Research Article

Agricultural Engineering., 48(1) (2025) 113-139

ISSN (E): 2588-526X

DOI: 10.22055/agen.2025.46964.1729

ISSN (P): 2588-5944

# The effect of enriched biochar on the growth and physiological characteristics of forage corn (Zea mays L.) grown in arsenic contaminated soil under deficit irrigation conditions

Maryam Musapour[1], Afsaneh Alinejadian- Bidabadi[2]*, Mohammad Feizian[3] and Amir Lakzian[4]

1. Ph.D. student in Soil Science, Department of Soil Science Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran.
2. Associate Professor, Department of Soil Science Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran
3. Associate Professor, Department of Soil Science Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran
4. Professor, Department of Soil Science Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

Received: 20 May 2024. Accepted: 18 January 2025. *Corresponding Author:: alinezhadian.a@lu.ac.ir

## Abstract

**Introduction:** Today, the use of biochar to reduce the adverse effects of environmental stress such as heavy metal stress and drought stress has increased rapidly. Biochar reduces the adsorption of these metals by plants through the adsorption of soil pollutants on its surface due to the porous system and the presence of important functional groups such as carboxyl, phenolic and hydroxyl. Research has shown that by changing the surface characteristics of biochar, including specific surface area, pore volume and the content of functional groups, especially oxygen-containing groups, it is possible to increase the ability of biochar to adsorb heavy metals. Another important solution that has been started today to improve the quality of soil, agricultural products and remove pollutants is the use of nanotechnology. Today, zinc oxide nanoparticles are used in agriculture and related sectors. Zinc is a mineral element for plant growth and has beneficial effects on various aspects of plant growth. Forage corn (Zea mays) is one of the most important grains in the world and is very important in providing energy for animals. According to the studies conducted, one of the most important factors that has reduced the yield of forage corn in the world is drought stress, in addition to this, heavy metals may also be involved in this matter. There are various solutions to overcome the stress drought and pollution caused by heavy metals in forage corn, however, the effect of biochar enriched with zinc nanoparticles in these conditions has not been well investigated; Therefore, considering the importance of the forage corn in the human and livestock food chain, the main objective of this research was the role of biochar and biochar enriched with zinc nanoparticles in reducing the negative effects of deficit irrigation and arsenic on some morphological and physiological characteristics of forage corn.

**Materials and Methods:** Experimental factors include 5 levels of biochar: control (no use of biochar), 0.5 and 1% by weight of plain biochar, 0.5 and 1% by weight of biochar enriched with zinc nanoparticles and three irrigation levels: control (100), 75 and 55% of Field Capacity (FC)). In this study, green walnut skin was used to prepare biochar. Zinc oxide nanoparticles were used for biochar enrichment. At first, 0.2 % of the weight of biochar was weighed from nanoparticles, and then it was brought to a certain volume with

© 2025 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

distilled water. The produced suspension was shaken overnight at room temperature. After this step, the sediment produced was washed several times and dried in an oven at 100 degrees for 12 hours. Then it was weighed according to the Experimental factors were included 5 levels of biochar: control (no use of biochar), 0.5 and 1% by weight of plain biochar, 0.5 and 1% by weight of biochar enriched with zinc nanoparticles and three irrigation levels: control (100), 75 and 55% of Field Capacity (FC)). In this study, green walnut skin was used to prepare biochar. Zinc oxide nanoparticles were used for biochar enrichment. At first, 0.2 % of the weight of biochar was weighed from nanoparticles, and then it was brought to a certain volume with distilled water. The produced suspension was shaken overnight at room temperature. After this step, the sediment produced was washed several times and dried in an oven at 100 degrees for 12 hours. Then it was weighed according to the experimental treatments and mixed separately with the soil of the pot, which was previously contaminated with arsenic from the source of Na2HAsO4.7H2O in the amount of 50 mg/kg of soil. To determine the FC, the weight method was used, and based on the soil moisture level, the levels of 75 and 55% of the FC were calculated, and the test plants were irrigated by the weight method of the pots every other day. After the completion of the vegetative growth and before entering the reproductive growth some morphological and physiological traits of the plant were measured. After that the plants hervested and the soils of pots collected for some analizes.

**Results and Discussion** The results showed that the application of biochar (unenriched) and enriched biochar reduced the negative effect of arsenic and deficit irrigation. So that the highest fresh weight (43.95 gr per pot) and dry weight (5.36 gr per pot) of leaves in the treatment of 0.5% weight enriched biochar, the highest, (87.86 cm) highth, chlorophyll a (17.52 mg/g) and total chlorophyll (26 mg/g leaf weight) were in the treatment of 1% enriched biochar. Chlorophyll b (8.73 mg/g leaf weight), cartenoid (5.65 mg/g leaf weight), RWC (79.19%) was observed in the treatment of 1% biochar (unenriched) and control treatment (100% FC). The results also showed that the highest zinc uptake in leaf (393.04 µg/ pot) in the treatment of 1% enriched biochar and full irrigation (100% FC) and the lowest amount (105.55 04 µg/pot) in the control treatment (no use of biochar) and severe irrigation deficiency (55% FC) was observed; While highest arsenic uptake in leaf (18.58 µ/pot) in the control treatment (no use of biochar) and severe deficit irrigation (55% FC) and the lowest amount (2.34 µg/pot) in The treatment of 1% enriched biochar and complete irrigation was observed; which can be related to the effective role of enriched biochar in reducing arsenic absorption in severe irrigation conditions.

**Conclusion**Considering the favorable effect of biochar in improving the growth and physiological characteristics of forage corn and reducing the absorption of arsenic at different levels of irrigation, it can be said that in soils contaminated with arsenic, the addition of biochar plays an effective role in improving plant growth in deficit irrigation.

***Keywords:*** **Biochar, Forage corn, Heavy metals, Zn Nanoparticles**.

مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی) جلد ۴۸ شماره۱، بهار ۱۴۰۴

مقاله پژوهشی

# تأثیر بیوچار غنی‌شده بر ویژگی‌های رشدی و فیزیولوژیکی ذرت علوفه‌ای کشت‌شده در خاک آلوده به آرسنیک تحت شرایط کم آبیاری

مریم موسی‌پور[۱]، افسانه عالی‌نژادیان بیدآبادی[۲*]، محمد فیضیان[۳] و امیر لکزیان[۴]

۱- دانشجوی دکتری علوم خاک، گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران.

۲- دانشیار، گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران.

۳- دانشیار، گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

۴- استاد، گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

**تاریخچه مقاله**

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۳۱

پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹

***کلمات کلیدی:***

***بیوچار،***

***ذرت علوفه‌ای،***

***فلزهای سنگین،***

***نانو ذرات روی***

* عهده دار مکاتبات

**چکیده**

**امروزه استفاده از بیوچار و نانو ذرات برای به حداقل رساندن اثرات نامطلوب تنش‌های محیطی افزایش یافته است. به همین منظور پژوهشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل در ۳ تکرار به‌صورت گلدانی بر روی ذرت علوفه‌ای در خاک آلوده به آرسنیک اجرا شد. فاکتورهای آزمایشی شامل ۵ سطح بیوچار: شاهد (عدم کاربرد بیوچار)، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی بیوچار، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده با نانو ذرات عنصر روی و سه سطح آبیاری (۱۰۰، ۷۵ و ۵۵ درصد ظرفیت زراعی) بودند. نتایج نشان داد که در خاک آلوده به آرسنیک، کم‌آبیاری سبب کاهش برخی ویژگی‌های رشدی و فیزیولوژی ذرت علوفه‌ای شد؛ درحالی‌که کاربرد بیوچار و بیوچار غنی‌شده سبب افزایش این ویژگی‌های در شرایط آبیاری کامل و کم‌آبیاری شد؛ به‌طوری‌که بیش‌ترین وزن‌تر (۴۳/۹۵ گرم در گلدان) و خشک برگ (۵/۳۶ گرم در گلدان) در تیمار ۰/۵ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده، بیش‌ترین (ارتفاع (۸۷/۸۶ سانتی‌متر)، کلروفیل a (۱۷/۵۲ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ) و کلروفیل کل (۲۶ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ) در تیمار یک درصد بیوچار غنی‌شده و بیش‌ترین کلروفیل b (۸/۷۳ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ)، کارتنوئید (۵/۶۹ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ ۵)، محتوی نسبی آب برگ (۷۹/۱۹ درصد) در تیمار یک درصد بیوچار ساده و سطح آبیاری کامل (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) مشاهده گردید و کم‌ترین مقدار ویژگی‌های مذکور در تیمار شاهد (عدم کاربرد بیوچار) و سطح آبیاری ۵۵ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد. نتایج همچنین نشان داد بیش‌ترین روی جذب‌شده در برگ (۳۹۳/۰۴ میکروگرم در گلدان) در تیمار یک درصد بیوچار غنی‌شده و آبیاری کامل و کمترین مقدار (۱۰۵/۵۵ میکروگرم در گلدان) در تیمار شاهد (عدم استفاده بیوچار)**

**وکم‌آبیاری شدید (۵۵ درصد ظرفیت زراعی) مشاهده شده؛ درحالی‌که بیشترین مقدار جذب آرسنیک در برگ (۱۸/۵۸ میکروگرم در گلدان) در تیمار شاهد (عدم استفاده از بیوچار) و کم‌آبیاری شدید (۵۵ درصد ظرفیت زراعی) و کم‌ترین مقدار (۲/۳٤ میکروگرم در گلدان) در تیمار یک درصد بیوچار غنی‌شده و آبیاری کامل مشاهده شد؛ که می‌تواند به نقش مؤثر بیوچار غنی‌شده در کاهش جذب آرسنیک در شرایط کم-آبیاری شدید مرتبط باشد. درنهایت با توجه به اثر مطلوب بیوچار در بهبود ویژگی‌های رشدی و فیزیولوژیکی ذرت علوفه‌ای و کاهش جذب آرسنیک در سطوح مختلف آبیاری می‌توان بیان کرد در خاک‌های آلوده به آرسنیک افزودن بیوچار نقش مؤثری در بهبود رشد گیاه در شرایط کم‌آبیاری دارد.**

## مقدمه

آرسنیک آلاینده‌ای بسیار سمی است که آلوده شدن خاک و آب‌های زیرزمینی توسط آن نگران-کننده است. تماس با آرسنیک و ورود آن به بدن انسان اکثر دستگاه‌ها و اندام‌های بدن ازجمله دستگاه تنفسی، قلب و عروق، گوارشی، عصبی، تولیدمثلی، کبد، کلیه‌ها و پوست را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۲۸). علاوه بر عوامل زمین‌شناختی و مواد مادری خاک، فعالیت‌های انسانی مانند معدن‌کاوی و ذوب فلزها، احتراق زغال‌سنگ و استفاده گسترده از ترکیب‌های دارای آرسنیک مانند حشره‌کش‌ها، آفت‌کش‌ها، محافظت‌کننده‌های چوب، فاضلاب و غیره نیز سبب تجمع مقادیر بالای این فلز در خاک‌ها شده است (۵۰). در ایران وجود خاک‌های آلوده به آرسنیک در استان‌های کردستان، خراسان، زنجان و آذربایجان شرقی گزارش شده است (۶). محصولات زراعی کشت شده در خاک‌های آلوده به آرسنیک مقدار قابل‌توجهی آرسنیک را جذب می‌کنند. تجمع آرسنیک در گیاه سبب ایجاد اختلال در رشد و نمو گیاهان از طریق کاهش رشد رویشی، کاهش سطح فتوسنتز، نکروزه شدن برگ‌ها و تخریب غشای کلروپلاستی می‌شود (۴۸)؛ بنابراین اصلاح خاک‌های آلوده به آرسنیک برای حفظ سلامتی بشر و تولیدات کشاورزی ضروری است. در این راستا امروزه کاربرد بیوچار به‌عنوان یک رویکرد مقرون‌به‌صرفه که خطرات زیستی محیطی کمتری دارد برای کاهش اثرات نامطلوب فلزهای سنگین موجود در خاک، پیشنهاد شده است (۶۹). بیوچار ماده‌ای جامد، متخلخل و غنی از کربن است که از تجزیه حرارتی بقایا و زیست‌توده‌های آلی در شرایط بدون اکسیژن و یا اکسیژن محدود طی فرایند گرماکافت تهیه می‌شود (۲۹). پژوهشگران عقیده دارند که بیوچار با جذب آلاینده‌های خاک در سطح خود به دلیل سیستم متخلخل و وجود گروه‌های عاملی مهمی مانند کربوکسیل، فنول و هیدروکسیل (۶۷)، سبب کاهش جذب فلزهای سنگین توسط گیاهان می‌شود و باعث می‌شود گیاهان بهتر با آلودگی خاک سازگار شده و رشد بهتری در این شرایط داشته باشند (۵۲). اثر بیوچار پوست برنج (۵۵) و کاه گندم (۶۰) بر بهبود رشد و عملکرد ذرت در شرایط آلودگی آرسنیک گزارش‌شده است.

یکی دیگر از راه‌کارهای مهمی که امروزه برای بهبود کیفیت خاک، محصولات کشاورزی و حذف آلاینده‌ها آغاز شده است استفاده از فن‌آوری نانو است (۱). نانو ذرات با داشتن ویژگی‌های بی‌نظیری ازجمله، بالا بودن نسبت سطح به حجم، اندازه کوچک و اثرات کوانتومی در بخش‌های مختلف زیست‌محیطی کاربردهای فراوانی دارند. انواع مختلفی از نانو ذرات در زمینه‌های مختلف استفاده می‌شوند. یکی از آن‌ها نانو ذرات اکسید روی است که در

کشاورزی و بخش‌های وابسته کاربرد دارد (۴). روی یک عنصر معدنی حیاتی برای رشد گیاه است و تأثیرات مفید بر جنبه‌های مختلف رشد گیاه دارد. این عنصر در چندین فرایند بیوشیمیایی، از قبیل سنتز پروتئین‌ها، کلروفیل، آنزیم‌ها و گردش متابولیک نقش دارد (۳۵). روی همچنین می‌تواند به‌طور مؤثری آلودگی خاک و سایر نگرانی‌های زیست‌محیطی مرتبط با کودهای شیمیایی و حیوانی را کاهش دهد (۶۴). در پژوهشی (۵) کاربرد نانو ذرات روی، سبب کاهش غلظت آرسنیک در اندام هوایی و ریشه گیاه سویا شد. نتایج آنان همچنین نشان داد که طول ساقه و ریشه، سرعت خالص فتوسنتز، تعرق، هدایت روزنه‌ای، عملکرد فتوشیمیایی و سایر عوامل با افزایش سطح آرسنیک کاهش یافت؛ درحالی‌که کاربرد نانو ذرات روی سبب افزایش قابل‌توجه این پارامترها در شرایط آلودگی آرسنیک شد. بااین‌حال تحقیقات نشان داد است افزودن نانوذره روی به سطح ترکیبات آلی مانند بیوچار می‌تواند نقش مثبت نانو ذرات روی در افزایش رشد گیاه تحت شرایط تنش‌های محیطی را افزایش دهد (۵۶). یکی از دلایل اصلی اصلاح بیوچار با نانو ذرات اثر مثبت آن در حذف آلاینده‌ها از طریق جذب آن‌هاست (۴۴). علاوه بر این تحقیقات نشان داده است که بیوچار غنی‌شده با مواد معدنی در حفظ و جذب مواد مغذی نقش مؤثری دارد (۷۱). مطالعات مختلف اثر بیوچار غنی‌شده با مواد معدنی مختلف از قبیل نیتروژن (از منبع اوره) (۷۲)، سولفات (۷۸) و نانو ذرات روی (۶۵) را گزارش کرده‌اند که سبب افزایش عملکرد گیاه شده‌اند.

