی کردن منحنی رطوبتی و منحنی هدایت هیدرولیکی تیمارهای بیوپار مورد استفاده قرار گرفته است.

$$S^{tot}(h) = wS^{cap}(h) + (1 - w)S^{ad}(h) \quad \text{رابطه ۲}$$

که  $S$  تابع اشباع بر اساس مدل ونگنوختن (van Genuchten, 1980)  $S = \left(\frac{1}{1+(ah)^n}\right)^{1-1/n}$  برای کل منحنی (tot)، و بخش‌های موینگی (cap) و جذبی (ad)،  $w$  فاکتور وزن‌دهی برای بخش‌های موینگی و جذبی است که نشان‌دهنده سهم هر کدام در توصیف داده‌های اندازه‌گیری است و با کمی کردن مدل از طریق برازش بر داده‌ها به دست می‌آید.

$$K^{tot}(S) = K_s^{cap} K_{rel}^{cap}(S^{cap}) + K_s^{film} K_{rel}^{film}(S^{ad}) \quad \text{رابطه ۳}$$

که  $K_{rel}$  هدایت هیدرولیکی نسبی، نسبت هدایت هیدرولیکی خاک به هدایت هیدرولیکی اشباع یعنی  $K_{rel}^{tot} = \frac{K^{tot}}{K_s}$ ،  $K_s^{cap}$  و  $K_s^{film}$  به ترتیب هدایت هیدرولیکی موینگی و غشایی در شرایط اشباع هستند.

به منظور درک بهتر اثر بیوپار بر تحویل آب به ریشه، مقادیر پتانسیل جریان ماتریک (Matric flux potential) برای تیمارهای ۰، ۲، ۳ و ۴ درصد بیوپار محاسبه شد. پتانسیل جریان ماتریک،  $\phi$  ( $\text{cm}^2 \text{d}^{-1}$ ) که همان سطح زیر منحنی هدایت هیدرولیکی خاک است از این جهت که دو متغیر اساسی جذب آب به ریشه (یعنی پتانسیل ماتریک و هدایت هیدرولیکی) را در قالب یک کمیت واحد ( $\phi$ ) بیان می‌کند حائز اهمیت بوده و در مطالعات مدل‌سازی جذب آب به ریشه مورد استفاده قرار گرفته است (de Jong van Lier *et al.*, 2006; Pinheiro *et al.*, 2018; Raats, 1977). مقدار  $\phi$  از رابطه زیر تعیین شد:

$$\phi = \int_{h_{Ref}}^h K_h d(h) \quad \text{رابطه ۴}$$

که  $K_h$  هدایت هیدرولیکی غیراشباع،  $h$  و  $h_{Ref}$  نیز مکش در یک نقطه دلخواه تا مکش در نقطه مرجعی مانند نقطه پژمردگی دائم (PWP) در نظر گرفته می‌شود. در پژوهش حاضر مقدار  $\phi$  از انتگرال  $K_h$  ( $\text{cm d}^{-1}$ ) در محدوده مکش ماتریک ۱۰۰ تا ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر برای تیمارهای یادشده بالا محاسبه شد.

### تجزیه و تحلیل‌های آماری

تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 (SAS Institute, 2014)، انجام شد. قبل از انجام تجزیه واریانس، از نرمال بودن

1 - Evaporative method

۲ - Evaporation flux

توزیع باقیمانده‌ها با استفاده از رویه UNIVARIATE و همگن بودن واریانس‌ها اطمینان حاصل شد. تجزیه واریانس داده‌های آزمایش برای تعیین معنی‌داری اثرهای اصلی و متقابل با استفاده از رویه مدل خطی عمومی (GLM) انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از روش حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) و آزمون Z انجام شد. در صورت معنی‌دار شدن اثرات متقابل، مقایسه میانگین بر پایه روش برش‌دهی فیزیکی انجام شد. برای محاسبه ضرایب همبستگی پیرسون بین صفات مختلف از رویه (CORR) استفاده شد.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوجار مورد مطالعه

BD	SD	MWD	D <sub>50</sub>	pH	EC	Ash	C <sub>t</sub>	H	N	O	S	H/C <sub>org</sub>	SSA
g cm <sup>-3</sup>	mm	mm			dS m <sup>-1</sup>			%				mol mol <sup>-1</sup>	m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>
۰/۳۱	۱/۸۹	۰/۲۷	۰/۲۱	۹/۷	۱/۱۲	۸/۴۲	۷۸/۶	۲/۵۷	۱/۲۳	۹/۱	۰/۰۵	۰/۴	۱۴/۸۸

BD و SD به ترتیب جرم ویژه ظاهری و حقیقی، MWD میانگین قطر و D<sub>50</sub> قطر میانه ذرات با روش Dane & Top 2002، pH واکنش خاک و EC هدایت الکتریکی در عصاره ۱:۲۰ بیوجار و آب. C<sub>t</sub> و C<sub>org</sub> کربن کل (درصد) و کربن ناپایدار (مول). Ash درصد خاکستر اندازه‌گیری شده براساس روش استاندارد IBI. هیدروژن (H)، نیتروژن (N)، اکسیژن (O) و گوگرد (S) اندازه‌گیری شده به وسیله دستگاه (CNS analyzer (Vario TOC cube, Elementar, Germany)، نسبت مولی هیدروژن به کربن (شاخص آروماتیکی)، SSA سطح ویژه اندازه‌گیری شده به روش BET.

جدول ۲. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

شن	سیلت	رس	MWD	D50	pH	EC <sub>e</sub>	OC	CCE	N	P	K
	%		mm			dS m <sup>-1</sup>		%		mg kg <sup>-1</sup>	
۵۹/۷	۳۳/۵	۶/۸	۰/۸۳	۰/۳۰	۷/۵۸	۰/۵۶	۰/۲۶	۴/۲۵	۳۱۰	۶/۱۰	۲۳۸

OC و CCE به ترتیب درصد کربن آلی و کربنات کلسیم معادل، نیتروژن کل (N)، فسفر قابل جذب (P) و پتاسیم قابل جذب (K). کلیه آزمون‌های خاک براساس Sparks et al., 1996 اندازه‌گیری شد.

جدول ۳. برخی از ویژگی‌های هیدرولیکی تیمارهای ۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد بیوجار

WHC(100-15000)	θ <sub>s</sub>	θ <sub>PWP</sub>	θ <sub>FC</sub>	h <sub>FC</sub>	مقدار کاربرد بیوجار
	(cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )			cm	(درصد وزنی)
۰/۱۸۷ <sup>c</sup>	۰/۴۵۴	۰/۱۱۳	۰/۲۹۵	۱۰۶	۰
۰/۱۹۶ <sup>bc</sup>	۰/۴۶۴	۰/۱۱۳	۰/۳۰	۱۰۹	۰/۵
۰/۲۰۲ <sup>b</sup>	۰/۴۶۷	۰/۱۱۴	۰/۲۹۸	۱۳۹	۱
۰/۲۱۷ <sup>b</sup>	۰/۴۶۸	۰/۱۱۱	۰/۲۹۷	۱۵۷	۲
۰/۲۲۳ <sup>ab</sup>	۰/۴۷۸	۰/۱۱۴	۰/۲۹۸	۱۷۴	۳
۰/۲۳۸ <sup>a</sup>	۰/۴۷۳	۰/۱۱۴	۰/۲۹۵	۲۴۲	۴
۰/۲۵۱ <sup>a</sup>	۰/۴۸۸	۰/۱۱۵	۰/۲۹۹	۲۵۷	۵

h<sub>FC</sub>، θ<sub>FC</sub>، θ<sub>PWP</sub>، WHC(100-15000) و KS به ترتیب مکش ماتریک ظرفیت مزرعه (Assouline & Or 2014)، رطوبت خاک در h<sub>FC</sub> رطوبت اشباع، رطوبت نقطه پژمردگی، ظرفیت نگهداشت آب بین مکش‌های ۱۰۰ تا ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر و هدایت هیدرولیکی اشباع در تیمارها هستند. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون Z است.

## نتایج و بحث

شرایط رطوبتی خاک و آب مصرفی گیاه

نتایج اندازه‌گیری رطوبت گلدان‌ها در شرایط کم‌آبایی اعمال شده نشان داد که در هر چرخه تر و خشک شدن، رطوبت خاک تیمارهای I1 و I2 در بازه ۰/۳۰ cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> (±۰/۰۱SD, n=۲۱) تا ۰/۱۸ cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> (±۰/۰۲SD, n=۲۱) و برای I3 در بازه ۰/۱۸ cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> (±۰/۰۱SD, n=۲۱) و ۰/۳۰ cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> (±۰/۰۲SD, n=۲۱) و ۰/۳۰ cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> (±۰/۰۲SD, n=۲۱) متغیر بود. در طول آزمایش، فواصل آبیاری‌ها در تیمارهای I1 و I2 بسته به سن



نهال، دوره رشد و شرایط اقلیمی گلخانه بین ۲ تا ۶ روز متغیر بود. نتایج تجزیه واریانس داده‌های آب مصرفی گیاه (مجموع مقادیر تعرق روزانه گیاه در کل فصل کشت) نشان داد که اثرات اصلی بیوپچار و آبیاری و نیز اثرات متقابل آنها بر مقدار آب مصرفی گیاه معنی‌دار ( $p < 0.01$ ) بود (جدول تجزیه واریانس ارائه نشده). همچنین، با افزایش مقدار کاربرد بیوپچار، آب مصرفی گیاه در همه تیمارها (I1، I2 و I3) به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل نشان داده نشده).

