



The effect of biochar application along with potassium fertilizer on soil K status, rice yield and yield components in two K-depleted paddy soils

Zohreh Nouri Amirkolaei¹ | Bahi Jalili² | Fardin Sadegh-Zadeh³

1. Department of Soil Science, Faculty of Crop Science, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: Znooriamiri69@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Crop Science, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: bahi_jalilis@yahoo.com

3. Department of Soil Science, Faculty of Crop Science, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: fardin.upm@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: June. 1, 2025

Revised: Aug. 15, 2025

Accepted: Aug. 25, 2025

Published online: Nov. 2025

Keywords:

**Biochar,
Paddy soil,
Plant nutrition,
Potassium,
Rice.**

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the effect of combining normal and acidic rice straw biochars with potassium fertilizer on the potassium status, yield, and yield components of rice in two potassium-depleted paddy soils. This experiment was conducted using a completely randomized design as a factorial with two factors: biochar levels (at three levels of 0 (B0), 1 percent normal biochar (NB1) and 1 percent acidic biochar (AB1)) and potassium fertilizer levels (at five levels of 0, 25%, 50%, 75%, and 100% of the fertilizer recommendation) in three replications, resulting in a total of 15 treatments across two paddy soils with different textures under Shirodi rice cultivation. The results showed that the addition of normal and acidic biochars (NB1 and AB1), along with varying amounts of potassium fertilizer (K0, K25, K50, K75, and K100), increased the potassium content, yield, and yield components of rice. Therefore, the NB1K50 treatment had the greatest ability to enhance the potassium concentration in biomass and rice grain in both clay loam and sandy loam soils. The NB1K50 treatment also achieved the highest plant height and 1,000-seed weight in both soils. The highest plant biomass yield was obtained with the application of AB1K100, and the highest rice grain yield resulted from the application of NB1K100 in clay loam and sandy loam soils. Overall, it seems that the combined application of biochar and potassium fertilizer has increased the potassium content in different parts of the rice plant and has enhanced plant growth and yield. Biochar contains a substantial amount of activated potassium that can serve as a soil amendment agent to provide potassium to crops in the short term.

Cite this article: Nouri amirkolaei, Z., Jalili, B., & Sadegh-zadeh, F. (2025). The impact of biochar application on soil potassium dynamics, rice yield and yield components in two K-depleted paddy soils., *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (9),2541-2564. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.396517.669954>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.396517.669954>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction:

Rice (*Oryza sativa* L.) is the second most important crop after wheat and plays a significant role in feeding the world's population. This cash crop is cultivated in Iran mainly in the two provinces of Mazandaran and Gilan under flooded conditions. Potassium is one of the essential elements for rice, which plays a significant role in increasing the yield and quality of the crop and its deficiency reduces crop production. Recently, the use of biochar has become popular due to its economic and environmental benefits as an organic source for soil fertility management and plant nutrition. High amounts of potassium in plant residues and the biochar obtained from them can have a significant impact on the potassium status in the soil.

Objective:

This study was conducted to determine the effect of the combined application of normal and acidic rice straw biochars and potassium fertilizer on the potassium status, yield, and yield components of rice in two potassium-depleted paddy soils.

Materials and Methods:

An experiment was conducted in a completely randomized design as a factorial with two factors: biochar levels (at three levels of 0 (B0), 1 percent normal biochar (NB1) and 1 percent acidic biochar (AB1)) and potassium fertilizer levels (at five levels of 0, 25%, 50%, 75%, and 100% of the fertilizer recommendation) in three replications and with a total of 15 treatments in two paddy soils with different textures under Shirodi rice cultivation. At the end of the cultivation period and after harvesting the plant shoots, yield, yield components, biomass and grain potassium concentration, rice response, as well as the amount of exchangeable and non-exchangeable potassium forms and total soil potassium were also determined.

Results:

The results showed that the addition of normal and acidic biochars (NB1 and AB1) along with different amounts of potassium fertilizer (K0, K25, K50, K75, and K100) increased the potassium content, yield, and yield components of rice. Therefore, the NB₁K₅₀ treatment had the greatest ability to increase the potassium concentration of biomass and rice grain. This treatment was able to increase the potassium concentration of biomass in two clay loam and sandy loam soils by 3 and 5 times compared to the control, respectively. It also increased the potassium concentration of rice grain by 46.6 and 54.2 percent compared to the control in two clay loam and sandy loam soils, respectively. The NB₁K₅₀ treatment had the highest plant height and 1000-seed weight in both soils. This treatment increased the height and 1000-seed weight of the plant in clay loam soil by 17.4 and 36.9 percent, respectively, and in sandy loam soil by 22.7 and 37.2 percent, respectively, compared to the control. The highest plant biomass yield was obtained with the application of AB₁K₁₀₀, which was able to increase the plant biomass yield in clay loam and sandy loam soils by 81 and 83 percent, respectively, compared to the control. The highest rice grain yield was obtained with the application of NB₁K₁₀₀, which increased the rice grain yield in clay loam and sandy loam soils by 2.2 times compared to the control.

Conclusion:

Overall, it seems that the combined application of biochar and potassium fertilizer has increased the potassium content in different parts of the rice plant and also increased plant growth and yield. On the other hand, the use of biochar alone has also been successful in increasing the potassium content and yield and yield components of rice. In general, biochar contains a large amount of activated potassium that can be used as a soil amendment agent to provide potassium to crops in the short term and have a favorable effect on plant growth and yield.

Authors' Contributions:

Behi Jalili proposed the presented idea. Developed the theory validated the analytical methods and performed the calculations. Zohreh Nouri Amirkolaei experimented, collected the data and performed the calculations in the software. Fardin Sadeghzadeh reviewed, monitored, and confirmed the findings of this work. All authors discussed the results and contributed to the final version of the article. All authors have read and agreed with the published version of the article.

Statement of Data Availability

Data will be available upon request from the authors.

Acknowledgments

The authors consider it necessary to thank and acknowledge all participants in the present study.

Ethical considerations

The authors avoided data falsification, distortion, plagiarism, infringement, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

تأثیر کاربرد توأمان بیوچار و کود پتاسیمی بر وضعیت پتاسیم، عملکرد و برخی اجزای عملکرد برنج در دو خاک شالیزاری تخلیه شده از پتاسیم

زهره نوری امیرکلایی^۱ | بهی جلیلی^۲ | فردین صادق زاده^۳

۱. گروه علوم خاک، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: Znooriamiri69@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم خاک، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه:

bahi_jalilis@yahoo.com

۳. گروه علوم خاک، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: fardin.upm@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۳/۱۱	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۵/۲۴	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۳	
تاریخ انتشار: آذر ۱۴۰۴	
واژه‌های کلیدی: برنج، بیوچار، پتاسیم، تغذیه، خاک شالیزاری	هدف مطالعه حاضر تعیین تأثیر کاربرد توأمان بیوچار نرمال و اسیدی کاه و کلش برنج و کود پتاسیمی بر وضعیت پتاسیم، عملکرد و اجزای عملکرد برنج در دو خاک شالیزاری تخلیه پتاسیم شده، در نظر گرفته شد. این آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی به صورت فاکتوریل با دو فاکتور سطوح بیوچار (در سه سطح ۰ (B0) و ۱ درصد بیوچار نرمال (NB1) و ۱ درصد بیوچار اسیدی (AB1)) و سطوح کود پتاسیمی (در پنج سطح ۰، ۲۵، ۵۰ درصد، ۷۵ درصد و ۱۰۰ درصد توصیه کودی) در سه تکرار و با مجموعاً ۱۵ تیمار در دو خاک شالیزاری با بافت مختلف تحت کشت برنج رقم شیرودی انجام شد. نتایج نشان داد که با افزودن بیوچارهای نرمال و اسیدی (NB1 و AB1) به همراه مقادیر مختلف کود پتاسیمی (K0، K25، K50، K75، K100)، محتوای پتاسیم، عملکرد و اجزای عملکرد برنج افزایش یافت. به طوری که تیمار NB1K50 بیشترین توانایی را در افزایش غلظت پتاسیم زیست توده و دانه برنج در دو خاک لوم رسی و لوم شنی داشت. تیمار NB1K50 در هر دو خاک دارای بیشترین ارتفاع و وزن هزار دانه گیاه نیز بود. بیشترین میزان عملکرد زیست توده گیاه متعلق به کاربرد AB1K100 و بیشترین میزان عملکرد دانه برنج مربوط به کاربرد NB1K100 در دو خاک لوم رسی و لوم شنی است. بنابراین بر اساس یافته‌های این تحقیق، کاربرد توأمان بیوچار و کود پتاسیمی موجب افزایش محتوای پتاسیم در اندام‌های مختلف گیاه برنج و افزایش رشد و عملکرد گیاه شده است. بیوچار، حاوی مقدار زیادی پتاسیم فعال شده است که می‌تواند به عنوان یک عامل اصلاح کننده خاک در جهت تأمین پتاسیم برای محصولات در کوتاه مدت استفاده شود.
استناد: نوری امیرکلایی، زهره؛ جلیلی، بهی؛ و صادق زاده، فردین (۱۴۰۴). تأثیر کاربرد بیوچار بر وضعیت پتاسیم، عملکرد و برخی اجزای عملکرد برنج در دو خاک شالیزاری تخلیه پتاسیم شده، <i>مجله تحقیقات آب و خاک ایران</i> ، ۵۶ (۹)، ۲۵۴۱-۲۵۶۴. https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.396517.669954	
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.	© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.396517.669954	



مقدمه

پتاسیم از جمله عناصر غذایی ضروری است که در بهبود کیفیت محصولات کشاورزی جایگاه ویژه‌ای دارد و از آن به‌عنوان عنصر کیفیت نام برده می‌شود (ملکوتی و همکاران، ۱۳۹۵). پتاسیم به طور معمول به چهار شکل؛ پتاسیم محلول در آب، پتاسیم قابل تبادل، پتاسیم غیر قابل تبادل، و پتاسیم ساختمانی در خاک وجود دارد (Li et al., 2014). گیاه پتاسیم مورد نیاز خود را به‌شکل کاتیون پتاسیم (K^+) از محلول خاک جذب می‌کند (ملکوتی و همایی، ۱۳۸۳) و فراهمی مداوم پتاسیم برای گیاه اهمیت زیادی دارد (Bagyalakshmi et al., 2012) فراهمی پتاسیم برای گیاهان از طریق فرایندهای فیزیکی و شیمیایی مختلف در خاک کنترل می‌شود که تثبیت پتاسیم یکی از مهم‌ترین آن‌هاست (Golestanifard et al., 2020).

البته تعادل بین شکل‌های مختلف پتاسیم در خاک قابل برگشت است (Bertsch and Grant., 1985) به‌طوری‌که پتاسیم محلول از طریق شکل‌های تبدلی و غیر قابل تبادل یا با افزودن کودها مجدداً احیا می‌شود (Simard et al., 1992). ولی کشت‌های فشرده یا استفاده از ارقام پر محصول می‌تواند منجر به تخلیه پتاسیم قابل تبادل و غیر قابل تبادل شود. افزودن پتاسیم به خاک‌های تخلیه-پتاسیم شده منتج به ورود یون‌های پتاسیم از محلول خاک به حفرات دی‌تری‌گونا و تثبیت آن‌ها می‌شود (Portela et al., 2019). و این فرایند متعاقباً کارایی کودهای پتاسیمی را در خاک‌های مذکور کاهش می‌دهد (Tan et al., 2017). به‌طور عمده کانی‌های رسی ۲:۱ مانند ایلایت‌ها، ورمیکولایت‌ها، مونموریلونایت‌ها و اسمکتایت‌ها مسئول تثبیت پتاسیم در خاک‌ها هستند (Simmonsson et al., 2009; Jalali and Kolahci, 2007). در خاک‌هایی که حاوی مقادیر زیادی رس‌های ۲:۱ هستند و به‌ویژه در حضور کانی ایلایت، تثبیت پتاسیم به حداکثر مقدار می‌رسد (Havlin et al., 1991). در ایلایت محل‌های تبدلی با گزینش‌پذیری متفاوت نسبت به یون‌های پتاسیم وجود دارد. در این کانی، هوازگی از لبه‌ها به سمت داخل است؛ بنابراین یک فضای گوه‌ای شکل حدواسط بین لایه‌های غیرمنبسط‌شونده و منبسط‌شونده، به نام ساختگاه لبه شکسته (frayed edge site) تشکیل می‌گردد (Sawhney, 1972; Nakao et al., 2008). لبه‌های شکسته نسبت به جذب پتاسیم گزینش‌پذیری بالایی دارند و به جهت شعاع هیدراته یون‌های پتاسیم، ورود آن‌ها به این فضا تسهیل می‌گردد. از طرفی شرایط غرقاب نیز سبب فرسوده شدن این فضای بین لایه‌ای و افزایش میزان ساختگاه لبه شکسته می‌شود. بدین ترتیب در خاک‌های ایلایتی تحت شرایط غرقاب ظرفیت تثبیت پتاسیم افزایش می‌یابد. همچنین شرایط غرقاب با فراهم آوردن امکان احیا Fe^{3+} به Fe^{2+} و افزایش بار منفی کانی‌های رسی، تثبیت پتاسیم را افزایش می‌دهد (Golestanifard et al., 2020). در خاک‌های شالیزاری شمال ایران، به‌دلیل زیاد بودن کانی‌های ۲:۱ مانند ایلایت، میزان تثبیت پتاسیم بالاست. بنابراین با افزودن کود پتاسیمی به خاک، بخش زیادی از پتاسیم تثبیت شده و در نتیجه گیاه به کود پتاسیم پاسخ نمی‌دهد (Golestanifard et al., 2008). طی سه دهه اخیر، به دنبال معرفی ارقام پرمحصول برنج همراه با استفاده از کودهای شیمیایی نامتعادل، کمبود پتاسیم در خاک‌های شالیزاری به یک عامل محدودکننده فزاینده برای عملکرد برنج در استان‌های شمالی ایران تبدیل شده است (Golestanifard et al., 2020).

برنج (*Oryza sativa* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات غلات در کشورهای در حال توسعه به‌شمار می‌رود و با چشم انداز افزایش ۲۵ درصدی مصرف برنج تا سال ۲۰۳۰، وظیفه تغذیه بیش از ۴ میلیارد نفر در جهان را بر عهده دارد (موسسه تحقیقات بین المللی برنج، IRRI، 2019). برنج در منطقه‌ای به وسعت ۱۶۱ میلیون هکتار در سرتاسر جهان (USDA, 2020)، عمدتاً به صورت غرقاب کشت می‌شود و قادر است محیط ریزوسفر خود را اکسید نماید (پور صالح، ۱۳۷۳). برنج شیروودی در گروه ارقام میان رس و پرمحصول برنج قرار می‌گیرد که در شمال کشور کشت می‌شود. این نوع برنج نسبت به سایر ارقام میان‌رس و دیررس برنج، از لحاظ عملکرد و جذب عناصر غذایی توانایی بالاتری دارد. متوسط عملکرد این محصول در هر هکتار حدود ۷ تن شلتوک می‌باشد (موسوی و همکاران، ۱۳۸۹).