کمبود آب یکی از تنش‌های غیر زیستی است که بر رشد و نمو گیاهان تأثیر می‌گذارد. در گزارشی (۱۸) مشاهده گردید که تنش کم‌آبی به‌طور معنی‌داری سبب کاهش رشد و عملکرد ذرت علوفه‌ای شد، به‌طوری‌که در تیمارهای ۷۵، ۵۵ و ۲۵ درصد نیاز آبی به ترتیب ۷، ۴۷/۴ و ۷۹/۱ درصد عملکرد زیست توده گیاه نسبت به سطح ۱۰۰ درصد نیاز آبی کاهش یافت. کاربرد بیوچار همچنین از طریق افزایش ماده آلی خاک، ظرفیت نگهداری آب و بهبود فعالیت میکروبی منجر به بهبود عملکرد گیاه در طول خشکسالی می‌شود (۷۶). در گزارشی مشاهده گردید کمبود آب بر رشد نهال‌های سویا و محتوای کلروفیل برگ‌ها تأثیر نامطلوب داشت؛ در حالیکه اصلاح‌کننده بیوچار رشد و محتوای کلروفیل را به‌ویژه تحت تنش خشکی افزایش داد (۲۴).

ذرت علوفه‌ای بانام علمی (Zea mays L.) از خانواده (Poaceae) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین غلات جهان، اهمیت زیادی در تأمین انرژی انسان دارد به همین دلیل در تحقیقات مربوط به آرسنیک (۳۶ و ۵۱) و تنش کم‌آبی (۷۶) موردتوجه بوده است. بنابراین با توجه به این‌که بخش زیادی از خاک‌های ایران جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند، افزایش آلودگی و تشدید تنش کم‌آبی در این مناطق نیاز به ارائه راه‌کارهای اساسی است؛ درنتیجه با توجه به اهمیت گیاه ذرت در زنجیره غذایی انسان و دام در این پژوهش به اثر بیوچار و بیوچار غنی‌شده با نانو ذرات روی بر ویژگی‌های رشدی و فیزیولوژیکی ذرت علوفه‌ای کشت شده در خاک آلوده به آرسنیک تحت شرایط کم آبیاری می‌پردازیم.

## مواد و روش

به‌منظور بررسی تأثیر بیوچار پوست گردو و بیوچار غنی‌شده‌ی آن با نانو ذرات اکسیدروی بر برخی ویژگی‌های رشدی و فیزیولوژیکی ذرت علوفه‌ای کشت شده در خاک آلوده به آرسنیک تحت شرایط کم آبیاری، پژوهشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل با دو فاکتور در ۳ تکرار به‌صورت گلدانی در پاییز (مهرماه) ۱۴۰۲ در شرایط گلخانه اجرا شد. فاکتور اول شامل ۵ سطح بیوچار: تیمار شاهد (عدم استفاده از بیوچار)، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی بیوچار (ساده)، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده با نانو ذرات روی و فاکتور دوم شامل سه سطح آبیاری ۱۰۰ (شاهد)، ۷۵ و ۵۵ درصد ظرفیت زراعی بود.

در ابتدا برای تهیه بیوچار مقادیر کافی پوست سبز گردو از باغ‌های شهرستان الشتر تهیه شد. پس از شستشو با آب مقطر هوا خشک گردید؛ سپس آسیاب و با الک ۲ میلی‌متری غربال شد، درنهایت با افزایش نرخ دمای ۱۰ درجه سلسیوس در دقیقه به مدت ۲ ساعت در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس در شرایط بدون اکسیژن (اکسیژن محدود) در کوره الکتریکی قرار داده شد (۶۸).

به‌منظور تهیه بیوچار غنی‌شده از نانو ذرات روی (از منبع اکسید روی) تهیه‌شده از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان استفاده شد. برای غنی‌سازی بیوچار ابتدا سوسپانسیونی حاوی بیوچار و آب مقطر با نسبت ۱ به ۱۰ روی هات پلیت با دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار داده شد و سپس به سوسپانسیون حاصل مقدار ۰/۲ درصد وزنی بیوچار نانوذره اکسید روی اضافه شد. سپس حجم سوسپانسیون با آب مقطر به ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. این محلول به مدت یک شبانه‌روز در دمای اتاق روی یک همزن مغناطیسی هم زده شد. بعد از هم زدن، محلول از کاغذ صافی عبور داده شد و با آب مقطر ۲-۳ بار شسته شد. سپس رسوب حاصل در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۲ ساعت در آون خشک شد تا بیوچار غنی‌شده با نانو ذرات به دست آید (۶۷). برخی ویژگی‌های شیمیایی بیوچار (ساده و غنی‌شده) در جدول (۱) گزارش شده است. در ابتدا برای تعیین مقدار روی کل از روش هضم تر توسط اسید نیتریک استفاده شد (۲۱) و سپس با استفاده دستگاه جذب اتمی قرائت گردید. عناصر کربن، هیدروژن، نیتروژن و گوگرد توسط دستگاه Analyzer-CHNS (Elementar, Vario EL III) (Fadeeva)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات آمونیوم (۲۱)، pH و هدایت الکتریکی در عصاره با نسبت ۱:۲۰ (بیوچار به آب دیونیزه) قرائت شد (۶۳).

جهت انجام این پژوهش ابتدا خاک لازم از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان تهیه گردید و پس از هوا خشک شدن از الک دو میلی‌متری عبور داده شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت خاک (۲۲)، کربن آلی (۷۵)، pH (۶۶)، هدایت الکتریکی (۵۷)، نیتروژن کل (۱۵)، فسفر قابل‌دسترس (۴۹)، پتاسیم قابل‌دسترس (۴۱)، غلظت آرسنیک کل با اسید نیتریک غلیظ و آب‌اکسیژنه (۳۱)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات آمونیوم (۲۱) و غلظت آرسنیک قابل‌دسترس با استفاده از سولفات آمونیوم ۰/۰۵ مولار (۷۴) اندازه‌گیری شد (جدول ۲).

به‌منظور آلوده کردن خاک ابتدا مقدار ۱۰ کیلوگرم خاک توزین شد؛ سپس معادل ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم آرسنیک از منبع نمک آرسنات سدیم ($Na_2HAsO_4{\cdot}7H_2O$) توزین گردید و پس از انحلال در آب مقطر به خاک اسپری شد (۳۰). پس از خشک شدن خاک کاملاً به هم زده شد و یکدست گردید، سپس با خاک تمام گلدان‌ها مخلوط شد. چند بار عملیات هم زدن خاک تکرار شد تا کل خاک آلوده‌شده با خاک غیر آلوده مخلوط شود.

پس از ترکیب نمودن تیمارهای بیوچار با خاک، خاک تیمار شده به گلدان‌ها (۵ کیلوگرمی) اضافه و گلدان‌ها توزین شدند. پس از گذشت دو روز ۵ عدد بذر ذرت علوفه‌ای (رقم ۶۰۰zp) در گلدان‌ها کشت شد. درنهایت به‌صورت کامل با آب شهری تا حد اشباع (پس از خروج اولین قطره آب از زیر گلدان) آب داده شدند. برای جلوگیری از تبخیر آب، سطح گلدان‌ها با پلاستیک پوشانده شد. پس از گذشت ۲ روز و خروج کامل آب ثقلی از انتهای گلدان، دوباره گلدان‌ها توزین و با توجه به داشتن وزن خاک خشک به همراه گلدان، وزن آب در حالت ظرفیت زراعی به دست آمد. این مقدار به‌عنوان مقدار آب در حالت ظرفیت زراعی در نظر گرفته شد (۵۳). سپس تا رسیدن گیاه به مرحله ۶ برگی با همین مقدار آب به‌صورت یک روز در میان آبیاری شدند. بر اساس مقدار رطوبت به‌دست‌آمده در حالت ظرفیت زراعی، سطوح ۵۵ و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی محاسبه و تا زمان برداشت گیاه به‌صورت یک روز در میان آبیاری شدند. پس از اتمام رشد رویشی (۹۰ روز پس از کشت بذر) و قبل از وارد شدن به رشد زایشی نمونه‌ها برداشت شدند. سپس برخی صفات مورفولوژیکی شامل ارتفاع گیاه، وزن‌تر و

خشک برگ، تعداد برگ خشک و سالم (برگ‌تر) و برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی شامل، محتوای نسبی آب (۵۸)، نشت یونی (۴۵) و رنگیزه‌های فتوسنتزی (۴۲) اندازه‌گیری شد. برای غلظت آرسنیک و روی کل برگ، ابتدا نمونه‌ها با استفاده از روش هضم تر عصاره تهیه گردید (۲۱) و سپس با استفاده از دستگاه پلاسمای جفت القائی (ICP) قرائت گردید. برای تعیین مقدار جذب آرسنیک و روی در برگ از ضرب مقدار وزن خشک برگ در غلظت آرسنیک و روی برگ استفاده گردید.

درنهایت تجزیه‌وتحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار مینی تب (MINITAB) نسخه ۲۲ انجام شد. مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چندمرحله‌ای دانکن در سطح پنج درصد و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار اکسل انجام شد.

**جدول(۱) برخی ویژگی‌های بیوچار و بیوچار غنی‌شده**

**Table (1)- Some characteristics of biochar and enriched biochar**

| | pH پ‌هاش | هدایت الکتریکی* | ظرفیت تبادل کاتیونی | درصد خاکستر | روی کل |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Electrical conductivity | CEC | Ash | Zinc $_{(Total)}$ |
| | - | دسی‌زیمنس بر متر | سانتی مول بار بر کیلوگرم | % | میلی‌گرم بر کیلوگرم |
| | | ($dS\ m^{-1}$) | ($Cmolc\ Kg^{-1}$) | | ($mg\ kg^{-1}$) |
| B0 | 10.01 | 5.84 | 49 | 26.7 | 101 |
| Be | 10.2 | 4.21 | 73 | 20.71 | 988 |
| | نیتروژن | کربن | هیدروژن | C/N | گوگرد |
| | $Nitrogen_{(Total)}$ (%) | Carbon (%) | Hydrogen (%) | – | Sulfur (%) |
| B0 | 1.09 | 45.6 | 3.88 | 48.8 | 0.351 |
| Be | 0.86 | 42.9 | 3.67 | 58.73 | 0.342 |

*: مقدار pH و EC بیوچار در عصاره ۱:۲۰ قرائت شده است.

*: pH and EC values of biochar are read in 1:20 extract

B0: بیوچار، Be: بیوچارغنی‌شده

B0: Biochar, Be: Enriched biochar

**جدول(۲) برخی ویژگی‌های فیزیکو شیمیایی خاک موردمطالعه**

**Table (2) Some physical and chemical characteristics of the studied soil**

| بافت Texture | پ‌هاش pH | هدایت الکتریکی | ظرفیت تبادل کاتیونی | کربنات کلسیم معادل | کربن آلی |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Electrical conductivity | CEC | $CaCO_3$ | Organic carbon |
| – | - | دسی‌زیمنس بر متر | سانتی مول بار بر کیلوگرم | % | % |
| | | ($dS\ m^{-1}$) | ($cmol_c\ kg^{-1}$ | | |
| clay loam | 8.09 | 1.25 | 19 | 27.5 | 0.71 |
| نیتروژن کل | فسفر قابل‌جذب | پتاسیم قابل‌جذب | روی قابل‌جذب | آرسنیک قابل‌جذب | آرسنیک کل |
| $Nitrogen_{(Total)}$ | $Phosphorus_{(ava)}$ | $Potassium_{(ava)}$ | Zinc $_{(ava)}$ | Arsenic $_{(ava)}$ | $Arsenic_{(Total)}$ |
| % | میلی‌گرم بر کیلوگرم ($mg.kg^{-1}$) | | | | |
| 0.065 | 21 | 525 | 2.05 | Nd* | Nd |

*Nd: زیر حد تشخیص دستگاه ICP :Nd: below the detection limit of the ICP device

## نتایج و بحث

### آرسنیک برگ

نتایج تجزیه واریانس جدول (۳) نشان داد که اثر اصلی بیوچار و کم‌آبیاری و برهمکنش آن‌ها بر جذب آرسنیک و روی در برگ در سطح یک درصد معنی‌دار شد. نتایج برهمکنش (شکل ۱) سطوح مختلف کم آبیاری و بیوچار (ساده و غنی‌شده) نشان داد که کم‌آبیاری سبب افزایش جذب آرسنیک برگ ذرت شد درحالی‌که افزودن بیوچار و بیوچار غنی‌شده با نانو ذرات روی سبب کاهش این ویژگی شد؛ به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار آرسنیک جذب‌شده در برگ (۱۸/۵۸ میکروگرم در گلدان) در سطح آبیاری ۵۵ درصد ظرفیت زراعی و تیمار شاهد (عدم استفاده از بیوچار) مشاهده شد؛ درحالی‌که کم‌ترین مقدار (۲/۳۴ میکروگرم در گلدان) در سطح آبیاری کامل (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و تیمار ۱ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده با نانو ذرات روی مشاهده شد (شکل ۱).

