

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

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

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 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 (N-B₁) and 1 percent acidic biochar (A-B₁) 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 irrigated 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 biochar (N-B₁ and A-B₁) 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 N-B₁K₅₀ 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 day loam and sandy loam soils by 4 and 5 times compared to the control, respectively. It also increased the potassium concentration of rice grain by 6.6 and 4.2 percent compared to the control in two day loam and sandy loam soils, respectively. The N-B₁K₅₀ 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 day loam soil by 7.4 and 6.9 percent, respectively, and in sandy loam soil by 2.7 and 7.2 percent, respectively, compared to the control. The highest plant biomass yield was obtained with the application of A-B₁K₁₀₀, which was able to increase the plant biomass yield in day loam and sandy loam soils by 1 and 3 percent, respectively, compared to the control. The highest rice grain yield was obtained with the application of N-B₁K₁₀₀, which increased the rice grain yield in day loam and sandy loam soils by 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:

Bahar Ali proposed the presented idea, developed the theory, validated the analytical methods and performed the calculations. Zohreh Nikolaei experimented, collected the data and performed the calculations in the software. Farideh Adegzadeh 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.

چکیده

هدف مطالعه حاضر تعیین تأثیر کاربرد توامان 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، ۱ و ۲ درصد بیوچار نرمال (NB) و ۱ درصد بیوچار اسیدی (AB)) و سطوح کود پتاسیمی (در پنج سطح ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد توصیه کودی) در سه تکرار و با مجموعاً ۱۵ تیمار در دو خاک شالیزاری با بافت مختلف تحت کشت برنج رقم شیروزی 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 N BK₅₀ بیشترین توانایی را در افزایش غلظت پتاسیم زیست توده و دانه برنج در دو خاک لوم رسی و لوم شنی داشت. تیمار N BK₅₀ در هر دو خاک دارای بیشترین ارتفاع و وزن هزار دانه گیاه نیز بود. بیشترین میزان عملکرد زیست توده گیاه متعلق به کاربرد N BK₁₀₀ و بیشترین میزان عملکرد دانه برنج مربوط به کاربرد N BK₁₀₀ در دو خاک لوم رسی و لوم شنی است. بنابراین بر اساس یافته‌های این تحقیق، کاربرد توامان 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.

کلمات کلیدی: برنج، بیوچار، پتاسیم، تغذیه، خاک شالیزاری

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. The experiment was conducted using a completely randomized design as a factorial with two factors: biochar levels at three levels (0, 1 percent normal biochar (NB) and 1 percent acidic biochar (AB)) and potassium fertilizer levels at five levels (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 irrigated rice cultivation. The results showed that the addition of normal and acidic biochar (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 N BK₅₀ treatment had the greatest ability to enhance the potassium concentration in biomass and rice grain in both clay loam and sandy loam soils. The N BK₅₀ treatment also achieved the highest plant height and 1000-seed weight in both soils. The highest plant biomass yield was obtained with the application of N BK₁₀₀, and the highest rice grain yield resulted from the application of N BK₁₀₀ 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.

Keywords: Biochar, paddy soil, plant nutrition, potassium, rice

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 به‌طور 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 (B agyalakshmi et al, 2012) فراهمی پتاسیم برای گیاهان از طریق فرآیندهای فیزیوشیمیایی مختلف در خاک کنترل می‌شود که تثبیت پتاسیم یکی از مهم‌ترین آن‌هاست (G destanifard et al, 2020).

البته تعادل بین شکل‌های مختلف پتاسیم در خاک قابل برگشت است (B etsch anfi ant, 1985) به‌طوری‌که پتاسیم محلول از طریق شکل‌های تبدیلی و غیر قابل تبادل یا با افزودن کودها مجدد احیا می‌شود (S imard et al, 1992). ولی کشت‌های فشرده یا استفاده از ارقام پرمحصول 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 دی‌تری‌گونال و تثبیت آن‌ها می‌شود (P otela et al, 2019). و این فرایند متعاقباً کارایی کودهای پتاسیمی را در خاک‌های مذکور کاهش می‌دهد (T an et al, 2017) به‌طور عمده کانی‌های رسی ۲:۱ مانند ایلایت‌ها، ورمیکولایت‌ها، مونموریلونایت‌ها و اسمکتایت‌ها مسئول تثبیت پتاسیم در خاک‌ها هستند (S immonsson et al, 2007; J dali anK dahci 2007). در خاک‌هایی که حاوی مقادیر زیادی رس‌های ۲:۱ هستند و به‌ویژه در حضور کانی ایلایت، تثبیت پتاسیم به حداکثر مقدار می‌رسد (H alin et al, 1991). در ایلایت محل‌های تبدیلی با گزینش‌پذیری متفاوت نسبت به یون‌های پتاسیم وجود دارد. در این کانی، هوازگی از لایه‌ها 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 (S avhney 1972; N kao 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 F^{+} به F^{-} و افزایش بار منفی کانی‌های رسی، تثبیت پتاسیم را افزایش می‌دهد (G destanifard 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 (G destanifard 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 (G destanifard et al, 2020).

برنج (*Oryza sativa L.*) یکی از مهم‌ترین محصولات غلات در کشورهای در حال توسعه به‌شمار می‌رود و با چشم‌انداز افزایش ۲۵ درصدی مصرف برنج تا سال ۲۰۳۰، وظیفه تغذیه بیش از ۴ میلیارد نفر در جهان را بر عهده دارد (موسسه تحقیقات بین‌المللی برنج IRRI 2019). برنج در منطقه‌ای به وسعت ۱۶۱ میلیون هکتار در سرتاسر جهان (U DA 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 (B ilias & al, 2023). در سال‌های اخیر برای غلبه بر برخی از این مشکلات، مطالعات متعددی در مورد استفاده از بیوپار و کاربرد آن در خاک انجام شده است. بیوپار به‌عنوان یک اصلاح‌کننده خاک، از پیرولیز مواد آلی مبتنی بر کربن در دمای بالا تحت شرایط بدون اکسیژن یا دارای اکسیژن محدود تولید می‌شود (W u & al, 2019). بسته به نوع زیست‌توده و شرایط پیرولیز، بیوپارها از نظر ترکیب عنصری، گروه‌های عاملی سطحی و سایر خصوصیات فیزیکوشیمیایی بسیار متنوع هستند (B ilias & al, 2023). به‌عنوان مثال در طول فرایند پیرولیز، فسفر از دست نمی‌رود ولی با افزایش دمای پیرولیز فراهمی آن برای گیاه کاهش می‌یابد؛ و با افزایش دمای پیرولیز، پتاسیم قابل تبادل نسبت به پتاسیم محلول در آب افزایش می‌یابد (S ilber & al, 2010). علاوه، با افزایش دمای پیرولیز گروه‌های عاملی اسیدی حذف و بیوپار قلیایی می‌شود (I ppolito & al, 2016). به‌هرحال، بیوپار به صورت مستقیم یا غیرمستقیم باعث افزایش رشد و عملکرد گیاه می‌شود. اثر مستقیم به‌دلیل محتوای عناصر غذایی آن است و اثر غیر مستقیم ناشی از بهبود نگهداشت عناصر غذایی، بهبود pH خاک، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، بهبود خصوصیات فیزیکی خاک، تغییر فعالیت میکروبی و افزایش مقاومت در برابر بیماری‌های گیاهی است (S ilber & al, 2010). کاه و کلش برنج از جمله ضایعاتی است که غالباً به عنوان زیست‌توده بیوپار استفاده می‌شود (B ilias & al, 2023) و حاوی مقادیر قابل توجهی پتاسیم است (Z hao & al, 2015). بیوپار با مقدار پتاسیم نسبتاً بالا (حدود ۴ تا ۹۱ گرم بر کیلوگرم)، می‌تواند مکمل مناسبی برای کود پتاسیم در خاک باشد (W u & al, 2019). معدود تحقیقات انجام شده در زمینه تأثیر کاربرد بیوپار بر فراهمی پتاسیم خاک و جذب گیاه نشان می‌دهد که بیوپار پتانسیل بالایی برای افزایش فراهمی پتاسیم دارد و این توانایی مستقیماً به منابع بیوپار غنی از پتاسیم و به‌طور غیرمستقیم به ظرفیت تبادل کاتیونی، تخلخل و سطح ویژه بیوپار بستگی دارد (B ilias & al, 2023). از طرفی میزان اثربخشی بیوپار به ویژگی‌های خاک نیز بستگی دارد (S ilber & al, 2010). بنابراین خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک که معمولاً آهکی و pH قلیایی دارند از بیوپار با pH پایین سود می‌برند (I ppolito & al, 2016). بنابراین، اصلاح شیمی سطح بیوپار با کمک اسید، آب دوستی سطح بیوپار را افزایش داده و حلالیت آبی و امکان دسترسی گیاه به عناصر غذایی موجود در خاک‌های آهکی را بهبود می‌دهد (S ahin & al, 2017). S degh-zadeh & al (2018) بیان کردند اعمال تیمارهایی نظیر اسیدی کردن بیوپار سبب افزایش مقدار عناصر غذایی بیوپار می‌شود، زیرا اسیدی شدن سبب انحلال فرم‌های کریستالی عناصر موجود در بیوپار می‌شود. I ppolito & al (2015) در بررسی‌های خود به این نتیجه دست یافتند که کاربرد یک بیوپار با pH اسیدی در یک خاک آهکی؛ (۱) وضعیت آب خاک را با کاهش تلفات تبخیری بهبود می‌بخشد، (۲) pH خاک را کاهش می‌دهد و (۳) جذب عناصر غذایی توسط گیاه را افزایش می‌دهد.