با در نظر گرفتن ملاحظات فوق، چالش اصلی، توسعه شیوه‌های نوین مدیریت پتاسیم است که قادر به رفع تناقض بین عملکرد مطلوب محصول و شیوه‌های کوددهی پایدار باشند و از کاهش منابع پتاسیم خاک (به‌عنوان یک منبع طبیعی محدودکننده) جلوگیری کنند. علاوه بر این، ایجاد مدیریت یکپارچه عناصر غذایی برای حفظ بهره‌وری محصول و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی از طریق بازیافت و استفاده مجدد از پتاسیم (و سایر عناصر غذایی) از زیست‌توده ضایعات، می‌تواند بخش عمده‌ای از یک استراتژی اقتصاد زیستی باشد (Bilias et al., 2023). در سال‌های اخیر برای غلبه بر برخی از این مشکلات، مطالعات متعددی در مورد استفاده از بیوجار و کاربرد آن در خاک انجام شده است. بیوجار به‌عنوان یک اصلاح‌کننده خاک، از پیرولیز مواد آلی مبتنی بر کربن در دمای بالا تحت شرایط بدون اکسیژن یا دارای اکسیژن محدود تولید می‌شود (Wu et al., 2019). بسته به نوع زیست توده و شرایط پیرولیز، بیوجارها از نظر ترکیب عنصری، گروه‌های

عاملی سطحی و سایر خصوصیات فیزیکوشیمیایی بسیار متنوع هستند (Bilias et al., 2023). به عنوان مثال در طول فرایند پیرولیز، فسفر از دست نمی رود ولی با افزایش دمای پیرولیز فراهمی آن برای گیاه کاهش می یابد؛ و یا با افزایش دمای پیرولیز، پتاسیم قابل تبادل نسبت به پتاسیم محلول در آب افزایش می یابد (Silber et al., 2010). بعلاوه، با افزایش دمای پیرولیز گروه های عاملی اسیدی حذف و بیوچار قلیایی می شود (Ippolito et al., 2016). به هر حال، بیوچار به صورت مستقیم یا غیرمستقیم باعث افزایش رشد و عملکرد گیاه می شود. اثر مستقیم به دلیل محتوای عناصر غذایی آن است و اثر غیر مستقیم ناشی از بهبود نگه داشتن عناصر غذایی، بهبود pH خاک، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، بهبود خصوصیات فیزیکی خاک، تغییر فعالیت میکروبی و افزایش مقاومت در برابر بیماری های گیاهی است (Silber et al., 2010). کاه و کلش برنج از جمله ضایعاتی است که غالباً به عنوان زیست توده بیوچار استفاده می شود (Bilias et al., 2023) و حاوی مقادیر قابل توجهی پتاسیم است (Zhao et al., 2015). بیوچار با مقدار پتاسیم نسبتاً بالا (حدود ۴ تا ۹۱ گرم بر کیلوگرم)، می تواند مکمل مناسبی برای کود پتاسیم در خاک باشد (Wu et al., 2019). معدود تحقیقات انجام شده در زمینه تأثیر کاربرد بیوچار بر فراهمی پتاسیم خاک و جذب گیاه نشان می دهد که بیوچار پتانسیل بالایی برای افزایش فراهمی پتاسیم دارد و این توانایی مستقیماً به منابع بیوچار غنی از پتاسیم و به طور غیرمستقیم به ظرفیت تبادل کاتیونی، تخلخل و سطح ویژه بیوچار بستگی دارد (Bilias et al., 2023). از طرفی میزان اثربخشی بیوچار به ویژگی های خاک نیز بستگی دارد (Silber et al., 2010). بنابراین خاک های مناطق خشک و نیمه خشک که معمولاً آهکی و pH قلیایی دارند از بیوچار با pH پایین سود می برند (Ippolito et al., 2016). بنابراین، اصلاح شیمی سطح بیوچار با کمک اسید، آب دوستی سطح بیوچار را افزایش داده و حلالیت آبی و امکان دسترسی گیاه به عناصر غذایی موجود در خاک های آهکی را بهبود می دهد (Sahin et al., 2017). Sadegh-zadeh et al. (2018) بیان کردند اعمال تیمارهایی نظیر اسیدی کردن بیوچار سبب افزایش مقدار عناصر غذایی بیوچار می شود، زیرا اسیدی شدن سبب انحلال فرم های کریستالی عناصر موجود در بیوچار می شود. Ippolito et al. (2015) در بررسی های خود به این نتیجه دست یافتند که کاربرد یک بیوچار با pH اسیدی در یک خاک آهکی؛ (۱) وضعیت آب خاک را با کاهش تلفات تبخیری بهبود می بخشد، (۲) pH خاک را کاهش می دهد و (۳) جذب عناصر غذایی توسط گیاه را افزایش می دهد.

باتوجه به آنچه در بالا گفته شد، در مطالعه پیشین وضعیت تثبیت پتاسیم در دو خاک شالیزاری با بافت مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که هر دو خاک شالیزاری تخلیه پتاسیم شده، تحت شرایط غرقاب پتانسیل تثبیت پتاسیم بالایی دارند، به طوری که خاک لوم رسی قادر به تثبیت بیش از ۸۰ درصد پتاسیم افزوده شده در کاربرد کم یا زیاد پتاسیم بود. خاک لوم شنی در کاربرد مقادیر متفاوت پتاسیم توانست بیش از ۵۰ درصد پتاسیم اعمال شده را تثبیت نماید. برای غلبه بر پتانسیل بالای تثبیت پتاسیم در این خاک ها، به تقریباً ۲۰۰۰ کیلوگرم پتاسیم در هکتار برای خاک لوم رسی و ۸۰۰ کیلوگرم پتاسیم در هکتار برای خاک لوم شنی نیاز است. افزودن بیوچار به خاک های مورد مطالعه پتانسیل تثبیت پتاسیم را به میزان ۴۰/۲ درصد در خاک لوم رسی و ۲۱/۷۴ درصد در خاک لوم شنی کاهش داد (Nouri et al., 2024). بنابراین باتوجه به کمبود پتاسیم در خاک های شالیزاری شمال کشور و نیز عدم کاربرد کود پتاسیمی کافی به وسیله کشاورزان این مناطق لازم است جایگزینی بیوچار به جای کود پتاسیمی که منجر به کاهش مصرف کود و بار اقتصادی کشاورزان می شود، مورد بررسی قرار گیرد. از این رو هدف مطالعه حاضر تعیین تأثیر بیوچارهای کاه و کلش برنج و کود پتاسیمی بر وضعیت پتاسیم برنج و عملکرد و اجزای عملکرد این گیاه در نظر گرفته شد.

روش شناسی پژوهش

زمان و محل اجرای آزمایش

به منظور بررسی تأثیر بیوچار کاه برنج اسیدی بر فراهمی پتاسیم و پاسخ برنج در دو خاک شالیزاری با بافت مختلف، آزمایش هایی به صورت انکوباسیون و گلدانی، در آزمایشگاه علوم خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در سال ۱۴۰۲-۱۴۰۱ اجرا گردید.

نمونه برداری از خاک

دو نمونه خاک مرکب شامل بافت های لوم رسی از شالیزار واقع در مزرعه پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، با موقعیت جغرافیایی "۲۹° ۳۹' ۳۶" شمالی و "۰۳' ۰۴' ۵۳" شرقی، با ارتفاع ۲۰- متر از سطح دریا، و لوم شنی از شالیزار تحت کشت واقع در روستای سوته با موقعیت جغرافیایی "۴۲° ۴۸' ۳۶" شمالی و "۰۳' ۰۸' ۵۳" شرقی، با ارتفاع ۲۰ در منطقه فرح آباد در شمال شهرستان ساری، از عمق ۳۰-۳۰ سانتی متر با در نظر گرفتن میزان پتاسیم قابل تبادل عصاره گیری شده با استات آمونیوم، به طور تصادفی انتخاب و جمع آوری شد. پس

از نمونه برداری، نمونه های خاک هوا خشک شده و پس از کوبیدن، خاک از الک ۲ میلی متری عبور داده شد و جهت انجام آزمایش های لازم نگهداری شدند.

تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک های شالیزاری با ظرفیت تثبیت پتاسیم بالا

نمونه های خاک پس از هوا خشک شدن از الک ۲ میلی متری عبور داده شد. سپس برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن ها از جمله بافت خاک با دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۶ ساعت (Gee and Bauder, 1982)، pH گل اشباع (Rhoades, 1992)، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع (Rhoades, 1992)، رطوبت گل اشباع (Rhoades, 1992)، ظرفیت تبادل کاتیونی (Sumner and Miller, 1996)، کربن آلی (Walkley and Black, 1934)، درصد کربنات کلسیم معادل (Nelson, 1982)، نیتروژن کل (Bremner and Mulvaney, 1982)، فسفر قابل جذب (Olsen et al., 1954)، پتاسیم قابل استخراج با استات آمونیوم (Knudsen et al., 1992) و آهن، منگنز، روی و مس قابل جذب (Lindsay and Norvell, 1978) اندازه گیری شد.

تهیه و تعیین خصوصیات شیمیایی بیوجار نرمال و بیوجار اسیدی

بیوجار مورد استفاده در این آزمایش از تجزیه حرارتی کاه برنج تولید شد. ابتدا نمونه ماده اولیه خرد شده، از الک ۲ میلی متری عبور داده شد و در آون با درجه حرارت ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید. سپس نمونه ها به مدت ۳ ساعت در کوره با دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند تا تبدیل به بیوجار شوند. بعد از ۱ ساعت کوره به دمای مورد نظر رسیده و سپس ۲ ساعت در این دما باقی ماند. پس از خنک شدن نمونه ها و رسیدن به دمای محیط، بیوجار از کوره خارج شده و به منظور افزودن به خاک و نیز انجام آزمایشات بعدی در ظروف پلاستیکی درب دار نگهداری شد. pH و قابلیت هدایت الکتریکی بیوجار با استفاده از نسبت ۱:۲۰ بیوجار به آب تعیین شد. میزان پتاسیم موجود در بیوجار به روش سوزاندن خشک اندازه گیری شد. میزان نیتروژن کل بیوجار به روش هضم توسط دستگاه کدال، میزان ماده آلی، فسفر و عناصر کم مصرف بیوجار نیز اندازه گیری شد (IBI, 2012; Wang et al., 2014).

برای تهیه بیوجار اسیدی، بیوجار تهیه شده در مرحله قبل، با اسید کلریدریک ۰/۱ نرمال در نسبت ۱:۲۰ (w/v) سه بار شسته و به دنبال آن با آب مقطر شست و شو داده شد. سپس در آون به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس خشک شد. (Sadegh-Zade et al., 2018). لازم به ذکر است، پس از اسیدشویی بیوجار، pH و قابلیت هدایت الکتریکی، میزان کلر موجود، مقدار نیتروژن کل، میزان پتاسیم، فسفر، عناصر کم مصرف و همچنین مقدار ماده آلی بیوجار اصلاح شده نیز اندازه گیری شد (IBI, 2012; Wang et al., 2014).

اجرای آزمایش

این تحقیق به صورت آزمایش گلخانه ای در دمای محیط در قالب طرح کاملاً تصادفی و به صورت فاکتوریل با دو فاکتور سطوح بیوجار (در سه سطح ۰ (B₀)، ۱ درصد بیوجار نرمال (NB₁) و ۱ درصد بیوجار اسیدی (AB₁)) و سطوح کود پتاسیمی از منبع کلرید پتاسیم (در پنج سطح ۰ (K₀)، ۲۵ درصد (K₂₅)، ۵۰ درصد (K₅₀)، ۷۵ درصد (K₇₅) و ۱۰۰ درصد (K₁₀₀) توصیه کودی) در سه تکرار صورت پذیرفت. از ترکیب فاکتوریل سطوح بیوجار و سطوح کود پتاسیمی برای هر یک از دو خاک لوم رسی و لوم شنی ۱۵ تیمار به شرح زیر حاصل شد: AB₁K₇₅، AB₁K₅₀، AB₁K₂₅، AB₁K₀، NB₁K₁₀₀، NB₁K₇₅، NB₁K₅₀، NB₁K₂₅، NB₁K₀، B₀K₁₀₀، B₀K₇₅، B₀K₅₀، B₀K₂₅، B₀K₀، AB₁K₁₀₀.

از هر دو نمونه خاک مورد مطالعه در این آزمایش نمونه های ۱۰ کیلوگرمی توزین و به درون گلدان ها منتقل شد. به جز پتاسیم، نیتروژن و فسفر براساس آزمون خاک و توصیه های مبتنی بر آزمون خاک برای هر گلدان تأمین شد. تیمارهای مختلف بیوجار و کود پتاسیمی نیز بر اساس مقادیر مذکور به هر گلدان منتقل و به خوبی با خاک مخلوط شدند. در طول دوره رشد گیاه، خاک در شرایط غرقاب نگهداری و پس از پایان دوره رشد گیاه، اندام هوایی گیاه برداشت و جهت اندازه گیری عملکرد، اجزای عملکرد، غلظت پتاسیم زیست توده و دانه برنج، جذب پتاسیم زیست توده، دانه و کل گیاه و پاسخ برنج به آزمایشگاه منتقل گردید. همچنین جهت اندازه گیری مقدار شکل های پتاسیم قابل تبادل، غیرقابل تبادل (Pratt, 1965) و پتاسیم کل خاک (Knudsen et al., 1992) در پایان دوره کشت و بعد از برداشت گیاه، از خاک هر گلدان نمونه برداری صورت گرفت.

انجام عملیات زراعی

جهت اجرای عملیات طرح، کودهای شیمیایی مطابق نیاز کودی بر اساس نتایج آزمون خاک شامل کود فسفره به میزان ۰/۵ گرم در گلدان پتتا اکسید فسفر (P₂O₅) از منبع سوپر فسفات تریپل و کود نیتروژنه به میزان ۰/۷ گرم نیتروژن در گلدان از منبع اوره به گلدان ها اضافه



شد. کودهای پایه، کود پتاسیم و بیوپارها نیز بر اساس طرح آزمایشی قبل از نشاءکاری با خاک گلدان‌ها مخلوط شدند. البته کود نیتروژنه طی سه مرحله، یک سوم قبل از نشاءکاری، یک سوم در زمان پنجه‌زنی و یک سوم هم‌زمان به ساقه رفتن به‌صورت سرک استفاده شد.

عملیات کاشت و داشت

بعد از پیاده کردن نقشه طرح و اعمال تیمارهای کودی در هر گلدان، گیاهچه‌های یک دست رقم شیروودی (سه گیاهچه در هر کپه) در هر گلدان کاشته (۵ اردیبهشت ۱۴۰۳) شدند. مراحل داشت شامل آبیاری، وجین و مبارزه با آفات طبق روش‌های معمول در منطقه صورت گرفت.

عملیات برداشت

در زمان رسیدگی محصول برنج و برداشت آن (اواخر شهریور ماه)، کل بوته‌های هر گلدان، برداشت و ارتفاع بوته، وزن هزار دانه و میزان عملکرد زیست‌توده و دانه اندازه‌گیری شدند. مقدار پتاسیم در زیست‌توده و دانه برنج نیز اندازه‌گیری شدند. در نهایت پس از برداشت محصول و خشک شدن خاک گلدان‌ها، از خاک هر گلدان جهت تعیین شکل‌های مختلف پتاسیم (محلول، قابل تبادل و غیرقابل تبادل) و پتاسیم کل به‌طور جداگانه نمونه‌برداری و به آزمایشگاه منتقل شد.

آنالیز گیاه

به‌منظور تعیین ارتفاع گیاه، فاصله از سطح خاک گلدان تا انتهای بالاترین سنبله هر بوته، با متر اندازه‌گیری شد و میانگین آن‌ها برای هر گلدان جداگانه یادداشت گردید. پس از برداشت بوته‌ها و جداسازی دانه‌ها از سنبله، وزن هزار دانه در هر گلدان شمارش و با ترازو توزین و یادداشت شد. برای محاسبه عملکرد زیست‌توده گیاه در انتهای دوره کشت، کل بوته‌های گیاه در هر گلدان از سطح خاک کف‌بر شد. پس از جداسازی خوشه‌ها از هر بوته، نمونه‌های گیاهی در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت در آون خشک شدند و سپس وزن خشک نمونه گیاهی با ترازو توزین و یادداشت شد. سپس با استفاده از آن عملکرد زیست‌توده بر حسب گرم در گلدان محاسبه گردید (هوشمندفر و همکاران، ۱۳۸۷). در نهایت عملکرد با انجام محاسبات بر اساس تن در هکتار گزارش شد. برای تعیین عملکرد دانه گیاه در انتهای دوره کشت و برداشت بوته‌های هر گلدان، خوشه‌ها از هر بوته جداسازی شدند و در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت در آون خشک شدند. در انتها وزن خشک نمونه‌های دانه گیاه (شلتوک) با ترازو توزین و یادداشت گردید. سپس با استفاده از آن عملکرد دانه (شلتوک) بر حسب گرم در گلدان محاسبه گردید. در نهایت عملکرد با انجام محاسبات بر اساس تن در هکتار گزارش شد.

برای اندازه‌گیری پتاسیم زیست‌توده و دانه برنج، پس از رسیدگی نهایی و برداشت گیاه، نمونه‌ها به‌منظور خشک کردن به مدت ۷۲ ساعت در آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار داده شد. سپس نمونه‌ها را آسیاب کرده و ۰/۵ گرم پودر گیاهی توزین و داخل کروزه چینی ریخته و با روش هضم به‌طریقه سوزاندن خشک کروزه‌ها داخل کوره الکتریکی به مدت ۱۰ ساعت (برای دانه ۳ ساعت) با دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس قرار داده شد. سپس ۲/۵ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۲ نرمال به محتویات داخل کروزه اضافه و با آب مقطر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانده و از نمونه‌ها عصاره‌گیری به‌عمل آمد. مقدار پتاسیم با دستگاه فلیم‌فتومتر بعد از قرائت محلول‌های استاندارد مورد سنجش قرار گرفت. سپس با رسم منحنی استانداردها مقدار پتاسیم در گیاه محاسبه گردید. در نهایت مقدار این عنصر در زیست‌توده و دانه برنج بر حسب درصد طبق فرمول زیر محاسبه گردید (رابطه ۱) (توللی و سمنانی، ۱۳۸۱).

$$X = \frac{a \times v \times b}{m \times Dm} \quad \text{رابطه ۱}$$

X= درصد پتاسیم، a= عدد به‌دست آمده از دستگاه، v= حجم عصاره مصرفی، b= ضریب رقت، m= وزن ماده گیاهی، Dm= درصد ماده خشک می‌باشد.