مطالعات نشان داده است که بیوچار می‌تواند جذب و غلظت آرسنیک را در اندام هوایی ذرت کاهش دهد (۵۵). پژوهشگران عقیده دارند مکانیسم‌های رایج اصلاح خاک‌های آلوده به آرسنیک به‌واسطه بیوچار شامل بهبود جذب الکترواستاتیک، فرآیند تبادل یونی، جذب سطحی و کمپلکس شدن هستند (۳۷). در تحقیقی (۴۰) مشاهده گردید استفاده از بیوچار (پوست برنج و کود گاوی) برای کاهش خطر آلودگی آرسنیک و بهبود خواص خاک در شرایط تنش خشکی مؤثر واقع شد؛ به‌طوری‌که فراهمی زیستی آرسنیک را ۵۴/۷ درصد کاهش داد. در تحقیق حاضر مشاهده گردید اثر بیوچار غنی‌شده در کاهش جذب آرسنیک نسبت به بیوچار ساده مؤثرتر بود؛ در این خصوص تحقیقات نشان داده است آرسنیک زمانی که در خاک است، رابطه آنتاگونیستی با روی دارد (۴۷)؛ بنابراین، در این پژوهش به نظر می‌رسد افزایش محتوی روی خاک از طریق بیوچار غنی‌شده، سبب کاهش جذب آرسنیک در گیاه شده است (۶۵). در گزارشی (۶۵) مشاهده گردید بیوچار تیمار شده با نانو ذرات روی محتوی آرسنیک اندام هوایی برنج را نسبت به سطح شاهد (عدم استفاده از بیوچار) ۹۰ درصد کاهش داد.

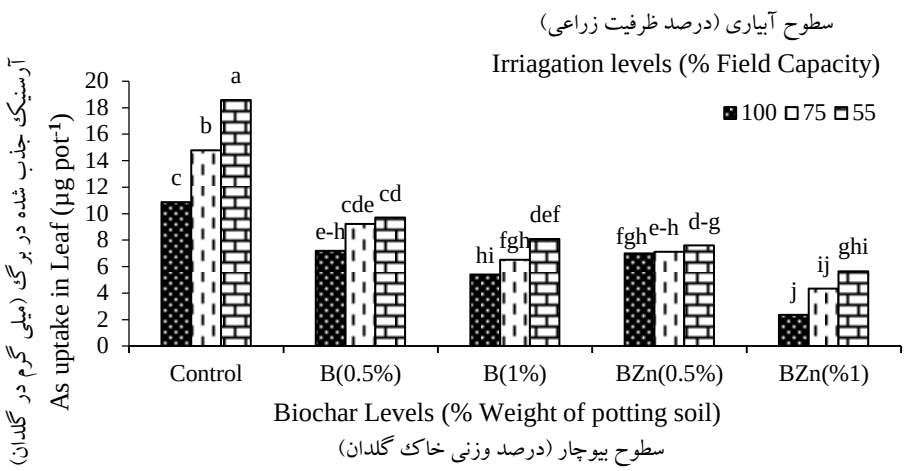
**جدول(۳) تجزیه واریانس اثر بیوچار و بیوچار غنی‌شده بر جذب آرسنیک و روی در برگ ذرت علوفه‌ای تحت کم آبیاری**

**Table (3) Variance analysis of the effect of biochar and enriched biochar on arsenic and Zn uptake in leaf forage corn leaves under deficit irrigation**

| جذب روی در برگ<br>Zn uptake in leaf | جذب آرسنیک در برگ<br>As uptake in leaf | df | منابع تغییرات<br>Source of variation |
|---|---|---|---|
| 93010** | 40.63** | 2 | (A) Irrigation level سطح آبیاری |
| 23199** | 141.65** | 4 | (B) Biochar بیوچار |
| 2185.8** | 5.91** | 8 | B×A |
| 237.6 | 0.524 | 30 | Error خطا |
| 7.01 | 8.73 | - | (%) CV |

** معنی‌داری در سطح ۰/۰۱

** Significance at the p<0.01 level



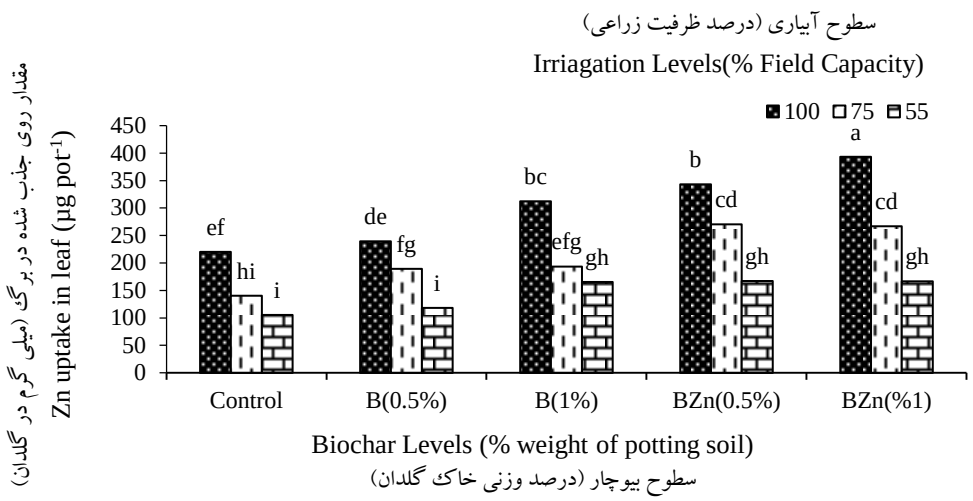

**شکل(۱) برهمکنش بیوچار و کم‌آبیاری بر جذب آرسنیک در برگ ذرت**
**Control: شاهد، B(0.5%): تیمار ۰/۵ درصد وزنی بیوچار، B(1%): تیمار ۱ درصد وزنی بیوچار، BZn(0.5%): تیمار ۰/۵ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده، BZn(1%): تیمار ۱ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده.**
***تیمارهایی که دارای حروف یکسان‌اند اختلاف معنی‌دار ندارند**

**Figure (1) The interaction of biochar and deficit irrigation on the As uptake in maize leaf**
**Control: control, B(0.5%): treatment of 0.5% by weight of biochar, B(1%): treatment of 1% by weight of biochar, BZn(0.5%): treatment of 0.5% by weight of enriched biochar, BZn(1%): Treatment of 1 percent by weight of enriched biochar.**
***Treatments with the same letters do not have a significant difference**

نتایج نشان داد با کاهش سطح آبیاری مقدار آرسنیک جذب‌شده در گیاه افزایش یافت؛ کمبود رطوبت خاک خروج آرسنیک از ناحیه ریشه را کاهش می‌دهد (۹) بنابراین تجمع آرسنیک و درنهایت جذب توسط گیاه افزایش می‌یابد. ورود آرسنیک به گیاه سبب ایجاد اخلال در روند رشد طبیعی گیاه و بروز علائمی مانند کاهش وزن، نکروزه شدن برگ‌ها، کاهش فتوسنتز و علائم مشابه می‌گردد (۱۰). ترکیب آلودگی آرسنیک و کم‌آبیاری درنهایت منجر به کاهش زیست‌توده گیاه شد؛ درنتیجه افزایش محتوی آرسنیک در گیاه را نیز می‌توان بر اساس فاکتور رقت توجیه نمود (۳۵). علاوه بر این بیوچار به‌طور مؤثر موجب عدم تحرک و کاهش قابلیت دسترسی آرسنیک در خاک می‌شود (۳۹ و ۴۰)؛ بنابراین در تیمار شاهد (عدم استفاده از بیوچار) دسترسی گیاه برای جذب آرسنیک افزایش یافت و تجمع آرسنیک در این شرایط بیشتر شد. همچنین در تیمارهای تحت استفاده از بیوچار ساده (غنی نشده) در سطوح ۰/۵ و ۱ درصد وزنی نسبت به تیمارهای بیوچار غنی‌شده هم‌سطح خود (۱ و ۰/۵) تجمع آرسنیک بیشتری مشاهده شد که همان‌طور که بیان شد می‌تواند به رابطه آنتاگونیستی روی و آرسنیک مرتبط باشد.

## روی برگ

نتایج برهمکنش (شکل ۲) سطوح مختلف کم آبیاری و بیوچار (ساده و غنی‌شده) نشان داد که کم‌آبیاری مقدار جذب روی در برگ را کاهش داد درحالی‌که افزودن بیوچار به‌صورت ساده و غنی‌شده با نانو ذرات روی مقدار جذب روی را افزایش داد؛ به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار جذب (۳۹۳/۰۴ میکروگرم در گلدان) در سطح آبیاری کامل (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و تیمار ۱ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده مشاهده شد؛ درحالی‌که کم‌ترین مقدار (۱۰۵/۵۵ میکروگرم در گلدان) در سطح ۵۵ درصد ظرفیت زراعی و تیمار شاهد (عدم استفاده از بیوچار) مشاهده شد (شکل ۲).




**شکل (۲) برهمکنش بیوچار و کم‌آبیاری بر جذب روی در برگ ذرت**
**Control: شاهد، B(0.5%): تیمار ۰/۵ درصد وزنی بیوچار، B(1%): تیمار ۱ درصد وزنی بیوچار، BZn(0.5%): تیمار ۰/۵ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده، BZn(1%): تیمار ۱ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده.**
***تیمارهایی که دارای حروف یکسان‌اند اختلاف معنی‌دار ندارند**

**Figure (2) The interaction of biochar and deficit irrigation on the content Zn in maize leaves**
**Control: control, B(0.5%): treatment of 0.5% by weight of biochar, B(1%): treatment of 1% by weight of biochar, BZn(0.5%): treatment of 0.5% by weight of enriched biochar, BZn(1%): Treatment of 1 percent by weight of enriched biochar.**
***Treatments with the same letters do not have a significant difference.**

نتایج این پژوهش نشان داد که جذب روی با افزودن بیوچار (غنی‌شده و ساده) نسبت به تیمار شاهد (عدم استفاده از بیوچار) در تمام سطوح آبیاری افزایش یافت؛ این افزایش در گیاهان تیمار شده با بیوچار غنی‌شده با نانو ذرات بیشتر مشاهده گردید که با توجه به محتوی روی در بیوچار غنی‌شده قابل پیش‌بینی است؛ از طرفی با توجه به زیست‌توده بیشتر در تیمارهای تحت استفاده از بیوچار (غنی‌شده و ساده) مقدار جذب روی افزایش یافت (۳۶ و ۶۷). نتایج تحقیقی نشان داد که افزودن بیوچار غنی‌شده با نانو ذرات روی سبب افزایش محتوی روی اندام هوایی تربچه تحت تنش شوری شد؛ به‌طوری‌که نسبت به سطح شاهد (عدم استفاده از بیوچار) محتوی روی ۸۶/۶ درصد افزایش یافت (۶۷). با کاهش سطوح آبیاری مقدار روی جذب شده در برگ کاهش یافت. تحقیقات نشان داده است تحرک و جابجایی روی در شرایط کمبود آب کاهش می‌یابد (۶۱)، کم‌آبی همچنین با تداخل در سازوکارهای جذب و تخلیه همراه با کاهش تعرق سبب کاهش جذب عناصر غذایی مانند روی می‌شود (۱۲ و ۴۶). از طرفی همان‌طور که بیان شد در خاک بین روی و آرسنیک رابطه آنتاگونیستی مشاهده شده است، بنابراین کاهش روی در تیمار شاهد (عدم استفاده از بیوچار) می‌تواند به دلیل جذب بالای آرسنیک باشد.

## صفات مورفولوژیکی

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان داد که اثر اصلی بیوچار و کم‌آبیاری بر صفات مورفولوژیکی ذرت (ارتفاع، وزن‌تر و خشک برگ، تعداد برگ سالم و تعداد برگ خشک) در سطح یک درصد و برهمکنش آن‌ها بر تمام صفات اندازه‌گیری شده به‌جز تعداد برگ سالم معنی‌دار شد.

**جدول(٤) تجزیه واریانس اثر بیوچار و بیوچار غنی‌شده بر ویژگی‌های مورفولوژیکی ذرت علوفه‌ای تحت کم آبیاری**
**Table (4) Variance analysis of the effect of biochar and enriched biochar on the morphological characteristics of forage corn under deficit irrigation**

| تعداد برگ خشک Number of dry leaves | تعداد برگ سالم Number of healthy leaves | ارتفاع Height | وزن خشک برگ leaf dry weight | وزن‌تر برگ Leaf fresh weight | df | منابع تغییرات Source of variation |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 23.4$^{**}$ | 21.06$^{**}$ | 2386.05$^{**}$ | 12.99$^{**}$ | 359.03$^{**}$ | 2 | سطح آبیاری (A) Irrigation level |
| 4.02$^{**}$ | 3.85$^{**}$ | 166.7$^{**}$ | 1.43$^{**}$ | 128.05$^{**}$ | 4 | بیوچار (B) Biochar |
| 0.45$^{*}$ | 0.87$^{ns}$ | 54.79$^{**}$ | 0.32$^{**}$ | 16.42$^{**}$ | 8 | B×A |
| 0.22 | 0.48 | 5.89 | 0.04 | 3.04 | 30 | خطا Error |
| 9.17 | 6.27 | 3.35 | 5.63 | 5.33 | - | (%) CV |

Ns: عدم معنی‌داری، $^{*}$ و $^{**}$ به ترتیب معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ و ۰/۰۱

ns: no significant, * and ** statistical significance at the levels of $p<0.05$ and $p<0.01$ respectively

