



Effects of rice straw and sewage sludge-derived hydrochars on some agronomic traits and leaf chlorophyll index of rice in a sandy loam soil contaminated with lead (Pb)

Masomeh Mahdizadeh¹ | Nosratollah Najafi² | Shahin Oustan³ | Ahmad Shirinfekr⁴ | Shahram Mahmoud Soltani⁵

1. Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran. E-mail: mahdizadeh20@gmail.com
2. Corresponding Author, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran. E-mail: n-najafi@tabrizu.ac.ir
3. Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran. E-mail: oustan@hotmail.com
4. Tea Research Center, Horticultural Science Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Lahijan, Iran. E-mail: shirinfekr@gmail.com
5. Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran. E-mail: shmsoltani@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Oct. 2, 2024

Revised: Oct. 28, 2024

Accepted: Nov. 6, 2024

Published online: March. 2025

Keywords:

*Heavy metals,
Hydrothermal carbonization,
Integrated soil fertility
management,
Paddy soil,
Toxicity.*

ABSTRACT

The present study aimed to investigate the effects of rice straw, sewage sludge, and their hydrochars on some agronomic traits and chlorophyll index of rice plants in a sandy loam soil contaminated with lead (Pb) under greenhouse conditions. The research was conducted as a factorial experiment in a completely randomized design with three replications and two factors of organic matter at 11 levels (control, rice straw, rice straw hydrochar, sewage sludge, sewage sludge hydrochar, rice straw + rice straw hydrochar, sewage sludge + sewage sludge hydrochar, rice straw + sewage sludge, rice straw hydrochar + sewage sludge hydrochar, rice straw hydrochar + sewage sludge, sewage sludge hydrochar + rice straw), and Pb at two levels of 0 and 500 mg/kg as lead nitrate. The results showed that soil contamination with Pb significantly reduced leaf chlorophyll index, plant height, panicle dry matter, panicle length, leaf number, leaf width, and stem diameter. By application of sewage sludge and its hydrochar, agronomic traits of rice were significantly increased, and this increase was even higher in the presence of sewage sludge than its hydrochar. The application of rice straw decreased panicle dry matter and leaf number and increased the ratio of shoot dry matter to that of root and had no significant effect on other traits. The application of rice straw hydrochar reduced shoot and root dry matter, leaf number, and leaf length. The results showed that integration of sewage sludge and its hydrochar with rice straw and its hydrochar can reduce the negative effects of rice straw and its hydrochar and Pb toxicity.

Cite this article: Mahdizadeh, M., Najafi, N., Oustan, S., Shirinfekr, A. & Mahmoud Soltani, S. (2025). Effects of rice straw and sewage sludge-derived hydrochars on some agronomic traits and leaf chlorophyll index of rice in a sandy loam soil contaminated with lead (Pb). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (1),17-42. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.381783.669785>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.381783.669785>





EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Conversion of rice straw (*Oryza sativa* L.) and sewage sludge into hydrochars can reduce the organic matter decomposition rate, increase its stability in soil and eliminate pathogens, pests and weed seeds. Soil contamination with lead (Pb) can negatively affect the quantity and quality of rice. It is expected that by using sewage sludge and its hydrochar, rice straw and its hydrochar, and their combination, the toxic effects of Pb will decrease. To this end, the present study aimed to investigate the effects of rice straw, sewage sludge, and their hydrochars on some agronomic traits and chlorophyll index of rice plants (cv. Hashemi) in a sandy loam soil contaminated with Pb under greenhouse conditions.

Methodology

The research was conducted as a factorial experiment in a completely randomized design with three replications and two factors of organic matter at 11 levels (control, rice straw, rice straw hydrochar, sewage sludge, sewage sludge hydrochar, rice straw + rice straw hydrochar, sewage sludge + sewage sludge hydrochar, rice straw + sewage sludge, rice straw hydrochar + sewage sludge hydrochar, rice straw hydrochar + sewage sludge, sewage sludge hydrochar + rice straw), and Pb at two levels of 0 and 500 mg/kg as lead nitrate (PbNO₃).

