



Effect of Fly Ash and Its Derivatives on Yield of Two Rice Cultivars (Champa and Anbarbo) in Cadmium-Contaminated Soils

Ahlam Maleknasari¹, Shahram Goudarzi²✉, Abdolamir Yousefi³, Ali Afrous⁴, Arash Borzou⁵

1. Department of Soil Science, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran. Email:

dr.ahlammaleknasari@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Healthy and Organic Products Technology Research Center, Dezful branch, Islamic Azad University, Dezful, [Iran. Email: Goudarzi55@gmail.com](mailto:Goudarzi55@gmail.com)

3. Department of Soil Science, Healthy and Organic Products Technology Research Center, Dezful branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran. Email: Abdolamiryousefi@yahoo.com

4. Department of Water Engineering, Healthy and Organic Products Technology Research Center, Dezful branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran. Email: ali.afrous@gmail.com

5. Department of Agronomy, Varamin-Pishva Branch, Islamic Azad University, Varamin, Iran. Email:

arash_borzou@yahoo.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Cadmium is one of the heavy metals, which the results of recent research indicate the severe biological toxicity, irreversibility, accumulation and non-degradability of this element in nature, and its accumulation in the soil causes a decrease in soil fertility and crop yields. One of the ways to improve the fertility of contaminated soils is the use of waste materials such as fly ash and its derivatives. The aim of this study was to investigate the effect of fly ash derivatives and genotype treatments on rice yield. The experiments of two cropping years 2019-2020 and 2020-2021 were performed in two forms of field and pot cultivation in private lands located in Kheyber town of Dezful city. This research was done by split plot method and in the form of randomized complete block design. The main factor included four amendments; soil with zero ash (as control), ash, intermediate material and zeolite. The sub-factor included two cultivars; Champa and Anbarbo. The studied traits are grain yield and plant dry weight. Comparison of treatment averages were done by Duncan's method and at two probability levels of 1% and 5%. According to the results, the effect of fly ash treatment and its derivatives on rice yield had a significant effect at 1% level. Genotype also had a significant effect on rice yield at 1% level. Also, the interaction effect of fly ash treatment and derivatives and genotype treatment had a significant effect on rice yield at 1% level. So that the lowest and the highest amount of yield with the amount of 3065.42 and 3555.96 kg/ha in the field experiment and 3162.54 and 3668.1 kg/ha in the pot experiment were corresponded to the control treatment and Anbarbo variety and fly ash Champa treatments respectively. It was found that the treatment of fly ash and Champa variety was statistically higher than the other treatments at 5% level according to Duncan's test. According to the comparison results, the highest yield in both field and pot tests was observed in intermediates treatment and Champa variety.
Article history:	
Received: Apr. 26, 2022	
Revised: July. 5, 2022	
Accepted: July. 16, 2022	
Published online: Aug. 23, 2022	
Keywords: Soil Fertility, Zeolite, Soil Chemical Properties, Plant Genotype, Dry Weight.	

Cite this article Maleknasari, A., Goudarzi, Sh., Yousefi, A. A., Afrous, A., & Borzou, A. (2022) Effect of Fly Ash and Its Derivatives on Yield of Two Rice Cultivars (Champa and Anbarbo) in Cadmium-Contaminated Soils. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (6), 1345-1357.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.342222.669254>



بررسی تأثیر خاکستر بادی و مشتقات آن بر عملکرد دو رقم برنج (چمپا و عنبر بو) در خاک‌های آلوده به کادمیوم

احلام ملک‌ناصری^۱، شهرام گودرزی^۲، عبدالامیر یوسفی^۳، علی افروس^۴، آرش برزو^۵

۱. گروه خاکشناسی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران. ایمیل: dr.ahlammaleknaseri@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه خاکشناسی، مرکز تحقیقات فناوری تولید محصولات سالم و ارگانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

ایمیل: Goudarzish55@gmail.com

۳. گروه خاکشناسی، مرکز تحقیقات فناوری تولید محصولات سالم و ارگانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران. ایمیل:

Abdolamiryousefi@yahoo.com

۴. گروه مهندسی آب، مرکز تحقیقات فناوری تولید محصولات سالم و ارگانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران. ایمیل:

ali.afrous@gmail.com

۵. گروه زراعت، واحد ورامین، دانشگاه آزاد اسلامی، ورامین، ایران. ایمیل: arash_borzou@yahoo.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۲/۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۴/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۴/۲۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۶/۱

واژه‌های کلیدی:

حاصلخیزی خاک،

ژئولیت،

خصوصیات شیمیایی خاک،

ژئوتیپ گیاه،

وزن خشک.

کادمیوم یکی از فلزات سنگین است که نتایج تحقیقات اخیر حاکی از سمیت شدید بیولوژیکی، برگشت‌ناپذیری، انباشت و عدم تجزیه‌پذیری این عنصر در طبیعت می‌باشند که تجمع آن در خاک سبب کاهش حاصلخیزی خاک و عملکرد محصولات زراعی می‌شود. یکی از روش‌های بهبود حاصلخیزی خاک‌های آلوده، استفاده از مواد زائد و دورریختنی از جمله خاکستر بادی و مشتقات آن می‌باشد. پژوهش حاضر به منظور بررسی اثر تیمار مشتقات خاکستر بادی و ژئوتیپ بر عملکرد برنج در خاک آلوده شده با کادمیوم انجام پذیرفت که طی آزمایشی دوساله در سال‌های زراعی ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ به صورت کشت مزرعه‌ای و ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ به روش کشت گلدانی در اراضی شخصی واقع در شهرک خیبر از توابع شهرستان دزفول اجرا گردید. این تحقیق به روش اسپلیت پلات و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد. عامل اصلی شامل تیمار خاکستر بادی و مشتقات آن در چهار سطح تیمار کنترل (خاک معمولی مزرعه آلوده به کادمیوم بدون خاکستر و مشتقات آن)، خاکستر بادی، تیمار ماده واسطه‌ای و ژئولیت، و عامل فرعی ژئوتیپ در دو سطح شامل رقم چمپا و عنبربو بود. صفات مورد بررسی عملکرد دانه و وزن خشک بوته می‌باشد. مقایسه میانگین تیمارها به روش دانکن و در دو سطح احتمال ۱ و ۵ درصد انجام شد. طبق نتایج به‌دست‌آمده، تیمار خاکستر بادی و مشتقات آن، ژئوتیپ و اثر متقابل تیمار خاکستر بادی و مشتقات و تیمار ژئوتیپ همگی بر روی میزان عملکرد برنج تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد در هر دو آزمایش مزرعه‌ای و گلدانی داشتند. به طوری که کمترین و بیشترین میزان محصول با مقدار ۳۰۶۵/۴۲ و ۳۵۵۵/۹۶ کیلوگرم در هکتار در آزمایش مزرعه‌ای و ۳۱۶۲/۵۴ و ۳۶۶۸/۱ کیلوگرم در هکتار در آزمایش گلدانی به ترتیب در تیمار شاهد و رقم عنبربو و تیمار خاکستر بادی و رقم چمپا به‌دست آمد. اختلاف به‌دست‌آمده از نظر آماری در سطح ۵ درصد طبق آزمون دانکن معنی‌دار بود. به طوری که با توجه به نتایج مقایسه میانگین بیشترین میزان عملکرد در هر دو آزمون مزرعه‌ای و گلدانی در تیمار مواد واسطه‌ای و رقم چمپا مشاهده شد.