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، به‌طوری‌که 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 بالایی تثبیت پتاسیم در این خاک‌ها، به تقریباً ۲۰۰۰ کیلوگرم پتاسیم در هکتار برای خاک لوم رسی و ۸۰۰ کیلوگرم پتاسیم در هکتار برای خاک لوم شنی نیاز است. افزودن بیوپار به خاک‌های 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 (N ori & al, 2024). بنابراین باتوجه به کمبود پتاسیم در خاک‌های شالیزاری شمال کشور و نیز عدم کاربرد کود پتاسیمی کافی به‌وسیله کشاورزان این مناطق لازم است جایگزینی بیوپار به‌جای کود پتاسیمی که منجر به کاهش مصرف کود و بار اقتصادی کشاورزان می‌شود، مورد بررسی قرار گیرد. از این رو هدف مطالعه حاضر تعیین تأثیر بیوپارهای کاه و کلش برنج و کود پتاسیمی بر وضعیت پتاسیم برنج و عملکرد و اجزای عملکرد این گیاه در نظر گرفته شد.

روشن‌شناسی پژوهش

زمان و محل اجرای آزمایش

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

نمونه‌برداری از خاک

دو نمونه خاک مرکب شامل بافت‌های لوم رسی از شالیزار واقع در مزرعه پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، با موقعیت جغرافیایی "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 سونه با موقعیت جغرافیایی "۴۲° ۳۶' شمالی و "۰۳' ۰۸" ۵۳° شرقی، با ارتفاع ۲۰ متر در منطقه فرح‌آباد در شمال شهرستان ساری، از عمق ۳۰- سانتی‌متر با در نظر گرفتن میزان پتاسیم قابل تبادل عصاره‌گیری شده با استات آمونیوم، به‌طور تصادفی انتخاب و جمع‌آوری شد. پس از نمونه‌برداری، نمونه‌های خاک هوا خشک شده و پس از کوبیدن، خاک از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد و جهت انجام آزمایش‌های لازم نگهداری شدند.

تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های شالیزاری با ظرفیت تثبیت پتاسیم بالا

نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. سپس برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن‌ها از جمله بافت خاک با دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۶ ساعت (Gæ anB ader1982)، گل‌اشباع (R hades1992)، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره گل‌اشباع (R hades1992)، رطوبت گل‌اشباع (R hoades1992)، ظرفیت تبادل کاتیونی (S umner anM iller 1996)، کربن آلی (W alkley atB lack1934)، درصد کربنات کلسیم معادل (N dson1982)، نیتروژن کل (B remner and 1996)، فسفر قابل جذب (M thvaney1982)، فسفر قابل جذب (G lsen et al,1954)، پتاسیم قابل استخراج با استات آمونیوم (K nudsen et al,1992) و آهن، منگنز، روی و مس قابل جذب (S ndsay anN ovel1978) اندازه‌گیری شد.

تهیه و تعیین خصوصیات شیمیایی بیوپار نرمال و بیوپار اسیدی

بیوپار مورد استفاده در این آزمایش از تجزیه حرارتی کاه برنج تولید شد. ابتدا نمونه ماده اولیه خرد شده، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد و در آون با درجه حرارت ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید. سپس نمونه‌ها به مدت ۳ ساعت در کوره با دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند تا تبدیل به بیوپار شوند. بعد از ۱ ساعت کوره به دمای مورد نظر رسیده و سپس ۲ ساعت در این دما باقی ماند. پس از خنک شدن نمونه‌ها و رسیدن به دمای محیط، بیوپار از کوره خارج شده و به‌منظور افزودن به خاک و نیز انجام آزمایشات بعدی در ظروف پلاستیکی درب دار نگهداری شد. قابلیت هدایت الکتریکی بیوپار با استفاده از نسبت ۱:۲۰ بیوپار به آب تعیین شد. میزان پتاسیم موجود در بیوپار به روش سوزاندن خشک اندازه‌گیری شد. میزان نیتروژن کل بیوپار به روش هضم توسط دستگاه کدال، میزان ماده آلی، فسفر و عناصر کم‌مصرف بیوپار نیز اندازه‌گیری شد (B l2012;W ang et al,2014). برای تهیه بیوپار اسیدی، بیوپار 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 (S alegh-Z ade et al,2018). لازم به ذکر است، پس از اسیدشویی بیوپار، قابلیت هدایت الکتریکی، میزان کلر موجود، مقدار نیتروژن کل، میزان پتاسیم، فسفر، عناصر کم‌مصرف و همچنین مقدار ماده آلی بیوپار اصلاح‌شده نیز اندازه‌گیری شد (B l2012;W ang et al,2014).

اجرای آزمایش

این تحقیق به صورت آزمایش گلخانه‌ای در دمای محیط در قالب طرح کاملاً تصادفی و به صورت فاکتوریل با دو فاکتور سطوح بیوچار (در سه سطح 0 ، 1 ، 2)، 1 درصد بیوچار نرمال (NB_1) و 1 درصد بیوچار اسیدی ($A-B_1$) و سطوح کود پتاسیمی از منبع کلرید پتاسیم (در پنج سطح 0 ، 1 ، 2 ، 3 ، 4)، 25 درصد (K_2)، 50 درصد (K_3)، 75 درصد (K_4) و 100 درصد (K_5) توصیه کودی در سه تکرار صورت پذیرفت. از ترکیب فاکتوریل سطوح بیوچار و سطوح کود پتاسیمی برای هر یک از دو خاک لوم رسی و لوم شنی 15 تیمار به شرح زیر حاصل شد: $A-B_1K_2$ ، $A-B_1K_3$ ، $A-B_1K_4$ ، $A-B_1K_5$ ، $A-B_2K_2$ ، $A-B_2K_3$ ، $A-B_2K_4$ ، $A-B_2K_5$ ، $A-B_3K_2$ ، $A-B_3K_3$ ، $A-B_3K_4$ ، $A-B_3K_5$ ، $A-B_4K_2$ ، $A-B_4K_3$ ، $A-B_4K_4$ ، $A-B_4K_5$ ، $A-B_5K_2$ ، $A-B_5K_3$ ، $A-B_5K_4$ ، $A-B_5K_5$.

از هر دو نمونه خاک مورد مطالعه در این آزمایش نمونه‌های 10 کیلوگرمی توزین و به درون گلدان‌ها منتقل شد. به جز پتاسیم، نیتروژن و فسفر براساس آزمون خاک و توصیه‌های مبتنی بر آزمون خاک برای هر گلدان تأمین شد. تیمارهای مختلف بیوچار و کود پتاسیمی نیز بر اساس مقادیر مذکور به هر گلدان منتقل و به‌خوبی 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 اندازه‌گیری عملکرد، اجزای عملکرد، غلظت پتاسیم زیست‌توده و دانه برنج، جذب پتاسیم زیست‌توده، دانه و کل گیاه و پاسخ برنج به آزمایشگاه منتقل گردید. همچنین جهت اندازه‌گیری مقدار شکل‌های پتاسیم قابل تبادل، غیرقابل تبادل ($Patt$ 1965) و پتاسیم کل خاک ($Kndsen$ et al. 1992) در پایان دوره کشت و بعد از برداشت گیاه، از خاک هر گلدان نمونه‌برداری صورت گرفت.

انجام عملیات زراعی

جهت اجرای عملیات طرح، کودهای شیمیایی مطابق نیاز کودی بر اساس نتایج آزمون خاک شامل کود فسفره به میزان 0.5 گرم در گلدان پنتا اکسید فسفر (P_2O_5) از منبع سوپر فسفات تریپل و کود نیتروژنه به میزان 0.7 گرم نیتروژن در گلدان از منبع اوره به گلدان‌ها اضافه شد. کودهای پایه، کود پتاسیم و بیوچارها 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 (5 اردیبهشت 1403) 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 70 درجه سلسیوس به مدت 48 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، 1387). 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 استاندارد 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، D 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 (U DA and RC S2007) statisti و مقایسه میانگین‌ها با روش حداقل اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد (L D) صورت پذیرفت. رسم نمودارها توسط نرم‌افزار Excel انجام شد.

یافته‌های پژوهش

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها و بیوچارهای 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 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 قابل‌جذب در دو خاک لوم شنی و لوم رسی به ترتیب ۳/۴۱ و ۱/۸۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد و غلظت پتاسیم نیز قابل‌جذب در هر دو خاک لوم شنی و لوم رسی به ترتیب ۱۲۵ و ۱۴۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم برآورد شد.

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

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

پارامتر	واحد	مقدار (لوم شنی)	مقدار (لوم رسی)	پارامتر	واحد	بیوچار نرمال	بیوچار اسیدی
---------	------	-----------------	-----------------	---------	------	--------------	--------------

۲/۶۴	۷/۸۴	pH	۷/۶۶	۷/۲۶	pH
۴/۷۱	۱/۲۴	dS m ⁻¹	۰/۳۵	۰/۳۹	dS m ⁻¹
۱/۱۱	۱/۰۲	%	۰/۰۸	۰/۱	%
۶۹/۸۵	۷۰/۳۳	cmol kg ⁻¹	۱۶/۶	۱۱/۳	cmol kg ⁻¹
۱۰۷۱۴/۲۸	۸۱۶۳/۲۶	mg kg ⁻¹	۱/۸۵	۳/۴۱	mg kg ⁻¹
۲۰۴۰۸/۱۶	۴۰۸۱۶/۳۲	mg kg ⁻¹	۱۴۷	۱۲۵	mg kg ⁻¹
-	-	-	۲۳/۲۰	۲۱/۳۸	%
۶۱/۶۳	۵۸/۲۳	%	۰/۸۵	۱/۰۵	%
۱۳۴/۶۹	۱۴۳/۸۷	mg kg ⁻¹	۵۷/۸۹	۲۸/۲۹	mg kg ⁻¹
۴/۵۹	۸/۱۶	mg kg ⁻¹	۵/۱۳	۱/۴۸	mg kg ⁻¹
۴۰/۳۶	۴۲/۳۴	mg kg ⁻¹	۲/۷۷	۰/۹۱	mg kg ⁻¹
۲۳۹/۲۸	۲۳۱/۱۲	mg kg ⁻¹	۳۱/۵۷	۵/۶۱	mg kg ⁻¹
-	-	-	۳۴	۷۸	%
-	-	-	۳۰	۶	%
-	-	-	۳۶	۱۶	%

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

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر ساده سطوح بیوچار، سطوح کود پتاسیمی و همچنین اثر متقابل آن‌ها بر غلظت پتاسیم زیست‌توده برنج در خاک‌های شالیزاری در سطح احتمال یک درصد (0.01) معنی‌دار بود (جدول ۲).

