

## Water availability of biochar-enriched casing soil in button mushroom (*Agaricus bisporus*)

M. Eshaghi<sup>1</sup>, A. Karimi<sup>2\*</sup>, Sh. Ghorbani Dashtaki<sup>3</sup> and T. Saedi<sup>4</sup>

### Extended Abstract

#### Introduction:

Water scarcity and drought are among the most common agricultural problems in Iran. Therefore, finding solutions to enhance the resistance of agricultural crops such as button mushrooms resistant to drought stress is of particular importance. Increasing soil water retention and irrigation management are vital to preventing water scarcity and physiological stress in agricultural crops. Therefore the amount of water available to plants and its measurement has been of interest to farmers and researchers. One of the solutions considered in recent years for optimal management of soil water status is the addition of organic amendments to the soil, including biochar. Biochar can change the physical properties, improving access to water, air, and nutrients for the plant, and as a result, affect the growth and yield of agricultural crops. Therefore, irrigation of casing soil under button mushroom cultivation should also be managed according to these changes to prevent inefficient irrigation.

#### Methods:

This study was conducted in a completely randomized factorial design with three factors: type of casing soil at four levels, amount of biochar at four levels, and size of biochar particles at two levels. The experiments had three replications. The control treatment consisted of casing soil used in the factory with a combination of North peat, South peat, and spent mushroom compost (SMC) in equal weight ratios. The experiments involved a total number of 29 treatments across 87 experimental plots at the Negin Fasl compost and mushroom production factory, located in Shahrood city, Iran, in 2023. In this regard, the initial casing soil compositions including North peat, peat vermicompost, cow manure vermicompost, and mushroom compost vermicompost were prepared. To prepare different treatments, biochar derived from pruning waste of plum and pomegranate trees, with particle sizes of 0–1 mm and 1–2 mm, was added at 5%, 10%, and 15% by weight to the aforementioned casing soil compositions with a 20-day incubation period. Then, 15 days after the compost loading operation in the button of mushroom cultivation hall, when 70% of the compost bed was covered with mushroom mycelium, the casing stage began. For each square meter of the cultivation bed, 32 kg of casing soil was added as described in the experimental treatments in the form of caking. After the casing stage, sampling the casing soil was carried out from each experimental plot using a metal cylinder with a diameter and height of 4.5 and 5 cm, respectively. Finally, the soil moisture characteristic curve obtained by measuring moisture at suctions of 0, 10, 20, 50, 60, 80, and 100 hectopascals. The indices of air volume percentage after irrigation (AIR), available water (EAW), water buffering capacity (WBC), water holding capacity (WHC), and their integral energy were calculated. Then, the obtained data were analyzed using SPSS software.

<sup>1</sup> Ph. D. Student of Soil Resources Management, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrood University, Shahrood, Iran.

<sup>2</sup> Associate Professor Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrood University, Shahrood, Iran.

<sup>3</sup> Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrood University, Shahrood, Iran.

<sup>4</sup> Former Ph. D. Student of Soil Science, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrood University, Shahrood, Iran.

\*Corresponding Author: [karimiahmad1342@sku.ac.ir](mailto:karimiahmad1342@sku.ac.ir)

Received: 2025/06/07

Accepted: 2025/08/11

## Results:

The results showed that the application of biochar led to a decrease in AIR in the studied soils which could be due to the high frequency of fine pores that were affected after irrigation. The highest volumetric percentage of air after irrigation was observed in the  $S_0$  treatment (0.17) and the lowest in the  $S_{4l2Z1}$  treatment (0.02), which had no significant difference with the  $S_{3l3Z2}$  treatment (0.02). The application of biochar in different soils except for the  $S_1$  treatment did not cause any changes in the EAW value compared to the commercial casing soil and the EAW value of all treatments was at the optimal level. The application of biochar to the casing soil resulted in an increase in the WBC value of water and this increase led to enhance in water retention in the casing soil. However, WHC value in the  $S_{1l0}$ ,  $S_{2l0}$ ,  $S_{3l0}$  and  $S_{4l0}$  treatments decreased by 34, 29, 5 and 19 percent compared with the  $S_0$  treatment, respectively. The results showed that the variation of  $EI_{AIR}$  among different casing soils and also commercial casing soil was small; also in all four studied soil types  $EI_{AIR}$  increased after irrigation with increasing biochar application. Soil water availability for plants was almost constant in the moisture range of 10 to 50 hPa. The application of biochar to casing soil increased this energy requirement but this increase was not significant. Also, the amount of energy required for water absorption in the moisture range between 50 and 100 hPa was almost the same among different casing soils and also commercial casing soil. There was no significant difference between the energy requirements of these soils, but the application of biochar -except for soil  $S_1$ - led to an increase in  $EI_{WBC}$ , although this increase was not significant.

## Conclusion:

Overall, the results showed that adding biochar to casing soil did not cause any problems in terms of soil aeration and kept the amount of accessible soil water at an optimal level. However despite the increase in the amount of water buffering capacity (WBC) and water holding capacity (WHC) in the soil, the amount of integral energy (EI) increased due to the increase in the specific surface area of the soil, making water extraction more difficult. Therefore, it seems that using biochar as a percentage replacement for casing soil does not cause a significant change in soil water availability compared to commercial and conventional casing soil.

**Keywords:** Biochar, Casing soil, Integral energy, Water buffering capacity

**Citation:** Eshaghi, M., Karimi, A., Ghorbani Dashtaki, Sh., and Saeedi, T. 2025. Water availability of biochar-enriched casing soil in button mushroom (*Agaricus bisporus*). Iranian Water Research Journal. 58(3). pp.107-119. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2025.15258.2691>.

---



## قابلیت دسترسی آب در خاک پوششی غنی شده با بیوجار تحت کشت قارچ دکمه‌ای (*Agaricus bisporus*)

محبوبه اسحاقی<sup>۱</sup>، احمد کریمی<sup>۲\*</sup>، شجاع قربانی دشتکی<sup>۳</sup>، طیبه ساعدی<sup>۴</sup>

### چکیده

کمبود آب و خشکی در ایران از شایع‌ترین مشکلات کشاورزی به حساب می‌آید؛ بنابراین، یافتن راه‌کارهایی برای مقاومت محصولات کشاورزی همچون قارچ دکمه‌ای به تنش خشکی از اهمیت خاصی برخوردار است. در همین راستا، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی قابلیت دسترسی آب در خاک پوششی غنی شده با بیوجار و زیر کشت قارچ دکمه‌ای در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۲۹ تیمار طی سال ۱۴۰۳ اجرا گردید. بر این اساس، ترکیبات اولیه خاک پوششی از جمله پیت شمال، ورمی‌کمپوست پیت شمال، ورمی‌کمپوست کود گاوی و ورمی‌کمپوست کمپوست برگشتی قارچ تهیه گردید. سپس به ترکیب‌های خاک پوششی یاد شده مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی بیوجار اضافه و تیمارهای مختلف ساخته شد. از هر کرت آزمایشی نمونه‌برداری از خاک پوششی توسط استوانه فلزی با قطر و ارتفاع به ترتیب ۴/۵ و ۵ سانتی‌متر انجام شد و در نهایت با اندازه‌گیری منحنی مشخصه رطوبتی خاک، شاخص‌های درصد حجمی هوا پس از آبیاری (AIR)، آب سهل‌الوصول (EAW)، گنجایش آب بافری (WBC)، گنجایش نگهداری آب (WHC) و انرژی انتگرالی آن‌ها محاسبه شد. نتایج نشان داد افزودن بیوجار به خاک پوششی مشکلی را از لحاظ تهویه در خاک ایجاد نکرد و مقدار آب سهل‌الوصول خاک را در حد بهینه نگهداشت ولی علیرغم افزایش مقدار WBC و WHC در خاک، میزان انرژی انتگرالی به دلیل افزایش سطح ویژه خاک زیاد شد که برداشت آب از آن سخت‌تر می‌شود. در مجموع می‌توان گفت استفاده از بیوجار تغییر قابل توجهی در قابلیت دسترسی آب خاک نسبت به خاک پوششی تجاری و مرسوم ایجاد نمی‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** انرژی انتگرالی، بیوجار، خاک پوششی، گنجایش آب بافری

**ارجاع:** اسحاقی، م.، کریمی، ا.، قربانی دشتکی، ش.، ساعدی، ط. ۱۴۰۴. قابلیت دسترسی آب در خاک پوششی غنی شده با بیوجار تحت کشت قارچ دکمه‌ای. مجله پژوهش آب ایران، ۵۸(۳)، صص. ۱۰۷-۱۱۹. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2025.15258>.

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

<sup>۳</sup> استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

<sup>۴</sup> دانش‌آموخته دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه اصفهان، ایران

\* نویسنده مسئول: [karimiahmad1342@sku.ac.ir](mailto:karimiahmad1342@sku.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۸

## مقدمه

نشان داد که انرژی انتگرالی می‌تواند شاخصی از کیفیت فیزیکی خاک باشد.