استاد: ملک‌ناصری، احلام؛ گودرزی، شهرام؛ یوسفی، عبدالامیر؛ افروس، علی؛ برزو، آرش (۱۴۰۱). بررسی تأثیر خاکستر بادی و مشتقات آن بر عملکرد دو رقم برنج (چمپا و عنبر بو) در خاک‌های آلوده به کادمیوم. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۶)، ۱۳۴۵-۱۳۵۷.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.342222.669254>



© نویسنده‌گان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

خاک مهم‌ترین عامل محیطی است که زندگی انسان به شدت به آن وابسته است (Zhang et al., 2018). در حال حاضر یکی از چالش‌های اساسی در زمینه محیط‌زیست، افزایش تدریجی غلظت فلزات سنگین در خاک به سبب عدم تجزیه آن‌ها توسط میکروارگانیسم‌ها می‌باشد. این گونه فلزات پس از جذب و انباشت در بافت‌های گیاهی با توجه به داشتن خواص و اثرات بالقوه سیتوتوکسیک، کارسینوژنیک و موتاژنیک، مخاطرات جدی را بر سلامت انسان و سایر موجودات زنده وارد می‌نمایند (Amouei et al., 2006; Iskandar & Kirkham, 2001). با توجه به روند رو به رشد جمعیت دنیا از سویی و افزایش تدریجی میزان آلودگی‌های محیط‌زیست و به دنبال آن نابودی بخش مهمی از خاک‌های کشاورزی، چالش‌های اساسی و جدی دنیا در دهه آینده بر سر موضوع مهم امنیت غذایی از جنبه‌های کمی و کیفی آن خواهد بود. در کشور ما نیز با توجه به افزایش روند توسعه صنعتی در برنامه‌های ساخت و احداث صنایع و کارخانه‌های مختلف از سویی و نیز وجود قابلیت بالقوه مناسب در زمینه توسعه کشاورزی در اکثر مناطق و خصوصاً در استان‌های جنوبی و شمالی کشور، آلودگی خاک‌های مناطق مزبور به انواع ترکیبات آلاینده از جمله فلزات سنگین سرب، کادمیوم و روی و نیز پاک‌سازی این نوع فلزات سمی و خطرناک از محیط‌زیست و خاک دارای اهمیت زیاد خواهد بود. (Amouei et al., 2012; Zuo et al., 2021; Kicińska et al., 2022).

روش‌های فیزیکی و شیمیایی متعددی برای پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین وجود دارد که اغلب آن‌ها علاوه بر هزینه زیاد منجر به تخریب ساختار فیزیکی و شیمیایی و فعالیت‌های حیاتی خاک می‌شوند (Krämer, 2005). تکنولوژی اصلاح در محل به دلیل عملکرد ساده، کم‌هزینه بودن در مدیریت واقعی خاک بسیار مورد توجه و استفاده قرار گرفته است (Yu et al., 2019). این فناوری برای ترمیم خاک و بهبود حاصلخیزی آن در کشور چین به یک روند رایج تبدیل شده است (Zhang et al., 2019). اخیراً مطالعات به سمت استفاده از مواد زائد و دورریختنی جهت بهبود حاصلخیزی خاک و کاهش جذب فلزات سنگین در خاک سوق داده شده است که کاربرد اصطلاح پسیواتورها^۱ برای این فرایند رایج شده است (Yang et al., 2017a; Sanchez-Hernandez et al., 2019). خاکستر بادی یک ماده زائد جامد صنعتی است که سالانه ۳۰ میلیون تن تولید می‌گردد که تقاضای داخلی آن بسیار پائین است و در برخی کشورها عمدتاً در تولید آجر، سنگ‌فرش جاده‌ها و ساخت سیمان کاربرد محدودی دارد (Xu & Shi, 2018; Bakare et al., 2019; Venkatesan et al., 2019).

خاکستر بادی^۲ محصول فرعی سوخت ذغال‌سنگ است که شامل سیلیس، آلومین و اکسیدهای آهن و کلسیم می‌باشد. خاکستر بادی در انواع C و F وجود دارد. نوع C خاکستر بادی به دلیل دارا بودن بیش از ۱۰ درصد اکسید کلسیم، خاصیت سیمانی شدن نیز دارد. خاکستر بادی از استخراج گازهای خروجی کوره‌های آتش با سوخت زغال و سیلت غیر پلاستیک و ریز می‌باشد که ترکیبی متفاوت بر اساس سوخت زغال طبیعی است و خاکستر بادی جزء مصالح زائد در نیروگاه‌های حرارتی می‌باشد. کشور هندوستان به دلیل داشتن مواد اولیه و همچنین وجود نیروگاه‌های برقی حرارتی بهترین مکان برای تولید خاکستر بادی می‌باشد (Ahmaruzzaman, 2010).

از جمله راهکارهای جدیدی که برای افزایش تأثیرگذاری و جلوگیری از هدررفت رطوبت و کودهای شیمیایی مورد استفاده قرار گرفته است، به‌کارگیری ترکیبات طبیعی چون کانی‌های زئولیت در مزارع کشاورزی می‌باشد (Polat et al., 2004). زئولیت‌ها مواد متخلخلی هستند که با ساختمان کریستالی خود مانند غربال مولکولی عمل کرده و به دلیل داشتن کانال‌های باز در شبکه خود، اجازه عبور بعضی از یون‌ها را داده و مسیر عبور بعضی از یون‌های دیگر را مسدود می‌کند. جذب انتخابی و آزادسازی کنترل‌شده عناصر غذایی توسط زئولیت باعث می‌شود که در صورت انتخاب صحیح نوع زئولیت مصرفی هنگامی که به خاک اضافه می‌شوند، از طریق افزایش فراهمی طولانی‌مدت رطوبت و عناصر غذایی به بهبود رشد گیاه کمک می‌کند. تحقیقات نشان داد که مصرف ۹ تن زئولیت در هکتار، توانست شاخص برداشت دانه گلرنگ را معادل ۵/۰۷ درصد نسبت به تیمار عدم مصرف زئولیت افزایش دهد و نقش مثبت آن در کاهش صدمات ناشی از تنش کمبود آب به اثبات رسید (Mirzakhani & Sibi, 2010). سایر محققان گزارش نمودند که اثر سطوح مختلف تنش آبی و مصرف سوپرچاذب‌ها بر پایداری غشاء سلولی در سطح آماری یک درصد معنی‌دار بودند. به‌طوری‌که بیشترین و کمترین ناپایداری غشاء سلولی با میانگین ۸۲/۰۹ و ۸۰/۶۳ درصد به ترتیب متعلق به تیمار آبیاری پس از ۱۴۰ و ۷۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک کلاس a بود (Khadem et al., 2010). مصرف زئولیت از طریق فراهم نمودن مقادیر بیشتری آب آبیاری برای ریشه‌ها، باعث ایجاد شرایط رشد و نمو بهتری برای گیاهان شده و تخریب غشاء سلول‌ها را کاهش می‌دهد (Mirzakhani & Sibi, 2010).



Mirzakhani (2016) در بررسی اثر مصرف زئولیت بر عملکرد دانه و صفات فیزیولوژیک گندم (رقم بک کراس روشن) در شرایط تنش کم‌آبی گزارش کردند اثر سطوح مختلف مصرف زئولیت بر صفات عملکرد دانه و بیولوژیکی گیاه، سطح ویژه برگ پرچم معنی‌دار بود. همچنین گزارش کردند که مصرف ۹ تن در هکتار زئولیت منجر به افزایش ۱۶/۷۹ درصد عملکرد نسبت به تیمار شاهد شد. Beyki & Khashei Siuki (2019) در بررسی اثر کاربرد زئولیت طبیعی و مدیریت آبیاری بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه داروئی سیاه‌دانه (*Nigella sativa L.*) گزارش کردند بیشترین ارتفاع بوته، وزن خشک و تر و وزن هزاردانه در تیمار زئولیت مشاهده شد که این تفاوت نسبت به تیمار شاهد معنی‌دار بود. Mohammadi et al. (2013) در بررسی اثر کاربرد زئولیت بر عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت دانه‌ای گزارش کردند که کاربرد زئولیت در شرایط تنش خشکی منجر به افزایش معنی‌دار عملکرد دانه‌ای، وزن هزاردانه، تعداد دانه در بلال و ارتفاع گیاه گردید. همچنین تیمار زئولیت منجر به بهبود کارایی مصرف آب گیاه ذرت در شرایط تنش گردید.