میزان پاسخ برنج از تفاضل عملکرد در تیمار شاهد و عملکرد در تیمار کود داده شده بدست آمد.

تجزیه و تحلیل آماری

برای تجزیه و تحلیل آماری داده‌های به‌دست آمده، از نرم‌افزار Statistix 8 (USDA and NRCS, 2007) و مقایسه میانگین‌ها با روش حداقل اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد (LSD) صورت پذیرفت. رسم نمودارها توسط نرم‌افزار Excel انجام شد.

یافته‌های پژوهشی

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها و بیوجارهای مورد مطالعه

برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های انتخاب شده در این مطالعه در جدول (۱) آمده است. باتوجه به نتایج ارائه شده در این جدول می‌توان گفت؛ بافت خاک‌های مورد مطالعه به ترتیب لوم رسی با ۳۶ درصد رس، ۳۰ درصد سیلت و ۳۴ درصد شن و لوم شنی با ۱۶ درصد رس، ۶ درصد سیلت و ۷۸ درصد شن می‌باشد. خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب دارای pH ۷/۶۶ و ۷/۲۶ هستند. مقدار کربن آلی در هر دو خاک لوم شنی و لوم رسی به ترتیب ۱/۰۵ و ۰/۸۵ درصد و نیتروژن کل خاک لوم شنی ۰/۱ درصد و در خاک لوم رسی ۰/۰۸ درصد برآورد گردید. مقدار کربنات کلسیم خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب ۲۳ و ۲۱ درصد است. غلظت فسفر قابل جذب در دو خاک لوم شنی و لوم رسی به ترتیب ۳/۴۱ و ۱/۸۵ میلی گرم بر کیلوگرم می‌باشد و غلظت پتاسیم نیز قابل جذب در هر دو خاک لوم شنی و لوم رسی به ترتیب ۱۲۵ و ۱۴۷ میلی گرم بر کیلوگرم برآورد شد.

با توجه به جدول (۱)، pH بیوجار در حالت اولیه کمی قلیایی است. بعد از فرایند اسیدی کردن pH آن کاهش پیدا کرده و اسیدی شده است. مقدار نیتروژن، ماده آلی، فسفر و منگنز موجود در بیوجار بعد از فرایند اسیدی شدن، افزایش یافته است. اما مقدار پتاسیم، آهن، مس و منگنز بعد از اسیدی شدن نسبت به حالت اولیه بیوجار، کاهش یافته است. ظرفیت تبادل کاتیونی بیوجار در حالت اولیه نسبت به بیوجار اسیدی، بیشتر بوده است.

جدول ۱. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها و بیوجارهای مورد مطالعه

پارامتر	واحد	مقدار (لوم شنی)	مقدار (لوم رسی)	پارامتر	واحد	بیوجار نرمال	بیوجار اسیدی
pH		۷/۲۶	۷/۶۶	pH		۷/۸۴	۲/۶۴
EC	dS m ⁻¹	۰/۳۹	۰/۳۵	EC	dS m ⁻¹	۱/۲۴	۴/۷۱
نیتروژن کل	%	۰/۱	۰/۰۸	نیتروژن کل	%	۱/۰۲	۱/۱۱
CEC	cmol kg ⁻¹	۱۱/۳	۱۶/۶	CEC	cmol kg ⁻¹	۷۰/۳۳	۶۹/۸۵
فسفر قابل جذب	mg kg ⁻¹	۳/۴۱	۱/۸۵	فسفر کل	mg kg ⁻¹	۸۱۶۳/۲۶	۱۰۷۱۴/۲۸
پتاسیم قابل جذب	mg kg ⁻¹	۱۲۵	۱۴۷	پتاسیم کل	mg kg ⁻¹	۴۰۸۱۶/۳۲	۲۰۴۰۸/۱۶
کربنات کلسیم	%	۲۱/۳۸	۲۳/۲۰	-	-	-	-
کربن آلی	%	۱/۰۵	۰/۸۵	کربن آلی	%	۵۸/۲۳	۶۱/۶۳
آهن قاب جذب	mg kg ⁻¹	۲۸/۲۹	۵۷/۸۹	آهن کل	mg kg ⁻¹	۱۴۳/۸۷	۱۳۴/۶۹
مس قابل جذب	mg kg ⁻¹	۱/۴۸	۵/۱۳	مس کل	mg kg ⁻¹	۸/۱۶	۴/۵۹
روی قابل جذب	mg kg ⁻¹	۰/۹۱	۲/۷۷	روی کل	mg kg ⁻¹	۴۲/۳۴	۴۰/۳۶
منگنز قابل جذب	mg kg ⁻¹	۵/۶۱	۳۱/۵۷	منگنز	mg kg ⁻¹	۲۳۱/۱۲	۲۳۹/۲۸
شن	%	۷۸	۳۴	-	-	-	-
سیلت	%	۶	۳۰	-	-	-	-
رس	%	۱۶	۳۶	-	-	-	-

تأثیر بیوجارها و کود پتاسیمی بر غلظت پتاسیم زیست‌توده برنج در خاک‌های شالیزاری

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر ساده سطوح بیوجار، سطوح کود پتاسیمی و همچنین اثر متقابل آن‌ها بر غلظت پتاسیم زیست‌توده برنج در خاک‌های شالیزاری در سطح احتمال یک درصد ($p < 0/01$) معنی‌دار بود (جدول ۲).

در این آزمایش تأثیر افزودن بیوجارهای B₀، NB₁ و AB₁ به همراه مقادیر مختلف کود پتاسیمی (K₀، K₂₅، K₅₀، K₇₅، K₁₀₀) بر غلظت پتاسیم زیست‌توده برنج در خاک‌های لوم رسی و لوم شنی مورد بررسی قرار گرفت. در عدم کاربرد کود پتاسیمی و بیوجارها غلظت پتاسیم زیست‌توده برنج در خاک‌های لوم رسی و لوم شنی به ترتیب ۰/۷ و ۰/۴ درصد بود. با کاربرد مقادیر مختلف کود پتاسیمی B₀K₂₅ تا B₀K₁₀₀ در خاک لوم رسی، غلظت پتاسیم زیست‌توده برنج بین ۱/۱۳ تا ۱/۸ درصد و در خاک لوم شنی بین ۰/۹۳ تا ۱/۶ درصد متغیر بود. غلظت پتاسیم زیست‌توده برنج در تیمارهای NB₁K₀ و AB₁K₀ در خاک لوم رسی به ترتیب به ۱/۸۳ و ۱/۷ درصد و در خاک لوم شنی به ترتیب به ۱/۵ و ۱/۳ افزایش یافت. اما تیمار NB₁K₅₀ بیش‌ترین توانایی را در افزایش غلظت پتاسیم زیست‌توده برنج داشت (شکل ۱ الف و ب). به‌طوری‌که اعمال این تیمار غلظت پتاسیم زیست‌توده برنج را از ۰/۷ درصد در تیمار شاهد به ۲/۸۳ درصد در لوم رسی و از ۰/۴ درصد در

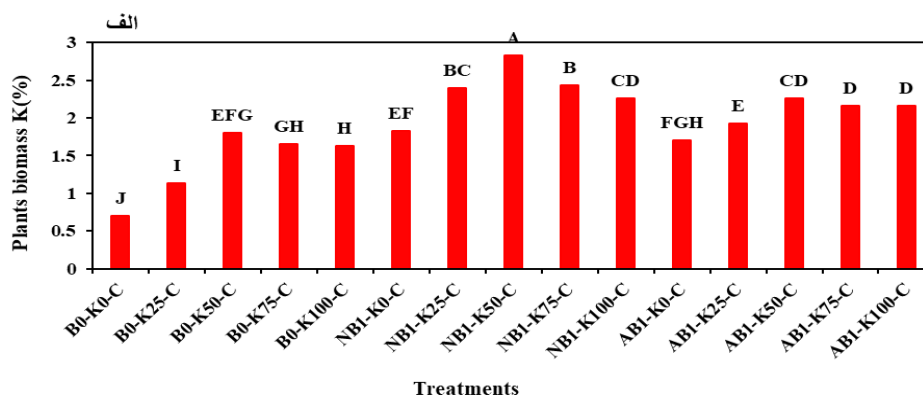
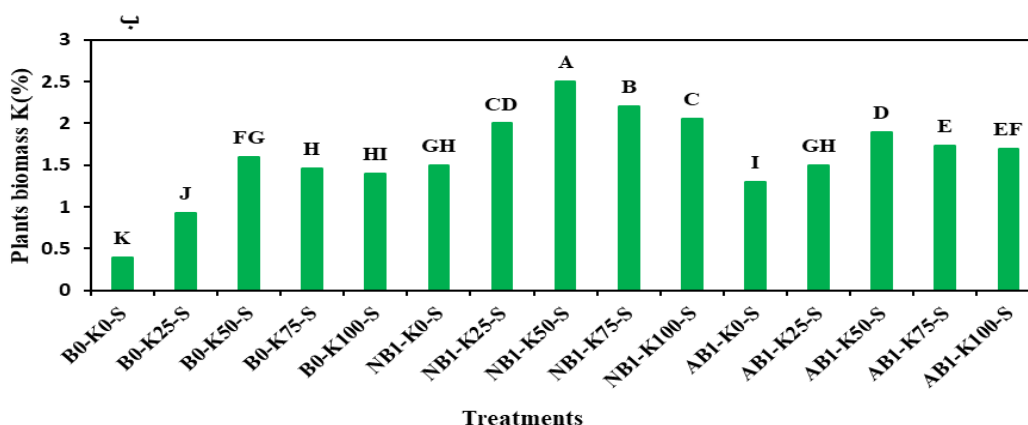


تیمار شاهد به ۲/۵ درصد در خاک لوم شنی رساند. تیمار AB₁K₅₀ نیز توانست غلظت پتاسیم زیست توده برنج را به ۲/۲۶ درصد در خاک لوم رسی و ۱/۹ درصد در خاک لوم شنی برساند.

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس اثر بیوجار و کود پتاسیمی بر وضعیت پتاسیم برنج در دو نوع خاک شالیزاری

منابع تغییرات		درجه آزادی		میانگین مربعات	
غلظت پتاسیم زیست توده		غلظت پتاسیم دانه		خاک لوم رسی	
سطوح بیوجار	۲	۳/۶۶۰.۲**	۰/۰۱۵۵۰**		
سطوح کود پتاسیمی	۴	۱/۰۱۵۸۹**	۰/۰۰۵۲۷**		
سطوح بیوجار × سطوح کود پتاسیمی	۸	۰/۰۸۱۸۹**	۰/۰۰۰۱۰**		
خطا	۲۸	۰/۰۰۸۹۸	۰/۰۰۰۰۲		
ضریب تغییرات %		۴/۹۱	۱/۱۴		
خاک لوم شنی					
سطوح بیوجار	۲	۲/۹۹۴۶۷**	۰/۰۱۴۷۳**		
سطوح کود پتاسیمی	۴	۱/۱۵۱۸۹**	۰/۰۰۴۶۶**		
سطوح بیوجار × سطوح کود پتاسیمی	۸	۰/۰۶۸۵۶**	۰/۰۰۰۰۳**		
خطا	۲۸	۰/۰۰۴۹۰	۰/۰۰۰۰۱		
ضریب تغییرات %		۴/۳۴	۰/۸۱		

**معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد، *معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد و NS عدم تفاوت معنی دار

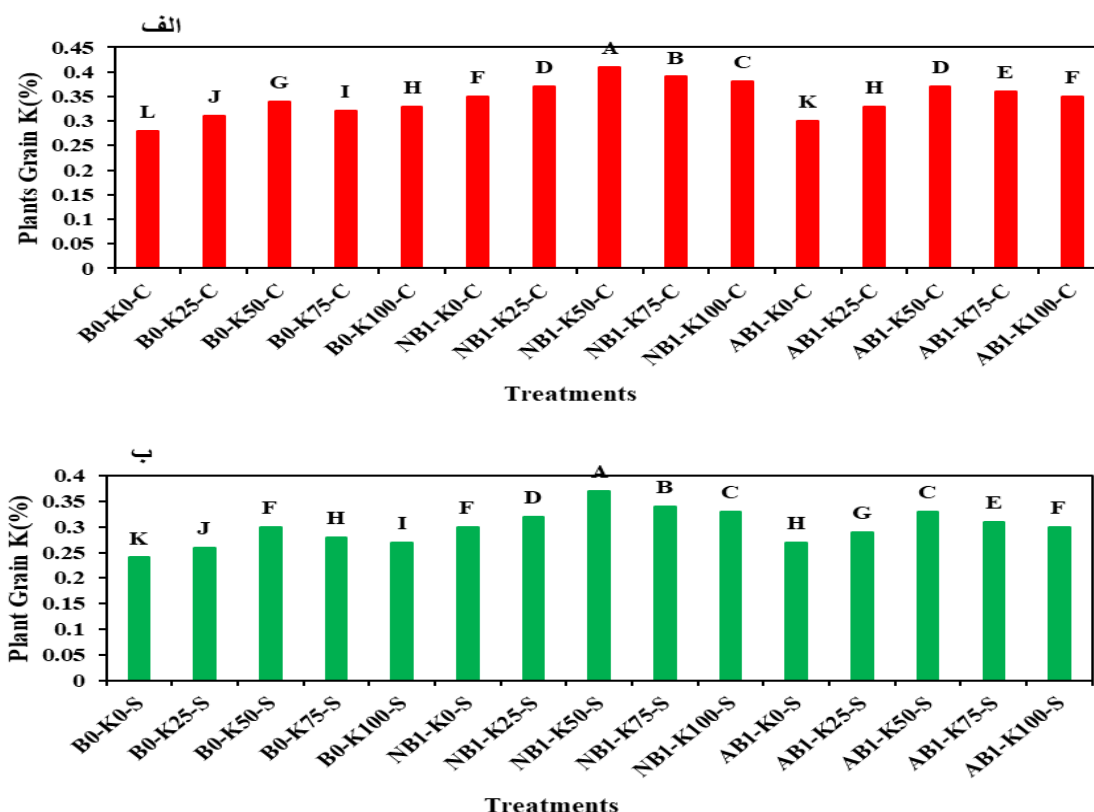


شکل ۱. مقایسه میانگین تأثیر بیوجار و کود پتاسیمی بر غلظت پتاسیم زیست توده برنج در خاک‌های (الف) لوم رسی و (ب) لوم شنی. ستون‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشابه باشند نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD می‌باشد. (NB: بیوجار نرمال، AB: بیوجار اسیدی؛ 0: بدون مصرف بیوجار، 1 درصد NB: مصرف 1 درصد بیوجار نرمال، 1 درصد AB: مصرف 1 درصد بیوجار اسیدی، K0: بدون مصرف کود پتاسیم، K25: مصرف ۲۵ درصد توصیه کودی پتاسیم، K50: مصرف ۵۰ درصد توصیه کودی پتاسیم، K75: مصرف ۷۵ درصد توصیه کودی پتاسیم، K100: مصرف ۱۰۰ درصد توصیه کودی پتاسیم)

تأثیر بیوجارها و کود پتاسیمی بر غلظت پتاسیم دانه برنج در خاک‌های شالیزاری

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها این چنین نشان داد که، اثر ساده سطوح بیوجار و سطوح کود پتاسیمی، همچنین اثر متقابل آن‌ها بر غلظت پتاسیم دانه برنج در هر دو خاک در سطح احتمال یک درصد ($p < 0/01$) تأثیر معنی‌داری داشتند (جدول ۲).

