

Effect of magnetized water and sugarcane bagasse-derived biochar on the growth and chemical composition of spinach under drought stress in greenhouse conditions

Zeinab Saeedavi ¹, Ali Akbar Moosavi ^{2*}, Reza Ghasemi ³, Fatemeh Razzaghi ⁴

¹ Department of Soil Science and Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.

² Department of Soil Science and Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.

³ Department of Soil Science and Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.

⁴ Department of Water Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.

Extended Abstract

Introduction

Water scarcity and drought are becoming global problems, particularly in arid and semi-arid regions. Drought stress is one of the factors that negatively affect the quantitative and qualitative growth of plants. It results from the changes outside the optimal range of environmental conditions. Due to the severe limitations of water resources in most regions of the country, moisture stress has been defined as one of the most important stresses adversely affecting plant growth and yield. Drought stress typically occurs when water levels in the soil and atmosphere decrease due to evaporation and transpiration. Almost all plants are somewhat drought tolerant, but the degree of tolerance varies from species to species. Magnetic water can be a promising method to overcome the problem of limited water resources, improve agricultural product production, and mitigate drought stress in plants at various growth stages; in addition, it is environmentally friendly. Adding biochar to the soil is another method of dealing with drought stress, as it increases organic matter and consequently enhances soil water retention. Therefore, this study was conducted to investigate the combined effect of moisture stress, biochar, and magnetic water on spinach growth and chemical composition under greenhouse conditions.

Materials and Methods

A factorial greenhouse experiment in the form of a completely randomized design with three replications was conducted with drought stress at three levels of field capacity (FC), 75% of field capacity moisture (0.75FC), and 50% of field capacity (0.5FC); and four levels (0, 1, 2, and 3% by weight) of sugarcane bagasse-derived biochar prepared at 400 °C and two types of water including magnetized water and non-magnetized water. The required soil was taken from a depth of 0 to 30 cm of calcareous soil, air-dried, passed through a 2-mm sieve, and analyzed for physical and chemical properties. Sugarcane bagasse was collected from Imam Khomeini Sugar Factory located in Khuzestan Province and converted to biochar at 400 °C under limited oxygen conditions for 4 h. Magnetic water of 0.21 Tesla was prepared by repeatedly passing drinking water through a water magnetizing device. According to the results of the soil test, nutrient elements were added to the soil. 15 spinach seeds (*Spinacia oleracea* L., var. Virofly) were planted in each pot, and they were maintained in greenhouse conditions. After one month, the number of plants was reduced to 9 in each pot. All pots were treated by the mentioned moisture levels through daily weighing. Drought treatments were started two weeks after planting and continued throughout the growing season for two months. After harvesting, plant samples were prepared and chemically analyzed. Statistical analysis was performed using Excel and SAS statistical software and means were compared using Duncan's test at a probability level of 5%.

Results and Discussion

The results showed that in plants irrigated with magnetized water, the application of 1, 2, and 3% of biochar caused an increase of 3.9%, 7.8%, and 8.3%, respectively in the shoot dry weight of spinach, although the differences were not statistically significant. Furthermore, moisture levels of 0.75FC and 0.5FC in the magnetized water caused a decrease of 3.7% and 15.7%, respectively, and in normal water, it caused 8.3% and 24% decrease in shoot dry weight, respectively. In plants irrigated with magnetized water, application of 1, 2, and 3% biochar compared to the control caused a decrease of 19.2%, 32.5%, and 30.6%, respectively in the shoot Cu concentration. Whereas, the use of 2% and 3% biochar caused an increase of 6.2% and 11.9% in the shoot Mn concentration. Applying 0.75FC and 0.5FC moisture stress levels compared to the normal conditions caused a significant decrease of 19.5% and 29.7% in shoot Cu concentration, 21.2% and 21.1% decrease in shoot

Fe concentration, and 18% and 20% decrease in shoot K concentration, respectively. Whereas, the mentioned moisture levels caused an increase of 24.7% and 47% in the shoot Mn concentration.

Conclusion

In general, the application of magnetized water compared to normal water significantly increased the shoot Mn and Zn concentration by threefold and 40.4%, respectively, compared to that of the control. Using magnetized water increased shoot dry weight by 10.8% compared to normal water. The results showed that the application of magnetized water can be used as a suitable solution to increase the concentration of some nutrients and some growth characteristics of spinach. In general, the results showed that the application of magnetized water and biochar, which have been introduced as two strategies to reduce the adverse effects of drought on plants, can be effective on the chemical composition of plants and the nutrient concentration of the plants. Further studies are recommended to evaluate the impacts of other biochar derived from livestock manure and plant residues, as well as different levels of biochar, on spinach and other crops, under drought or other stress conditions.

Keywords: Biochar, drought stress, field capacity, magnetized water, nutrient elements, plant yield

Article Type: Research Article

Acknowledgment

We would like to express our sincere gratitude to Shiraz University for the financial and logistical support that significantly contributed to the research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

All information and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution

Zeinab Saeedavi: Experiments, data analysis and interpretation, software, writing - original draft and editing; **Ali Akbar Moosavi:** Conceptualization, Idea and experimental design, project supervision, data analysis, and interpretation, resources, writing and editing; **Reza Ghasemi:** Conceptualization, Idea and experimental design, supervision, data analysis and interpretation, manuscript editing; **Fatemeh Razzaghi:** Conceptualization, Idea and experimental design, data analysis and interpretation, manuscript editing

Corresponding Author, E-mail: aamousavi@gmail.com; aamousavi@shirazu.ac.ir

Citation: Saeedavi, Z., Moosavi, A.A., Ghasemi, R., & Razzaghi, F. (2025). Effect of Magnetized Water and Sugarcane Bagasse-derived Biochar on the Growth and Chemical Composition of Spinach under Drought Stress in Greenhouse Conditions. *Water and Soil Management and Modeling*, 5(2),138-159.
doi: 10.22098/mmws.2025.16405.1530

Received: 19 December 2024, Received in revised form: 16 February 2025, Accepted: 22 February 2025, Published online: 22 June 2025.

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 2, pp138-159.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





تأثیر آب مغناطیسی و بیوچار باگاس نیشکر بر رشد و ترکیب شیمیایی اسفناج تحت تنش خشکی در شرایط گلخانه

زینب سعیدآوی^۱، سید علی اکبر موسوی^{۲*}، رضا قاسمی^۳، فاطمه رزاقی^۴

^۱ بخش علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

^۲ بخش علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

^۳ بخش علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

^۴ بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

چکیده

آب مغناطیسی و بیوچار می‌توانند از روش‌های امیدوارکننده دوست‌دار محیط‌زیست برای غلبه بر تنش خشکی و بهبود تولید محصولات کشاورزی باشد. در یک آزمایش فاکتوریل کاملاً تصادفی با سه تکرار اثر توأم سطوح بدون تنش خشکی (FC)، تنش ۷۵ درصد (0.75FC) و تنش ۵۰ درصد (0.5FC)؛ سطوح صفر، ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی بیوچار باگاس نیشکر و دو نوع آب مغناطیسی و معمولی بر رشد و ترکیب شیمیایی اندام‌هوایی اسفناج در شرایط گلخانه (۷۲ گلدان) بررسی شد. کاربرد ۱، ۲ و ۳ درصد بیوچار همراه با آب مغناطیسی به‌ترتیب سبب افزایش ۳/۹، ۷/۸ و ۸/۳ درصدی وزن خشک اندام‌هوایی نسبت به شاهد شدند ($P < 0.05$). تنش‌های خشکی ۷۵ و ۵۰ درصد، به‌ترتیب سبب کاهش ۳/۷ و ۱۵/۷ درصدی و ۸/۳ و ۲۴ درصدی وزن خشک با کاربرد آب‌های مغناطیسی و معمولی شدند. کاربرد ۱، ۲ و ۳ درصد بیوچار به‌ترتیب سبب کاهش ۱۹/۲، ۳۲/۵ و ۳۰/۶ درصدی غلظت مس شد. درحالی‌که ۲ و ۳ درصد بیوچار سبب افزایش ۶/۲ و ۱۱/۹ درصدی منگنز شدند. تنش‌های خشکی ۷۵ و ۵۰ درصد نیز به‌ترتیب سبب کاهش‌های معنی‌دار ۱۹/۵ و ۲۹/۷ درصدی مس، ۲۱/۲ و ۲۱/۱ درصدی آهن و ۱۸ و ۲۰ درصدی پتاسیم شدند. درحالی‌که تنش‌ها سبب افزایش ۲۴/۷ و ۴۷ درصدی منگنز شدند. به‌طور کلی آب مغناطیسی در مقایسه با آب معمولی به‌ترتیب سبب افزایش معنی‌دار وزن خشک، روی و منگنز به‌میزان ۱۰/۸ و ۴۰/۴ درصد و ۳ برابر شد. بنابراین آب مغناطیسی می‌تواند به‌عنوان راهکار مناسبی برای افزایش برخی عناصر غذایی، بهبود وضعیت تغذیه‌ای و برخی ویژگی‌های رشد اسفناج استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: آب مغناطیسی، تنش خشکی، رطوبت ظرفیت مزرعه، زغال زیستی، عملکرد گیاه، عناصر غذایی

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: aamousavi@gmail.com; aamousavi@shirazu.ac.ir

استناد: سعیدآوی، زینب؛ موسوی، سید علی اکبر؛ قاسمی، رضا؛ و رزاقی، فاطمه (۱۴۰۴). تأثیر آب مغناطیسی و بیوچار باگاس نیشکر بر رشد و ترکیب شیمیایی اسفناج تحت تنش خشکی در شرایط گلخانه. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۵(۲): ۱۳۸-۱۵۹.

doi: 10.22098/mmws.2025.16405.1530

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۲۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۴، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۲، صفحه ۱۳۸ تا ۱۵۹

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

تنش به معنای هرگونه تغییر در شرایط محیطی است که می‌تواند موجب کاهش رشد کمی یا کیفی گیاه شود. تنش‌های محیطی می‌توانند اثرات مختلفی از جمله کاهش رشد، تغییرات فیزیولوژیک، اختلالات متابولیک، کاهش تولید محصول، افزایش حساسیت به بیماری‌ها و آفات و تغییرات ژنتیکی بر روی گیاهان داشته باشند. یکی از این تنش‌های محیطی، تنش خشکی است. با توجه به محدودیت‌های شدید منابع آبی در بیش‌تر مناطق کشور، تنش خشکی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تنش‌های تأثیرگذار بر گیاهان زراعی تعریف شده است (Kafi et al., 2010).

یکی از روش‌های جدید و مؤثر برای مقابله با تنش خشکی، افزایش بهره‌وری و کیفیت آب آبیاری در بخش کشاورزی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، استفاده از آب مغناطیسی است. آب مغناطیسی، آب شش‌ضلعی است که با عبور آب از یک میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود و می‌تواند مولکول‌های آب را فعال و یونیزه کرده و ساختار آن‌ها را تغییر دهد. عبور آب آبیاری از میدان مغناطیسی روشی بی‌خطر بوده که طی فرآیند مغناطیسی کردن آب، هیچ ماده شیمیایی به آب اضافه نمی‌شود؛ از این‌رو، این روش بی‌ضرر و دوست‌دار محیط‌زیست به شمار می‌آید (Tahir and Karim, 2010). این امر استفاده از آب مغناطیسی در بخش کشاورزی را برای افزایش رشد گیاهان و بهره‌وری مواد غذایی برجسته می‌کند زیرا می‌توان از طریق آبیاری با آب مغناطیسی رشد و نمو گیاهان را هم از نظر کمی و هم از نظر کیفی بهبود بخشید. مغناطیسی کردن آب شور یا آب آلوده به فلزات نیز می‌تواند به‌عنوان یک ابزار جایگزین برای غلبه بر مشکل کمبود منابع آب در نظر گرفته شود. در نتیجه، مغناطیسی کردن آب آبیاری می‌تواند یک روش امیدوارکننده برای بهبود کمیت و کیفیت تولیدات کشاورزی باشد و در عین حال از نظر زیست‌محیطی نیز بی‌خطر و مفید باشد (Alattar et al., 2022). گزارش شده آب مغناطیسی اثر مثبتی بر حلالیت عناصر معدنی موجود در خاک دارد و تیمار گیاهان با آب مغناطیسی، شدت فتوسنتز و سوخت‌وساز را نیز به‌مقدار خیلی کم افزایش می‌دهد که این افزایش، سبب بهبود تولید و عملکرد محصول می‌شود (Saliha, 2005). پژوهشگران دریافته‌اند که آبیاری با آب مغناطیسی، با اثری که بر افزایش جذب عناصر غذایی توسط گیاه دارد، سبب افزایش رشد و عملکرد گیاه می‌شود (Samadyar et al., 2014; Selim et al., 2019). میدان مغناطیسی با اثری که بر تعدیل اثرات منفی تنش رطوبتی و افزایش تحمل گیاه به شوری دارد، می‌تواند فرایند پیری را به تعویق بیندازد. به بیانی دیگر آب مغناطیسی به‌دلیل جذب راحت‌تر و سریع‌تر توسط گیاه،

می‌تواند آسیب ناشی از کم آبی را به حداقل برساند و در مناطق خشک و نیمه‌خشک، سبب بهبود عملکرد گیاهان و مقاومت گیاهان در برابر تنش‌های شوری و خشکی شود. میدان مغناطیسی می‌تواند با افزایش درصد جوانه زنی بذر و افزایش سرعت و قدرت رشد گیاه، افزایش تولید خالص محصول را نیز به دنبال داشته باشد (Teixeira da Silva and Dobranszki, 2016). پژوهش‌های مختلف نشان داده که تنش خشکی سبب کاهش ویژگی‌های رشد اسفناج از جمله سطح برگ، وزن برگ و گیاه، تعداد برگ و ارتفاع گیاه و کارایی مصرف آب شد (Zhang et al., 2015; Gavili et al., 2018b; Alinejadian Bidabadi et al., 2018). برخی پژوهشگران نیز دریافته‌اند که میدان مغناطیسی سبب افزایش کلروفیل a و b و شاخص عملکرد در گیاه اسفناج شده است (Biketi, 2018; Alpsoy and Unal, 2019). نتایج پژوهش دیگری نشان داد که آب مغناطیسی منجر به افزایش خصوصیات زراعی (تعداد برگ، وزن تازه و خشک اندام هوایی، وزن تازه و خشک ریشه) در کاهو و همچنین افزایش راندمان مصرف آب و در نتیجه مدیریت بهینه آبیاری شده است (Putti et al., 2023).