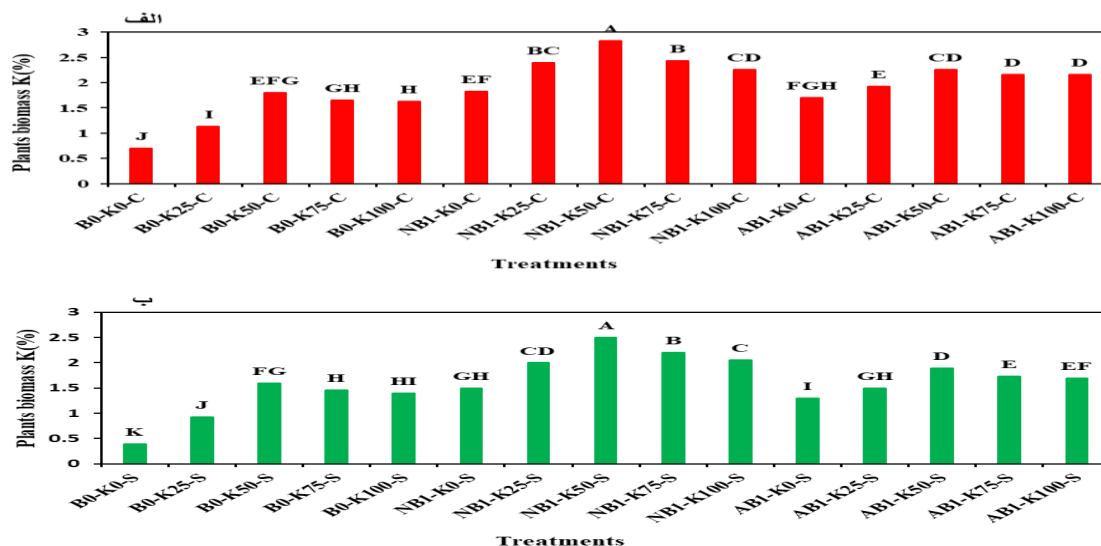
جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس اثر بیوچار و کود پتاسیمی بر وضعیت پتاسیم برنج در دو نوع خاک شالیزاری

منابع تغییرات	درجه آزادی	غلظت پتاسیم زیست‌توده	میانگین مربعات
		غلظت پتاسیم دانه	
خاک لوم رسی			
سطوح بیوچار	۲	۳/۶۶۰۲**	۰/۰۱۵۵۰**
سطوح کود پتاسیمی	۴	۱/۰۱۵۸۹**	۰/۰۰۵۳۷**
سطوح بیوچار × سطوح کود پتاسیمی	۸	۰/۰۸۱۸۹**	۰/۰۰۰۱۰*
خطا	۲۸	۰/۰۰۸۹۸	۰/۰۰۰۰۲
ضریب تغییرات %		۴/۹۱	۱/۱۴
خاک لوم شنی			
سطوح بیوچار	۲	۲/۹۹۴۶۷**	۰/۰۱۴۷۳**
سطوح کود پتاسیمی	۴	۱/۱۵۱۸۹**	۰/۰۰۴۶۶**
سطوح بیوچار × سطوح کود پتاسیمی	۸	۰/۰۶۸۵۶**	۰/۰۰۰۰۳**
خطا	۲۸	۰/۰۰۴۹۰	۰/۰۰۰۰۱
ضریب تغییرات %		۴/۳۴	۰/۸۱

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد * معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و NS عدم تفاوت معنی‌دار

در این آزمایش تأثیر افزودن بیوچارهای A، B و N، B₁B₂B₃ و به‌همراه مقادیر مختلف کود پتاسیمی (K₀، K₃₀، K₆₀، K₉₀) بر غلظت پتاسیم زیست‌توده برنج در خاک‌های لوم رسی و لوم شنی مورد بررسی قرار گرفت. در عدم کاربرد کود پتاسیمی و بیوچارها 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

$B K_m$ تا $B K_0$ در خاک لوم رسی، غلظت پتاسیم زیست‌توده برنج بین $1/13$ تا $1/8$ درصد و در خاک لوم شنی بین $0/93$ تا $1/6$ درصد متغیر بود. غلظت پتاسیم زیست‌توده برنج در تیمارهای $N B K_0$ و $A B K_0$ در خاک لوم رسی به ترتیب به $1/83$ و $1/7$ درصد و در خاک لوم شنی به ترتیب به $1/5$ و $1/3$ افزایش یافت. اما تیمار $N B K_0$ 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 $0/7$ درصد در تیمار شاهد به $2/83$ درصد در لوم رسی و از $0/4$ درصد در تیمار شاهد به $2/5$ درصد در خاک لوم شنی رساند. تیمار $A B K_0$ نیز توانست غلظت پتاسیم زیست‌توده برنج را به $2/26$ درصد در خاک لوم رسی و $1/9$ درصد در خاک لوم شنی برساند.



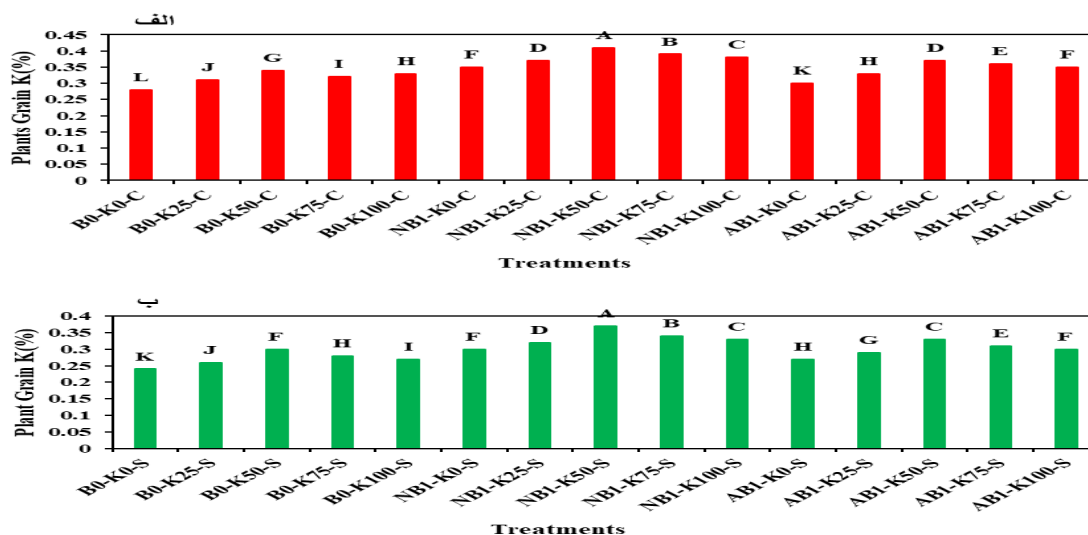
شکل ۱. مقایسه میانگین تأثیر بیوجار و کود پتاسیمی بر غلظت پتاسیم زیست‌توده برنج در خاک‌های (الف) لوم رسی و (ب) لوم شنی. ستون‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشابه باشند نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون ISD می‌باشد. (NB: بیوجار نرمال، AB: بیوجار اسیدی؛ 0: بدون مصرف بیوجار، 1 درصد NB: مصرف ۱ 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)

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

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها این‌چنین 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 $N B K_0$ و $A B K_0$ به‌همراه مقادیر مختلف کود پتاسیمی ($B K_m$ تا $B K_0$) در هر دو خاک افزایش یافته است. با کاربرد مقادیر مختلف کود پتاسیمی $B K_m$ تا $B K_0$ 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_0 ، 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 $N B K_0$ و $A B K_0$ 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 $N B K_0$ 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 ($B K_m$ تا $B K_0$) به همراه ۱ درصد بیوجار نرمال ($N B K_0$) 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 BK A در مقایسه با سایر مقادیر کود پتاسیم (K₀, K₂₅, K₅₀, K₇₅, K₁₀₀) به همراه ۱ درصد بیوجار اسیدی (A B1) در افزایش مقدار پتاسیم دانه، موفق‌تر عمل کرد و غلظت پتاسیم دانه را در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب به ۰/۳۷ و ۰/۳۳ درصد رساند که برابر بود با ۳۲/۱ و ۳۷/۵ درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد. تیمار N BK در قیاس با تیمار B BK غلظت پتاسیم دانه را در خاک لوم رسی ۲۰/۵ درصد و در خاک لوم شنی ۲۳/۳ 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 NB: مصرف ۱ 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)

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 (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 (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**
					۲۱۵/۰۱۳**

۱۴/۳۳۷**	۸/۲۱۵۲**	۱/۰۳۱۷**	۲۲/۸۵۲۲**	۱۱۱/۸۷۳**	۴	سطوح کود پتاسیمی
۰/۳۰۹**	۰/۲۷۴۷**	۰/۳۴۲۰**	۱/۳۵۳**	۵/۱۸۵**	۸	سطوح بیوجار × سطوح کود پتاسیمی
۰/۰۳۰	۰/۰۲۱۴	۰/۰۰۸۴	۰/۰۷۲۴	۰/۱۴۹	۲۸	خطا
۳/۰۱	۲/۲۸	۱/۱۹	۱/۰۸	۰/۴۰		ضریب تغییرات %