در این راستا نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد شکل (۲ الف و ب)، غلظت پتاسیم دانه برنج با افزودن بیوجارهای B_0 ، NB_1 و AB_1 به همراه مقادیر مختلف کود پتاسیمی (K_0 ، K_{25} ، K_{50} ، K_{75} ، K_{100}) در هر دو خاک افزایش یافته است. با کاربرد مقادیر مختلف کود پتاسیمی B_0K_{100} تا B_0K_{25} در خاک لوم رسی، غلظت پتاسیم دانه برنج بین $0/31$ تا $0/34$ درصد و در خاک لوم شنی بین $0/26$ تا $0/3$ درصد متغیر بود. که در این بین تیمار K_{50} ، موفقیت بیشتری در افزایش مقدار پتاسیم دانه داشت و توانست غلظت پتاسیم دانه را در خاک لوم رسی $21/4$ درصد و در خاک لوم شنی 25 درصد در مقایسه با شاهد افزایش دهد. غلظت پتاسیم دانه برنج در تیمارهای NB_1 و AB_1 در خاک لوم رسی به ترتیب به $0/35$ و $0/30$ درصد و در خاک لوم شنی به ترتیب به $0/30$ و $0/27$ افزایش یافت. بیش‌ترین میزان پتاسیم دانه برنج مربوط به تیمار NB_1K_{50} است که توانست غلظت پتاسیم دانه را به ترتیب از $0/28$ و $0/24$ درصد در تیمار شاهد بدون مصرف بیوجار و کود پتاسیمی به $0/41$ و $0/37$ درصد در دو خاک لوم رسی و لوم شنی افزایش دهد. این تیمار در مقایسه با سایر مقادیر کود پتاسیم (K_0 ، K_{25} ، K_{75} ، K_{100}) به همراه 1 درصد بیوجار نرمال (NB_1) توانایی بیش‌تری در افزایش پتاسیم دانه برنج داشت به‌طوری‌که پتاسیم دانه برنج را در خاک لوم رسی $46/2$ درصد و در خاک لوم شنی $54/1$ درصد افزایش دهد. تیمار AB_1K_{50} در مقایسه با سایر مقادیر کود پتاسیم (K_0 ، K_{25} ، K_{75} ، K_{100}) به همراه 1 درصد بیوجار اسیدی (AB_1)، در افزایش مقدار پتاسیم دانه، موفق‌تر عمل کرد و غلظت پتاسیم دانه را در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب به $0/37$ و $0/33$ درصد رساند که برابر بود با $32/1$ و $37/5$ درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد. تیمار NB_1K_{50} در قیاس با تیمار B_0K_{50} ، غلظت پتاسیم دانه را در خاک لوم رسی $20/5$ درصد و در خاک لوم شنی $23/3$ درصد افزایش داد.



شکل ۲. مقایسه میانگین تأثیر بیوجار و کود پتاسیمی بر غلظت پتاسیم دانه برنج در خاک‌های (الف) لوم رسی و (ب) لوم شنی. ستون‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشابه باشند نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD می‌باشد. (NB: بیوجار نرمال، AB: بیوجار اسیدی؛ 0: بدون مصرف بیوجار، 1 درصد بیوجار نرمال، 1 درصد AB: مصرف 1 درصد بیوجار اسیدی، K_0 : بدون مصرف کود پتاسیم، K_{25} : مصرف ۲۵ درصد توصیه کودی پتاسیم، K_{50} : مصرف ۵۰ درصد توصیه کودی پتاسیم، K_{75} : مصرف ۷۵ درصد توصیه کودی پتاسیم، K_{100} : مصرف ۱۰۰ درصد توصیه کودی پتاسیم)



تأثیر بیوجارها و کود پتاسیمی بر ارتفاع برنج در خاک‌های شالیزاری

با مشاهده نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر ساده سطوح بیوجار و سطوح کود پتاسیمی بر ارتفاع برنج در هر دو خاک در سطح احتمال یک درصد ($p < 0/01$) تأثیر معنی‌داری داشتند. همچنین اثر متقابل سطوح بیوجار و سطوح کود پتاسیمی نیز بر ارتفاع برنج در هر دو خاک در سطح احتمال یک درصد ($p < 0/01$) تأثیر معنی‌داری داشتند (جدول ۳).

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس تأثیر بیوجار و کود پتاسیمی بر ارتفاع گیاه و برخی صفات مربوط به عملکرد و اجزای عملکرد برنج در دو نوع خاک شالیزاری

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		ارتفاع گیاه	وزن هزار دانه گیاه	عملکرد زیست توده	عملکرد دانه
خاک لوم رسی					
سطوح بیوجار	۲	۳۳۰/۵۸۹**	۵۵/۳۴۷۴**	۷۱/۷۶۷۵**	۶۴/۲۹۵۹**
سطوح کود پتاسیمی	۴	۶۴/۷۵۷**	۲۳/۳۴۱۳**	۰/۵۱۲۰**	۱۰/۳۸۸۹**
سطوح بیوجار × سطوح کود پتاسیمی	۸	۲/۲۹۸**	۱/۲۴۶۶**	۰/۶۹۸۱**	۰/۳۵۵۵**
خطا	۲۸	۰/۲۸۰	۰/۲۰۴۶	۰/۰۴۳۳	۰/۰۱۶۰
ضریب تغییرات %		۰/۵۴	۱/۷۶	۲/۶۶	۱/۸۳
خاک لوم شنی					
سطوح بیوجار	۲	۵۱۱/۰۱۶**	۷۱/۷۳۶۹**	۶۶/۲۳۶۵**	۶۰/۰۶۹۹**
سطوح کود پتاسیمی	۴	۱۱۱/۸۷۳**	۲۲/۸۵۲۲**	۱/۰۳۱۷**	۸/۲۱۵۲**
سطوح بیوجار × سطوح کود پتاسیمی	۸	۵/۱۸۵**	۱/۳۵۳**	۰/۳۴۲۰**	۰/۲۷۴۷**
خطا	۲۸	۰/۱۴۹	۰/۰۷۲۴	۰/۰۰۸۴	۰/۰۲۱۴
ضریب تغییرات %		۰/۴۰	۱/۰۸	۱/۱۹	۲/۲۸

**معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد، *معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد و ns عدم تفاوت معنی دار

بر اساس نتایج مقایسه میانگین داده‌ها در جدول (۴)، کاربرد ۱ درصد بیوجار نرمال و ۱ درصد بیوجار اسیدی هر دو باعث افزایش ارتفاع برنج شدند. تیمار NB₁K₅₀ در هر دو خاک دارای بیش‌ترین ارتفاع گیاه بود. این تیمار ارتفاع گیاه را در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب از ۸۹/۵ و ۸۵/۲۳ سانتی‌متر در تیمار شاهد به ۱۰۵/۱۳ و ۱۰۴/۶ سانتی‌متر افزایش داد. ارتفاع گیاه در این تیمار در دو خاک لوم شنی و لوم رسی به ترتیب ۱۷/۴ و ۲۲/۷ درصد نسبت به شاهد افزایش پیدا کرد. تیمار B₀K₂₅ کم‌ترین میزان ارتفاع گیاه را در هر دو خاک دارا بود. این تیمار ارتفاع گیاه را به ۹۱/۹۰ و ۸۹/۱۳ سانتی‌متر به ترتیب در دو خاک لوم رسی و لوم شنی رساند که برابر با ۲/۶ و ۴/۵ درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد بود. تیمار NB₁K₁₀₀ ارتفاع گیاه را نسبت به تیمار مشابه ولی بدون کاربرد بیوجار (B₀K₁₀₀)، در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب ۹/۸ و ۱۰/۶ درصد افزایش داد. در بین تیمارهای کاربرد کود پتاسیمی، تیمار B₀K₁₀₀ دارای بیش‌ترین ارتفاع گیاه در هر دو خاک بود. کاربرد این تیمار در دو خاک لوم رسی و لوم شنی، تنها توانست ارتفاع گیاه را به ترتیب ۶ و ۱۰/۸ درصد افزایش دهد. کاربرد AB₁K₁₀₀ ارتفاع گیاه را ۱۳/۶ و ۱۹/۵ درصد به ترتیب در دو خاک لوم رسی و لوم شنی افزایش داد.

تأثیر بیوجارها و کود پتاسیمی بر وزن هزار دانه برنج در خاک‌های شالیزاری

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد، اثر ساده سطوح بیوجار و سطوح کود پتاسیمی بر وزن هزار دانه برنج در هر دو خاک در سطح احتمال یک درصد ($p < 0/01$) تأثیر معنی‌داری داشتند. همچنین اثر متقابل سطوح بیوجار و سطوح کود پتاسیمی نیز بر وزن هزار دانه برنج در هر دو خاک در سطح یک درصد ($p < 0/01$) تأثیر معنی‌داری داشتند (جدول ۳).

در این راستا نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، در جدول (۴) نشان داد که بیش‌ترین وزن هزار دانه گیاه در هر دو خاک متعلق به تیمار NB₁K₅₀ بود. این تیمار موفق شد وزن هزار دانه گیاه را در هر دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب از ۲۱/۰۵ و ۲۰/۷۱ گرم در تیمار شاهد بدون کاربرد بیوجار B₀K₀ به ۲۸/۶۶ و ۲۸/۴۳ گرم افزایش دهد. بر این اساس وزن هزار دانه در این تیمار در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب ۳۶/۹ و ۳۷/۲ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت. کم‌ترین وزن هزار دانه نیز در هر دو خاک مربوط به تیمار B₀K₂₅ بود که وزن هزار دانه را به ترتیب به ۲۲/۷۵ و ۲۱/۰۵ گرم در دو خاک لوم رسی و لوم شنی رساند که برابر است با ۸ و ۱/۶ درصد

افزایش نسبت به تیمار شاهد. همان گونه که مشاهده می شود در بین تیمارهای کاربرد کود پتاسیمی، بیشترین وزن هزار دانه مربوط به تیمار B_0K_{100} بود که وزن هزار دانه را در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب ۲۰/۵ و ۱۸/۸ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. از طرفی کاربرد NB_1K_{50} در مقایسه با کاربرد B_0K_0 ، وزن هزار دانه را به ترتیب ۱۲/۹ و ۱۵ درصد در دو خاک لوم رسی و لوم شنی افزایش داد. AB_1K_{50} نیز بین سایر مقادیر کود پتاسیم به همراه ۱ درصد بیوجار اسیدی، موفق تر عمل کرد و وزن هزار دانه را در خاک لوم رسی ۳۲/۳ و در خاک لوم شنی ۳۰ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد.

جدول ۴. مقایسه میانگین تأثیر بیوجار و کود پتاسیمی بر ارتفاع گیاه و برخی صفات مربوط به عملکرد و اجزای عملکرد برنج در دو نوع خاک شالیزاری

کود پتاسیم										بیوجار
K_{100}		K_{75}		K_{50}		K_{25}		K_0		
لوم شنی	لوم رسی	لوم شنی	لوم رسی	لوم شنی	لوم رسی	لوم شنی	لوم رسی	لوم شنی	لوم رسی	
ارتفاع گیاه (cm)										
۹۴/۵۰ ^H	۱۰۰/۸۰ ^D	۹۳/۹۰ ^H	۹۳/۷۷ ^{HI}	۹۱/۱۷ ^J	۹۲/۹۰ ^I	۸۹/۱۳ ^K	۹۱/۹۰ ^J	۸۵/۲۳ ^L	۸۹/۵۰ ^K	0
۱۰۴/۱۷ ^A	۱۰۴/۲۳ ^B	۱۰۲/۹۰ ^B	۱۰۲/۲۰ ^C	۱۰۴/۶۰ ^A	۱۰۵/۱۳ ^A	۹۹/۷۰ ^E	۱۰۰/۸۰ ^D	۹۸/۸۰ ^F	۹۷/۳۷ ^F	1%NB
۱۰۱/۹۰ ^C	۱۰۱/۰۷ ^D	۱۰۰/۹۷ ^D	۹۹/۷۰ ^E	۱۰۱/۷۰ ^C	۹۹/۶۳ ^E	۹۵/۳۰ ^G	۹۵/۷۰ ^G	۹۲/۶۰ ^I	۹۳/۸۰ ^H	1% AB
وزن هزار دانه گیاه (g)										
۲۴/۶۲ ^F	۲۵/۲۸ ^F	۲۴/۲۶ ^F	۲۴/۹۶ ^{FG}	۲۲/۷۸ ^H	۲۴/۷۰ ^{FG}	۲۱/۰۵ ^I	۲۲/۷۵ ^H	۲۰/۷۱ ^I	۲۱/۰۵ ^I	0
۲۷/۶۹ ^B	۲۸/۲۲ ^{AB}	۲۷/۸۲ ^B	۲۸/۰۱ ^{AB}	۲۸/۴۳ ^A	۲۸/۶۶ ^A	۲۶/۰۵ ^D	۲۶/۷۷ ^{DE}	۲۵/۲۹ ^E	۲۶/۳۷ ^E	1%NB
۲۵/۹۷ ^D	۲۷/۲۵ ^{CD}	۲۵/۸۹ ^D	۲۶/۷۶ ^{DE}	۲۶/۹۳ ^C	۲۷/۸۵ ^{BC}	۲۳/۶۳ ^G	۲۴/۳۰ ^G	۲۲/۳۶ ^H	۲۳/۰۱ ^H	1% AB
عملکرد زیست توده گیاه ($t ha^{-1}$)										
۵/۳۵۰ ^{GH}	۵/۱۹۳ ^{HI}	۵/۰۹۳۳ ^I	۵/۰۸۰ ^I	۵/۴۸۰ ^G	۵/۴۴۷ ^{GH}	۵/۳۱۰ ^H	۵/۵۰۳ ^{GH}	۵/۳۴۰ ^{GH}	۵/۷۷۳ ^G	0
۸/۷۸۰ ^C	۸/۷۹۰ ^{CD}	۸/۷۷۰ ^C	۸/۵۶۷ ^{DE}	۸/۸۷۶ ^C	۸/۶۳۰ ^{DE}	۷/۷۱۰ ^F	۸/۵۴۳ ^F	۸/۱۰۰ ^E	۸/۳۲۷ ^{EE}	1%NB
۹/۸۱۰۰ ^A	۱۰/۵۰۰ ^A	۹/۶۹۶۷ ^{AB}	۱۰/۱۷۷ ^A	۹/۵۵۰ ^B	۹/۴۹۳ ^B	۸/۸۸۰ ^C	۹/۱۲۰ ^C	۸/۶۰۰ ^D	۸/۸۷۳ ^{CD}	1% AB
عملکرد دانه گیاه ($t ha^{-1}$)										
۵/۵۰۳۳ ^G	۶/۰۶۰ ^H	۵/۲۳۰ ^H	۵/۷۶۷ ^I	۴/۴۱۶ ^I	۵/۰۴۳ ^J	۳/۸۴۰ ^J	۴/۲۳۰ ^K	۲/۸۴۰ ^K	۳/۰۵۷ ^L	0
۹/۳۳۰۰ ^A	۱۰/۰۴۰ ^A	۹/۱۶۰۰ ^A	۹/۸۶۰ ^A	۸/۸۰۳۳ ^B	۹/۶۴۰ ^B	۸/۰۲۰۰ ^C	۸/۳۷۰ ^C	۶/۵۰۰ ^{EF}	۶/۹۵۰ ^F	1%NB
۷/۱۳۳۳ ^D	۷/۵۵۰ ^D	۷/۰۴۶۷ ^D	۷/۳۲۰ ^E	۶/۷۳۰ ^E	۷/۱۹۷ ^E	۶/۲۸۰ ^F	۶/۵۶۰ ^G	۵/۵۵۳۳ ^G	۵/۷۹۰ ^I	1% AB
پاسخ گیاه ($t ha^{-1}$)										
۲/۴۴ ^H	۲/۴۳ ^J	۱/۹۶ ^I	۲/۰۳ ^K	۱/۷۷ ^I	۱/۶۶ ^L	۰/۹۹ ^J	۰/۹۹ ^M	۰ ^K	۰ ^N	0
۹/۷۵ ^A	۱۰ ^A	۹/۴۷ ^{AB}	۹/۶ ^B	۹/۳۲ ^B	۹/۴۴ ^{BC}	۷/۲۸ ^E	۷/۵۷ ^F	۶/۲۴ ^F	۶/۴۴ ^H	1%NB
۸/۵۸ ^C	۹/۲۳ ^C	۸/۳۸ ^C	۸/۶۶ ^D	۷/۹۲ ^D	۷/۸۶ ^E	۶/۵۳ ^F	۶/۸۵ ^G	۵/۶۴ ^G	۵/۸۳ ^I	1% AB

اعدادی که دارای حداقل یک حرف مشابه باشند نشان دهنده عدم تفاوت معنی دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD می باشد

تأثیر بیوجارها و کود پتاسیمی بر عملکرد زیست توده برنج در خاک های شالیزاری

با استناد به نتایج تجزیه واریانس داده ها، اثر ساده سطوح بیوجار و سطوح کود پتاسیمی و همچنین اثر متقابل سطوح بیوجار و سطوح کود پتاسیمی بر عملکرد زیست توده برنج در هر دو خاک در سطح احتمال یک درصد ($p < 0/01$) تأثیر معنی داری داشتند (جدول ۳).