یکی دیگر از روش‌های مؤثر برای مقابله با تنش خشکی، استفاده از بیوپچار است. بیوپچار می‌تواند ماده آلی خاک را افزایش دهد و ظرفیت نگهداشت آب در خاک را بهبود بخشد. این ویژگی باعث می‌شود گیاهان در شرایط تنش خشکی رشد بهتری داشته باشند. در واقع افزودن بیوپچار به خاک‌های کشاورزی روشی برای بهبود ویژگی‌ها و افزایش باروری خاک است. گزارش شده بیوپچار به‌دلیل توانایی زیاد در جذب و نگهداری عناصر غذایی و کودهای شیمیایی، حتی نگهداری عناصری مانند فسفر و نیتروژن و جلوگیری از آبشویی آن‌ها، سبب افزایش رشد گیاهان از جمله سبزیجات می‌شود (Berek et al., 2011). افزایش غلظت کلسیم، منیزیم و روی نیز در سبزیجاتی مانند اسفناج و کلم بروکلی تحت تأثیر کاربرد بیوپچار گزارش شده است (Gartler et al., 2013). زمانی که بیوپچار به خاک اضافه می‌شود می‌تواند از طریق بهبود اندازه خلل و فرج خاک، ذخیره آب در خاک را افزایش دهد و مقدار جذب آب در ناحیه رشد ریشه گیاه را تحت تأثیر قرار دهد (Azimzadeh and Najafi, 2017). کاهش اثرات منفی تنش رطوبتی بر شاخص‌های رشدی اسفناج مانند وزن تر و خشک اندام هوایی، سطح برگ و همچنین افزایش منگنز، سدیم و پتاسیم اندام هوایی نیز با کاربرد ۱/۲۵ درصد بیوپچار کود گاوی در سطوح مختلف تنش رطوبتی نیز توسط Gavili et al. (2018b) گزارش شد. همچنین گزارش شده که بیوپچار تولید شده در دمای پایین (۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) می‌تواند توانایی حاصلخیزی بیش‌تری

نسبت به بیوپار تولید شده در دمای بالا (۶۰۰ درجه) داشته باشد و بیوپار تولید شده در دمای متوسط (۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه) نیز می‌تواند بر هدایت هیدرولیکی خاک و رشد گیاه تأثیر مثبت داشته باشد (Moradi-Choghamarani et al., 2019a; Moradi-Choghamarani et al., 2019b; Zhang et al., 2024). در پژوهشی با کاربرد بیوپار کاه برنج، بیوپار پوسته برنج و بیوپار انگور در مزارع کشت شده با سبزیجات برگی نشان دادند که هر سه نوع کود آلی pH خاک، محتوای کربن آلی و محتوای کربن مقاوم خاک را افزایش دادند، درحالی‌که قابلیت هدایت الکتریکی و پتاسیم خاک را کاهش دادند. نتایج آنان همچنین نشان داد که کاربرد بیوپار کاه و پوسته برنج، محتوای ویتامین B در برگ و دمبرگ سبزیجات کشت شده را افزایش داد. تغییر در غلظت عناصر (Gavili et al., 2019)، شکل‌های شیمیایی (Zahedifar et al., 2017; Zahedifar et al., 2020) و فعالیت یا آزادسازی عناصر (Zahedifar and Moosavi, 2017) ناشی از افزودن بیوپار به خاک یا وضعیت رطوبتی خاک ممکن است سبب القا کمبود یا سمیت یک یا چند عنصر غذایی در گیاه و تغییر کمیت و کیفیت محصول شده و بر ارزش غذایی محصول تولیدی مؤثر باشد. از طرفی استفاده طولانی مدت از بیوپار می‌تواند فراوانی میکروبی خاک و ساختار جامعه را تغییر دهد، که می‌تواند بر سلامت خاک و چرخه مواد مغذی تأثیر بگذارد (Hardy et al., 2019). در مطالعه‌ای با بررسی اثرات طولانی مدت (۷ سال) کاربرد بیوپار بر رشد و ویژگی‌های فیزیولوژیکی ذرت، مشخص شد که کاربرد بیش از حد بیوپار رشد ذرت را مهار کرد (Cong et al., 2023). نرخ‌های بیش از حد بیوپار سبب کاهش استحکام خاک به‌ویژه در خاک‌های سیلتی و شنی، افزایش آب‌گریزی خاک و به‌دنبال آن کاهش توانایی نگهداری آب در خاک و همچنین افزایش pH خاک فراتر از محدوده ایده‌آل برای گیاهان و کاهش دسترسی به مواد مغذی شود و به‌طور بالقوه حاصلخیزی خاک و عملکرد محصول را کاهش دهد. بیوپار بیش از حد می‌تواند منافذ خاک را مسدود و عناصر غذایی ضروری مانند فسفر، منگنز و کلسیم را جذب کرده، مانع تبادل آب و عناصر غذایی شود و در نتیجه رشد پوشش گیاهی را محدود کند (Lin et al., 2024). Lee et al. (2024) نیز نشان دادند که استفاده از بیوپار مشتق شده از بقایای گلخانه‌ای ساقه فلفل قرمز سبب افزایش وزن تر کاهو نسبت به شاهد در اولین فصل زراعی شد اما کاربرد بیش از حد بیوپار منجر به کاهش عملکرد در فصل زراعی دوم شد که احتمالاً به دلیل افزایش pH و قابلیت هدایت الکتریکی خاک است. هرچند نتایج Jin et al. (2024) در استفاده طولانی مدت (۶ سال) بیوپار در شالیزارهای برنج با خاک شور-

قلیایی، نشان داد که کاربرد بیوپار می‌تواند اثرات منفی تنش شوری-قلیایی بر محصولات را کاهش دهد. اما اثرات طولانی‌مدت کاربرد بیوپار بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، غلظت نمک، در دسترس بودن عناصر غذایی، فعالیت آنزیم‌های خاک، و عملکرد برنج در خاک‌های بسیار شور-قلیایی هنوز نامشخص است. سبزیجات بخش مهمی از تولیدات کشاورزی به‌حساب می‌آیند و در میان سبزی‌های برگی مهم فصل سرد می‌توان اسفناج را نام برد که گیاهی یکساله و روزبلند با ارزش غذایی زیاد است. اسفناج، گیاه بومی ایران، گیاهی یکساله دارای ساقه‌ای راست به ارتفاع نیم‌متر است که پس از سبز شدن، می‌تواند تولید برگ‌های طوقه‌ای کند و با ریشه عمیقی که دارد می‌تواند در خاک نفوذ کند. با توجه به اینکه در مطالعات گذشته اثر همزمان تنش خشکی، بیوپار و آب مغناطیسی شده بر رشد و ترکیب شیمیایی گیاهان از جمله اسفناج مطالعه نشده است، از این رو این پژوهش با هدف بررسی اثر توأم تنش رطوبتی، بیوپار باگاس نیشکر و آب مغناطیسی بر رشد و ترکیب شیمیایی اسفناج انجام شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه و اندازه‌گیری ویژگی‌های اولیه خاک مورد مطالعه

خاک مورد نیاز از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک آهکی (رس سیلتی) سری کوی اساتید واقع در منطقه باجگاه استان فارس (در ارتفاع ۱۸۵۲ متری از سطح آزاد دریا و واقع بر طول جغرافیای ۵۲ درجه و ۴۶ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی) برداشته شد. نمونه‌ها پس از جمع‌آوری، هوا خشک شدند. بخشی از نمونه‌ها از الک دو میلی‌متری عبور داده و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با استفاده از روش‌های معمول استاندارد (Jones, 2001) به شرح زیر اندازه‌گیری شدند: pH در خمیر اشباع با دستگاه pH متر، بافت خاک به روش هیدرومتری، رطوبت ظرفیت مزرعه با قرار دادن نمونه خاک اشباع در مکش ۳۳۰ سانتی‌متر در دستگاه سلول فشاری، ماده آلی به روش ترسوزانی، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره خمیر اشباع به وسیله هدایت‌سنج الکتریکی، نیتروژن کل به روش کدال، فسفر قابل استفاده به روش عصاره‌گیری با بی‌کربنات سدیم و غلظت عناصر کم‌مصرف کاتیونی (منگنز، مس، روی و آهن) به روش عصاره‌گیری با دی. تی. پی. ا. و قرائت با دستگاه جذب اتمی است. (جدول ۱).

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

Table 1- Some physical and chemical characteristics of the studied soil

Cu	Mn	Zn	Fe	P	EC _e	pH	Total N	OM	Water content (FC)	Sand	Silt	Clay	Soil parameters
mg kg ⁻¹					dS m ⁻¹				%				Value
0.12	4.48	1.33	5.79	13	0.53	7.53	0.11	1.19	30	14.4	44	41.6	

FC represents water content at field capacity conditions.

FC نشان‌دهنده رطوبت جرمی ظرفیت مزرعه است.

داده شد و با نرخ افزایش دمای ۱۰ درجه در دقیقه، دما به ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت و با ماندگاری در این دما به مدت ۴ ساعت، باگاس به زغال زیستی (بیوچار) تبدیل شد. جدول ۲ برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی باگاس نیشکر و بیوچار تهیه شده از آن در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد که با روش‌های استاندارد معمول (Moradi-Choghamarani et al., 2019a; Moradi-Choghamarani et al., 2019b) اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.

۲-۲- تهیه و تعیین ویژگی‌های بیوچار

باگاس نیشکر از کارخانه قند امام خمینی واقع در استان خوزستان تهیه و به آزمایشگاه منتقل شد. قبل از انجام آتشکافت، باگاس نیشکر در آون در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شد تا محتوای آب موجود در باگاس برای انجام فرآیند آتشکافت ثابت شود. سپس باگاس در درون محفظه‌های آلومینیومی (شرایط اکسیژن محدود) در یک کوره الکتریکی با ابعاد ۳۰×۳۰×۴۶ سانتی‌متر قرار

جدول ۲- برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی باگاس نیشکر و بیوچار تهیه شده از آن در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد (Moradi-Choghamarani et al., 2019a; Moradi-Choghamarani et al., 2019b)

Table 2- Some chemical and physical characteristics of sugarcane bagasse and its derived biochar at 400 °C (Moradi-Choghamarani et al., 2019a; Moradi-Choghamarani et al., 2019b)

Chemical characteristics													
O/C	H/C	O (%)	N (%)	H (%)	C (%)	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Mn (g/kg)	Fe (g/kg)	K (g/kg)	Na (g/kg)	Mg (g/kg)	Ca (g/kg)
1.04	1.61	54.71	0.56	5.31	39.4	8.76	7.82	0.04	0.72	18.27	1.59	1.21	18.82
0.81	0.53	50.32	0.99	2.06	46.6	27.42	17.90	0.10	3.26	5.48	2.93	400	62.16
Physical characteristics													
θ (°)						γ _s (mN m ⁻¹)		γ ₉₀ (mN m ⁻¹)		MED (M)	WDPT (min)	RD (g cm ⁻³)	
107.6						8.7		35		5	90-70	1.31	
< 9						18		72		0	-0	1.51	

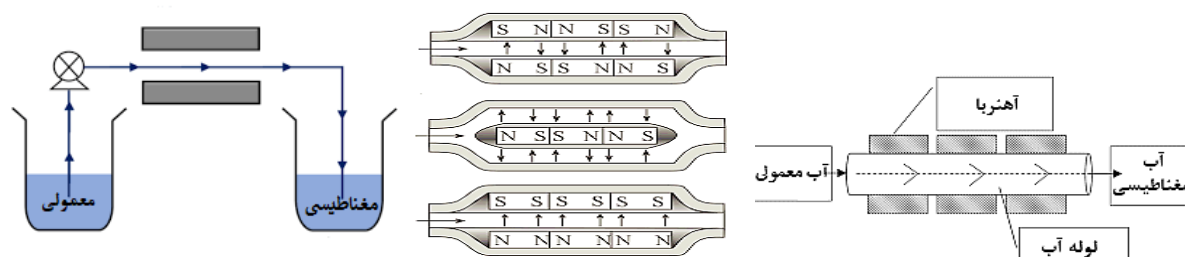
O, N, H, C, Zn, Cu, Mn, Fe, K, Na, Mg, and Ca are oxygen, nitrogen, hydrogen, carbon, zinc, copper, manganese, iron, potassium, sodium, magnesium, and calcium, respectively.

RD, WDPT, MED, γ₉₀, γ_s, and θ are the particle density, water drop penetration time, alcohol drop molarity, 90-degree surface tension, air-solid surface tension, and water-solid contact angle, respectively.

شد و آب از بین آهنرباها با کمک لوله‌های باریکی عبور داده شد و آب عبوری در ظرف دیگری تخلیه شده و این کار حداقل ۱۲ بار تکرار شد. میدان مغناطیسی بین دو لایه آهنربای مذکور برای مغناطیسی کردن آب به‌وسیله دستگاه تسلا متر اندازه‌گیری و حدود ۰/۲۱ تسلا تنظیم شد. جدول ۳ برخی ویژگی‌های شیمیایی آب، قبل و بعد از عبور از میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد.