#### اثر بیوپچار بر ویژگی‌های فیزیولوژیک گیاه

در شکل ۱ تغییرات رطوبت خاک و شدت تعرق گیاه در طول چرخه‌های تر و خشک شدن خاک برای هر یک از تیمارهای آبیاری I1 (شکل ۱. الف، ب)، I2 (شکل ۱. د، ه) و I3 (شکل ۱. ز، ح) نشان داده شده است. به منظور بررسی اثر بیوپچار و تیمارهای آبیاری بر شدت تعرق، در این‌جا یک مقطع زمانی هشت روزه، حداقل روزهای ۶۲ (اواخر مرحله رویشی) و ۷۰ (اوایل مرحله زایشی) پس از کاشت به عنوان نمونه مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که طبق برنامه آبیاری، رطوبت خاک برای تیمار I1 در روزهای ۶۲ و ۷۰ پس از کاشت، به ترتیب در کم‌ترین ( $0.18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) و بیش‌ترین ( $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) حد دامنه، و برای تیمار I2 برعکس، یعنی در روزهای ۶۲ و ۷۰ پس از کاشت، رطوبت خاک به ترتیب در بیش‌ترین ( $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) و کم‌ترین ( $0.18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) حد دامنه قرار داشت. بر این اساس نتایج نشان داد که با افزایش رطوبت خاک در تیمار I1 (شکل ۱. ب)، شدت تعرق از  $185 \text{ cm}^3 \text{ d}^{-1}$  ( $\pm 19 \text{SD}$ ,  $n=21$ ) در روز ۶۲ به  $551 \text{ cm}^3 \text{ d}^{-1}$  ( $40 \text{SD}$ ,  $n=21$ ) در روز ۷۰ افزایش یافت و با کاهش رطوبت خاک در تیمار I2 (شکل ۱. ه)، شدت تعرق از  $n=21$   $62 \text{ cm}^3 \text{ d}^{-1}$  ( $\pm 45 \text{SD}$ ,  $n=21$ ) در روز ۶۲ به  $84 \text{ cm}^3 \text{ d}^{-1}$  ( $\pm 24 \text{SD}$ ,  $n=21$ ) در روز ۷۰ کاهش یافت. بنابراین، ضمن آن که شدت تعرق تابعی از تغییرات رطوبت خاک بود، مقایسه تیمارهای I1 و I2 نیز نشان داد که به ازای تغییر یکسان مقدار رطوبت خاک، دامنه تغییرات شدت تعرق (پاسخ گیاه) در تیمار I2 بیش‌تر از I1 بود (یعنی  $567$  در مقابل  $366$  سانتیمترمکعب در روز). افت شدید شدت تعرق در I2 می‌تواند به حساسیت بالای دوره زایشی ذرت به تنش خشکی و در نتیجه پاسخ متقابل گیاه به صورت تنظیم هدایت روزنه‌ای به منظور حفظ پتانسیل آب برگ نسبت داده شود (Steynberg *et al.*, 1989; Benesova *et al.*, 2012; Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2016). زیست‌توده تولید شده بیش‌تر در مرحله رویشی و در نتیجه نیاز تعرقی بالاتر گیاهان تیمار I2 (به دلیل آبیاری کافی در مرحله رویشی) نیز می‌تواند از دلایل افت زیاد شدت تعرق گیاه در مواجهه با اولین چرخه خشک‌شدن خاک پس از ظهور گل‌های نر باشد (شکل ۱. ه). برای تیمار I3 که دامنه تغییرات رطوبت خاک در فواصل آبیاری‌های روزانه به‌طور متوسط بین  $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  و  $0.24 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  بود (شکل ۱. ز)، به دلیل نوسانات کم‌تر و در نتیجه میانگین رطوبت خاک بیش‌تر، شدت تعرق گیاهان در مقایسه با دو تیمار آبیاری I1 و I2 بالاتر بود (شکل ۱. ح). در شکل ۱ اثر مقادیر مختلف بیوپچار بر شدت تعرق گیاهان در طول اولین چرخه خشک‌شدن خاک (به‌طور نمونه برای سه رطوبت خاک مختلف) در هر یک از تیمارهای I1 (شکل ۱. ج)، I2 (شکل ۱. و) و I3 (شکل ۱. ط) نشان داده شده است. گیاهان رشد کرده در خاک حاوی ۴ درصد بیوپچار در تیمار I1، با  $194 \text{ cm}^3 \text{ d}^{-1}$ ،  $284 \text{ cm}^3 \text{ d}^{-1}$  و  $418 \text{ cm}^3 \text{ d}^{-1}$  بیش‌ترین و در خاک شاهد با  $107 \text{ cm}^3 \text{ d}^{-1}$ ،  $141$  و  $280 \text{ cm}^3 \text{ d}^{-1}$  کم‌ترین شدت تعرق را به ترتیب در رطوبت‌های  $0.18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ،  $0.20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  و  $0.23 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  داشتند (شکل ۱. ج). همین‌طور گیاهان رشد کرده در خاک حاوی ۴ درصد بیوپچار در تیمار آبیاری I2 نیز با  $151 \text{ cm}^3 \text{ d}^{-1}$ ،  $295 \text{ cm}^3 \text{ d}^{-1}$  و  $521 \text{ d}^{-1}$  بیش‌ترین و در خاک شاهد با  $46 \text{ cm}^3 \text{ d}^{-1}$ ،  $99 \text{ cm}^3 \text{ d}^{-1}$  و  $323 \text{ cm}^3 \text{ d}^{-1}$  کم‌ترین شدت تعرق را به ترتیب در رطوبت‌های  $0.18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ،  $0.20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  و  $0.23 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  داشتند (شکل ۱. و). به عبارت دیگر، افزودن ۴ درصد بیوپچار به خاک، منجر به افزایش ۸۱، ۱۰۰ و ۴۹ درصد شدت تعرق در I1 و افزایش ۲۲۸، ۱۹۸ و ۶۱ درصد شدت تعرق در I2 به ترتیب در سه رطوبت مورد مقایسه شد. این افزایش شدت تعرق در سایر چرخه‌های خشکی خاک نیز مشاهده شد که نشان می‌دهد افزودن بیوپچار به خاک تأثیر مثبتی بر بهبود وضعیت آب گیاه ذرت در شرایط تنش خشکی داشته و نتایج این تأثیر به‌ویژه در اولین چرخه خشکی خاک، برای گیاهان تحت تنش خشکی مرحله زایشی چشمگیرتر از رویشی بوده است. در تیمار I3 نیز شدت تعرق تحت تأثیر افزودن بیوپچار به خاک، افزایش یافت اما میزان این افزایش کم‌تر از دو تیمار I1 و I2 بود (شکل ۱. ط). این تأثیرپذیری کم‌تر شدت تعرق روزانه از بیوپچار در تیمار I3 می‌تواند به رطوبت کافی خاک (میانگین بالاتر رطوبت) در طول دوره رشد نسبت داده شود. علاوه بر این، در تیمار I3 (شکل ۱. ط) برخلاف I1 و I2 (شکل‌های ۱. ج و ۱. و)، مشاهده می‌شود که با کاهش میانگین روزانه رطوبت طی یک چرخه خشکی خاک، شدت تعرق افزایش یافته است. با توجه به آبیاری کافی گیاهان در I3، به نظر می‌رسد نوسانات روزانه رطوبت خاک در این تیمار، محدودکننده شدت تعرق نبوده و تغییرات شدت تعرق روزانه، عمدتاً تحت تأثیر عوامل اقلیمی گلخانه (مانند تغییرات دما، شدت تابش خورشید و رطوبت نسبی هوا) است. به عبارت دیگر در تیمار I3، تقاضای تعرقی عامل اصلی کنترل‌کننده شدت تعرق بوده است، در حالی که در دو تیمار تحت تنش خشکی (I1 و I2)، که کمبود رطوبت