همانگونه که مقایسه میانگین داده ها نشان می دهد (جدول ۴)، عملکرد زیست توده گیاه با کاربرد ۱ درصد بیوجار نرمال و ۱ درصد بیوجار اسیدی در هر دو خاک افزایش پیدا کرد. به طوری که بیشترین میزان عملکرد زیست توده گیاه متعلق به کاربرد AB_1K_{100} است که توانست عملکرد زیست توده گیاه را در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب از ۵/۷۷ و ۵/۳۴ تن در هکتار به ۱۰/۵ و ۹/۸۱ تن در هکتار افزایش دهد. عملکرد زیست توده گیاه در این تیمار نسبت به تیمار B_0K_0 بیوجار، در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب ۸۱ و ۸۳ درصد افزایش یافت. کاربرد AB_1K_{50} ، عملکرد زیست توده گیاه را به ۸/۷۹ و ۸/۸۷ تن در هکتار به ترتیب در دو خاک لوم رسی و لوم شنی افزایش داد که به ترتیب برابر با ۵۲ و ۶۶ درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد بود. بر اساس نتایج مقایسه میانگین داده ها، کمترین عملکرد زیست توده گیاه در هر دو خاک مربوط به تیمار B_0K_{75} بود که عملکرد زیست توده گیاه را در هر دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب ۱۱ و ۴ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش داد. در خاک لوم شنی کاربرد B_0K_{25} نیز عملکرد زیست توده گیاه را نسبت به شاهد ۵/۵ درصد



کاهش داد. اما کاربرد B_0K_{50} و B_0K_{100} عملکرد زیست‌توده گیاه را نسبت به شاهد به ترتیب $2/6$ و $0/1$ درصد افزایش داد. در حالی که در خاک لوم رسی کاربرد B_0K_{25} ، B_0K_{50} و B_0K_{100} نیز نتوانست عملکرد زیست‌توده گیاه را نسبت به شاهد افزایش دهد و این سه تیمار عملکرد زیست‌توده گیاه را به ترتیب $4/6$ ، 5 و 10 درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش دادند. کاربرد AB_1K_{100} در مقایسه با کاربرد B_0K_{75} ، موفق شد عملکرد زیست‌توده گیاه را در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب 106 و 92 درصد افزایش دهد. همچنین این تیمار عملکرد زیست‌توده گیاه را نسبت به تیمار مشابه بدون کاربرد بیوجار (تیمار B_0K_{100})، در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب 102 و 83 درصد افزایش داد.

تأثیر بیوجارها و کود پتاسیمی بر عملکرد دانه برنج در خاک‌های شالیزاری

با استناد به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر ساده سطوح بیوجار و سطوح کود پتاسیمی بر عملکرد دانه برنج در هر دو خاک در سطح احتمال یک درصد ($p < 0/01$) معنی‌دار شد. همچنین اثر متقابل سطوح بیوجار و سطوح کود پتاسیمی بر عملکرد دانه برنج در خاک‌های شالیزاری در سطح احتمال یک درصد ($p < 0/01$) تأثیر معنی‌داری داشتند (جدول ۳).

به این ترتیب نتایج مقایسه میانگین داده‌ها جدول (۴) نشان داد که، بیش‌ترین میزان عملکرد دانه برنج مربوط به کاربرد NB_1K_{100} است که عملکرد دانه برنج را در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب از $3/05$ و $2/84$ تن در هکتار در تیمار شاهد به $10/04$ و $9/33$ تن در هکتار افزایش داده است. در واقع این تیمار توانست عملکرد دانه برنج را در هر دو خاک $2/2$ برابر نسبت به تیمار شاهد افزایش دهد. کم‌ترین میزان عملکرد دانه برنج متعلق به تیمار B_0K_{25} است که عملکرد دانه برنج را در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب به $4/23$ و $3/84$ تن در هکتار معادل با 38 و 35 درصد نسبت به شاهد افزایش داد. همچنین تیمار B_0K_{100} بدون کاربرد بیوجار تنها توانست عملکرد دانه برنج را در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب 98 و 93 درصد نسبت به شاهد افزایش دهد. در خاک لوم شنی کاربرد NB_1K_{100} در مقایسه با کاربرد B_0K_{25} و B_0K_{100} ، موفق شد عملکرد دانه برنج را به ترتیب 142 و 69 درصد افزایش دهد. در خاک لوم رسی نیز این تیمار در مقایسه با کاربرد B_0K_{25} و B_0K_{100} ، توانست عملکرد دانه برنج را به ترتیب 137 و 65 درصد افزایش دهد. 1 درصد بیوجار اسیدی نسبت به 1 درصد بیوجار نرمال توانایی کم‌تری در افزایش عملکرد دانه برنج داشت. به‌طوری‌که کاربرد AB_1K_{100} ، در دو خاک لوم رسی و لوم شنی موفق به افزایش به ترتیب 147 و 151 درصدی عملکرد دانه برنج در قیاس با تیمار شاهد شد.

تأثیر بیوجارها و کود پتاسیمی بر پاسخ برنج در خاک‌های شالیزاری

با استناد به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر ساده سطوح بیوجار و سطوح کود پتاسیمی بر پاسخ برنج در هر دو خاک در سطح احتمال یک درصد ($p < 0/01$) معنی‌دار شد. همچنین اثر متقابل سطوح بیوجار و سطوح کود پتاسیمی بر پاسخ برنج در هر دو خاک در سطح احتمال یک درصد ($p < 0/01$) تأثیر معنی‌داری داشتند (جدول ۳). مقایسه میانگین داده‌ها جدول (۴)، چنین نشان داد که بیش‌ترین میزان پاسخ گیاه در دو خاک لوم رسی و لوم شنی در تیمار NB_1K_{100} اتفاق افتاد. این تیمار میزان پاسخ گیاه را در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب 10 و $9/75$ برابر نسبت به تیمار شاهد بدون کاربرد بیوجار و کود پتاسیم، افزایش داد. کم‌ترین میزان پاسخ گیاه در تیمار B_0K_{25} ، مشاهده گردید که توانست پاسخ گیاه را در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب 90 درصد و 89 درصد افزایش دهد. در بین تیمارهای مربوط به کاربرد کود پتاسیم به‌تنهایی، تیمار B_0K_{100} توانایی بالاتری در افزایش پاسخ گیاه داشت و توانست پاسخ گیاه را در هر دو خاک $2/4$ برابر افزایش دهد. تیمار NB_1K_{100} ، پاسخ گیاه را نسبت به تیمار کاربرد B_0K_{25} ، به ترتیب 10 و $9/9$ برابر در دو خاک لوم رسی و لوم شنی افزایش داد. همچنین این تیمار پاسخ گیاه را نسبت به تیمار مشابه اما بدون کاربرد بیوجار (B_0K_{100})، $3/1$ و $2/9$ برابر به ترتیب در دو خاک لوم رسی و لوم شنی افزایش داد. در بین تیمارهای مربوط به کاربرد 1 درصد بیوجار اسیدی نیز، کاربرد AB_1K_{100} در افزایش پاسخ گیاه موفق‌تر عمل کرد و توانست پاسخ گیاه را نسبت به شاهد به ترتیب $9/2$ و $8/5$ برابر در دو خاک لوم رسی و لوم شنی افزایش دهد.

تأثیر بیوجارها و کود پتاسیمی بر غلظت پتاسیم قابل استخراج در خاک‌های شالیزاری

با بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر ساده سطوح بیوجار و سطوح کود پتاسیمی و همچنین اثر متقابل آن‌ها بر غلظت پتاسیم قابل استخراج در هر دو خاک در سطح احتمال یک درصد ($p < 0/01$) معنی‌دار شد (جدول ۵).

در پایان دوره کشت برنج و بعد از برداشت گیاه، غلظت شکل‌های مختلف پتاسیم در خاک تعیین گردید. با استناد به نتایج مقایسه میانگین که در شکل (۳) نشان داده شده است، تأثیر افزودن مقادیر مختلف بیوجارها (B_0 ، NB_1 ، AB_1) به‌همراه مقادیر مختلف کود پتاسیمی (K_0 ، K_{25} ، K_{50} ، K_{75} ، K_{100}) را بر پتاسیم قابل استخراج در دو خاک لوم رسی و لوم شنی در طول دوره کشت برنج نشان می‌دهند. همان‌طور که

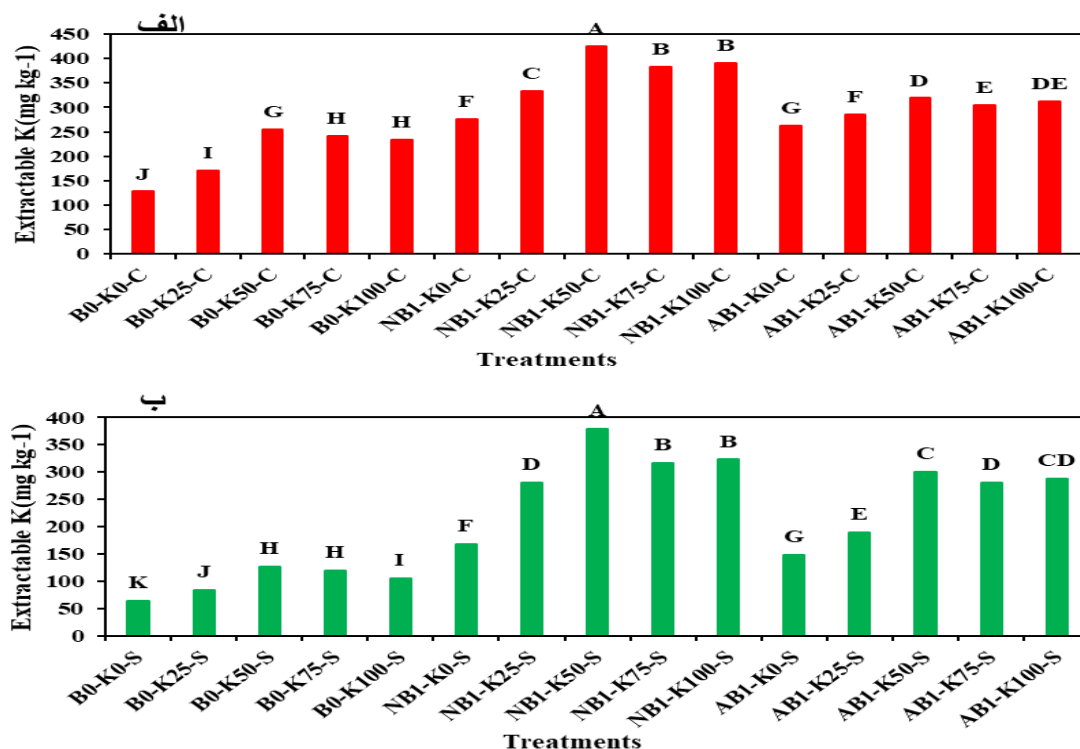
از شکل (۳ الف) پیداست در خاک لوم رسی کاربرد کود پتاسیمی در مقادیر K_{25} ، K_{50} ، K_{75} و K_{100} به ترتیب سبب افزایش ۳۳، ۱۰۰، ۸۸ و ۸۳ درصدی غلظت پتاسیم قابل استخراج نسبت به شاهد شد. با مصرف بیوجارها صرف نظر از مقدار و نوع آن، غلظت پتاسیم قابل استخراج نسبت به تیمار شاهد افزایش معنی داری یافت. به این ترتیب که در تیمارهای AB_1 و NB_1 که صرفاً حاوی بیوجار بودند میزان پتاسیم قابل استخراج به ترتیب تقریباً $1/2$ و $1/1$ برابر شد. در کاربرد توامان بیوجار و کود پتاسیمی بیشترین غلظت پتاسیم قابل استخراج به میزان $425/5$ میلی گرم در کیلوگرم با افزایش $2/3$ برابری برای تیمار NB_1K_{50} ثبت شد. شایان توجه است که غلظت پتاسیم قابل استخراج در تیمارهای NB_1K_{75} و NB_1K_{100} نسبت به NB_1K_{50} کاهش معنی داری نشان داد. همچنین، غلظت پتاسیم قابل استخراج در تمامی تیمارهایی که ۱ درصد بیوجار اسیدی دریافت کردند از تیمارهای متناظر با ۱ درصد بیوجار نرمال به طور معنی داری کمتر بود. ۱ درصد بیوجار اسیدی در تیمار مشابه (AB_1K_{50})، مقدار پتاسیم قابل استخراج را نسبت به شاهد $1/4$ برابر افزایش داد.

جدول ۵. نتایج تجزیه واریانس اثر بیوجار و کود پتاسیمی بر غلظت پتاسیم قابل جذب، پتاسیم غیرقابل تبادل و پتاسیم کل در دو خاک لوم رسی و

لوم شنی شالیزاری پس از برداشت

منابع تغییرات	درجه آزادی	غلظت پتاسیم قابل جذب	غلظت پتاسیم غیر قابل تبادل	غلظت پتاسیم کل
		لوم رسی	لوم شنی	لوم رسی
سطوح بیوجار	۲	۹۲۴۸۹**	۱۲۶۸۷۲۷**	۱۶۰۳۶۵۲**
سطوح کود پتاسیمی	۴	۱۸۱۱۱/۹**	۲۸۵۱۶**	۳۶۷۹۶۹**
سطوح بیوجار × سطوح کود پتاسیمی	۸	۱۲۱۴/۹**	۲۹۲۲**	۴۵۷۳۶**
خطا	۲۸	۵۱/۴	۲۹۸	۱۳۲۸۶
ضریب تغییرات %		۲/۴۹	۳/۵۶	۰/۹۷

** معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد، * معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد و ns عدم تفاوت معنی دار



شکل ۳. مقایسه میانگین تاثیر بیوجار و کود پتاسیمی بر غلظت پتاسیم قابل استخراج در خاکهای (الف) لوم رسی و (ب) لوم شنی. ستون هایی که دارای حداقل یک حرف مشابه باشند نشان دهنده عدم تفاوت معنی دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD می باشد. (NB: بیوجار نرمال، AB: بیوجار اسیدی؛ 0: بدون مصرف بیوجار، 1 درصد بیوجار نرمال، 1 درصد AB: مصرف ۱ درصد بیوجار اسیدی، K0: بدون مصرف کود پتاسیم، K25: مصرف ۲۵ درصد توصیه کودی پتاسیم، K50: مصرف ۵۰ درصد توصیه کودی پتاسیم، K75: مصرف ۷۵ درصد توصیه کودی پتاسیم، K100: مصرف ۱۰۰ درصد توصیه کودی پتاسیم)

در خاک لوم شنی غلظت پتاسیم قابل استخراج در تیمارهای K_{25} ، K_{50} ، K_{75} و K_{100} نسبت به شاهد به ترتیب ۳۳، ۱۰۰، ۸۹ و ۶۷ درصد افزایش یافت (شکل ۳ ب). غلظت پتاسیم قابل استخراج در تیمارهای NB_1 و AB_1 به ترتیب نسبت به تیمار شاهد تقریباً $1/7$ و $1/3$ برابر شد. بیشترین غلظت پتاسیم قابل استخراج با افزایش ۵ برابری برای تیمار NB_1K_{50} به دست آمد و این مقدار برابر $378/9$ میلی گرم در کیلوگرم بود. لازم به ذکر است افزایش کاربرد کود پتاسیمی در تیمارهای NB_1K_{75} و NB_1K_{100} نسبت به NB_1K_{50} منجر به کاهش معنی داری در غلظت پتاسیم قابل استخراج شد. مشابه با خاک لوم رسی، غلظت پتاسیم قابل استخراج در تمامی تیمارهایی که ۱ درصد بیوپار اسیدی دریافت کردند از تیمارهای متناظر که ۱ درصد بیوپار نرمال دریافت کردند به طور معنی داری کمتر بود. به طوری که در تیمار مشابه (AB_1K_{50})، مقدار پتاسیم قابل استخراج را $3/7$ برابر نسبت به شاهد افزایش داد.