۳-۲- تهیه آب مغناطیسی

آب مغناطیسی با عبور متمادی آب معمولی از دستگاه مغناطیس کننده آب متشکل از ۶ آهنربای سرامیکی مکعبی شکل با ابعاد ۱۰×۱۰×۲ سانتی‌متر که در دو ردیف سه‌تایی به صورت موازی و به فاصله حدود ۱۰ سانتی‌متر از یکدیگر قرار گرفته بودند، تهیه شد (شکل ۱). بدین صورت که آب معمولی در ظرفی قرار داده



شکل ۱- شکل شماتیک دستگاه تهیه آب مغناطیسی

Figure 1- Schematic description of the magnetic water preparation device

جدول ۳- برخی ویژگی‌های شیمیایی آب معمولی و آب مغناطیسی

Table 3- Some chemical characteristics of the normal and magnetized water

Cl	K	Mg (meq L^{-1})	Ca	Na	EC (dS m^{-1})	pH	
1.78	1.14	1.93	2.74	1.36	0.49	7.77	Magnetized water
1.23	0.78	1.57	2.39	1.04	0.19	7.03	Normal water

روزانه کلیه گلدان‌ها توزین و پس از رسیدن وزن گلدان‌ها به هر کدام از سطوح تنش خشکی تعریف شده با انجام آبیاری، رطوبت گلدان‌ها به حد مورد نظر رسانده شد. به منظور جلوگیری از تنش ناگهانی، تیمار خشکی پس از استقرار کامل بوته‌ها از دو هفته بعد از کاشت اعمال شد و در طول فصل رشد و به مدت دو ماه تا برداشت گیاه ادامه یافت.

۵-۲- برداشت گیاه، اندازه‌گیری وزن خشک و ترکیب شیمیایی گیاه

دوماه بعد از کشت گیاه، نمونه‌های گیاهی از طوقه از سطح خاک برداشت شد و پس از وزن کردن، با آب معمولی و سپس آب مقطر شست‌وشو داده شد و سپس در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت در آن خشک شد. نمونه‌های خشک شده توزین و با آسیاب برقی پودر شدند. برای تجزیه گیاه یک گرم ماده خشک گیاه در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد خاکستر شده و سپس ۵ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۲ نرمال به آن افزوده شد تا نمونه حل شود. سپس نمونه حل شده صاف شده و با آب مقطر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد و غلظت عناصر با دستگاه جذب اتمی (برای عناصر آهن، روی، مس و منگنز، کلسیم و منیزیم) و دستگاه شعله‌سنج (برای عناصر سدیم و پتاسیم) اندازه‌گیری شد.

۶-۲- تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای آماری اکسل و SAS انجام شد. مقایسه میانگین‌ها نیز با آزمون چند دامنه دانکن و در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

۴-۲- آزمایش گلخانه‌ای

آزمایش در شرایط گلخانه به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار با تیمارهای تنش خشکی در سه سطح بدون تنش (FC)، تنش ۷۵ درصد (0.75FC) و تنش ۵۰ درصد (0.5FC) و چهار سطح بیوپار تهیه شده از باگاس نیشکر در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد شامل سطوح صفر، ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی و دو نوع آب شامل تیمار آب مغناطیسی و آب معمولی انجام شد. آزمایش در گلخانه، به روش گلدانی (شامل ۷۲ گلدان ۳ کیلوگرمی خاک به همراه درصد مورد نظر بیوپار) انجام شد (لازم به ذکر است تیمارهای مورد استفاده با توجه به هدف‌های پژوهش و سطوح تیمارها و نوع آزمایش با توجه به پژوهش‌های پیشین سایر پژوهشگران و نتایج آنان در نظر گرفته شد). با توجه به نتایج آزمون خاک و به منظور جلوگیری از کمبود احتمالی عناصر غذایی، عناصر آهن، روی، مس، منگنز و فسفر به ترتیب از منابع سبکترین آهن، سولفات روی، سولفات مس، سولفات منگنز و مونوپتاسیم فسفات پس از هوا خشک شدن خاک، به صورت محلول به خاک افزوده شد و مخلوط آن‌ها با خاک به‌طور دقیق انجام شد و برای جلوگیری از کمبود احتمالی نیتروژن، از کود اوره برای تهیه محلول غذایی استفاده و به‌طور یکسان به همه گلدان‌ها اضافه شد. در هر گلدان ۱۵ عدد بذر اسفناج (*Spinacia oleracea* L., var. *virofly*) در عمق مناسب (تقریباً یک سانتی‌متری) کاشته و گلدان‌ها در شرایط گلخانه با دمای ۱۵ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری و آبیاری آن‌ها به روش وزنی، با آب معمولی و مغناطیسی در طول فصل رشد انجام شد. پس از یک ماه تعداد گیاهان به ۹ عدد در هر گلدان کاهش یافت. همچنین به‌منظور ایجاد شرایط یکسان در طول فصل رشد موقعیت قرارگیری گلدان‌ها در گلخانه چندین بار تغییر داده شد.

۳- نتایج تجزیه واریانس، مقایسه میانگین و اثرهای متقابل آن‌ها بر ویژگی‌های مورد مطالعه

۳-۱- وزن خشک اندام هوایی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که از میان منابع تغییر ذکر شده در جدول ۴، تنها اثر نوع آب و تنش خشکی در سطح احتمال یک درصد بر وزن خشک اندام هوایی گیاه اسفناج معنی‌دار بود.

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر بیوچار، نوع آب و تنش خشکی بر وزن خشک اندام هوایی اسفناج

Table 4- Results of variance analysis of the effect of biochar, water type, and drought stress on shoot dry weight of spinach

Error	Water × Drought stress × Biochar	Drought stress × Biochar	Water × Biochar	Water × Drought stress	Biochar	Drought stress	Water type	Source of variation
48	6	6	3	2	3	2	1	Degree of freedom (DF)
1.5	1.87 ^{ns}	1.98 ^{ns}	0.17 ^{ns}	0.06 ^{ns}	1.61 ^{ns}	18.35 ^{**}	11.86 ^{**}	Mean square (MS)

ns، ** و * به ترتیب معنی‌داری در سطوح 5 و 1 درصد و غیرمعنی‌داری را نشان می‌دهد.

*, **, and ns indicate significance at the probability levels of 5% and 1%, and non-significant, respectively.

با آب معمولی سبب افزایش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی گیاه به میزان ۱۰/۸ درصد شد (شکل ۲).

۳-۲- غلظت عناصر در اندام هوایی

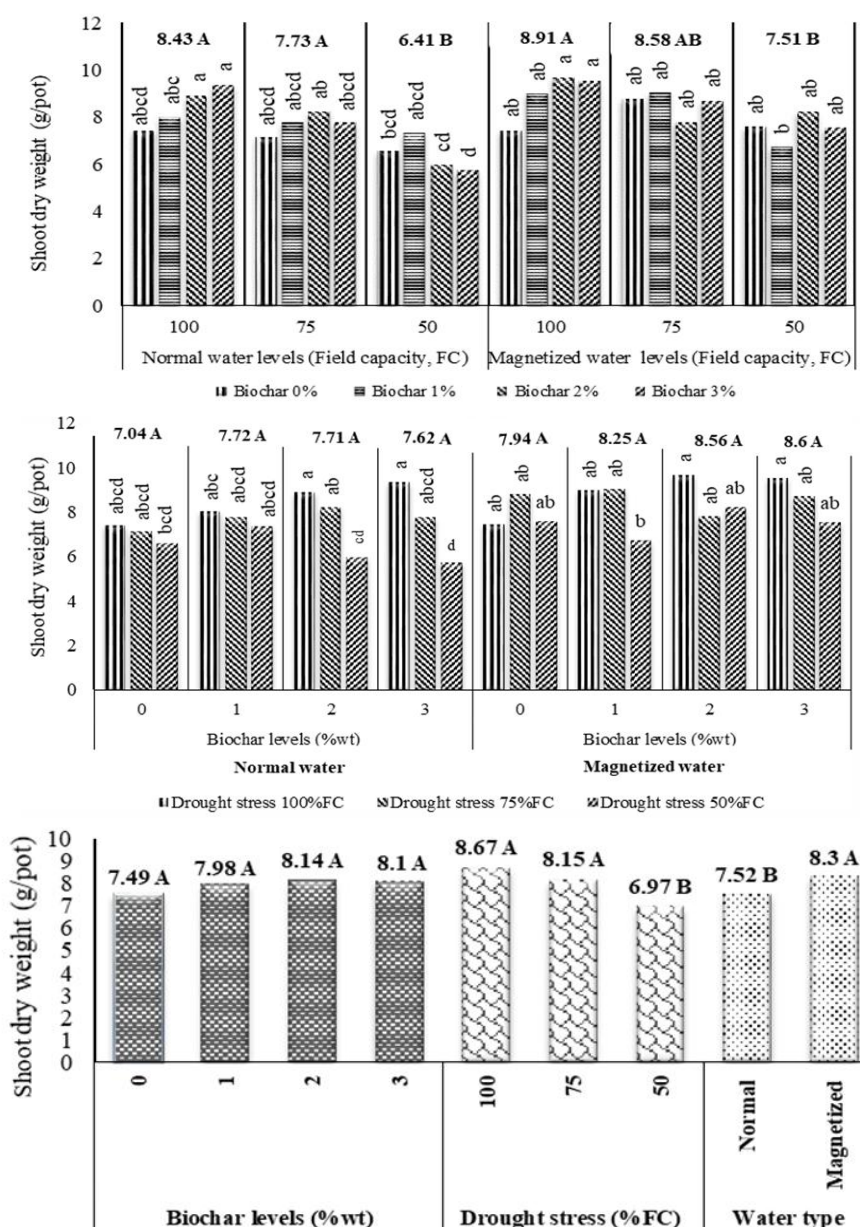
نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر نوع آب بر غلظت منگنز و روی اندام هوایی اسفناج در سطح احتمال یک درصد و بر غلظت منیزیم اندام هوایی اسفناج در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار است، در حالی‌که اثر نوع آب بر غلظت مس، آهن، کلسیم، سدیم و پتاسیم اندام هوایی از نظر آماری معنی‌دار نیست (جدول ۵). نتایج همچنین نشان داد اثر تنش خشکی در سطح احتمال یک درصد بر غلظت منگنز اندام هوایی معنی‌دار است درحالی‌که اثر تنش خشکی از نظر آماری بر غلظت سایر عناصر معنی‌دار نیست. اثر سطوح بیوچار نیز از نظر آماری بر غلظت هیچ یک از عناصر مورد مطالعه معنی‌دار نبود. همچنین اثر متقابل نوع آب و تنش خشکی از نظر آماری در سطح احتمال یک درصد بر غلظت مس، منگنز و پتاسیم اندام هوایی معنی‌دار بود در حالی‌که بر غلظت سایر عناصر معنی‌دار نبود. نتایج نشان داد برهم‌کنش تنش خشکی و سطوح بیوچار نیز تنها بر غلظت کلسیم اندام هوایی در سطح آماری پنج درصد معنی‌دار است و برهم‌کنش آب و سطوح بیوچار و همچنین برهم‌کنش نوع آب، تنش خشکی و سطوح بیوچار تنها بر غلظت مس اندام هوایی در سطح آماری پنج درصد معنی‌دار است در حالی‌که بر غلظت سایر عناصر مورد مطالعه در اندام هوایی معنی‌دار نیست (جدول ۵).

نامناسب آزمایش که می‌تواند منجر به ناتوانی در تشخیص اثر برهم‌کنش‌ها شود؛ ج) گوناگونی و تنوع زیاد داده‌ها که می‌تواند سبب پنهان شدن اثر برهم‌کنش‌ها در بین داده‌ها شود؛ د) اندازه کم نمونه‌ها که سبب کاهش قدرت آزمون و ناتوانی در تشخیص صحیح اثرات واقعی تیمارها می‌شود؛ و) وجود متغیرهای

نتایج مقایسه میانگین نشان داد در گیاهان آبیاری شده با آب معمولی، کاربرد سطوح مختلف بیوچار در مقایسه با بیوچار صفر اثر معنی‌داری بر وزن خشک اندام هوایی اسفناج نداشت (شکل ۲). نتایج همچنین نشان داد که در گیاهان آبیاری شده با آب معمولی افزایش سطوح تنش خشکی ۷۵ و ۵۰ درصد به ترتیب، سبب کاهش ۸/۳ و ۲۴ درصدی وزن خشک اندام هوایی گیاه شد که این کاهش تنها در تنش خشکی ۵۰ درصد ظرفیت زراعی از لحاظ آماری معنی‌دار بود. نتایج همچنین نشان داد در گیاهان آبیاری شده با آب مغناطیسی، کاربرد سطوح ۱، ۲ و ۳ درصد بیوچار نسبت به بیوچار صفر به ترتیب سبب افزایش ۳/۹، ۷/۸ و ۸/۳ درصدی وزن خشک اندام هوایی گیاه شد هرچند این تغییرات از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. همچنین تنش خشکی ۷۵ و ۵۰ درصد در مقایسه با شرایط بدون تنش، به ترتیب سبب کاهش ۳/۷ و ۱۵/۷ درصدی وزن خشک اندام هوایی شد که این کاهش در تنش خشکی ۵۰ درصد از لحاظ آماری معنی‌دار بود. نتایج نشان داد میزان کاهش وزن خشک اندام هوایی در پاسخ به تنش‌های خشکی ۷۵ و ۵۰ درصد در شرایط استفاده از آب مغناطیسی (۳/۷ و ۱۵/۷ درصد) در مقایسه با گیاهان آبیاری شده با آب معمولی (۸/۳ و ۲۴ درصد) کمتر بود که نشان‌دهنده اثر مثبت آب مغناطیسی شده در کاهش اثرات منفی تنش خشکی بر رشد گیاه است که می‌تواند به دلیل افزایش جذب آب توسط گیاه یا افزایش نگهداشت آب در خاک در شرایط آبیاری با آب مغناطیسی شده باشد. به‌طور کلی نتایج نشان داد کاربرد آب مغناطیسی در مقایسه به‌طور کلی معنی‌دار نبودن اثر برهم‌کنش‌های مختلف تیمارهای مورد مطالعه بر غلظت برخی عناصر می‌تواند به دلایل متفاوتی از جمله موارد زیر باشد: الف) عدم وجود اثرات واقعی و برهم‌کنش بین تیمارهای مورد مطالعه، که در این حالت تفاوت‌های موجود ناشی از تغییرات تصادفی هستند؛ ب) طراحی

طراحی آزمایش مدنظر قرار گیرد و بنابراین برخی از موارد ذکر شده عملاً نمی‌توانند تأثیر زیادی بر نتایج داشته باشند. به عبارتی به نظر می‌رسد از بین دلایل ذکر شده دو دلیل (۱) عدم وجود اثرات واقعی و برهم‌کنش بین تیمارهای مورد مطالعه و (۲) وجود متغیرهای غیرقابل کنترل و مزاحم برای تأثیر بر نتایج و عدم تشخیص اثر برهم‌کنش تیمارها بر ویژگی‌های مورد مطالعه، اثرات بیش‌تری داشته و محتمل‌تر باشند.