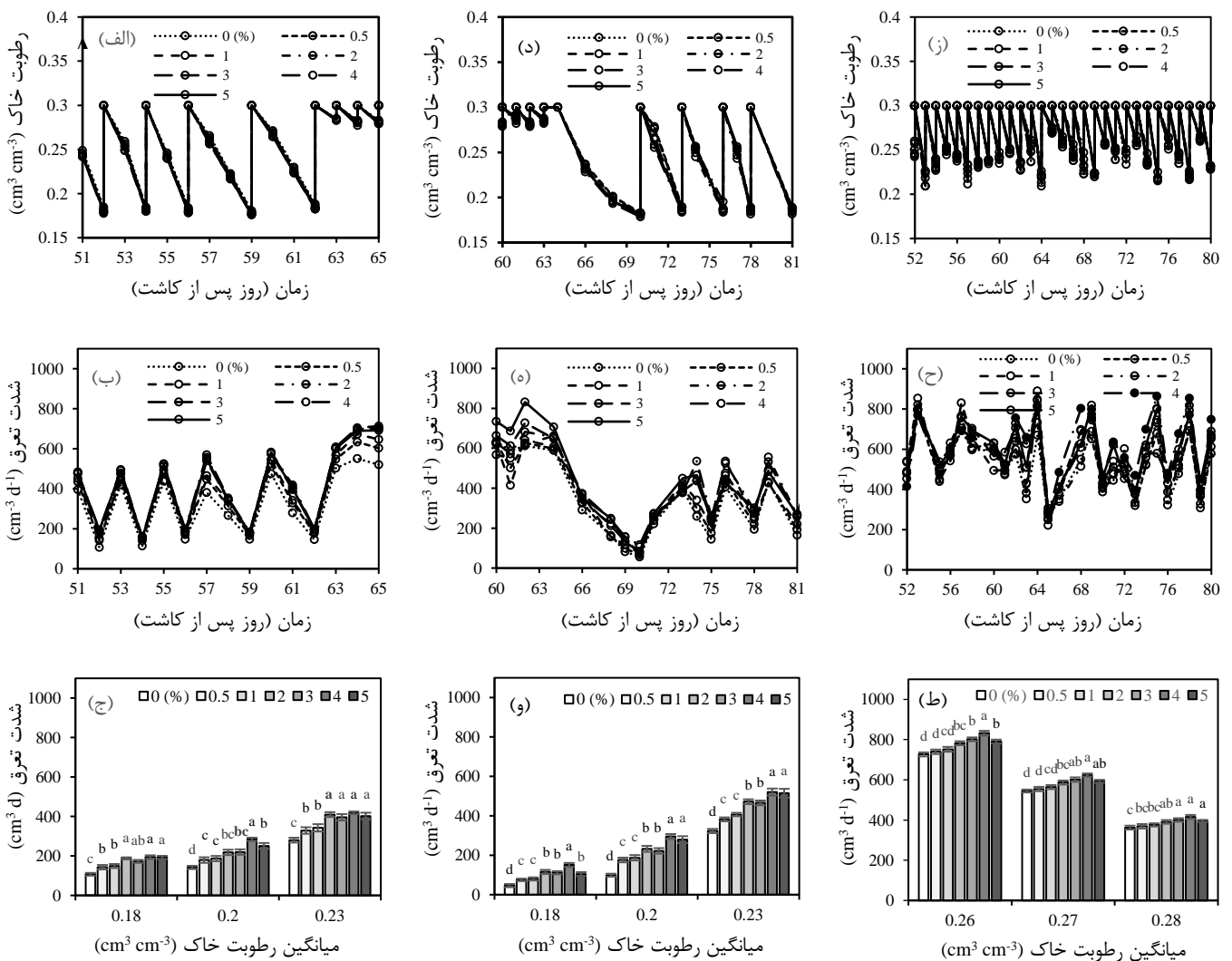


خاک به عنوان یک عامل محدودکننده، کنترل کننده شدت تعرق گیاهان بوده است، کاهش میانگین رطوبت روزانه در یک چرخه خشکی خاک، باعث کاهش شدت تعرق خواهد شد (قانون حداقل لیبیک). در مجموع، یافته‌های این آزمایش نشان می‌دهند که در هر سه تیمار آبیاری، با خشک شدن خاک، برای هر رطوبت معین، شدت تعرق گیاهان در تیمارهای حاوی بیوپچار به طور معنی داری بیش تر از خاک شاهد بود که نشان دهنده تعدیل اثر تنش خشکی و بهبود وضعیت آب در گیاه در نتیجه افزودن بیوپچار به خاک است. همچنین، میزان (بزرگی) اثر مثبت بیوپچار بر شدت تعرق عمدتاً تابع دو عامل زمان اعمال تنش خشکی (مرحله رشدی گیاه) و شدت تنش اعمال شده بود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی بیوپچار و آبیاری و نیز اثر متقابل بیوپچار در آبیاری بر هدایت روزانه معنی دار ( $p < 0.01$ ) بود (جدول تجزیه واریانس ارائه نشده)، بنابراین، تیمار آبیاری در پاسخ گیاه (باز و بسته شدن روزنه‌ها) به مقادیر مختلف بیوپچار موثر بود. شکل ۲ تغییرات هدایت روزانه و شدت فتوسنتز در تیمارهای آبیاری I1، I2، I3 را به عنوان تابعی از مقادیر مختلف بیوپچار، به عنوان نمونه برای زمان‌های ۶۲ و ۷۰ پس از کاشت نشان می‌دهد. مقادیر هدایت روزانه در روز ۶۲ پس از کاشت برای تیمارهای I1، I2 و I3 به ترتیب  $0.15 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ( $\pm 0.04 \text{SD}$ ,  $n=21$ )،  $0.27 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ( $\pm 0.03 \text{SD}$ ,  $n=21$ ) و  $0.27 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ( $\pm 0.04 \text{SD}$ ,  $n=21$ ) و در روز ۷۰ پس از کاشت به ترتیب  $0.33 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ( $\pm 0.06 \text{SD}$ ,  $n=21$ )،  $0.11 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ( $\pm 0.04 \text{SD}$ ,  $n=21$ ) و  $0.42 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ( $\pm 0.04 \text{SD}$ ,  $n=21$ ) بود (شکل ۲. الف، ب). این نتیجه را می‌توان به میانگین رطوبت خاک پایین تر تیمارهای I1 و I2 به ترتیب در روزهای ۶۲ و ۷۰ و نیز زیست توده کم تر گیاهان تیمار I1 که در مرحله رویشی در معرض چرخه‌های خشکی خاک قرار داشتند، نسبت داد. با افزایش رطوبت خاک از  $0.18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (در روز ۶۲) به  $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (در روز ۷۰)، متوسط هدایت روزانه‌ای گیاهان در تیمار I1، ۱۲۰ درصد افزایش و با کاهش رطوبت در محدوده رطوبتی یادشده (از روز ۶۲ به ۷۰)، در تیمار I2، ۱۴۵ درصد کاهش یافت (شکل ۲. الف، ب). در رطوبت خاک  $0.18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (در روز ۶۲ برای تیمار I1) با افزایش مقدار کاربرد بیوپچار، هدایت روزانه‌ای گیاهان از  $0.08 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ( $\pm 0.04 \text{SD}$ ,  $n=3$ ) در خاک شاهد به حداکثر  $0.20 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ( $\pm 0.04 \text{SD}$ ,  $n=3$ ) در خاک حاوی ۴ درصد بیوپچار به طور پیوسته‌ای افزایش یافت (شکل ۲. الف). روند افزایشی مشابهی برای تیمار I2 با افزایش مقدار کاربرد بیوپچار مشاهده شد (شکل ۲. ب)، به طوری که گیاهان رشد کرده در خاک حاوی ۴ درصد بیوپچار با  $0.16 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ( $\pm 0.01 \text{SD}$ ,  $n=3$ ) بیش ترین و گیاهان خاک شاهد با  $0.03 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ( $\pm 0.02 \text{SD}$ ,  $n=3$ ) کم ترین هدایت روزانه را داشتند. در شکل ۲ (ج، د) تغییرات شدت فتوسنتز به عنوان تابعی از مقادیر بیوپچار نشان داده شده است. با توجه به این که روند تغییرات شدت فتوسنتز در تیمارهای آبیاری، مشابه هدایت روزانه‌ای بود، در این جا از ارائه نتایج مربوط به شدت فتوسنتز صرف نظر شده است. در مجموع، نتایج این آزمایش نیز نشان داد که هدایت روزانه‌ای و شدت فتوسنتز در شرایط تنش خشکی تابعی از مقدار رطوبت خاک بوده و همواره برای هر رطوبت خاک معین، افزودن بیوپچار به خاک، هدایت روزانه‌ای و شدت فتوسنتز گیاهان تحت تنش خشکی را افزایش داد. این نتیجه مانند نتایج شدت تعرق می‌تواند مؤید افزایش جذب آب توسط ریشه و بهبود توازن آب در گیاه تحت تأثیر کاربرد بیوپچار در خاک باشد. Gavili et al., 2019 اثر سطوح مختلف بیوپچار کود گاوی (۰، ۱/۲۵، ۲/۵ و ۵ درصد حجمی) و سطوح کم آبیاری ۷۰ و ۵۵ درصد FC را بر کارایی مصرف آب و عملکرد سویا بررسی کردند و نشان دادند که فقط مقدار ۱/۲۵ درصد بیوپچار سبب بهبود کارایی مصرف آب و عملکرد سویا شد و سایر سطوح بی اثر یا اثر منفی بر صفات یادشده داشتند. را در شرایط آبیاری از آنجا که شدت تعرق، هدایت روزانه و شدت فتوسنتز، پارامترهای فیزیولوژیک مرتبط به هم و همگی متأثر از قابلیت دسترسی رطوبت خاک هستند (Havranek & Benecke, 1978; Xiao et al. 2011; Hayat et al. 2020)، نتایج به دست آمده مبنی بر اثر مثبت بیوپچار بر پارامترهای فیزیولوژیک گیاه در شرایط تنش خشکی می‌تواند مطرح کننده بهبود توانایی خاک تیمار شده با بیوپچار در افزایش قابلیت دسترسی ریشه به رطوبت خاک باشد.

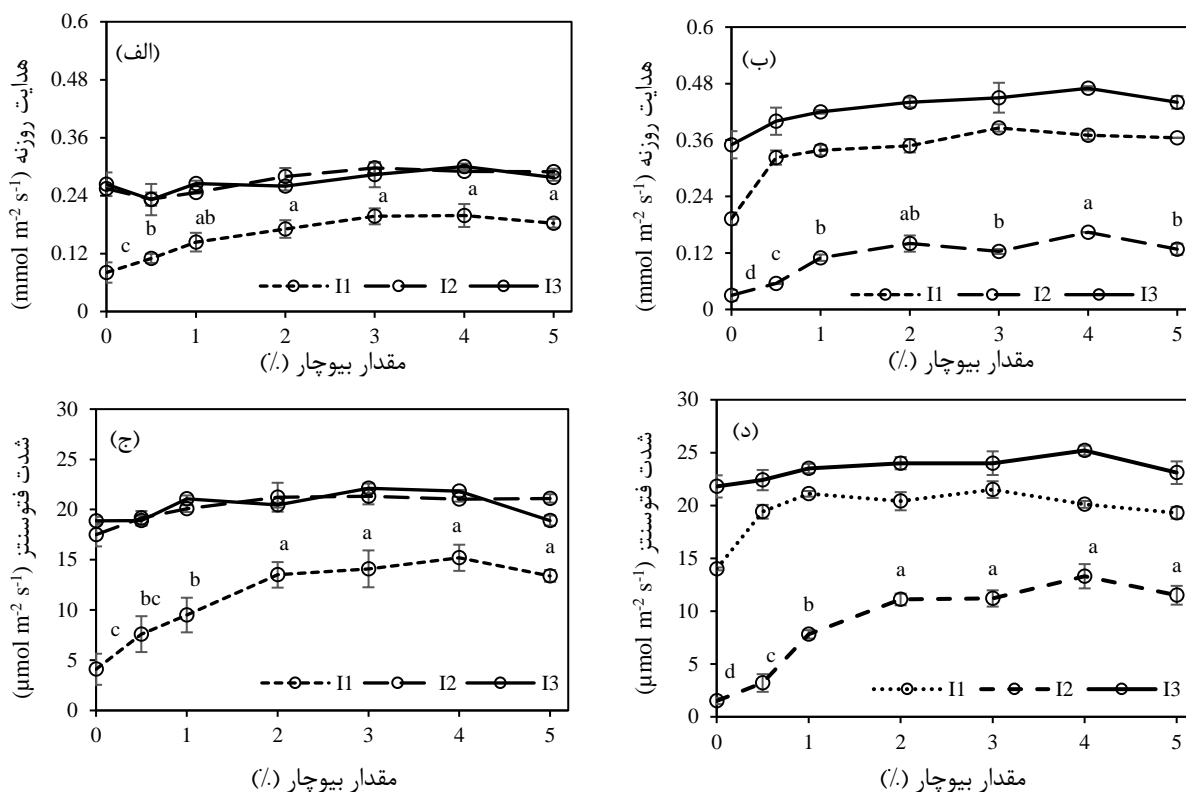
#### اثر بیوپچار بر زیست توده گیاهی و کارایی مصرف آب