تاکنون حدود ۲۰۰ هزار هکتار از اراضی استان خوزستان به کشت برنج اختصاص یافته است. برنج عنبر بو و برنج چمپا دو رقم محلی بسیار با کیفیت و محصول معطر، خوش طعم و کاملاً طبیعی ایرانی مخصوص خوزستان است. سایر ارقام برنج در این استان عبارتند از طارم، شمیم، صدر و رقم محلی. آلودگی به کادمیوم یکی از مسائل عمده در بخش کشاورزی علی‌الخصوص مزارع برنج می‌باشد که تجمع زیاد آن در برنج منجر به تهدید جدی سلامت عمومی می‌شود. از طرفی استان خوزستان به عنوان یکی از مناطق مهم برنج‌کاری در ایران است که به دلیل فعالیت‌های صنعتی مختلف در آن، آلودگی خاک با فلزات سنگین و سایر آلوده‌کننده‌ها بالا می‌باشد (Fouladi et al., 2021). تاکنون آلودگی خاک‌های تحت کشت برنج در این استان به عناصری همچون سرب، کادمیوم، نیکل، و کروم گزارش شده است (Fouladi et al., 2021; Hojati, 2019). لذا با توجه مشکل آلودگی کادمیوم در اراضی شالیزار خوزستان و همچنین مزایای استفاده از خاکستر بادی از جمله ارزان‌قیمت بودن، در دسترس بودن و اثبات کارا بودن این ماده، هدف از این تحقیق بررسی تأثیر و کارایی خاکستر بادی و مشتقات آن در بهبود حاصلخیزی خاک‌های آلوده به کادمیوم و عملکرد برنج (*Oryza sativa L.*) می‌باشد که تا کنون چنین مطالعه‌ای انجام نشده است.

مواد و روش‌ها

محل اجرای آزمایش

این تحقیق به منظور بررسی اثر خاکستر بادی و مشتقات آن (مواد واسطه‌ای، زئولیت) بر حاصلخیزی خاک‌های آلوده به کادمیوم و گیاه برنج (*Oryza sativa L.*)، در اراضی شخصی واقع در شهرک خیبر از توابع شهرستان دزفول در سال‌های زراعی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ اجرا گردید. این منطقه با طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۲ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۲۲ دقیقه شمالی و ارتفاع ۸۲ متر از سطح دریا در فاصله ۱۲۰ کیلومتری از مرکز استان، در شمال غرب خوزستان واقع شده است. به‌طور کلی آب و هوای استان خوزستان نیمه استوایی، دارای تابستان‌های گرم و خشک و طولانی و زمستان‌های بارانی و مرطوب است. فصل گرمای خوزستان از اردیبهشت‌ماه شروع و تا اواخر مهر ادامه می‌یابد. که عمدتاً کشت برنج در این استان در فصل تابستان و به‌طور دقیق در خرداد و یا تیر کشت شده و انتهای تابستان محصول برداشت می‌شود. دوره بارندگی معمولاً بین ماه‌های آبان تا اردیبهشت بوده که در مناطق شمال جلگه خوزستان میزان بارندگی بیشتر و در مناطق جنوبی و شرق کمتر و محدودتر است. شرایط اقلیمی و ویژگی‌های آب و خاک این استان مستعد برای رویش اکثر گیاهان زراعی بوده و انطباق فیزیولوژیک این نباتات با اقلیم خوزستان موجب گردیده است تا تجمع ماده خشک این نباتات بسیار مطلوب و نزدیک به پتانسیل ژنتیکی آن‌ها باشد (Fouladi et al., 2021; Hojati, 2019). بر اساس بررسی‌های آماری جهت غالب بادهای منطقه جنوب، جنوب غربی به شمال، شمال شرقی می‌باشد. جمع ساعات آفتابی سالانه بیش از ۲۷۰۰ ساعت و تبخیر به بیش از ۲۴۰۰ میلی‌متر می‌رسد. بر اساس تقسیم‌بندی دوما رتن این منطقه جزو مناطق نیمه‌خشک و بر اساس کلیموگرام آمبرژه دارای آب‌وهوای گرم می‌باشد.

خاک محل آزمایش

با توجه به اهمیت و شرایط اجرای تحقیق جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، از خاک مزرعه از اعمال ۰ تا ۳۰ نمونه‌گیری به عمل آمد و مورد تجزیه قرار گرفت که نتایج آن در جدول شماره (۱) نشان شده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر

هدایت الکتریکی ds.m ⁻¹	اسیدیته کل اشباع pH	نیترژن کل %	فسفر قابل جذب mg/Kg	پتاسیم قابل جذب mg/Kg	درصد رس %	درصد سیلت %	درصد شن %
۰/۹۹	۷/۱	۰/۱۷	۶/۹	۱۰۸	۳۴	۳۵	۳۱

مشخصات طرح آزمایش

این آزمایش به صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در ۳ تکرار طی دو سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ و ۱۴۰۰-۱۳۹۹ به دو صورت کشت مزرعه‌ای و گلدانی انجام شد. تیمارهای تحقیق شامل تیمار خاکستر بادی و مشتقات آن به عنوان عامل اصلی در چهار سطح تیمار کنترل (CK) (خاک معمولی مزرعه آلوده به کادمیوم بدون خاکستر و مشتقات آن) خاکستر بادی (FA)، تیمار ماده واسطه‌ای (IP)، و تیمار زئولیت (ZE) و ژنوتیپ به عنوان تیمار فرعی شامل دو رقم چمپا (G1) و عنبربو (G2) می‌باشند. مواد به کار گرفته در این تحقیق خاکستر بادی، ماده واسطه‌ای (IP) و زئولیت (ZE) می‌باشد. خاکستر بادی به صورت آماده قابل دسترس می‌باشد، اما برای تهیه ماده واسطه‌ای و زئولیت نیاز به یک سری مراحل آزمایشگاهی می‌باشد تا از خاکستر بادی تهیه شوند.

جهت تهیه ماده واسطه‌ای (IP) ابتدا خاکستر بادی با سدیم هیدروکسید به نسبت جرم FA: NaOH = 5: 6 به طور یکنواختی ترکیب می‌گردد و پس از خنک شدن ماده حاصله، به مدت ۳ ساعت در آون با دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد جهت کریستاله شدن قرار می‌گیرد. سپس مواد کریستاله شده را پس از خنک شدن با اسید هیدروکلریک رقیق شده با غلظت ۰/۵ میلی‌مولار ترکیب نموده تا اسیدیته آن به حالت خنثی برسد. در نهایت در دمای معمولی خشک شده و جهت استفاده در تحقیق نگهداری و ذخیره می‌گردد (Zhao et al., 2020). جهت تهیه زئولیت (ZE)، مواد واسطه‌ای (IP) به نسبت جرم (IP: H₂O₂) = 1:6 با آب اکسیژنه مخلوط شده و جهت انجام واکنش هیدروترمال به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شود. ماده حاصله را پس از خنک شدن با اسید هیدروکلریک رقیق شده با غلظت ۰/۵ میلی‌مولار ترکیب نموده تا قلیای اضافی دفع شده و اسیدیته آن به حالت خنثی برسد و در نهایت ترکیب زئولیت حاصل می‌گردد. زئولیت حاصل در دمای اتاق خشک شده و جهت استفاده در تحقیق و نگهداری ذخیره می‌شوند (Zhao et al., 2020). مراحل اجرای آزمایش بدین صورت بود که پس از آماده‌سازی زمین (ماخار، دیسک، ماله، دیسک و فارو)، ابعاد کلی طرح از چهار طرف پیاده و گونیا شد و کرت‌ها و فواصل بین کرت‌ها و تکرارها مشخص شد. بذور به صورت دستی کشت شد. در طول اجرای آزمایش مبارزه با علف‌های هرز به صورت وجین دستی انجام شد.

پروتکل آلوده کردن خاک گلدان

آلوده کردن خاک با کادمیوم، با استفاده از نمک نترات کادمیوم Cd(NO₃)₂.4H₂O به صورت اسپری کردن محلول بر روی تمام قسمت‌های خاک انجام می‌گردد. نمک نترات کادمیوم علاوه بر کادمیوم، حاوی نترات نیز می‌باشد، بنابراین برای اضافه کردن مقدار ۲۰ میلی‌گرم کادمیوم به خاک از جرم مولی نمک نترات کادمیوم که برابر با ۳۰۸/۴۷ گرم بر مول است استفاده گردید. پس از ایجاد آلودگی، خاک‌ها به کیسه‌های پلاستیکی بدون زهکش منتقل شدند و به منظور رسیدن به تعادل یونی به مدت دو هفته درون این کیسه‌ها و در شرایط گلخانه‌ای در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۳ درصد نگهداری شدند تا برهمکنش آلاینده‌ها و خاک تکوین یافته و شرایط آلودگی طبیعی تر شود. جهت آماده کردن بستر کاشت و تیمارهای تحقیق، ابتدا مقداری از این خاک را جهت استفاده برای تیمار شاهد کنار گذاشته شد و سپس مابقی آن را به سه قسمت تقسیم کرده و به نسبت ۵ به یک (۵ نسبت خاک آلوده به کادمیوم، یک نسبت خاکستر بادی، مواد واسطه‌ای، زئولیت) مخلوط کرده و به درون گلدان‌ها انتقال داده شدند (Zhao et al., 2012; Zhao et al., 2020). با توجه به حجم زیاد مطالب، از ارائه نتایج اثر کادمیوم در محتوای فعلی خودداری شد.