در مورد اثر افزودن بیوپار به خاک پوششی قارچ خوراکی و اثر آن بر رطوبت و قابلیت دسترسی آب می‌توان به نتایج پژوهش Hu et al. (2022) اشاره کرد که گزارش کردند استفاده از بیوپار کمپوست برگشتی قارچ در کشت قارچ صدفی باعث حفظ رطوبت خاک و افزایش برداشت محصول می‌شود. حفظ رطوبت خاک پوششی در تولید قارچ اهمیت فراوانی دارد و بیوپار با حفظ رطوبت خاک منجر به افزایش عملکرد محصول و کاهش فاصله زمانی کاشت تا برداشت می‌شود (Talwar et al., 2024).

از آنجایی که خاک پوششی نباید زیاد خشک و یا زیاد مرطوب باشد پس ارزیابی شاخص‌های نگهداشت آب و تهویه در خاک پوششی ضروری است. در شرایط مطلوب رطوبتی میسلیم قارچ گسترش بهتری خواهد داشت و از دیگر سو رطوبت زیاد خاک پوششی باعث عدم انجام تبادلات گازی کمپوست و توده فشرده میسلیمومی در سطح خاک پوششی و در زمان تشکیل ته-سجاقی موجب از بین رفتن پین‌ها خواهد شد و عملکرد کاهش می‌یابد (Jafari Haghighi, 2024). بر این اساس این پژوهش با هدف ارزیابی قابلیت دسترسی آب در خاک پوششی غنی شده با بیوپار و زیر کشت قارچ دکمه‌ای در دانشگاه شهرکرد و کارخانه تولید کمپوست و قارچ نگین فصل شهرکرد انجام گرفت.

## مواد و روش‌ها

بر اساس اهداف این پژوهش، ترکیبات اولیه خاک پوششی از جمله پیت شمال، ورمی کمپوست-پیت شمال، ورمی کمپوست- کودگاوی و ورمی کمپوست-کمپوست برگشتی قارچ تهیه گردید. سپس برای تهیه تیمارهای آزمایشی مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی بیوپار در اندازه ذرات ۰-۱ و ۱-۲ میلی‌متر به خاک‌های پوششی یادشده با دوره انکوباسیون ۲۰ روزه اضافه شد. شایان ذکر است که بیوپار مورد استفاده در این پژوهش از شرکت دانش بنیان فصل پنجم واقع در استان فارس که طی فرآیند گرماکافت در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد به مدت نگهداری ۳ ساعت، تولید شده بود، تهیه شد. بیوپار مورد استفاده از شاخه‌های اضافی هرس درختان آلو و انار با طول ۵۰ و قطر ۴ سانتی‌متر با هم ترکیب و درون کوره صنعتی با ظرفیت ۱۰ تن در درجه حرارت مذکور و در شرایط عدم وجود اکسیژن یا به مقدار فوق‌العاده کم، تولید شده بود.

با توجه به اقلیم گرم و خشک کشور ایران، کمبود آب و خشکی از شایع‌ترین مشکلات کشاورزی است بنابراین مدیریت منابع آب از اولویت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از راه‌های مفید برای مقابله با بحران خشکسالی و تأمین آب مورد نیاز، افزایش ذخیره آب در خاک از طریق به‌کارگیری روش‌های مدیریتی مؤثر است (Ajayi et al., 2016). در این راستا، استفاده از اصلاح‌کننده‌های آلی مانند بیوپار، به‌عنوان یک راهکار امیدبخش در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. بیوپار ماده‌ای با خواص منحصر به فرد است که به‌ویژه در دهه‌های اخیر برای اصلاح طیف گسترده‌ای از ویژگی‌های نامناسب خاک‌ها به دفعات توسط پژوهشگران مختلف استفاده شده است (Rabiei et al., 2013). بیوپار با بهبود ساختار و حفظ رطوبت خاک، از شیوه‌های کشاورزی پایدار پشتیبانی می‌کند و تاب‌آوری اقلیمی را افزایش می‌دهد (Aiduang et al., 2025). افزودن بیوپار به خاک منجر به افزایش درصد حجمی هوا پس از هوا (AIR)، آب سهل الوصول (EAW)، گنجایش آب بافری (WBC) و گنجایش نگهداشت آب (WHC)، کاهش چگالی ظاهری خاک می‌شود و به‌عنوان منبع ترکیبات کربنی رشد گیاه را بهبود می‌بخشد (Raviv and Lieth, 2008). مقدار AIR به عوامل زیادی مانند اندازه ذرات بستر رشد و تعداد دفعات آبیاری وابسته است (Kirkham, 2005). مقدار WBC یک خاک پوششی می‌تواند منجر به کاهش سریع مقدار رطوبت با افزایش مکش ماتریک گردد (Jafari Haghighi, 2024). افزودن بیوپار به خاک پوششی با اندازه ذرات ریز باعث افزایش نگهداشت آب در خاک می‌شود، در حالیکه افزودن بیوپار به خاک پوششی با اندازه ذرات درشت، مشابه با کارکرد پرلیت باعث افزایش زه‌کشی و هوادهی بسترهای رشد می‌شود (Banitalebi et al., 2021). (Minasny and McBratney, 2003) بیان داشتند که اگرچه آب قابل دسترس عمده‌تاً برای کمی‌سازی میزان آبی که به‌راحتی در دسترس گیاه قرار دارد استفاده می‌شود، اما این مفهوم به‌طور مستقیم انرژی مورد نیاز گیاه برای جذب آب را نشان نمی‌دهد. به همین دلیل مفهوم انرژی انتگرالی (EI) را به‌عنوان معیاری از قابلیت دسترسی آب خاک پیشنهاد کردند. (Shi et al., 2011) ضریب کارایی انرژی انتگرالی را در خاک‌های چین بررسی کردند و نشان دادند که EI به خوبی بیان‌کننده مقدار اختلاف انرژی آب جذب شده به‌وسیله گیاه و آب خاک است. نتایج مطالعات (Asgarzadeh et al., 2011)

سه تکرار و تیمار شاهد (خاک پوششی مورد استفاده در کارخانه) با ترکیب پیت شمال، پیت جنوب و کمپوست برگشتی قارچ (SMC) با نسبت وزنی برابر در سه تکرار، در مجموع ۲۹ تیمار با ۸۷ کرت آزمایش انجام گردید. سطوح فاکتورهای آزمایش به شرح زیر است:

فاکتور نوع خاک پوششی شامل چهار سطح ( $S_1, S_2, S_3$  و  $S_4$ ) که به ترتیب  $S_1$ : مخلوط پیت شمال و ورمی کمپوست SMC به نسبت وزنی ۵۰ درصد،  $S_2$ : مخلوط پیت شمال و ورمی کمپوست کود گاوی به نسبت وزنی ۵۰ درصد،  $S_3$ : ورمی کمپوست مخلوط پیت شمال و SMC به نسبت وزنی ۵۰ درصد، و  $S_4$ : ورمی کمپوست مخلوط پیت شمال و کود گاوی به نسبت وزنی ۵۰ درصد است. فاکتور مقدار بیوجار شامل چهار سطح  $L_0, L_1, L_2$  و  $L_3$  به ترتیب با مقادیر صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی و فاکتور اندازه ذرات بیوجار شامل ۲ سطح  $Z_1$  و  $Z_2$  (ذرات ۰-۱ و ۱-۲ میلی‌متر) می‌باشد.

بدین منظور برای تولید خاک پوششی، پیت شمال، کود گاوی، کمپوست برگشتی پرورش قارچ شش ماهه و بیوجار حاصل از مخلوط ضایعات هرس درختان آلو و انار و ورمی کمپوست آن‌ها تهیه گردید. سپس با توجه به تیمارهای آزمایش مقادیر لازم بیوجار در اندازه ذرات مختلف به فرمول‌های خاک پوششی مورد استفاده، اضافه گردید. ترکیب تیمارها در جدول ۱ نشان داده شده است.

برای تهیه ورمی کمپوست به عنوان مواد اولیه ترکیب خاک پوششی نیز کود گاوی، کمپوست برگشتی قارچ دکمه‌ای و پیت شمال به صورت جداگانه در سبدهای پلاستیکی با طول ۸۰، عرض ۵۰ و عمق ۲۵ سانتی‌متر قرار داده شد و به ازای هر سبد ۱۰۰ عدد کرم خاکی قرمز (*Eisenia feotida*) در عمق ۱۵ سانتی‌متری بستر رها گردید و طی مدت زمان دو ماه، با تأمین دمای ۲۱ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۷۵ تا ۸۵ درصد با آبیاری به صورت هفته‌ای یک نوبت به میزان ۲۵۰ میلی‌لیتر به ازای هر سبد، ورمی کمپوست مواد اولیه خاک پوششی از جمله کود گاوی، کمپوست برگشتی قارچ دکمه‌ای و پیت شمال آماده برداشت شدند.

پس از تهیه تیمارها و ۱۵ روز پس از عملیات بارگیری کمپوست در سالن پرورش قارچ دکمه‌ای، مرحله خاکدهی شروع گردید. در هر متر مربع بستر کشت، ۳۲ کیلوگرم خاک پوششی با ضخامت ۴ سانتی‌متر به شرح تیمارهای آزمایش به صورت افزودن کمپوست اسپان ران شده به خاک اضافه گردید و پس از مرحله خاکدهی به کمپوست، از هر کرت آزمایشی نمونه‌برداری انجام گرفت.