نتایج نشان داد با افزایش بیوپچار در تیمار I1، سطح برگ و حجم ریشه افزایش یافت (شکل ۳. الف، ب). در این تیمار آبیاری، با افزایش مقدار کاربرد بیوپچار، سطح برگ و حجم ریشه به ترتیب از  $326.06 \text{ cm}^2$  ( $\pm 3786 \text{SD}$ ,  $n=3$ ) و  $132 \text{ cm}^3$  ( $\pm 2/89 \text{SD}$ ,  $n=3$ ) در خاک شاهد به حداکثر  $49728 \text{ cm}^2$  ( $\pm 1772 \text{SD}$ ,  $n=3$ ) و  $175 \text{ cm}^3$  ( $\pm 2/25 \text{SD}$ ,  $n=3$ ) در خاک حاوی ۴ درصد بیوپچار افزایش یافت، در حالی که در تیمارهای I2 و I3 تغییرات سطح برگ و حجم ریشه در مقادیر مختلف بیوپچار معنی دار نبود (شکل نشان داده نشده). شکل ۴ مقادیر شاخص برداشت (HI) اندازه گیری شده بر اساس وزن دانه و اندام هوایی را نشان می‌دهد. برای تیمار I1، مقدار شاخص برداشت در خاک‌های حاوی ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵، به ترتیب ۱۹، ۲۵، ۴۲، ۴۰، ۲۶ و ۵۵ درصد بیش تر از خاک شاهد بود. برای تیمار I2، مقدار شاخص برداشت در خاک‌های حاوی ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ به ترتیب ۲۰، ۲۷، ۳۱، ۸۶، ۷۰ و ۶۶ درصد بیش تر از خاک شاهد بود و در I3 نیز خاک‌های حاوی

۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد بیوجار به ترتیب ۵۳، ۶۵، ۷۰، ۷۶، ۶۵ و ۴۸ درصد بیش تر از خاک شاهد بود. انتقال مجدد آسیمیلاتها<sup>۱</sup> از برگها و ساقه به دانه که معمولا در شرایط تنش خشکی چند هفته پس از گل دهی آغاز می شود، می تواند سبب افزایش نسبت وزن دانه به اندام هوایی می شود (Plaut et al. 2004; Hutsch et al. 2017). با این حال نتایج پژوهش حاضر نشان می دهد که کاربرد بیوجار در خاک، اثر تنش خشکی در افزایش شاخص برداشت ذرت را تشدید نمود. بطور کلی، پژوهش های بسیار کمی در مورد اثر بیوجار بر بخش بندی وزن خشک در اندام های گیاه و انتقال مجدد آسیمیلاتها انجام شده است (Sun et al., 2019). با توجه به اهمیت اقتصادی دانه در تولیدات گیاهی و اطلاعات کم موجود در مورد چگونگی اثر بیوجار بر عملکرد گیاه در شرایط خشکی خاک، لزوم انجام تحقیقات بیش تر مبتنی بر بررسی مکانیسم تأثیر بیوجار بر جابجایی و انتقال مواد سنتز شده به دانه وجود دارد.



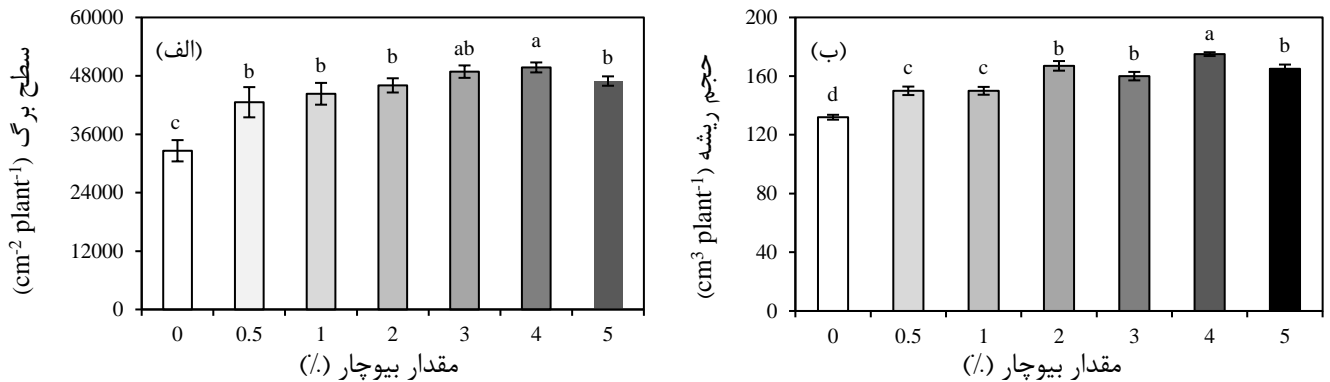
شکل ۱. نیمرخ زمانی رطوبت حجمی خاک و شدت تعرق گیاهان رشد کرده در خاک های تیمار شده با مقادیر ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴، و ۵ درصد بیوجار در تیمارهای آبیاری ۱، ۲ و ۳ (n=۳): تغییرات رطوبت خاک و شدت تعرق در طول چرخه های تر و خشک شدن خاک برای II در روزهای ۵۱ تا ۶۵ (الف، ب)، برای I2 در روزهای ۶۰ تا ۸۱ (د، ه) و برای I3 در روزهای ۵۲ تا ۸۰ پس از کاشت (ز، ح). اثر مقادیر مختلف بیوجار بر شدت تعرق در طول یک چرخه خشک شدن خاک: برای I1 و I2 مقایسه در رطوبت های ۰/۱۸، ۰/۲ و ۰/۲۳ سانتی متر مکعب بر سانتی متر مکعب (ج، و)، و برای I3 در رطوبت های ۰/۲۶، ۰/۲۷ و ۰/۲۸ سانتی متر مکعب بر سانتی متر مکعب. حروف مشترک نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون z است. میله های عمودی نشان دهنده خطای معیار هستند.



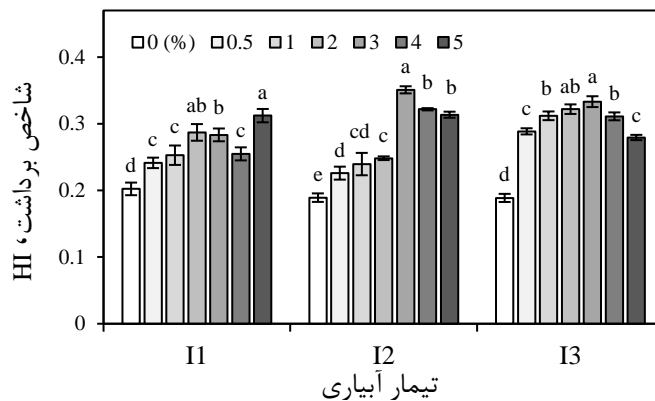
شکل ۲. تغییرات هدایت روزانه و شدت فتوسنتز به عنوان تابعی از مقدار بیوپچار (۰، ۱/۵، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد بیوپچار) (n=۳): در مرحله رویشی یعنی در روز ۶۲ پس از کاشت (الف، ج)، بلافاصله پس از ظهور گل‌های نر یعنی در روز ۷۰ پس از کاشت (ب، د). حروف مشترک نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون z است. میله‌های عمودی نشان‌دهنده خطای معیار هستند.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی بیوپچار و آبیاری و همچنین اثرات متقابل آن‌ها بر کارایی مصرف آب معنی‌دار بود (جدول تجزیه واریانس ارائه نشده). شکل ۵ (الف، ب) اثر مقادیر مختلف بیوپچار بر کارایی مصرف آب ( $WUE_{plant}$  و  $WUE_{grain}$ ) را نشان می‌دهد. برای تیمار آبیاری I1، مقدار  $WUE_{plant}$  در خاک‌های حاوی بیوپچار بطور متوسط ۵ درصد بیش‌تر از خاک شاهد بود اما تفاوت معنی‌داری بین خاک‌های حاوی بیوپچار در این آبیاری مشاهده نشد (شکل ۵. الف). برای تیمار آبیاری I2، کاربرد بیوپچار تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر  $WUE_{plant}$  نداشت. در این تیمار آبیاری، با افزایش بیوپچار از ۰ به ۲ درصد، مقدار  $WUE_{plant}$  اندکی افزایش (حدود ۴ درصد) و در مقادیر بالاتر بیوپچار، تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۵. الف). این نتیجه می‌تواند ناشی از اثرات منفی شدید تنش خشکی اعمال شده در دوره زایشی بر عملکرد خشک اندام هوایی گیاه باشد. به نظر می‌رسد، از یک سو، تقاضای تعرقی بالای گیاهان تیمار I2 (به دلیل سطح برگ و زیست‌توده بیش‌تر تولید شده در مرحله رویشی) و از سوی دیگر کمبود رطوبت خاک در چرخه‌های خشکی خاک در مرحله زایشی گیاه، توازن آب در گیاهان تیمار I2 را بیش از تیمار I1 متاثر کرده باشد. در تیمار I3، افزایش بیوپچار اثر منفی روی  $WUE_{plant}$  داشت، به طوری که مقدار  $WUE_{plant}$  از  $4/82 g L^{-1}$  ( $\pm 0/07SD$ , n=۳) در خاک شاهد به  $4/22 g L^{-1}$  ( $\pm 0/09SD$ , n=۳) در خاک حاوی ۵ درصد بیوپچار کاهش معنی‌داری یافت (شکل ۵. الف). به نظر می‌رسد که در شرایط رطوبت کافی خاک (آبیاری روزانه، I3)، اگرچه با افزایش مقدار بیوپچار، تعرق تجمعی افزایش یافته است (نتایج نشان داده نشده)، با این حال مقدار زیست‌توده خشک تولید شده، متناسب با افزایش مقدار تعرق تجمعی افزایش پیدا نکرده است. نتایج مقایسه تیمارهای بیوپچار از نظر  $WUE_{grain}$  برای هر دو تیمار I1 و I2 یک روند افزایشی را با افزایش بیوپچار نشان داد، در حالی که برای تیمار I3، مقدار  $WUE_{grain}$  با افزایش بیوپچار ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت (شکل ۵. ب). خاک شاهد و خاک حاوی ۵ درصد بیوپچار به ترتیب با  $0/86 g L^{-1}$  ( $\pm 0/07SD$ , n=۳) و  $1/39 g L^{-1}$  ( $\pm 0/06SD$ , n=۳) کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار  $WUE_{grain}$  را در تیمار I1 داشتند (معادل ۶۲ درصد افزایش) (شکل ۵. ب). خاک شاهد و خاک حاوی ۳ درصد بیوپچار به ترتیب با  $0/72 g L^{-1}$  ( $\pm 0/07SD$ , n=۳) و  $1/29 g L^{-1}$  ( $\pm 0/07SD$ , n=۳) کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار  $WUE_{grain}$  را در تیمار I2 داشتند (معادل ۷۹ درصد افزایش) (شکل ۵. ب). برای تیمار آبیاری I3، مقدار  $WUE_{grain}$  با افزایش بیوپچار ابتدا با شیب تندی تا خاک حاوی ۳ درصد بیوپچار افزایش و پس از آن با افزایش بیوپچار با شیب ملایم‌تری کاهش یافت. در این تیمار آبیاری خاک شاهد با  $0/79 g L^{-1}$  ( $\pm 0/07SD$ , n=۳) و