Results and Discussion

The results showed that soil contamination with Pb significantly reduced leaf chlorophyll index, plant height, panicle dry matter, panicle length, leaf number, leaf width, and stem diameter. By application of sewage sludge and its hydrochar, agronomic traits of rice were significantly increased, and this increase was even higher in the presence of sewage sludge than its hydrochar. The application of rice straw decreased panicle dry matter and leaf number and increased the ratio of shoot dry matter to that of root and had no significant effect on other traits. The application of rice straw hydrochar reduced shoot and root dry matters, leaf number, and leaf length. Compared to the initial biomass, the effect of hydrochar on the studied traits was different depending on its origin (rice straw or sewage sludge) and the type of trait. Using both types of studied hydrochars compared to the initial biomass did not cause significant changes in leaf chlorophyll index, leaf length, leaf width, panicle length, and plant height. There was no significant difference between sewage sludge and its hydrochar in terms of the number of leaves, but the use of rice straw hydrochar reduced the number of leaves compared to the initial biomass. The application of both types of hydrochars significantly reduced the number of panicles and the dry matter of root, shoot, and panicle compared to the initial biomass.

Conclusion

The results showed that integration of sewage sludge and its hydrochar with rice straw and its hydrochar could reduce the negative effects of rice straw and its hydrochar and Pb toxicity. This study was conducted under greenhouse conditions and its results may be different in field conditions. Therefore, it is recommended to conduct this research in field conditions in a soil contaminated with Pb.

Author Contributions

Conceptualization, M.M. and N.N.; methodology, M.M. and N.N.; software, M.M. and N.N.; validation, M.M., N.N., S.O., A.S. and S.M.S.; formal analysis, M.M. and N.N.; investigation, M.M.; resources, M.M. and N.N.; data curation, M.M. and N.N.; writing—original draft preparation, M.M. and N.N.; writing—review and editing, N.N., S.O., A.S. and S.M.S.; visualization, M.M.; supervision, N.N.; project administration, N.N.; funding acquisition, N.N. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgements

This paper is published as a part of a Ph.D. dissertation supported by the Vice Chancellor for Research and Technology of the University of Tabriz, Iran. The authors are thankful to the University of Tabriz for financial supports.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

تأثیر هیدروچارهای کاه برنج و لجن فاضلاب بر برخی صفات زراعی و شاخص کلروفیل برگ برنج در یک خاک لوم شنی قلیایی آلوده به سرب

معصومه مهدی‌زاده^۱ | نصرت اله نجفی^۲ | شاهین اوستان^۳ | احمد شیرین‌فکر^۴ | شهرام محمود سلطانی^۵

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: mahdizadeh20@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: n-najafi@tabrizu.ac.ir

۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: oustan@hotmail.com

۴. پژوهشکده چای، مؤسسه تحقیقات علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، لاهیجان، ایران.

رایانامه: shirinfekr@gmail.com

۵. مؤسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران. رایانامه: shmsoltani@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۶/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۸/۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۸/۱۶

تاریخ انتشار: فروردین ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

خاک تسالیزار،

سمیت،

فلزهای سنگین،

کربونیزه‌شدن گرم‌آبی،

مدیریت تلفیقی حاصلخیزی

خاک.

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر کاه برنج، لجن فاضلاب شهری و هیدروچارهای آن‌ها بر برخی صفات زراعی و شاخص کلروفیل برگ برنج در یک خاک آلوده به سرب در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار و دو فاکتور شامل مواد آلی در ۱۱ سطح (شاهد، کاه برنج، هیدروچار کاه برنج، لجن فاضلاب شهری، هیدروچار لجن فاضلاب شهری، کاه برنج + هیدروچار کاه برنج، لجن فاضلاب شهری + هیدروچار لجن فاضلاب شهری، کاه برنج + لجن فاضلاب شهری، هیدروچار کاه برنج + هیدروچار لجن فاضلاب شهری، کاه برنج + هیدروچار لجن فاضلاب شهری، لجن فاضلاب شهری + هیدروچار کاه برنج) و سرب در دو سطح ۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک از منبع سرب نیترات اجرا شد. نتایج نشان داد که آلودگی خاک به سرب، شاخص کلروفیل برگ، ارتفاع بوته، ماده خشک خوشه، طول خوشه، تعداد برگ، عرض برگ و قطر ساقه را به‌طور معنادار کاهش داد. با مصرف لجن فاضلاب و هیدروچار آن، صفات زراعی برنج به‌طور معنادار افزایش یافت و میزان این افزایش در حضور لجن فاضلاب بیشتر از هیدروچار آن بود. مصرف کاه برنج، ماده خشک خوشه و تعداد برگ را کاهش و نسبت ماده خشک شاخساره به ریشه را افزایش داد ولی بر سایر صفات اثر معنادار نداشت. مصرف هیدروچار کاه برنج، ماده خشک شاخساره و ریشه، تعداد برگ و طول برگ را کاهش داد. نتایج نشان داد که تلفیق لجن فاضلاب و هیدروچار آن با کاه برنج و هیدروچار آن می‌تواند اثرهای منفی کاه برنج و هیدروچار آن و سمیت سرب را کاهش دهد.