#### طرح آزمایش و اعمال تیمارها

این آزمایش در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی به صورت فاکتوریل با سه فاکتور نوع خاک پوششی در چهار سطح، مقدار بیوجار در چهار سطح و اندازه ذرات بیوجار در دو سطح و در

جدول ۱- ترکیب تیمارهای آزمایش

| کد | تیمار       | کد | تیمار       | کد | تیمار       | کد | تیمار       | کد | تیمار        |
|----|-------------|----|-------------|----|-------------|----|-------------|----|--------------|
| ۱  | $S_1L_0$    | ۸  | $S_2L_0$    | ۱۵ | $S_3L_0$    | ۲۲ | $S_4L_0$    | ۲۹ | $S_0$ (شاهد) |
| ۲  | $S_1L_1Z_1$ | ۹  | $S_2L_1Z_1$ | ۱۶ | $S_3L_1Z_1$ | ۲۳ | $S_4L_1Z_1$ |    |              |
| ۳  | $S_1L_1Z_2$ | ۱۰ | $S_2L_1Z_2$ | ۱۷ | $S_3L_1Z_2$ | ۲۴ | $S_4L_1Z_2$ |    |              |
| ۴  | $S_1L_2Z_1$ | ۱۱ | $S_2L_2Z_1$ | ۱۸ | $S_3L_2Z_1$ | ۲۵ | $S_4L_2Z_1$ |    |              |
| ۵  | $S_1L_2Z_2$ | ۱۲ | $S_2L_2Z_2$ | ۱۹ | $S_3L_2Z_2$ | ۲۶ | $S_4L_2Z_2$ |    |              |
| ۶  | $S_1L_3Z_1$ | ۱۳ | $S_2L_3Z_1$ | ۲۰ | $S_3L_3Z_1$ | ۲۷ | $S_4L_3Z_1$ |    |              |
| ۷  | $S_1L_3Z_2$ | ۱۴ | $S_2L_3Z_2$ | ۲۱ | $S_3L_3Z_2$ | ۲۸ | $S_4L_3Z_2$ |    |              |

رطوبت در مکش‌های مختلف، مدل ون‌گنوختن با توجه به رابطه (۱) بر داده‌های آزمایش برازش داده و پارامترهای آن بهینه شد.

$$\theta(h) = \theta(r) + \frac{\theta(s) - \theta(r)}{[1 + (\alpha h)^n]^{(1 - \frac{1}{n})}} \quad (1)$$

که در آن:  $\theta(h)$  مقدار رطوبت حجمی خاک به عنوان تابعی از  $h$ ،  $\theta(s)$  رطوبت حجمی اشباع ( $m^3 m^{-3}$ ) و  $\theta(r)$  رطوبت حجمی باقیمانده،  $\alpha$  پارامتر مقیاس ( $hpa^{-1}$ ) و مرتبط با

#### تعیین منحنی مشخصه رطوبتی

برای تعیین منحنی مشخصه رطوبتی خاک، بلافاصله پس از مرحله خاکدهی به کمپوست، نمونه‌برداری از خاک پوششی هر کرت آزمایشی توسط استوانه فلزی با قطر و ارتفاع به ترتیب ۴/۵ و ۵ سانتی‌متر انجام و به آزمایشگاه انتقال داده شد. رطوبت خاک در مکش‌های ماتریک صفر، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ هکتوپاسکال با جعبه شن اندازه‌گیری شد (Reynolds and Clarke Topp, 2009). پس از اندازه‌گیری

(2001). بنابراین همواره مقادیر گنجایش ویژه رطوبتی  $(E_i(h))$  کمتر یا مساوی مقادیر گنجایش ویژه رطوبتی  $C(h)$  است. برای محاسبه انرژی انتگرالی مفاهیم مختلف آب قابل استفاده از رابطه کلی زیر که شکل تغییر یافته از معادله پیشنهادی میناسنی و مکبراتی (Minasny and McBratney, 2003) است، استفاده شد (Asgarzadeh et al., 2011).

$$E_i = \frac{1}{10SAW} \int_{h_i}^{h_f} h \left[ \prod_{i=1}^n w_i(h) \right] c(h) dh \quad (۸)$$

در این رابطه،  $E_i$  بر حسب ژول بر کیلوگرم  $(JKg^{-1})$ ،  $h$  مکش ماتریک بر حسب هکتوپاسکال، مقادیر  $h_i$  و  $h_f$  برای مفهوم AIR به ترتیب مقادیر رطوبت در مکش های صفر و ۱۰ هکتوپاسکال، برای مفهوم EAW به ترتیب مقادیر رطوبت در مکش های ۱۰ و ۵۰ هکتوپاسکال و مقادیر رطوبت برای مفهوم WBC به ترتیب در مکش های ۵۰ و ۱۰۰ هکتوپاسکال است. در این رابطه SAW مقدار آب قابل استفاده بر حسب  $cm^3 cm^{-3}$  و ضریب ۱۰ در این رابطه، برای تبدیل واحد انرژی از هکتوپاسکال به ژول بر کیلوگرم است. از تابع  $h$  انتگرال گیری به صورت عددی با استفاده از روش ذوزنقه ای با تقسیم کل محدوده منحنی رطوبتی به تعداد زیادی فاصله انجام شد (Asgarzade et al., 2011).

### تجزیه و تحلیل داده ها

این پژوهش به صورت آزمایش کاملاً تصادفی انجام شد. فرضیات تجزیه واریانس شامل همگنی واریانس ها با استفاده از آزمون لون و نرمال بودن داده ها با استفاده از کولموگروف-اسمیرنوف بررسی شد. برای بررسی نتایج تغییرات شاخص های فیزیکی در تیمارهای آزمایش، آنالیز واریانس (ANOVA) انجام شد. مقایسه میانگین تیمارهای آزمایش از طریق آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ ( $p < 0.05$ ) انجام گرفت. برای مشخص نمودن اثر نوع خاک، مقدار بیوچار و اندازه ذرات بیوچار و همچنین اثرات متقابل آن ها بر ویژگی های مورد مطالعه، تجزیه واریانس سه عامله انجام شد (Soltani, 2011). تجزیه و تحلیل داده ها با استفاده از نرم افزار SPSS Statistics 25 و ترسیم نمودارها با نرم افزار Excel 2013 انجام شد.

### نتایج و بحث

#### ویژگی های بیوچار مورد استفاده

برخی از ویژگی های شیمیایی و فیزیکی بیوچار مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ آمده است.

عکس مکش ماتریک در نقطه عطف منحنی و  $n$  پارامتر توزیع اندازه منافذ است که شیب منحنی رطوبتی را مشخص می کند (Reynolds and Clarke Topp, 2009).

پارامترهای درصد حجمی هوا پس از آبیاری (AIR)، آب سهل الوصول (EAW)، گنجایش آب بافری (WBC) و گنجایش نگهداری آب (WHC) از روی داده های منحنی مشخصه رطوبتی و بر اساس روابط زیر محاسبه شدند (Raviv and Lieth, 2008).

$$AIR = \theta_0 - \theta_{10} \quad (۲)$$

$$EAW = \theta_{10} - \theta_{50} \quad (۳)$$

$$WBC = \theta_{50} - \theta_{100} \quad (۴)$$

$$WHC = \theta_{10} \quad (۵)$$

که در این روابط: AIR درصد حجمی هوا پس از آبیاری، EAW آب سهل الوصول، WBC گنجایش آب بافری، WHC گنجایش نگهداری آب،  $\theta_0$  رطوبت اشباع،  $\theta_{10}$  رطوبت در مکش ماتریک ۱۰ هکتوپاسکال،  $\theta_{50}$  رطوبت در مکش ماتریک ۵۰ هکتوپاسکال و  $\theta_{100}$  رطوبت در مکش ماتریک ۱۰۰ هکتوپاسکال است (Raviv and Lieth, 2008).

برای تعیین  $E_{IAIR}$ ،  $E_{IEAW}$  و  $E_{IWBC}$  که به ترتیب انرژی انتگرالی AIR در دامنه مکش صفر تا ۱۰ هکتوپاسکال، انرژی انتگرالی EAW در دامنه مکش ۱۰ تا ۵۰ هکتوپاسکال و انرژی انتگرالی WBC در دامنه مکش ۵۰ تا ۱۰۰ هکتوپاسکال هستند، ابتدا گنجایش ویژه رطوبتی از رابطه (۶) محاسبه شد.

$$C(h) = (\theta_s - \theta_r)(n-1)h^{-1}(\alpha h)^n + [1 + (\alpha h)^n]^{\frac{1-2n}{n}} \quad (۶)$$

که در آن  $C(h)$  گنجایش ویژه رطوبتی (مشتق معادله ون-گنوختن) یعنی  $|d\theta/dh|$  بر حسب هکتوپاسکال است. بقیه پارامترهای معادله نیز در رابطه ۱ تعریف شده اند.