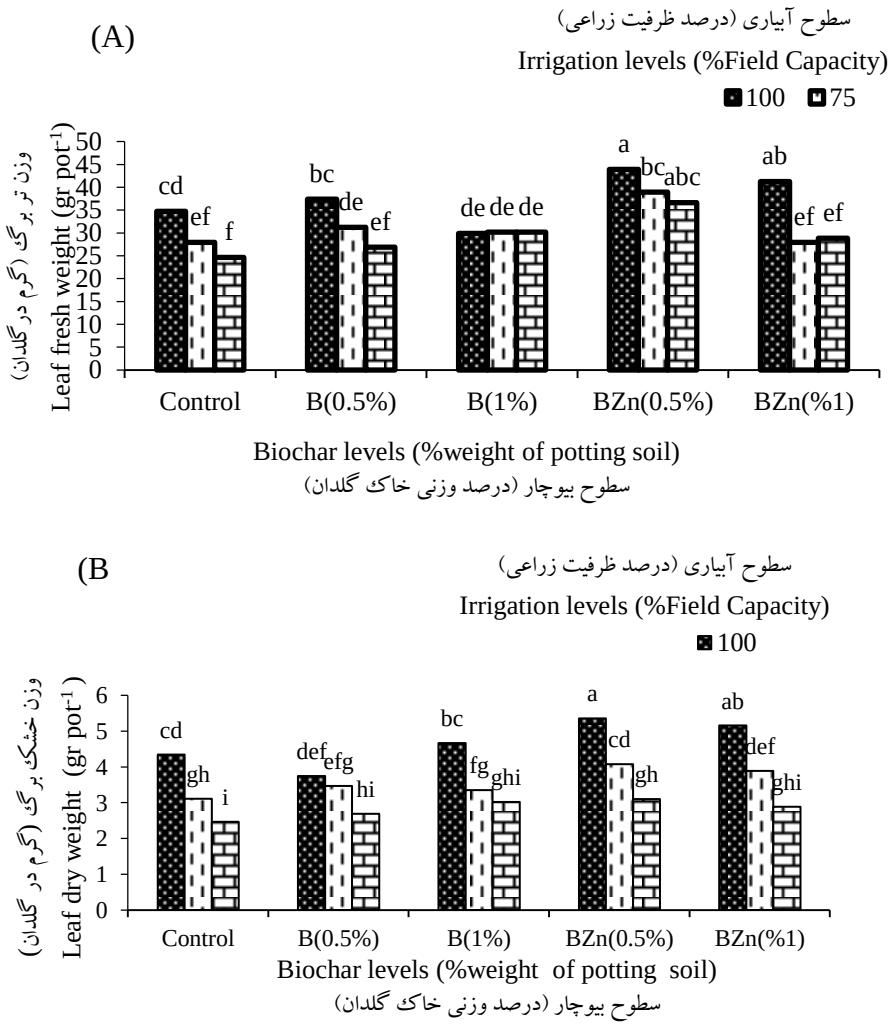
## وزن‌تر و خشک برگ

نتایج برهمکنش سطوح آبیاری و بیوچار (ساده و غنی‌شده) نشان داد که کم‌آبیاری وزن‌تر و خشک برگ ذرت را کاهش داد (شکل ۳)؛ درحالی‌که افزودن بیوچار ساده و غنی‌شده با نانو ذرات روی سبب افزایش این ویژگی شد؛ به‌طوری‌که بیش‌ترین وزن‌تر برگ (۴۳/۹۵ گرم در گلدان) در تیمار ۰/۵ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده در تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد؛ هرچند با تیمارهای ۱ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده در ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و تیمار ۰/۵ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده در تیمار ۷۵ درصد ظرفیت زراعی تفاوت معنی‌داری نشان نداد. کم‌ترین مقدار وزن‌تر برگ (۲۴/۶۴ گرم در گلدان) نیز در تیمار شاهد (عدم استفاده از بیوچار) و در سطح ۵۵ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد.

نتایج همچنین نشان داد (شکل ۳) که افزودن بیوچار ساده و غنی‌شده سبب افزایش وزن خشک هم در شرایط کم آبیاری (۵۵ و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی) و هم آبیاری کامل (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) شد؛ به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار (۵/۳۶ گرم در گلدان) در تیمار ۰/۵ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده در سطح ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به دست آمد که با تیمار ۱ وزنی بیوچار غنی‌شده در سطح ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی تفاوت معنی‌داری نداشت. کم‌ترین مقدار (۲/۴۶ گرم در گلدان) در تیمار شاهد (عدم استفاده از بیوچار) و سطح ۵۵ درصد ظرفیت زراعی مشاهده گردید که با برخی سطوح تفاوت معنی-داری نداشت.

کم¬آبی از طریق کاهش سطح برگ، بسته شدن روزنه‌ها، کاهش در قابلیت هدایت روزنه‌ها، کاهش در آبگیری کلروپلاست و سایر بخش‌های پروتوپلاسم و کاهش سنتز پروتئین و کلروفیل، اثر کاهنده بر فرایند فتوسنتز و درنهایت کاهش رشد و عملکرد گیاه دارد (۳). مطالعات دیگر کاهش ویژگی‌های رشدی ذرت تحت شرایط کمبود آب را گزارش کرده‌اند (۶۲)؛ که با نتایج این تحقیق مشابهت دارد. نتایج همچنین نشان داد که افزودن بیوچار (ساده و غنی-شده) سبب کاهش اثرات نامطلوب کم‌آبیاری و آلودگی آرسنیک و بهبود وزن‌تر و خشک برگ ذرت شد؛ به‌طوری‌که در صفات موردبررسی، بیوچار هم در شرایط کم‌آبیاری (۵۵ و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی) و هم آبیاری کامل (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) نسبت به سطح شاهد (عدم استفاده از بیوچار) سبب افزایش این ویژگی‌ها گردید؛ هرچند بین برخی سطوح تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد؛ اما به‌طورکلی کاربرد بیوچار ساده و غنی‌شده اثر مثبتی بر وزن‌تر و خشک برگ گیاه داشت. بیوچار می‌تواند به بهبود ساختار ریشه کمک کند، این امر سبب تسهیل جذب آب و مواد مغذی از خاک توسط گیاه می‌شود و به بهبود رشد گیاهان در شرایط تنش‌های محیطی (خشکی و شوری) کمک کند (۷۷). نتایج نشان داد بیوچار غنی‌شده با نانو ذرات روی اثرات

بهتری نسبت به بیوچار ساده بر وزن‌تر و خشک برگ ذرت داشت. این اثرات نانو ذرات ممکن است به دلیل یون‌های عنصری رهاشده از آن‌ها و یا مرتبط با خواص ویژه فیزیکوشیمیایی آن‌ها ازنظر حلالیت، بار سطحی، اثرات کوانتومی، کمپلکس شدن و سطح ویژه بالای آن‌ها باشد (۱۹). روی عنصری ضروری برای فعال‌سازی بسیاری از آنزیم‌های گیاهی است؛ بنابراین کمبود این عنصر سبب کاهش فتوسنتز و تولید پروتئین شده که در پی آن عملکرد گیاه کاهش می‌یابد؛ بنابراین با افزودن این عنصر فعالیت‌های آنزیم‌هایی مانند RNA و DNA پلیمراز، هورمون ایندول استیک اسید (IAA) و ژیبرلین افزایش یافته و درنهایت افزایش عملکرد گیاه را به دنبال دارد (۴۶).




**شکل(۳) برهمکنش بیوچار و کم‌آبیاری بر وزن‌تر (A) و وزن خشک برگ (B) ذرت**

**Control: شاهد، B(0.5%): تیمار ۰/۵ درصد وزنی بیوچار، B(1%): تیمار ۱ درصد وزنی بیوچار، BZn(0.5%): تیمار ۰/۵ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده، BZn(1%): تیمار ۱ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده.**

***تیمارهایی که دارای حروف یکسان‌اند اختلاف معنی‌دار ندارند**

**Figure (3) The interaction of biochar and deficit irrigation on the weight of leaves (A) and dry weight (B) of maize**

**Control: control, B(0.5%): treatment of 0.5% by weight of biochar, B(1%): treatment of 1% by weight of biochar, BZn(0.5%): treatment of 0.5% by weight of enriched biochar,**

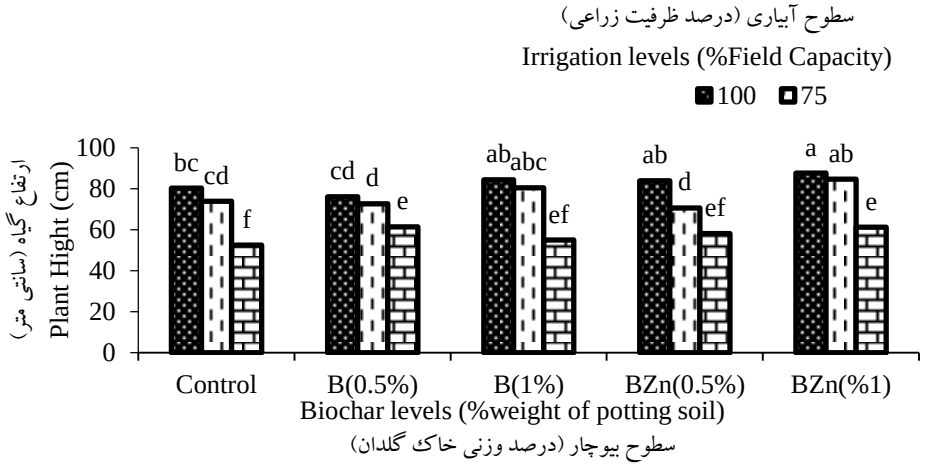
**BZn(1%): Treatment of 1 percent by weight of enriched biochar.**

***Treatments with the same letters do not have a significant difference**

**ارتفاع**

نتایج برهمکنش سطوح مختلف کم‌آبیاری و بیوچار (ساده و غنی‌شده) بر ارتفاع ذرت (شکل ۴) نشان داد که افزودن بیوچار سبب افزایش این ویژگی هم در شرایط کمبود آب و هم آبیاری کامل شد؛ به‌طوری‌که بیش‌ترین ارتفاع گیاه (۸۷/۸۶ سانتی‌متر) در تیمار ۱ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده و سطح آبیاری کامل ( درصد ۱۰۰ ظرفیت زراعی) مشاهده شد که با برخی سطوح تفاوت معنی‌داری نداشت. کم‌ترین میزان ارتفاع (۵۲/۵ سانتی‌متر) نیز در تیمار شاهد (عدم استفاده از بیوچار) و در سطح ۵۵ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد. روی عنصری است که در تولید هورمون اکسین که در رشد طولی گیاه مؤثر است، نقش اساسی دارد (۵۲)؛ بنابراین افزایش ارتفاع گیاه درنتیجه افزودن بیوچار غنی‌شده با نانو ذرات را می‌توان به این نقش عنصر روی مرتبط دانست. در گزارشی (۶۵) با بررسی اثر بیوچار اصلاح‌شده با نانو ذرات روی بر عملکرد گیاه برنج مشاهده شد که گیاهان تیمار شده با بیوچار اصلاح‌شده با نانو ذرات روی رشد و عملکرد بهتری ازنظر ارتفاع، زیست‌توده، تعداد سنبلچه‌های بارور و وزن ۱۰۰۰ دانه در مقایسه با تیمار شاهد داشتند که هم‌راستا با نتایج پژوهش حاضر است.

کاهش ارتفاع گیاه علاوه بر کم‌آبیاری می‌تواند به تأثیر نامطلوب آرسنیک مرتبط باشد (۴۷) مطابق تحقیقات صورت گرفته تجمع آرسنیک در سلول‌های گیاهی با تأثیر بر فرآیندهایی که منجر به نقص رشد می‌شوند مانع رشد رویشی گیاه می‌شود (۵۵). در این تحقیق کاربرد بیوچار ساده و غنی‌شده در شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری اثر منفی آرسنیک بر ارتفاع گیاه را کاهش داد. علاوه بر این نقش مؤثر بیوچار در بهبود جذب آب و مواد مغذی از خاک در شرایط آلودگی آرسنیک می‌تواند در افزایش رشد رویشی گیاه مؤثر باشد (۵۵). نتایج تحقیقی (۵۴) در خصوص اثر بیوچار بر ویژگی‌های رشدی ذرت تحت تنش آرسنیک نشان داد که در مقایسه با گیاهان شاهد (بدون تنش آرسنیک)، ارتفاع گیاهان تیمار شده با آرسنیک ۱۴/۷۵ درصد کاهش یافت؛ درحالی‌که ارتفاع گیاهان تیمار شده با بیوچار در سطوح آلوده‌شده به آرسنیک ۳۴/۷۰ درصد افزایش یافت.




**شکل ٤- برهمکنش بیوچار و کم‌آبیاری بر ارتفاع ذرت**

**Control: شاهد، B(0.5%): تیمار ۰/۵ درصد وزنی بیوچار، B(1%): تیمار ۱ درصد وزنی بیوچار، BZn(0.5%): تیمار ۰/۵ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده، BZn(1%): تیمار ۱ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده.**

***تیمارهایی که دارای حروف یکسان‌اند اختلاف معنی‌دار ندارند**

**Figure(4) Interaction of biochar and deficit irrigation on height of maize**

**Control: control, B(0.5%): treatment of 0.5% by weight of biochar, B(1%): treatment of 1% by weight of biochar, BZn(0.5%): treatment of 0.5% by weight of enriched biochar, BZn(1%): Treatment of 1% by weight of enriched biochar.**

***Treatments with the same letters do not have a significant difference**

## تعداد برگ سالم و خشک

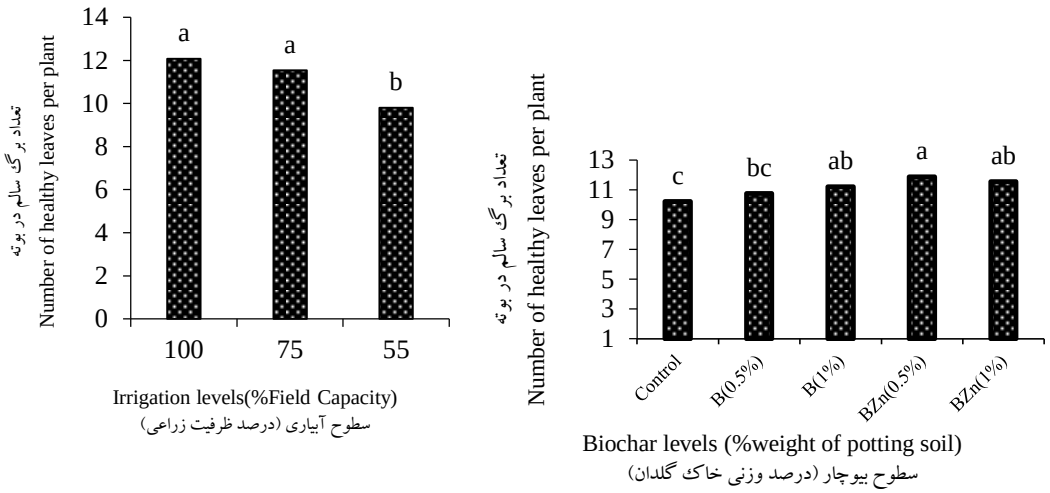
نتایج (شکل ۵) اثر اصلی کم آبیاری بر تعداد برگ سالم ذرت نشان داد که در سطح ۵۵ درصد ظرفیت زراعی کاهش معنی‌دار تعداد برگ مشاهده شد؛ به‌طوری‌که نسبت به سطح ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی تعداد برگ سالم ۱۸/۷۴ درصد و برای سطح ۷۵ درصد ظرفیت زراعی ۴/۴۲ کاهش یافت که تفاوت معنی‌داری با سطح ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی نشان نداد. نتایج همچنین بیانگر این است که اثر اصلی بیوچار ساده و غنی‌شده با نانو ذرات روی سبب افزایش تعداد برگ سالم ذرت شد؛ به‌طوری‌که به ترتیب در تیمارهای ۰/۵ درصد وزنی بیوچار ساده، ۱ درصد وزنی بیوچار ساده، ۰/۵ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده و ۱ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده، تعداد برگ سالم ۵/۴۳، ۹/۷۸، ۱۶/۳۰ و ۱۳/۰۵ درصد افزایش یافت.