کنترل نشده و مزاحم که بر نتایج تأثیر دارند و سبب مخفی ماندن اثر تیمارها می‌شوند؛ ه) انتخاب نادرست آزمون آماری در تحلیل داده‌ها که منجر به نتایج و در نتیجه تحلیل‌های ناصحیح می‌شود؛ و ی) توزیع نامتعادل تیمارها در نمونه‌های آزمایشی که می‌تواند سبب عدم تشخیص یا تشخیص نادرست اثر برهم‌کنش‌ها شود (Richard and Wichern, 2007; Wolfgang and Simar, 2007). در پژوهش حاضر سعی شده تا حدامکان اصول صحیح



شکل ۲ - اثر سطوح تنش خشکی (رطوبتی)، بیوچار و نوع آب بر میانگین وزن خشک اندام هوایی اسفناج (میانگین‌های کلی مربوط به سطوح بیوچار یا تنش‌های رطوبتی مربوط به هر نوع آب، که حداقل در یک حرف بزرگ و ستون‌هایی که در هر تیمار حداقل در یک حرف کوچک مشترک هستند از نظر آماری و با استفاده از آزمون چند دامنه دانکن در سطح احتمال ۵ درصد با یکدیگر اختلاف معنی‌دار ندارند. Figure 2- Effect of drought (moisture) stress levels, biochar, and water type on the mean shoot dry weight of spinach (overall means of biochar or moisture stress levels for each type of water, followed by the same capital letters, and the columns followed by the same lowercase letters are not significantly different at $P \leq 0.05$ according to Duncan's multiple range test.)

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس اثر بیوچار، نوع آب و تنش خشکی بر غلظت عناصر اندام هوایی

Table 5- Results of analysis of variance of the effect of biochar, water type, and drought stress on the shoot nutrient concentration of spinach

K	Na	Ca	Mg	Zn	Fe	Mn	Cu	DF	Source of variation
96626540 ^{ns}	478087 ^{ns}	294336 ^{ns}	1256641*	3268**	8256 ^{ns}	197709**	26/ 79 ^{ns}	1	1
294041543 ^{ns}	284240 ^{ns}	112486 ^{ns}	785181 ^{ns}	137 ^{ns}	4266 ^{ns}	10259**	16/ 72 ^{ns}	2	2
204080597 ^{ns}	215667 ^{ns}	231518 ^{ns}	372572 ^{ns}	21 ^{ns}	7375 ^{ns}	477 ^{ns}	22/ 12 ^{ns}	3	3
2903987900**	508199 ^{ns}	130985 ^{ns}	196943 ^{ns}	86 ^{ns}	5166 ^{ns}	2621**	67/11**	2	4
3446555 ^{ns}	37105 ^{ns}	10806 ^{ns}	125742 ^{ns}	36 ^{ns}	4087 ^{ns}	519 ^{ns}	40/87*	2	5
616831813 ^{ns}	130920 ^{ns}	435249*	191995 ^{ns}	21 ^{ns}	189 ^{ns}	293 ^{ns}	15/ 20 ^{ns}	6	6
186328935 ^{ns}	36827 ^{ns}	151244 ^{ns}	496222 ^{ns}	46 ^{ns}	4030 ^{ns}	226 ^{ns}	33/64*	6	7
293659413	170365	178798	307474	82/48	5178	350/17	11/58	48	8

منابع تغییر 1، 2، 3، 4، 5، 6، 7 و 8 به ترتیب نوع آب، تنش خشکی، سطوح بیوچار، برهم‌کنش نوع آب و سطوح بیوچار، برهم‌کنش تنش خشکی و سطوح بیوچار، برهم‌کنش نوع آب، تنش خشکی و سطوح بیوچار و خطا هستند.

*, **, و ^{ns} به ترتیب معنی‌داری در سطوح 5 و 1 درصد و غیرمعنی‌داری را نشان می‌دهد.

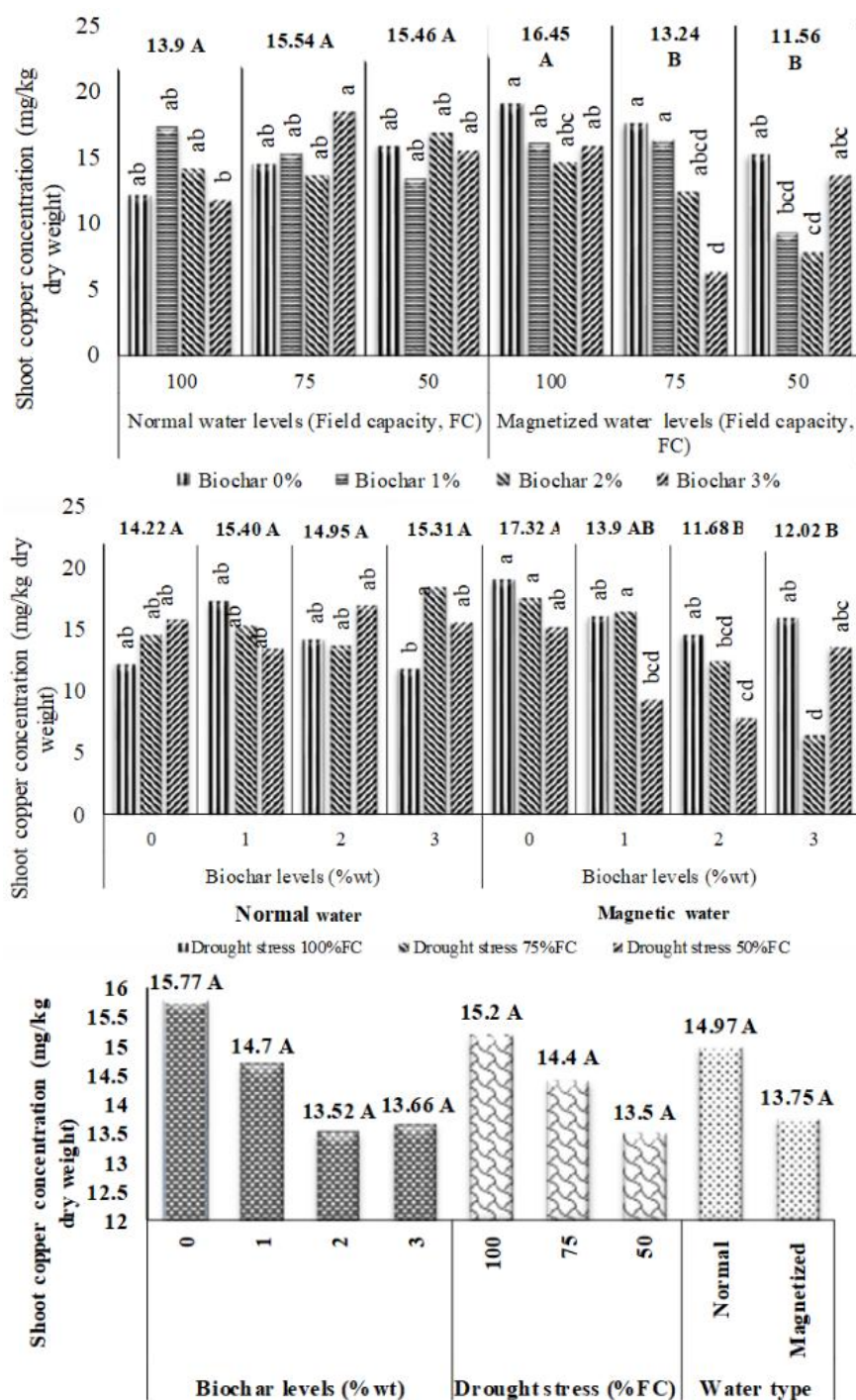
The sources of variation 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, and 8 are water type, drought stress, biochar levels, the interaction between water type and drought stress, interaction between water type and biochar levels, interaction between drought stress and biochar levels, interaction between water type, drought stress, and biochar levels, and error, respectively.

*, **, and ns indicate significance at the probability levels of 5% and 1%, and non-significant, respectively.

۳-۲-۱- مس

نتایج مقایسه میانگین نشان داد در گیاهان آبیاری شده با آب معمولی، کاربرد سطوح مختلف بیوچار در مقایسه با شاهد و همچنین افزایش سطح تنش خشکی در مقایسه با شرایط بدون تنش اثر معنی‌داری بر غلظت مس اندام هوایی اسفناج نداشت. نتایج همچنین نشان داد در گیاهان آبیاری شده با آب معمولی، بیش‌ترین غلظت مس اندام هوایی اسفناج (۱۸/۴۸ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک) در تیمار سه درصد بیوچار و در شرایط تنش خشکی ۷۵ درصد ظرفیت مزرعه حاصل شد. درحالی‌که کم‌ترین میزان غلظت مس در گیاهان آبیاری شده با آب معمولی (۱۱/۸۵ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک) در همان درصد بیوچار (سه درصد) اما در تیمار بدون تنش خشکی حاصل شد (شکل ۳). نتایج همچنین نشان داد که در گیاهان آبیاری شده با آب مغناطیسی، کاربرد سطوح ۱، ۲ و ۳ درصد بیوچار در مقایسه با شاهد (صفر درصد) به ترتیب سبب کاهش ۱۹/۲۲، ۳۲/۵ و ۳۰/۶ درصدی

غلظت مس اندام هوایی شد. هر چند کاهش ۱۹/۲۲ درصدی حاصل از کاربرد ۱ درصد بیوچار در مقایسه با شاهد (صفر درصد) از نظر آماری معنی‌دار نبود. نتایج همچنین نشان داد در گیاهان آبیاری شده با آب مغناطیسی، با اعمال تنش خشکی ۷۵ و ۵۰ درصد، غلظت مس اندام هوایی به‌طور معنی‌داری به ترتیب به میزان ۱۹/۵ و ۲۹/۷ درصد در مقایسه با شرایط بدون تنش خشکی کاهش یافت. نتایج همچنین نشان داد بیش‌ترین (۱۹/۱۱ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک) و کم‌ترین (۶/۴۷ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک) غلظت مس اندام هوایی در شرایط آبیاری با آب مغناطیسی نیز به ترتیب در تیمارهای بدون تنش خشکی و صفر درصد بیوچار و تنش خشکی ۷۵ درصد و سه درصد بیوچار حاصل شد (شکل ۳). به‌طور کلی نتایج نشان داد کاربرد آب مغناطیسی در مقایسه با آب معمولی سبب کاهش حدود ۸ درصدی غلظت مس اندام هوایی اسفناج شد؛ هرچند این کاهش از لحاظ آماری معنی‌دار نبود (شکل ۳).



شکل ۳- اثر سطوح تنش خشکی (رطوبتی)، بیوجار و نوع آب بر غلظت مس اندام هوایی گیاه اسفناج (میانگین‌های کلی مربوط به سطوح بیوجار یا تنش‌های رطوبتی مربوط به هر نوع آب، که حداقل در یک حرف بزرگ و ستون‌هایی که در هر تیمار حداقل در یک حرف کوچک مشترک هستند از نظر آماری و با استفاده از آزمون چند دامنه دانکن در سطح احتمال ۵ درصد با یکدیگر اختلاف معنی‌دار ندارند).

Figure 3- Effect of drought (moisture) stress levels, biochar, and water type on spinach shoot copper concentration (overall means of biochar or moisture stress levels for each type of water, followed by the same capital letters, and the columns followed by the same lowercase letters are not significantly different at $P \leq 0.05$ according to Duncan's multiple range test.)