تأثیر بیوپارها و کود پتاسیمی بر غلظت پتاسیم غیر قابل تبادل در خاکهای شالیزاری

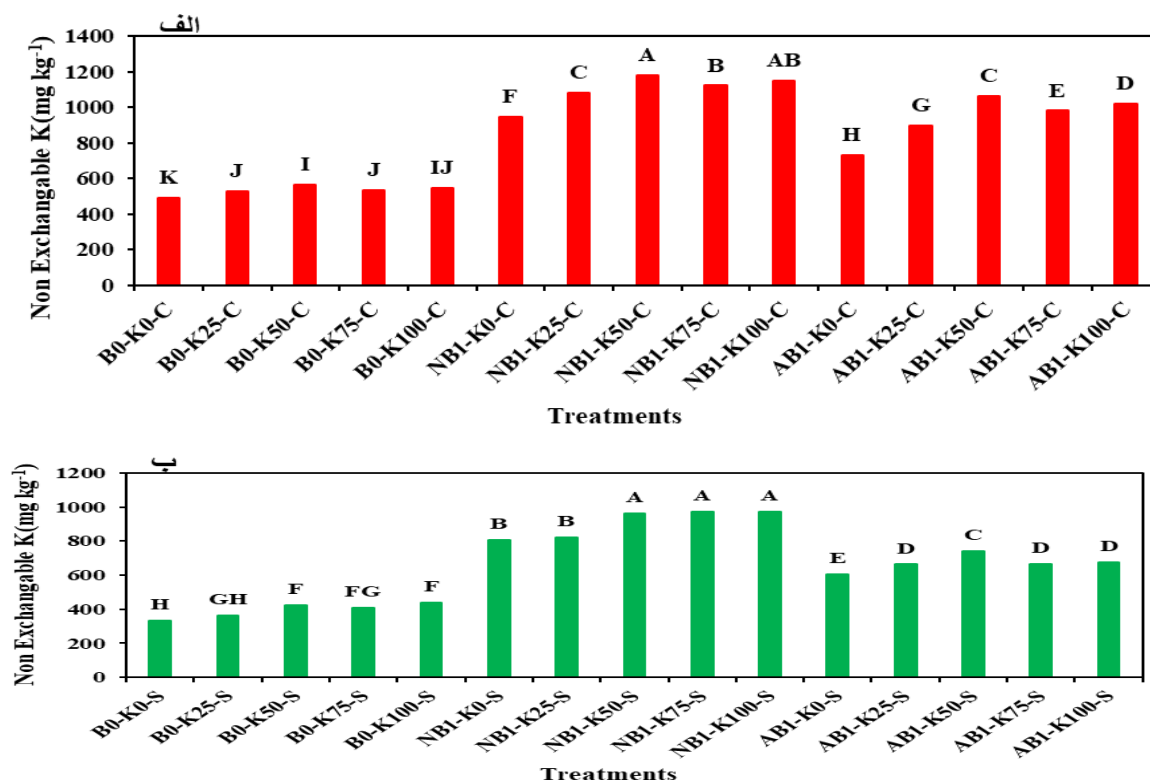
با بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر ساده سطوح بیوپار و سطوح کود پتاسیمی بر غلظت پتاسیم غیر قابل تبادل در هر دو خاک در سطح احتمال یک درصد ($p < 0/01$) تأثیر معنی داری داشتند. همچنین اثر متقابل آن‌ها نیز بر غلظت پتاسیم غیر قابل تبادل در خاک لوم رسی در سطح احتمال یک درصد ($p < 0/01$) و در خاک لوم شنی در سطح احتمال پنج درصد ($p < 0/05$) معنی دار بوده است (جدول ۵).

شکل (۴) تأثیر افزودن مقادیر مختلف بیوپارها (B_0 ، NB_1 ، AB_1) به همراه مقادیر مختلف کود پتاسیمی (K_0 ، K_{25} ، K_{50} ، K_{75} ، K_{100}) را بر پتاسیم غیر قابل تبادل در دو خاک لوم رسی و لوم شنی در طول دوره کشت برنج نشان می‌دهند. همان‌طور که از شکل (۴ الف) پیداست در خاک لوم رسی، غلظت پتاسیم غیر تبدلی با افزایش میزان کود مصرفی در تیمارهای K_{25} ، K_{50} ، K_{75} و K_{100} افزایش محسوسی یافت و تیمار K_{50} بیشترین افزایش را با ۱۵ درصد، نسبت به تیمار شاهد از خود نشان داد. تیمارهای NB_1 و AB_1 به ترتیب سبب افزایش ۹۳ و ۴۹ درصدی غلظت پتاسیم غیر تبدلی نسبت به تیمار شاهد شد. تیمار NB_1K_{50} ، توانایی بیشتری نسبت به سایر تیمارها در افزایش مقدار پتاسیم غیر قابل تبادل داشت. به طوری که مقدار پتاسیم غیر قابل تبادل را از $489/4$ میلی گرم بر کیلوگرم در تیمار شاهد به $1177/3$ میلی گرم بر کیلوگرم افزایش داد ($1/4$ برابر افزایش نسبت به تیمار شاهد). در هر گروه از تیمارهایی که ۱ درصد بیوپار نرمال یا بیوپار اسیدی دریافت کردند، با افزایش میزان کود پتاسیمی کاربردی به بیش از ۵۰ درصد منجر به کاهش غلظت پتاسیم غیر تبدلی شد. همچنین غلظت پتاسیم غیر تبدلی در تمامی تیمارهایی که ۱ درصد بیوپار اسیدی دریافت کردند به طور معنی داری کمتر از تیمار متناظر با ۱ درصد بیوپار نرمال بود. تیمار AB_1K_{50} نیز در بین تیمارهای مربوط به کاربرد ۱ درصد بیوپار اسیدی، عملکرد بهتری داشت و توانست مقدار پتاسیم غیر قابل تبادل را به 1063 میلی گرم بر کیلوگرم برساند ($1/1$ برابر افزایش نسبت به تیمار شاهد) (شکل ۴ الف).

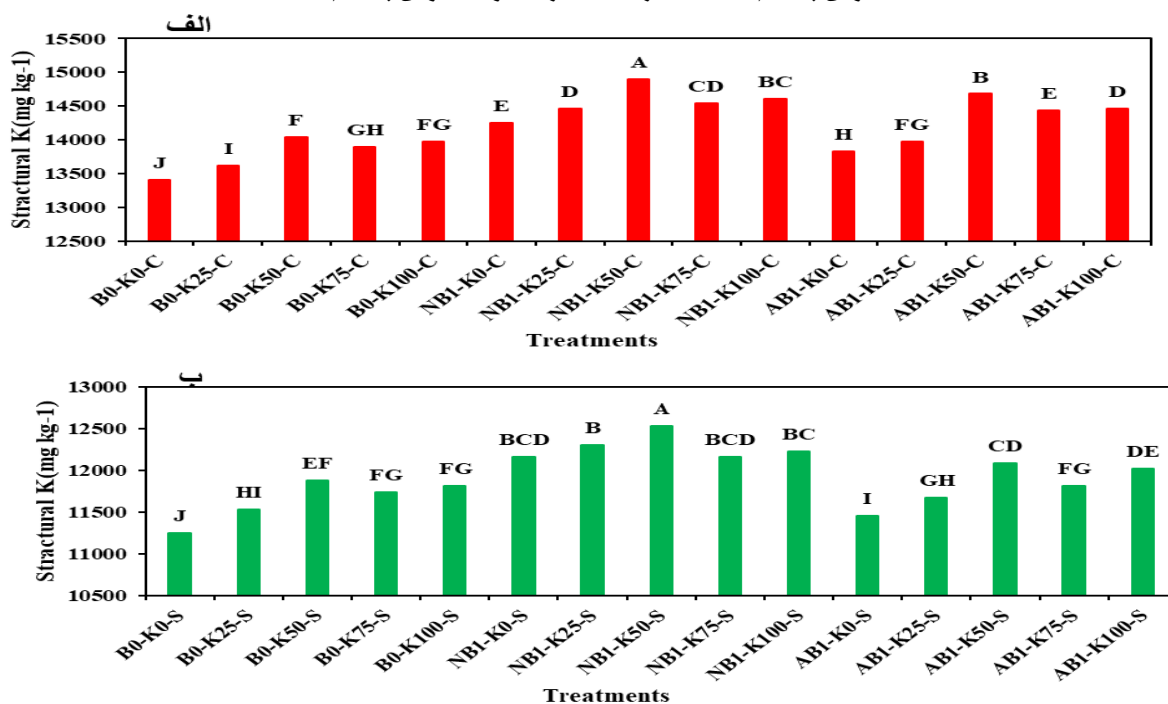
در خاک لوم شنی، غلظت پتاسیم غیر تبدلی با افزایش میزان کود کاربردی در تیمارهای K_{25} ، K_{50} ، K_{75} و K_{100} به طور معنی داری افزایش یافت. به طوری که تیمار B_0K_{50} با افزایش ۳۵ درصدی نسبت به شاهد، نسبت به سایر مقادیر کود پتاسیمی موفق تر عمل کرد. در تیمارهای NB_1 و AB_1 به ترتیب افزایش $1/4$ و $0/8$ برابری غلظت پتاسیم غیر تبدلی نسبت به تیمار شاهد مشاهده شد. در خاک لوم شنی در همه تیمارهای مربوط به کاربرد بیوپار، افزایش مقدار کود پتاسیمی کاربردی از B_0K_{25} تا B_0K_{100} ، منجر به افزایش مقدار پتاسیم غیر قابل تبادل نسبت به شاهد شد. به طوری که از $333/33$ میلی گرم بر کیلوگرم در تیمار شاهد به $975/44$ میلی گرم بر کیلوگرم در تیمار NB_1K_{100} افزایش یافت ($1/9$ برابر افزایش نسبت به تیمار شاهد). لازم به ذکر است غلظت پتاسیم غیر تبدلی در تیمارهای حاوی ۱ درصد بیوپار اسیدی نسبت به کلیه تیمارهای متناظر با ۱ درصد بیوپار نرمال به طور معنی داری کمتر است (شکل ۴ ب).

تأثیر بیوپارها و کود پتاسیمی بر غلظت پتاسیم کل در خاکهای شالیزاری

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که، اثر ساده سطوح بیوپار و سطوح کود پتاسیمی بر غلظت پتاسیم کل در هر دو خاک در سطح احتمال یک درصد ($p < 0/01$) تأثیر معنی داری داشتند. همچنین اثر متقابل آن‌ها نیز بر غلظت پتاسیم کل در خاک لوم رسی در سطح احتمال پنج درصد ($p < 0/05$) و در خاک لوم شنی در سطح احتمال یک درصد ($p < 0/01$) معنی دار بوده است (جدول ۵).



شکل ۴. مقایسه میانگین تأثیر بیوجار و کود پتاسیمی بر غلظت پتاسیم غیر قابل تبادل در خاک‌های (الف) لوم رسی و (ب) لوم شنی. ستون‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشابه باشند نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD می‌باشد. (NB: بیوجار نرمال، AB: بیوجار اسیدی؛ 0: بدون مصرف بیوجار، 1 درصد NB: مصرف 1 درصد بیوجار نرمال، 1 درصد AB: مصرف 1 درصد بیوجار اسیدی، K0: بدون مصرف کود پتاسیم، K25: مصرف ۲۵ درصد توصیه کودی پتاسیم، K50: مصرف ۵۰ درصد توصیه کودی پتاسیم، K75: مصرف ۷۵ درصد توصیه کودی پتاسیم، K100: مصرف ۱۰۰ درصد توصیه کودی پتاسیم)



شکل ۵- مقایسه میانگین تأثیر بیوجار و کود پتاسیمی بر غلظت پتاسیم کل در خاک‌های (الف) لوم رسی و (ب) لوم شنی. ستون‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشابه باشند نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD می‌باشد. (NB: بیوجار نرمال، AB: بیوجار اسیدی؛ 0: بدون مصرف بیوجار، 1 درصد NB: مصرف 1 درصد بیوجار نرمال، 1 درصد AB: مصرف 1 درصد بیوجار اسیدی، K0: بدون مصرف کود پتاسیم، K25: مصرف ۲۵ درصد توصیه کودی پتاسیم، K50: مصرف ۵۰ درصد توصیه کودی پتاسیم، K75: مصرف ۷۵ درصد توصیه کودی پتاسیم، K100: مصرف ۱۰۰ درصد توصیه کودی پتاسیم)

شکل (۵) تأثیر افزودن مقادیر مختلف بیوچارها (B_0 , NB_1 , AB_1) به همراه مقادیر مختلف کود پتاسیمی (K_0 , K_{25} , K_{50} , K_{75} , K_{100}) را بر پتاسیم کل در دو خاک لوم رسی و لوم شنی در طول دوره کشت برنج نشان می‌دهند. همان‌طور که از شکل (۵ الف) پیداست در خاک لوم رسی کاربرد کود پتاسیمی در مقادیر K_{25} , K_{50} , K_{75} و K_{100} به ترتیب سبب افزایش $1/6$ ، $4/8$ ، $3/7$ و $4/2$ درصدی غلظت پتاسیم کل نسبت به شاهد شد. با مصرف بیوچارها صرف نظر از مقدار و نوع آن، غلظت پتاسیم کل نسبت به تیمار شاهد افزایش معنی‌داری یافت. به این ترتیب که در تیمارهای NB_1 و AB_1 که صرفاً حاوی بیوچار بودند میزان پتاسیم کل به ترتیب تقریباً $6/3$ و $3/2$ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. در کاربرد توامان بیوچار و کود پتاسیمی بیشترین غلظت پتاسیم کل به میزان 14894 میلی‌گرم در کیلوگرم با افزایش $11/1$ درصدی برای تیمار NB_1K_{50} ثبت شد. غلظت پتاسیم کل در تیمار AB_1K_{50} برابر با 14681 میلی‌گرم در کیلوگرم بود که $9/5$ درصد نسبت به شاهد افزایش داشت که در مقایسه با NB_1K_{100} به‌طور معنی‌داری کمتر بود. همچنین، غلظت پتاسیم کل در تمامی تیمارهایی که ۱ درصد بیوچار اسیدی دریافت کردند از تیمارهای متناظر با ۱ درصد بیوچار نرمال به‌طور معنی‌داری کمتر بود.

در خاک لوم شنی غلظت پتاسیم کل در تیمارهای K_{25} , K_{50} , K_{75} و K_{100} نسبت به شاهد به ترتیب $2/5$ ، $5/6$ ، $4/3$ و $4/9$ درصد افزایش یافت (شکل ۵ ب). غلظت پتاسیم کل در تیمارهای NB_1 و AB_1 به ترتیب نسبت به تیمار شاهد تقریباً $8/1$ و $1/9$ درصد افزایش یافت. بیشترین غلظت پتاسیم کل با افزایش $11/4$ درصدی برای تیمار NB_1K_{50} به دست آمد و این مقدار برابر 12531 میلی‌گرم در کیلوگرم بود. لازم به ذکر است افزایش کاربرد کود پتاسیمی در تیمارهای NB_1K_{75} و NB_1K_{100} نسبت به NB_1K_{50} منجر به کاهش معنی‌داری در غلظت پتاسیم کل شد. مشابه با خاک لوم رسی، غلظت پتاسیم کل در تمامی تیمارهایی که ۱ درصد بیوچار اسیدی دریافت کردند از تیمارهای متناظر که ۱ درصد بیوچار نرمال دریافت کردند به‌طور معنی‌داری کمتر بود.

بحث

در گذشته هنگامی که محصول برنج پایین بود، بیشتر خاک‌ها توانایی تأمین پتاسیم لازم برای سطوح پایین تولید را داشتند. لذا در بیشتر آزمایشات کودی پاسخ به کود پتاسیم منفی یا اندک بود. در ایران نیز آزمایشات کودی پتاسیم در شالیزارها نتایج مشابهی داشت. در اثر رواج ارقام پرمحصول و استفاده غیر متعادل از کود شیمیایی و عوامل دیگر کمبود پتاسیم تدریجاً به‌عنوان عامل محدودکننده تولید در خاک‌هایی که قبلاً کمبودی نداشتند آشکار گردید. افزایش عملکرد ماده خشک حاصل از شیوه جدید تولید در شالیزارها، غالباً باعث تشدید خروج پتاسیم از شالیزارها و منفی شدن موازنه ورود و خروج پتاسیم گردید. این روند تدریجاً توانایی عرضه پتاسیم خاک‌ها را کاهش داده و زمینه‌ساز بروز کمبود پتاسیم شد. با وقوع این تحولات در شالیزارها، گزارشات مربوط به پاسخ مثبت برنج به کود پتاسیم نیز به تدریج افزایش یافت (Tofighi, 1999). غلظت پتاسیم کمتر از ۲ درصد در کل اندام هوایی در طول دوره رشد رویشی نشان‌دهنده کمبود پتاسیم در برنج و پاسخ آن به کود پتاسیمی محتمل است (Golestanifard et al., 2020). کاربرد کود پتاسیمی به‌تنهایی در مقادیر مختلف، غلظت پتاسیم زیست‌توده برنج را کمتر از ۲ درصد نگه داشت. در واقع حتی استفاده از ۲۰۰ کیلوگرم پتاسیم در هکتار که بیش از مقدار مرسوم کود مصرفی (۱۰۰-۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) در اراضی شالیزاری شمال ایران است قادر به برطرف کردن کمبود پتاسیم در برنج نیست. از طرفی کشاورزان قدرت خرید مقادیر مرسوم کود پتاسیمی را ندارند، بنابراین استفاده توامان بیوچار و کود پتاسیمی می‌تواند گزینه مناسبی برای بهبود وضعیت پتاسیم در اراضی شالیزاری شمال ایران باشد. البته کاربرد تیمارهای NB_1 و AB_1 به‌تنهایی در هر دو خاک مورد مطالعه، غلظت پتاسیم زیست‌توده برنج را همچنان کمتر از ۲ درصد نگه داشت ولی کاربرد NB_1 به همراه مقادیر مختلف کود پتاسیمی در هر دو خاک غلظت پتاسیم زیست‌توده برنج را به $2 \leq$ درصد افزایش داد. همچنین لازم به ذکر است، علی‌رغم غلظت بیشتر پتاسیم قابل استخراج در خاک لوم شنی در قیاس با خاک لوم رسی، غلظت پتاسیم زیست‌توده برنج در خاک لوم رسی بیشتر از خاک لوم شنی است، احتمالاً گیاه رشد یافته در خاک لوم رسی پتاسیم مورد نیاز خود را علاوه بر پتاسیم قابل استخراج از پتاسیم غیرقابل تبادل نیز تأمین کرده است (Mizutani et al., 2024). نشان دادند که بخشی از پتاسیم غیرقابل تبادل صرف نظر از غلظت پتاسیم قابل تبادل، قابل آزادسازی است. آن‌ها نشان دادند در برخی خاک‌های مورد مطالعه آزاد شدن پتاسیم از بخش غیرقابل تبادل تحت تأثیر کوددهی نیست و باوجود بالا بودن پتاسیم قابل تبادل، همچنان پتاسیم از بخش غیرقابل تبادل آزاد و در اختیار گیاه قرار می‌گیرد.

