Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

The effect of the combined use of biochar and bentonite on evaporation and soil moisture

Elham Tavakoli[1], Ahmad Reza Ghasemi[2]*, Hamid Reza Motaghian[3]

[1] M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculcural, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
[2] Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculcural, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
[3] Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculcural, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Extended Abstract

Introduction

Due to climate change in recent years, the water crisis has become much more serious than before. Therefore, water shortage is one of the most important problems in the world in the last century. Evaporation from the soil surface can be considered the most important component in the water balance. Using soil amendments is a strategy to reduce the adverse effects of drought stress on plants. Water-absorbent polymers can be used as a modifier to improve soil health, which improves water holding capacity. Natural or artificial absorbents superused in agriculture are hydrophilic compounds that increase the water-holding capacity in the soil, reduce the leaching of soil nutrients, reduce the amount of evaporation from the soil surface, and increase the soil ventilation, causing better growth and development of plants and increased yield in drought stress conditions. These polymers can absorb water several times their weight in their building and gradually return water to the soil by reducing the water in the surrounding soil, so the soil is moist for a longer period without re-irrigation. Biochar and bentonite are among the important natural superabsorbents, whose effect on increasing the water-holding capacity in the soil has been proven. Despite many studies in this field, the impact of combining these two absorbents super has not been studied, so in the current study, the simultaneous effect of these two absorbents super on evaporation from the soil and the amount of residual moisture in the soil was investigated.

Materials and Methods

This research was conducted at Shahrekord University. To prepare biochar, thin and dry walnut tree branches were first collected, and after chopping, the wood was placed in cylindrical metal containers with lids and low oxygen conditions at two temperatures of 400 and 600℃ in an oven for two hours. The bentonite was also purchased from the market and its purity was checked in the laboratory. This research was a factorial experiment using a completely randomized design and three replications. The treatments include the combination of bentonite (Be) at three levels of two, five, and 10 % by weight with biochar (B) prepared at two temperatures of 400 and 600℃ at two levels of two and three percent by weight and a control treatment (a Clay Loam soil). In this research, the water balance method was used to obtain the amount of evaporation. In this method, the amount of water entering and leaving the lysimeters (pots) is measured using a graduated container, and since no plants are grown in the pots, the amount obtained from the balance equation is the amount of evaporation from the soil surface. The humidity of the treatments was also measured by the SM150 hygrometer at the surface and 15 cm depth of the pots. The analysis of the data obtained from this experiment, including analysis of variance and means comparison, was done in Statisca software and drawing figures in Excel software.

Results and Discussion

The results showed that the changes in the amount of evaporation from the soil surface in all the investigated months as well as the total evaporation of the entire period are significant at a significant level of 0.01. The comparison of the means for the total amount of evaporation in different treatments showed that the amount of evaporation in all the investigated treatments was lower than in the control treatment. The lowest rate of evaporation is related to the soil mixed with two percent bentonite and biochar produced at 600℃. The highest evaporation from the soil surface after the control treatment (432 mm and equivalent to 3.1 mm per day) was observed in the soil treatment mixed with 10%

Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

bentonite and two percent biochar produced at a temperature of 400℃. In total, the amount of evaporation from the soil in different treatments has decreased between seven and 14 % compared to the control treatment. The amount of soil moisture in all the investigated treatments has increased significantly compared to the control treatment. In other words, the combination of biochar and bentonite has helped to maintain moisture in the soil. The highest amount of soil moisture was obtained in the treatment of three percent biochar produced at 600℃ and 10 % bentonite and it was 25.4 %, which is 18 % more than the moisture content of the control treatment. Increasing the amount of bentonite added to the soil has also increased soil moisture.

Conclusion

The results showed that the soil evaporation in the simultaneous use of three percent biochar with different levels of bentonite is higher than the use of two percent biochar. Therefore, it can reject the use of a three percent biochar composition to reduce evaporation from the soil. Based on this, the best treatment should be sought among the two percent biochar treatments. Among the treatments of two percent biochar, the greatest effect on reducing evaporation occurred in the two treatments of two percent biochar produced at 600℃ and two percent bentonite and the treatment of two percent biochar produced at 400℃ and five percent bentonite. Choosing one of these two treatments for use in large areas requires an economic study of the prevailing conditions in the region and the availability of bentonite minerals and raw materials for biochar production. In one treatment, the temperature of biochar production is higher (B2-Be2-T600), and in the other, the amount of bentonite used is higher (B2-Be5-T400). Optimum use of water in the field and scientific management of water, require appropriate tools that, in addition to being available, do not impose large costs on farmers. In addition to all the things mentioned above, not causing pollution to the soil and plants is also a very important parameter in this field. Therefore, according to the results of this research, it is recommended to use a combination of two or five bentonites with two percent biochar for use in fields.

Keywords: Clay Loam soil, Endothermic temperature, Moisture retention, Soil amendments, Water absorption

Article Type: Research Article

Acknowledgment

We would like to express our sincere gratitude to the University of Shahrekord 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 data generated during the manuscript analysis are included in the article.

Authors' contribution

Elham Tavakoli: Writing, original draft preparation, software; **Ahmad Reza Ghasemi:** Conceptualization, methodology, manuscript editing; **Hamid Reza Motaghian:** Visualization, supervision

*Corresponding Author, E-mail: ghasemiar@yahoo.com

Citation: Tavakoli, E., Ghasemi, A.R., & Motaghian, H.R. (2024). The effect of the combined use of biochar and bentonite on evaporation and soil moisture. *Water and Soil Management and Modeling, 4*(3), 173-186.
DOI: 10.22098/mmws.2023.13053.1297

Received: 03 June 2023, Received in revised form: 14 June 2023, Accepted: 17 June 2023, Published online: 17 June 2023
Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 3, pp. 173-186

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک

شاپا الکترونیکی: ۲۵۴۶-۲۷۸۳

تأثیر استفادهٔ ترکیبی از زغال‌زیستی و بنتونیت بر میزان تبخیر و رطوبت خاک

الهام توکلی[۱]، احمد رضا قاسمی[۲*]، حمیدرضا متقیان[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
[۲] دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
[۳] دانشیار، گروه علوم خاک، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

چکیده

استفاده از اصلاح‌کننده‌های خاک جهت افزایش نگهداشت آب در خاک و با هدف افزایش راندمان مصرف آب در کشاورزی، راه‌کار مناسبی برای کاهش اثرات کم‌آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. یکی از راه‌های غلبه بر هزینه‌های آبیاری، برداشت آب از محل توسعهٔ ریشهٔ گیاه است. ترکیبات جاذب آب می‌توانند با ذخیرهٔ آب در خاک، برداشت آب را برای گیاه تسهیل کند. زغال‌زیستی و بنتونیت از ترکیبات طبیعی مناسب جهت بهبود توانایی خاک در جذب رطوبت هستند. این مواد سازگار با محیط زیست و غیرسمی هستند که به‌دلیل خواص بیوشیمیایی، توانایی بالایی در جذب آب و نگهداری آب در خاک دارند. در پژوهش حاضر تأثیر استفادهٔ هم‌زمان از این دو ماده بر میزان تبخیر از خاک و رطوبت خاک مورد بررسی قرار گرفت. برای این هدف از زغال‌زیستی چوب گردو که در دو دمای گرماکافت ۴۰۰ و ۶۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد تولید شده است در دو مقدار دو و سه درصد وزنی و سه میزان دو، پنج و ۱۰ درصد بنتونیت و یک تیمار شاهد (حاوی خاک لومی‌رسی بدون مادهٔ افزودنی) استفاده شد. پژوهش به‌صورت یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی و در سه تکرار در دانشگاه شهرکرد انجام شد. نتایج نشان داد که با اعمال تیمارهای مورد بررسی، تبخیر از خاک بین هفت تا ۱۴ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافته است. کم‌ترین میزان تبخیر مربوط به خاک مخلوط با دو درصد بنتونیت و دو درصد زغال‌زیستی تولید شده در دمای ۶۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد است. مقدار رطوبت در تمام تیمارهای مورد بررسی نسبت به تیمار شاهد نیز افزایش معناداری داشت. به‌عبارت دیگر ترکیب زغال‌زیستی و بنتونیت به نگهداشت رطوبت در خاک کمک کرده است. بالاترین میزان رطوبت خاک در تیمار سه درصد زغال‌زیستی تولید شده در دمای ۶۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد و ۱۰ درصد بنتونیت و به مقدار ۲۵/۴ درصد به‌دست آمد که ۱۸ درصد بیش‌تر از رطوبت تیمار شاهد است. از این‌رو، می‌توان استفادهٔ ترکیبی از این دو ماده را برای نگهداری آب آبیاری در منطقهٔ ریشهٔ گیاه و در نتیجه صرفه‌جویی و کاهش هزینه‌ها توصیه نمود زیرا آب قابل‌دسترس گیاه را افزایش می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: اصلاح‌کنندهٔ خاک، جذب آب، خاک لومی‌رسی، دمای گرماکافت، نگهداشت رطوبت