۳-۲-۲-۳- منگنز

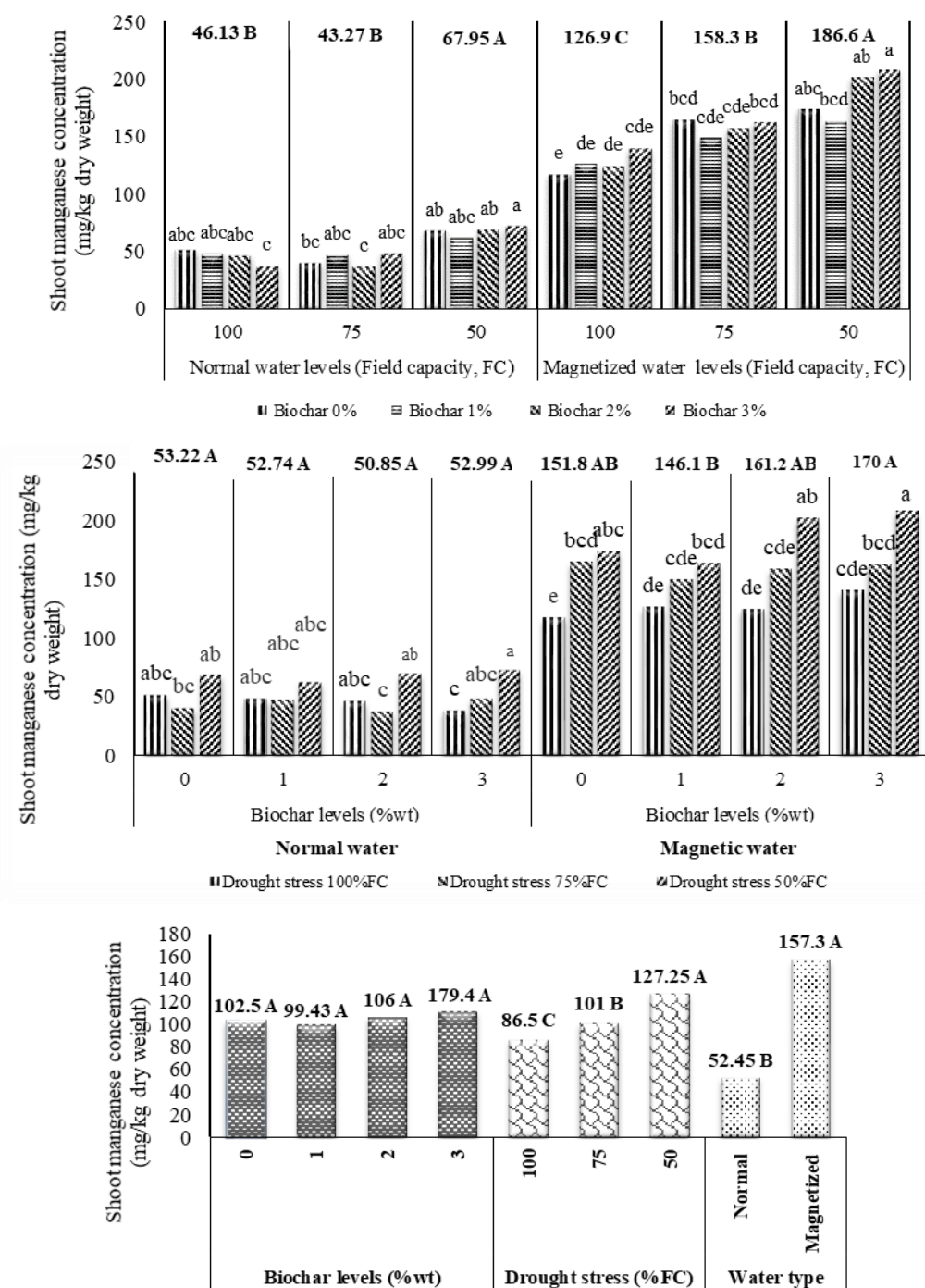
نتایج مقایسه میانگین نشان داد در گیاهان آبیاری شده با آب معمولی، کاربرد سطوح مختلف بیوپار در مقایسه با شاهد (صفر درصد) در هر سطح تنش خشکی اثر معنی‌داری بر غلظت منگنز اندام هوایی اسفناج نداشت. نتایج همچنین نشان داد که افزایش تنش خشکی در مقایسه با شرایط بدون تنش تنها در تنش خشکی ۵۰ درصد سبب افزایش ۴۷ درصدی و معنی‌دار غلظت منگنز اندام هوایی اسفناج شد. کاربرد سطوح کم تنش خشکی (۷۵ درصد ظرفیت مزرعه) در مقایسه با شرایط بدون تنش اثر معنی‌داری بر غلظت منگنز اندام هوایی نداشت. نتایج همچنین نشان داد در گیاهان آبیاری شده با آب معمولی، بیش‌ترین غلظت منگنز اندام هوایی (۷۲/۵۸ میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک) در تیمار کاربرد سه درصد بیوپار و در تنش خشکی ۵۰ درصد حاصل شد درحالی‌که کم‌ترین میزان غلظت منگنز (۳۷ میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک) در تیمار با کاربرد ۲ درصد بیوپار و تنش خشکی ۷۵ درصد حاصل شد (شکل ۴). نتایج همچنین نشان داد که در گیاهان آبیاری شده با آب مغناطیسی، با افزایش سطح بیوپار ابتدا غلظت منگنز اندام هوایی اسفناج کاهش و پس از آن افزایش یافت. به‌طوری‌که افزایش یک درصد بیوپار به خاک در مقایسه با شاهد سبب کاهش ۷/۸ درصدی منگنز اندام هوایی و پس از آن افزایش ۲ و ۳ درصد بیوپار به خاک نسبت به شاهد به‌ترتیب سبب افزایش ۶/۲ و ۱۱/۹۲ درصدی غلظت منگنز شد. هر چند تغییرات مذکور در مقایسه با شاهد از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. نتایج همچنین نشان داد در گیاهان آبیاری شده با آب مغناطیسی، اعمال تنش خشکی ۷۵ و ۵۰ درصد، غلظت منگنز اندام هوایی را به‌طور معنی‌داری به‌ترتیب به میزان ۲۴/۷ و ۴۷ درصد در مقایسه با شرایط بدون تنش افزایش داد. بیش‌ترین غلظت منگنز اندام‌های هوایی گیاه به میزان ۲۰۷/۵۲ میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک در تیمار کاربرد ۳ درصد بیوپار و تنش خشکی ۵۰ درصد حاصل شد درحالی‌که کم‌ترین غلظت منگنز اندام هوایی به میزان ۱۱۷/۳ میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک در تیمار بدون تنش و بدون

کاربرد بیوپار حاصل شد (شکل ۴). به‌طور کلی نتایج نشان داد کاربرد آب مغناطیسی در مقایسه با آب معمولی سبب افزایش معنی‌دار و ۳ برابری غلظت منگنز اندام هوایی اسفناج شد (شکل ۴).

۳-۲-۳- آهن

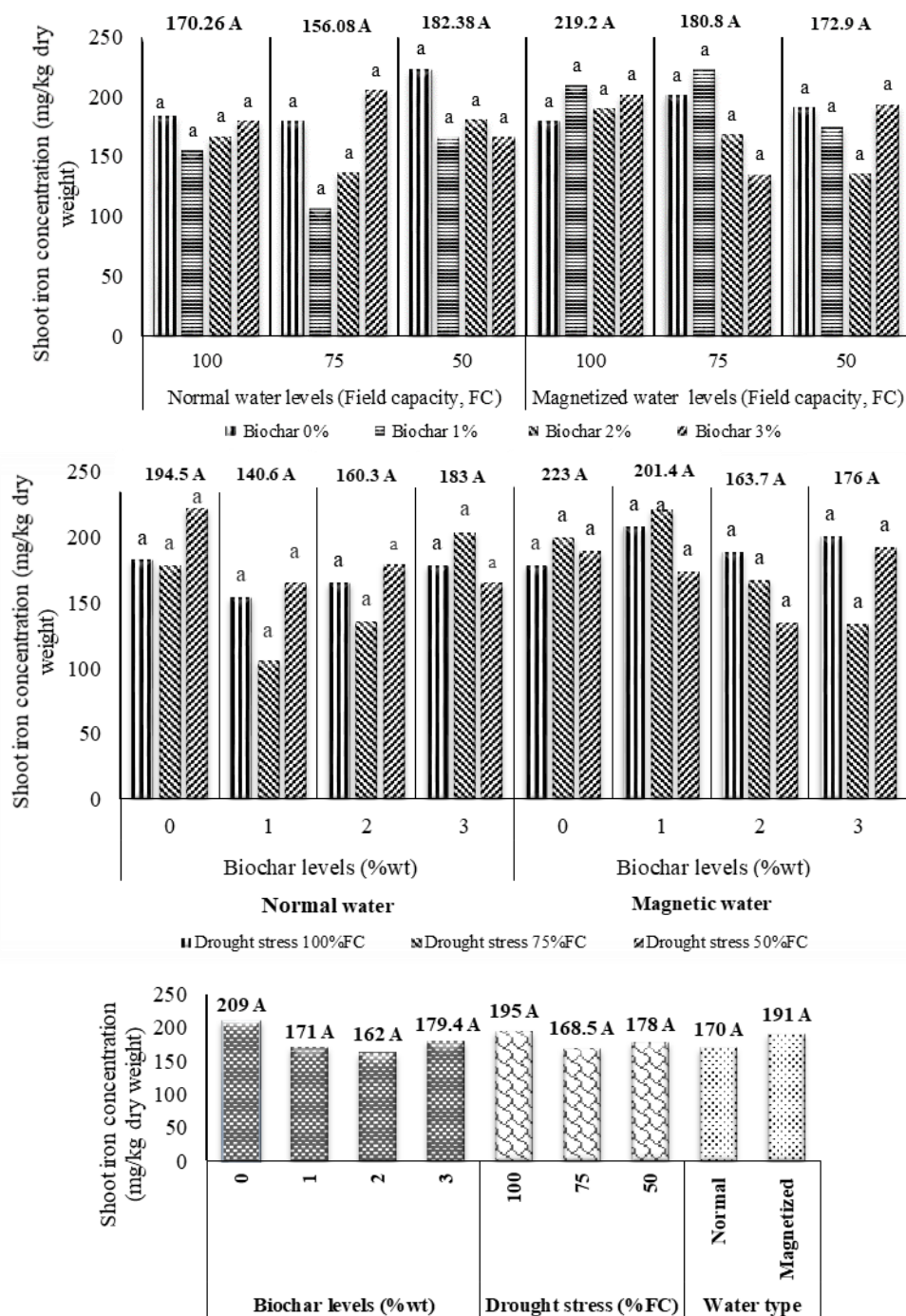
نتایج مقایسه میانگین نشان داد در گیاهان آبیاری شده با آب معمولی، کاربرد سطوح مختلف بیوپار در مقایسه با شاهد (صفر درصد) و همچنین افزایش تنش خشکی در مقایسه با شرایط بدون تنش اثر معنی‌داری بر غلظت آهن اندام هوایی اسفناج نداشت. نتایج شکل ۵ همچنین نشان داد در گیاهان آبیاری شده با آب معمولی، بیش‌ترین غلظت آهن اندام هوایی (۲۲۲ میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک) در تیمار بدون کاربرد بیوپار و تنش خشکی ۵۰ درصد و کم‌ترین غلظت آهن (۱۳۶ میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک) در تیمار با تنش خشکی ۷۵ درصد و ۲ درصد بیوپار حاصل شد. نتایج همچنین نشان داد که در گیاهان آبیاری شده با آب مغناطیسی، افزایش سطح بیوپار اثر معنی‌داری بر غلظت آهن اندام هوایی نداشت. اما با اعمال تنش خشکی ۷۵ و ۵۰ درصد در گیاهان آبیاری شده با آب مغناطیسی غلظت آهن اندام هوایی به‌ترتیب به میزان ۲۱/۲۱ و ۲۱/۱۱ درصد در مقایسه با بدون تنش خشکی کاهش یافت هر چند این تغییرات از نظر آماری معنی‌دار نبود. در گیاهان آبیاری شده با آب مغناطیسی، بیش‌ترین غلظت آهن اندام هوایی (۲۲۱/۵۲ میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک) نیز در تیمار تنش خشکی ۷۵ درصد ظرفیت مزرعه و ۱ درصد بیوپار و کم‌ترین غلظت آهن (۱۳۴/۳۵ میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک) در همان سطح تنش ولی با کاربرد ۳ درصد بیوپار حاصل شد (شکل ۵).

به‌طور کلی نتایج نشان داد کاربرد آب مغناطیسی در مقایسه با آب معمولی سبب افزایش حدود ۱۳ درصدی غلظت آهن اندام هوایی اسفناج شد هر چند این افزایش از لحاظ آماری معنی‌دار نبود (شکل ۵).



شکل ۴- اثر سطوح تنش خشکی (رطوبتی)، بیوجار و نوع آب غلظت منگنز اندام هوایی گیاه اسفناج (میانگین‌های کلی مربوط به سطوح بیوجار یا تنش‌های رطوبتی مربوط به هر نوع آب، که حداقل در یک حرف بزرگ و ستون‌هایی که در هر تیمار حداقل در یک حرف کوچک مشترک هستند از نظر آماری و با استفاده از آزمون چند دامنه دانکن در سطح احتمال ۵ درصد با یکدیگر اختلاف معنی‌دار ندارند).

Figure 4- Effect of drought (moisture) stress levels, biochar, and type of water on the concentration of manganese in the shoots of spinach plants (overall means of biochar or moisture stress levels for each type of water, followed by the same capital letters, and the columns followed by the same lowercase letters are not significantly different at $P \leq 0.05$ according to Duncan's multiple range test).



شکل ۵- اثر سطوح تنش خشکی (رطوبتی)، بیوجار و نوع آب بر غلظت آهن اندام هوایی گیاه اسفناج (میانگین‌های کلی مربوط به سطوح بیوجار یا تنش‌های رطوبتی مربوط به هر نوع آب، که حداقل در یک حرف بزرگ و ستون‌هایی که در هر تیمار حداقل در یک حرف کوچک مشترک هستند از نظر آماری و با استفاده از آزمون چند دامنه دانکن در سطح احتمال ۵ درصد با یکدیگر اختلاف معنی‌دار ندارند).

Figure 5- The effect of drought (moisture) stress level, biochar, and type of water on this spinach shoot plant (overall means of biochar or moisture stress levels for each type of water, followed by the same capital letters, and the columns followed by the same lowercase letters are not significantly different at $P \leq 0.05$ according to Duncan's multiple range test).

(جدول ۶). نتایج هم‌چنین نشان داد که غلظت روی در گیاهان آبیاری شده با آب معمولی در تنش خشکی ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه به‌طور معنی‌داری به میزان ۱۹/۲۲ درصد در مقایسه با شرایط بدون تنش خشکی کاهش یافت در حالی‌که تنش خشکی

۳-۲-۴- روی

نتایج مقایسه میانگین نشان داد در گیاهان آبیاری شده با آب معمولی، کاربرد سطوح مختلف بیوجار در مقایسه با شاهد (صفر درصد) اثر معنی‌داری بر غلظت روی اندام هوایی اسفناج نداشت

۷۵ درصد ظرفیت مزرعه در مقایسه با شرایط بدون تنش بر غلظت روی اندام هوایی اثر معنی‌داری نداشت. نتایج هم‌چنین نشان داد که تیمار کاربرد ۳ درصد بیوپار و تنش خشکی ۷۵ درصد ظرفیت مزرعه بیش‌ترین غلظت روی با مقدار ۴۱/۱۴ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک و تیمار کاربرد ۱ درصد بیوپار و تنش خشکی ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه کم‌ترین غلظت روی با مقدار ۲۵/۳۷ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک را به خود اختصاص دادند. نتایج مقایسه میانگین نشان داد در گیاهان آبیاری شده با آب مغناطیسی نیز کاربرد سطوح مختلف بیوپار در مقایسه با بیوپار صفر درصد و هم‌چنین سطوح تنش خشکی در مقایسه با شرایط بدون تنش

اثر معنی‌داری بر غلظت روی اندام هوایی اسفناج نداشتند. نتایج هم‌چنین نشان داد بیش‌ترین غلظت روی با مقدار ۴۹/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک در شرایط بدون کاربرد بیوپار و تنش خشکی ۷۵ درصد ظرفیت مزرعه و کم‌ترین غلظت روی با مقدار ۴۱/۶۴ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک در تیمار کاربرد ۲ درصد بیوپار و در شرایط بدون تنش خشکی مشاهده شد (جدول ۵). به‌طورکلی نتایج نشان داد که کاربرد آب مغناطیسی در مقایسه با آب معمولی سبب افزایش معنی‌دار ۴۰/۴۱ درصدی غلظت روی اندام هوایی اسفناج شد (جدول ۶).