همان‌گونه که در شکل‌های (۱) مشاهده می‌شود بیش‌ترین غلظت پتاسیم زیست‌توده گیاه مربوط به تیمار NB_1K_{50} است که غلظت پتاسیم زیست‌توده را در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب ۳ و $5/2$ برابر نسبت به شاهد افزایش داد. بیش‌ترین غلظت پتاسیم دانه

نیز مربوط به کاربرد NB_1K_{50} است. چنان که توانست غلظت پتاسیم دانه را در دو خاک لوم رسی $46/2$ درصد و در خاک لوم شنی $54/1$ درصد نسبت به شاهد افزایش دهد (شکل های ۲). به طور کلی پاسخ گیاه نیز به کاربرد 1 درصد بیوجار نرمال و 1 درصد بیوجار اسیدی در هر دو خاک مثبت بود و نتایج بدست آمده در (جدول ۴) نشان داد که بیشترین میزان پاسخ گیاه به کاربرد 1 درصد بیوجار نرمال به همراه کود پتاسیم، مربوط به تیمار NB_1K_{100} بود که می توان به این نتیجه رسید با افزایش سطح کاربرد بیوجار به همراه کود پتاسیمی، پاسخ برنج نیز در هر دو خاک افزایش یافت. در این تیمار پاسخ گیاه در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب 10 و $9/75$ برابر نسبت به شاهد افزایش یافت. بیوجار به علت سطح ویژه بالایی که دارد موجب تغییر در تخلخل خاک و توزیع اندازه ذرات آن می شود و می تواند آب و عناصر غذایی را در سطح خود نگه دارد و به تدریج در اختیار ریشه گیاه قرار دهد (Sun et al., 2014). در واقع بیوجارها به عنوان یک حامل مناسب برای افزایش تغذیه پتاسیم گیاه عمل می کنند، زیرا استفاده از 30000 کیلوگرم در هکتار بیوجار، 136 کیلوگرم در هکتار به کل پتاسیم در خاک اضافه می کند که بیشتر آن در بخش های پتاسیم موجود در گیاه می باشد (Bilias et al., 2023). مطالعات کمی تا کنون بر روی اثرات بیوجار بر بهبود وضعیت پتاسیم محصول و عملکرد متمرکز شده اند. (Biederman and Harpole (2013). بیان کردند بیوجار باعث افزایش محتوای پتاسیم در گیاهان می شود. برخلاف سایر عناصری که ممکن است تبخیر شوند (به عنوان مثال N) یا به اشکال نسبتاً نامحلول تبدیل شوند (مانند Mg)، پتاسیم تا حد زیادی حفظ شده و به نمک های حاوی پتاسیم با حلالیت بالا تبدیل می شود. مطالعات اخیر نشان داده است که استفاده از بیوجار تولید شده از زیست توده غنی از پتاسیم به سرعت جذب پتاسیم توسط گیاهان را افزایش می دهد. بنابراین، چنین بیوجاری می تواند، جهت تامین پتاسیم خاک، به عنوان یک منبع جایگزین و سازگار با محیط زیست عمل کند و یک مسیر عرضه پتاسیم به آسانی قابل جذب را برای گیاهان فراهم سازد (Bilias et al., 2023) که این نتایج توسط (Asad Karim et al. (2017 تأیید شده است. (Oram et al. (2014، گزارش دادند که کاربرد بیوجار در ترکیب با کودهای معدنی باعث افزایش عملکرد بقولات و محتوای پتاسیم آن ها می شود. این را می توان به عوامل متعددی مانند بهبود حاصلخیزی خاک، استفاده کارآمد از عناصر غذایی، ساختمان بهتر خاک و ظرفیت نگهداری آب نسبت داد. در این زمینه بیوجار می تواند عملکرد محصول را با افزایش کارایی استفاده از پتاسیم افزایش دهد و بنابراین نیاز به کودهای شیمیایی پتاسیم را کاهش داده و سلامت خاک را حفظ کند. (Zhao et al. (2020، اثرات هفت تیمار بیوجار کاه ذرت (شاهد، 5 تن در هکتار، 10 تن در هکتار، 15 تن در هکتار، 20 تن در هکتار، 25 تن در هکتار، 30 تن در هکتار) را به صورت یک آزمایش مزرعه ای طولانی مدت در خاک قلیایی تحت کشت ذرت، مورد مطالعه قرار دادند و نتایج حاصل از آن نشان داد که غلظت پتاسیم گیاهان ذرت با کاربرد بیوجار افزایش یافت و بیشترین غلظت پتاسیم در گیاهان ذرت با نرخ 20 تن در هکتار اتفاق افتاد. در مقابل، غلظت پتاسیم ذرت در تیمار 25 و 30 تن در هکتار کاهش یافت. (El-Naggar et al. (2019 و (Bilias et al. (2023 تأکید کرد که ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک مانند pH، درصد مواد آلی خاک، ظرفیت نگهداری آب و پایداری خاکدانه ها به شدت تحت تأثیر افزودن بیوجار هستند. هنگامی که بیوجار در خاک اعمال می شود، این ویژگی های خاک را تغییر می دهد که به نوبه خود با بهبود دسترسی عناصر غذایی و کاهش پتانسیل آبشویی آن ها، بر حاصلخیزی خاک و رشد گیاه تأثیر زیادی می گذارد. بنابراین، پتانسیل تامین پتاسیم بیوجار به طور غیرمستقیم با بهبود طولانی مدت خواص فیزیکی و شیمیایی خاک پس از کاربرد بیوجار مرتبط است. به عنوان مثال، پتانسیل بیوجار برای حفظ پتاسیم از طریق افزایش CEC، در دسترس بودن پتاسیم را جهت جذب توسط گیاه افزایش داد (Bilias et al., 2023).

تاکنون به خوبی ثابت شده است که مکانیسم هایی که دسترسی گیاهان به پتاسیم را کنترل می کنند توسط یک تعادل شیمیایی دینامیکی تعیین می شوند که سه شکل متمایز پتاسیم را در خاک ها (پتاسیم محلول، قابل تبادل و پتاسیم غیرقابل تبادل) که تصور می شود برای گیاه قابل جذب باشند به هم متصل می کند (Bilias et al., 2023). (Li et al. (2009، گزارش کردند که عواملی مانند نوع خاک، بافت، ظرفیت ذاتی تامین پتاسیم خاک و کانی های رسی غالب می توانند بر راندمان پتاسیم اضافه شده تأثیر بگذارند. همچنین، وجود کانی های رسی $2:1$ مانند ایلایت یا ورمیکولایت بر توانایی خاک برای آزاد کردن یا جذب پتاسیم غیرقابل تبادل تأثیر می گذارد و بنابراین در دسترس بودن پتاسیم را زمانی که بارگذاری پتاسیم قابل تبادل ناکافی است، تعیین می کند (Bilias et al., 2023).

با مطالعه نتایج بدست آمده پس از برداشت محصول (شکل های ۳)، مشاهده می شود که افزودن مقادیر مختلف بیوجارها (B_0 , NB_1 , AB_1) به همراه مقادیر مختلف کود پتاسیمی (K_0 , K_{25} , K_{50} , K_{75} , K_{100}) باعث افزایش پتاسیم قابل استخراج در هر دو خاک شدند. به طوری که تیمار NB_1K_{50} در مقایسه با سایر مقادیر پتاسیم اعمال شده همراه با 1 درصد بیوجار نرمال، موفق تر عمل کرد و توانست غلظت پتاسیم قابل استخراج را در هر دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب $2/3$ و 5 برابر نسبت به شاهد افزایش دهد. با مشاهده نتایج موجود در (شکل های ۴)، غلظت پتاسیم غیرقابل تبادل نیز در خاک لوم شنی با کاربرد NB_1K_{100} ، غلظت پتاسیم غیرقابل تبادل را $1/9$ برابر نسبت

به شاهد افزایش داد. در خاک لوم رسی اما کاربرد NB_1K_{50} ، موفق‌ترین تیمار در افزایش شکل پتاسیم غیرقابل تبادل بود و توانست غلظت پتاسیم غیرقابل تبادل را $1/4$ برابر نسبت به شاهد افزایش دهد. به‌طور کلی، پتاسیم محلول در آب (KNO_3 ، K_2SO_4 ، KCl و KNO_2) موجود در بیوپچار ۵۰ تا ۵۸ درصد کل پتاسیم موجود در بیوپچار را تشکیل می‌دهد. پتاسیم موجود در کانی که تجزیه آن دشوار است و شامل پتاسیم بین لایه‌ای و پتاسیم کمپلکس شده است، ۴۲ تا ۵۰ درصد باقی‌مانده را تشکیل می‌دهد. بیوپچار، حاوی مقدار زیادی پتاسیم فعال شده، می‌تواند به‌عنوان یک عامل اصلاح‌کننده خاک در جهت تأمین پتاسیم برای محصولات در کوتاه مدت استفاده شود. از آنجایی که پتاسیم در خاک توسط گیاهان تخلیه می‌شود، پتاسیم موجود در بیوپچار به تدریج در خاک رها می‌شود و توسط آن جذب و تکمیل‌کننده پتاسیم موجود در خاک می‌شود. یون‌های پتاسیم موجود در بیوپچار توسط مکان‌های دارای بار منفی در کلوئیدهای خاک جذب می‌شوند تا تبدیل به پتاسیم قابل تبادل شوند و برای جذب و استفاده توسط گیاه دوباره به خاک برگردند. یون‌های پتاسیم هم‌چنین می‌توانند در کانی‌های رسی به‌عنوان پتاسیم غیرقابل تبادل با عمل میکروب‌های خاک، به‌عنوان منابع و مخازن پتاسیم موجود در خاک تثبیت شوند تا در هنگام کمبود مجدد رها شوند و توسط گیاهان جذب شوند (Liu et al., 2018). Wang et al. (2018) گزارش دادند که کاربرد بیوپچار می‌تواند جذب پتاسیم و رشد محصولات را تسهیل کند. آن‌ها در مطالعه‌ای با عنوان اثرات کاربرد بیوپچار بر دینامیک پتاسیم خاک و جذب محصول، به این نتیجه دست یافتند که کاربرد بیوپچار قابلیت دسترسی پتاسیم را در هر دو خاک مورد مطالعه پس از اولین دوره رشد افزایش داد. افزایش پتاسیم در خاک الفی سول عمدتاً در پتاسیم محلول و قابل تبادل مشاهده شد که علت آن مربوط به ظرفیت تبادل کاتیونی بالاتر این خاک بوده است در حالی که در خاک انتی‌سول، افزایش بیش‌تر در شکل غیرقابل تبادل پتاسیم بود که می‌تواند مربوط به محتوای بیشتر کانی‌های ۱:۲ در این خاک باشد که تثبیت پتاسیم را تسهیل می‌کند.

با تکیه بر نتایج بدست آمده در جدول (۴) مشاهده شد که عملکرد و اجزای عملکرد برنج نسبت به کاربرد ۱ درصد بیوپچار نرمال و ۱ درصد بیوپچار اسیدی به‌تنهایی یا به‌همراه کود پتاسیمی، پاسخ مثبت دادند. همان‌گونه که در جدول (۴) مشاهده می‌شود کاربرد NB_1K_{50} ارتفاع گیاه را در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب $16/4$ و $22/7$ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. بیش‌ترین وزن هزار دانه نیز در هر دو خاک متعلق به کاربرد NB_1K_{50} است که توانست وزن هزار دانه را در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب $36/9$ و $37/2$ درصد نسبت به شاهد افزایش دهد (جدول ۴). بیش‌ترین عملکرد زیست‌توده گیاه مربوط به کاربرد AB_1K_{100} بود که عملکرد زیست‌توده در دو خاک لوم رسی و لوم شنی را به ترتیب ۸۱ و ۸۳ درصد نسبت به شاهد بدون کاربرد بیوپچار و کود پتاسیم افزایش داد (جدول ۴). هم‌چنین طبق نتایج بدست آمده در (جدول ۴)، بیش‌ترین میزان عملکرد دانه برنج مربوط به کاربرد NB_1K_{100} است که موفق شد عملکرد دانه برنج را در دو خاک لوم رسی و لوم شنی $2/2$ برابر نسبت به شاهد افزایش دهد. طبق نتایج بدست آمده می‌توان دریافت که کاربرد ۱ درصد بیوپچار نرمال و ۱ درصد بیوپچار اسیدی به‌تنهایی و یا به‌همراه کود پتاسیمی اثرات مثبتی بر روی رشد، عناصر غذایی و عملکرد گیاه دارد و باعث افزایش عملکرد و بهبود ارتفاع، وزن هزار دانه گیاه و افزایش تولید محصول می‌شود. زیرا به‌دلیل سطح ویژه بالا، بار سطحی منفی و تخلخل زیاد و کربن پایدار موجود در آن می‌تواند باعث بهبود و افزایش خواص شیمیایی خاک از جمله pH، CEC و کربن آلی شده و از تلفات آن‌ها جلوگیری کند، در نتیجه باعث افزایش بهره‌وری کود مصرفی خواهد شد. (Abu Zied Amin 2016) در یک آزمایش گلدانی، اثرات بیوپچار تولید شده از بلال ذرت را بر برخی خواص شیمیایی و وضعیت پتاسیم در یک خاک شنی آهکی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که افزودن بیوپچار به این خاک منجر به افزایش قابل توجهی در pH خاک، مواد آلی (OM)، پتاسیم محلول و پتاسیم قابل تبادل شد. هم‌چنین وزن خشک و محتوای پتاسیم گیاهان گندم کشت شده در خاک شنی آهکی با افزودن بیوپچار به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. استفاده از بیوپچار در سطح 6000 کیلوگرم در هکتار به این خاک منجر به افزایش وزن تر و خشک بوته گندم به ترتیب $96/8$ و $123/5$ درصد نسبت به تیمار شاهد شد. (Masulili and Utomo 2010) در مطالعات خود بیان کردند که با افزودن بیوپچار سبوس و کاه برنج به خاک تحت کشت برنج، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و هم‌چنین غلظت عناصر غذایی در خاک بهبود یافت و از این طریق موجب بهبود رشد برنج، افزایش ارتفاع بوته، تعداد پنجه، تعداد ساقه بارور و زیست توده کل برنج شده است. Major et al. (2010)، به این نتیجه دست یافتند که افزودن بیوپچار به میزان ۱۱ تن در هکتار در ابتدای آزمایش و قبل از کاشت، موجب افزایش عملکرد برنج به میزان ۷۵ درصد در طی دو سال و بعد از ۴ فصل کشت شده است. (Huang et al. 2019) در مطالعه خود نشان دادند که کاربرد بیوپچار در اراضی شالیزاری در طی دو سال عملکرد دانه برنج را بین ۴ تا ۱۰ درصد نسبت به شاهد افزایش داده است. فلاح و همکاران (۱۳۹۳)، در مطالعه خود به این نتیجه دست یافتند که کاربرد ۶ گرم بیوپچار کاه برنج به‌همراه ۳۰ گرم کمپوست در کیلوگرم خاک، موجب شد وزن هزار دانه، وزن خوشه، وزن کل گیاه و تعداد دانه پر نسبت به شاهد افزایش یابد و به بیش‌ترین میزان خود برسد. هم‌چنین عملکرد

دانه نیز با افزایش سطح کاربرد بیوپچار کاه برنج افزایش یافت. (Gu et al. (2022). در بررسی‌های خود گزارش کردند که کاربرد مشترک بیوپچار و کود شیمیایی ارتفاع بوته برنج و تجمع ماده خشک را افزایش داد و کاربرد ترکیبی ۷/۵ تن بیوپچار در هکتار به همراه ۱۰۰ و ۸۰ درصد کود شیمیایی عملکرد برنج را به ترتیب ۵/۷۸ و ۲/۴۱ درصد افزایش داد و همچنین خوشه‌های مؤثر برنج و تعداد دانه در خوشه نیز افزایش یافت. کاربرد بیوپچار می‌تواند غلظت پتاسیم بافت گیاهی را افزایش دهد (Biederman and Harpole., 2013).