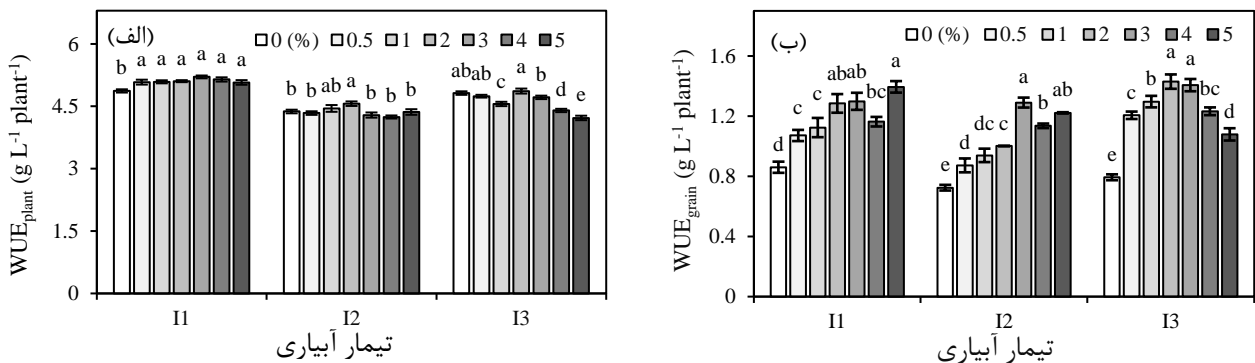
خاک‌های ۲ و ۳ درصد بیوپچار مشترکاً با میانگین  $۱/۴۲\text{gL}^{-1}$  ( $\pm 0/07\text{SD}$ ,  $n=3$ ) به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار  $\text{WUE}_{\text{grain}}$  را داشتند (معادل ۸۱ درصد افزایش) (شکل ۵. ب). در مجموع، در هر سه تیمار آبیاری راندمان مصرف آب دانه تحت‌تأثیر کاربرد بیوپچار افزایش یافت. Zhang *et al.*, 2020 گزارش کردند که تنش خشکی و مصرف بیوپچار کاه گندم در یک آزمایش گلدانی سبب افزایش به ترتیب ۲۷/۵ و ۱۵/۶ درصد کارایی مصرف آب دانه سویا شد. Batool *et al.*, 2015 نیز در یک آزمایش گلخانه‌ای اثر مثبت افزودن بیوپچار چوب شاه‌پسند و گچ بر افزایش کارایی مصرف آب گیاه بامیه تحت تنش خشکی را مشاهده نمودند. اثر مثبت بیوپچار بر افزایش کارایی مصرف آب به وسیله محققین دیگری نیز گزارش شده است (Yeboah *et al.*, 2016; Fischer *et al.*, 2019; Gavili *et al.*, 2019; Baiamonte *et al.*, 2020).



شکل ۳. اثر مقادیر ۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد بیوپچار بر سطح برگ (الف) و حجم ریشه (ب) برای تیمار آبیاری I1 (n=3). حروف مشترک نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون z است. میله‌های عمودی نشان‌دهنده خطای معیار هستند.



شکل ۴. اثر مقادیر ۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد بیوپچار بر شاخص برداشت (HI). حروف مشترک نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است. میله‌های عمودی نشان‌دهنده خطای معیار هستند.



شکل ۵. اثر مقادیر ۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد بیوپچار بر کارایی مصرف آب گیاه (WUE<sub>plant</sub>) (الف) و دانه (WUE<sub>grain</sub>) (ب)، در هر یک از تیمارهای آبیاری I1، I2 و I3 (n=3). تغییرات وزن خشک اندام هوایی تولید شده به عنوان تابعی از کل آب مصرفی گیاه (ج). حروف مشترک نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون z است. میله‌های عمودی نشان‌دهنده خطای معیار هستند.

### اثر بیوجار بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک

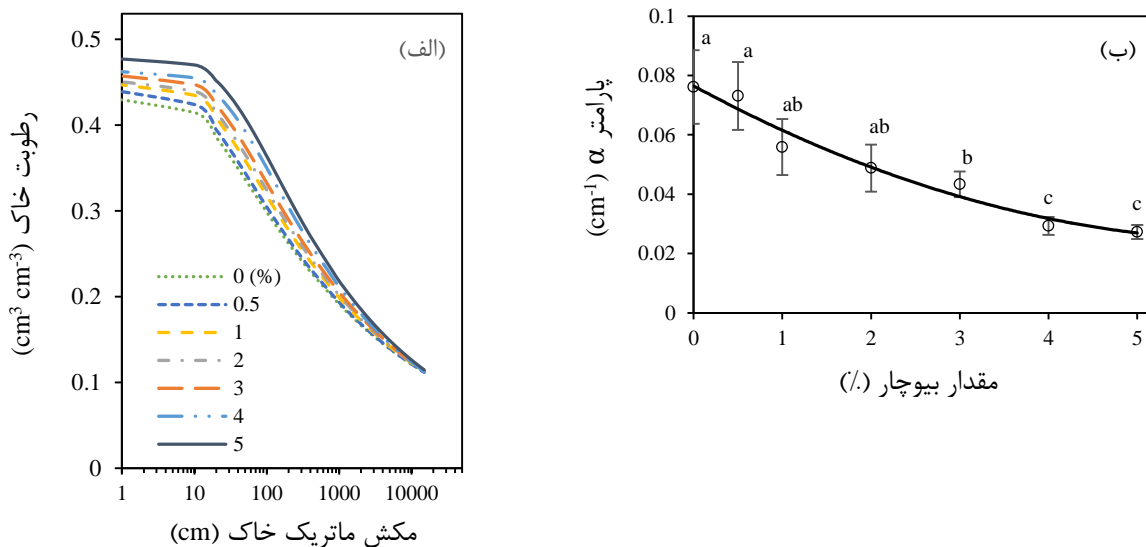
نتایج نشان داد که نگهداشت آب در محدوده مکش‌های ماتریک بین ۱۰۰ و ۳۰۰۰ سانتی‌متر در تیمارهای حاوی بیوجار به‌طور متوسط  $(n=18)$   $0.25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  بیش‌تر از خاک شاهد بود، درحالی‌که در مکش‌های بالاتر در محدوده ۳۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر هیچ تفاوت معنی‌داری بین تیمارها از لحاظ مقدار نگهداشت آب مشاهده نشد و در مکش‌های ماتریک نزدیک به PWP (۱۵۰۰۰ سانتی‌متر) منحنی رطوبتی همه تیمارها بر هم منطبق بودند (شکل ۶. الف). در مجموع، مقدار نگهداشت آب در محدوده مکش‌های بین ۱۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر در تیمارهای حاوی بیوجار به‌طور متوسط  $(n=18)$   $0.34 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  بیش‌تر از خاک شاهد بود (جدول ۳). بنابراین، بیوجار مورد استفاده تنها در محدوده خیس (تا مرطوب) منحنی رطوبتی، نگهداشت آب را افزایش داد و اثر مثبت معنی‌داری بر محدوده خشک منحنی رطوبتی نداشت. برازش معادله ونگنوختن (۱۹۸۰) بر داده‌های منحنی رطوبتی نشان داد که پارامتر  $n$  (مربوط به شکل منحنی رطوبتی ونگنوختن) افزایش معنی‌داری با افزایش مقدار بیوجار نشان نداد، درحالی‌که پارامتر  $\alpha$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) (تقریباً عکس مکش ورود هوا)، با افزایش بیوجار به‌طور معنی‌داری کاهش یافت که نشان می‌دهد، اثر مثبت بیوجار بر نگهداشت آب خاک، عمدتاً در محدوده خیس منحنی رطوبتی خاک قابل توجه بوده است و بنابراین به نظر می‌رسد، روند کاهش پارامتر  $\alpha$  (یا افزایش مکش ورود هوا) با افزایش بیوجار (شکل ۶. ب)، بیش‌تر تغییرات نگهداشت آب در خاک‌های حاوی مقادیر مختلف بیوجار را توصیف می‌نماید. بسیاری از پژوهش‌ها نشان داده‌اند که افزودن بیوجار به خاک سبب افزایش نگهداشت آب می‌شود، با این حال، نوع و شدت این تاثیرات بسته به نوع بیوجار، خاک و شرایط آزمایش متفاوت بوده است (Blanco-Canqui, 2017; Hussain et al., 2020; Jeffery et al., 2015; Tammeorg et al., 2014; Karhu et al., 2011). اثر مثبت کمی را روی منحنی رطوبتی و افزایش نگهداشت آب در نتیجه افزودن بیوجار به خاک گزارش نمودند. Hardie et al., 2014 نیز در یک کار پژوهشی میدانی هیچ تأثیر معنی‌داری روی منحنی رطوبتی یک خاک درشت بافت تیمار شده با  $\text{Mg ha}^{-1}$  ۴۷ بیوجار بقایای آکاسیا مشاهده نکردند. این محققین اعلام کردند که بیوجار به کار رفته هیچ اثر معنی‌داری بر رطوبت خاک، منافذ قابل زهکش (در مکش‌های بین ۱۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر)، ظرفیت مزرعه، آب قابل استفاده گیاه، پارامترهای منحنی رطوبتی ونگنوختن، پایداری خاکدانه و نقطه پژمردگی دائم نداشت، در حالی که هدایت هیدرولیکی نزدیک اشباع و رطوبت در مکش یک سانتی‌متر به‌طور معنی‌داری متأثر از بیوجار بود. در پژوهش حاضر، عواملی مانند سطح تماس کم ذرات بیوجار با آب ناشی از سطح ویژه کم بیوجار مورد استفاده ( $\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$  ۱۴/۸۸، جدول ۱) و فراوانی نسبتاً زیاد گروه‌های عاملی الیفاتیکی آب‌گریز بر اساس شدت بالای پیک‌های طیف FTIR اندازه‌گیری شده در اعداد موجی  $2832 \text{ cm}^{-1}$  و  $3048 \text{ cm}^{-1}$  (داده‌ها ارائه نشده)، می‌توانند اثر کم بیوجار بر بهبود نگهداشت آب خاک را به‌خوبی توضیح دهند (Gray et al., 2014; Jeffery et al., 2015; Obia et al., 2016).