جدول ۶- اثر سطوح بیوپار، نوع آب و خشکی بر غلظت روی (میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک) اندام هوایی اسفناج رشد یافته خشکی

Table 6- Effect of biochar, water and drought type on shoot Zn concentration (mg kg ⁻¹ DW) of spinach grown					
Biochar levels (%wt)					Drought stress (%FC)
Mean	3	2	1	0	
Normal Water (33.33 B)					
35.43 A	34.26 a	36.52 a	36.09 a	34.83 a	100
35.94 A	41.14 a	30.35 a	33.44 a	38.84 a	75
28.62 B	28.43 a	35.12 a	25.37 a	25.55 a	50
	34.64 A	33.99 A	31.63 A	33.07 A	Mean
Magnetized Water (46.80 A)					
45.76 A	48.33 a	41.64 a	45.41 a	47.66 a	100
48.35 A	48.48 a	46.66 a	49.07 a	49.2 a	75
46.3 A	46.24 a	42.72 a	47.68 a	48.56 a	50
	47.68 A	43.67 A	47.38 A	48.47 A	Mean

*در مورد هر نوع آب، میانگین‌هایی که در هر ردیف یا ستون حداقل در یک حرف بزرگ و اعدادی که در بدنه جدول حداقل در یک حرف کوچک مشترک هستند از نظر آماری و با استفاده از آزمون چند دامنه دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

*For each type of water, the means in each row or column followed by the same capital letters and those in the body of the table followed by the same lowercase letters are not significantly different at $P \leq 0.05$ according to Duncan's multiple range test.

۳-۲-۵- منیزیم

نتایج مقایسه میانگین نشان داد در گیاهان آبیاری شده با آب معمولی، کاربرد سطوح مختلف بیوپار در مقایسه با شاهد اثر معنی‌داری بر غلظت منیزیم اندام هوایی اسفناج نداشت. از طرفی افزایش سطوح تنش خشکی ۷۵ و ۵۰ درصد در مقایسه با شرایط بدون تنش به‌ترتیب سبب افزایش ۹/۴ و ۱۲/۴ درصدی غلظت منیزیم اندام هوایی گیاه شد هرچند این تغییرات از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. نتایج هم‌چنین نشان داد در گیاهان آبیاری شده با آب معمولی، بیش‌ترین غلظت منیزیم اندام هوایی (۲۷۷۶ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک) در تیمار ۲ درصد بیوپار و تنش خشکی ۵۰ درصد و کم‌ترین غلظت منیزیم (۱۷۸۶ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک) در تیمار با تنش خشکی ۷۵ درصد و ۱ درصد بیوپار حاصل شد (داده‌ها نشان داده نشده است). نتایج مقایسه میانگین هم‌چنین نشان داد در گیاهان آبیاری شده با آب مغناطیسی، کاربرد سطوح بیوپار سبب کاهش غلظت منیزیم اندام هوایی در مقایسه با شاهد (بیوپار صفر) شد هر چند این تغییرات

از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. تنش خشکی ۷۵ و ۵۰ درصد در مقایسه با شرایط بدون تنش نیز به‌ترتیب سبب افزایش ۵/۵۳ و ۶/۶۲ درصدی غلظت منیزیم اندام هوایی گیاه شد هرچند این تغییرات از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. در گیاهان آبیاری شده با آب مغناطیسی، بیش‌ترین غلظت منیزیم اندام هوایی (۲۷۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک) در تیمار ۳ درصد بیوپار و شرایط بدون تنش خشکی و کم‌ترین غلظت منیزیم (۱۶۷۲ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک) در شرایط بدون تنش خشکی و ۲ درصد بیوپار حاصل شد (داده‌ها نشان داده نشده است). به‌طورکلی نتایج نشان داد که کاربرد آب مغناطیسی در مقایسه با آب معمولی سبب کاهش ۴/۷۲ درصدی غلظت منیزیم اندام هوایی اسفناج شد هرچند این تغییرات از لحاظ آماری معنی‌دار نبود.

۳-۲-۶- کلسیم

نتایج مقایسه میانگین نشان داد در گیاهان آبیاری شده با آب معمولی، کاربرد سطوح مختلف بیوپار در مقایسه با بدون کاربرد بیوپار و همچنین افزایش تنش خشکی در مقایسه با شرایط بدون تنش رطوبتی اثر معنی داری بر غلظت کلسیم اندام هوایی اسفناج نداشت. نتایج همچنین نشان داد در گیاهان آبیاری شده با آب معمولی، بیشترین غلظت کلسیم اندام هوایی (۱۹۲۴ میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک) در تیمار بدون کاربرد بیوپار و تنش خشکی ۵۰ درصد و کمترین غلظت کلسیم (۱۳۲۵ میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک) در تیمار با تنش خشکی ۷۵ درصد ظرفیت مزرعه و ۳ درصد بیوپار حاصل شد. نتایج همچنین نشان داد که در گیاهان آبیاری شده با آب مغناطیسی، کاربرد بیوپار یک درصد سبب افزایش ۲/۸ درصدی و کاربرد بیوپار ۲ و ۳ درصد به ترتیب سبب کاهش ۸/۴ و ۱۵ درصدی غلظت کلسیم اندام هوایی گیاه شد هر چند تغییرات از لحاظ آماری معنی دار نبود. افزایش تنش خشکی نیز در مقایسه با شاهد اثر معنی داری بر غلظت کلسیم اندام هوایی اسفناج نداشت. بیشترین و کمترین غلظت کلسیم اندام هوایی در گیاهان آبیاری شده با آب مغناطیسی نیز به ترتیب با مقادیر ۲۰۳۶ و ۱۰۶۲ میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک در تیمارهای با بیوپار ۱ و ۳ درصد هر دو در تنش خشکی ۵۰ درصد حاصل شد (داده‌ها نشان داده نشده است). به طور کلی نتایج نشان داد کاربرد آب مغناطیسی در مقایسه با آب معمولی سبب افزایش حدود ۶ درصدی میانگین غلظت کلسیم اندام هوایی اسفناج شد هرچند این افزایش از لحاظ آماری معنی دار نبود.

۳-۲-۷- پتاسیم

نتایج مقایسه میانگین نشان داد در گیاهان آبیاری شده با آب معمولی، کاربرد سطوح مختلف بیوپار در مقایسه با شاهد اثر

معنی داری بر غلظت پتاسیم اندام هوایی اسفناج نداشت (جدول ۶). نتایج همچنین نشان داد که اعمال سطوح تنش خشکی ۷۵ و ۵۰ درصد در مقایسه با شرایط بدون تنش به ترتیب سبب افزایش ۱۷ و ۴۶ درصدی غلظت پتاسیم اندام هوایی اسفناج شد که البته این افزایش تنها در تنش ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه از لحاظ آماری معنی دار بود. نتایج همچنین نشان داد در گیاهان آبیاری شده با آب معمولی، بیشترین غلظت پتاسیم اندام هوایی (۹۵۱۴۷ میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک) در تیمار بدون کاربرد بیوپار و تنش خشکی ۵۰ درصد و کمترین غلظت پتاسیم (۴۸۴۱۳ میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک) در تیمار بدون تنش خشکی و کاربرد ۳ درصد بیوپار حاصل شد (جدول ۷).

نتایج همچنین نشان داد در گیاهان آبیاری شده با آب مغناطیسی، کاربرد بیوپار اثر معنی داری بر غلظت پتاسیم اندام هوایی نداشت. اما افزایش تنش خشکی سبب کاهش غلظت پتاسیم شد به طوری که با اعمال تنش خشکی ۷۵ و ۵۰ درصد نسبت به شرایط بدون تنش، غلظت پتاسیم به ترتیب به میزان ۱۸ و ۲۰ درصد کاهش یافت هر چند این کاهش تنها در تنش خشکی ۵۰ درصد از لحاظ آماری معنی دار بود. بیشترین غلظت پتاسیم اندام هوایی (۹۸۳۷۸ میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک) نیز در تیمار بدون تنش خشکی و ۱ درصد بیوپار و کمترین غلظت پتاسیم (۵۰۵۵۶ میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک) در شرایط تنش خشکی ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه و ۱ درصد بیوپار حاصل شد (جدول ۷). به طور کلی نتایج نشان داد کاربرد آب مغناطیسی در مقایسه با آب معمولی سبب افزایش حدود ۳ درصدی غلظت پتاسیم اندام هوایی اسفناج شد هرچند این افزایش از لحاظ آماری معنی دار نبود.

جدول ۷- اثر سطوح بیوپار، نوع آب و خشکی بر غلظت پتاسیم (میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک) اندام هوایی اسفناج رشد یافته

Table 7- Effect of biochar water and drought on shoot K concentration (mg kg ⁻¹ DW) of spinach grown under different					
	Biochar levels (%wt)				Drought stress (%FC)
Mean	3	2	1	0	
	Normal Water (72094 A)				
59548 B	48413 c	59571 bc	63021 abc	67186 abc	100
69936 B	73608 abc	74763 abc	72724 abc	58650 bc	75
86798 A	83909 ab	95602 a	72533 abc	95147 a	50
	68643 A	76645 A	69426 A	73661 A	Mean
	Magnetized Water (74411 A)				
84352 A	82453 abc	82633 abc	98378 a	73942 abc	100
71244 AB	70834 abc	77493 abc	69457 abc	67194 abc	75
67637 B	60331 bc	73685 abc	50556 c	85975 ab	50
	71206 A	77937 A	72797 A	75704 A	Mean

*در مورد هر نوع آب، میانگین‌هایی که در هر ردیف یا ستون حداقل در یک حرف بزرگ و اعدادی که در بدنه جدول حداقل در یک حرف کوچک مشترک هستند از نظر آماری و با استفاده از آزمون چند دامنه دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی دار ندارند.

*For each type of water, the means in each row or column followed by the same capital letters and those in the body of the table followed by the same lowercase letters are not significantly different at $P \leq 0.05$ according to Duncan's multiple range test.

۳-۲-۸- سدیم

نتایج مقایسه میانگین نشان داد در گیاهان آبیاری شده با آب معمولی، کاربرد سطوح مختلف بیوپار در مقایسه با بدون کاربرد بیوپار و همچنین اعمال سطوح تنش خشکی در مقایسه با شرایط بدون تنش اثر معنی‌داری بر غلظت سدیم اندام هوایی اسفناج نداشت. نتایج همچنین نشان داد در گیاهان آبیاری شده با آب معمولی، بیش‌ترین غلظت سدیم اندام هوایی (۱۶۲۸ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک) در تیمار کاربرد ۳ درصد بیوپار و تنش خشکی ۷۵ درصد و کم‌ترین غلظت سدیم (۹۵۳ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک) در تیمار کاربرد ۱ درصد بیوپار و تنش خشکی ۵۰ درصد حاصل شد (داده‌ها نشان داده نشده است). نتایج همچنین نشان داد که در گیاهان آبیاری شده با آب مغناطیسی، کاربرد بیوپار اثر معنی‌داری بر غلظت سدیم اندام هوایی نداشت. اما افزایش تنش خشکی سبب افزایش غلظت سدیم اندام هوایی شد به‌طوری‌که با اعمال تنش خشکی ۷۵ و ۵۰ درصد در مقایسه با شرایط بدون تنش به‌ترتیب به میزان ۰/۵۸ و ۴۱ درصد افزایش یافت هر چند تغییرات از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. نتایج همچنین نشان داد بیش‌ترین غلظت سدیم اندام هوایی (۱۶۱۲ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک) در تیمار تنش خشکی ۵۰ درصد و ۳ درصد بیوپار و کم‌ترین غلظت سدیم (۸۰۲ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک) در شرایط بدون تنش خشکی و ۲ درصد بیوپار حاصل شد (داده‌ها نشان داده نشده است). به‌طور کلی نتایج نشان داد کاربرد آب مغناطیسی در مقایسه با آب معمولی سبب کاهش حدود ۱۶ درصدی غلظت سدیم اندام هوایی اسفناج شد هرچند این کاهش از لحاظ آماری معنی‌دار نبود.

۴- بحث

در گیاهان آبیاری شده با آب مغناطیسی، کاربرد سطوح ۱، ۲ و ۳ درصد بیوپار در مقایسه با شاهد سبب افزایش وزن خشک و کاهش غلظت مس اندام هوایی گیاه اسفناج شده است. افزایش وزن خشک اندام هوایی اسفناج با افزایش سطوح بیوپار، سبب کاهش غلظت مس اندام هوایی شده، که می‌تواند به‌علت اثر رقت ناشی از افزایش عملکرد باشد. نتایج همچنین نشان داد که افزایش تنش خشکی سبب افزایش غلظت منگنز اندام هوایی اسفناج شده که با نتایج پژوهش انجام شده توسط (Nahar and Gretzmacher 2002) در خصوص افزایش غلظت منگنز در گیاه گوجه فرنگی با افزایش تنش خشکی مطابقت داشت. مشابه با نتایج این پژوهش، افزایش غلظت عناصر کم‌مصرف از جمله آهن، روی، مس و منگنز در اثر افزایش تنش رطوبتی توسط Sajedi and Rejali (2011) نیز گزارش شد.