نتایج برهمکنش سطوح مختلف کم‌آبیاری و بیوچار (ساده و غنی‌شده) بر تعداد برگ خشک ذرت (شکل ۶) نشان داد که کم‌آبیاری سبب افزایش تعداد برگ خشک در ذرت شد، به‌طوری‌که بیش‌ترین برگ خشک (۷ عدد در بوته) در تیمار شاهد (عدم استفاده از بیوچار) و سطح ۵۵ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد. درحالی‌که کاربرد بیوچار به‌صورت ساده و غنی‌شده سبب کاهش این ویژگی شد، به‌طوری‌که کمترین تعداد برگ خشک (۳ عدد در بوته) در تیمار ۱ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده و سطح ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به‌دست آمد. همان‌طور که مشاهده شد در کم‌ترین سطح آبیاری (سطح ۵۵ درصد ظرفیت زراعی) کاربرد بیوچار به‌صورت ساده و غنی‌شده اثر معنی‌داری بر این ویژگی نداشت.

مطابق نتایج افزایش تعداد برگ گیاه ذرت نیز همانند سایر ویژگی‌های رویشی تحت شرایط کم‌آبیاری کاهش یافت. تحقیقات نشان داده است زمانی که گیاهان در معرض کم‌آبی قرار می‌گیرند، انعطاف‌پذیری دیواره سلول‌های در حال رشد اندام‌ها، معمولاً کاهش می‌یابد؛ بنابراین توسعه سلولی و رشد کاهش می‌یابد (۱۳). در تحقیقات مشابه کاهش تعداد برگ گیاه ذرت تحت شرایط کم‌آبی گزارش شده است (۶۲). بهبود توسعه برگ گیاه درنتیجه افزودن بیوچار (ساده و غنی‌شده) را نیز می‌توان به افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت خاک درنتیجه استفاده از بیوچار دانست که باعث می‌شود در فواصل بین آبیاری‌ها، سطح رطوبت در وضعیت مطلوب‌تری حفظ شود که این خود باعث افزایش عملکرد گیاه می‌شود (۱۷). علاوه بر کم‌آبیاری از دلایل عدم توسعه برگ‌های ذرت و افزایش تعداد برگ خشک به اثر نامطلوب آرسنیک می‌توان اشاره کرد. کاهش رشد گیاهان و تغییر در پارامترهای مربوط به رشد، به‌عنوان یک پاسخ عمومی در برابر تنش فلزهای سنگین محسوب می‌شود که در اغلب گونه‌های گیاهی گزارش شده است (۵۹). مشاهدات نشان داده است که خواص ساختاری برگ، مانند ضخامت برگ، سطح برگ و تعداد برگ، به‌طور مستقیم تحت تأثیر نامطلوب آرسنیک قرار می‌گیرد (۱۲). در گزارشی با بررسی اثر آرسنیک بر ویژگی‌های رشدی ذرت تحت تنش آرسنیک کاهش رشد و توسعه برگ ذرت مشاهده شد که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد (۵۱).

## صفات فیزیولوژیک

جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی و برهمکنش سطوح کم‌آبیاری و بیوچار (ساده و غنی‌شده) بر ویژگی‌های فیزیولوژیک ذرت شامل محتوی نسبی آب برگ، نشت یونی، کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کارتنوئید در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۵).



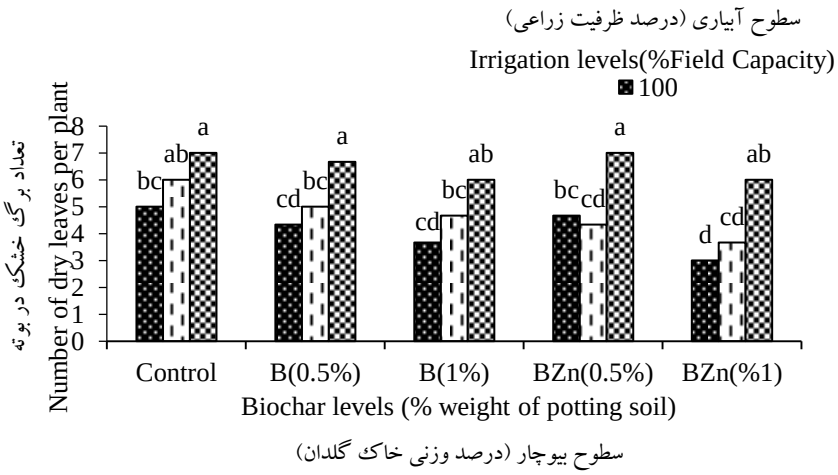

**شکل (۵) اثرات اصلی بیوچار و کم‌آبیاری بر تعداد برگ سالم در بوته ذرت**

**Control: شاهد، B(0.5%): تیمار ۰/۵ درصد وزنی بیوچار، B(1%): تیمار ۱ درصد وزنی بیوچار، BZn(0.5%): تیمار ۰/۵ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده، BZn(1%): تیمار ۱ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده.**

***تیمارهایی که دارای حروف یکسان‌اند اختلاف معنی‌دار ندارند**

**Figure (5) The main effects of biochar and deficit irrigation on the number of healthy leaves in maize plants**
**Control: control, B(0.5%): treatment of 0.5% by weight of biochar, B(1%): treatment of 1% by weight of biochar, BZn(0.5%): treatment of 0.5% by weight of enriched biochar, BZn(1%): Treatment of 1 percent by weight of enriched biochar.**

***Treatments with the same letters do not have a significant difference**




**شکل (٦) برهمکنش بیوچار و کم‌آبیاری بر تعداد برگ خشک در بوته ذرت**

**Control: شاهد، B(0.5%): تیمار ۰/۵ درصد وزنی بیوچار، B(1%): تیمار ۱ درصد وزنی بیوچار، BZn(0.5%): تیمار ۰/۵ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده، BZn(1%): تیمار ۱ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده.**

***تیمارهایی که دارای حروف یکسان‌اند اختلاف معنی‌دار ندارند**

**Figure (6) The interaction of biochar and deficit irrigation on the number of dry leaves in maize plants**
**Control: control, B(0.5%): treatment of 0.5% by weight of biochar, B(1%): treatment of 1% by weight of biochar, BZn(0.5%): treatment of 0.5% by weight of enriched biochar, BZn(1%): Treatment of 1 percent by weight of enriched biochar.**

***Treatments with the same letters do not have a significant difference**

**جدول (۵) نتایج تجزیه واریانس اثر بیوچار و کم‌آبیاری بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی ذرت در خاک آلوده به آرسنیک**

**Table (5) The results of analysis of variance of the effect of biochar and irrigation levels on the physiological characteristics of maize in soil contaminated with arsenic**

| کارتنوئید Carotenoids | کلروفیل کل Total chlorophyll | کلروفیل b chlorophyll b | کلروفیل a chlorophyll a | نشت یونی EL | محتوی نسبی آب برگ RWC | df | منابع تغییرات Source of variation |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7.39** | 136.5** | 41.87** | 28.21** | 4374.2** | 2580.9** | 2 | سطوح آبیاری (A) Irrigation level |
| 6.83** | 43.25** | 7.00** | 22.58** | 98.41** | 93.77** | 4 | بیوچار (B) Biochar |
| 1.09** | 31.69** | 5.78** | 21.68** | 62.22** | 33.74** | 8 | B×A |
| 0.25 | 3.01 | 0.61 | 0.99 | 16.45 | 8.73 | 30 | خطا Error |
| 10.8 | 11.27 | 10.18 | 10.51 | 8.94 | 4.82 | - | (%) CV |

** معنی‌دار در سطح یک درصد

**statistical significanc at the level of p<0.0.1

RWC: Relative water content, LE: Electrolyte leakage

## محتوی نسبی آب برگ

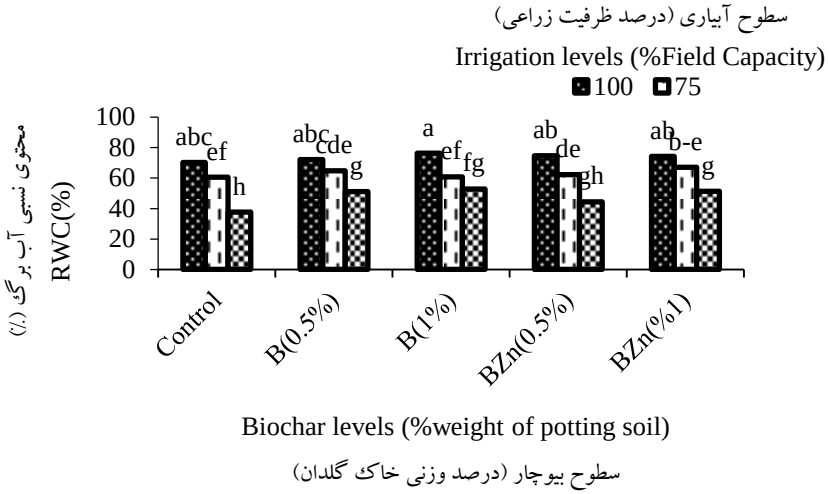
نتایج برهمکنش سطوح مختلف کم‌آبیاری و بیوچار (ساده و غنی‌شده) بر محتوی نسبی آب برگ (شکل ۷) نشان داد که کاربرد بیوچار سبب افزایش این ویژگی در شرایط کمبود آب (سطح ۷۵ و ۵۵ درصد ظرفیت زراعی) شد؛ درحالی‌که در شرایط آبیاری کامل (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) افزودن بیوچار ساده و غنی‌شده اثر معنی‌داری بر محتوی نسبی آب برگ نداشت؛ هرچند بیش‌ترین مقدار آن (۷۹/۱۹۴ درصد) در تیمار ۱ درصد وزنی بیوچار ساده مشاهده گردید. نتایج همچنین نشان داد که کم‌آبیاری سبب کاهش محتوی نسبی آب برگ ذرت شد به‌طوری‌که کم‌ترین مقدار آن (۳۷/۶۳ درصد) در تیمار شاهد (عدم استفاده از بیوچار) و در سطح ۵۵ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد که با تیمار ۰/۵ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده در این سطح آبیاری تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۸). کاهش محتوی نسبی آب برگ از دیگر اثرات تنش کم‌آبی است. بین محتوای نسبی آب برگ، پتانسیل آب گیاه، باز نگه‌داشتن روزنه‌ها، فتوسنتز و درنتیجه عملکرد گیاه ارتباط نزدیکی وجود دارد (۲۷)؛ بنابراین محتوی نسبی آب برگ معرف خوبی از وضعیت آبی گیاه است که به‌عنوان یک شاخص مهم جهت تحمل به خشکی پیشنهاد شده است. محققان بیان کردند که گیاهان می‌توانند در شرایط کم‌آبی ناچیز محتوی نسبی آب برگ خود را حفظ نمایند درحالی‌که در تنش شدید با کاهش آن مواجه خواهند شد (۷). نتایج تحقیقات بذرگر و همکاران (۱۱) بر درصد محتوی نسبی آب برگ گیاه ذرت بچه (رقم پشن) نشان داد که تنش کم‌آبیاری ۲۰ درصد آبیاری کامل کاهش معنی‌داری بر این ویژگی داشت که مشابه نتایج این پژوهش است. تحقیقات نشان داده است که بیوچار از طریق افزایش محتوای کربن خاک، موجب افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت خاک می‌گردد که این امر سبب بهبود روابط آبی گیاه در شرایط تنش کم‌آبی می‌شود (۱۶). افزیش محتوی نسبی گیاه در تیمارهای تحت استفاده از بیوچار غنی‌شده به تاثیر عنصر روی به بهبود بافت آوندی گیاه و جلوگیری از تخریب آنها در ارتباط است (۲۳). مطالعات مشابه اثر روی در افزایش محتوی نسبی آب را گزارش کرده‌اند که مشابه نتایج این تحقیق است (۲ و ۳۴).

## نشت یونی

نتایج برهمکنش سطوح مختلف کم‌آبیاری و بیوچار (ساده و غنی‌شده) بر میزان نشت یونی ذرت نشان داد که تنش کم آبیاری سبب افزایش نشت یونی شد (شکل ۸)؛ به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار (۶۸/۹۱ درصد) در تیمار شاهد (عدم استفاده از بیوچار) و در بالاترین سطح تنش (۵۵ درصد ظرفیت زراعی) به

دست آمد. همان‌طور که مشاهده شد افزودن بیوچار جز در سطح ۱ درصد وزنی بیوچار در سایر سطوح بیوچار (به‌صورت ساده و غنی‌شده) در تنش ۵۵ درصد ظرفیت زراعی اثر معنی‌داری بر نشت یونی گیاه نداشت. نتایج همچنین نشان داد که کم‌ترین مقدار نشت یونی (۱۹/۶۵ درصد) در تیمار ۰/۵ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده و در سطح ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد که با تیمارهای ۱ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده و ساده و تیمار شاهد (عدم استفاده از بیوچار) در این سطح آبیاری تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۹). تنش‌های محیطی سبب افزایش تجمع گونه‌های فعال اکسیژن، پراکسیداسیون لیپیدی و اسیدهای چرب غیراشباع غشای سلولی می‌گردد (۴۳)؛ پراکسیداسیون لیپیدی غشاء سبب تجمع محتوی مالون‌دی‌آلدئید در گیاه می‌شود درنتیجه ثبات غشای سلولی به‌تدریج کاهش یافته و نشت یون‌ها اتفاق می‌افتد (۲۰). محققان اثر بیوچار بر کاهش نشت الکرولیت تحت تنش کم‌آبی را به نقش بیوچار در نگهداری آب خاک و آب قابل استفاده برای گیاه مرتبط می‌دانند که می‌توانند منجر به کاهش نشت یونی در گیاه شوند (۳۲).