**معی دار در سطح احتمال ۱ درصد *معی 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 N BK 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 K₂₅ B 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 N B K₁₀₀ ارتفاع گیاه را نسبت به تیمار مشابه ولی بدون کاربرد بیوجار (B K₁₀₀)، 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 B K₁₀₀ 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 A BK₁₀₀ ارتفاع گیاه را ۱۳/۶ و ۱۹/۵ درصد به ترتیب در دو خاک لوم رسی و لوم شنی 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 رسی	لوم شنی	لوم رسی	لوم شنی	لوم رسی	لوم شنی	لوم رسی	لوم شنی	لوم رسی	لوم شنی	
ارتفاع گیاه (cm)										
۹۴/۵۰ ^H	۱۰۰/۸۰ ^D	۹۳/۹۰ ^H	۹۳/۷۷ ^{HI}	۹۱/۱۷ ^L	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	۲۵/۳۸ ^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	۲۸/۲۳ ^{AB}	۲۷/۸۱ ^B	۲۸/۱۰ ^{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)										
۵/۳۵۰۰ ^{GH}	۵/۱۹۳ ^{HI}	۵/۰۹۲ ^I	۵/۰۸۰ ^I	۵/۴۸۰۰ ^G	۵/۴۴۷ ^{GH}	۵/۳۱۰۰ ^H	۵/۵۰۳ ^{GH}	۵/۳۴۰۰ ^{GH}	۵/۷۷۳ ^G	0
۸/۷۸۰۰ ^C	۸/۷۹۰۰ ^{CD}	۸/۷۷۰۰ ^C	۸/۵۶۷ ^{DE}	۸/۸۷۶۷ ^C	۸/۶۳۰ ^{DE}	۷/۷۱۰۰ ^F	۸/۵۴۳ ^F	۸/۱۰۰۰ ^E	۸/۳۲۷ ^{EE}	1%NB
۹/۸۱۰۰ ^A	۱۰/۵۱۰۰ ^A	۹/۶۹۶۷ ^{AB}	۱۰/۱۷۷ ^A	۹/۵۵۰۰ ^B	۹/۴۹۳ ^B	۸/۸۸۰۰ ^C	۹/۱۳۰ ^C	۸/۶۰۰۰ ^D	۸/۸۷۳ ^{CD}	1% AB
عملکرد دانه گیاه (t ha ⁻¹)										
۵/۵۰۳۳ ^G	۶/۰۶۰ ^H	۵/۲۳۰۰ ^H	۵/۷۶۷ ^I	۴/۰۱۶۷ ^I	۵/۰۴۳ ^J	۳/۸۴۰۰ ^J	۴/۲۳۰ ^K	۲/۸۴۰۰ ^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	۶/۵۰۰۰ ^{EF}	۶/۹۵۰ ^F	1%NB
۷/۱۳۳۳ ^D	۷/۵۵۰ ^D	۷/۰۴۶۷ ^D	۷/۳۲۰ ^E	۶/۷۳۰۰ ^E	۷/۱۹۷ ^E	۶/۲۸۰۰ ^F	۶/۵۶۰ ^G	۵/۵۵۳۳ ^G	۵/۷۹۰ ^I	1% AB
پاسخ گیاه (t ha ⁻¹)										
۲/۴۴ ^H	۲/۴۲ ^J	۱/۹۶ ^I	۲/۰۲ ^K	۱/۷۷ ^I	۱/۶۶ ^L	۰/۹۹ ^J	۰/۹ ^M	۰ ^K	۰ ^N	0
۹/۷۵ ^A	۱۰ ^A	۹/۴۷ ^{AB}	۹/۶ ^B	۹/۳۳ ^B	۹/۴۴ ^{BC}	۷/۲۸ ^E	۷/۵۷ ^F	۶/۲۴ ^F	۶/۴۴ ^H	1%NB
۸/۵۸ ^C	۹/۲۲ ^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 معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون ISD می‌باشد

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

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد، اثر ساده سطوح بیوچار و سطوح کود پتاسیمی بر وزن هزار دانه برنج در هر دو خاک در سطح احتمال یک درصد (0.01) تأثیر معنی‌داری داشتند. همچنین اثر متقابل سطوح بیوچار و سطوح کود پتاسیمی نیز بر وزن هزار دانه برنج در هر دو خاک در سطح یک درصد (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 N BK 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 بیوچار B K 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 B K 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. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در بین تیمارهای کاربرد کود پتاسیمی، بیش‌ترین وزن هزار دانه مربوط به تیمار B K 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 N BK در مقایسه با کاربرد B K وزن هزار دانه را به ترتیب ۱۲/۹ و ۱۵ درصد در دو خاک لوم رسی و لوم شنی افزایش داد. A BK نیز بین سایر مقادیر کود پتاسیم به همراه ۱ درصد بیوچار اسیدی، موفق‌تر عمل کرد و وزن هزار دانه را در خاک لوم رسی ۳۲/۳ و در خاک لوم شنی ۳ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد.

تأثیر بیوچارها و کود پتاسیمی بر عملکرد زیست‌توده برنج در خاک‌های شالیزاری

با استناد به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر ساده سطوح بیوچار و سطوح کود پتاسیمی و همچنین اثر متقابل سطوح بیوچار و سطوح کود پتاسیمی بر عملکرد زیست‌توده برنج در هر دو خاک در سطح احتمال یک درصد (0.01) تأثیر معنی‌داری داشتند (جدول ۳). همان‌گونه که مقایسه میانگین داده‌ها نشان می‌دهد (جدول ۴)، عملکرد زیست‌توده گیاه با کاربرد ۱ درصد بیوچار نرمال و ۱ درصد بیوچار اسیدی در هر دو خاک افزایش پیدا کرد. به‌طوری‌که بیش‌ترین میزان عملکرد زیست‌توده گیاه متعلق به کاربرد A BK است که توانست عملکرد زیست‌توده 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 زیست‌توده گیاه در این تیمار نسبت به تیمار B K بیوچار، در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب ۸۱ و ۸۳ درصد افزایش یافت. کاربرد A BK، عملکرد زیست‌توده 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 داده‌ها، کم‌ترین عملکرد زیست‌توده گیاه در هر دو خاک مربوط به تیمار B K بود که عملکرد زیست‌توده 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 K نیز عملکرد زیست‌توده گیاه را نسبت به شاهد ۰/۵ درصد کاهش داد. اما کاربرد B K و B K عملکرد زیست‌توده گیاه را نسبت به شاهد به ترتیب ۲/۶ و ۰/۱ درصد افزایش داد. در حالی‌که در خاک لوم رسی کاربرد B K و B K نیز نتوانست عملکرد زیست‌توده گیاه را نسبت به شاهد افزایش دهد و این سه تیمار عملکرد زیست‌توده گیاه را به ترتیب ۴/۶، ۵ و ۱۰ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش دادند. کاربرد A BK در مقایسه با کاربرد B K، موفق شد عملکرد زیست‌توده گیاه را در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب ۱۰۶ و ۹۲ درصد افزایش دهد. همچنین این تیمار عملکرد زیست‌توده گیاه را نسبت به تیمار مشابه بدون کاربرد بیوچار (تیمار B K) در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب ۱۰۲ و ۸۳ درصد افزایش داد.

تأثیر بیوچارها و کود پتاسیمی بر عملکرد زیست‌توده برنج در خاک‌های شالیزاری

با استناد به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر ساده سطوح بیوچار و سطوح کود پتاسیمی بر عملکرد دانه برنج در هر دو خاک در سطح احتمال یک درصد ($\alpha = 0.01$) معنی‌دار شد. همچنین اثر متقابل سطوح بیوچار و سطوح کود پتاسیمی بر عملکرد دانه برنج در خاک‌های شالیزاری در سطح احتمال یک درصد ($\alpha = 0.01$) 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 $N \text{ BK } m$ 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 $B \text{ K}$ 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 $B \text{ K}$ بدون کاربرد بیوچار تنها توانست عملکرد دانه برنج را در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب به 93 و 98 درصد نسبت به شاهد افزایش دهد. در خاک لوم شنی کاربرد $N \text{ BK } m$ در مقایسه با کاربرد $B \text{ K}$ و $B \text{ K } m$ ، 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 $B \text{ K}$ و $B \text{ K } m$ ، توانست عملکرد دانه برنج را به ترتیب 137 و 65 درصد افزایش دهد. 1 درصد بیوچار اسیدی نسبت به 1 درصد بیوچار نرمال توانایی کم‌تری در افزایش عملکرد دانه برنج داشت. به‌طوری‌که کاربرد $A \text{ B K } m$ ، 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 بیوچارها و کود پتاسیمی بر پاسخ برنج در خاک‌های شالیزاری

با استناد به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر ساده سطوح بیوچار و سطوح کود پتاسیمی بر پاسخ برنج در هر دو خاک در سطح احتمال یک درصد ($\alpha = 0.01$) معنی‌دار شد. همچنین اثر متقابل سطوح بیوچار و سطوح کود پتاسیمی بر پاسخ برنج در هر دو خاک در سطح احتمال یک درصد ($\alpha = 0.01$) 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 $N \text{ BK } m$ 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 بیوچار و کود پتاسیم، افزایش داد. کم‌ترین میزان پاسخ گیاه در تیمار $B \text{ K}$ ، 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 $B \text{ K } m$ توانایی بالاتری در افزایش پاسخ گیاه داشت و توانست پاسخ گیاه را در هر دو خاک $2/4$ برابر افزایش دهد. تیمار $N \text{ BK } m$ ، پاسخ گیاه را نسبت به تیمار کاربرد $B \text{ K}$ ، 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 بیوچار ($B \text{ K } m$)، $3/1$ و $2/9$ برابر به ترتیب در دو خاک لوم رسی و لوم شنی افزایش داد. در بین تیمارهای مربوط به کاربرد 1 درصد بیوچار اسیدی نیز، کاربرد $A \text{ B K } m$ 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 بیوچارها و کود پتاسیمی بر غلظت پتاسیم قابل استخراج در خاک‌های شالیزاری

با بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر ساده سطوح بیوچار و سطوح کود پتاسیمی و همچنین اثر متقابل آن‌ها بر غلظت پتاسیم قابل استخراج در هر دو خاک در سطح احتمال یک درصد ($\alpha = 0.01$) معنی‌دار شد (جدول ۵).