روش انجام آزمایش گلدانی

ابتدا سوراخ‌های کف گلدان قبل از اضافه کردن خاک، به وسیله تکه‌های سنگ پوشانده شد و به عنوان زهکش، روی آن ۱۰ سانتیمتر شن درشت، ریخته شد. در آزمایش گلدانی، ابعاد گلدان ۵۰ در ۵۰ سانتی‌متر بوده و ۱۶ بوته در هر گلدان کشت شد. سپس درون هر گلدان مقدار ۵ کیلوگرم خاک آلوده به کادمیوم و مخلوط شده با ترکیبات خاکستر بادی، ماده واسطه‌ای و زئولیت در گلدان‌ها طبق نقشه طرح ریخته شد و به مدت ۷ روز با رطوبت ظرفیت زراعی نگهداری شدند. جهت تهیه نشاء، شلتوک در تاریخ ۱۵ خرداد درون سینی نشاء در خزانه کشت می‌شود و سپس نشاءها در تاریخ ۱۰ تیرماه به درون گلدان‌ها انتقال داده شدند. جهت مصرف کود پایه به ترتیب ۹۰ کیلوگرم



در هکتار نیتروژن از منبع اوره (۴۶ درصد نیتروژن خالص)، ۵۰ کیلوگرم در هکتار فسفر از منبع فسفات آمونیوم (۴۶ درصد فسفر) و ۳۰ کیلوگرم در هکتار پتاسیم از منبع سولفات پتاسیم (۵۰ درصد پتاسیم) استفاده شد. مقدار کود برای هر گلدان نیز بدین صورت بود که ۷ گرم نیتروژن، ۴ گرم فسفر و ۲/۵ گرم پتاسیم مصرف شد. عملیات آبیاری و وجین علف‌های هرز با دست انجام شد. با توجه به اندازه گلدان و حجم خاک مورد نیاز و همچنین خصوصیات خاکی مورد نظر، مقدار مشخصی از همین مقدار در گلدان اعمال شد. دلیل ارائه برای واحد هکتار، سهولت استفاده سایر محققین می‌باشد.

پروتکل آلوده کردن خاک مزرعه

آلوده کردن بستر کشت برنج در مزرعه به‌وسیله آبیاری با آب آلوده به کادمیوم صورت گرفت. ابتدا با اضافه کردن مقدار ۲۰ میلی‌گرم کادمیوم از جرم مولی نمک نترات کادمیوم به ازای هر لیتر آب آبیاری، به مخزن آب آبیاری، آب آلوده تهیه می‌گردد. سپس بعد از اجرای نقشه طرح و ایجاد فاروها به مدت دو هفته خاک محل آزمایش با آب آلوده به کادمیوم به میزان ظرفیت مزرعه آبیاری می‌شوند. بعد از هر بار رسیدن رطوبت مزرعه به حالت گاورو شدن خاک، آبیاری مجدداً تکرار می‌گردد. سپس از خاک مزرعه نمونه‌برداری شده و میزان کادمیوم آن اندازه‌گیری شده و اقدام به انتقال نشاء به مزرعه می‌گردد (Zhao et al., 2012; Zhao et al., 2020).

روش انجام آزمایش مزرعه‌ای

جهت آماده‌سازی و تهیه بستر کشت در آزمایش مزرعه‌ای عملیات شخم، دیسک زدن، تسطیح و مرزبندی مزرعه مورد مطالعه در اواخر خردادماه انجام شد. قبل از کاشت نمونه‌گیری خاک به‌صورت زیگزاگ از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک انجام شد. جهت تهیه نشاء، شلتوک در تاریخ ۱۵ خرداد درون سینی نشاء در خزانه کشت شده و سپس نشاءها در تاریخ ۱۰ تیرماه به زمین اصلی انتقال داده شد. نشاءها با فواصل ۲۵×۲۰ در هر کرت کشت شد. در آزمایش مزرعه‌ای، ابعاد کرت ۱۱ متر در ۱۱ متر بود. قبل از انتقال نشاء به زمین اصلی، از کودهای NPK به نسبت ۱۰:۵:۱۳ استفاده شد. همچنین در دوره پنجه‌زنی نیز کود اوره به میزان ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار و کود پتاسیم به میزان ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار به‌صورت سرک داده شد. کرت‌ها با یک لایه پلی‌اتیلن تا عمق ۲۰ سانتی‌متری خاک از هم مجزا شده تا از نشت آب کرت‌های مجاور در طول دوره رشد جلوگیری گردد. لازم به ذکر است که نیاز آبی گیاه در طول دوره رشد تأمین شد. همچنین کنترل علف‌های هرز و مبارزه با آفات و بیماری‌ها در صورت لزوم به‌صورت شیمیایی و مکانیکی انجام شد.

نمونه‌برداری گیاهی

نمونه‌برداری به روش نمونه‌برداری تصادفی ساده در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک صورت گرفت. پس از رسیدگی کامل گیاهان از یک سانتی‌متری بالای سطح خاک با تیغ استیل بریده شد و پس از شستشو با اسیدکلریدریک رقیق (۰/۱ نرمال) و آب مقطر به منظور از بین بردن آلودگی‌های روی سطح گیاه به پاکت‌های کاغذی منتقل شدند و به مدت ۴۸ ساعت داخل آون با دمای ۶۵-۷۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند و پس از توزین و جداسازی بافت‌های مختلف جهت اندازه‌گیری میزان کادمیوم طی آزمایش‌های شیمیایی با آسیاب برقی پودر شدند.

نمونه‌برداری خاک

جهت بررسی و مقایسه خصوصیات خاک آلوده به کادمیوم، قبل و بعد از اعمال تیمارهای تحقیق اقدام به نمونه‌گیری و اندازه‌گیری شد. به این صورت که از خاک هر گلدان و هر کرت مزرعه به میزان یک کیلوگرم جمع‌آوری و خاک سه تکرار از هر تیمار باهم مخلوط شد و یک نمونه برای هر تیمار تهیه شد. نمونه‌ها به‌وسیله هوا خشک شد و سپس آسیاب شدند و از عبور از الک ۰/۱ میلی‌متر عبور داده شدند و سپس متغیرهایی که در ادامه ذکر می‌گردد در آزمایشگاه اندازه‌گیری شدند.

نمونه‌گیری گیاهی در مزرعه

برای نمونه‌های گیاهی در مزرعه، ۵ بوته کامل به‌عنوان یک نمونه و ۵ نمونه برای هر پلات جمع‌آوری شد. نمونه‌ها با آب مقطر به‌دقت شستشو شدند تا خاک سطحی شسته شود. این بوته‌ها به شش بخش ریشه (R)، ساقه (S)، برگ (L)، پوسته برنج (RH) و دانه برنج (RG) تقسیم شدند. در طول ساقه برنج، بخشی از قسمت طوقه ساقه تا نوک سنبله به‌عنوان طول شاخه تعریف شده است. زیست‌توده هر قطعه نمونه برابر مجموع وزن خشک بخش‌های هوایی و ریشه برنج به دست آمد (Chen et al., 2019).

تجزیه آماری

داده‌های اندازه‌گیری در دو بخش مزرعه‌ای و گلدانی تجزیه و تحلیل شدند. همچنین عملکرد، وزن خشک بوته و نوع ژنوتیپ گیاه به روش اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و متغیرهای مربوط به خاک به روش بلوک‌های کامل تصادفی آنالیز واریانس شدند (چون تیمار کودی هم اعمال شد، به خاطر اینکه از اختلاط کرت‌ها جلوگیری شود، از طرح اسپلیت پلات استفاده شد). تجزیه واریانس و مقایسه میانگین داده با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 صورت پذیرفت. مقایسه میانگین تیمارها به روش دانکن و در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel 2013 انجام شد.