با ضرب نمودن  $C(h)$  در  $w_i(h)$  عبارت گنجایش ویژه رطوبتی موثر  $(E_i(h))$  از رابطه (۷) محاسبه شد.

$$E_i(h) = w_i(h)C(h) \quad (۷)$$

که در آن  $w_i(h)$  توابع وزن دهی ضربی هستند که برای انواع محدودیت های فیزیکی خاک محاسبه می شود. مقادیر  $w_i(h)$  که ممکن است به صورت خطی و یا غیر خطی با مکش ماتریک تغییر کند، زمانی که محدودیت کامل برای جذب آب وجود دارد صفر است و به طور مداوم به یک افزایش می یابد که در آن هیچ محدودیتی برای جذب آب وجود ندارد (Groenevel et al., ۲۰۰۸).

تیمار  $S_4L_2Z_1$  ( $0/02$ ) مشاهده می‌شود که فاقد اختلاف معنی دار با تیمار  $S_3L_3Z_2$  ( $0/02$ ) بود. درصد حجمی هوا پس از آبیاری در تیمارهای  $S_1L_0$ ،  $S_3L_0$  و  $S_4L_0$  در مقایسه با تیمار  $S_0$ ، ۳۵ درصد و تیمار  $S_2L_0$  نیز نسبت به شاهد ۲۳ درصد کاهش یافت. در خاک‌های  $S_1$  و  $S_2$  بیشترین درصد حجمی هوا پس از آبیاری به ترتیب در تیمارهای  $S_1L_0$  و  $S_2L_0$  مشاهده شد و افزودن بیوپار در مقادیر مختلف به آن‌ها منجر به کاهش شد. در خاک  $S_3$  و  $S_4$  بیشترین درصد حجمی هوا پس از آبیاری به ترتیب در تیمارهای  $S_3L_1Z_1$  و  $S_4L_1Z_1$  بود ولی تفاوت معنی‌دار با تیمارهای بدون کاربرد بیوپار در همان خاک نداشتند (شکل ۱). بنابراین کاربرد بیوپار منجر به کاهش درصد حجمی هوا پس از آبیاری در خاک‌های مورد مطالعه شده است و علت آن می‌تواند بهبود ساختار و افزایش تخلخل کل خاک که ناشی از ایجاد منافذ ریز بر اثر کاربرد بیوپار است، باشد زیرا عمدتاً این منافذ ریز با آب پر می‌شوند و منجر به کاهش AIR می‌گردند. نتایج این تحقیق با نتایج به دست آمده توسط Banitalebi et al. (2021) همخوانی دارد. آنها در پژوهش خود گزارش کردند که مقدار AIR بستر رشد خیار در کشت گلخانه‌ای با ترکیب بیوپار خاک اره، ورمیکولیت و زئولیت پس از آبیاری به دلیل افزایش شدید منافذ ریز کاهش یافت.

#### نتایج تغییرات EAW خاک پوششی در آزمایش

نتایج مقایسه میانگین EAW تیمارهای آزمایش در شکل ۲ آمده است. بیشترین مقدار EAW در تیمار  $S_1L_1Z_2$  ( $0/17$ ) و کمترین آن در تیمار  $S_3L_3Z_2$  ( $0/07$ ) مشاهده می‌شود. مقدار EAW در تیمارهای  $S_2L_0$ ،  $S_3L_0$  و  $S_4L_0$  نسبت به تیمار  $S_0$  تفاوت معنی‌داری ندارد. در خاک  $S_1$  کاربرد بیوپار مقدار EAW را در مقایسه با شاهد افزایش داد و در تیمار  $S_1L_1Z_2$  مقدار این صفت در مقایسه با شاهد ۳۰ درصد افزایش یافت. افزودن بیوپار به خاک  $S_2$  مقدار EAW را در مقایسه با شاهد در سطح ۵ و ۱۰ درصد بیوپار کاهش و در مقادیر ۱۵ درصد افزایش داد ولی این تغییرات معنی‌دار نبود. در خاک‌های  $S_3$  و  $S_4$  تغییر محسوسی در EAW با کاربرد بیوپار مشاهده نشد (شکل ۲). بنابراین نتایج نشان داد که کاربرد بیوپار در خاک‌های مختلف به جز تیمار  $S_1$  و نسبت به خاک پوششی تجاری تغییراتی را در مقدار آب سهل الوصول ایجاد نمی‌کند و مقدار EAW تمامی تیمارها در حد بهینه است. Jafari Haghighi (2024) حد بهینه آب سهل الوصول خاک پوششی زیر کشت قارچ دکمه‌ای را در دامنه  $0/13-0/04$  معرفی کردند

جدول ۲- ویژگی‌های بیوپار مورد استفاده در آزمایش

| P<br>(%) | P <sub>p</sub><br>(g. cm <sup>-3</sup> ) | P <sub>b</sub><br>(g. cm <sup>-3</sup> ) | OM<br>% | pH  | EC<br>(dS.m <sup>-1</sup> ) |
|----------|------------------------------------------|------------------------------------------|---------|-----|-----------------------------|
| ۵۶       | ۱/۱۸                                     | ۰/۶۶                                     | ۵۹/۷    | ۸/۱ | ۲/۱۰                        |

EC: قابلیت هدایت الکتریکی، OM: مقدار ماده آلی، P<sub>b</sub>: چگالی ظاهری، P<sub>p</sub>: چگالی حقیقی و P: تخلخل

pH، EC (در عصاره ۱ به ۵ بیوپار به آب) و چگالی ظاهری بیوپار مورد استفاده در این پژوهش به ترتیب دارای مقادیر ۸/۱، ۲/۱۰ دسی‌زیمنس بر متر و ۰/۶۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود که هیچ گونه محدودیتی برای افزودن آن به خاک پوششی وجود ندارد. (Zeid et al. (2011 بیشینه pH و EC خاک پوششی را به ترتیب ۹ و ۴ دسی‌زیمنس بر متر در عصاره ۱ به ۵ خاک به آب پیشنهاد کردند. Jafari Haghighi (2024) نیز حد بهینه چگالی ظاهری و تخلخل خاک پوششی را به ترتیب در محدوده  $0/78-0/55$  گرم بر سانتی‌متر مکعب و ۷۳-۶۴ درصد عنوان کردند.

#### میزان آب قابل دسترس توسط مفاهیم مختلف در خاک پوششی

نتایج آنالیز واریانس شاخص‌های نگهداشت آب و تهویه (درصد حجمی هوا پس از آبیاری، آب سهل الوصول، گنجایش آب بافری و گنجایش نگهداشت آب خاک) برای تیمارهای آزمایش در جدول ۳ آورده شده است. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر مقدار بیوپار و اثر متقابل آن در نوع خاک در سطح آماری ۱ درصد بر AIR خاک پوششی معنی‌دار است. سایر تیمارهای آزمایش اثر معنی‌داری بر AIR خاک پوششی ندارند. بر اساس نتایج به دست آمده از این جدول، اثر نوع خاک در سطح آماری ۱ درصد بر EAW خاک پوششی معنی‌دار است و دیگر تیمارهای آزمایش اثر معنی‌داری بر مقدار آب سهل الوصول در خاک پوششی ندارند. همچنین اثر مقدار بیوپار و اثر متقابل آن در نوع خاک و اندازه ذرات بیوپار در سطح آماری ۱ درصد و اثر متقابل مقدار بیوپار در اندازه ذرات بیوپار در سطح آماری ۵ درصد بر مقدار گنجایش آب بافری معنی‌دار است. اثر نوع خاک، مقدار بیوپار و اثرات متقابل آن‌ها در سطح آماری ۱ درصد بر گنجایش نگهداشت آب در خاک پوششی نیز معنی‌دار است.

#### نتایج تغییرات AIR در تیمارهای آزمایش

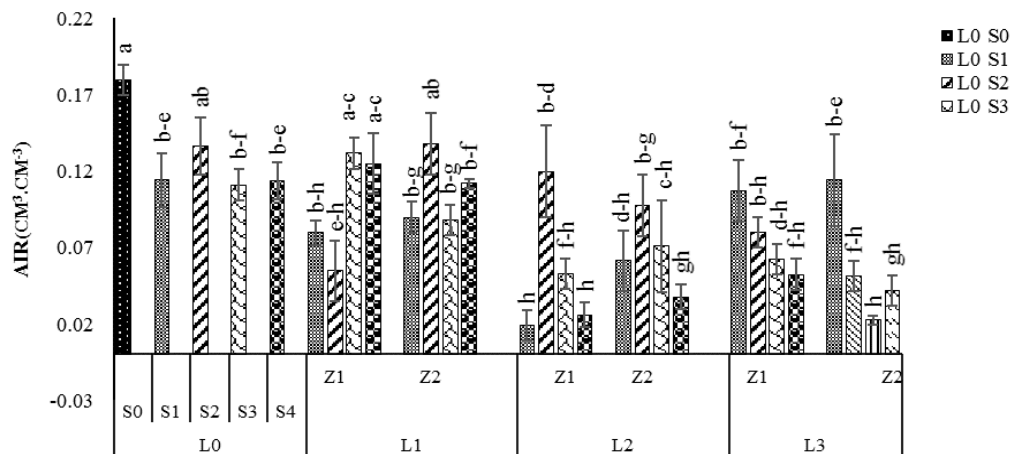
نتایج مقایسه میانگین AIR تیمارهای آزمایش در شکل ۱ آمده است. نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین درصد حجمی هوا پس از آبیاری در تیمار  $S_0$  ( $0/17$ ) و کمترین آن در