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به وضعیت ضعیف پتاسیم در خاک‌های شالیزاری مورد مطالعه و ظرفیت بالای تثبیت پتاسیم در هر دو خاک، یافته‌های این تحقیق نشان داد که افزودن ۱ درصد بیوپچار کاه و کلش برنج همراه با مقادیر مناسب کود پتاسیمی (NB_{1K50} و NB_{1K100}) به خاک‌های تحت کشت برنج، موجب افزایش رشد و عملکرد و اجزای عملکرد برنج در هر دو خاک شالیزاری مورد مطالعه شده است. همچنین غلظت پتاسیم موجود در اندام هوایی (دانه و زیست‌توده) برنج نیز پس از کاربرد توامان بیوپچار و کود پتاسیمی (NB_{1K50}) به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. هرچند کاربرد توامان بیوپچار و کود پتاسیمی سبب افزایش بیشتر محتوای پتاسیم، رشد و عملکرد برنج شده است ولی کاربرد بیوپچار به تنهایی نیز در افزایش جذب و محتوای پتاسیم و عملکرد و اجزای عملکرد برنج در مقایسه با شاهد و کاربرد کود شیمیایی به تنهایی، موفق عمل کرد. در بین سطوح مختلف بیوپچار، ۱ درصد بیوپچار نرمال نسبت به ۱ درصد بیوپچار اسیدی توانایی بیشتری در افزایش رشد و عملکرد برنج داشت. به‌طور کلی بیوپچار به‌علت دارا بودن محتوای بالای پتاسیم، با کاهش ظرفیت تثبیت پتاسیم در خاک‌های ایلاتی-شالیزاری تخلیه پتاسیم شده می‌تواند به‌طور مؤثری موجب افزایش فراهمی و جذب پتاسیم توسط گیاه شود و بر رشد و عملکرد گیاه تأثیر مطلوب بگذارد.

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

منابع

- پورصالح، مسعود. (۱۳۷۳). غلات (گندم، جو، برنج، ذرت). انتشارات صفار، چاپ دوم. ۱۴۴ ص.
- وللی، حسین و سمنانی، ابولفضل (۱۳۷۱). روش‌های تجزیه خاک‌ها، گیاهان، آب‌ها و کودها. دانشگاه شهید چمران، چاپ اول. ۲۱۹ ص.
- فلاح طوله کلائی، سپیده؛ بهمنیار، محمد علی و صادق زاده، فردین (۱۳۹۳) تأثیر کاربرد کمپوست زباله شهری و بیوپچار بر عملکرد و غلظت برخی عناصر غذایی پر مصرف و کم مصرف در گیاه برنج. پایان نامه کارشناسی ارشد علوم و مهندسی خاک، شیمی، حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری. ۸۸ ص.
- ملکوتی، محمد جعفر و همایی، مهدی (۱۳۸۳). حاصلخیزی مناطق خشک و نیمه خشک (مشکلات و راه حل‌ها). دانشگاه تربیت مدرس. دفتر نشر آثار علمی. تهران. چاپ دوم. ۵۰۲ ص.
- ملکوتی، محمد جعفر؛ شهابی، علی اصغر و بازرگان، کامبیز (۱۳۹۵). پتاسیم در کشاورزی (نقش پتاسیم در تولید محصولات کشاورزی سالم). انتشارات تهران مبلغان. چاپ دوم. ۳۶۰ ص.
- موسوی، سید یوسف؛ محمدیان، محمد و نصیری، مرتضی (۱۳۸۹). کوددهی سرک نسبت‌های مختلف کلرور پتاسیم به همراه اوره بر کمیت و کیفیت برنج رقم شیروودی. یازدهمین کنگره علوم زراعت و اصلاح نباتات ایران، تهران.
- هوشمندفر، علیرضا؛ طهرانی، محمد مهدی و هاشمولویان، بابک (۱۳۷۲). تأثیر مصرف و کارایی نیتروژن بر میزان پروتئین دانه و کارایی مصرف نیتروژن در گندم، گیاه و زیست بوم. ۱۵ (۱) ۵۲-۶۲.

REFERENCES

- Karim, A. A., Kumar, M., Singh, S. K., Panda, C. R., & Mishra, B. K. (2017). Potassium enriched biochar production by thermal plasma processing of banana peduncle for soil application. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 123, 165-172.
- Abu Zied Amin, A. E. E. (2016). Impact of corn cob biochar on potassium status and wheat growth in a calcareous sandy soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47(17), 2026-2033.
- Abrishamkesh, S., Gorji, M., Asadi, H., Bagheri-Marandi, G. H., & Pourbabaee, A. A. (2015). Effects of rice husk biochar application on the properties of alkaline soil and lentil growth Original Paper. *Plant, Soil and Environment*, 61(11).
- Bagyalakshmi, B., Ponmurugan, P., & Marimuthu, S. (2012). Influence of potassium solubilizing bacteria on crop productivity and quality of tea (*Camellia sinensis*). *African Journal of Agricultural Research*, 7(30),



4250-4259.

- Biederman, L. A., & Harpole, W. S. (2013). Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *Global Change Biology bioenergy*, 5(2), 202-214.
- Bertsch, P. M., & Thomas, G. W. (1985). Potassium status of temperate region soils. *Potassium in agriculture*, 129-162.
- Biliyas, F., Kalderis, D., Richardson, C., Barbayiannis, N., & Gasparatos, D. (2023). Biochar application as a soil potassium management strategy: A review. *Science of the Total Environment*, 858, 159782.
- Bremner, J. M., & Mulvaney, C. S. (1982). Nitrogen—total. Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties, 9, 595-624.
- El-Naggar, A., Lee, S. S., Rinklebe, J., Farooq, M., Song, H., Sarmah, A. K., ... & Ok, Y. S. (2019). Biochar application to low fertility soils: A review of current status, and future prospects. *Geoderma*, 337, 536-554.
- Fallah Tolekolai, S., Bahmanyar, M.A., & Sadeghzadeh, F. (2015). The effect of applying municipal soil waste compost and biochar on yield and concentration of some macro and micro nutrients in rice plant. M.Sc. Thesis in soil science and Engineering, soil chemistry, fertility, and plant nutrition. Faculty of agricultural sciences. Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University. 88pp. (in persian)
- Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, 383-411.
- Golestani Fard, A. & Tofighi, H. (2008). Potassium fixation in paddy soils in north of Iran. Iranian. *Journal of Agriculture Science*, 39, 173-185.
- Golestanifard, A., Santner, J., Aryan, A., Kaul, H. P., & Wenzel, W. W. (2020). Potassium fixation in northern Iranian paddy soils. *Geoderma*, 375, 114475.
- Gu, W., Wang, Y., Feng, Z., Wu, D., Zhang, H., Yuan, H., ... & Zhang, W. (2022). Long-term effects of biochar application with reduced chemical fertilizer on paddy soil properties and japonica rice production system. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 902752.
- Havlin, J.L., Beaton, J.D., Tisdale, S.L., & Nelson, W.L. (1991). Soil fertility and fertilizers in introduction to nutrient management. *Prentice-Hall*, 196-216.
- Houshmandfar, A.R., Tehrani, M.M., & Delnavaz Hashemlouyan, B. (2008). The Effects Of Different Nitrogen Levels On Grain Protein And The Nitrogen Use Efficiency Of Wheat. *Plant And Ecosystem*, 4(15), 52-62. (in persian).
- Huang, M., Long, F. A. N., Jiang, L. G., Yang, S. Y., Zou, Y. B., & Uphoff, N. (2019). Continuous applications of biochar to rice: Effects on grain yield and yield attributes. *Journal of integrative agriculture*, 18(3), 563-570.
- International Rice Research Institute (IRRI).
- IBI. (2012). Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil.
- Ippolito, J. A., Ducey, T. F., Cantrell, K. B., Novak, J. M., & Lentz, R. D. (2016). Designer, acidic biochar influences calcareous soil characteristics. *Chemosphere*, 142, 184-191.
- Jalali, M., & Kolahchi, Z. (2007). Short-term potassium release and fixation in some calcareous soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 170(4), 530-537.
- Knudsen, D. L., Peterson, G. A., & Pratt, P. F. (1992). Lithium, sodium, and potassium. *Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties*, 9, 225-246.
- Li, X., Lu, J., Wu, L., & Chen, F. (2009). The difference of potassium dynamics between yellowish red soil and yellow cinnamon soil under rapeseed (*Brassica napus* L.)—rice (*Oryza sativa* L.) rotation. *Plant and Soil*, 320, 141-151.
- Li, X., Zhan, L., Lu, J., Liao, Z., Li, J., Ren, T., & Cong, R. (2014). Potassium mobilization and transformation in red paddy soil as affected by rice. *Agronomy Journal*, 106(3), 1011-1017.
- Liu, S., Tang, W., Yang, F., Meng, J., Chen, W., & Li, X. (2018). Influence of biochar application on potassium-solubilizing *Bacillus mucilaginosus* as potential biofertilizer. *Preparative Biochemistry and Biotechnology*, 47(1), 32-37.
- Lindsay, W.L., Norwell, W.A. (1978). Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42: 421-428.
- Major, J., Lehmann, J., Rondon, M., & Goodale, C. (2010). Fate of soil-applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration. *Global Change Biology*, 16(4), 1366-1379.
- Malakouti, M.J., & Homaei, M. (2004). Soil fertility management in arid and semi- arid regions: constraints and mitigation strategies. Tarbiat Modares university, office for Scientific Publications, Tehran, Iran, 502pp. (in persian).

- Malakouti, M.J., Shahabi, A.A., & Bazargan, K. (2016). Potassium in agriculture: the unrecognized role in the production of healthy agricultural crops. Mobaleghan publishing house, Tehran, Iran, 360pp. (in persian).
- Masulili, A., Utomo, W. H., & Syechfani, M. S. (2010). Rice husk biochar for rice based cropping system in acid soil 1. The characteristics of rice husk biochar and its influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in West Kalimantan, Indonesia. *Journal of Agricultural Science*, 2(1), 39.
- Mizutani, Y., Kubotera, H., Fujii, T., Maeda, T., Watanabe, M., & Hiradate, S. (2024). Recharge of exchangeable K from non-exchangeable fractions as affected by exchangeable K and K acquisition by rice in Japanese paddy soils. *Soil Science and Plant Nutrition*, 70(4), 295-305.
- Mousavi, Y., Mohammadian, M., & Nasiri, M. (2010). Top-Dressing fertilization with different" ratios of potassium chloride and on" yield and quality of shiroudi rice cultivar. 11th Iranian congress on agronomy and plant breeding, Tehran, 2010. (in persian).
- Nakao, A., Thiry, Y., Funakawa, S., & Kosaki, T. (2008). Characterization of the frayed edge site of micaceous minerals in soil clays influenced by different pedogenetic conditions in Japan and northern Thailand. *Soil science and plant nutrition*, 54(4), 479-489.
- Nelson, R. E. (1982). Carbonate and gypsum. Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and microbiological properties, 9, 181-197.
- Nouri, Z., Jalili, B., & Sadegh-Zadeh, F. (2024). Biochars application reduces potassium fixation and improves rice potassium content in K-depleted paddy soils. *Journal of Environmental Management*.
- Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S., & Dean, C.A. (1954). Estimation of available phosphorous in soils by extraction with sodium bicarbonate. U. S. Department of Agriculture Circular, 939(19).
- Oram, N. J., van de Voorde, T. F., Ouwehand, G. J., Bezemer, T. M., Mommer, L., Jeffery, S., & Van Groenigen, J. W. (2014). Soil amendment with biochar increases the competitive ability of legumes via increased potassium availability. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 191, 92-98.
- Pratt, P.F. (1965). Potassium. In: Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties, 9.2. Ed(s): Norman, A.G, 1022-1030.
- Rhoades, J. D. (1992). Soluble salts. In: Page, A.L., R.H. Miller and D.R. Keeney. Method of soil Analysis. Part II: Chemical and Mineralogical Properties, 2nd edn. Madison, Wisconsin: SSSA.
- Rhoades, J. D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5, 417-435.
- Sadegh-Zadeh, F., Parichehreh, M., Jalili, B., & Bahmanyar, M. A. (2018). Rehabilitation of calcareous saline-sodic soil by means of biochars and acidified biochars. *Land Degradation & Development*, 29(10), 3262-3271.
- Sahin, O., Taskin, M. B., Kaya, E. C., Atakol, O. R. H. A. N., Emir, E., Inal, A., & Gunes, A. Y. D. I. N. (2017). Effect of acid modification of biochar on nutrient availability and maize growth in a calcareous soil. *Soil Use and Management*, 33(3), 447-456.
- Sun, Z., Bruun, E. W., Arthur, E., de Jonge, L. W., Moldrup, P., Hauggaard-Nielsen, H., & Elsgaard, L. (2014). Effect of biochar on aerobic processes, enzyme activity, and crop yields in two sandy loam soils. *Biology and Fertility of Soils*, 50, 1087-1097.
- Sumner, M. E., & Miller, W. P. (1996). Cation exchange capacity and exchange coefficients. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5, 1201-1229.
- Sawhney, B. L. (1972). Selective sorption and fixation of cations by clay minerals: a review. *Clays and clay minerals*, 20(2), 93-100.
- Simonsson, M., Hillier, S., & Öborn, I. (2009). Changes in clay minerals and potassium fixation capacity as a result of release and fixation of potassium in long-term field experiments. *Geoderma*, 151(3-4), 109-120.
- Simard, R. R., Zizka, J., & De Kimpe, C. R. (1992). Release of potassium and magnesium from soil fractions and its kinetics. *Soil Science Society of America Journal*, 56(5), 1421-1428.
- Silber, A., Levkovitch, I., & Graber, E. R. (2010). pH-dependent mineral release and surface properties of cornstraw biochar: agronomic implications. *Environmental science & technology*, 44(24), 9318-9323.
- Portela, E., Monteiro, F., Fonseca, M., & Abreu, M. M. (2019). Effect of soil mineralogy on potassium fixation in soils developed on different parent material. *Geoderma*, 343, 226-234.
- Poursaleh, M. (1994). Cereal Crop: wheat, barley, rice and maize. Saffar publications, 144pp. (in persian).
- Tan, D., Liu, Z., Jiang, L., Luo, J., & Li, J. (2017). Long-term potash application and wheat straw return reduced soil potassium fixation and affected crop yields in North China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 108, 121-133.
- Tavaloli, H., & Semnani, A. (1991). Methods of analysis of soil, plants waters and fertilisers. Shahid chamran University publications. Ahvaz. 219pp. (in persian).



- Towfighi, H. (1999). Response of rice to potassium application in paddy soils of northern Iran. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 29(4), 869-883.
- USDA, (2020). World Rice Supply and Utilization. Available at <https://www.ers.usda.gov/data-products/rice-yearbook/> (Accessed: 12 July 2020).
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38.
- Wang, Y., Yin, R., & Liu, R. 2014. Characterization of biochar from fast pyrolysis and its effect on chemical properties of the tea garden soil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 110, 375-381.
- Wang, L., Xue, C., Nie, X., Liu, Y., & Chen, F. (2018). Effects of biochar application on soil potassium dynamics and crop uptake. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 181(5), 635-643.
- Wu, X., Wang, D., Riaz, M., Zhang, L., & Jiang, C. (2019). Investigating the effect of biochar on the potential of increasing cotton yield, potassium efficiency and soil environment. *Ecotoxicology and environmental safety*, 182, 109451.
- Zhao, H. B., Song, Q., Wu, X. Y., & Yao, Q. (2015). Study on the transformation of inherent potassium during the fast-pyrolysis process of rice straw. *Energy & fuels*, 29(10), 6404-6411.
- Zhao, W., Zhou, Q., Tian, Z., Cui, Y., Liang, Y., & Wang, H. (2020). Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land, improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain. *Science of the Total Environment*, 722, 137428.
- Zhang, M., Riaz, M., Liu, B., Xia, H., El-Desouki, Z., & Jiang, C. (2020). Two-year study of biochar: Achieving excellent capability of potassium supply via alter clay mineral composition and potassium-dissolving bacteria activity. *Science of the Total Environment*, 717, 137286.