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ghasemiar@yahoo.com

استناد: توکلی، الهام، قاسمی، احمدرضا، و متقیان، حمیدرضا (۱۴۰۳). تأثیر استفادهٔ ترکیبی از زغال‌زیستی و بنتونیت بر میزان تبخیر و رطوبت خاک. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۳)، ۱۷۳-۱۸۶.
DOI: 10.22098/mmws.2023.13053.1297

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۳، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۷، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۳/۲۷
مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۳، صفحه ۱۷۳ تا ۱۸۶
ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان

۱- مقدمه

تبخیر از خاک به‌عنوان یک بخش کلیدی از چرخهٔ هیدرولوژی و بیلان آبی باعث از دست رفتن بخش زیادی از آب قابل‌دسترس گیاهان می‌شود. تبخیر تحت تأثیر بسیاری از نیروهای محرکه است که با ویژگی غیرخطی، غیرثابت و تصادفی مشخص می‌شوند (Mohammadi et al., 2024). با توجه به گرمایش کرهٔ زمین آگاه شدن از میزان تبخیر و مدل‌سازی آن در بخش‌های کشاورزی، منابع آب و حفاظت آب و خاک از اهمیت زیادی برخوردار است (Alempour Rajab et al., 2024).

با توجه به این‌که عمده‌ترین مصرف‌کنندهٔ آب در جهان بخش کشاورزی است، با شناخت عوامل مؤثر بر تبخیر و راه‌کارهای کاهش آن می‌توان از هدررفت آب در مزارع جلوگیری کرد. به‌ویژه این‌که در بخش‌های وسیعی از مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور در سطوح وسیعی کشاورزی انجام می‌شود. با توجه به این‌که تغییر الگوهای آب و هوایی در سال‌های اخیر، بحران آب بسیار جدی‌تر از قبل شده است، بنابراین، کاهش بارش منجر به افزایش رقابت برای منابع آب به‌ویژه برای کشاورزانی که به کشاورزی دیم وابسته هستند، خواهد شد (Li et al., 2017). مدیریت مناسب منابع آب و استفاده از روش‌های کاربردی به‌خصوص در بخش کشاورزی ضمن افزایش کارایی مصرف آب، موجب کاهش خسارات ناشی از تنش خشکی می‌شود (Mortezavi el al., 2015). استفاده از اصلاح‌کننده‌های خاک یک راهبرد برای کاهش اثرات نامطلوب تنش خشکی است. بنابراین، توسعهٔ راهبردهای زراعی که کاهش تنش خشکی را در محصولات زراعی امکان‌پذیر می‌سازد، یک اولویت حیاتی است. پلیمرهای جاذب آب می‌توانند به‌عنوان اصلاح‌کننده‌ای برای بهبود سلامت خاک استفاده شوند که در نهایت ظرفیت نگهداری آب را بهبود می‌بخشند (Malik et al., 2023).

سوپرجاذب‌های طبیعی یا مصنوعی که در کشاورزی استفاده می‌شوند ترکیبات آب‌دوستی هستند که از طریق افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک، کاهش آب‌شویی مواد غذایی خاک، کاهش میزان تبخیر از سطح خاک و افزایش تهویهٔ خاک موجب رشد و نمو بهتر گیاهان و در نتیجه افزایش عملکرد در شرایط مطلوب و تنش خشکی می‌شوند (Abedi Koupai and Mesforoush, 2009). این نوع از پلیمرها می‌توانند در ساختمان خود چند برابر وزن خود آب جذب کنند و با کاهش آب خاک محیط، به‌تدریج آب را به خاک پس بدهند بنابراین خاک به مدت طولانی‌تر و بدون نیاز به آبیاری مجدد، مرطوب می‌ماند (Widiastuti, et al., 2008). پژوهش‌های فراوانی روش‌های کاهش تبخیر از سطح خاک و افزایش رطوبت خاک را در دنیا مورد برررسی قرار داده‌اند که در ادامه به برخی از این مطالعات اشاره می‌شود.

به‌عنوان مثال، Fu et al. (2016) یک نانوکامپوزیت سوپرجاذب از بنتونیت اصلاح شده با متیل اکریلیک اسید تهیه کردند و نشان دادند که این ماده یک سوپرجاذب با جذب آب بسیار بالا است. در پژوهشی، Li et al. (2017) بیان کردند که پنج درصد وزنی ورمی‌کولیت می‌تواند ظرفیت جذب آب را ۱۶/۸ درصد افزایش دهد. آن‌ها ثابت کردند که دلیل افزایش میزان جذب آب به‌علت افزایش حجم روزنه‌های خاک و خاصیت جذب آب ورمی‌کولیت است. در پژوهش دیگری، Ghazavi et al. (2019) نشان دادند که اضافه کردن سوپرجاذب زئولیت در سطح‌های مختلف به خاک‌های لومی و شنی باعث افزایش رطوبت و نگهداشت رطوبت در خاک‌ها می‌شود و هرچه سطح مصرف سوپرجاذب‌ها افزایش می‌یابد، رطوبت و نگهداشت رطوبت در خاک‌ها نیز افزایش می‌یابد. در ادامه، Gholinezhad and Eivazi (2021) تأثیر سوپرجاذب A200 و کود دامی را بر کاهش اثرات تنش خشکی در ارقام مختلف گندم بررسی نمودند و عنوان کردند مصرف پلیمر سوپرجاذب و کود دامی با افزایش دسترسی گیاه به آب و کاهش اثرات تنش خشکی، باعث بهبود اجزای عملکرد دانه در ارقام مختلف گندم شده است.

از سایر پژوهش‌ها، Amani et al. (2021) تأثیر سه کانی ورمی‌کولیت، بنتونیت و زئولیت بر میزان رطوبتی خاک نشان دادند که بیش‌ترین افزایش رطوبت خاک در تیمار بنتونیت اتفاق افتاده است. در مطالعه‌ای، Mohammadifard and Moghaddam (2021) نشان دادند که کاربرد ۵۰ گرم در کیلوگرم خاک بنتونیت باعث کاهش اثرات تنش رطوبتی در گیاه مرزه شده است. هم‌چنین، Wu et al. (2021) در پژوهشی گزارش کردند که در یک میزان مناسب، سوپرجادب‌ها نه تنها می‌توانند یکنواختی توزیع آب در خاک را بهبود بخشند، بلکه کارایی و تراکم‌پذیری آن را نیز بهبود می‌بخشند. با توجه به توانایی جذب و نگهداری آب، می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی حرکت و تجمع رطوبت در خاک را کنترل کنند. تأثیر نوع و زمان افزودن اصلاح‌کنندهٔ آلی پوستهٔ برنج و معدنی زئولیت بر برخی از ویژگی‌های خاک توسط Ekhtiarian et al. (2022) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کاربرد هر دو اصلاح‌کننده باعث افزایش معناداری میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، تخلخل، رطوبت وزنی و هدایت الکتریکی نسبت به شاهد شده است. در پژوهشی، Malik et al. (2023) نشان دادند که پلیمرهای جاذب آب می‌توانند بیش از وزن خود آب نگهدارند و در زمان نیاز تقریباً ۹۵ درصد آب را آزاد کنند. این مواد تخلخل خاک را بین ۰/۲۶ تا ۶/۹۱ درصد و ظرفیت نگهداری آب را بین ۵/۶۸ تا ۱۷/۹۰ درصد بهبود می‌بخشند. در ادامه، Ngeno et al. (2023) به بررسی تأثیر سوپرجاذب‌ها بر آب قابل‌دسترس گیاه در خاک‌های رسی، رسی‌شنی و لومی‌شنی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که خاک رس

نسبت به خاک رسی‌شنی و لومی‌شنی تغییر بیش‌تری در احتباس آب دارد. هم‌چنین، Keller et al. (2023) در یک مطالعهٔ میدانی دو ساله در یک خاک لومی‌شنی برای ارزیابی اثرات زغال‌زیستی بر کیفیت خاک و رشد و عملکرد لوبیا چیتی و سورگوم انجام دادند. مقایسهٔ تیمارها با تیمار شاهد نشان داد، زغال‌زیستی به مقدار ۱۱/۲ میلی‌گرم در هکتار در سال اول حفظ رطوبت خاک پس از آبیاری را ۱۹ درصد و در سال دوم ۲۵ درصد بهبود بخشیده است. در نهایت، Nepal et al. (2023) در پژوهشی نشان دادند که کاربرد طولانی‌مدت زغال‌زیستی می‌تواند باعث حفظ موادمغذی و بهره‌وری خاک شود. میزان تأثیر زغال‌زیستی بر خواص فیزیکوشیمیایی خاک بسته به منبع زغال‌زیستی، نوع، اندازه، ویژگی‌های ذاتی خاک و سامانهٔ کشت متفاوت است. زغال‌زیستی یک اصلاح‌کنندهٔ خاک است که از گرماکافت بقایای آلی تولید شده و نه تنها با بهبود کیفیت خاک پایداری آن را افزایش می‌دهد بلکه رشد گیاه را تحریک می‌کند (Farrokhian Firouz et al., 2024).