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس شاخص‌های نگهداشت آب و تهویه در تیمارهای آزمایش

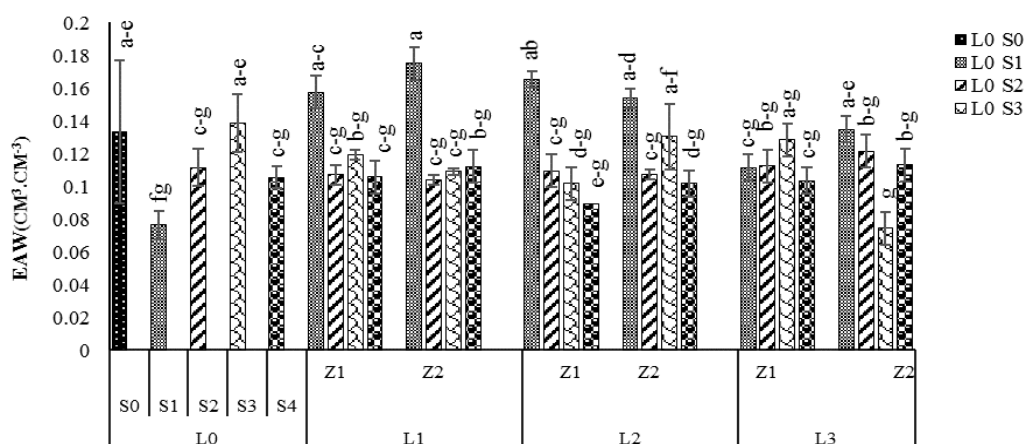
| منابع تغییرات                               | درجه آزادی | AIR<br>(cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> ) | EAW<br>(cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> ) | WBC<br>(cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> ) | WHC<br>(cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> ) |
|---------------------------------------------|------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| میانگین مربعات                              |            |                                             |                                             |                                             |                                             |
| نوع خاک                                     | ۳          | ۰/۰۰۲ ns                                    | ۰/۰۰۸ **                                    | ۰/۰۰۱ ns                                    | ۰/۰۱۸ **                                    |
| مقدار بیوپار                                | ۲          | ۰/۰۱۲ **                                    | ۰/۰۰۱ ns                                    | ۰/۰۰۲ **                                    | ۰/۰۰۸ **                                    |
| اندازه ذرات بیوپار                          | ۱          | ۰/۰۰۱ ns                                    | ۰/۰۰۱ ns                                    | ۰/۰۰۱ ns                                    | ۰/۰۰۷ ns                                    |
| نوع خاک × مقدار بیوپار                      | ۶          | ۰/۰۰۶ **                                    | ۰/۰۰۱ ns                                    | ۰/۰۰۱ **                                    | ۰/۰۰۷ **                                    |
| نوع خاک × اندازه ذرات بیوپار                | ۳          | ۰/۰۰۱ ns                                    | ۰/۰۰۱ ns                                    | ۰/۰۰۱ **                                    | ۰/۰۰۱ ns                                    |
| مقدار بیوپار × اندازه ذرات بیوپار           | ۲          | ۰/۰۰۲ ns                                    | ۰/۰۰۱ ns                                    | ۰/۰۰۱ *                                     | ۰/۰۰۴ ns                                    |
| نوع خاک × مقدار بیوپار × اندازه ذرات بیوپار | ۶          | ۰/۰۰۲ ns                                    | ۰/۰۰۱ ns                                    | ۰/۰۰۱ **                                    | ۰/۰۰۴ ns                                    |
| خطا                                         | ۴۸         | ۰/۰۰۱                                       | ۰/۰۰۱                                       | ۰/۰۰۱                                       | ۰/۰۰۳                                       |

ns: معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ (P<۰/۰۱)، \* معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ (P<۰/۰۵) و \*\* معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ (P<۰/۰۵)

AIR: درصد حجمی هوا پس از آبیاری، EAW: آب سهل الوصول، WBC: گنجایش آب بافری، WHC: گنجایش نگهداری آب



شکل ۱- مقایسه میانگین AIR خاک پوششی در تیمارهای آزمایش  
S: نوع خاک، L: مقدار بیوپار، Z: اندازه ذرات بیوپار، AIR: درصد حجمی هوا پس از آبیاری



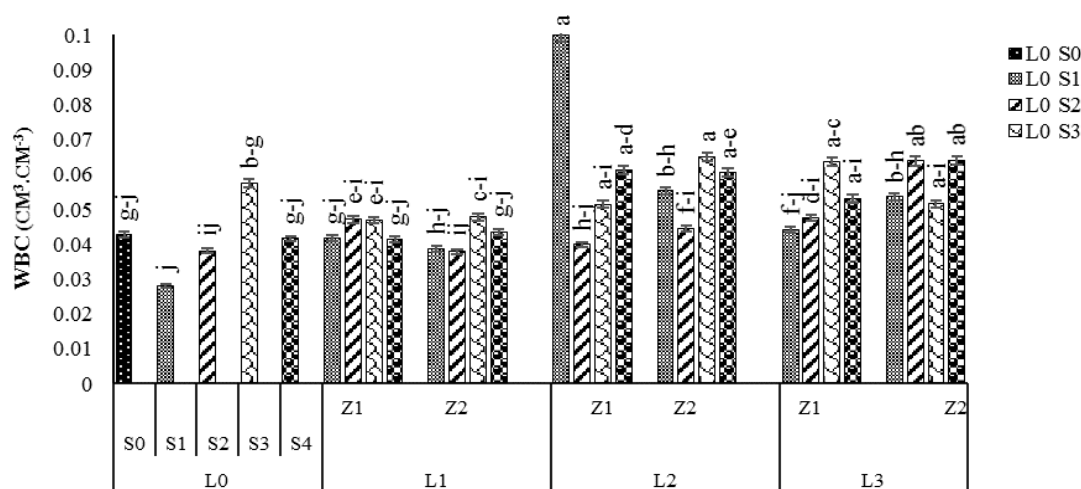
شکل ۲- مقایسه میانگین EAW خاک پوششی در تیمارهای آزمایش  
S: نوع خاک، L: مقدار بیوپار، Z: اندازه ذرات بیوپار، EAW: آب سهل الوصول



به خود اختصاص داد که در مقایسه با شاهد ۵۰ درصد افزایش داشت و در خاک  $S_3$  نیز تیمارهای  $S_3L_3Z_1$  و  $S_3L_2Z_2$  منجر به افزایش ۵۰ درصدی گنجایش آب بافری نسبت خاک پوششی تجاری شدند (شکل ۳). بر اساس نتایج این شکل، افزودن بیوجار به خاک پوششی منجر به افزایش WBC آب می‌شود و این افزایش می‌تواند منجر به افزایش نگهداشت آب در خاک پوششی شود. افزایش مقدار گنجایش بافری آب یک بستر، منجر به افزایش نگهداشت آب در خاک می‌گردد (Raviv and Lieth, 2008).

### نتایج تغییرات WBC خاک پوششی در تیمارهای آزمایش

نتایج مقایسه میانگین WBC تیمارهای آزمایش در شکل ۳ آمده است. نتایج مقایسه میانگین نشان داد تیمار  $S_1L_2Z_1$  (۰/۰۷۹) بیشترین تیمار  $S_1L_0$  (۰/۰۲) کمترین گنجایش آب بافری را به خود اختصاص دادند. در خاک  $S_1$  تیمار  $S_1L_2Z_1$  منجر به افزایش ۹۷ درصدی WBC نسبت به خاک پوششی تجاری شد. در خاک  $S_2$  تیمار  $S_2L_3Z_2$  بیشترین WBC را

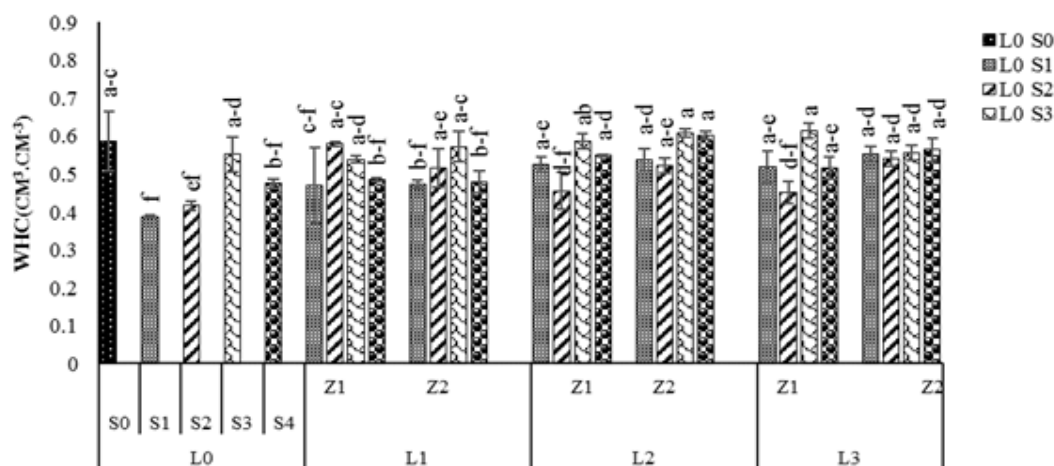


شکل ۳- مقایسه میانگین WBC خاک پوششی در تیمارهای آزمایش  
S: نوع خاک، L: مقدار بیوجار، Z: اندازه ذرات بیوجار، WBC: گنجایش آب بافری

کاهش پیدا کرد. در تمامی خاک‌های مورد مطالعه کاربرد بیوجار گنجایش نگهداری آب را افزایش داد و با افزایش مقادیر بیوجار مقدار افزایش گنجایش نگهداری آب محسوس‌تر بود (شکل ۴). نتایج این پژوهش با نتایج Norouzi et al. (2016) در مورد افزایش مقدار ضرایب رطوبتی WHC و FC با کاربرد بیوجار مطابقت دارد. Andrenelli et al. (2016) نتیجه گرفتند که کاربرد بیوجار باعث اصلاح شرایط ساختمانی و تخلخل کل خاک و ایجاد منافذ ریز شده به همین دلیل رطوبت در ضرایب WHC تغییر معنی‌داری پیدا می‌کند.