کاهش محتوی محتوی نسبی آب برگ و افزایش نشت یونی ذرت را علاوه بر تنش کم‌آبیاری می‌توان به اثر نامطلوب آرسنیک مرتبط دانست. محققان عامل اصلی اثرات نامطلوب آرسنیک در گیاه را افزایش تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن می‌دانند که تخریب ساختار غشاء و تحریک پراکسیداسیون لیپیدها را به دنبال دارد (۲۶). غشاهای زیستی هدف اصلی آسیب‌پذیر در خسارت‌های سلولی القایی توسط آرسنیک می‌باشند، به‌طوری‌که میزان آسیب واردشده به غشاء را شاخص اصلی تحمل یا حساسیت در برابر تنش‌ها می‌دانند. آسیب غشایی موجب به‌هم‌ریختگی وضعیت جذب مواد ضروری از خاک، نقصان هدایت روزنه‌ای و درنهایت کاهش محتوای آب درون سلول‌ها می‌گردد (۲۸).




**شکل (۷) برهمکنش بیوچار و کم‌آبیاری بر محتوی نسبی آب برگ ذرت**

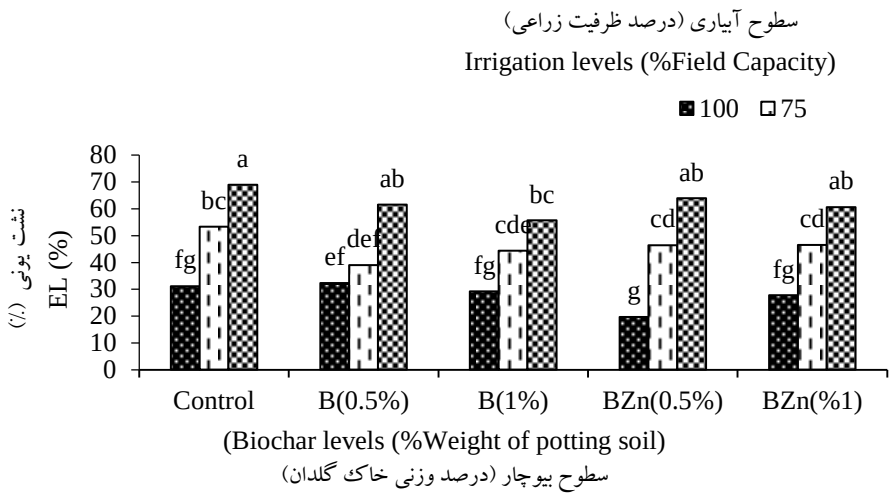
**Control: شاهد، B(0.5%): تیمار ۰/۵ درصد وزنی بیوچار، B(1%): تیمار ۱ درصد وزنی بیوچار، BZn(0.5%): تیمار ۰/۵ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده، BZn(1%): تیمار ۱ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده.**

***تیمارهایی که دارای حروف یکسان‌اند اختلاف معنی‌دار ندارند**

**Figure (7) Interaction effect of biochar and deficit irrigation on maize Relative water content**

**Control: control, B(0.5%): treatment of 0.5% by weight of biochar, B(1%): treatment of 1% by weight of biochar, BZn(0.5%): treatment of 0.5% by weight of enriched biochar, BZn(1%): Treatment of 1% by weight of enriched biochar.**

***Treatments with the same letters do not have a significant difference**




**شکل (۸) برهمکنش بیوچار و کم‌آبیاری بر نشت یونی برگ ذرت**

**Control: شاهد، B(0.5%): تیمار ۰/۵ درصد وزنی بیوچار، B(1%): تیمار ۱ درصد وزنی بیوچار، BZn(0.5%): تیمار ۰/۵ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده، BZn(1%): تیمار ۱ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده.**

***تیمارهایی که دارای حروف یکسان‌اند اختلاف معنی‌دار ندارند**

**Figure (8) Interaction effect of biochar and deficit irrigation on the electrolyte leakage (EL) of maize leaves**

**Control: control, B(0.5%): treatment of 0.5% by weight of biochar, B(1%): treatment of 1% by weight of biochar, BZn(0.5%): treatment of 0.5% by weight of enriched biochar, BZn(1%): Treatment of 1 percent by weight of enriched biochar.**

***Treatments with the same letters do not have a significant difference**

## رنگیزه‌های فتوسنتزی

### کلروفیل a

نتایج برهمکنش سطوح مختلف کم‌آبیاری و بیوچار (ساده و غنی‌شده) بر کلروفیل a (شکل ۹ (A)) نشان داد که افزودن بیوچار غنی‌شده سبب افزایش معنی‌دار این ویژگی هم در شرایط آبیاری کامل و هم کم‌آبیاری (سطح ۷۵ و ۵۵ درصد ظرفیت زراعی) شد؛ به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار آن (۱۷/۵۲ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ) در شرایط آبیاری کامل و تیمار یک درصد وزنی بیوچار غنی‌شده مشاهده شد. نتایج همچنین نشان داد که (شکل ۹ (A)) کم‌آبیاری سبب کاهش محتوی کلروفیل a ذرت شد به‌طوری‌که کم‌ترین مقدار آن (۶/۲ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ) نیز در تیمار شاهد (عدم استفاده از بیوچار) و در سطح ۷۵ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد که با برخی سطوح تفاوت معنی‌داری نداشت.

### کلروفیل b

نتایج برهمکنش سطوح مختلف کم‌آبیاری و بیوچار (ساده و غنی‌شده) بر کلروفیل b (شکل ۹ (B)) نشان داد که افزودن بیوچار (غنی‌شده و ساده) سبب افزایش این ویژگی شد؛ به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار آن (۸/۷۳ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ) در اثر کاربرد ۱ درصد وزنی خاک بیوچار ساده و سطح ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد. همچنین نتایج نشان داد که تنش کم‌آبیاری سبب کاهش محتوی کلروفیل b ذرت شد؛ به‌طوری‌که کم‌ترین مقدار آن (۲/۲۹ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ) در تیمار شاهد (عدم استفاده از بیوچار) و در سطح ۵۵ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد (شکل ۹ (B)).

### کلروفیل کل

نتایج برهمکنش سطوح مختلف کم‌آبیاری و بیوچار (ساده و غنی‌شده) بر کلروفیل کل (شکل ۹ (C)) نشان داد

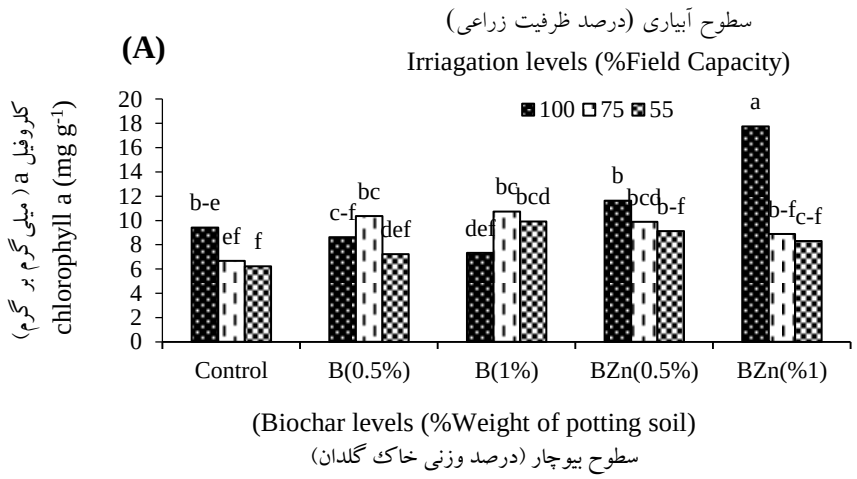
کـه افـزودن بیوچـار غنـی‌شـده سـبب افـزایش معنـی‌دار کلروفیل کل شد؛ درحـالی‌کـه کـم‌آبیـاری سـبب کـاهش کلروفیل کل شد؛ به‌طـوری‌کـه بـیش‌تـرین مقـدار آن (۲۶ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تـر بـرگ) در اثـر کـاربرد ۱ درصـد وزنی بیوچار غنی‌شده و سطح ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعـی و کم‌ترین مقدار (۸/۹۵ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ) در تیمار شاهد (عدم اسـتفاده از بیوچـار) و سـطح ۵۵ درصـد ظرفیت زراعی مشاهده شد؛ که با تیمارهای ۱ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده و ۰/۵ وزنـی بیوچـار سـاده در ایـن سـطح (۵۵ درصد ظرفیت زراعی) تفاوت معنی‌داری نداشت.

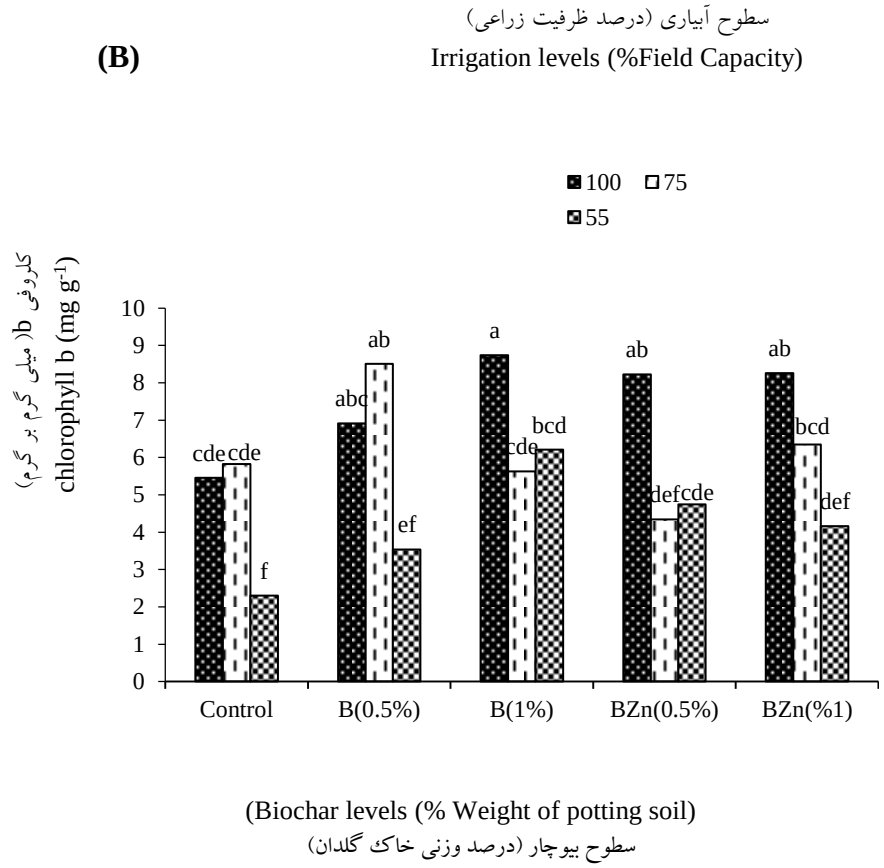
**کارتنوئید**

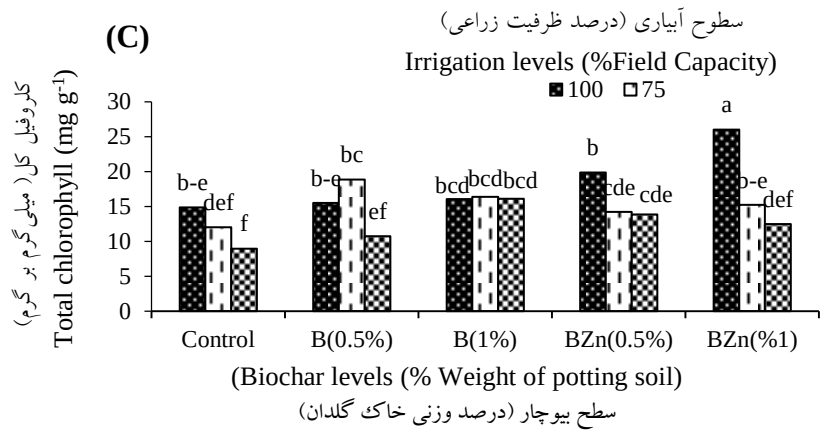
نتایج برهمکنش سطوح مختلف کم‌آبیاری و بیوچـار (ساده و غنی‌شده) نشان داد که افزودن بیوچار (غنی‌شده و ساده) بر کارتنوئید (شـکل ۹ (D))، سـبب افـزایش مقـدار این ویژگی شد؛ به‌طوری‌کـه بـیش‌تـرین مقـدار آن (۵/۶۹ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تـر بـرگ) در اثـر کـاربرد ۱ درصـد وزنـی خـاک بیوچـار سـاده و سـطح ۱۰۰ درصـد ظرفیـت زراعی مشاهده شد، هرچند بـا تیمارهـای ۱ درصـد وزنـی بیوچـار غنـی‌شـده در سـطوح ۷۵ و ۱۰۰ درصـد ظرفیـت زراعـی تفـاوت معنـی‌داری نداشـت. نتـایج نشـان داد کـه (شـکل ۹ (D))، کارتنوئیـد نیـز ماننـد سـایر رنگیـزه‌هـای فتوسنتزی تحت شرایط کم‌آبیاری کاهش یافت و کم‌ترین مقدار آن (۱/۷۴ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر بـرگ) در تیمـار شـاهد (عـدم اسـتفاده از بیوچـار) و در سـطح ۵۵ درصـد ظرفیت زراعی مشاهده شد.