نتایج و بحث

عملکرد برنج در آزمایش مزرعه‌ای

نتایج تجزیه واریانس نشان داد عملکرد برنج تحت تأثیر تیمار مشتقات خاکستر بادی ($P \leq 0/01$) و ژنوتیپ ($P \leq 0/01$) و همچنین اثر متقابل این دو تیمار ($P \leq 0/01$) تفاوت معنی‌داری داشت (جدول ۲). ویژگی عمومی مواد خاکستر بادی و ژنوتیپ و سایر مشتقات آن، جذب و حفظ رطوبت در بافت خود می‌باشد؛ لذا با جذب رطوبت، به مرور زمان این رطوبت را در اختیار گیاه قرار می‌دهد و سبب می‌گردد که گیاه در تمام دوران رشدی خود رطوبت در دسترس داشته باشد و تنش خشکی که از عمده‌ترین تنش‌های محیطی مناطق گرم و خشک می‌باشد بر روی گیاه تأثیر نگذارد. در نتیجه عدم وجود تنش و رشد کامل گیاه ساختارهای گیاه به صورت کامل تشکیل شده و اندازه آن‌ها نیز بیشتر می‌شود. البته با توجه به نتایج تجزیه واریانس مرکب، تأثیر مشتقات خاکستر بادی در ژنوتیپ بر وزن خشک بوته معنی‌دار نشد. در نتیجه انتظار می‌رود که زیست‌توده و ماده خشک بیشتری نسبت به سایر تیمارها حاصل شود و در نهایت عملکرد گیاه نیز نسبت به سایر تیمارها افزایش یابد که یافته‌های این تحقیق همسو با یافته‌های پژوهش Zhao et al. (2020) نیز می‌باشد.

جدول ۲- تجزیه واریانس مرکب وزن خشک بوته و عملکرد اندازه‌گیری شده برنج در مزرعه

میانگین مربعات (MS)		درجه آزادی	منابع تغییرات
عملکرد	وزن خشک بوته		
۲۵۷۴/۵	۰/۰۲	۱	سال
^{ns} ۱۵۶۶/۶۷	۰/۱**	۴	تکرار*سال
**۶۴۲۸۴/۴۴	**۲/۰۳	۳	مشتقات خاکستر بادی
^{ns} ۵۲۶/۸۱	^{ns} ۰/۰۲	۳	مشتقات خاکستر بادی*سال
۲۸۱/۴	۰/۰۱	۱۲	خطای a
**۱۰۵۱۱۰۹/۶۴	**۳/۲۹	۲	ژنوتیپ
^{ns} ۱۵۱۱/۶۳	۰/۰۰۶**	۲	ژنوتیپ*سال
۱۰۷۲۲/۶۴**	^{ns} ۰/۰۰۲	۶	مشتقات خاکستر بادی*ژنوتیپ
^{ns} ۶۸۴/۶۷	^{ns} ۰/۰۰۹	۶	مشتقات خاکستر بادی*ژنوتیپ*سال
۷۲۶/۱۴	۰/۰۰۴	۴۸	خطای کل
۶/۸۱	۴/۶۶	-	CV

^{ns}، * و ** به ترتیب به مفهوم غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

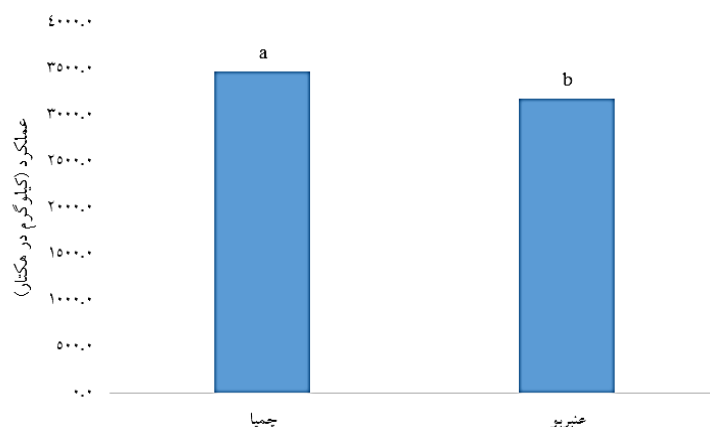
نتایج مقایسه میانگین نشان داد افزودن مشتقات خاکستر بادی باعث افزایش معنی‌دار میزان عملکرد در گیاه برنج شده است. بیشترین مقدار عملکرد در تیمار ماده واسطه‌ای به میزان ۳۳۹۱/۹۵ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد که از نظر آماری با تیمار ژنوتیپ اختلاف معنی‌داری نداشت. کمترین میزان عملکرد در تیمار شاهد به میزان ۳۲۳۰/۸۹ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد (شکل ۱). به عبارت دیگر استفاده از ماده واسطه‌ای باعث افزایش ۵ درصدی عملکرد در برنج شده است. (Ghrai et al. (2010) تأیید کردند که ژنوتیپ سنتز شده از خاکستر بادی قادر است که با کاهش میزان قابلیت دسترسی فلزات سنگین در خاک‌های آلوده، استرس القاء شده به محصولات زراعی را کاهش دهد. که این عامل می‌تواند باعث افزایش رشد و عملکرد گیاه برنج گردد. از طرفی Yang et al. (2017b) گزارش کرده‌اند که خاکستر بادی حاوی مواد مغذی شامل سیلیکون، پتاسیم و نیتروژن می‌باشد که از این طریق می‌تواند ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های آلوده را اصلاح و حاصلخیزی خاک را بهبود دهد. استفاده از مواد اصلاح‌گر آلی در خاک که در بردارنده مواد مغذی و سودمند می‌باشند، می‌تواند بر افزایش

جمعیت میکروبی خاک اثر مثبت داشته و از سوی دیگر با این افزایش جمعیت، گروه های میکروبی تجزیه کننده آلوده گرهای شیمیایی و آلی افزایش پیدا کند. در نتیجه این امر میزان آلوده گرها در خاک نیز کاهش یابد (Aminiyan *et al.*, 2018; Jafari *et al.*, 2013). همچنین در بحث زیست پالایی بوسیله گیاهان نیز تحقیقات نشان می دهد با توجه به افزایش رشد و توسعه سیستم های گیاهی در حضور عناصر ریز مغذی، پالایش مواد آلوده گر امری محتمل باشد (Mohammadipour *et al.*, 2013).



شکل ۱- تیمار مشتقات خاکستر بادی بر عملکرد برنج در مزرعه

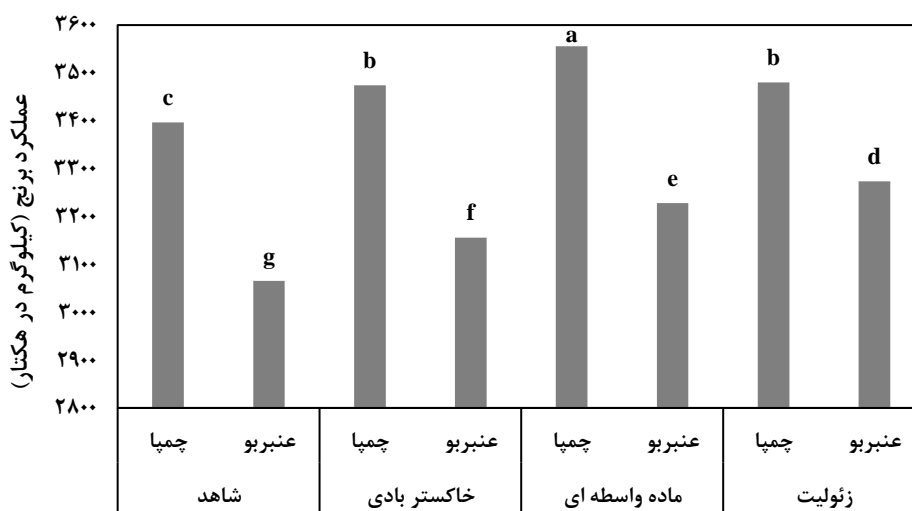
طبق نتایج به دست آمده بیشترین میزان عملکرد در رقم چمپا (۳۴۷۶/۷۰ کیلوگرم در هکتار) و کمترین میزان عملکرد در رقم عنبربو (۳۱۸۰/۷۲ کیلوگرم در هکتار) مشاهده شد (شکل ۲). به عبارت دیگر در شرایط آزمایش میزان عملکرد رقم چمپا ۱۰ درصد بیشتر از رقم عنبربو بوده است. بطور کلی رقم چمپا از ارقام بسیار مقاوم و سازگار گیاه برنج با شرایط اقلیمی، خاکی و آبی استان خوزستان است و نسبت به سایر ارقام برنج کشت شده در استان خوزستان عملکرد بیشتر و بهتری دارد و به عنوان رقم غالب در این ناحیه شناخته شده است. متوسط عملکرد رقم چمپا در خوزستان در حدود ۴/۵-۵ تن در هکتار و متوسط عملکرد رقم عنبربو در حدود ۳/۵ تن در هکتار می باشد (Limochi, 2013).