### نتایج تغییرات WHC خاک پوششی در آزمایش

نتایج مقایسه میانگین WHC تیمارهای آزمایش در نمودار شکل ۴ آمده است. نتایج مقایسه میانگین نشان داد گنجایش نگهداری آب در تیمار  $S_3L_3Z_1$  (۰/۶۱) در بالاترین سطح قرار داشت که البته فاقد اختلاف معنی‌دار با تیمار  $S_3L_2Z_2$  (۰/۶۰) و  $S_4L_2Z_2$  (۰/۶۰) بود. تیمار  $S_1L_0$  نیز کمترین (۰/۳۸) گنجایش نگهداری آب را به خود اختصاص داد. گنجایش نگهداری آب در تیمارهای  $S_1L_0$ ،  $S_2L_0$ ،  $S_3L_0$  و  $S_4L_0$  نسبت به تیمار  $S_0$  به ترتیب ۳۴، ۲۹، ۵ و ۱۹ درصد



شکل ۴- مقایسه میانگین WHC خاک پوششی در تیمارهای آزمایش  
S: نوع خاک، L: مقدار بیوپار، Z: اندازه ذرات بیوپار، WHC: گنجایش نگهداری آب

#### انرژی انتگرالی شاخص‌های نگهداشت آب و تهویه

نتایج آنالیز واریانس مقدار انرژی انتگرالی شاخص‌های نگهداشت آب و تهویه ( $E_{AIR}$ ،  $E_{EAW}$  و  $E_{IWC}$ ) در تیمارهای خاک‌های پوششی در جدول ۴ آمده است. نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر نوع خاک و مقدار بیوپار و اثر متقابل آن‌ها در سطح آماری ۱ درصد بر  $E_{AIR}$  معنی‌دار است. همچنین، اثر متقابل نوع خاک،

مقدار بیوپار و اندازه ذرات بیوپار نیز در سطح آماری ۵ درصد بر  $E_{AIR}$  معنی‌دار است. بر اساس نتایج به‌دست آمده از این جدول، اثر مقدار بیوپار در سطح آماری ۱ درصد بر  $E_{EAW}$  معنی‌دار است. اثر متقابل نوع خاک در مقدار بیوپار و مقدار بیوپار در اندازه ذرات بیوپار در سطح ۵ پنج درصد بر  $E_{EAW}$  معنی‌دار است. همچنین اثر نوع خاک و مقدار بیوپار و اثر متقابل آن‌ها در سطح آماری ۱ درصد بر  $E_{IWC}$  معنی‌دار است.

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس تغییرات انرژی انتگرالی شاخص‌های نگهداشت آب و تهویه در تیمارهای آزمایش

| منابع تغییرات                               | درجه آزادی | $E_{AIR}$<br>( $J \cdot kg^{-1}$ ) | $E_{EAW}$<br>( $J \cdot kg^{-1}$ ) | $E_{IWC}$<br>( $J \cdot kg^{-1}$ ) |
|---------------------------------------------|------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| میانگین مربعات                              |            |                                    |                                    |                                    |
| نوع خاک                                     | ۳          | ۰/۱۹۳**                            | ۰/۰۶۲ ns                           | ۰/۱۵۹**                            |
| مقدار بیوپار                                | ۲          | ۰/۱۶۵**                            | ۰/۴۵۱**                            | ۰/۰۵۷**                            |
| اندازه ذرات بیوپار                          | ۱          | ۰/۰۱۵ ns                           | ۰/۰۱۷ ns                           | ۰/۰۰۶ ns                           |
| نوع خاک × مقدار بیوپار                      | ۶          | ۰/۱۶۱**                            | ۰/۱۳۹*                             | ۰/۰۱۹**                            |
| نوع خاک × اندازه ذرات بیوپار                | ۳          | ۰/۰۳۸*                             | ۰/۱۰۲*                             | ۰/۰۰۳ ns                           |
| مقدار بیوپار × اندازه ذرات بیوپار           | ۲          | ۰/۰۶۸ ns                           | ۰/۱۴۱*                             | ۰/۰۰۴ ns                           |
| نوع خاک × مقدار بیوپار × اندازه ذرات بیوپار | ۶          | ۰/۰۵۷*                             | ۰/۰۵۶ ns                           | ۰/۰۰۷**                            |
| خطا                                         | ۴۸         | ۰/۰۲۰                              | ۰/۰۳۲                              | ۰/۰۰۲                              |

\*\* معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ ( $P < 0.01$ )، \* معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ( $P < 0.05$ )، ns: غیر معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ ( $P < 0.05$ )

$E_{AIR}$ : درصد حجمی هوا پس از آبیاری،  $E_{EAW}$ : آب سهل الوصول و  $E_{IWC}$ : گنجایش آب بافری

#### نتایج تغییرات شاخص‌های نگهداشت آب و تهویه در

##### تیمارهای آزمایش

نتایج مقایسه میانگین شاخص‌های نگهداشت آب و تهویه ( $E_{AIR}$ ،  $E_{EAW}$  و  $E_{IWC}$ ) تیمارهای آزمایش در جدول ۵ آمده است. نتایج نشان داد بیشترین انرژی انتگرالی درصد حجمی هوا پس از آبیاری در تیمار  $S_1L_2Z_1$  (۱/۴۰) ژول بر

کیلوگرم) و کمترین میزان آن در تیمار  $S_1L_0$  (۰/۴۲) ژول بر کیلوگرم) به‌دست آمد که فاقد اختلاف معنی‌دار با تیمار  $S_0$  (۰/۴۴) ژول بر کیلوگرم) بود. در هر چهار نوع خاک مورد مطالعه با افزایش مصرف بیوپار  $E_{AIR}$  پس از آبیاری افزایش پیدا کرد. در خاک  $S_1$  بیشترین انرژی انتگرالی درصد حجمی هوا پس از آبیاری در تیمار  $S_1L_2Z_1$  برابر ۱/۴۰ ژول بر کیلوگرم بود و نسبت به انرژی انتگرالی تیمار  $S_1L_0$  (۰/۴۲) ژول بر کیلوگرم)

بر کیلوگرم)، افزایش ۳۲/۲ درصدی نشان داد. انرژی انتگرالی آب سهل الوصول تیمار  $S_2L_3Z_2$  (۲/۸۴ ژول بر کیلوگرم) نسبت به تیمار  $S_2L_0$  (۲/۵۳ ژول بر کیلوگرم)، به میزان ۱۲ درصد افزایش نشان داد. بیشترین  $E_{IEAW}$  در خاک‌های  $S_3$  و  $S_4$  نیز در تیمارهای  $S_3L_3Z_2$  و  $S_4L_2Z_1$  (۳ ژول بر کیلوگرم)، مشاهده شد که در مقایسه با تیمارهای  $S_3L_0$  و  $S_4L_0$  به ترتیب ۱۴ و ۱۵ درصد افزایش یافت. تغییرات انرژی انتگرالی آب سهل الوصول ( $E_{IEAW}$ ) در میان خاک‌های پوششی مختلف و همچنین خاک پوششی تجاری کم است و قابلیت دسترسی به آب خاک برای گیاه در این محدوده تقریباً ثابت است. کاربرد بیوچار به خاک پوششی باعث افزایش مقدار این انرژی شده است ولی این افزایش معنی‌دار نبود. نتایج مطالعه Zangiabadi et al. (2017) نیز وجود همبستگی مثبت بین انرژی انتگرالی و کربن آلی در اثر افزودن بیوچار به خاک را تایید می‌کند که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد.

افزایش ۲۳۳ درصدی داشت. در خاک  $S_2$  نیز بیشترین مقدار انرژی انتگرالی درصد حجمی هوا پس از آبیاری در تیمار  $S_2L_3Z_2$  با میزان ۰/۷۲ ژول بر کیلوگرم به دست آمد که در مقایسه با انرژی انتگرالی تیمار  $S_2L_0$  (۰/۵ ژول بر کیلوگرم)، ۴۴ درصد افزایش نشان داد. در خاک‌های  $S_3$  و  $S_4$  نیز بیشترین  $E_{IAIR}$  به ترتیب در تیمارهای  $S_3L_3Z_2$  (۰/۷۵ ژول بر کیلوگرم) و  $S_4L_2Z_1$  (۰/۷۷ ژول بر کیلوگرم) مشاهده شد که در مقایسه با تیمارهای  $S_3L_0$  و  $S_4L_0$  به ترتیب ۳۶ و ۵۴ درصد افزایش یافت.