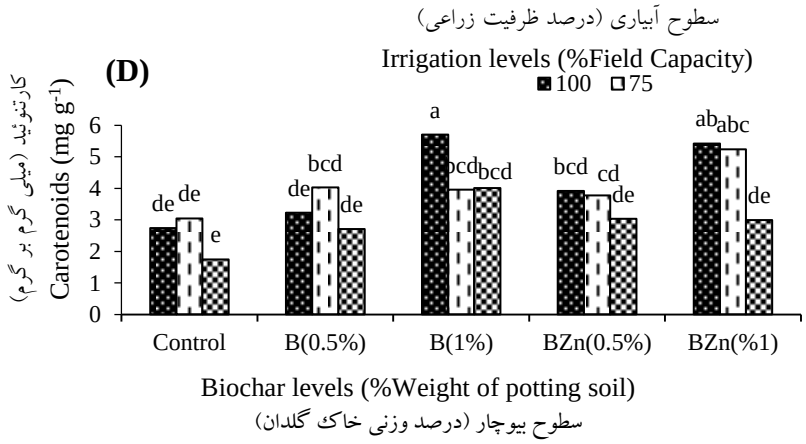
تحقیقات نشان داده است کاهش مقـدار کلروفیـل در اثر تنش کـم‌آبـی، بـه دلیـل افـزایش تولیـد رادیکـال‌هـای اکسـیژن اسـت کـه موجـب پراکسیداسـیون و تجزیـه ایـن رنگیزه‌ها می‌گردد (۸). اثر مطلوب بیوچـار بـر پارامترهـای فیزیولوژیک گیاه در شرایط کم‌آبیـاری مـی‌توانـد مطـرح کننده بهبود توانایی خاک تیمار شده با بیوچار در افـزایش قابلیت دسترسـی ریشـه بـه عناصـر غـذایی باشـد. افـزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی در اثر کاربرد بیوچار غنی‌شـده نـانو ذرات روی را می‌توان به نقش مکمل روی در پشـتیبانی از فعال شدن منیزیم و منگنز برای بیوسنتز رنگ‌دانه‌ها مـرتبط دانست (۲۶). در گزارشی کاربرد نانوذره روی سبب رشـد بهتر، افزایش زیست‌توده و محتـوای کلروفیـل گیـاه ذرت شد (۳۶) که با نتایج این تحقیق مشابهت دارد.

علاوه بر کـم‌آبیـاری آرسـنیک بـر کـاهش محتـوی رنگیـزه‌هـای فتوسـنزی دخیـل اسـت. طبـق تحقیقـات هنگامی‌که گیاهـان مقـادیر زیـادی آرسـنیک را از خـاک جذب مـی‌کننـد، سـمیت آرسـنیک، منجـر بـه مهـار سـنتز رنگیزه‌های کلروفیل (۵۶) با تداخل در عملکـرد کلروفیـل سـنتتاز مـی‌شـود (۷۴). مقـدار کلروفیـل بـر سـرعت رشـد گیاهان تأثیر می‌گذارد، بنـابراین مـی‌توانـد بـه‌عنـوان یـک شاخص مهم برای اندازه‌گیری درجه تنش فلزهای سـنگین بـر روی گیاهـان اسـتفاده شـود. کاروتنوئیـدها بـا افـزایش تحمـل یـا مقاومـت بـه تـنش اکسـیداتیو نقـش مهمـی در پاسخ‌هـای دفـاعی گیاهـان دارنـد. کـاهش توانـایی سـلول گیاهی برای حذف گونه‌های فعال اکسیژن ممکن است از کاهش غلظت کاروتنوئید ناشی شود به‌طور خلاصه، برای گیاهـانی کـه تحـت آلـودگی آرسـنیک رشـد مـی‌کننـد، محتـوای کـم کلروفیـل a و کاروتنوئیـد نشـان‌دهنـده بیش‌ترین تغییرات در رنگ‌دانـه‌هـای فتوسـنتزی ناشـی از سمیت آرسنیک است (۵۵).


(A)
سطوح آبیاری (درصد ظرفیت زراعی)
Irriagation levels (%Field Capacity)
100 75 55
کلروفیل a ( میلی گرم بر گرم)
chlorophyll a (mg g-1)
Control
B(0.5%)
B(1%)
BZn(0.5%)
BZn(%1)
(Biochar levels (%Weight of potting soil)
سطوح بیوچار (درصد وزنی خاک گلدان)


(B)
سطوح آبیاری (درصد ظرفیت زراعی)
Irrigation levels (%Field Capacity)
100 75
55
کلروفی b( میلی گرم بر گرم)
chlorophyll b (mg g-1)
Control
B(0.5%)
B(1%)
BZn(0.5%)
BZn(%1)
(Biochar levels (% Weight of potting soil)
سطوح بیوچار (درصد وزنی خاک گلدان)




**شکل (۹) برهمکنش بیوچار و کم‌آبیاری بر محتوی کلروفیل a (A)، کلروفیل b (B)، کلروفیل کل (C) و کارتنوئید (D) برگ ذرت**

**Control: شاهد، B(0.5%): تیمار ۰/۵ درصد وزنی بیوچار، B(1%): تیمار ۱ درصد وزنی بیوچار، BZn(0.5%): تیمار ۰/۵ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده، BZn(1%): تیمار ۱ درصد وزنی بیوچار غنی‌شده.**

***تیمارهایی که دارای حروف یکسان‌اند اختلاف معنی‌دار ندارند**

**Figure (9) The interaction effect of biochar and deficit irrigation on the content of chlorophyll a (A), chlorophyll b (B), total chlorophyll (C) and carotenoids (D) in maize leaves**

**Control: control, B(0.5%): treatment of 0.5% by weight of biochar, B(1%): treatment of 1% by weight of biochar, BZn(0.5%): treatment of 0.5% by weight of enriched biochar, BZn(1%): Treatment of 1 percent by weight of enriched biochar**

**Treatments with the same letters do not have a significant difference**

## نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر افزودن بیوچار (ساده و غنی‌شده) سبب بهبود ویژگی‌های رشد، محتوی رنگیزه‌های فتوسنتزی و افزایش جذب روی و کاهش اثر نامطلوب کم‌آبیاری و آرسنیک بر ویژگی‌های مذکور شد. کم‌آبیاری سبب افزایش مقدار جذب آرسنیک و کاهش جذب روی در گیاه شد. مطابق نتایج نقش بیوچار غنی‌شده در کاهش جذب آرسنیک چشمگیرتر بود؛ به‌طوری‌که در تیمارهای غنی‌شده ۷۱/۳۵ و ۵۰ درصد و در تیمارهای ساده (غنی‌نشده) ۵۴/۸ و ۴۱/۶ درصد جذب آرسنیک کاهش یافت؛ که به نقش موثر عنصر روی در کاهش جذب آرسنیک توسط گیاه مرتبط است؛ از این رو، استفاده از بیوچار به‌صورت غنی‌شده با نانو ذرات روی می‌تواند راهی موثر برای رشد بهتر گیاهان در خاک‌های آلوده به آرسنیک و در شرایط کم‌آبیاری پیشنهاد گردد.

**Reference**

1. Abbasi Surki, A., Nazari, M., Fallah, S., Iranipour, R., and Mousavi, A. 2020. The competitive effect of almond trees on light and nutrients absorption, crop growth rate, and the yield in almond–cereal agroforestry systems in semi-arid regions. Journal of Agroforestry Systems, 94(3): 1111-1122. https://doi.org/10.1007/s10457-019-00469-2

2. Abdi, N., Van Biljon, A., Steyn, C., and Labuschagne, M. 2023. Zn fertilizer and mycorrhizal inoculation effect on bread wheat cultivar grown under water deficit. Journal of Life, 13(5):1078. https://doi.org/10.3390/life13051078

3. Alizadeh, O., Majidi Harvan, I., Nadian, H.E., Nurmohammadi, G.h., and Amarian, M.R. 2008. Effect of water stress and different nitrogen rates on phenology, growth and development of corn. Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources, 14 (5): 116-128. (In Persian with English abstract)

4. Adrees, M., Saeed Khan, Z., Hafeez, M., Rizwan, M., Hussain, K.h., Asrar, M., Alyemeni, M.N., Wijaya, L., and Ali, Sh. 2021. Foliar exposure of zinc oxide nanoparticles improved the growth of wheat (Triticum aestivum L.) and decreased cadmium concentration in grains under simultaneous Cd and water deficient stress. Journal of Ecotoxicology and Environmental Safety, 208: 111627. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111627

5. Ahmad, P., Alyemeni, M.N., Al-Huqail, A., Alqahtani, M., Wijaya, L., Ashraf, M., Kaya, C., and Bajguz, A. 2020. Zinc Oxide Nanoparticles Application Alleviates Arsenic (As) Toxicity in Soybean Plants by Restricting the Uptake of as and Modulating Key Biochemical Attributes, Antioxidant Enzymes, Ascorbate-Glutathione Cycle and Glyoxalase System. Journal of Plants, 9: 825. https://doi.org/10.3390/plants9070825

6. Asghari Moghaddam, A., and Barzegar, I.R. 2015. Considering Factors Affecting High Arsenic Concentration in Groundwater Resources of Tabriz Plain Aquifers. Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 24(94): 177-190. https://doi.org/10.22071/gsj.2015.43280

7. Babaei, K., Moghaddam, M., Farhadi, N., and Pirbalouti, A.G. 2021. Morphological, physiological and phytochemical responses of Mexican marigold (Tagetes minuta L.) to drought stress. Journal of Scientia Horticulturae, 284: 110116. http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110116

8. Bacelar, E.A., Santos, D.L., Moutinho-Pereira, J.M., Goncalves, B.C., Ferreira, H.F., and Correia, C.M. 2006. Immediate responses and adaptative strategies of three olive cultivars under contrasting water availability regimes: changes on structures and chemical composition of foliage and oxidative damage. Journal of Plant Science, 170: 596-605. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2005.10.014

9. Bhat, P. 2024. Enhancing Drought and Arsenic Resistance in Oryza sativa by Hyperexpression of Aquaporin Genes. Preprints Organizations. doi: 10.20944/preprints202405.1280.v1

10. Bakhat, H.F., Zia, Z., Abbas, S., Hammad, H.M., Shahzad, H., Abbas, A., Alharby, H., and Shahid, M. 2017. Arsenic uptake, accumulation and toxicity in rice plants: possible remedies for its detoxification: A review, Journal of Environmental Science and Pollution Research, 24(10): 9142-9158. https://doi.org/10.1007/s11356-017-8462-2

11. Barzegar, G., Navabi Kalat, S.M., Khavari Khorasani, S., Ghasemi, M., and Kelidari, A. 2022. Effect of Deficit Irrigation Stress and Plant Density on Antioxidant Enzymes Activity, Compatible Osmolytes, Relative Water Content and Yield of Baby Corn (Pashan Cultivar). Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 15(6): 1370-1381. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20087942.1400.15.6.12.2 (In Persian with English abstract)

12. Bandaru, V., Hansen, D.J., Codling, E.E., Daughtry, C.S., White-Hansen, S., and Green, C.E. 2010. Quantifying arsenic-induced morphological changes in spinach leaves: Implications for remote sensing. International Journal of Remote Sensing, 31: 4163–4177. https://doi.org/10.1080/01431161.2010.498453

13. Basra, A.S., and Basra, R.K., 1997. Mechanism of environmental stress resistance in plants. First edition, published by Harward Academic, 480 p. https://doi.org/10.1201/9780203747803

14. Baligar, V.C., Fageria, N.K., and He, Z.L. 2001. Nutrient use efficiency in plants. Journal of Communications in Soil Science and Plant Analysis, 32: 921-950. https://doi.org/10.1081/CSS-100104098

15. Bremner, J.M., and Mulvaney, C.S. 1982. Nitrogen-Total. In: Al P, Keeney DR, Baker DE, Miller RH, editors. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. 2nd edn. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America, pp: 594–624. https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed

16. Chanda, G.K., Bhunia, G., and Chakraborty, S.K. 2011. The effect of vermicompost and other fertilizers on cultivation of tomato plants. Journal of Horticulture and Forestry, 3(2): 42-45.

17. Esvand, F., Karimi, A., Motaghian, H.R., and Mohammadi, J. 2020. Comparison of biochar effects of cow manure and sugarcane residues on moisture content of sandy loam soil. Journal of Iranian Water Researches, 14(3): 171- 178. (In Persian)

18. Esmaily, M., Dadashi, M.R., Feyzbakhsh, M.T., Kaboosi, K., and Sheikh, F. 2024. Influence of deficit Irrigation regimes on the quantitative and qualitative yield of forage maize hybrids. Journal of Crop Health, 76(2): 549-560. https://doi.org/10.1007/s10343-024-00973-1

19. Farooqui, A., Tabassum, H., Ahmad, A., Mabood, A., Ahmad, A., and Ahmad, I. Z. 2016. Role of nanoparticles in growth and development: A review. International Journal of Pharmacy and Biological Sciences 7: 22 -37. https://doi.org/10.22376/IJPBS.2016.7.4.P22-37

20. Gapińska, M., Skłodowska, M., and Gabara, B. 2008. Effect of short-and long-term salinity on the activities of antioxidative enzymes and lipid peroxidation in tomato roots. Journal of Acta Physiologiae Plantarum, 30(1): 11. https://doi.org/10.1007/s11738-007-0072-z

21. Gaskin, J., C., Steiner, K., Harris, K., Das, and Bibens, B. 2008. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. Journal of American Society of Agricultural and Biological Engineers, 51: 2061-2069. doi:10.13031/2013.25409

22. Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. Particle-size analysis. In: Klute, A (Ed.) Methods soil analysis. Part 1: physical and mineralogical methods. Agronomy Monographs series Number 9(1). American Society of Agronomy: Madison, WI, USA. pp 383–411. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15

23. Gadallah, M.A.A. 2000. Effects of indole-3-acetic acid and zinc on the growth, osmotic potential and soluble carbon and nitrogen components of soybean plants growing under water deficit. Journal of Arid Environments, 44: 451–467. https://doi.org/10.1006/jare.1999.0610

24. Gullap, M.K., Severoglu, S., Karabacak, T., Yazici, A., Ekinci, M., Turan, M., and Yildirim, E. 2022. Biochar derived from hazelnut shells mitigates the impact of drought stress on soybean seedlings. Journal of Crop and Horticultural Science, 52(1): 19-37. http://dx.doi.org/10.1080/01140671.2022.2079680

25. Ghafariyan, M.H., Malakouti, M.J, Dadpour, M.R., Stroeve, P., and Mahmoudi, M. 2013. Effects of magnetite nanoparticles on soybean chlorophyll. Environmental Science and Technology, 47:10645–10652. https://doi.org/10.1021/es402249b

26. Gong, B., He, E., Qiu, H., Van Gestel, C.A., Romero-Freire, A., Zhao, L., and Cao, X. 2020. Interactions of arsenic, copper, and zinc in soil-plant system: Partition, uptake and phytotoxicity. Science of The Total Environment, 745: 140926. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140926

27. Graça, J.P., D., Rodrigues, F.A., Farias, J.R.B., Oliveira, M.C.N.D., Hoffmann-Campoand, C.B., and Zingaretti, S.M. 2010. Physiological parameters in sugarcane cultivars submitted to water deficit. Brazilian Journal of Plant Physiology, 22(3): 189-197. https://doi.org/10.1590/S1677-04202010000300006

28. Gupta, D.K., and Chatterjee, S. 2017. Arsenic Contamination in the Environment: the issues and solutions. Second edition, Springer International Publishing, p. 236. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-54356-7