شکل ۲- اثر تیمار ژنوتیپ بر عملکرد برنج در مزرعه

در مورد اثر متقابل تیمار مشتقات خاکستر بادی و ژنوتیپ، بیشترین میزان عملکرد تحت اثر تیمار مواد واسطه ای و رقم چمپا (۳۵۵۵/۹۶ کیلوگرم در هکتار) و کمترین میزان عملکرد در تیمار شاهد و در رقم عنبربو (۳۰۶۵/۴۲ کیلوگرم در هکتار) مشاهده شد (شکل ۳). همچنین مقدار عملکرد رقم چمپا در تیمار ماده واسطه ای نسبت به خاکستر بادی بیشتر است. طبق گزارش Querol *et al.* (2006) و Feng *et al.* (2017) ترکیبات مواد واسطه ای و ژنوتیپ حاصل از خاکستر باید به وسیله سیلیس موجود در ساختارشان باعث تغییر در فعالیت آنزیم خاک شده و اثر سمی کادمیوم بر روی برنج را کاهش می دهد. همچنین بیان داشتند که با این مواد می توانند با غیرفعال کردن

جذب‌کننده فلزات سنگین در ریشه گیاه منجر به کاهش جذب فلزات سنگین شده و میزان آن‌ها را در بافت‌های گیاه کاهش داده و در نتیجه از صدمات وارده به گیاه می‌کاهد و باعث افزایش رشد و عملکرد گیاه می‌گردد.



شکل ۳- اثر متقابل تیمار مشتقات خاکستر بادی و ژنوتیپ بر عملکرد برنج در مزرعه

عملکرد برنج در آزمایش گلدانی

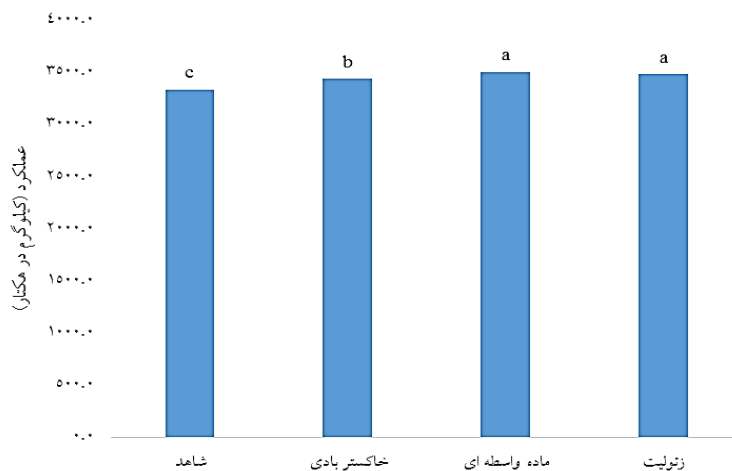
نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر تیمار خاکستر بادی و مشتقات آن بر روی میزان عملکرد برنج تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد داشت. اثر ژنوتیپ نیز بر عملکرد برنج در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌داری داشت. با توجه به نتایج، اثر متقابل تیمار خاکستر بادی و مشتقات آن و تیمار ژنوتیپ بر عملکرد برنج در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌داری داشت. به طور کلی، که هر سه در سطح احتمال یک درصد بر عملکرد تأثیر معنی‌دار داشتند. همچنین بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، اثر اصلی سال و اثر متقابل خاکستر بادی در ژنوتیپ در سال تأثیر معنی‌داری بر وزن خشک بوته و عملکرد برنج نداشت (جدول ۳). سایر محققین نیز چنین نتیجه‌ای را گزارش کردند؛ بر اساس یافته‌های تحقیق (Zhao et al. (2020)، میزان زیست‌توده نیز تحت تأثیر خاکستر بادی به میزان ۲۶/۳ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت. ایشان بیان داشتند که تأثیر مثبت خاکستر بادی و مشتقات آن در خاک‌های آلوده به کادمیوم می‌تواند به دلیل افزایش محتوای سیلیس موجود در خاک باشد که منجر به رشد و توسعه ساختار گیاه برنج می‌گردد. نتیجه تحقیقات (Balakhnina et al. (2015) بر روی گیاه جو نیز هم‌راستا با نتایج قبلی است.

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب داده‌های گیاهی اندازه‌گیری شده در گلدان

میانگین مربعات (MS)		درجه آزادی	منابع تغییرات
عملکرد	وزن خشک بوته		
ns ۱۱۴/۹۱	ns ./.۰۰۳	۱	سال
۲۷۳۳/۶۸**	.۰/۱۳**	۴	تکرار*سال
**۶۹۶۲۸/۳۶	**۱/۹۷	۳	مشتقات خاکستر بادی
ns ۱۵/۴۳	ns ./.۰۰۱	۳	مشتقات خاکستر بادی*سال
۹۰۴/۶۷	.۰/۰۰۶	۱۲	خطای a
**۱۰۳۱۲۰۰/۵۶	**۴/۳۳	۲	ژنوتیپ
ns ./.۲۱	۳/۵۲**	۲	ژنوتیپ*سال
۹۷۹۰/۵۰**	ns ./.۰۰۱	۶	مشتقات خاکستر بادی*ژنوتیپ
ns ./.۶۸	ns ./.۰۰۴	۶	مشتقات خاکستر بادی*ژنوتیپ*سال
۵۰۴/۱۹	.۰/۰۰۳	۴۸	خطای کل
۶/۶۵	۴/۵۳	-	CV

ns، * و ** به ترتیب به مفهوم غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

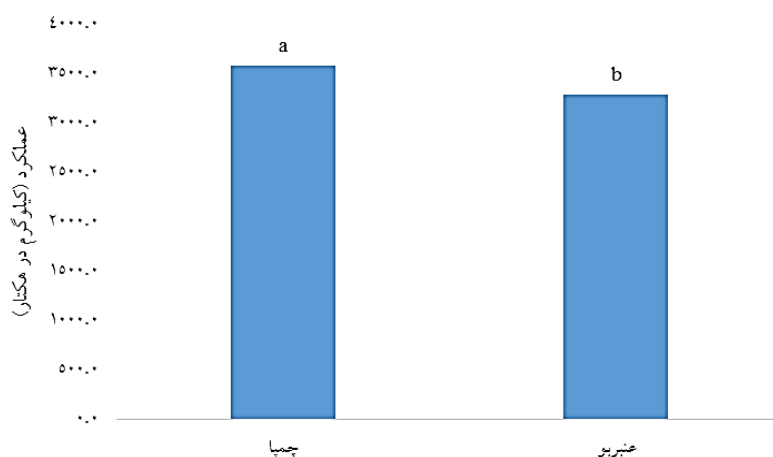
نتایج مقایسه میانگین اثر خاکستر بادی و مشتقات آن بر عملکرد برنج در شرایط گلدانی نشان داد که بیشترین مقدار عملکرد در تیمار ماده واسطه‌ای خاکستر بادی به میزان $3505/42$ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد که از نظر آماری با تیمار ژئولیت اختلاف معنی‌داری نداشت و کمترین میزان عملکرد در تیمار شاهد به میزان $3333/49$ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد (شکل ۴). به عبارت دیگر استفاده از ماده واسطه‌ای باعث افزایش ۵ درصدی عملکرد در برنج شده است. افزایش عملکرد در گیاهان مختلف در اثر استفاده از خاکستر بادی و ژئولیت هم در خاک‌های آلوده به کادمیوم و هم در خاک‌های غیرآلوده توسط پژوهشگران مختلفی گزارش شده است. از آنجایی که در مورد مواد واسطه‌ای تحقیقات اندکی وجود داشته و از طرفی نتایج ژئولیت و مواد واسطه‌ای شبیه به هم هستند، به مقایسه نتایج این پژوهش با دیگر محققین در مورد اثر کاربرد ژئولیت بر عملکرد برنج پرداخته شد. از جمله (Mirzakhani (2016) در بررسی اثر مصرف ژئولیت بر عملکرد دانه و صفات فیزیولوژیک گندم (رقم یک کراس روشن) در شرایط تنش آبی گزارش کردند اثر سطوح مختلف مصرف ژئولیت بر صفات عملکرد دانه و بیولوژیکی گیاه، سطح ویژه برگ پرچم معنی‌دار بود. (Beyki & Khashei Siuki (2019) گزارش کرده‌اند که کاربرد ژئولیت طبیعی و مدیریت آبیاری باعث افزایش معنی‌دار عملکرد و اجزای عملکرد گیاه داروئی سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) شده است. (Mohammadi et al. (2013) نیز گزارش کردند که کاربرد ژئولیت در شرایط تنش خشکی منجر به افزایش معنی‌دار عملکرد دانه، وزن هزاردانه، تعداد دانه در بلال و ارتفاع گیاه شد. که تمامی موارد با نتیجه به‌دست‌آمده در تحقیق حاضر هم‌خوانی دارد.