نتایج جدول ۵ نشان داد که انرژی انتگرالی آب سهل الوصول در هر چهار نوع خاک مورد مطالعه، با کاربرد بیوچار افزایش یافت. بیشترین  $E_{IEAW}$  در تیمار  $S_1L_2Z_1$  (۳/۳۷ ژول بر کیلوگرم) و کمترین آن در تیمار  $S_1L_1Z_2$  (۲/۴۲ ژول بر کیلوگرم) مشاهده شد. انرژی انتگرالی آب سهل الوصول در خاک  $S_1$  در تیمار  $S_1L_2Z_1$  نسبت به تیمار  $S_1L_0$  (۲/۵۵ ژول

جدول ۵- مقایسه میانگین انرژی انتگرالی شاخص‌های نگهداشت آب و تهویه در تیمارهای آزمایش

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.  
 $E_{IAIR}$ : درصد حجمی هوا پس از آبیاری،  $E_{IEAW}$ : آب سهل الوصول و  $E_{IWC}$ : گنجایش آب بافری

| تیمار        | $E_{IAIR}$<br>(j.kg <sup>-1</sup> ) | $E_{IEAW}$<br>(j.kg <sup>-1</sup> ) | $E_{IWC}$<br>(j.kg <sup>-1</sup> ) | تیمار       | $E_{IWC}$<br>(j.kg <sup>-1</sup> ) | $E_{IEAW}$<br>(j.kg <sup>-1</sup> ) | $E_{IAIR}$<br>(j.kg <sup>-1</sup> ) |
|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| $S_1L_0$     | ۰/۴۲ ± ۰/۰۷ g                       | ۲/۵۵ ± ۰/۰۶ e-g                     | ۷/۴۳ ± ۰/۰۲ d-f                    | $S_3L_0$    | ۰/۵۷ ± ۰/۰۵ c-g                    | ۲/۶۳ ± ۰/۰۳ c-g                     | ۷/۴۴ ± ۰/۰۳ c-f                     |
| $S_1L_1Z_1$  | ۰/۸۰ ± ۰/۰۶ b-d                     | ۲/۴۹ ± ۰/۰۱ fg                      | ۷/۲۴ ± ۰/۰۴ gh                     | $S_3L_1Z_1$ | ۰/۴۹ ± ۰/۰۱ c-g                    | ۲/۵۹ ± ۰/۰۰۵ c-g                    | ۷/۴۵ ± ۰/۰۱ c-f                     |
| $S_1L_1Z_2$  | ۰/۸۳ ± ۰/۰۶ bc                      | ۲/۴۲ ± ۰/۰۱ g                       | ۷/۱۹ ± ۰/۰۳ hi                     | $S_3L_1Z_2$ | ۰/۵۶ ± ۰/۰۴ c-g                    | ۲/۶۶ ± ۰/۰۳ c-g                     | ۷/۴۶ ± ۰/۰۰۵ c-f                    |
| $S_1L_2Z_1$  | ۱/۴۰ ± ۰/۳۱ a                       | ۳/۳۷ ± ۰/۴۴ a                       | ۷/۱۵ ± ۰/۰۷ i                      | $S_3L_2Z_1$ | ۰/۶۸ ± ۰/۰۱ b-g                    | ۲/۷۸ ± ۰/۰۳ b-f                     | ۷/۴۹ ± ۰/۰۱ b-f                     |
| $S_1L_2Z_2$  | ۰/۸۴ ± ۰/۰۹ b                       | ۲/۶۸ ± ۰/۰۱ c-g                     | ۷/۳۰ ± ۰/۰۲ g                      | $S_3L_2Z_2$ | ۰/۶۸ ± ۰/۰۴ b-g                    | ۲/۷۹ ± ۰/۰۹ b-f                     | ۷/۴۸ ± ۰/۰۲ b-f                     |
| $S_1L_3Z_1$  | ۰/۵۳ ± ۰/۰۱ d-g                     | ۲/۶۰ ± ۰/۰۱ c-g                     | ۷/۴۴ ± ۰/۰۱ c-f                    | $S_3L_3Z_1$ | ۰/۶۷ ± ۰/۰۶ b-g                    | ۲/۷۷ ± ۰/۰۲ b-f                     | ۷/۴۸ ± ۰/۰۰۸ b-f                    |
| $S_1L_3Z_2$  | ۰/۵۹ ± ۰/۰۹ b-g                     | ۲/۶۳ ± ۰/۰۴ c-g                     | ۷/۴۲ ± ۰/۰۱ d-f                    | $S_3L_3Z_2$ | ۰/۷۵ ± ۰/۰۱ b-e                    | ۳/۰۰ ± ۰/۰۵ b                       | ۷/۵۷ ± ۰/۰۲ a                       |
| $S_2L_0$     | ۰/۵۰ ± ۰/۰۶ c-g                     | ۲/۵۳ ± ۰/۰۲ e-g                     | ۷/۴۰ ± ۰/۰۲ f                      | $S_4L_0$    | ۰/۵۰ ± ۰/۰۲ e-g                    | ۲/۶ ± ۰/۰۰۸ c-g                     | ۷/۴۵ ± ۰/۰۰۳ d-g                    |
| $S_2L_1Z_1$  | ۰/۷۲ ± ۰/۰۹ b-f                     | ۲/۷۴ ± ۰/۰۷ b-g                     | ۷/۴۱ ± ۰/۰۲ ef                     | $S_4L_1Z_1$ | ۰/۴۸ ± ۰/۰۲ c-g                    | ۲/۵۸ ± ۰/۰۱ c-g                     | ۷/۴۵ ± ۰/۰۰۵ d-g                    |
| $S_2L_1Z_2$  | ۰/۴۷ ± ۰/۰۴ fg                      | ۲/۵۵ ± ۰/۰۳ e-g                     | ۷/۴۲ ± ۰/۰۱ d-f                    | $S_4L_1Z_2$ | ۰/۵۲ ± ۰/۰۲ d-g                    | ۲/۵۸ ± ۰/۰۲ c-g                     | ۷/۴۳ ± ۰/۰۱ d-g                     |
| $S_2L_2Z_1$  | ۰/۵۳ ± ۰/۰۶ d-g                     | ۲/۵۶ ± ۰/۰۱ d-g                     | ۷/۴۱ ± ۰/۰۱ ef                     | $S_4L_2Z_1$ | ۰/۷۷ ± ۰/۰۲ b-d                    | ۳/۰۰ ± ۰/۰۷ b                       | ۷/۵۶ ± ۰/۰۱ a-b                     |
| $S_2L_2Z_2$  | ۰/۵۶ ± ۰/۰۸ c-g                     | ۲/۶۴ ± ۰/۰۴ c-g                     | ۷/۴۴ ± ۰/۰۱ c-f                    | $S_4L_2Z_2$ | ۰/۷۲ ± ۰/۰۲ b-f                    | ۲/۹۰ ± ۰/۰۵ b-c                     | ۷/۵۲ ± ۰/۰۳ a-c                     |
| $S_2L_3Z_1$  | ۰/۶۱ ± ۰/۰۲ b-g                     | ۲/۶۶ ± ۰/۰۲ c-g                     | ۷/۴۵ ± ۰/۰۰۵ c-f                   | $S_4L_3Z_1$ | ۰/۶۷ ± ۰/۰۴ b-g                    | ۲/۷۹ ± ۰/۰۸ b-f                     | ۷/۴۹ ± ۰/۰۲ b-f                     |
| $S_2L_3Z_2$  | ۰/۷۲ ± ۰/۰۳ b-f                     | ۲/۸۴ ± ۰/۰۸ b-e                     | ۷/۴۸ ± ۰/۰۲ b-f                    | $S_4L_3Z_2$ | ۰/۷۳ ± ۰/۰۱ b-f                    | ۲/۸۸ ± ۰/۰۵ b-d                     | ۷/۵۰ ± ۰/۰۲ a-e                     |
| $S_0$ (شاهد) | ۰/۴۴ ± ۰/۰۷ g                       | ۲/۵۲ ± ۰/۰۴ e-g                     | ۷/۴۰ ± ۰/۰۵ ef                     |             |                                    |                                     |                                     |

تجاری) داشت. کاربرد بیوچار در سطوح ۵ و ۱۰ درصد وزنی در خاک  $S_1$ ، باعث افزایش معنی‌دار انرژی انتگرالی گنجایش آب بافری شد.