جدول ۵. نتایج تجزیه واریانس اثر بیوچار 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

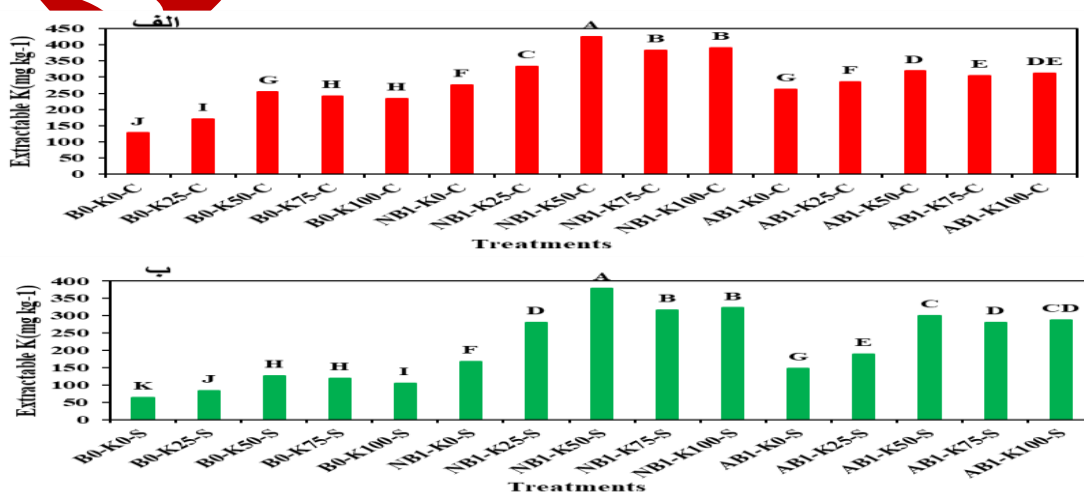
منابع تغییرات		درجه آزادی		میانگین مربعات			
غلظت پتاسیم قابل جذب		غلظت پتاسیم غیر قابل تبادل		غلظت پتاسیم کل			
لوم رسی	لوم شنی	لوم رسی	لوم شنی	لوم رسی	لوم شنی	لوم رسی	لوم شنی

۱۶۰۳۶۵۲**	۲۱۶۰۸۳۷**	۹۷۴۷۹۰**	۱۲۶۸۷۲۷**	۱۵۰۵۷۶**	۹۲۴۸۹**	۲	سطوح بیوجار
۳۶۷۹۶۹**	۶۳۷۰۰۰**	۳۰۵۲۴**	۶۱۶۷۰**	۲۸۵۱۶**	۱۸۱۱۱/۹**	۴	سطوح کود پتاسیمی
۴۵۷۳۶**	۱۵۳۱۰ *	۳۲۴۲*	۸۳۲۵ **	۲۹۲۲ **	۱۲۱۴/۹ **	۸	سطوح بیوجار × سطوح کود پتاسیمی
۱۳۲۸۶	۶۶۱۹	۱۰۴۷	۲۹۸	۵۷	۵۱/۴	۲۸	خطا
۰/۹۷	۰/۵۷	۴/۹۱	۲/۰۲	۳/۵۶	۲/۴۹		ضریب تغییرات %

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

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 (B₀N B₁A B₂) به همراه مقادیر مختلف کود پتاسیمی (K₀K₂₅K₅₀K₇₅K₁₀₀) 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 K₂₅K₅₀K₇₅K₁₀₀ 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 معنی‌داری یافت. به این ترتیب که در تیمارهای B₁N B₂A که صرفاً حاوی بیوجار بودند میزان پتاسیم قابل استخراج به ترتیب تقریباً ۱/۲ و ۱/۱ برابر شد. در کاربرد توأمان بیوجار و کود پتاسیمی بیشترین غلظت پتاسیم قابل استخراج به میزان ۴۲۵/۵ میلی گرم در کیلوگرم با افزایش ۲/۳ برابری برای تیمار B₁N BK₅₀ ثبت شد. شایان توجه است که غلظت پتاسیم قابل استخراج در تیمارهای B₂N BK₇₅ و B₁N BK₁₀₀ نسبت به B₁N BK₅₀ کاهش معنی‌داری 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 معنی‌داری کمتر بود. ۱ درصد بیوجار اسیدی در تیمار مشابه (B₁N BK₅₀)، مقدار پتاسیم قابل استخراج را نسبت به شاهد ۱/۴ برابر افزایش داد.

در خاک لوم شنی غلظت پتاسیم قابل استخراج در تیمارهای B₂N BK₅₀K₇₅K₁₀₀ نسبت به شاهد به ترتیب ۳۳، ۱۰۰، ۸۹ و ۶۷ درصد افزایش یافت (شکل ۳ ب). غلظت پتاسیم قابل استخراج در تیمارهای B₁N B₂A به ترتیب نسبت به تیمار شاهد تقریباً ۱/۷ و ۱/۳ برابر شد. بیشترین غلظت پتاسیم قابل استخراج با افزایش ۵ برابری برای تیمار B₁N BK₅₀ به دست آمد و این مقدار برابر ۳۷۸/۹ میلی گرم در کیلوگرم بود. لازم به ذکر است افزایش کاربرد کود پتاسیمی در تیمارهای B₁N BK₇₅ و B₁N BK₁₀₀ منجر به کاهش معنی‌داری در غلظت پتاسیم قابل استخراج شد. مشابه با خاک لوم رسی، غلظت پتاسیم قابل استخراج در تمامی تیمارهایی که ۱ درصد بیوجار اسیدی دریافت کردند از تیمارهای متناظر که ۱ درصد بیوجار نرمال دریافت کردند به طور معنی‌داری کمتر بود. به طوری که در تیمار مشابه (B₁N BK₅₀)، مقدار پتاسیم قابل استخراج را ۳/۷ برابر نسبت به شاهد افزایش داد.



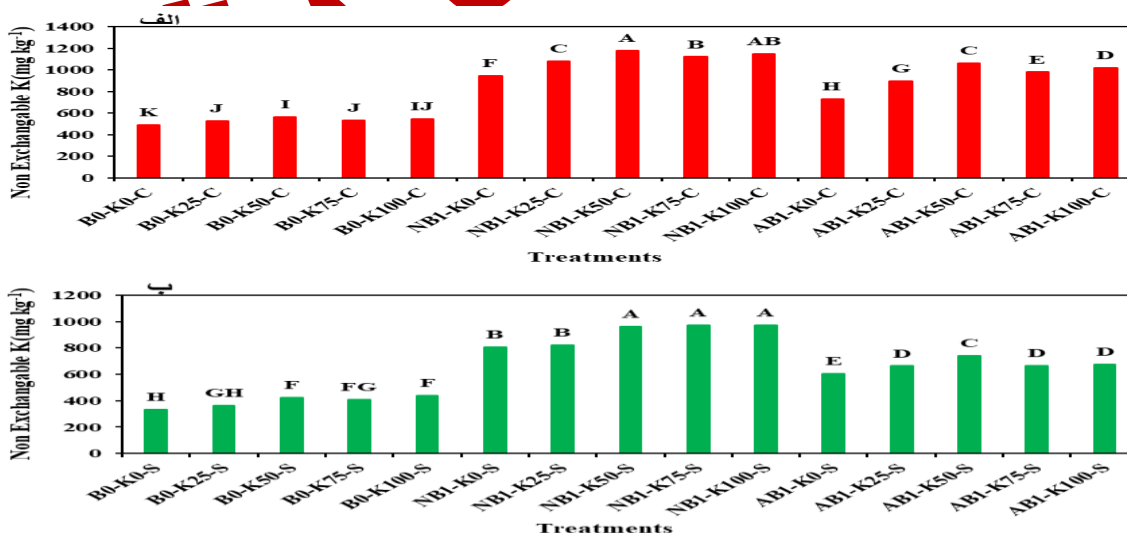
شکل

۳. مقایسه میانگین تأثیر بیوجار و کود پتاسیمی بر غلظت پتاسیم قابل استخراج 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 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)

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

با بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر ساده سطوح بیوجار و سطوح کود پتاسیمی بر غلظت پتاسیم غیر قابل تبادل در هر دو خاک در سطح احتمال یک درصد (01) تأثیر معنی‌داری داشتند. همچنین اثر متقابل آن‌ها نیز بر غلظت پتاسیم غیر قابل تبادل در خاک لوم رسی در سطح احتمال یک درصد (01) و در خاک لوم شنی در سطح احتمال پنج درصد (05) معنی‌دار بوده است (جدول ۵).