بررسی منابع به خوبی نشان می‌دهد که زغال‌زیستی و بنتونیت از جمله سوپرجاذب‌های مهم و طبیعی هستند که تأثیر آن‌ها بر افزایش ظرفیت نگهداشت آب در خاک به اثبات رسیده است. علی‌رغم مطالعات فراوان در این زمینه تأثیر تلفیق این دو سوپرجاذب مورد مطالعه قرار نگرفته است، بنابراین در پژوهش حاضر تأثیر هم‌زمان این دو سوپرجاذب بر تبخیر از خاک و میزان رطوبت باقی‌مانده در خاک مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقهٔ مورد مطالعه

این پژوهش در دانشگاه شهرکرد در استان چهارمحال و بختیاری به طول و عرض جغرافیایی به‌ترتیب ۵۰ درجه و ۵۱ دقیقهٔ شرقی و ۳۲ درجه و ۲۰ دقیقهٔ شمالی و ارتفاع ۲۱۱۶ متر از سطح دریا انجام گرفت. میانگین درجهٔ حرارت سالانهٔ منطقه ۱۱/۷ درجهٔ سانتی‌گراد و متوسط بارش ۳۲۲ میلی‌متر در سال است.

۲-۲- تهیهٔ زغال‌زیستی و بنتونیت

ابتدا شاخه‌های نازک و خشک درخت گردو جمع‌آوری و پس از ریز کردن برای تهیهٔ زغال‌زیستی چوب‌ها در ظروف استوانه‌ای فلزی با درپوش و در شرایط کم اکسیژن در دو دمای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد در آون به‌مدت دو ساعت قرار داده شد. انتخاب این دو دما بر اساس پژوهش‌های انجام شده Nowruzi et al. (2017) و Nasimi et al. (2020) انجام گرفت. تفاوت دما در تولید زغال‌زیستی باعث تغییر در ساختمان زغال‌زیستی شده که می‌تواند قدرت نگهداری آب را تغییر دهد. بنتونیت مورد استفاده از بازار خریداری و خلوص آن در آزمایشگاه بررسی شد.

۲-۳- آماده‌سازی گلدان‌ها

مقداری خاک با بافت لومی‌رسی از الک دو میلی‌متر عبور داده شد، سپس گلدان‌هایی با دهانه و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر که به لایسی‌متر تبدیل شده‌اند از خاک موجود پر شد. درصدهای مختلف از بنتونیت و زغال‌زیستی مطابق تیمارهای تعریف شده با خاک‌های گلدان مخلوط شد. شکل ۱ نمایی از مراحل تهیهٔ زغال‌زیستی و آماده‌سازی گلدان‌ها را نشان می‌دهد. جدول ۱ تیمارهای مورد آزمایش و حروف اختصاری هر تیمار را نشان می‌دهد. برخی خصوصیات خاک مورد آزمایش مانند بافت، pH، EC، FC و PWP در آزمایشگاه تعیین و در جدول ۲ ارائه شده است.

شکل ۱- نمایی از مراحل تهیهٔ زغال‌زیستی و آماده‌سازی گلدان‌ها

Figure 1- The stages of preparing biochar and pots

۲-۴- تیمارهای مورد بررسی

این پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی و در سه تکرار در یک زمان و مکان انجام شد. تیمارها شامل ترکیب بنتونیت (Be) در سه سطح دو، پنج و ۱۰ درصد وزنی با زغال‌زیستی (B) تهیه شده در دو دمای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد در دو سطح دو و سه درصد وزنی و یک تیمار شاهد است. آزمایش در بازهٔ زمانی آذر ۱۴۰۰ تا فروردین ۱۴۰۱ به‌مدت ۱۵۰ روز انجام شد.

جدول ۱- تیمارهای آزمایشی مورد بررسی در پژوهش

Table 1- Experimental treatments examined in the research

شماره	شرح تیمار	علامت اختصاری
1	درصد زغال‌زیستی 400 درجهٔ سانتی‌گراد و 2 درصد بنتونیت	B2-Be2-T400
2	2 درصد زغال‌زیستی 400 درجهٔ سانتی‌گراد و 5 درصد بنتونیت	B2-Be5-T400
3	2 درصد زغال‌زیستی 400 درجهٔ سانتی‌گراد و 10 درصد بنتونیت	B2-Be10-T400
4	3 درصد زغال‌زیستی 400 درجهٔ سانتی‌گراد و 2 درصد بنتونیت	B3-Be2-T400
5	3 درصد زغال‌زیستی 400 درجهٔ سانتی‌گراد و 5 درصد بنتونیت	B3-Be5-T400
6	3 درصد زغال‌زیستی 400 درجهٔ سانتی‌گراد و 10 درصد بنتونیت	B3-Be10-T400
7	2 درصد زغال‌زیستی 600 درجهٔ سانتی‌گراد و 2 درصد بنتونیت	B2-Be2-T600
8	2 درصد زغال‌زیستی 600 درجهٔ سانتی‌گراد و 5 درصد بنتونیت	B2-Be5-T600
9	2 درصد زغال‌زیستی 600 درجهٔ سانتی‌گراد و 10 درصد بنتونیت	B2-Be10-T600
10	3 درصد زغال‌زیستی 600 درجهٔ سانتی‌گراد و 2 درصد بنتونیت	B3-Be2-T600
11	3 درصد زغال‌زیستی 600 درجهٔ سانتی‌گراد و 5 درصد بنتونیت	B3-Be5-T600
12	3 درصد زغال‌زیستی 600 درجهٔ سانتی‌گراد و 10 درصد بنتونیت	B3-Be10-T600
13	شاهد، خاک بدون مادهٔ اصلاحی	Con

جدول ۲- برخی متغیرهای خاک مورد مطالعه

Table 2- Some parameters of the studied soil

شوری خاک (دسی‌زیمنس بر متر)	pH	رس (درصد)	سیلت (درصد)	شن (درصد)	بافت خاک
0.891	7.83	20	30	50	لومی‌رسی

۲-۵- اندازه‌گیری تبخیر و رطوبت خاک

در پژوهش حاضر برای به‌دست آوردن مقدار تبخیر از روش بیلان آبی استفاده شده است. در این روش مقدار آب ورودی و خروجی لایسی‌مترها (گلدان‌ها) با استفاده از ظرف مدرج اندازه گرفته شده و چون در گلدان‌ها گیاهی کشت نشده است، مقدار به‌دست آمده از رابطهٔ بیلان (رابطهٔ ۱) برابر با مقدار تبخیر از سطح خاک است.

$$E = I - O - \Delta S \qquad (۱)$$

در رابطهٔ بالا، I مقدار آب آبیاری ورودی به لایسی‌متر، O مقدار آب خروجی از لایسی‌متر، E تبخیر از سطح خاک و ΔS تغییرات حجم آب در لایسی‌متر در دورهٔ زمانی مورد نظر است. رطوبت تیمارها به‌وسیلهٔ دستگاه رطوبت‌سنج SM150 در سطح و عمق ۱۵ سانتی‌متری گلدان‌ها اندازه‌گیری شد. زمان آبیاری بر اساس رطوبت گلدان‌های شاهد تعیین شد. به‌عبارت دیگر، زمانی آبیاری انجام می‌شود که رطوبت گلدان‌های شاهد به حد پایینی رطوبت سهل‌الوصول (θc) برسد. مقدار θc از طریق رابطهٔ (۲) که در آن، θfc رطوبت ظرفیت زراعی و θpwp رطوبت پژمردگی دائم است و عمق آبیاری نیز بر اساس رابطهٔ (۳) محاسبه می‌شوند.

$$\theta c = \theta fc - 0.5(\theta fc - \theta pwp) \qquad (۲)$$

$$D = ((\theta fc - \theta soil)/100) \times Drz \qquad (۳)$$

در رابطهٔ (۳)، D عمق آب مورد نیاز هر گلدان، Drz عمق گلدان و θsoil مقدار رطوبت تیمار شاهد است (Alizadeh, 2007). تحلیل داده‌های حاصل از این آزمایش شامل تحلیل واریانس و مقایسهٔ میانگین‌ها در نرم‌افزار STATISCA و رسم شکل‌ها در نرم‌افزار EXCEL انجام شد.

۳- نتایج و بحث

نتایج تحلیل واریانس داده‌های به‌دست آمده به‌تفصیل در زیر آمده است. برای بررسی دقیق‌تر داده‌ها، داده‌ها در بازه‌های زمانی ماهانه و کل دوره مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول ۳ نتایج تحلیل واریانس داده‌های مربوط به تبخیر کل (مجموع تبخیر در کل بازهٔ زمانی ۱۵۰ روزه) و مجموع تبخیر ماهانه را نشان می‌دهد.