برازش مدل VG-PDI بر داده‌ها، کاهش غیرخطی هدایت هیدرولیکی غیراشباع ( $K_h$ ) را با خشک‌شدن خاک در تیمارهای ۰، ۲، ۳ و ۴ درصد بیوجار نشان می‌دهد (شکل ۷. الف). به منظور درک بهتر اثر کاربرد بیوجار بر  $K_h$ ، نسبت هدایت هیدرولیکی غیراشباع در تیمارهای حاوی بیوجار به خاک شاهد ( $\frac{K_h}{K_{hc}}$ ) در مقابل مکش ماتریک خاک رسم شده است (شکل ۷. ب). این شکل اثر مقادیر کاربرد بیوجار بر سرعت جریان آب در خاک در حال خشک‌شدن را به‌صورت کمی بیان می‌کند. متوسط مقدار نسبت  $\left(\frac{K_h}{K_{hc}}\right)$  در مکش‌های ماتریک محدوده ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ سانتی‌متر برای تیمارهای ۲ و ۳ درصد بیوجار به ترتیب ۲ و ۲/۴۵ بود. همچنین، بیش‌ترین مقدار این نسبت در مکش‌های ماتریک نزدیک به ۳۰۰ سانتی‌متر مربوط به تیمار ۴ درصد بیوجار و برابر ۲/۵۷ بود. در مجموع،  $K_h$  خاک‌های حاوی بیوجار (۲، ۳ و ۴ درصد) در دامنه وسیعی از مکش ماتریک خاک (یعنی ۳۰۰ تا ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر) به‌طور متوسط بیش از دو برابر خاک شاهد بود. بنابراین، نتایج این آزمایش نشان داد که با خشک‌شدن خاک ( $K_h$ ) به شدت (غیرخطی) کاهش پیدا کرد و (۲) شیب افت  $K_h$  در خاک‌های حاوی بیوجار، کم‌تر از خاک شاهد بود. به عبارت دیگر، افزودن بیوجار به خاک، از افت شدید  $K_h$  خاک در حال خشک‌شدن جلوگیری نمود. این شرایط که به معنای ارتقای توانایی خاک در افزایش فراهمی آب و متعاقباً افزایش جذب آب به ریشه است، می‌تواند بهبود شدت تعرق، شدت فتوسنتز و عملکرد گیاهان تحت تنش خشکی در خاک‌های حاوی بیوجار را توضیح دهد. بازآرایی و بهبود اتصال منافذ بین ذرات خاک و بیوجار را می‌توان از دلایل افزایش  $K_h$  در خاک‌های حاوی بیوجار نسبت به شاهد بیان نمود. ذرات بیوجار با قرارگیری در بین منافذ درشت خاک و ایجاد خلل و فرج ریزتر یا با تشکیل خاکدانه‌های جدید به ویژه در خاک‌های درشت بافت، اتصال منافذ را بهبود بخشیده و این امر می‌تواند سرعت جریان آب در شرایط غیراشباع خاک را افزایش دهد (Ajayi & Horn, 2016; Prendergast-Miller et al., 2014; Villagra et al., 2018). گزارش‌های موجود، نتایج متفاوتی از اثر بیوجار بر هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک را نشان می‌دهند. به عنوان مثال Uzoma et al. (2011) کاهش ۲۲ برابری هدایت هیدرولیکی غیراشباع (به روش تخمین از منحنی رطوبتی) یک خاک شنی

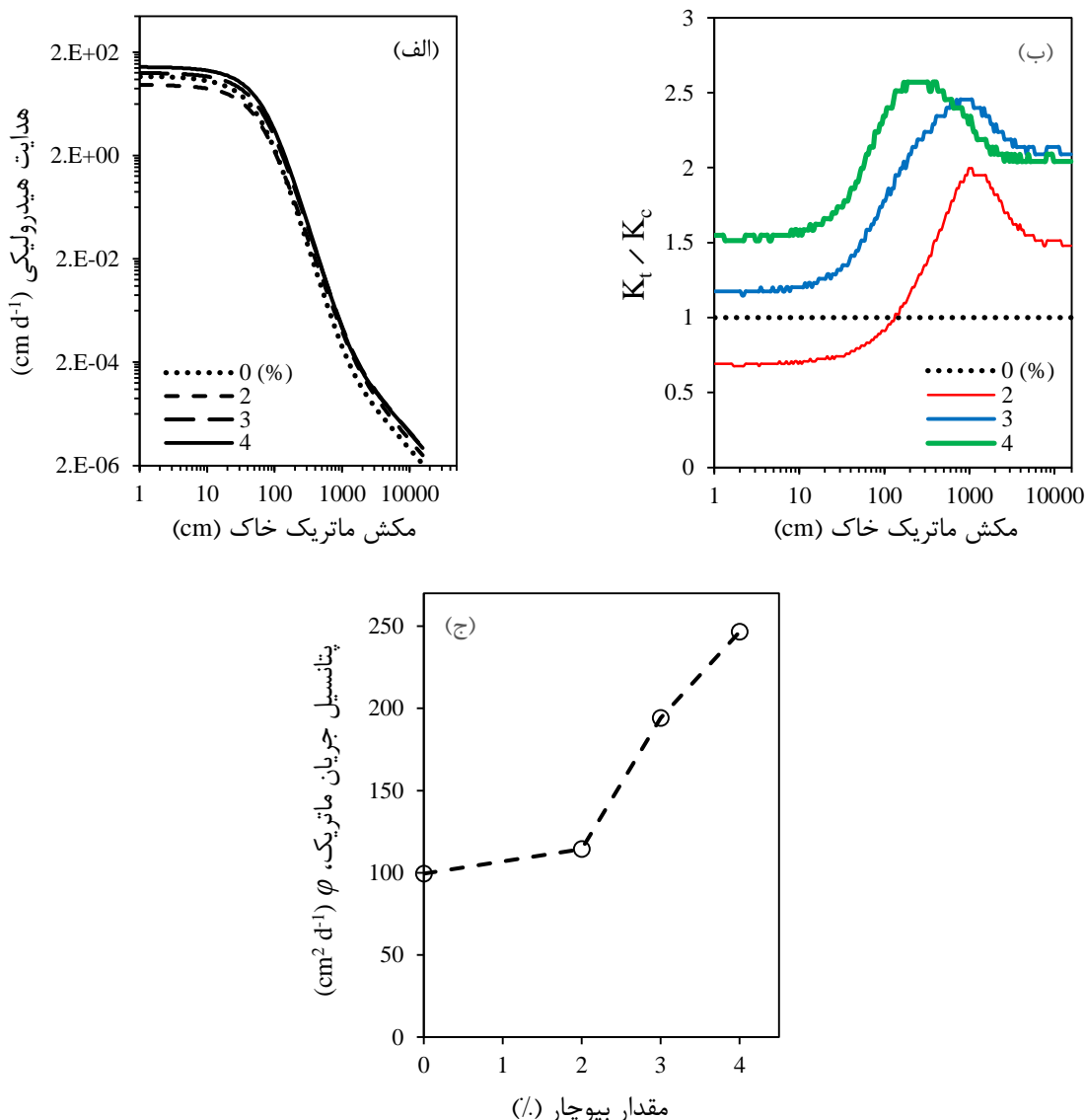
در اثر کاربرد  $20 \text{ Mg ha}^{-1}$  بیوپچار افاقای سیاه را گزارش نمودند. اما Kameyama *et al.* (2012) افزایش معنی‌دار  $K_h$  یک خاک لوم شنی تیمار شده با مقادیر ۵ و ۱۰ درصد بیوپچار باگاس را مشاهده کردند. Castellini *et al.* (2015) نیز با اندازه‌گیری  $K_h$  در نقاط نزدیک اشباع با روش  $UHG^1$  در یک خاک مخلوط شده با مقادیر مختلف بیوپچار افزایش اندکی در  $K_h$  با مصرف  $30 \text{ g kg}^{-1}$  بیوپچار گزارش نمودند.