شکل (۴) تأثیر افزودن مقادیر مختلف بیوجارها (B₀, N₀, B₁, A₁, B₁) به همراه مقادیر مختلف کود پتاسیمی (K₀, K₂₅, K₅₀, K₇₅, K₁₀₀) 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 قابل تبدلی با افزایش میزان کود مصرفی در تیمارهای K₂₅, K₅₀, K₇₅ و K₁₀₀ افزایش محسوسی یافت و تیمار K₅₀ بیشترین افزایش را با ۱۵ درصد، نسبت به تیمار شاهد از خود نشان داد. تیمارهای NB₁ و AB₁ به ترتیب سبب افزایش ۹۳ و ۴۹ درصدی غلظت پتاسیم غیر تبدلی نسبت به تیمار شاهد شد. تیمار N B K₁ توانایی بیشتری نسبت به سایر تیمارها در افزایش مقدار پتاسیم غیر قابل تبادل داشت. به‌طوری‌که مقدار پتاسیم غیر قابل تبادل را از ۴۸۹/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار شاهد به ۱۱۷۷/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش داد (۱/۴ برابر افزایش نسبت به تیمار شاهد). در هر گروه از تیمارهایی که ۱ درصد بیوجار نرمال یا بیوجار 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 بیوجار اسیدی دریافت کردند به‌طور معنی‌داری کمتر از تیمار متناظر با ۱ درصد بیوجار نرمال بود. تیمار A B K₁ نیز در بین تیمارهای مربوط به کاربرد ۱ درصد بیوجار اسیدی، عملکرد بهتری داشت و توانست مقدار پتاسیم غیر قابل تبادل را به ۱۰۶۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم برساند (۱/۱ برابر افزایش نسبت به تیمار شاهد) (شکل ۴ الف).

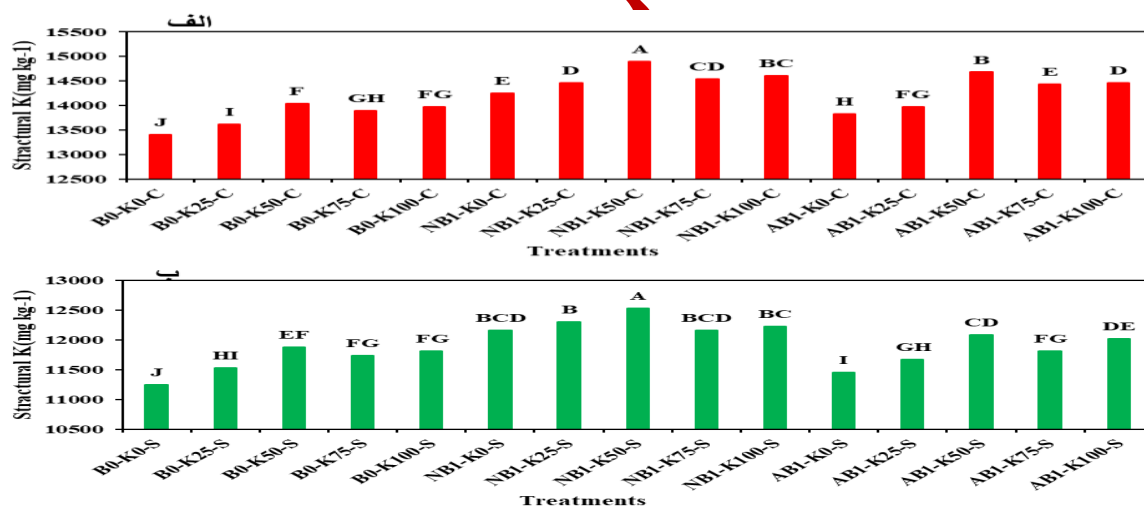


شکل ۴. مقایسه میانگین تأثیر بیوجار و کود پتاسیمی بر غلظت پتاسیم غیر قابل تبادل در خاک‌های (الف) لوم رسی و (ب) لوم شنی. ستون‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشابه باشند نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون ISD می‌باشد. (NB: بیوجار نرمال، AB: بیوجار اسیدی؛ 0: بدون مصرف بیوجار، 1 درصد بیوجار نرمال، 1 درصد AB: مصرف 1 درصد بیوجار اسیدی، K0: بدون مصرف کود پتاسیم، K25: مصرف 25 درصد توصیه کودی پتاسیم، K50: مصرف 50 درصد توصیه کودی پتاسیم، K75: مصرف 75 درصد توصیه کودی پتاسیم، K100: مصرف 100 درصد توصیه کودی پتاسیم)

در خاک لوم شنی، غلظت پتاسیم غیرتبادلی با افزایش میزان کود کاربردی در تیمارهای K_0 ، K_{25} ، K_{50} و K_{75} به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. به‌طوری‌که تیمار K_{75} با افزایش 35 درصدی نسبت به شاهد، نسبت به سایر مقادیر کود پتاسیمی موفق‌تر عمل کرد. در تیمارهای N_0 ، N_1 و N_2 به ترتیب افزایش 1/4 و 1/8 برابر غلظت پتاسیم غیرتبادلی نسبت به تیمار شاهد مشاهده شد. در خاک لوم شنی در همه تیمارهای مربوط به کاربرد بیوجار، افزایش مقدار کود پتاسیمی کاربردی از K_0 تا K_{75} منجر به افزایش مقدار پتاسیم غیر قابل تبادل نسبت به شاهد شد. به‌طوری‌که از 333/33 میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار شاهد به 975/44 میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار N_2 افزایش یافت (1/9 برابر افزایش نسبت به تیمار شاهد). لازم به ذکر است غلظت پتاسیم غیرتبادلی در تیمارهای حاوی 1 درصد بیوجار اسیدی نسبت به کلیه تیمارهای متناظر با 1 درصد بیوجار نرمال به‌طور معنی‌داری کمتر است (شکل ۴ ب).

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

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده سطوح بیوجار و سطوح کود پتاسیمی بر غلظت پتاسیم کل در هر دو خاک در سطح احتمال یک درصد (0.01) تأثیر معنی‌داری داشتند. همچنین اثر متقابل آن‌ها نیز بر غلظت پتاسیم کل در خاک لوم رسی در سطح احتمال پنج درصد (0.05) و در خاک لوم شنی در سطح احتمال یک درصد (0.01) معنی‌دار بوده است (جدول ۵).



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 ISD 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 25 درصد توصیه کودی پتاسیم، K50: مصرف 50 درصد توصیه کودی پتاسیم، K75: مصرف 75 درصد توصیه کودی پتاسیم، K100: مصرف 100 درصد توصیه کودی پتاسیم)

شکل (۵) تأثیر افزودن مقادیر مختلف بیوجارها (N_0 ، N_1 ، N_2) 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_0 و K_{25} 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 A B_1 N B_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 میلی گرم در کیلوگرم با افزایش $11/1$ درصدی برای تیمار N BK_{10} ثبت شد. غلظت پتاسیم کل در تیمار A BK_{10} برابر با 14681 میلی گرم در کیلوگرم بود که $9/5$ درصد نسبت به شاهد افزایش داشت که در مقایسه با N BK_{10} به طور معنی‌داری کمتر بود. همچنین، غلظت پتاسیم کل در تمامی تیمارهایی که 1 درصد بیوچار اسیدی دریافت کردند از تیمارهای متناظر با 1 درصد بیوچار نرمال به طور معنی‌داری کمتر بود.

در خاک لوم شنی غلظت پتاسیم کل در تیمارهای K_{10} K_{20} K_{30} K_{40} 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 A B_1 N B_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 N BK_{10} به دست آمد و این مقدار برابر 12531 میلی گرم در کیلوگرم بود. لازم به ذکر است افزایش کاربرد کود پتاسیمی در تیمارهای N BK_{10} و N BK_{20} نسبت به N BK_{10} منجر به کاهش معنی‌داری در غلظت پتاسیم کل شد. مشابه با خاک لوم رسی، غلظت پتاسیم کل در تمامی تیمارهایی که 1 درصد بیوچار اسیدی دریافت کردند از تیمارهای متناظر که 1 درصد بیوچار نرمال دریافت کردند به طور 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 به عنوان 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 (Tafaghhi 1999). غلظت پتاسیم کمتر از 2 درصد در کل اندام هوایی در طول دوره رشد رویشی نشان‌دهنده کمبود پتاسیم در برنج و پاسخ آن به کود پتاسیمی محتمل است (Gdestanifard et al, 2020). کاربرد کود پتاسیمی به‌تنهایی در مقادیر مختلف، غلظت پتاسیم زیست‌توده برنج را کمتر از 2 درصد نگه داشت. در واقع حتی استفاده از 200 کیلوگرم پتاسیم در هکتار که بیش از مقدار مرسوم کود مصرفی ($100-150$ 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 A B_1 N B_1 به‌تنهایی در هر دو خاک مورد مطالعه، غلظت پتاسیم زیست‌توده برنج را همچنان کمتر از 2 درصد نگه داشت ولی کاربرد N B_1 به همراه مقادیر مختلف کود پتاسیمی در هر دو خاک غلظت پتاسیم زیست‌توده برنج را به 2 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.