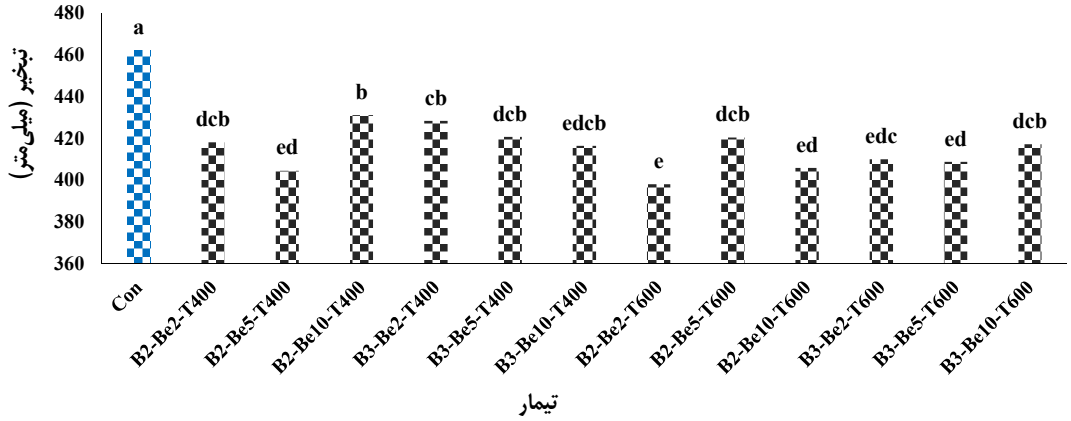
جدول۳- تحلیل واریانس داده‌های مربوط به تبخیر تیمارهای مختلف

Table 3- Analysis of variance of evaporation in different treatments

منبع تغییرات	درجهٔ آزادی	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	تبخیر کل
تیمار	12	0.0682^{***}	0.0810^{***}	0.0780^{***}	0.0293^{***}	0.0240^{***}	0.0345^{***}
زغال‌زیستی	3	0.053^{***}	0.0808^{**}	0.0201^{ns}	0.0018^{ns}	0.0067^{ns}	0.0149^{*}
بنتونیت	2	0.1081^{***}	0.0084^{ns}	0.0094^{ns}	0.0009^{ns}	0.0082^{ns}	0.0029^{ns}
زغال‌زیستی*بنتونیت	6	0.0496^{***}	0.0583^{**}	0.0483^{**}	0.0216^{**}	0.0123	0.0152^{**}
خطا	24	0.0056^{ns}	0.0209^{ns}	0.0226^{ns}	0.0089^{ns}	0.0071^{ns}	0.0057^{ns}

*، **، *** و ns به‌ترتیب معناداری در سطح ۰/۱، ۰/۰۵، ۰/۰۱ و غیرمعنادار

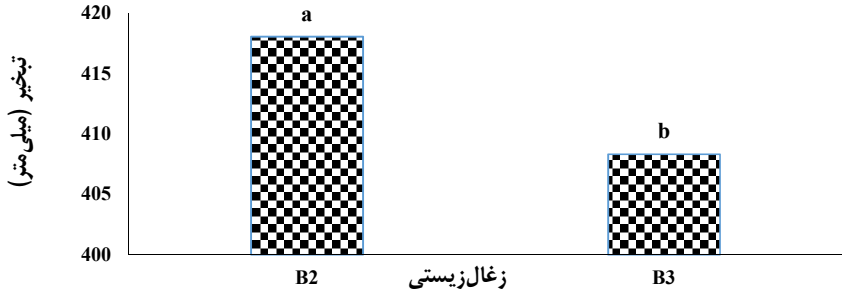
نتایج تحلیل واریانس تیمارها نشان می‌دهد که تغییرات مقدار تبخیر از سطح خاک در تمام ماه‌های مورد بررسی و مجموع تبخیر کل دوره در سطح معناداری ۰/۰۱ معنادار می‌باشد (جدول ۳). مقایسهٔ میانگین‌ها برای مجموع تبخیر بر حسب میلی‌متر بر روز در تیمارهای مختلف که در شکل ۲ ارائه شده است، نشان می‌دهد که میزان تبخیر در تمامی تیمارهای مورد بررسی کم‌تر از تیمار شاهده شده است. به‌عبارت دیگر افزودن درصدهای مختلف زغال‌زیستی و بنتونیت مورد مطالعه به خاک توانسته به‌صورت معناداری بر میزان تبخیر از سطح خاک تأثیر بگذارد. کم‌ترین میزان تبخیر مربوط به خاک مخلوط با دو درصد بنتونیت و دو درصد زغال‌زیستی تولید شده در دمای ۶۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد (B2-Be2-T600) و به‌مقدار ۳۹۸ میلی‌متر (۲/۶ میلی‌متر بر روز) است، بیش‌ترین تبخیر از سطح خاک بعد از تیمار شاهد (۴۳۲ میلی‌متر و معادل ۳/۱ میلی‌متر بر روز) نیز در تیمار خاک مخلوط با ۱۰ درصد بنتونیت و دو درصد زغال‌زیستی تولید شده در دمای ۴۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد و معادل ۴۳۱ میلی‌متر (۲/۸ میلی‌متر بر روز) مشاهده شد. با توجه به مقادیر تبخیر به‌دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که با اعمال تیمارهای مورد بررسی، تبخیر از خاک بین هفت تا ۱۴ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافته است.



شکل ۲- مقایسهٔ میانگین تبخیر از خاک در تیمارهای مختلف

Figure 2- Comparison of mean in different treatments for soil evaporation

با توجه به معنادار شدن تأثیر زغال‌زیستی بر میزان تبخیر و اثر متقابل زغال‌زیستی و بنتونیت، مقایسهٔ میانگین‌ها این دو نیز مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۳). همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود با افزایش زغال‌زیستی از یک به دو درصد میزان تبخیر به‌صورت معناداری کاهش یافته است هرچند این کاهش تنها در سطح اطمینان ۹۰ درصد معنادار و حدود ۳ درصد است. در پژوهشی، Wang et al. (2018) نیز گزارش کردند که کم‌ترین مقدار کاهش در تبخیر نسبت به تیمار شاهد، به‌میزان تنها دو درصد (غیر معنادار) مربوط به استفاده از یک درصد زغال‌زیستی شده است. در پژوهش دیگری، Jafarikia et al. (2020) با بررسی تأثیر دو سطح یک و دو درصد زغال‌زیستی بر تبخیر از خاک نشان دادند که تنها تیمار دو درصد زغال‌زیستی دارای تفاوت معنادار با تیمار شاهد است. هم‌چنین، Zheng el al. (2012) در پژوهشی دریافتند که اضافه کردن زغال‌زیستی به برخی خاک‌ها تبخیر را کاهش نداده است. آن‌ها عنوان نمودند که بافت خاک و اندازهٔ ذرات زغال‌زیستی می‌تواند یک عامل تعیین‌کننده در این خصوص باشد. در مقابل پژوهش‌های دیگری نشان داده‌اند که زغال‌زیستی بر کاهش تبخیر از خاک تأثیر گذار است. برای نمونه، Wang et al. (2018) با هدف بررسی تأثیر زغال‌زیستی بر تبخیر در چهار مقدار یک، پنج، ۱۰ و ۱۵ درصد، بیان داشتند که افزودن زغال‌زیستی باعث افزایش رطوبت و کاهش تبخیر خاک می‌شود. نوع مادهٔ خام مورد استفاده در تولید زغال‌زیستی، دمای فرآیند تولید، اندازهٔ ذرات، مقدار اضافه شده به خاک و بافت خاک می‌تواند از عوامل مهم و تأثیر گذار در متفاوت بودن نتیجه پژوهش‌ها باشد. تأثیر عامل بنتونیت بر مقدار تبخیر از خاک از نظر آماری معنادار نشد (جدول ۳). در این راستا، Amani et al. (2021) نشان دادند که با افزودن یک و دو درصد بنتونیت به خاک میزان تبخیر اندکی کاهش یافت (کم‌تر از دو درصد) اما این کاهش معنادار نبود.