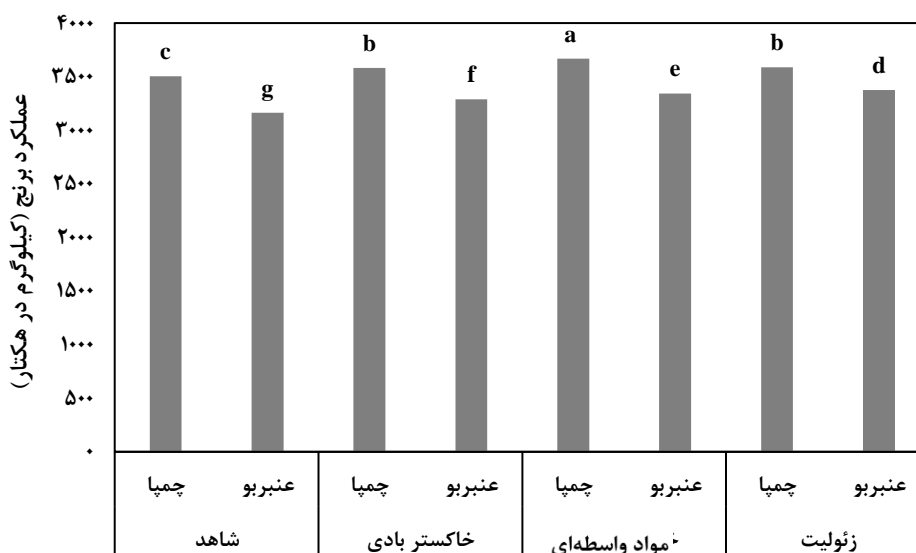
شکل ۴- اثر تیمار مشتقات خاکستر بادی بر عملکرد برنج در گلدان

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده بیشترین میزان عملکرد در رقم چمپا ($3585/77$ کیلوگرم در هکتار) و کمترین میزان عملکرد در رقم عنبربو ($3292/63$ کیلوگرم در هکتار) مشاهده شد (شکل ۵). به عبارت دیگر در شرایط آزمایش گلدانی، میزان عملکرد رقم چمپا ۹ درصد بیشتر از رقم عنبربو بوده است. که این اختلاف در سطح آماری ۵ درصد طبق آزمون دانکن معنی‌دار می‌باشد. بر اساس نتایج Zhao (2020) et al. وجود سیلیسیم در ترکیب خاکستر بادی و مشتقات آن یکی از دلایل ذکر شده برای افزایش عملکرد و بهبود رشد گیاه برنج در اثر استفاده از آن‌ها می‌باشد. اثر مصرف سیلیس بر کاهش آلودگی کادمیوم و بهبود رشد برنج توسط Lim et al. (2016) نیز گزارش شده است. لذا می‌توان در توجیه نتایج تحقیق حاضر نیز به این گزارش‌ها استناد کرد و آن را به عنوان یکی از عوامل مؤثر در افزایش عملکرد برنج پذیرفت. حتی اگر مقدار آن اندک باشد.

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل مشتقات خاکستر بادی و ژئولیت بر عملکرد برنج در شرایط آزمایش گلدانی نشان داد که بیشترین میزان عملکرد تحت اثر تیمار مواد واسطه‌ای و رقم چمپا ($3668/1$ کیلوگرم در هکتار) و کمترین میزان عملکرد در تیمار شاهد و در رقم عنبربو ($3162/54$ کیلوگرم در هکتار) مشاهده شد (شکل ۶) که این اختلاف در سطح آماری ۵ درصد طبق آزمون دانکن معنی‌دار شد. حتی عملکرد رقم چمپا در تیمار شاهد، از عملکرد رقم عنبربو در هر سه تیمار خاکستر بادی، مواد واسطه‌ای و ژئولیت بیشتر شد. (Querol (2006) et al. و (Feng et al. (2017) نیز گزارش کردند که ترکیبات مواد واسطه‌ای و ژئولیت حاصل از خاکستر باید به‌وسیله سیلیس موجود در ساختارشان باعث تغییر در فعالیت آنزیم خاک شده و اثر سمی کادمیوم بر روی برنج را کاهش می‌دهد که این موضوع باعث بهبود شرایط رشد برنج می‌گردد.



شکل ۵- اثر تیمار ژنوتیپ بر عملکرد برنج در گلدان



شکل ۶- اثر متقابل تیمار مشتقات خاکستر بادی و ژنوتیپ بر عملکرد برنج در گلدان

نتیجه‌گیری

ویژگی عمومی مواد خاکستر بادی و ژنولیت و سایر مشتقات آن جذب و حفظ رطوبت در بافت خود می‌باشد. بدین‌صورت که این مواد رطوبت را جذب نموده و به مرور زمان آن را در اختیار گیاه قرار می‌دهند. این امر سبب می‌شود که گیاه در تمام دوران رشدی خود رطوبت کافی در دسترس داشته باشد و کمتر در معرض تنش خشکی قرار بگیرد و بدین‌صورت از تأثیر تنش خشکی (یکی از مهم‌ترین تنش‌ها در مناطق گرم و خشک) کاسته می‌گردد. از طرف دیگر افزودن خاکستر بادی و مشتقات آن (مواد واسطه‌ای و ژنولیت) با افزایش سیلیس خاک منجر به بهبود pH خاک و در نهایت ایجاد کمپلکس با کادمیوم در خاک‌های آلوده به کادمیوم شده و از جذب آن توسط گیاه جلوگیری می‌نماید که این موضوع نیز باعث کاهش اثرات نامطلوب کادمیوم بر رشد گیاه می‌شود. همچنین سیلیسیوم با اصلاح pH خاک، سبب تقلیل سمیت عناصر کم‌مصرف و تعدیل در جذب عناصر پرمصرف می‌شود.

طبق نتایج تحقیق حاضر، تیمار خاکستر بادی و مشتقات آن بر میزان عملکرد برنج تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد داشت. در مورد تأثیر ژنوتیپ بر روی عملکرد برنج نیز در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌داری مشاهده شد. همچنین اثر متقابل تیمار خاکستر بادی و مشتقات و تیمار ژنوتیپ بر عملکرد برنج در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌داری داشت. با توجه به نتایج مقایسه میانگین بیشترین میزان عملکرد در هر دو آزمایش مزرعه‌ای و گلدانی در تیمار خاکستر بادی و رقم چمپا مشاهده شد. که از نظر آماری با سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد طبق آزمون دانکن داشت. با توجه به مطالب بالا و اهمیت تولید برنج و قیمت پایین و