پتانسیل جریان ماتریک ( $\phi$ ) به‌عنوان یک شاخص کاربردی، قابلیت تحویل آب به ریشه را نشان می‌دهد. مقادیر این پارامتر از روی داده‌های منحنی هدایت هیدرولیکی برای هر یک از تیمارهای ۰، ۲، ۳ و ۴ درصد بیوپچار تعیین شد. شکل (۷.ج) روند افزایش  $\phi$  با افزایش مقدار بیوپچار را نشان می‌دهد. براساس نتایج، مقدار  $\phi$  در تیمارهای ۲، ۳ و ۴ درصد بیوپچار به ترتیب ۱۵، ۹۵ و ۱۵۰ درصد بیش‌تر از خاک شاهد بود. با توجه به وجود رابطه مثبت بین شدت تعرق گیاه و  $\phi$  اندازه‌گیری شده در محدوده مکش‌های ماتریک ۱۰۰ تا  $15000 \text{ de}$  (Jong van Lier *et al.*, 2006)، نتایج به دست آمده  $\phi$  در پژوهش حاضر، بالاتر بودن شدت تعرق گیاهان رشد کرده در تیمارهای حاوی بیوپچار را توضیح می‌دهد.

دشواری‌های اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک سبب شده تا اطلاعات کافی و دقیقی در مورد اثر بیوپچار بر هدایت هیدرولیکی غیراشباع و تحویل آب به ریشه وجود نداشته باشد (Blanco-Canqui, 2017; Hussain *et al.*, 2020). به‌علاوه، همین اطلاعات محدود موجود نیز برخاسته از پژوهش‌هایی است که به‌طور غیرمستقیم منحنی هدایت هیدرولیکی خاک تیمار شده با بیوپچار را از روی منحنی رطوبتی آن تخمین زده‌اند (Kameyama *et al.*, 2012; Uzoma *et al.*, 2011; Bayabil *et al.*, 2015)، و یا از طریق اندازه‌گیری تعداد نقاط محدودی در نزدیکی نقطه اشباع خاک، منحنی هدایت هیدرولیکی را تعیین نموده‌اند (Castellini *et al.*, 2015; Hardie *et al.*, 2014)، که در حالت اول به دلیل خطاهای بزرگ حاصل از تخمین و در حالت دوم به دلیل تجمع تمام داده‌های اندازه‌گیری شده در محدوده خیس منحنی، برآورد دقیق و قابل‌اعتمادی از محدوده خشک منحنی هدایت هیدرولیکی حاصل نخواهد شد. پژوهش حاضر، ضمن کمی‌نمودن اثر بیوپچار بر شدت تعرق و تبادلات گازی برگ طی روند خشک‌شدن خاک، چگونگی تأثیر بیوپچار بر منحنی هدایت هیدرولیکی خاک (مبتنی بر اندازه‌گیری مستقیم  $K_h$  تا محدوده خشک خاک) را مورد بررسی قرار داده است. یافته‌ها، شواهد متقاعدکننده‌ای از تأثیر مثبت بیوپچار بر بهبود قابلیت تحویل آب به ریشه و متعاقباً بالاتر نگهداشتن شدت تعرق، هدایت روزنه و شدت فتوسنتز در چرخه‌های خشکی خاک ارائه نمودند. این پژوهش با رویکرد بررسی اثر عوامل هیدرولیکی خاک متأثر از بیوپچار بر وضعیت آب در گیاه انجام شده است و نتایج به دست آمده به معنای عدم تأثیر سایر عوامل دخیل در ویژگی‌های فیزیولوژیک و شاخص‌های رشدی ذرت نمی‌باشد.



شکل ۶. منحنی رطوبتی خاک‌های تیمار شده با ۰، ۱/۵، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد بیوپچار (الف)، پارامتر  $\alpha$  ونگنوختن (ب). حروف مشترک نشان دهنده عدم معنی‌داری در سطح ۵ درصد احتمال بر اساس آزمون LSD می‌باشند. میله‌های عمودی نشان‌دهنده خطای معیار هستند.



شکل ۷. منحنی هدایت هیدرولیکی خاک‌های تیمار شده با +، ۲، ۳ و ۴ درصد بیوپچار (الف)، تغییرات نسبی هدایت هیدرولیکی غیراشباع در تیمارهای حاوی بیوپچار ( $K_t$ ) به خاک بدون بیوپچار ( $K_c$ ) به عنوان تابعی از مکش ماتریک خاک (بین ۱ تا ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر) (ب)، پتانسیل جریان ماتریک ( $\phi$ ) به عنوان تابعی از مقادیر +، ۲، ۳ و ۴ درصد بیوپچار (ج).

## نتیجه‌گیری

با خشک شدن خاک در فواصل آبیاری‌ها همواره شدت تعرق، هدایت روزنه‌ای و فتوسنتز گیاهان رشد کرده در خاک‌های حاوی بیوپچار بالاتر از خاک شاهد بود که مطرح کننده افزایش جذب آب ریشه و بهبود توازن آب در گیاه در شرایط خشکی خاک تحت تاثیر کاربرد بیوپچار در خاک است. این بهبود، ضمن افزایش زیست توده و عملکرد دانه، منجر به افزایش معنی دار شاخص برداشت در خاک‌های حاوی بیوپچار شد که نشان داد بیوپچار مورد استفاده، اثر تنش خشکی در افزایش شاخص برداشت ذرت را تشدید نمود. کارایی مصرف آب (دانه) نیز تحت تاثیر کاربرد بیوپچار در خاک افزایش یافت. میزان تأثیر بیوپچار بر بهبود شدت تعرق و سایر ویژگی‌های فیزیولوژیک گیاهان تحت تنش خشکی مرحله زایشی بیش تر از مرحله رویشی بود. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهند که بیوپچار (چوب انگور) مخلوط شده با خاک (لوم شنی) سبب افزایش قابلیت فراهمی آب خاک شد. بیوپچار با کاهش مقاومت هیدرولیکی خاک، از افت شدید هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک در حال خشک شدن جلوگیری نمود. با توجه به اثر مثبت و اندک این بیوپچار به ویژه در محدوده خشک منحنی رطوبتی بر نگهداشت آب خاک، به نظر می‌رسد، افت کم تر هدایت هیدرولیکی غیراشباع و یا بالاتر بودن پتانسیل جریان ماتریک طی خشک شدن خاک، مهم ترین عامل بالاتر بودن شدت تعرق و تبادلات گازی برگ در خاک‌های حاوی بیوپچار بود.





"هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Abrishamkesh, S., Gorji, M., Asadi, H., Bagheri-Marandi, Gh. and Pourbabae, A. A. (2015). Effects of rice husk biochar application on the properties of alkaline soil and lentil growth. *Plant, Soil and Environment*, 11, 475-482.
- Ajayi, A. E. and Horn, R. (2016). Modification of chemical and hydrophysical properties of two texturally differentiated soils due to varying magnitudes of added biochar. *Soil and Tillage Research*, 164, 34-44.
- Ali, S., Rizwan, M., Qayyum, M. F., Ok, Y. S., Ibrahim, M., Riaz, M., Arif, M. S., Hafeez, F., Al-Wabel, M. I. and Shahzad, A. N. (2017). Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants: a critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 12700-12712.
- Assouline, S. and Or, D. (2014). The concept of field capacity revisited: Defining intrinsic static and dynamic criteria for soil internal drainage dynamics. *Water Resources Research*, 50, 4787-4802.
- ASTM (1990) D1762-84. In *standard method for chemical analysis of wood charcoal*. American Society for Testing and Materials (ASTM) International, Philadelphia, PA.
- Bayabil, H. K., Stoof, C. R., Lehmann, J. C., Yitaferu, B. and Steenhuis, T. S. (2015). Assessing the potential of biochar and charcoal to improve soil hydraulic properties in the humid Ethiopian Highlands: The Anjeni watershed. *Geoderma*, 243-244, 115-123.
- Baiamonte, G., Minacapilli, M. and Crescimanno, G. (2020). Effects of biochar on irrigation management and water use efficiency for three different crops in a desert sandy soil. *Sustainability*, 12, 7678.
- Basso, A. S., Miguez, F. E., Laird, D. A., Horton, R. and Westgate, M. (2013). Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils. *GCB Bioenergy*, 5, 132-143.
- Batista, E. M. C. C., Shultz, J., Matos, T. T. S., Fornari, M. R., Ferreira, T. M., Szpoganicz, B., De Freitas, R. A. and Mangrich, A. S. (2018). Effect of surface and porosity of biochar on water holding capacity aiming indirectly at preservation of the Amazon biome. *Scientific Reports*, 8, 10677.
- Batool, A., Taj, S., Rashid, A., Khalid, A., Qadeer, S., Saleem, A. R. and Ghufuran, M. A. (2015). Potential of soil amendments (Biochar and Gypsum) in increasing water use efficiency of *Abelmoschus esculentus* L. Moench. *Frontiers in Plant Science*, 6, 733.
- Benesova, M., Hola D., Fischer, L., Jedelsky, P. L., Hnilicka, F., et al. (2012). The physiology and proteomics of drought tolerance in Maize: Early stomatal closure as a cause of lower tolerance to short-term dehydration? *PLOS ONE* 7(6), e38017.
- Bittelli, M. and Flury, M. (2009). Errors in water retention curves determined with pressure plates. *Soil science society of america journal*, 73(5), 1453-1460.
- Blanco-Canqui, H., (2017). Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society American Journal*, 81, 687-711.
- Busscher, W. J., Novak, J. M., Evans, D. E., Watts, D. W., Niandou, M. A. S. and Ahmedna, M. (2010). Influence of pecan biochar on physical properties of Norfolk loamy sand. *Soil Science*, 175, 10-14.
- Castellini, M., Giglio, L., Niedda, M., Palumbo, A. D. and Ventrella, D. (2015). Impact of biochar addition on the physical and hydraulic properties of a clay soil. *Soil and Tillage Research*, 154, 1-13.
- Celia, M. A. and Binning, P. (1992). A mass conservative numerical solution for two-phase flow in porous media with application to unsaturated flow. *Water Resources Research*, 28, 2819-2828.
- Dane, J. H. and Topp, G. C. (2002) Physical methods. In *methods of soil analysis*, Part 4 SSSA Book Series. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- de Jong van Lier, Q., Metselaar, K. and van Dam, J. C. (2006). Root water extraction and limiting soil hydraulic conditions estimated by numerical simulation. *Vadose Zone Journal*, 5, 1264-1277.
- Esmaelnejad, L., Shorafa, M., Gorji, M. and Hosseini, S. M. (2017). Impacts of woody biochar particle size on porosity and hydraulic conductivity of biochar-soil mixtures: An incubation study. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 14, 1710-1718.
- Feddes, R. A., Kowalik, P. and Zarandi, H. (1978) *Simulation of field water use and crop yield*. Pudoc. Wageningen.
- Fischer, B. M. C., Manzoni, S., Morillas, L., Garcia, M., Johnson, M. S. and Lyon, S. W. (2019). Improving agricultural water use efficiency with biochar – A synthesis of biochar effects on water storage and fluxes across scales. *Science of the Total Environment*, 657, 853-862.
- Gao, Y., Shao, G., Lu, J., Zhang, K., Wu, S. and Wang, Z. (2020). Effects of biochar application on crop water use efficiency depend on experimental conditions : A meta-analysis. *Field Crops Research*, 249, 107763.
- Gavili, E., Moosavi, A. A., Kamgar Haghghi, A. A. (2019). Does biochar mitigate the adverse effects of