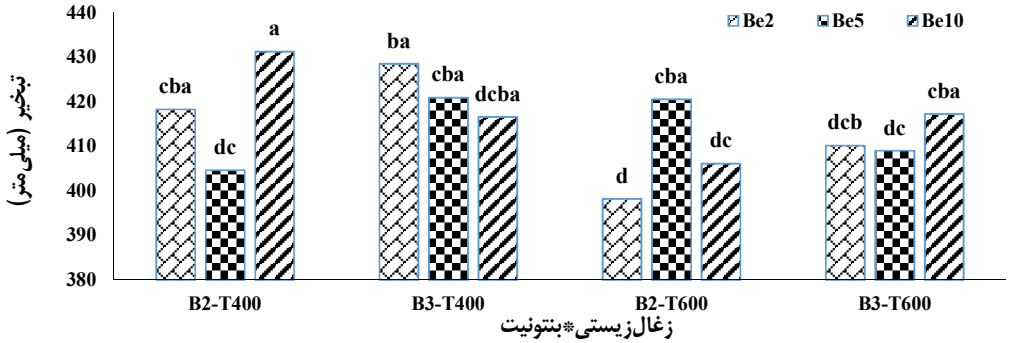


شکل ۳- مقایسهٔ میانگین تبخیر از خاک در تیمارهای زغال‌زیستی

Figure 3- Comparison of mean soil evaporation in Biochar treatments

مقایسهٔ میانگین مربوط به اثر متقابل استفادهٔ هم‌زمان از زغال‌زیستی و بنتونیت جهت کاهش تبخیر از خاک در شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به شکل ۴ می‌توان نتیجه گرفت که تفاوت معناداری در استفادهٔ هم‌زمان از سطوح مختلف بنتونیت همراه با سه درصد زغال‌زیستی (در هر دو دمای گرماکافت ۴۰۰ و ۶۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد) وجود ندارد. با توجه به این‌که همهٔ این تیمارها با تیمار شاهد تفاوت معناداری نشان دادند (شکل ۲)، از طرفی هم در تیمارهای دو درصد زغال‌زیستی (در هر دو دمای گرماکافت ۴۰۰ و ۶۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد) در ترکیب با سطوح مختلف بنتونیت، مقدار تبخیر کاهش بیش‌تری نشان می‌دهد (شکل ۴)، لذا می‌توان استفاده از ترکیب زغال‌زیستی سه درصد با بنتونیت جهت کاهش میزان تبخیر از خاک را رد نمود. بر این اساس بهترین تیمار را باید در بین تیمارهای دو درصد زغال‌زیستی جست و جو نمود.

در بین تیمارهای دو درصد زغال‌زیستی بیش‌ترین تأثیر بر کاهش تبخیر در تیمار دو درصد زغال‌زیستی تولید شده در دمای ۶۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد و دو درصد بنتونیت (B2-Be2-T600) اتفاق افتاده است که منجر به کاهش ۱۳/۸ درصد تبخیر نسبت به تیمار شاهد شده است. رتبهٔ دوم کاهش تبخیر نیز در تیمار B2-Be5-T400 مشاهده می‌شود که از نظر آماری با تیمار قبلی (B2-Be2-T600) تفاوت معناداری ندارد، لذا می‌توان این تیمار را نیز به‌عنوان تیمار بهینه برای کاهش تبخیر توصیه نمود. انتخاب یکی از این دو تیمار برای استفاده در اراضی وسیع مستلزم بررسی اقتصادی شرایط حاکم بر منطقه و میزان دسترسی به مادهٔ معدنی بنتونیت و مادهٔ خام برای تولید زغال‌زیستی است. در یک تیمار، دمای تولید زغال‌زیستی بیش‌تر (B2-Be2-T600) و در دیگری میزان بنتونیت مورد استفاده بیش‌تر است (B2-Be5-T400). قابل ذکر است علی‌رغم عدم معناداری تفاوت آماری بین این دو تیمار، تفاوت آن‌ها با تیمار شاهد معنادار بود (شکل ۲). مقدار کاهش تبخیر نسبت به تیمار شاهد در تیمار B2-Be2-T600 معادل ۱۳/۸ درصد و در تیمار B2-Be5-T400 معادل ۱۲/۵ درصد به‌دست آمد.



شکل ٤- مقایسهٔ میانگین اثر متقابل زغال‌زیستی * بنتونیت بر تبخیر از خاک

Figure 4- Comparison of the average interaction effect of biochar * bentonite on evaporation from soil

مقایسهٔ میانگین‌ها برای تیمارهای مورد بررسی به‌صورت ماهانه نیز در جدول ۴ ارائه شده است. در تحلیل ماهانه مقدار تبخیر از خاک نیز در تمام ماه‌های آزمایش، کم‌ترین مقدار تبخیر در یکی از دو تیمار B2-Be2-T600 و B2-Be5-T400 مشاهده شد (جدول ۴). این دو تیمار در بررسی مجموع تبخیر کل دورهٔ ۱۵۰ روزه نیز کم‌ترین میزان تبخیر را نشان دادند (شکل ۲).

جدول٤- مقایسهٔ میانگین تبخیر از خاک به‌صورت ماهانه در تیمارهای زغال‌زیستی

Table 4- Comparison of average monthly soil evaporation in biochar treatments

تیمار	فروردین	اسفند	بهمن	دی	آذر
Con	78.5 [a]	79.6 [a]	108.7 [a]	123.7 [a]	71.6[a]
B2-Be2-T400	71.4 [cb]	70.3 [c]	93.6 [c]	114.9 [bcd]	68.2 [abc]
B2-Be5-T400	69.0 [c]	70.0 [c]	93.5 [c]	106.0[e]	66.0 [bc]
B2-Be10-T400	71.5 [cb]	73.0 [cb]	103.4 [ab]	117.5 [abc]	65.8 [bc]
B3-Be2-T400	75.3 [ab]	75.6 [ab]	95.9 [c]	116.3 [bc]	65.4 [bc]
B3-Be5-T400	70.7 [c]	71.0 [c]	95.3 [c]	118.0 [ab]	65.9 [bc]
B3-Be10-T400	70.2 [c]	68.9 [c]	92.5 [c]	116.3 [bc]	68.7 [abc]
B2-Be2-T600	71.2 [cb]	69.3 [c]	91.2 [c]	110.7 [cde]	53.5[e]
B2-Be5-T600	70.4 [c]	72.6 [cb]	95.9 [c]	115.1 [bcd]	66.5 [bc]
B2-Be10-T600	70.3 [c]	70.9 [c]	93.6 [c]	107.5 [e]	66.2 [bc]
B3-Be2-T600	69.2 [c]	70.3 [c]	96.7 [cb]	111.9 [bcde]	59.0[d]
B3-Be5-T600	72.3 [cb]	70.0 [c]	93.2 [c]	108.7 [ed]	64.8 [bc]
B3-Be10-T600	68.9 [c]	72.8 [cb]	97.3 [cb]	111.2 [bcde]	67.0 [bc]

۳-۱- تغییرات رطوبت خاک در تیمارهای مورد بررسی

جدول تحلیل واریانس مقدار رطوبت عمق ۱۵ سانتی‌متری خاک نشان می‌دهد تغییرات رطوبت در تیمارهای مختلف، دو عامل زغال‌زیستی و بنتونیت و اثر متقابل آن‌ها در سطح معناداری یک درصد معنادار است (جدول ۵).

جدول۵- تحلیل واریانس داده‌های مربوط به رطوبت خاک تحت تیمارهای مختلف

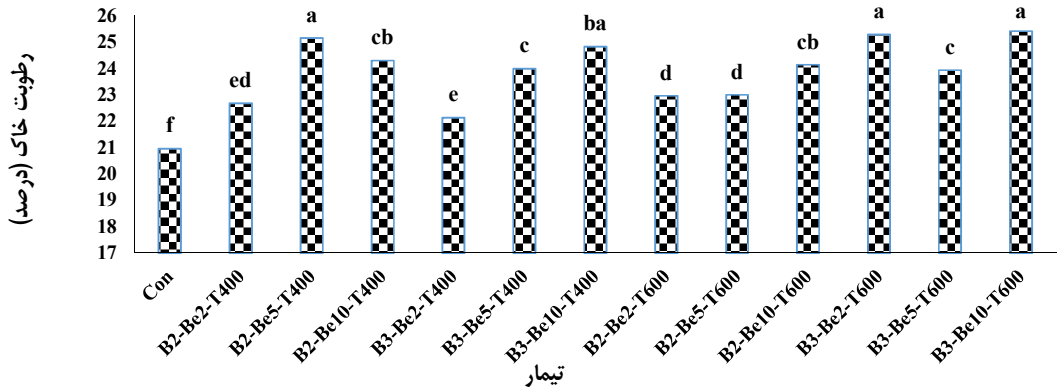
Table ۵- Analysis of variance of soil moisture in different treatments

منبع تغییرات	درجهٔ آزادی	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	میانگین رطوبت خاک
تیمار	12	13.25**	4.16**	5.96**	8.66**	8.08**	5.39**
زغال‌زیستی	3	19.17**	5.81**	5.87**	2.42**	3.77**	3.89**
بنتونیت	2	13.25**	4.16**	2.83**	12.32**	6.77**	5.92**
زغال‌زیستی*بنتونیت	6	7.79**	2.63**	2.54**	2.80**	4.54**	2.63**
خطا	24	0.30	0.40	0.37	0.75	0.40	0.18