در دسترس بودن خاکستر بادی و مشتقات آن می‌توان از این مواد جهت افزایش عملکرد در برنج بخصوص در خاک‌های آلوده به کادمیوم استفاده کرد و علاوه بر افزایش میزان محصول از اثرات سمی و نامطلوب کادمیم بر رشد گیاه جلوگیری کرد. با توجه به اثر تقریباً درازمدت مواد واسطه‌ای و همچنین تأثیر مستقیم آن بر افزایش عملکرد و اجزای عملکرد برنج، روش بهینه اقتصادی است و بهره‌وری بالایی دارد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in energy and combustion science*, 36(3), 327-363.
- Aminiyan, M. M., Hosseini, H., & Heydariyan, A. (2018). Microbial communities and their characteristics in a soil amended by nanozeolite and some plant residues: short time in-situ incubation. *Eurasian Journal of Soil Science*, 7(1), 9-19.
- Amouei, A. I., Mahvi, A. H., & Naddafi, K. (2006). Effect on heavy metals Pb, Cd and Zn availability in soils by amendments. *Journal of Babol University of Medical Sciences*, 7(4), 26-31. (In Farsi)
- Amouei, A., Mahvi, A. H., Naddafi, K., Fahimi, H., Mesdaghinia, A., & Naseri S. (2012). Optimum operating conditions in the phytoremediation of contaminated soils with Lead and Cadmium by native plants of Iran. *Scientific Journal of Kurdistan University of Medical Sciences*, 17(4), 93-102
- Bakare, M. D., Pai, R. R., Patel, S., & Shahu, J. T. (2019). Environmental Sustainability by Bulk Utilization of Fly Ash and GBFS as Road Subbase Materials. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 23(4), 04019011.
- Balakhnina, T. I., Bulak, P., Matichenkov, V. V., Kosobryukhov, A. A., & Włodarczyk, T. M. (2015). The influence of Si-rich mineral zeolite on the growth processes and adaptive potential of barley plants under cadmium stress. *Plant Growth Regulation*, 75(2), 557-565.
- Beyki, A., & Khashei Siuki, A. (2019). Application of Clinoptilolite Natural Zeolite and Irrigation Management on Yield and Yield Components of Black Cumin Plant (*Nigella sativa* L.). *Journal of Water Research in Agriculture*, 33(1), 137-148. (In Farsi)
- Chen, D., Chen, D., Xue, R., Long, J., Lin, X., Lin, Y. & Song, Y. (2019). Effects of boron, silicon and their interactions on cadmium accumulation and toxicity in rice plants. *Journal of hazardous materials*, 367, 447-455.
- Feng, X., Han, L., Chao, D., Liu, Y., Zhang, Y., Wang, R. & Zhang, G. (2017). Ionomeric and transcriptomic analysis provides new insight into the distribution and transport of cadmium and arsenic in rice. *Journal of hazardous materials*, 331, 246-256.
- Fouladi, M., Mohammadi Rouzbahani, M., Attar Roshan, S., & Sabz Alipour, S. (2021). Health risk assessment of potentially toxic elements in common cultivated rice (*Oryza sativa*) emphasis on environmental pollution. *Toxin Reviews*, 40(4), 1019-1034.
- Ghrrair, A. M., Ingwersen, J., & Streck, T. (2010). Immobilization of heavy metals in soils amended by nanoparticulate zeolitic tuff: sorption-desorption of cadmium. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 173(6), 852-860.
- Hojati, S. (2019). Use of spatial statistics to identify hotspots of lead and copper in selected soils from north of Khuzestan Province, southwestern Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(5), 654-669.
- Iskandar, I. K., & Kirkham, M. B. (Eds.). (2001). *Trace elements in soil: bioavailability, flux, and transfer*. CRC Press.
- Jafari, M., Ebrahimi, S., & Movahed Naeini, S. A. (2013). Simultaneous effect of municipal solid waste compost and some fertilizers on biodegradation of oil-contaminated soils. *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 2(3), 43-56.
- Khadem, S. A., Galavi, M., Ramrodi, M., Mousavi, S. R., Rousta, M. J., & Rezvani-Moghadam, P. (2010). Effect of animal manure and superabsorbent polymer on corn leaf relative water content, cell membrane stability and leaf chlorophyll content under dry condition. *Australian journal of crop science*, 4(8), 642-647.
- Kicińska, A., Pomykała, R., & Izquierdo-Diaz, M. (2022). Changes in soil pH and mobility of heavy metals in contaminated soils. *European Journal of Soil Science*, 73(1), e13203.
- Krämer, U. (2005). Phytoremediation: novel approaches to cleaning up polluted soils. *Current opinion in biotechnology*, 16(2), 133-141.
- Lim, S. S., Lee, D. S., Kwak, J. H., Park, H. J., Kim, H. Y., & Choi, W. J. (2016). Fly ash and zeolite

- amendments increase soil nutrient retention but decrease paddy rice growth in a low fertility soil. *Journal of soils and sediments*, 16(3), 756-766.
- Limochi, K. (2013). Effect of different planting densities on growth characteristics of rice cultivars in north regions of Khuzestan. *International Journal of Agriculture*, 3(3), 624. (In Farsi)
- Mirzakhani, M., & Sibi, M. (2010). Response of safflower physiological traits to water stress and zeolite application. In *The Proceedings of 2nd Iranian National Congress on Agricultural and Sustainable Development*. Islamic Azad University, Shiraz Branch. (In Persian).
- Mirzakhani, M. (2016). Effect of zeolite application on yield and physiological characteristics of wheat (cv. Roshan BC) in drought stress condition. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 9(1), 37-50. (In Farsi)
- Mohamadipour, F., & Asadi Kapourchal, S. (2013). Assessing land cress potential for phytoextraction of cadmium from Cd-contaminated soils. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 2(2), 25-36. (In Farsi)
- Mohammadi, M., Molavi, H., Liaghat, A., & Parsinejad, M. (2013). Effect of zeolite application on yield and water use efficiency of corn. *Water Research in Agriculture*, 27(1), 57-67. (In Farsi).
- Polat, E., Karaca, M., Demir, H., & Onus, A. N. (2004). Use of natural zeolite (clinoptilolite) in agriculture. *Journal of fruit and ornamental plant research*, 12(1), 183-189.
- Querol, X., Alastuey, A., Moreno, N., Alvarez-Ayuso, E., García-Sánchez, A., Cama, J., & Simón, M. (2006). Immobilization of heavy metals in polluted soils by the addition of zeolitic material synthesized from coal fly ash. *Chemosphere*, 62(2), 171-180.
- Sanchez-Hernandez, J. C., Ro, K. S., & Díaz, F. J. (2019). Biochar and earthworms working in tandem: Research opportunities for soil bioremediation. *Science of the total environment*, 688, 574-583.
- Venkatesan, M., Zaib, Q., Shah, I. H., & Park, H. S. (2019). Optimum utilization of waste foundry sand and fly ash for geopolymer concrete synthesis using D-optimal mixture design of experiments. *Resources, Conservation and Recycling*, 148, 114-123.
- Xu, G., & Shi, X. (2018). Characteristics and applications of fly ash as a sustainable construction material: A state-of-the-art review. *Resources, Conservation and Recycling*, 136, 95-109.
- Yang, S., Lin, L., Li, S. P., Li, Q., Wang, X. T., & Sun, L. (2017a). Assessment and comparison of three high-aluminum fly ash utilization scenarios in Inner Mongolia, China using an eco-efficiency indicator. *Waste Management & Research*, 35(5), 515-524.
- Yang, W. T., Zhou, H., Gu, J. F., Liao, B. H., Peng, P. Q., & Zeng, Q. R. (2017b). Effects of a combined amendment on Pb, Cd, and As availability and accumulation in rice planted in contaminated paddy soil. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 26(1), 70-83
- Yu, C. L., Deng, Q., Jian, S., Li, J., Dzantor, E. K., & Hui, D. (2019). Effects of fly ash application on plant biomass and element accumulations: a meta-analysis. *Environmental Pollution*, 250, 137-142.
- Zhang, L., Dai, S., Zhao, X., Nie, W., & Lv, J. (2018). Spatial Distribution and Correlative Study of the Total and the Available Heavy Metals in Soil From a Typical Lead Smelting Area, China. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 27(7), 563-572.
- Zhang, Y., Wang, X., Ji, X., Liu, Y., Lin, Z., Lin, Z. & Zhang, X. (2019). Effect of a novel Ca-Si composite mineral on Cd bioavailability, transport and accumulation in paddy soil-rice system. *Journal of environmental management*, 233, 802-811.
- Zhao, H., Huang, X., Liu, F., Hu, X., Zhao, X., Wang, L. & Ji, P. (2020). A two-year field study of using a new material for remediation of cadmium contaminated paddy soil. *Environmental Pollution*, 114614.
- Zhao, Y. D., Pan, Y. Z., Liu, B. Y., Yang, H., Hou, Y., Zhang, J. F., & Cai, L. (2012). *Pilea cadierei* Gagnep. et Guill's growth and accumulation under single and combined pollution of Cd and Pb. *Journal of Agro-Environment Science*, 31(1), 48-53.
- Zuo, W., Bai, Y., Lv, M., Tang, Z., Ding, C., Gu, C., ... & Li, M. (2021). Sustained effects of one-time sewage sludge addition on rice yield and heavy metals accumulation in salt-affected mudflat soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(6), 7476-7490.