افزودن بیوچار در خاک‌های  $S_2$  و  $S_3$  به استثنای تیمار  $S_3L_3Z_2$ ، منجر به افزایش  $E_{IWC}$  شد ولی این افزایش معنی‌دار

نتایج مقایسه میانگین نشان داد بیشترین  $E_{IWC}$  در تیمار  $S_3L_3Z_1$  (۷/۵۷ ژول بر کیلوگرم) که نسبت به تیمار  $S_0$  (۷/۴۰ ژول بر کیلوگرم) ۲/۲۹ درصد افزایش داشت و کمترین مقدار این انرژی در تیمار  $S_1L_2Z_1$  (۷/۱۵ ژول بر کیلوگرم) بود که ۳/۳۷ کاهش درصدی نسبت به تیمار  $S_0$  (خاک پوششی

### تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت دانشگاه شهرکرد و همکاری شرکت کشت و صنعت نگین فصل چهارمجال و بختیاری انجام شد. بدین وسیله از مساعدت دانشگاه شهرکرد و مدیریت و کارکنان شرکت نگین فصل کمال تشکر و قدردانی می‌شود.

### تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ گونه تضاد منفعی وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

### دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

### مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان به‌صورت زیر است:  
نویسنده اول: جمع‌آوری و تحلیل اولیه داده‌ها یا انجام مراحل آزمایشگاهی، مزرعه و گلخانه‌ای  
نویسنده دوم: تحلیل داده‌ها، راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله  
نویسنده سوم: تحلیل داده‌ها، راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله  
نویسنده چهارم: انجام تحلیل آماری، بازبینی متن مقاله

### اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آنها می‌باشد.

### منابع

1. Aiduang, W., Jatuwong, K., Jawana, R., Xayyavong, O. and Lumyong, S., 2025. Spent Mushroom Substrate-Derived Biochar and Its Applications in Modern Agricultural Systems: An Extensive Overview. *Life*, 15(2), pp. 317-325. <https://doi.org/10.3390/life15020317>
2. Ajayi, A.E., Holthusen, D. and Horn, R., 2016. Changes in microstructural behaviour and hydraulic functions of biochar amended soils. *Soil Tillage Research*, 155(2), pp. 166-175. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.08.007>
3. Andrenelli, M. C., Pellegrini, S., Vaccari, F. P. and Vignozzi, N., 2016. Field application of pelletized biochar: Short term effect on the hydrological properties of a silty clay loam soil. *Agricultural Water Management*, 163(1), pp. 190-196. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.017>
4. Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A., Nosrati, A. and Dexter, A.R., 2011. Integral energy of conventional available water, least

نبود. افزودن بیوپچار در خاک S<sub>4</sub> نیز باعث افزایش انرژی انتگرالی گنجایش آب بافری شده است ولی تنها در سطح ۱۰ درصد وزنی این افزایش معنی‌دار بود. مقدار انرژی لازم برای جذب آب در دامنه رطوبتی بین مکش ۵۰ تا ۱۰۰ هکتوپاسکال در میان خاک‌های پوششی متفاوت و همچنین خاک پوششی تجاری تقریباً یکسان است و تفاوت معنی‌داری میان انرژی این خاک‌ها نیست اما کاربرد بیوپچار در این خاک‌ها به جز خاک S<sub>1</sub> منجر به افزایش EI<sub>WBC</sub> شده است ولی این افزایش معنی‌دار نبود. نتایج مطالعات گذشته نیز نشان داده است که با سنگین شدن بافت و افزودن ترکیبات حاوی کربن آلی به خاک، سطح ویژه بیشتر و برداشت آب از آن سخت‌تر می‌شود (Barati et al., 2016).

### نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد کاربرد بیوپچار منجر به کاهش درصد حجمی هوا پس از آبیاری در خاک‌های مورد مطالعه شده است و علت آن می‌تواند بهبود ساختار و افزایش تخلخل کل خاک که ناشی از ایجاد منافذ ریز بر اثر کاربرد بیوپچار است، باشد زیرا بیشتر این منافذ ریز با آب پر می‌شوند و منجر به کاهش درصد حجمی هوا پس از آبیاری می‌شود. افزودن بیوپچار در خاک‌های مختلف به جز تیمار S<sub>1</sub> و نسبت به خاک پوششی تجاری تغییراتی را در مقدار آب سهل الوصول ایجاد نمی‌کند و مقدار آب سهل الوصول تمامی تیمارها در حد بهینه ۰/۱۳ تا ۰/۰۴ است ولی مقدار گنجایش بافری آب را افزایش داد که این افزایش منجر به افزایش نگهداشت آب در تمام خاک پوششی شد. تغییرات انرژی انتگرالی نیز در هر سه دامنه رطوبتی (رطوبت اشباع تا رطوبت در مکش ماتریک ۱۰ هکتوپاسکال، رطوبت در مکش ماتریک ۱۰ تا ۵۰ هکتوپاسکال و رطوبت در مکش ماتریک ۵۰ تا ۱۰۰ هکتوپاسکال) در میان خاک‌های پوششی مختلف و همچنین خاک پوششی تجاری و مرسوم کم و قابلیت دسترسی به آب خاک برای گیاه در این دامنه‌های رطوبتی در خاک‌های پوششی مختلف تقریباً ثابت و بدون تغییرات بود. بنابراین استفاده از بیوپچار به‌عنوان جایگزین درصدی از خاک پوششی تغییر قابل توجه و چشم‌گیری در قابلیت دسترسی آب خاک نسبت به خاک پوششی تجاری و مرسوم ایجاد نمی‌کند.

13. Rabiei, H., Arbitration, M., Moghimi Nejad, S. and Armaghan, F., 2013. Biharkhari Material in Sustainable Agriculture. National Conference on Agricultural Science and Technology, Malayer, Iran, pp. 753-760. [In Persian].
14. Raviv, M. and Lieth, J.H., 2008. Soilless Culture: Theory and Practice. 1 ed. *Elsevier*, 624 P.
15. Reynolds, W.D. and Clarke Topp, G., 2009. Soil water desorption and imbibition: tension and pressure techniques. In: Carter M.R., and Gregorich E.G. (ed.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. 2nd ed. Canadian Society of Soil Science. *Taylor and Francis*, pp. 981-997.
16. Shi, H., Chen, F. and Wang, H., 2011. Using the energy integral of soil water retention curve to evaluate the soil water availability. *IEEE*, 37(2), pp.1632-1635.  
<https://doi.org/10.1109/ISWREP.2011.5893351>
17. Soltani, A., 2011. Application of statistical software in statistical analyses. Second edition. *Mashhad: Mashhad University Jihad Publications*, 265 p. [In Persian].
18. Talwar, P., Kovalev, A.A., Litt, Y.V., Masakapalli, S.K. and Vivekanand, V., 2024. Utilization of agricultural residues for energy and resource recovery towards a sustainable environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(46), pp. 57354-57368.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-023-29500-x>
19. Zangiabadi, M., Gorji, M., Shorafa, M., Keshavarz, P. and Saadat, S., 2017. The relationship between integral energy (EI) of different soil moisture ranges and S-index in medium to coarse-textured soils. *Journal of Water and Soil*, 31(2), pp. 386-398. [In Persian]. <https://doi.org/10.22067/jsw.v31i2.53472>
20. Zeid, D.C., Pardo-Gonzales, J.E., Minhoni, M.T.A. and Pardo-Gimenez, A., 2011. A reliable quality index for mushroom cultivation. *Journal of Agricultural Science*, 3(1), pp. 50-61.  
<https://doi.org/10.5539/jas.v3n4p50>
- limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality. *Geoderma*, 166(2), pp. 34-42.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.06.009>
5. Banitalebi, G., Mosaddeghi, M.R. and Shariatmadari, H., 2021. Evaluation of physico-chemical properties of biochar-based mixtures for soilless growth media. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23(8), pp. 950-964.  
<https://doi.org/10.1007/s10163-021-01181-z>
6. Barati, S., Vahabi, M. R., Mosaddeghi, M. R. and Bassiri, M., 2016. Plant available water and integral energy for *Medicago sativa* and *Bromus tomentellus* in texturally different soils. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62(1), pp. 69-91.  
<https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1037295>
7. Groenevel, P.H., Grant C.D. and Semetsa, S., 2001. A new procedure to determine soil water availability. *Australian Journal of Soil Research*, 39(2), pp.577-598.  
<https://doi.org/10.1071/SR99084>
8. Hu, W., Di, O., Liang, T., Liu, J. and Zhang, J., 2022. Biochar on growth of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*). *Environmental Technology and Innovation*, 6(2), pp. 140-153.  
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.10272>
9. Jafari Haghighi, M., 2024. Industrial production and soil evaluation according to the different concepts of water usable soil for button mushroom breeding. PhD thesis. Faculty of Agriculture. Shahrekord University. Iran. [In Persian].
10. Kirkham, M.B., 2005. Principles of soil and plant water relations. *Elsevier Academic Press*, 500 p.
11. Minasny, B. and McBratney, A.B., 2003. Integral energy as a measure of soil-water availability. *Plant Soil*, 249(8), pp. 253-262.  
[DOI:10.1023/A:1022825732324](https://doi.org/10.1023/A:1022825732324)
12. Norouzi, M., Tabatabaei, S.H., Nouri, M.R. and the compass, H.R., 2016. The short-term effects of the leaf of the palm Keep moisture in the sandy soil. *Water and Soil Protection Journal*, 6 (2), pp. 150-137. [In Persian]. <https://sid.ir/paper/232096/fa>