* و ** به‌ترتیب معنادار در سطح ۰/۰۵ و ۰/۰۱

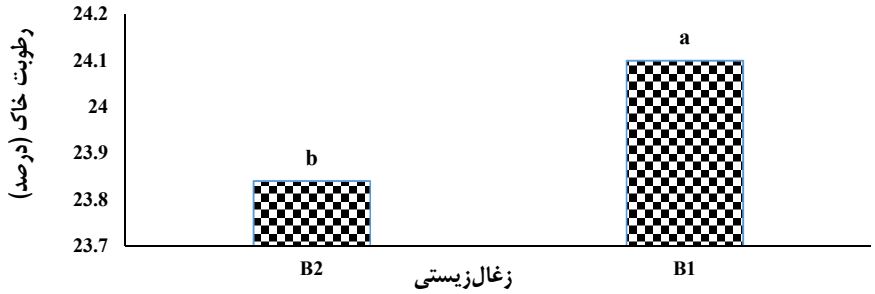
در شکل ۵ تغییرات میانگین رطوبت در کل دورهٔ ۱۵۰ روزه مورد بررسی در عمق ۱۵ سانتی‌متری از سطح خاک را نسبت به تیمار شاهد نشان داده شده شاست. مقدار رطوبت در تمام تیمارهای مورد بررسی نسبت به تیمار شاهد افزایش معناداری داشته است. به‌عبارت دیگر ترکیب زغال‌زیستی و بنتونیت به نگهداشت رطوبت در خاک کمک کرده است. بالاترین میزان رطوبت خاک در تیمار سه درصد زغال‌زیستی تولید شده در دمای ۶۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد و ۱۰ درصد بنتونیت و به‌مقدار ۲۵/۴ درصد به‌دست آمد که ۱۸ درصد بیش‌تر از رطوبت تیمار شاهد است. شکل ۶ نیز به‌وضوع افزایش رطوبت خاک در اثر افزایش مقدار زغال‌زیستی از دو به سه درصد را نشان می‌دهد. به‌عبارت دیگر نگهداشت رطوبت در تیمار سه درصد افزایش یافته که این امر موجب کاهش تبخیر در این تیمار نسبت به تیمار دو درصد نیز شده است (شکل ۳).

پژوهش‌های گذشته نیز بر توانایی زغال‌زیستی در افزایش رطوبت خاک دلالت دارند. برای نمونه Seyedsadr et al. (2022) با هدف شناسایی موثرترین ترکیبات اصلاحی برای افزایش نگهداری آب در خاک و در عین حال اجتناب از شست و شوی بیش از حد مواد مغذی انجام داده و نشان دادند زغال‌زیستی به‌طور قابل‌توجهی تخلخل کل را در مقایسه با کمپوست و کود دامی افزایش می‌دهد. هم‌چنین، عنوان نمودند تمام اصلاح‌کننده‌های مورد آزمایش میزان آب خاک را افزایش داده‌اند، اما افزودن زغال‌زیستی منجر به بیش‌ترین افزایش (۵۰ درصد) در محتوای آب در دسترس گیاهان در مقایسه با شاهد شده است. در پژوهش دیگری، Tokova et al. (2023) اذعان داشتند که زغال‌زیستی تخلخل خاک را تا ۲۲ درصد حتی چهار تا شش سال پس از کاربرد در خاک افزایش می‌دهد. هم‌چنین، آب در دسترس گیاه به‌میزان هشت تا ۵۱ درصد برای ۱۰ تن در هکتار زغال‌زیستی، ۱۸ تا ۲۱ درصد برای ۲۰ تن در هکتار زغال‌زیستی، افزایش می‌یابد. افزایش میزان بنتونیت اضافه شده به خاک نیز باعث افزایش رطوبت خاک شده است (شکل ۷). با افزایش بنتونیت از دو درصد به پنج درصد مقدار رطوبت خاک سه درصد و با افزایش بنتونیت به ۱۰ درصد میزان رطوبت شش درصد افزایش یافته است. مقایسهٔ میانگین اثر متقابل بین زغال‌زیستی و بنتونیت نیز که در سطح معناداری ۰/۰۱ معنادار است (جدول ۵) در شکل ۸ ارائه شده است.



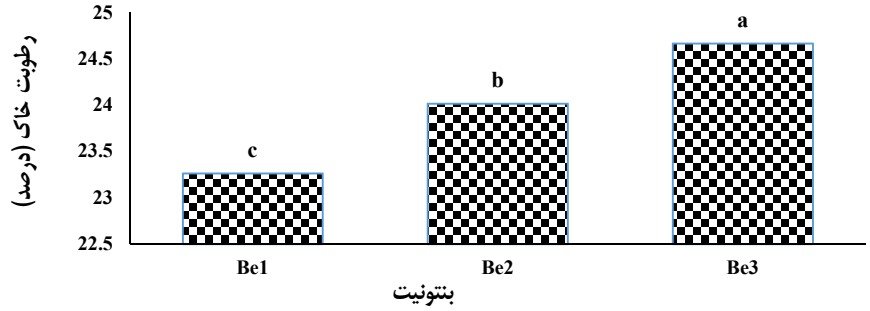
شکل ٥- مقایسهٔ میانگین رطوبت خاک در تیمارهای مختلف

Figure 5- Comparison of mean in different treatments for soil moisture



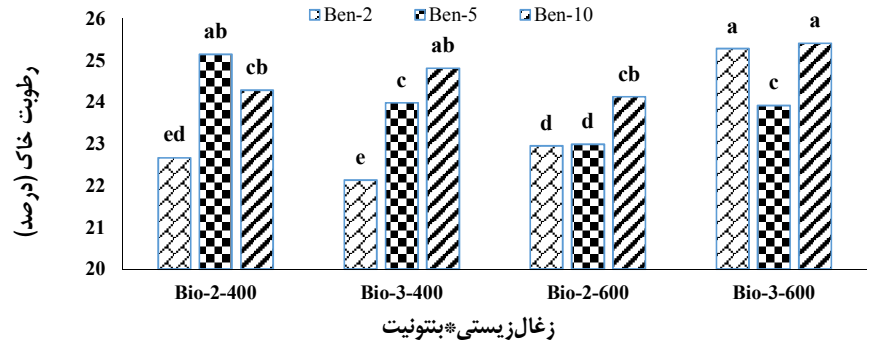
شکل ٦- مقایسهٔ میانگین رطوبت خاک در تیمارهای زغال‌زیستی

Figure 6- Comparison of mean soil moisture in biochar treatments



شکل ۷- مقایسهٔ میانگین رطوبت خاک در تیمارهای بنتونیت

Figure 7- Comparison of mean soil moisture in bentonite treatments



شکل ۸- مقایسهٔ میانگین اثر متقابل زغال‌زیستی * بنتونیت بر میانگین رطوبت خاک

Figure 8- Comparison of the average interaction effect of biochar * bentonite on average soil moisture

در بین تیمارهای دو درصد زغال‌زیستی بیش‌ترین میزان رطوبت خاک در تیمار B2Be5T400 به‌دست آمد. با افزایش بنتونیت به ۱۰ درصد نیز تفاوت معناداری در میزان رطوبت خاک ایجاد نشده است (شکل ۸). بنابراین، این تیمار در بین تیمارهای دو درصد زغال‌زیستی بیش‌ترین توانایی را در حفظ و نگهداری رطوبت در خاک دارد. میزان تبخیر از خاک در این تیمار نیز کم‌ترین مقدار در بین تیمارهای مورد بررسی بود (شکل ۴). در بین تیمارهای سه درصد زغال‌زیستی، بیش‌ترین رطوبت خاک در تیمار ۱۰ درصد بنتونیت و زغال‌زیستی ۶۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد مشاهده شد ولی این تیمار با بهترین تیمار موجود در بین تیمارهای دو درصد زغال‌زیستی (B2Be5T400) تفاوت معناداری نشان نداد. بنابراین، از نگاه کاربرد این تیمارها جهت افزایش رطوبت خاک، می‌توان تیمار B2Be5T400 را توصیه نمود. با توجه به این‌که این تیمار کم‌ترین مقدار تبخیر از خاک را هم نشان داده بود، استفاده از این تیمار می‌تواند جهت افزایش قدرت نگهداشت آب در خاک و کاهش تبخیر مؤثر باشد.

بنتونیت، یک سوپرجاذب طبیعی و مخلوطی از کانی‌های رسی است که دارای مقدار زیادی مونت‌موریلونیت می‌باشد و چسبندگی زیادی دارد. تخلیهٔ آب از خاک به‌دلیل نیروی چسبندگی بیش‌تر بین منافذ ریز و آب خاک دشوار است (Abu-Hamdeh, 2004). پژوهش‌های دیگری نیز نتایج حاصله را تأیید می‌نمایند برای نمونه Jazbi et al. (2018) نشان دادند که با افزایش مقدار بنتونیت به‌علت افزایش سطح ویژه سوپرجاذب، جذب آب افزایش می‌یابد و یا Paradelo et al. (2019) نشان دادند بنتونیت باعث افزایش میزان آب در بسترها می‌شود.