- drought on the agronomic traits and yield components of soybean? *Industrial Crops & Products*, 128, 445-454.
- Gray, M., Johnson, M. G., Dragila, M. I. and Kleber, M. (2014). Water uptake in biochars: The roles of porosity and hydrophobicity. *Biomass and Bioenergy*, 61, 196-205.
- Haider, G., Koyro, H. W., Azam, F., Steffens, D., Müller, C. and Kammann, C. (2015). Biochar but not humic acid product amendment affected maize yields via improving plant-soil moisture relations. *Plant and Soil*, 395, 141-157.
- Hardie, M., Clothier, B., Bound, S., Oliver, G. and Close, D. (2014). Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? *Plant and Soil*, 376, 347-361.
- Hayat, F., Ahmed, M. A., Zarebanadkouki, M., Javaux M, Cai, G. and Carminati, A. (2020). Transpiration reduction in Maize (*Zea mays* L) in response to soil drying. *Frontiers in Plant Science*, 10:1695.
- Havranek, W. M. and Benecke, U. (1978). The influence of soil moisture on water potential, transpiration and photosynthesis of conifer seedlings. *Plant and Soil*, 49, 91-103.
- Hulugalle, N. R. and Willatt, S. T. (1983). The role of soil resistance in determining water uptake by plant root systems. *Australian Journal of Soil Research*, 21, 571-74.
- Hussain, R., Garg, A. and Ravi, K. (2020). Soil-biochar-plant interaction: differences from the perspective of engineered and agricultural soils. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 4461-4481.
- Hütsch, B. W. and Schubert, S. (2017). Harvest index of Maize (*Zea mays* L.): Are there possibilities for improvement? *Advances in Agronomy*, Chapter Two, 146, 37-82.
- Iden, S. C. and Durner, W. (2014). Comment on ““Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range”” by A. Peters. *International Water Resources Association*, 50, 7530-7534.
- Jeffery, S., Abalos, D., Spokas, K. A. and Verheijen, F. G. A. (2015). Biochar effects on crop yield. In J. Lehmann and S. Joseph (Eds.), *Biochar for environmental management: science, technology and implementation* London, (pp. 301-326). Taylor and Francis.
- Jien, Sh. H. and Chen, J. Y. (2016). Effects of biochar on soil infiltration, runoff and sediment production on a sloped red soil. *Geophysical Research Abstracts*, EGU2016-11701
- Kameyama, K., Miyamoto, T., Shiono, T. and Shinogi, Y. (2012). Influence of sugarcane bagasse-derived biochar application on nitrate leaching in calcareous dark red soil. *Journal of Environmental Quality*, 41, 1131-1137.
- Karhu, K., Mattila, T., Bergström, I. and Regina, K. (2011). Biochar addition to agricultural soil increased CH<sub>4</sub> uptake and water holding capacity-Results from a short-term pilot field study. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 140, 309-313.
- Kwiatkowski, M. and Kalderis, D. (2019). A complementary analysis of the porous structure of biochars obtained from biomass. *Carbon Letters*, 30, 325-329.
- Martos, S., Mattana, S., Ribas, A., Albanell, E. and Domene, X. (2020). Biochar application as a win-win strategy to mitigate soil nitrate pollution without compromising crop yields: a case study in a Mediterranean calcareous soil. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 220-233.
- Minasny, B. and McBratney, A. B. (2003). Integral energy as a measure of soil-water availability. *Plant and Soil*, 249, 253-262.
- Nabavinia, F., Emami, H., Astarraee, A., Lakzian, A. (2015). Effect of tannery wastes and biochar on soil chemical and physicochemical properties and growth traits of radish. *International Agrophysics*, 29, 333-339.
- Obia, A., Mulder, J., Martinsen, V., Cornelissen, G. and Børresen, T. (2016). In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils. *Soil and Tillage Research*, 155, 35-44.
- Pearce, R. B., Mock, J. H. and Bailey, T. B. (1975). Rapid method for estimating leaf area per plant in maize. *Crop Science*, 15, 691-694.
- Peters, A. (2013). Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range. *Water Resources Research*, 49, 6765-6780.
- Peters, A. and Durner, W. (2008). Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties. *Journal of Hydrology*, 356 (1-2), 147-162
- Pertassek, T., Peters, A., and Durner, W. (2015) *HYPROP-FIT User's Manual*, V.3.0, METER group AG.
- Pinheiro, E. A. R., de Jong van Lier, Q., and Metselaar, K. (2018). A matric flux potential approach to assess plant water availability in two climate zones in Brazil. *Vadose Zone Journal*, 17, 160083.
- Pirasteh-Anosheh, H., Saed-Moucheshi, A., Pakniyat, H. and Pessarakli, M. (2016) Stomatal responses to



- drought stress. In *Water stress and crop plants: A sustainable approach*, (vols. 1-2). (pp. 24-40). Hoboken, NJ: Wiley.
- Plaut, Z., Butow, B. J., Blumenthal, C. S. and Wrigley, C. W. (2004). Transport of dry matter into developing wheat kernels and its contribution to grain yield under post-anthesis water deficit and elevated temperature. *Field Crops Research*, 86, 185-198.
- Prendergast-Miller, M. T., Duvall, M. and Sohi, S. P. (2014). Biochar-root interactions are mediated by biochar nutrient content and impacts on soil nutrient availability. *European Journal of Soil Science*, 65, 173-185.
- Raats, P. A. C. (1977). Laterally confined, steady flows of water from sources and to sinks in unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 41, 294-304.
- SAS (2014) SAS 9.4 user's guide.
- Soil Survey Staff (2014) *Keys to Soil Taxonomy* (12 th ed.). USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A. and Loeppert, R. H. (1996) Chemical Methods. In *methods of soil analysis*, Part 3 SSSA Book Series. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Steynberg, R. E., Nel, P. C. and Hammes, P. S. (1989). Drought sensitivity of maize (*Zea mays* L.) in relation to soil fertility and water stress during different growth stages, *South African Journal of Plant and Soil*, 6 (2), 83-85.
- Sun, H., Shi, W., Zhou, M., Ma, X. and Zhang, H. (2019). Effect of biochar on nitrogen use efficiency, grain yield and amino acid content of wheat cultivated on saline soil. *Plant, Soil and Environment*, 65, 83-89.
- Tammeorg, P., Simojoki, A., Mäkelä, P., Stoddard, F. L., Alakukku, L. and Helenius, J. (2014). Biochar application to a fertile sandy clay loam in boreal conditions: Effects on soil properties and yield formation of wheat, turnip rape and faba bean. *Plant and Soil*, 374, 89-107.
- Uzoma, K. C., Inoue, M., Andry, H., Zahoor, A. and Nishihara, E. (2011). Influence of biochar application on sandy soil hydraulic properties and nutrient retention. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 9, 1137-1143.
- van Genuchten, M. Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
- Villagra-Mendoza, K. and Horn, R. (2018). Effect of biochar on the unsaturated hydraulic conductivity of two amended soils. *International Agrophysics*, 32, 373-378.
- Xiao, J. F., Liu, Z. D., Liu, Z. G. and Nan, J. Q. (2011). Effects of drought at different growth stages and different water availabilities on growth and water consumption characteristics of summer Maize. *Journal of Maize Sciences*, 19, 64.
- Yang, A., Akhtar, S. S., Li, L., Fu, Q., Li, Q., Naeem, M. A., He, X., Zhang, Z. and Jacobsen, S. E. (2020). Biochar mitigates combined effects of drought and salinity stress in Quinoa. *Agronomy*, 10, 912.
- Yeboah, E., Asamoah, G., Kofi, B. and Abunyewa, A. A. (2016). Effect of biochar type and rate of application on maize yield indices and water use efficiency on an Ultisol in Ghana, *Energy Procedia*, 93, 14-18.
- Yu, O., Harper, M., Hoepfl, M. and Domermuth, D. (2017). Characterization of Biochar and Its Effects on the Water Holding Capacity of Loamy Sand Soil : Comparison of Hemlock Biochar and Switchblade Grass Biochar Characteristics. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36, 1474-1479.
- Zhang, W., Sun, C. and Qiu, Q. (2016). Characterizing of a capillary barrier evapotranspirative cover under high precipitation conditions. *Environmental Earth Sciences*, 75, 513.
- Zhang, Y., Ding, J., Wang, H. Su, L. and Gao, C. (2020). Biochar addition alleviate the negative effects of drought and salinity stress on soybean productivity and water use efficiency. *BMC Plant Biology*, 20, 288.
- Zoghi, Z., Hosseini, S. M., Kouchaksaraei, M. T., Kooch, Y. and Guidi, L. (2019). The effect of biochar amendment on the growth, morphology and physiology of *Quercus castaneifolia* seedlings under water-deficit stress. *European Journal of Forest Research*, 138, 967-979.
- Zong, Y., Xiao, Q. and Lu, S. (2016). Acidity, water retention, and mechanical physical quality of a strongly acidic Ultisol amended with biochars derived from different feedstocks. *Journal of Soils and Sediments*, 16, 177-190.
- Zwieten, L., V., Singh, B. P. and Cox, J. (2012) In J Cox (ed) *Biochar in horticulture: prospects for the use of biochar in Australian horticulture. Chapter four: biochar effects on soil properties*, Horticulture Australia, NSW Department of Primary Industries.