همان گونه که در شکل های (۱) مشاهده می شود بیشترین غلظت پتاسیم زیست توده گیاه مربوط به تیمار N BK است که غلظت پتاسیم زیست توده را در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب ۳ و ۵/۲ برابر نسبت به شاهد افزایش داد. بیشترین غلظت پتاسیم دانه نیز مربوط به کاربرد N BK است. چنان که توانست غلظت پتاسیم دانه را در دو خاک لوم رسی ۴۶/۲ درصد و در خاک لوم شنی ۵۴/۱ درصد نسبت به شاهد افزایش دهد (شکل های ۲). به طور کلی پاسخ گیاه نیز به کاربرد ۱ درصد بیوپار نرمال و ۱ درصد بیوپار اسیدی در هر دو خاک مثبت بود و نتایج بدست آمده در (جدول ۴) نشان داد که بیشترین میزان پاسخ گیاه به کاربرد ۱ درصد بیوپار نرمال به همراه کود پتاسیم، مربوط به تیمار N BK بود که می توان به این نتیجه رسید با افزایش سطح کاربرد بیوپار 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 ۱۰ و ۹/۷۵ برابر نسبت به شاهد افزایش یافت. بیوپار 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 (Sundal, 2014). در واقع بیوپارها به عنوان یک حامل مناسب برای افزایش تغذیه پتاسیم گیاه عمل می کنند، زیرا استفاده از ۳۰۰۰۰ کیلوگرم در هکتار بیوپار ۱۳۶ 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 بیوپار بر بهبود وضعیت پتاسیم محصول و عملکرد متمرکز شده اند. (Biederman andapol, 2013) بیان کردند بیوپار 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 M)، 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 بیوپار تولید شده از زیست توده غنی از پتاسیم به سرعت جذب پتاسیم توسط گیاهان را افزایش می دهد. بنابراین، چنین بیوپاری 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 (Akkaim et al, 2017) تأیید شده است. (Oram et al, 2014) گزارش دادند که کاربرد بیوپار در ترکیب با کودهای معدنی باعث افزایش عملکرد بقولات و محتوای پتاسیم آنها 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 بیوپار 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 مثبت تیمار بیوپار کاه ذرت (شاهد، ۵ تن در هکتار، ۱۰ تن در هکتار، ۱۵ تن در هکتار، ۲۰ تن در هکتار، ۲۵ تن در هکتار، ۳۰ 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 بیوپار افزایش یافت و بیشترین غلظت پتاسیم در گیاهان ذرت با نرخ ۲۰ تن در هکتار اتفاق افتاد. در مقابل، غلظت پتاسیم ذرت در تیمار ۲۵ و ۳۰ تن در هکتار کاهش یافت. (Elnagar 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 بیوپار هستند. هنگامی که بیوپار 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 آنها، بر حاصلخیزی خاک و رشد گیاه تأثیر زیادی می گذارد. بنابراین، پتانسیل تأمین پتاسیم بیوپار به طور غیرمستقیم با بهبود طولانی مدت خواص فیزیکی و شیمیایی خاک پس از کاربرد بیوپار مرتبط است. به عنوان مثال، پتانسیل بیوپار برای حفظ پتاسیم از طریق افزایش C E 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 خاکها (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 تأمین پتاسیم خاک و کانی‌های رسی غالب می‌توانند بر راندمان پتاسیم اضافه شده تأثیر بگذارند. همچنین، وجود کانی‌های رسی ۲:۱ مانند ایلایت یا ورمیکولایت بر توانایی خاک برای آزاد کردن یا جذب پتاسیم غیرقابل تبادل تأثیر می‌گذارد و بنابراین در دسترس بودن پتاسیم را زمانی که بارگذاری پتاسیم قابل تبادل ناکافی است، تعیین می‌کند (Bilal & al, 2023).

با مطالعه نتایج بدست آمده پس از برداشت محصول (شکل‌های ۳)، مشاهده می‌شود که افزودن مقادیر مختلف بیوپچارها (B_0 , B_1 , B_2 , B_3 , B_4 , B_5) به همراه مقادیر مختلف کود پتاسیمی (K_0 , K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5) باعث افزایش پتاسیم قابل استخراج در هر دو خاک شدند. به طوری که تیمار $N-BK_5$ در مقایسه با سایر مقادیر پتاسیم اعمال شده همراه با ۱ درصد بیوپچار نرمال، موفق‌تر عمل کرد و توانست غلظت پتاسیم قابل استخراج را در هر دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب ۲/۳ و ۵ برابر نسبت به شاهد افزایش دهد. با مشاهده نتایج موجود در (شکل‌های ۴)، غلظت پتاسیم غیرقابل تبادل نیز در خاک لوم شنی با کاربرد $N-BK_{10}$ غلظت پتاسیم غیرقابل تبادل را ۱/۹ برابر نسبت به شاهد افزایش داد. در خاک لوم رسی اما کاربرد $N-BK_5$ موفق‌ترین تیمار در افزایش شکل پتاسیم غیرقابل تبادل بود و توانست غلظت پتاسیم غیرقابل تبادل را ۱/۴ برابر نسبت به شاهد افزایش دهد. به طور کلی، پتاسیم محلول در آب (KNO_3 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 به عنوان 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 به عنوان پتاسیم غیرقابل تبادل با عمل میکروب‌های خاک، به عنوان منابع و مخازن پتاسیم موجود در خاک تثبیت شوند تا در هنگام کمبود مجدد رها شوند و توسط گیاهان جذب شوند (Lin & al, 2018). Wang & 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 انتی سول، افزایش بیش‌تر در شکل غیرقابل تبادل پتاسیم بود که می‌تواند مربوط به محتوای بیشتر کانی‌های ۱:۲ در این خاک باشد که تشبیه 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 به تنهایی یا به همراه کود پتاسیمی، پاسخ مثبت دادند. همان‌گونه که در جدول (۴) مشاهده می‌شود کاربرد $N-BK_5$ ارتفاع گیاه را در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب ۱۶/۴ و ۲۲/۷ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. بیش‌ترین وزن هزار دانه نیز در هر دو خاک متعلق به کاربرد $N-BK_5$ است که توانست وزن هزار دانه را در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به ترتیب ۳۶/۹ و ۳۷/۲ درصد نسبت به شاهد افزایش دهد (جدول ۴). بیش‌ترین عملکرد زیست‌توده گیاه مربوط به کاربرد $A-BK_{10}$ 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 $N-BK_{10}$ است که موفق شد عملکرد دانه برنج را در دو خاک لوم رسی و لوم شنی ۲/۲ برابر نسبت به شاهد افزایش دهد. طبق نتایج بدست آمده می‌توان دریافت که کاربرد ۱ درصد بیوپچار نرمال و ۱ درصد بیوپچار اسیدی به تنهایی و یا به همراه 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 به دلیل 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 $C E E pH$ 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 ۶۰۰۰۰ کیلوگرم در هکتار به این خاک منجر به افزایش وزن تر و خشک بوته گندم به ترتیب ۹۶/۸ و ۱۲۳/۵ درصد نسبت به تیمار شاهد شد (M asulili and t m 0 10 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. (M ajor & al 0 10 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. (H uang & al 0 19 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 به همراه ۳۰ گرم کمپوست در کیلوگرم خاک، موجب شد وزن هزار دانه، وزن خوشه، وزن کل گیاه و تعداد دانه بر نسبت به شاهد افزایش یابد و به بیشترین میزان خود برسد. همچنین عملکرد دانه نیز با افزایش سطح کاربرد بیوپچار کاه برنج افزایش یافت. (G u & al 0 22 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 (B iederman and H apole, 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 ($N BK m$ و $N BK n$) 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 توأمان بیوپچار و کود پتاسیمی ($N BK n$) به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. هرچند کاربرد توأمان 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.

منابع

۱- پورصالح، مسعود. (۱۳۷۳). غلات (گندم، جو، برنج، ذرت). انتشارات صفار، چاپ دوم. ۱۴۴ ص.

- ۲- توللی، حسین و سمنانی، ابولفضل (۱۳۷۱). روش‌های تجزیه خاک‌ها، گیاهان، آب‌ها و کودها. دانشگاه شهید چمران، چاپ اول. ۲۱۹ ص.
- ۳- فلاح طولی کلایی، سپیده؛ بهمنیار، محمد علی و صادق زاده، فردین (۱۳۹۳) تأثیر کاربرد کمپوست زباله شهری و بیوجار بر عملکرد و غلظت برخی عناصر غذایی پرمصرف و کم‌مصرف 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.
- ۴- 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.
- ۵- ملکوتی، محمد جعفر؛ شهابی، علی اصغر و بازرگان، کامبیز (۱۳۹۵). پتاسیم در کشاورزی (نقش پتاسیم در تولید محصولات کشاورزی سالم). انتشارات بهران مبلغان. چاپ دوم. ۳۶۰ ص.
- ۶- موسوی، سید یوسف؛ محمدیان، محمد و نصیری، مرتضی (۱۳۸۹). کوددهی سرک نسبت‌های مختلف کلرور پتاسیم به همراه اوره بر کمیت و کیفیت برنج رقم شیروانی. یازدهمین کنگره علوم زراعت و اصلاح نباتات ایران، تهران.
- ۷- هوشمندفر، علیرضا؛ طهرانی، محمد مهدی و هاشمولیان، بابک (۱۳۷۲). تأثیر مصرف و کارایی نیتروژن بر میزان پروتئین دانه و کارایی مصرف نیتروژن در گندم، کاه و زیست بوم. ۵۲-۶۲.

References

- 1 Kaim A., Kumar S., Singh K., Pandey 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.
- 2 Alotaibi A., Alotaibi 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(7): 2026-2033.
- 3 Arshamkesh S., Gholami A., Sadeghi B., Aghaie M. and Ghaheri H. G. & Pourbabaee A. A. (2015) Effects of rice husk biochar application on the properties of alkaline soil and lentil growth. *Iranian Journal of Plant, Soil and Environment* 6(1).
- 4 Bagyalakshmi B., Paramurugan P. & Manimuthu S. (2012) Influence of potassium solubilizing bacteria on crop productivity and quality of tea (*Camellia sinensis*). *African Journal of Agricultural Research* 5(10): 4250-4259.
- 5 Biederman L. A. & Harpole W. S. (2013) Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *Global Change Biology bioenergy* 4(2): 202-214.
- 6 Bartsch P. M. & Thomas G. W. (1985) Potassium status of temperate region soils. *Potassium in agriculture* 129-162.
- 7 Biliş F., Kaderiş D., Richardson C., Babayiannis N. & Gaspardos D. (2023) Biochar application as a soil potassium management strategy: A review. *Science of the Total Environment* 8581: 59782.
- 8 Bremner J. M. & Mulvaney C. S. (1982) Nitrogen—total. *Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties* 9: 595-624.
- 9 Elnagar A., El-Sayed S., Rinklebe J., Farooq M., Seng H., Samah A. K., ... & Oki S. (2019) Biochar application to low fertility soils: A review of current status and future prospects. *Geoderma* 337: 536-554.
- 10 Fallah-dekolaj S., Bahmanyar M. A. & Sadeghzadeh F. (2015) The effect of applying municipal solid waste compost and biochar on yield and concentration of some macro and micro nutrients in rice plant. *MS thesis in soil science and engineering, soil chemistry, fertility and plant nutrition faculty of agricultural sciences at Agricultural Sciences and Natural Resources University* 8 p (in Persian).