٤- نتیجه‌گیری

تبخیر از سطح خاک یکی از مهم‌ترین بخش‌های اجزای بیلان آب در مزرعه است که باعث هدررفت آب و کاهش کارایی مصرف آب در مزرعه می‌شود. بنابراین، پژوهش دربارهٔ راه‌کارهای کاهش تبخیر و افزایش ماندگاری رطوبت خاک امری ضروری در مناطق کم‌آب است. استفاده از ترکیبات طبیعی به‌دلیل عدم آلوده کردن خاک در اولویت قرار دارند. در پژوهش حاضر از زغال‌زیستی و بنتونیت به‌صورت ترکیبی استفاده شده است. نتایج نشان داد که این ترکیبات توانایی بالایی در نگهداری آب در خاک و کاهش تبخیر از خاک دارند. تیمار خاک مخلوط با دو درصد بنتونیت و دو درصد زغال‌زیستی تولید شده در دمای ۶۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد (B2-Be2-T600) کم‌ترین مقدار تبخیر و به‌مقدار ۳۹۸ میلی‌متر (۲/۶ میلی‌متر بر روز) را نشان داد. بیش‌ترین تبخیر از سطح خاک نیز بعد از تیمار شاهد (۳/۱ میلی‌متر بر روز) در تیمار خاک مخلوط با ۱۰ درصد بنتونیت و دو درصد زغال‌زیستی تولید شده در دمای ۴۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد (۲/۸ میلی‌متر بر روز) مشاهده شد.

تیمارهای مورد بررسی میزان رطوبت خاک را به‌صورت معناداری نسبت به تیمار شاهد افزایش دادند. به‌عبارت دیگر استفادهٔ ترکیبی از این دو ماده باعث بالا رفتن نگهداشت آب در خاک شده است. تیمار سه درصد زغال‌زیستی تولید شده در دمای ۶۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد و ۱۰ درصد بنتونیت با افزایش رطوبت خاک به‌میزان ۱۸ درصد نسبت به خاک بدون ماده اصلاحی، بالاترین عملکرد را نسبت به دیگر تیمارهای مورد بررسی نشان داد. استفادهٔ بهینه از آب در مزرعه و مدیریت علمی آب، نیاز به ابزارهای مناسبی دارد که علاوه‌بر در دسترس بودن، هزینه‌های زیادی را نیز به کشاورزان تحمیل نکند و در عین حال ماندگاری زیادی نیز داشته باشند. در کنار همهٔ موارد ذکر شده در بالا عدم ایجاد آلودگی برای خاک و گیاه نیز متغیر بسیار مهمی در این زمینه است. بنابراین، باتوجه به نتایج به‌دست آمده از این پژوش استفادهٔ ترکیبی از بنتونیت و زغال‌زیستی جهت استفاده در مزارع توصیه می‌شود. در انتها پیشنهاد می‌شود استفادهٔ ترکیبی از کودهای دامی و سوپرجاذب‌ها نیز بررسی شود. هم‌چنین، تغییرات منحنی رطوبتی خاک نیز تحت تأثیر این ترکیبات بررسی شود.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از دانشگاه شهرکرد که امکانات و تجهیزات لازم برای اجرای این پژوهش را فراهم نموده است تشکر می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

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

دسترسی به داده‌ها

همهٔ اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

الهام امانی: انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری، نگارش نسخهٔ اولیهٔ مقاله؛ **احمدرضا قاسمی:** مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، ویرایش و بازبینی مقاله؛ **حمیدرضا متقیان:** بازبینی متن مقاله، مشاوره.

منابع

اختیاریان، سحر، محمدی، سیما، و عالی نژادیان، افسانه (۱۴۰۱). بررسی تأثیر نوع و زمان افزودن اصلاح‌کننده آلی (پوسته برنج) و معدنی (زئولیت) بر برخی از ویژگی‌های خاک. *تحقیقات آب و خاک*

ایران، ۵۳(۸)، ۱۸۶۳-۱۸۸۴. doi:10.22059/IJSWR.2022.343787.669282

امانی، الهام، قاسمی، احمد رضا، نوری، محمدرضا، و متقیان، حمیدرضا (۱۴۰۰). تأثیر ورمی‌کولیت، بنتونیت و زئولیت بر میزان تبخیر و منحنی رطوبتی خاک. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۸(۲)، ۸۳-۱۰۱. doi:10.22069/JWSC.2021.18729.3424

جاذبی، زهرا، حجتی، محمود رضا، و کسراییان، علی (۱۳۹۷). ساخت و بررسی نانوکامپوزیت سوپرجاذب اکریل آمید/اکریلیک اسید/بنتونیت برای خاک‌های کشاورزی با شوری مختلف. *پژوهش نفت*، ۲۸(۹۸)، ۱۱۰-۱۲۶. doi:10.22078/pr.2017.2401.2110

جعفری‌کیا، طاهره، قاسمی، احمد رضا، قبادی‌نیا، مهدی، و متقیان، حمیدرضا (۱۳۹۹). تأثیر مقدار و عمق توزیع ماده خام و زغال‌زیستی چوب گردو بر تبخیر و رطوبت خاک. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۷(۳)، ۱-۲۱. doi:10.22069/jwsc.2020.17533.3303

عابدی کوپایی، جهانگیر، و مسفروش، مهسا (۱۳۸۸). ارزیابی کاربرد پلیمر سوپرجاذب بر عملکرد، کارآیی مصرف آب و ذخیره عناصر غذایی در خیار گلخانه‌ای. *آبیاری و زهکشی ایران*، ۳(۲)، ۱۰۰-۱۱۱. https://sid.ir/paper/131536/fa

عالم‌پور رجبی، فرناز، قربانی، محمدعلی، اسدی، اسماعیل (۱۴۰۳). مدل‌سازی فرآیند تبخیر با استفاده از الگوریتم هیبریدی پرندهٔ کوت و شبکهٔ عصبی مصنوعی. *نشریه مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۲)۲۷۹- ۲۹۴. doi: 10.22098/mmws.2023.12692.1266

علیزاده، امین (۱۳۸۶). طراحی سیستم‌های آبیاری. انتشارات دانشگاه امام رضا، ۴۵۰ صفحه.

فرخیان‌فیروزی، احمد، بی‌ریا، میلاد، معزی، عبدالامیر، و راهنما، افراسیاب (۱۴۰۲). اثر زغال‌زیستی کنوکارپوس بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک آهکی تحت کشت ذرّت. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*. doi:10.22098/mmws.2023.12233.1217

قضاوی، رضا، امیدوار، ابراهیم، و جیحونی، حدیثه (۱۳۹۸). بررسی تأثیر زئولیت بر ضرایب مدل‌های منحنی رطوبتی خاک در دو بافت شنی و لومی. *علوم آب و خاک*، ۲۳(۳)، ۶۵-۸۰. doi:10.47176/jwss.23.3.37191

قلی‌نژاد، اسماعیل، و عیوضی، علیرضا (۱۴۰۰). تأثیر پلیمر سوپرجاذب A200 و کود دامی بر کاهش اثرات تنش خشکی در ارقام مختلف گندم. *دانش آب و خاک*، ۳۱(۲)، ۶۹-۸۶. doi:10.22034/ws.2021.11689

محمدی‌فرد، فریبا، و مقدم، محمد (۱۴۰۰). تأثیر بنتونیت بر صفات بیوشیمیایی و محتوای رطوبت نسبی مرزه تحت سطوح مختلف رطوبت خاک. *مدیریت آب در کشاورزی*، ۸(۱)، ۷۷-۸۸. doi:20.1001.1.24764531.2021.8.1.7.5

محمدی، مجتبی، جهانتیغ، حسین، و ذوالفقاری، فرهاد (۱۴۰۳). پیش‌بینی ماهانهٔ تبخیر از تشت با استفاده از رویکردهای انفرادی و ترکیبی مدل‌های داده‌کاوی در مناطق خشک. *نشریه مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۲)۲۲۷ -۲۴۰. doi: 10.22098/mmws.2023.12728.1270

مرتضوی، سیدمرتضی، توکلی، افشین، محمدی، محمدحسن، و افصحی، کامران (۱۳۹۴). تأثیر کاربرد پلیمر سوپرجاذب بر صفات فیزیولوژیک و عملکرد گندم رقم آذر ۲ در شرایط دیم. *پژوهش‌های کاربردی زراعی*، ۲۶(۱۰۶)، ۱۱۸-۱۲۵. doi:10.22092/AJ.2015.105731

نسیمی، پریا، کریمی، احمد، و گرامی، زهرا (۱۳۹۹). اثرات بلندمدت بیوچار حاصل از برگ خرما بر تخلخل و پایداری ساختمان خاک لوم‌رسی‌شنی. *پژوهش‌های خاک*، ۳۴(۲)، ۱۹۵-۲۱۵. doi:10.22098/MMWS.2022.11264.1111

نوروزی، مهرداد، طباطبایی، سیدحسن، نوری، محمدرضا، و متقیان، حمیدرضا (۱۳۹۵). اثرات کوتاه مدت زغال‌زیستی حاصل از برگ خرما بر حفظ رطوبت در خاک لوم‌شنی. *حفاظت منابع آب و خاک*، ۶(۲)، ۱۳۷-۱۵۰. dor:20.1001.1.22517480.1395.6.2.10.5

References

Abedi Koupai, J., & Mesforoush M. (2009). Evaluation of superabsorbent polymer application on yield, water and fertilizer use efficiency in cucumber (Cucumis sativus). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, *2*(3), 100-111. https://sid.ir/paper/131536/fa [In Persian]

Abu-Hamdeh, N.H. (2004). The effect of tillage treatments on soil water holding capacity and on soil physical properties. 13th International Soil Conservation Organization Conference, Brisbane, Australia, Pp. 1-6.