29. Haider, F.U., Coulter, J.A., Cheema, S.A., Farooq, M., Wu, J., and Zhang, R. 2021. Co-application of biochar and microorganisms improves soybean performance and remediate cadmium-contaminated soil. Journal of Ecotoxicology and Environmental Safety, 214: 112112. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112112

30. Hassani, Sh., Babaakbari, M., Neyestani, M.R., and Delavar, M.A. 2021. Effect of Magnetite Nanoparticles and Some Iron-Containing Compounds on the Availability of Arsenic, Iron, Zinc and Copper in Soil. Journal of Water and soil (Agricultural Sciences and Technology), 24(6): 1231-1242. https://doi.org/10.22067/jsw.2020.14866.0. (In Persian with English abstract)

31. Hudson Edwards, K.A., Houghton, S.L., and Osborn, A. 2004. Extraction and analysis of arsenic in soils and sediments. Journal of Trends in Analytical Chemistry, 23 (10-11):745-752. DOI:10.1016/J.TRAC.2004.07.010

32. 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. https://doi.org/10.1016/j.still.2016.02.005

33. Jia, W., Yu, Z., Chen, J., Zhang, J., Zhu, J., Yang, W., and Wang, S. 2024. Synergistic effect between biochar and nitrate fertilizer facilitated arsenic immobilization in an anaerobic contaminated paddy soil. Science of the Total Environment, 955: 177007. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177007

34. Kheirizadeh, Y., and Seyed Sharifi, R. 2016. Bio fertilizers and zinc effects on some physiological parameters of triticale under water-limitation condition. Journal of Plant Interactions, 11: 167–177. https://doi.org/10.1080/17429145.2016.1262914

35. Khan, Z. S., Rizwan, M., Hafeez, M., Ali, S., Javed, M. R., and Adrees, M. 2019. The accumulation of cadmium in wheat (Triticum aestivum) as influenced by zinc oxide nanoparticles and soil moisture conditions. Journal of Environmental Science and Pollution Research International, 26: 19859-19870. https://doi.org/10.1007/s11356-019-05333-5

36. Khan, M.A., Yasmin, H., Shah Z.A., Rinklebe, J., Alyemeni, M.N., and Ahmad, P. 2022. Co application of biofertilizer and zinc oxide nanoparticles upregulate protective mechanism culminating improved arsenic resistance in maize. Journal of Chemosphere - Global Change Science, 294:133796. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133796

37. Kumar, A., Singh, E., Mishra, R., and Kumar, S. 2022. Biochar as environmental armour and its diverse role towards protecting soil, water and air. Science of the Total Environment, 806: 150444. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150444

38. Kumar, A., Basu, S., Kumari, S., Shekhar, S., and Kumar, G. 2022. Effective antioxidant defense prevents nitro-oxidative stress under arsenic toxicity: a study in rice genotypes of eastern Indo-Gangetic plains. Environmental and Experimental Botany, 204:105084. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105084

39. Kumar, A., Kumari, M., Azim, U., Vithanage, M., and Bhattacharya, T. 2023. Garbage to Gains: The role of biochar in sustainable soil quality improvement, arsenic remediation, and crop yield

enhancement. Journal of Chemosphere - Global Change Science, 344: 140417. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140417

40. Kumar, A., Bhattacharya, T., Shaikh, W. A., and Roy, A. 2024. Sustainable soil management under drought stress through biochar application: Immobilizing arsenic, ameliorating soil quality, and augmenting plant growth. Journal of Environmental Research, 259: 119531. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119531

41. Knudsen, D., Peterson, G.A., and Pratt, P.F. 1982. Lithium, sodium and potassium. Part 3. In: Page, A. L. (Ed). Methods of Soil Analysis, Chemical and Microbiological Properties. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, pp. 225-246.

42. Lichtenthaler, H.K. 1987. Chlorophylls and cartenoides: pigments of hotosynthetice biomembranes. Method in Enzymology, 148: 350-382. https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1

43. Loreto, F., and Schnitzler, J.P. 2010. Abiotic stresses and induced BVOCs. Trends in Plant Science, 15(3): 154- 166. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.12.006

44. Li, C., Zhang, L., Gao, Y., and Li, A. 2018. Facile synthesis of nano ZnO/ZnS modified biochar by directly pyrolyzing of zinc contaminated corn stover for Pb (II), Cu (II) and Cr (VI) removals. Journal of Waste Management, 79: 625 637. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.035

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

46. Marschner, H. 2012. Marschner's mineral nutrition of higher plants. Third edition. Academic press, 672 p.

47. Ma, X., Sharifan, H., Dou, F., and Sun, W. 2020. Simultaneous reduction of arsenic (As) and cadmium (Cd) accumulation in rice by zinc oxide nanoparticles. Chemical Engineering Journal, 384:123802. http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2019.123802

48. Meharg, A. A., and Whitaker, J. 2002. Arsenic uptake and metabolism in arsenic resistant and nonresistant plant species. Journal of The New Phytologist Foundation, 154(1): 29-43. http://dx.doi.org/10.1046/j.1469-8137.2002.00363.x

49. Olsen, S.R. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate.United States Department of Agriculture; Washington. (No.939).

50. Osterwalder, S., Huang, J., Shetaya, W., Agnan, Y., Frossard, A., Frey, B., Alewell, C., Kretzschmar, R., Biester, H., and Obrist, D. 2019. Mercury emission from industrially contaminated soils in relation to chemical, microbial, and meteorological factors. Journal of Environmental Pollution, 250: 944–952. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.093

51. Piršelová, B., Galuščáková, Ľ., Lengyelová, L., Kubová, V., Jandová, V., and Hegrová, J. 2022. Assessment of the hormetic effect of arsenic on growth and physiology of two cultivars of maize (Zea mays L). Journal of Plants (Basel), 11(24): 3433. https://doi.org/10.3390/plants11243433

52. Prasad, T.N.V.K.V., Sudhakar, P., Sreenivasulu, Y., Latha, P., Munaswamy, V., Raja Reddy, K., Sreeprasad, T.S., Sajanlal, P.R., and Pradeep, T. 2012. Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of Peanut. Journal of Plant Nutrition, 35(6): 905-927. http://dx.doi.org/10.1080/01904167.2012.663443

53. Penido, E., Martins, S., Mendes, G.C., Melo, T.B.M., Rosário, L.C.A., Guimarães, I., and Guilherme, L.R. 2019. Combining biochar and sewage sludge for immobilization of heavy metals in mining soils. Journal of Ecotoxicology and Environmental Safety, 172: 326-333. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.110

54. Pourmansour, S., Razzaghi, F., Sepaskhah, A., and Moosavi, A. 2018. Wheat growth and yield investigation under different levels of biochar and deficit irrigation under greenhouse conditions. Journal of Water and Irrigation Management, 9 (1): 15-28. https://doi.org/10.22059/jwim.2019.278053.665 (In Persian with English abstract)

55. Rahman, M.M., Das, A.K., Sultana, S., Ghosh, P.K., Islam, M.R., Keya, S.S., and Mostofa, M.G. 2023. Biochar potentially enhances maize tolerance to arsenic toxicity by improving physiological and biochemical responses to excessive arsenate. Journal of Biochar, 5(1): 71. http://dx.doi.org/10.1007/s42773-023-00270-6

56. Rai, P., Singh, V.P., Sharma, S., Tripathi, D.K., and Sharma, S. 2022. Iron oxide nanoparticles impart cross tolerance to arsenate stress in rice roots through involvement of nitric oxide. Journal of Environmental Pollution, 307: 119320. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119320

57. Rhoades, J.D. 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved soils. In: Sparks, D.L. (Ed.), Methods of Soils Analysis, Part 3: Chemical Methods. Soil Science Society of America Book series Number 5, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp. 417-435.

58. Ritchie, S.W., Nguyen, 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(1): 105-111. https://doi:10.2135/cropsci1990.0011183X003000010025x

59. Rodriguez-Ruiz, M., Aparicio-Chacon, M.V., Palma, J.M., and Corpas, G.J. 2018. Arsenate disrupts ion balance, sulfur and nitric oxide metabolisms in roots and leaves of pea (Pisum sativum L.) plants. Journal of Environmental and Experimental Botany, 161: 143-156. http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.06.028

60. Sattar, A., Sher, A., Abourehab, M. A., Ijaz, M., Nawaz, M., Ul-Allah, S., and Javaid, M.M. 2022. Application of silicon and biochar alleviates the adversities of arsenic stress in maize by triggering the morpho-physiological and antioxidant defense mechanisms. Journal of Toxicology, Pollution and the Environment, 10: 979049. http://dx.doi.org/10.3389/fenvs.2022.979049

61. Sadeghzadeh, B., Ghodsizad, L., Sadeghzadeh, N., Sepehr, I., and Feizi, M. 2021. Cereal Breeding For Zinc Deficiency and Its Importance to Alleviate Drought Stress. Journal of Crop Breeding, 13(37): 22-40. http://dx.doi.org/10.52547/jcb.13.37.22

62. Sotoudeh, A., Sakinejad, T., Shkoh Far, A., Lek, S., and Mojdam, M. 2022. Effect of magnesium and potassium foliar application on morphological, biochemical and functional characteristics of corn (Zea mays L.) under water deficit stress. Journal of Crop Ecophysiology, 3(63): 307-324. DOI:10.30495/JCEP.2022.1913625.1729 (In Persian with English abstract)

63. Singh, B., Camps-Arbestain, M., and J. Lehmann. 2017. Biochar pH, electrical conductivity and liming potential. In: Singh, B., Mei Dolk, M., Shen, Q. and Camps-Arbestain, M. (Ed.). Biochar: A Guide to Analytical Methods. Csiro Publishing. London, New York, pp. 23-38.

64. Subramanian, S., Blanton, L., Frese, S., Charbonneau, M., Mills, D., and Gordon, J. 2015. Cultivating Healthy Growth and Nutrition through the Gut Microbiota. Journal of Biophysical, 161(1): 36-48. https://doi.org/10.1016/j.cell.2015.03.013

65. Shukla, K., Khanam, R., Biswas, J. K., and Srivastava, S. 2023. Zinc oxide nanoparticles in combination with biochar alleviate arsenic accumulation in field grown rice (Oryza sativa L.) crop. Journal of Rhizosphere, 27: 100764. http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-2221512/v1

66. Thomas, G.W. 1996. Soil pH and Soil Acidity. In: Sparks, D.L., (Ed). Methods of Soil Analysis Part 3: Chemical Methods. Soil Science Society of America Book series Number 5, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp.475-490.

67. Taqdees, Z.U., Khan, J., Khan, W.D., Kausar, C., Afzaal, M., and Akhtar, I. 2022. Silicon and zinc nanoparticles-enriched miscanthus biochar enhanced seed germination, antioxidant defense system, and nutrient status of radish under NaCl stress. Journal of Crop and Pasture Science, 73(5): 556-572. https://doi.org/10.1071/CP21342

68. Tuzhi, M., Ghorbani Dashtaki, Sh., Mottaghian, H., and Ghasemi, A. 2021. Effect of walnut wood and walnut green shell biochar on water retention status in a sandy soil. Applied Soil Research, 4(8): 44-56. (In Persian with English abstract)

69. Yue, Y., Cui, L., Lin, Q., Li, G., and Zhao, X. 2017. Efficiency of sewage sludge biochar in improving urban soil properties and promoting grass growth. Journal of Chemosphere - Global Change Science, 173: 551-556. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.096

70. Yadav, S., Modi, P., Dave, A., Vijapura, A., Patel, D., and Patel, M. 2020. Effect of abiotic stress on crops. Journal of Sustainable Crop Production, 3(17): 5-16. https://doi: 10.5772/intechopen.88434

71. Ye, J., Zhang, R., Nielsen, S., Joseph, S.D., Huang, D., and Thomas, T. 2016. A combination of biochar–mineral complexes and compost improves soil bacterial processes, soilquality, and plant properties. Journal of Frontiers in Microbiology, 7: 372. http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2016.00372

72. Yeboah, S., Zhang, R., Cai, L., Li, L., Xie, J., Luo, Z., Wu, J., and Antille, D.L. 2017. Soil water content and photosynthetic capacity of spring wheat as affected by soil application of nitrogen-enriched biochar in a semiarid environment. Journal of Photosynthetica (International Journal for Photosynthesis Research), 55(3): 532-542. http://dx.doi.org/10.1007/s11099-016-0672-1

73. Wenzel, W.W., Kirchbaumer, N., Prohaska, T., Stingeder, G., Lombi, E., and Adriano, D.C. 2001. Arsenic fractionation in soils using an improved sequential extraction procedure. Journal of Analytica Chimica Acta, 436: 309-323. http://dx.doi.org/10.1016/S0003-2670(01)00924-2

74. Waheed, Z., Iqbal, S., Irfan, M., Jabeen, K., Ilyas, N., and Al-Qahtani, W.H. 2024. Isolation and characterization of PGPR obtained from different arsenic-contaminated soil samples and their effect on photosynthetic characters of maize grown under arsenic stress. Journal of Environmental Science and Pollution Research, 1-16. https://doi.org/10.1007/s11356-024-31972-4

75. Walkley, A., and Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining in soil organic matter, and a proposed modification of the chromic soil titration method. Journal of Soil science (An Interdisciplinary Approach to Soils Research), 37:29–38. http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003

76. Wang, L.H., Guan, J.N., Wei, J., Mahmood, A., Rasheed, A., Hassan, M.U., and Shehata, W.F. 2023. Biochar a promising amendment to mitigate the drought stress in plants: review and future prospective. Journal of Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 51(4): 13447. https://doi.org/10.15835/nbha51413447

77. Wu, Y., Wang, X., Zhang, L., Zheng, Y., Liu, X., and Zhang, Y. 2023. The critical role of biochar to mitigate the adverse impacts of drought and salinity stress in plants. Journal of Plant Science, 14: 116345. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1163451

78. Zhang, H., Voroney, R.P., Price, G.W., and White, A.J. 2017. Sulfur-enriched biochar as a potential soil amendment and fertiliser. Journal of Soil Research, 55: 93–99. http://dx.doi.org/10.1071/SR15256

79. Zhang, W., Cho, Y., Vithanage, M., Shaheen, S. M., Rinklebe, J., Alessi, D.S., and Yong, S.O. 2022. Arsenic removal from water and soils using pristine and modified biochars. Journal of Biochar, 4: 55. http://dx.doi.org/10.1007/s42773-022-00181-y