- 11 G eG .W .& B aderJ .W (1986) Particle-size analysis *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods* 5383411.
- 12 G estanF arA .& T dighiH (2008) Potassium fixation in paddy soils in north of Iran *Iranian Journal of Agriculture Science* 39, 173-185.
- 13 G estanifardA .,S atnerJ .,A ryanA .,K alH .P .& W anzelW .W (2020) Potassium fixation in northern Iranian paddy soils *Geoderma* 375:114475.
- 14 G uW .,W angY .,F engZ .,W uD .,Z hangH .,Y unH ., ...& Z hangW (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.
- 15 H alpinJ .L .,B atonJ .D .,T isdaleS .L .& NelsonW .L (1991) Soil fertility and fertilizers in introduction to nutrient management *Pentice-Hall* 196-216.
- 16 H ashmandfarA .R .,T ehranjM .M .& D enavahiA .shemlouyanB (2008) The effect of different nitrogen levels on rice yield and nitrogen use efficiency in wheat-rice rotation system *45* (5):52-62. (in persian).
- 17 H ungM .,L ongF .A .N .,J iangL .G .,Y angS .Y .,Z uY .B .& U phoffN (2019) Continuous applications of biochar to rice: Effects on grain yield and yield attributes *Journal of integrative agriculture* 18 (5):563-570.
- 18 International research institute (IRRI).
- 19 B (2012) Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil
- 20 I ppolitoJ .A .,D ueyT .F .,C atrellK .B .,N oakJ .M .& L entzR .D (2016) Designer acidic biochar influences calcareous soil characteristics *Chemosphere* 142:184-191.
- 21 J alim .& K dahchiZ (2007) Short-term potassium release and fixation in some calcareous soils *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 170 (5):530-537.
- 22 K ndsenD .L .,P ersonG .A .& P attP .F (1992) Lithium, sodium and potassium. *Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties* 92:25-246.
- 23 LiX .,L iJ .,W uL .& ChenF (2009) The difference of potassium dynamics between yellowish red soil and yellow cinnamon soil under rapeseed (*Rapissica napus*) -rice (*Oryza sativa*) rotation *Plant and Soil* 320:141-151.
- 24 LiX .,Z hangL .,L iJ .,L iaoZ .,L iJ .,R anT .& C ongR (2014) Potassium mobilization and transformation in red paddy soil as affected by rice *Agronomy Journal* 106 (1):1011-1017.
- 25 LiuS .,T angW .,Y angF .,M engJ .,C henW .& LiX (2018) Influence of biochar application on potassium-solubilizing *Bacillus mucilaginosus* as potential biofertilizer *Preparative Biochemistry and Biotechnology* 40 (1), 32-37.
- 26 LindsayW .L .,N ewellW .A (1978) Development of a soil test for zinc, iron, manganese and copper *Soil Science Society of America Journal* 42:421-428.
- 27 M ajorJ .,L ehmannJ .,RondonM .& GodaleC (2010) Fate of soil-applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration *Global Change Biology* 16 (13):1366-1379.
- 28 M akoutiM .J .& H ameiM (2004) Soil fertility management in arid and semi-arid regions: constraints and mitigation strategies *Abiati M. Alares university office for Scientific Publications, Tehran, Iran* 02 pp. (in persian).
- 29 M akoutiM .J .,S habajiA .A .& B azarganK (2016) Potassium in agriculture: the unrecognized role in the production of healthy agricultural crop *M. Taleghani publishing house, Tehran, Iran* 360 pp. (in persian).

30 M asilij A ,U tomow H ,& S yehfanj M S 2010).R ice husk biochar for rice based cropping system in acid soil .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* 150 (3) 39 .

31 Mizutani Y ,K ubotera H ,F ujii T ,M ada T ,W atanabe M ,& Hiradate S 2024).Recharge of exchangeable K from non-exchangeable fractions as affected by exchangeable K and acquisition by rice in Japanese paddy soils *Soil Science and Plant Nutrition* 70 (2) 295-305 .

32 Masavij Y ,M dhamadian M ,& Nasiri M 2010).The effect of potassium fertilization with different ratios of potassium chloride and on yield and quality of shiroudi rice cultivar 111 Iranian congress on agronomy and plant breeding 13-14 April 2010 (in persian) .

33 Nakano A ,T hiray Y ,F ukawa S ,& K osaki T 2008).Characterization of the frayed edge site of micaceous minerals in soil days influenced by different pedogenetic conditions in Japan and northern Thailand *Soil science and plant nutrition* 54 (4) 479-489 .

34 Nelson R .E 1982).Carbonate and gypsum *Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and microbiological properties* 91-81-197 .

35 Nasir Z ,J alil B ,& S adegh Z adeh F 2024).Biochars application reduces potassium fixation and improves rice potassium content in depleted paddy soils *Journal of Environmental Management* 350 117555 .

36 Olsen S R ,C ec N ,W atanabe F S ,& Dean C A 1954).Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate U.S. Department of Agriculture Circular 939 (19) .

37 Olan N J , van der Horst F ,O uwehand G J ,B oemer T M ,M onner L ,J effer S ,& V an den I ngen J.W 2014).Soil amendment with biochar increases the competitive ability of legumes via increased potassium availability *Agriculture, Ecosystems & Environment* 1919 2-98 .

38 Patterson F 1965).Potassium in methods of soil analysis Part 2 Chemical and microbiological properties 92 .E d 3 : Norman, A.G 22-1030 .

39. 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.

40 Rhoades J .D 1996).Soil salinity Electrical conductivity and total dissolved solids *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods* 541-7435 .

41 S adegh Z adeh F ,P aichehreh M ,J alil B ,& B dmanyar M A 2018).Rehabilitation of calcareous saline-sodic soil by means of biochars and acidified biochars *Land Degradation & Development* 29 (10) 3262-3271 .

42 Shino T ,Askin M .B ,K aya E .C ,A tko O .R .H .A .N .E rici E ,I mla 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 .

43 S un Z ,B rann E .W ,A rthur E ., de Jong L .W ,M ddrup P ,H aggaard N ielsen H ,& E lsgaard 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 .

44 Sumner M .E ,& Miller W .P 1996).Cation exchange capacity and exchange coefficients *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods* 512-01-1229 .

45 S ahney B .L 1972).Selective sorption and fixation of cations by clay minerals a review *Clays and clay minerals* 20 (3) 93-100 .

46 Simonsson M ,H illier S ,& Öborn L 2009).Changes in clay minerals and potassium fixation capacity as a result of release and fixation of potassium in long-term field experiments *Geoderma* 150 (3-4) 109-120 .

47 Simard R .R ,Z izka J ,& D K impe C R 1992).Release of potassium and magnesium from soil fractions and its kinetics *Soil Science Society of America Journal* 56 (4) 1421-1428 .

- 48 Silber A., L. okovitch I., & G. aber E. R. (2010). pH-dependent mineral release and surface properties of cornstraw biochar: agronomic implications. *Environmental science & technology* 44(4), 9318-9323.
- 49 P. otela E., M. oteiro F., Fonseca M., & A. beu M. M. (2019). Effect of soil mineralogy on potassium fixation in soils developed on different parent material. *Geoderma* 343, 226-234.
- 50 P. ursaleh M. (1994). Carbon top wheat, barley, rice and maize. *affar publication* 44 pp (in persian).
- 51 T. an D., L. iu Z., J. iang L., L. u J., & L. i J. (2017). Long-term potash application and wheat straw return reduced soil potassium fixation and affected crop yields in cotton. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 108, 121-133.
- 52 T. avalolij H., & S. emnanj A. (1991). Methods of analysis of soil, plants, waters and fertilizers. *lahid damran University publications* 19 pp (in persian).
- 53 T. owfighi H. (1999). Response of rice to potassium application in paddy soils of northern Iran. *Iranian Journal of Agricultural Sciences* 29(4), 869-883.
- 54 U. S. D. A. (2020). World rice supply and utilization. Available at <https://www.ers.usda.gov/data-products/rice-yearbook/> (Accessed 12 July 2020).
- 55 W. alkley A., & B. lack I. A. (1934). An examination of the egjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science* 3(2), 29-38.
56. 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.
- 57 W. ang L., X. u C., N. i X., L. iu Y., & C. hen F. (2018). Effects of biochar application on soil potassium dynamics and crop uptake. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 186(3), 635-643.
- 58 W. u X., W. ang D., R. iaz M., Z. hang L., & J. iang 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.
- 59 Z. hao H., B. S. ong Q., W. u X. Y., & Y. ao Q. (2015). Study on the transformation of inherent potassium during the fast-pyrolysis process of rice straw. *Energy & fuels* 29(10), 6404-6411.
- 60 Z. hao W., Z. hao Q., T. ian Z., C. u Y., L. iang Y., & W. ang 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.
- 61 Z. hang M., R. iaz M., L. iu B., X. iu H., E. D. souki Z., & J. iang C. (2020). Two-year study of biochar: Achieving excellent capability of potassium supply via alter day mineral composition and potassium-dissolving bacteria activity. *Science of the Total Environment* 717, 137286.