Alempour Rajabi, F., Ghorbani, M.A., & Asadi, E. (2024). Modeling of the evaporation process using the hybrid algorithm of the COOT bird and artificial neural network. *Water and Soil Management and Modeling, 4(2)*, 279- 294. doi: 10.22098/mmws.2023.12692.1266. [In Persian]

Alizadeh, A. (2007). Irrigation System Design. Emamreza University Press, 450 pages. [In Persian]

Amani E., Ghasemi A.R., Nouri M., & Mottaghian H. (2021). Effect of vermiculite, bentonite and zeolite on evaporation and soil characteristic moisture curve. *Journal of Water and Soil Conservation Research*, *28*(2), 83-101. DOI:10.22069/JWSC.2021.18729.3424. [In Persian]

Ekhtiarian, S., Mohammadi, S., & Alinejadian, A. (2022). The effect of adding rice husk and zeolite on some of the soil properties at different times. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *8*(53), 1863-1884. doi:10.22059/IJSWR.2022.343787.669282. [In Persian]

Farrokhian Firouzi, A., Biria, M., Moezzi, A., & Rahnama, A. (2024). Effect of conocarpus erectus biochar on some physical and mechanical properties of a calcareous soil under corn cultivation. *Water and Soil Management and Modelling*. doi:10.22098/mmws.2023.12233.1217. [In Persian]

Fu, L., Cao, T., Lei, Z., Chen, H., Shi, Y., & Xu, C. (2016). Superabsorbent nanocomposite based on methyl acrylic acid-modified bentonite and sodium polyacrylate: Fabrication, structure and water uptake. *Materials and Design*, *94*, 322-329. doi:10.1016/j.matdes.2016.01.014

Ghazavi, R., Omidvar, A., & Jeyhouni Naini, H. (2019). Investigation of the effect of zeolite on the coefficients of soil moisture curve models in sandy and loamy textures. *Journal of Soil and Water Sciences*, *23*(3), 65-80. doi:10.47176/jwss.23.3.3719. [In Persian]

Gholinezhad, E., & Eivazi, A. (2021). The effect of super absorbent polymer A200 and manure on reducing drought stress in wheat (Triticum aestivum L.) different cultivars. *Water and Soil Science Journal*, *31*(2), 69-86. doi:10.22034/ws.2021.11689. [In Persian]

Jafarikia T., Ghasemi, A.R., Ghobadi-Nia, M., & Motaghian, H.R. (2020). Influence of amount and distribution depth of walnut raw material and its biochar on evaporation and soil moisture. *Journal of Water and Soil Conservation Research*, *27*(3), 1-21. doi:10.22069/jwsc.2020.17533.3303. [In Persian]

Jazbi, Z., Hojjati, M., & Kasraian, A. (2018). Fabrication and study of acrylamide/acrylic acid/bentonite superabsorbent nanocomposites for agricultural soils with different salinity. *Journal of Petroleum Research*, *28*(98), 110-126. doi:10.22078/pr.2017.2401.2110. [In Persian]

Keller, L., Idowu, O.J., Ulery, A., Omer, M., & Brewer, C.E. (2023). Short-term biochar impacts on crop performance and soil quality in arid sandy loam soil. *Agriculture*, *13*, 782. doi:10.3390/agriculture13040782

Li, L., Zhou, X., Li, Y., Gong, C., Lu, L., Fu, X., &Tao, W. (2017). Water absorption and water/fertilizer retention performance of vermiculite modified sulphoaluminate cementitious materials. *Construction and Building Materials*, *137*, 224-233. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.01.061

Malik, S., Chaudhary, K., Malik, A., Punia, H., Sewhag, M., Berkesia, N., Nagora, M., Kalia, S., Malik, K., Kumar, D., Kumar, P., Kamboj, E., Ahlawat, V., Kumar, A., & Boora, K. (2023). Superabsorbent polymers as a soil amendment for increasing agriculture production with reducing water losses under. *Water Stress Condition Polymers*, *15*(1), 161. doi:10.3390/polym15010161

Mohammadifard, F., & Moghaddam, M. (2021). Effect of bentonite on biochemical traits and relative water content of summer savory (Satureja hortensis) under different soil moisture levels. *Journal of Water Management in Agriculture*, *8*(1), 77-88. doi:20.1001.1.24764531.2021.8.1.7.5. [In Persian]

Mohammadi, M., Jahantigh, H., & Zolfahari, F. (2024). Monthly prediction of pan evaporation using individual and combined approaches of data mining models in arid regions. *Water and Soil Management and Modeling, 4(2),* 227-240. doi: 10.22098/mmws.2023.12728.1270. [In Persian]

Mortezavi, M., Tavakoli, A., Mohammadi, M., & Afsahi, K. (2015). Effect of superabsorbent on physiological traits and yield of wheat (Azar 2 cultivar) under dry farming condition. *Applied Field Crops Research*, *26*(106), 118-125. doi:10.22092/AJ.2015.105731. [In Persian]

Nasimi, P., Karimi, A., & Gerami, Z. (2020). Long-term effects of palm leaf biochar on the porosity and structure stability of a sandy clay loam soil. *Journal of Soil Research*, *34*(2), 199-215. doi:10.22098/MMWS.2022.11264.1111. [In Persian]

Nepal, J., Ahmad, W., Munsif, F., Khan, A., & Zou, Z. (2023) Advances and prospects of biochar in improving soil fertility, biochemical quality, and environmental applications. *Front Environmental Science*, *11*, 1114752. doi:10.3389/fenvs.2023.1114752

Ngeno, V., Omuto, C., Mbuge, D. & Too, V. (2023) Assessment of Super Absorbent Polymer (SAP) on Plant Available Water (PAW) in Dry Lands. *Engineering*, *15*, 90-105. doi:10.4236/eng.2023.152008

Nowruzi, M., Tabatabai, H., Noori, M., & Motaghian, H.R. (2017). Short-term effects of biochar produced from date palm's leaves on moisture retention in sandy loam soil. *Journal of Water and Soil Resources*, 6(2).137-150. dor:20.1001.1.22517480.1395.6.2.10.5 [In Persian]

Paradelo, R., Basanta, R., & Barral, M.T. (2019). Water-holding capacity and plant growth in compost-based substrates modified with polyacrylamide, guar gum or bentonite. *Scientia horticulturae*, *243*, 344-349. doi:10.1016/j.scienta.2018.08.046

Seyedsadr, S., Sípek, V., Jacka, L., Snehota, M., Beesley, L., Pohorely, M., Kovar, M., & Trakal, L. (2022). Biochar considerably increases the easily available water and nutrient content in low-organic soils amended with compost and manure. *Chemosphere*, 293, 133586. doi:10.1016/j.chemosphere.2022.133586

Tokova, L., Igaz, D., Horak, J., & Aydın, E. (2023). Can application of biochar improve the soil water characteristics of silty loam soil? *Journal of Soils Sediments*, *5*, 1-16. doi:10.1007/s11368-023-03505-y

Wang, T., Stewart, C.E., Sun, C., Wang, Y., & Zheng, J. (2018). Effects of biochar addition on evaporation in the five typical loess plateau soils. *Catena*, *162*, 29-39. doi:10.1016/j.catena.2017.11.013

Widiastuti, N., Wu, H., Ang, M., & Zhang D. (2008). The potential application of natural zeolite for grey water treatment. *Desalination*, *218*, 271-280. doi:10.1016/j.desal.2007.02.022

Wu, H., Li, Z., Song, W., & Bai, Z. (2021). Effects of superabsorbent polymers on moisture migration and accumulation behaviors in soil. *Journal of Cleaner Production*, *279*, 123841. doi:10.1016/j.jclepro.2020.123841

Zheng, J., Stewart, C., & Cotrufo, M. (2012). Biochar and nitrogen fertilizer alters soil nitrogen dynamics and greenhouse gas fluxes from two temperate soils. *Journal of Environmental Quality*, *41*(5), 1361-1370. doi:10.2134/jeq2012.0019