در گیاهان آبیاری شده با آب معمولی، کاربرد سطوح مختلف بیوپار و همچنین افزایش تنش خشکی اثر معنی‌داری بر غلظت آهن اندام هوایی اسفناج نداشت که با نتایج Gavili et al. (2018b) هم‌خوانی داشت. این پژوهشگران نشان دادند سطوح رطوبتی اثر معنی‌داری بر غلظت آهن اندام هوایی اسفناج نداشت که دلیل آن را کاهش ماده خشک تولیدی به‌دنبال اعمال تنش خشکی در مقایسه با شرایط بدون تنش (شاهد) گزارش کردند. زیرا کاهش جذب آب و عناصر توسط ریشه گیاه و در نتیجه کاهش غلظت آهن و سایر عناصر از جمله منگنز، روی و مس برای خنثی کردن افزایش غلظت عناصر در اثر کاهش ماده خشک تولیدی، منجر به عدم تغییر معنی‌دار غلظت آهن در پاسخ به تنش خشکی شده است. از طرفی در گیاهان آبیاری شده با آب مغناطیسی، افزایش تنش خشکی سبب کاهش غلظت آهن اندام هوایی شد که با نتایج Karami et al. (2016) هم‌خوانی داشت. ایشان گزارش کردند که تنش کم‌آبی با کاهش وزن خشک گیاه ذرت، سبب کاهش جذب آهن در کلیه تیمارها شده است. در ارتباط با عدم تأثیر معنی‌دار سطوح رطوبتی بر غلظت کلسیم و منیزیم گیاه نیز، نتایج با یافته‌های (Gavili et al. 2018b) که گزارش کردند سطوح رطوبتی اثر معنی‌داری بر غلظت کلسیم و منیزیم اندام هوایی اسفناج نداشت، هم‌خوانی دارد. در گیاهان آبیاری شده با آب معمولی، افزایش غلظت پتاسیم با افزایش تنش خشکی با یافته‌های (Ponce and Salas 2008) که بیان نمودند گیاه برای مقابله با تنش خشکی و افزایش مقاومت خود در برابر تنش، با مصرف انرژی غلظت یون پتاسیم را در ریشه و اندام هوایی افزایش می‌دهد، هم‌خوانی داشت. در مطالعه‌ای دیگر (Sposito 2013) نیز گزارش کرد که پتاسیم به‌عنوان کاتیونی مهم در تحمل گیاهان به تنش خشکی شناخته شده است لذا، افزایش غلظت پتاسیم با افزایش تنش خشکی قابل توجیه است.

در گیاهان آبیاری شده با آب مغناطیسی، افزایش تنش خشکی سبب افزایش غلظت سدیم اندام هوایی شد که به نظر می‌رسد افزایش غلظت سدیم به‌دلیل تعادل اسمزی در گیاه باشد. به‌عبارتی گیاه در شرایط خشکی با جذب بیش‌تر سدیم، تعادل اسمزی را برقرار نموده و با این روش آب بیش‌تری جذب می‌کند. در مطالعه‌ای دیگر (Bagheri and Heydari Sharifabad 2007) نیز بیان کرد که افزایش تنش رطوبتی سبب افزایش غلظت یون سدیم در برگ گندم شده است. به‌طور کلی نتایج نشان داد کاربرد آب مغناطیسی در مقایسه با آب معمولی سبب افزایش غلظت آهن، منگنز، روی، پتاسیم و کلسیم از طرفی دیگر سبب کاهش غلظت سدیم و منیزیم اندام هوایی اسفناج شد. نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج (Grewal and Maheshwari 2011) که گزارش کردند کاربرد آب مغناطیسی سبب افزایش عناصری

همچون پتاسیم، کلسیم، منیزیم، روی، آهن، گوگرد و منگنز در اندام هوایی گیاه نخود شده است هم خوانی دارد. در مطالعه دیگری نیز Maheshwari and Grewal (2009) افزایش جذب عناصر غذایی در گیاه گوجه فرنگی نیز با کاربرد آب آبیاری مغناطیسی را گزارش نمودند. همچنین گزارش شده آب مغناطیسی شده سبب افزایش درصد عناصر معدنی (کلسیم و پتاسیم)، در اندام های رویشی و زایشی باقلا El-Sayed and El-Sayed (2014) و فلقل (Rawabdeh et al., 2014) شده است. از طرفی نتایج با یافته های Yokatani et al. (2001) که بیان کردند آبیاری گیاه کرفس با آب مغناطیسی شده سبب افزایش غلظت برخی از عناصر همانند کلسیم، منیزیم و سدیم در اندام هوایی شد در ارتباط با منیزیم و سدیم هم خوانی نداشت. مشابه با نتایج غلظت آهن، Habiby et al. (2019) نیز گزارش کردند که در تیمارهای آبیاری شده با آب مغناطیسی شده غلظت آهن در دانه ذرت در مقایسه با شاهد به طور معنی داری افزایش یافت. کاهش کشش سطحی آب مغناطیسی شده و افزایش سهولت جذب آب مغناطیسی توسط گیاه و به دنبال آن افزایش حلالیت و جذب عناصر نیز توسط Pang and Deng (2008) گزارش شد. احتمالاً غلظت روی اندام هوایی اسفناج نیز به دلیل همین مکانیزم افزایش یافته است. از طرفی دیگر با توجه به استدلال و نتیجه مطالعه Hozayn and Abdul Qadoo (2010) می توان افزایش غلظت پتاسیم را به افزایش حلالیت و قابلیت جذب عناصر به دلیل استفاده از آب مغناطیسی این گونه نسبت داد که کاهش کشش سطحی آب مغناطیسی شده و افزایش سرعت تورم و تعادل پتانسیل اسمزی لایه دوگانه پخشیده الکتریکی با محلول خاک، سبب افزایش حلالیت و قابلیت جذب عناصر پتاسیم و همچنین روی شده است. (Hasan et al. 2019) نیز با بررسی اثر آب مغناطیسی بر رشد و شرایط فیزیولوژیک گونه مورینگا تحت تنش خشکی، دریافتند که آب مغناطیسی شده با کاهش تجمع یون های سدیم، نسبت سدیم به پتاسیم را بهبود بخشیده و از این رو، استفاده از آب مغناطیسی اثرات نامطلوب خشکی را در این گونه کاهش داده است. البته نتایج پژوهش حاضر در رابطه با کاهش غلظت سدیم اندام هوایی اسفناج با کاربرد آب مغناطیسی با نتایج Yokatani et al. (2001) مغایرت داشت. ایشان بیان کردند آبیاری گیاه کرفس با آب مغناطیسی شده سبب افزایش غلظت برخی از عناصر مانند کلسیم، منیزیم و سدیم در اندام هوایی شده است. افزایش جذب عناصر در گیاهان به واسطه آبیاری با آب مغناطیسی در مطالعات (Moon and Chung 2000) و همچنین Esitken and Turan (2007) نیز گزارش شده است. (Zlotopolski 2017) نیز نشان داد که استفاده از آب

مغناطیسی شده سبب افزایش معنی دار میزان محصول، کلروفیل b و غلظت عناصر کم مصرف و پرمصرف در گیاه کاهو شد. نتایج مقایسه میانگین نشان داد در گیاهان آبیاری شده با آب معمولی، کاربرد سطوح مختلف بیوپار در مقایسه با شاهد اثر معنی داری بر غلظت پتاسیم اندام هوایی اسفناج نداشت. نتایج همچنین نشان داد که تنش خشکی ۷۵ و ۵۰ درصد در مقایسه با شرایط بدون تنش به ترتیب سبب افزایش ۱۷ و ۴۶ درصدی غلظت پتاسیم اندام هوایی اسفناج شد که البته این افزایش فقط در تنش ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه از لحاظ آماری معنی دار بود. نتایج با یافته های Gonzales and Salas (2008) که بیان نمودند گیاه برای مقابله با تنش خشکی و افزایش مقاومت خود در برابر تنش، با مصرف انرژی غلظت یون پتاسیم را در ریشه و اندام هوایی افزایش می دهد، هم خوانی داشت. در مطالعه ای دیگر Sposito (2013) نیز گزارش کرد که پتاسیم به عنوان کاتیونی مهم در تحمل گیاهان به تنش خشکی شناخته شده است لذا، افزایش غلظت پتاسیم با افزایش تنش خشکی قابل توجیه است.

۵- نتیجه گیری

به طور کلی نتایج پژوهش حاضر نشان داد که در گیاهان آبیاری شده با آب مغناطیسی کاربرد سطوح مختلف بیوپار در مقایسه با شاهد سبب کاهش غلظت مس اندام هوایی شد. در حالی که کاربرد بیوپار سبب افزایش غلظت منگنز و وزن خشک اندام هوایی گیاه شد هر چند این تغییرات از لحاظ آماری معنی دار نبود. اعمال تنش خشکی ۷۵ و ۵۰ درصد در مقایسه با شرایط بدون تنش نیز سبب کاهش غلظت مس اندام هوایی شد. در حالی که تنش های خشکی مذکور سبب افزایش معنی دار غلظت منگنز اندام هوایی گیاه شد. همچنین کاربرد آب مغناطیسی در مقایسه با آب معمولی سبب کاهش غلظت منیزیم، سدیم و مس و افزایش غلظت آهن، منگنز، روی و پتاسیم و کلسیم اندام هوایی اسفناج شد (هر چند برخی تغییرات از نظر آماری معنی دار نبود). به طور کلی نتایج نشان داد کاربرد آب مغناطیسی و همچنین بیوپار که به عنوان یکی از راهکارهای کاهش اثرات خشکی بر گیاهان معرفی شده اند می تواند بر ترکیب شیمیایی گیاهان و غلظت عناصر در گیاه موثر باشند. بنابراین پیشنهاد می شود در شرایط گلخانه برای افزایش راندمان مصرف آب و عملکرد گیاه از آب مغناطیسی استفاده شود هر چند این روش ممکن است با محدودیت هایی مانند نیاز به تجهیزات خاص و هزینه های اضافی برای کشاورز همراه باشد و شایسته است تحلیل های اقتصادی لازم نیز در این مورد انجام شود. از طرفی برای تعمیم نتایج این پژوهش به شرایط مزرعه، نیاز به بررسی اثر تیمارها در مزرعه و تایید نتایج در آن شرایط است. به علاوه ممکن است استفاده از آب مغناطیسی در شرایط

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش وجود ندارند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

زینب سعادوی: انجام آزمایش، انجام تجزیه و تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري و تفسیر نتایج، نگارش نسخه اولیه و ویرایش مقاله؛ سید علی‌اکبر موسوی: مفهوم‌سازی، ایده و طراحی آزمایش، راهنمایی، تجزیه و تحلیل و تفسیر داده‌ها، منابع مورد نیاز، نگارش و ویرایش مقاله؛ رضا قاسمی: مفهوم‌سازی، ایده و طراحی آزمایش، ویرایش مقاله؛ فاطمه رزاقی: مفهوم‌سازی، ایده و طراحی آزمایش، ویرایش مقاله.

غذایی اسفناج در گلدان. پژوهش‌های آب و خاک/ایران، ۳۹(۳)، ۶۴۱-۶۴۸. doi:10.22059/ijswr.2017.236843.667714
عظیم‌زاده، یاسر، و نجفی، نصرت‌اله (۱۳۹۵). اثر بیوچار بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک. مدیریت اراضی، ۴(۲)، ۱۶۱-۱۷۳. doi:10.22092/lmj.2017.109488
کافی، محمد، برزویی، اعظم، صالحی، معصومه، کمندی، علی، معصومی، علی، و نباتی، جعفر (۱۳۸۸). فیزیولوژی تنش‌های محیطی در گیاهان. جهاد دانشگاهی، مشهد، ۵۰۲.
گرمی، شهرزاد، زارعی، مهدی، یثربی، جعفری، و موسوی، سید علی اکبر (۱۳۹۵). اثر باکتری محرک رشد گیاه بر جذب برخی عناصر کم‌مصرف به‌وسیله ذرت در یک خاک آلوده به کادمیم تحت تنش کم‌آبی. دانش آب و خاک، ۲۵(۳/۲)، ۱۰۵ - ۱۱۷. doi:10.22067/jsw.v30i4.44237
گوبلی، ادریس، موسوی، سید علی‌اکبر، و کامگارحقیقی، علی‌اکبر (۱۳۹۶). اثر بیوچار کود گاوی بر ترکیب شیمیایی اسفناج رشد یافته در وضعیت‌های رطوبتی مختلف در یک خاک آهکی. پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب)، ۳۱(۴)، ۵۲۵-۵۴۴. doi:10.22092/ijswr.2018.115854

طبیعی مزرعه و در وسعت زیاد به سهولت شرایط گلخانه و محیط‌های کشت کنترل‌شده امکان‌پذیر نباشد یا اینکه نیاز به ادوات خاص و هزینه‌های زیادتر داشته باشد. از طرفی مطالعات بیش‌تر برای ارزیابی اثرات سایر انواع بیوچار مشتق شده از کود دامی و بقایای گیاهی و همچنین سطوح مختلف بیوچار بر روی اسفناج و سایر محصولات، تحت شرایط تنش خشکی یا سایر اشکال تنش در شرایط مزرعه نیز توصیه می‌شود. همچنین پیشنهاد می‌شود که اثرات بلند مدت کاربرد بیوچار بر ویژگی‌های خاک و عملکرد محصولات مورد بررسی قرار گیرد.

سپاسگزاری

از حمایت‌های دانشگاه شیراز در تامین و فراهم آوردن تسهیلات و امکانات لازم برای انجام پژوهش صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

منابع

باقری، علیرضا، و حیدری شریف‌آباد، حسین (۱۳۸۶). بررسی اثر تنش خشکی بر عملکرد و اجزای عملکرد و محتوی یون‌ها در گیاه جو بدون پوشینه (*Hordeum sativum* L.). دانش نوین کشاورزی، ۳(۷)، ۱-۱۵.
حبیبی، هادی، موحدی نایینی، سید علیرضا، خوش‌رو، مجتبی، و صابری، علیرضا (۱۳۹۸). تأثیر آب مغناطیسی بر عملکرد و جذب برخی از عناصر در ذرت در شرایط مزرعه. مهندسی زراعی (کشاورزی)، ۴۲(۲)، ۱۳۱-۱۴۲. doi:10.22055/agen.2019.27239.1454
ساجدی، نورعلی، و رجالی، فرهاد (۱۳۹۰). تأثیر تنش خشکی، کاربرد روی و تلقیح میکوریز بر جذب عناصر کم مصرف در ذرت. پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب)، ۲۵(۲)، ۸۳-۹۳. doi:10.22092/ijswr.2011.126473
صمدیار، حسن، رهی، علیرضا، شیرمحمدی، کیانوش، تقی‌زاده، فرید، و کدخدای، زهره (۱۳۹۴). تأثیر پالایش الکترونیکی آب (آب مغناطیسی) بر آلکالوئید هیوسین دانه و برخی صفات مورفولوژیکی دو گونه تاتوره. گیاه و زیست بوم، ۱۰(۴۰)، ۵۹-۷۲.
عالی‌نژادیان بیدآبادی، افسانه، حسنی، مریم، و ملکی، عباس (۱۳۹۷). تأثیر مقدار و شوری آب بر شوری خاک و رشد و غلظت عناصر

References

Alattar, E., Radwan, E., & Elwasife, K. (2022). Improvement in growth of plants under the effect of magnetized water. *Aims Biophysics*, 9(4), 346-387. doi:10.3934/biophy.2022029
Alinejadian Bidabadi, A., Hasani, M., & Maleki, A. (2018). The effect of amount and salinity of

water on soil salinity and growth and nutrients concentration of spinach in a pot experiment. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(3), 641-651. doi:10.22059/ijswr.2017.236843.667714 [In Persian]
Alpsoy, H.C., & Unal, H. (2019). Effect of stationary magnetic field on seed germination

- and crop yield in spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Comptes Rendus del'Académie Bulgare des Sciences*, 72(5), 678- 698.
- Azimzadeh, Y., & Najafi, N. (2017). Effects of biochar on soil physical, chemical, and biological properties. *Land Management Journal*, 4(2), 161-173.
doi:10.22092/lmj.2017.109488 [In Persian]
- Bagheri, A.R., & Heydari Sharifabad, H. (2007). effect of drought and salt stresses on yield, yield components, and ion content, of hull-less barley (*Hordeum sativum* L.). *Agroecology Journal* (Journal of New Agricultural Science), 3(7), 1-15.
<https://sid.ir/paper/166845/en> [In Persian]
- Berek, A.K., Hue, N., & Ahmad, A. (2011). Beneficial use of biochar to correct soil acidity. The Food Provider is available at www.ctahr.hawaii.edu/huen/nvh/biochar.
- Biketi, S. (2018). Investigation of the effect of long-term exposure of magnetic field on the elemental composition and chlorophyll concentration in spinach beet (*Beta vulgaris subsp. vulgaris*) (Doctoral Dissertation, Egerton University).
<http://41.89.96.81:8080/xmlui/handle/123456789/1743>.
- Cong, M., Hu, Y., Sun, X., Yan, H., Yu, G., Tang, G., Chen, Sh., Xu, W., & Jia, H. (2023). Long-term effects of biochar application on the growth and physiological characteristics of maize. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1172425.
doi:10.3389/fpls.2023.1172425
- Teixeira da Silva, J. A., & Dobránszki, J. (2016). Magnetic fields: how is plant growth and development impacted?. *Protoplasma*, 253(2), 231-248. doi:10.1007/s00709-015-0820-7
- El Sayed, H.E.S.A., & El Sayed, A. (2014). Impact of magnetic water irrigation for improving the growth, chemical composition and yield production of Broad Bean (*Vicia faba* L.) plant. *American Journal of Experimental Agriculture*, 4(4), 476-496.
- Esitken, A., & Turan, M. (2007). Alternating magnetic field effects on yield and plant nutrient element composition of strawberry (*Fragaria X ananassa* cv. Camarosa). *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B- Soil and Plant Science*, 54, 135-139.
doi:10.1080/09064710310019748
- Gartler, J., Robinson, B., Burton, K., & L. Clucas. (2013). Carbonaceous soil amendments to biofortify crop plants with zinc. *Science of the Total Environment*, 465, 308-313.
doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.10.027
- Gavili, E., Moosavi, A.A., & Moradi-Choghamarani, F. (2018a). Cattle manure biochar potential for ameliorating soil physical characteristics and spinach response under drought. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64, 1714-1727.
doi:10.1080/03650340.2018.1453925
- Gavili, E., Moosavi, A.A., & Zahedifar, M. (2019). Integrated effects of cattle manure-derived biochar and soil moisture conditions on soil chemical characteristics and soybean yield. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65, 1758-1774.
doi:10.1080/03650340.2019.1576864
- Gavili, E., Moosavi, A.A., & Kamgar Haghighi, A.A. (2018b). Effect of cattle manure biochar on the chemical composition of spinach grown at different water conditions in a calcareous soil. *Iranian Journal of Soil Research*, 31(4), 525-544.
doi:10.22092/ijsr.2018.115854 [In Persian]
- Grewal, S.H., & Maheshwari, B.L. (2011). Magnetic treatment of irrigation water and snow pea and chickpea seeds enhances early growth and nutrient contents of seedlings. *Bioelectromagnetics*, 32, 58-65.
doi:10.1002/bem.20615.
- Habiby, H., Movahedi, A.R., Khoshravesh, M., & Saberi, A.R. (2019). The effect of magnetic water on the yield of corn and the adsorption of potassium, zinc and iron. *Agricultural Engineering (Scientific Journal of Agriculture)*, 42(2), 131-142.
doi:10.22055/agen.2019.27239.1454 [In Persian]
- Hardy, B., Sleutel, S., Dufey, J. E., & Cornelis, J. T. (2019). The long-term effect of biochar on soil microbial abundance, activity and community structure is overwritten by land management. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 110.
doi:10.3389/fenvs.2019.00110
- Hasan, M.M., Alharby, H.F., Hajar, A.S., Hakeem, K.R., & Alzahrani, Y. (2019). The effect of magnetized water on the growth and physiological conditions of Moringa species under drought stress. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(3), 1145-1155. doi: 10.15244/pjoes/85879
- Hozayn, M., & Abdul Qados, A.M.S. (2010). Irrigation with magnetized water enhances growth, chemical constituent and yield of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Agriculture and Biology Journal of North America*, 1, 671-676.
<http://scihub.org/ABJNA/PDF/2010/4/1-4-671-676.pdf>
- Jin, F., Piao, J., Miao, S., Che, W., Li, X., Li, X., Shiraiwa, T., Tanaka, T., Taniyoshi, K., Hua, S., & Lan, Y. (2024). Long-term effects of biochar one-off application on soil physicochemical properties, salt concentration, nutrient availability, enzyme activity, and rice yield of highly saline-alkali paddy soils: based on a 6-

- year field experiment. *Biochar*, 6(1), 1-22.
doi:10.1007/s42773-024-00332-3
- Jones, J.B. (2001). *Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis*. CRC Press, USA. 382 P.
- Kafi, M., Borzouei, A., Salehi, M., Kamandi, A., Maasoomi, A., & Nabati, J. (2010). Physiology of Environmental Stresses in Plants. Jihad University Press, Mashhad, Branch, 502 P. [In Persian]
- Karami, S., Zarei, M., Yasrebi, J., & Moosavi, A. A. (2016). Effect of plant growth promoting rhizobacterium on uptake of some micronutrients by corn in a cd-contaminated soil under water deficit stress conditions. *Water and Soil Science*, 26(3-2), 105-117.
doi:10.22067/jsw. v30i4.44237 [In Persian]
- Lee, Y.N., Kim, S.S., Lee, D.W., Shim, J.H., Jeon, S.H., Roh, A.S., Kwon, S.A., Seo, D.C.H., & Kim, S.H. (2024). Characterization and application of biochar derived from greenhouse crop by-products for soil improvement and crop productivity in South Korea. *Applied Biological Chemistry*, 67(1), 112.
doi:10.1186/s13765-024-00968-6
- Lin, Y., Cai, Q., Chen, B., & Garg, A. (2024). A review of the negative effects of biochar on soil in green infrastructure with consideration of soil properties. *Indian Geotechnical Journal*, 1-15.
doi:10.1007/s40098-024-00875-z
- Maheshwari, B.L., & Grewal, H.S. (2009). Magnetic treatment of irrigation water: its effects on vegetable crop yield and water productivity. *Agricultural Water Management*, 96, 1229-1236.
doi: 10.1016/j.agwat.2009.03.016
- Moon, J.D., & Chung, H.S. (2000). Acceleration of germination of tomato seed by applying AC electric and magnetic fields. *Journal of Electrostatics*, 48, 103-114.
doi:10.1016/S0304-3886(99)00054-6
- Moradi-Choghamarani, F., Moosavi, A.A., & Baghernejad, M. (2019a). Determining organo-chemical composition of sugarcane bagasse-derived biochar as a function of pyrolysis temperature using proximate and Fourier transform infrared analyses. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138, 331-342.
doi:10.1007/s10973-019-08186-9
- Moradi-Choghamarani, F., Moosavi, A.A., Sepaskhah, A.R., & Baghernejad, M. (2019b). Physico-hydraulic properties of sugarcane bagasse-derived biochar: the role of pyrolysis temperature. *Cellulose*, 26, 7125-7143.
doi:10.1007/s10570-019-02607-6
- Nahar, K., & Gretzmacher, R. (2002). Effect of water stress on nutrient uptake, yield and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under subtropical conditions. *Die Bodenkultur*, 53(1), 45-51.
<https://www.researchgate.net/publication/24232289>
- Pang, X.F., & Deng, B. (2008). Investigation of changes in properties of water under the action of a magnetic field. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 51, 1621-1632.
doi:10.1007/s11433-008-0182-7
- Ponce, R.G., & Salas, M.L. (2008). Improvement of the growth, grain yield, and nitrogen, phosphorus, and potassium nutrition of grain corn through weed control. *Journal of Plant Nutrition*, 18(11), 2313-2324.
doi: 10.1080/01904169509365067
- Putti, F.F., Vicente, E.F., Chaves, P.P.N., Mantoan, L.P.B., Cremasco, C.P., Arruda, B., Forti, G.C., Junior, G.F.S., Reis, A.R., & Filho, L.R.A.G. (2023). Effect of magnetic water treatment on the growth, nutritional status, and yield of lettuce plants with irrigation rate. *Horticulturae*, 9(4), 504.
doi:10.3390/horticulturae9040504
- Rawabdeh, H., Safwan, S., & Rida, S. (2014). The effect of irrigation by magnetically water on chlorophyll and macroelements uptake of pepper (*Capsicum annuum* L.). *Jordan Journal of Agricultural Sciences*, 10(2), 503-526
- Richard, A.J., & Wichern, D.W. (2007). *Applied Multivariate Statistical Analysis*. 6th Ed. Prentice Hall, USA. 395 P.
- Sajedi, N.A., & Rejali, F. (2011). Effects of drought stress, zinc application, and mycorrhiza inoculation on uptake of micronutrients in maize. *Journal of Soil Research*, 25(2), 83-92.
doi:10.22092/ijsr.2011.126473 [In Persian]
- Saliha, B.B. (2005). Bio efficacy testing of GMX online magnetic water conditioner in grapes var. 'Muscat'. Tamil Nadu Agricultural University. Project Completion Project.
- Samadyar, H., Rahi, A., Shermohammadi, K., Taghizadfarid, R., & Kadkhoda, Z. (2014). The impact of electronic purification of water (magnetic irrigation) on seed hyoscyne and some morphological traits of two datura species. *Journal of Ecology and Plant*, 10(40), 59-72.
<https://www.magiran.com/p1344882> [In Persian]
- Selim, D.A.F.H., Nassar, R.M.A., Boghdady, M.S., & Bonfill, M. (2019). Physiological and anatomical studies of two wheat cultivars irrigated with magnetic water under drought stress conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 135, 480-488.
doi: 10.1016/j.plaphy.2018.11.012
- Sposito, N.C. (2013). Soil nutrient availability properties of biochar. A Thesis presented to the Faculty of Cal Poly State University, San Luis Obispo. doi:10.15368/theses.2013.175
- Tahir, N.A.R., & Karim, H.F.H. (2010). Impact of magnetic application on the parameters related to growth of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Jordan Journal of Biological Sciences*, 3(4), 175-184.

- Wolfgang, K.H., & Simar, L. (2007). *Applied Multivariate Statistical Analysis*. 2nd Ed. Springer- Verlag Berlin Heidelberg, Germany. 455 P.
- Yokatani, K.T., Hashimoto, H., Yanagisawa, M., Nakamura, T., Hasegawa, K., & Yamashita, M. (2001). Growth of Avena seedlings under a low magnetic field. *Biological Sciences in Space*, 15, 258-259.
- Zahedifar, M. (2017). Sequential extraction of zinc in the soils of different land use types as influenced by wheat straw-derived biochar. *Journal of Geochemical Exploration*, 182, 22-31. doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.08.007
- Zahedifar, M. (2020). Iron fractionation in the calcareous soils of different land uses as influenced by biochar. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 2321-2330. doi.org/10.1007/s12649-018-0481-9
- Zahedifar, M., & Moosavi, A.A. (2017). Modeling desorption kinetics of the native and applied zinc in biochar-amended calcareous soils of different land uses. *Environmental Earth Science*, 76, 567. doi.org/10.1007/s12665-017-6895-z
- Zhang, J., Sha, Z., Zhang, Y., Bei, Z., & Cao, L. (2015). The effects of different water and nitrogen levels on yield, water, and nitrogen utilization efficiencies of spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Canadian Journal of Plant Science*, 95(4), 671-679. doi:10.4141/cjps-2014-184
- Zhang, J., Ge, L. A., Yang, Y., Zhang, X., Wang, C., Sun, H., Chen, H., Huang, J., & Zhou, S. (2024). Production and subsequent application of different biochar-based organic fertilizers to enhance vegetable quality and soil carbon stability. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-13. doi:10.1007/s42729-024-02123-y
- Zlotopolski, V. (2017). Magnetic treatment reduces water usage irrigation without negatively impacting yield, photosynthesis and nutrient uptake in lettuce. *International Journal of Applied Agricultural Sciences*, 3(5), 117-122. doi:10.11648/j.ijaas.20170305.13