استناد: مهدی‌زاده، معصومه؛ نجفی، نصرت اله؛ اوستان، شاهین؛ شیرین‌فکر، احمد؛ محمود سلطانی، شهرام. (۱۴۰۴). تأثیر هیدروچارهای کاه برنج و لجن فاضلاب بر برخی صفات زراعی و شاخص کلروفیل برگ برنج در یک خاک لوم شنی قلیایی آلوده به سرب، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۶ (۱)، ۴۲-۱۷.



<https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.381783.669785>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.381783.669785>

مقدمه

برنج (*Oryza sativa* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات کشاورزی است که در تأمین انرژی، پروتئین و مواد غذایی بیش از نیمی از جمعیت جهان نقش دارد (Wei et al., 2018; Dabral et al., 2019). در سال زراعی ۱۴۰۱، سطح زیر کشت و میزان تولید برنج در ایران به ترتیب حدود ۷۹۲ هزار هکتار و ۳/۶ میلیون تن با میانگین عملکرد ۴۵۸۵ کیلوگرم در هکتار بود. در همان سال، سطح زیر کشت و میزان تولید برنج در استان آذربایجان شرقی به ترتیب ۹۵۰۹ هکتار و ۳۳۵۷۵ تن با میانگین عملکرد ۳۵۳۱ کیلوگرم در هکتار بود که بیش از ۸۵ درصد آن در شهرستان میانه تولید شد (Anonymous, 2023).

آلودگی خاک به فلزهای سنگین مانند سرب (Pb) در شالیزارها باعث کاهش کمیت و کیفیت محصول برنج و آسیب به سلامتی زیست‌بوم و انسان می‌شود. آلودگی برنج به Pb، به وضعیت صنعتی منطقه، ترافیک، فاصله منطقه رشد گیاه از جاده، فاصله منطقه رشد گیاه از معادن سرب و روی، مصرف لجن فاضلاب و غیره بستگی دارد؛ به طوری که گیاهانی که در مناطق صنعتی رشد می‌کنند، غلظت Pb بیشتری دارند (Fakhri et al., 2018). عامل‌های زیادی بر زیست‌فراهمی فلزهای سنگین در خاک اثر می‌گذارند که مهم‌ترین آن‌ها کمیت و کیفیت مواد آلی، نوع رس، اکسیدهای آهن و منگنز، پتانسیل ریداکس و pH خاک هستند (Rajapaksha et al., 2013). فلز Pb تمایلی شدید به پیوند با مواد آلی، کانی‌های رس، کربنات‌ها و اکسیدهای آهن و منگنز دارد و یکی از کم‌پویاترین فلزهای سنگین در خاک است (Nevidomskaya et al., 2016). Ashraf et al. (2017) گزارش کردند که گیاه برنج یک انباشتگر فلزها نیست؛ اما بر اساس رقم برنج و نوع خاکی که برنج در آن رشد می‌کند، جذب و توزیع Pb در این گیاه می‌تواند متفاوت باشد. Ashraf & Tang (2017) گزارش کردند که سمیت Pb موجب کاهش ارتفاع، کاهش ماده خشک ریشه و شاخساره بوته برنج شد. سطح بحرانی سمیت Pb، به دلیل تفاوت در گونه های گیاهی و ویژگی‌های خاک، در منابع علمی متفاوت گزارش شده است (Liu et al., 2003). Madhavan et al. (1989) بیشترین غلظت قابل قبول Pb کل در خاک‌های کشاورزی برای حفظ امنیت غذایی انسان را ۶۰۰ میلی‌گرم Pb بر کیلوگرم خاک بیان نمودند. بیشترین مقدار مجاز Pb در خاک‌های بسیاری از کشورهای اروپایی، ۱۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک تعیین شده است (Kabata-Pendias & Pendias, 2001). Zeng et al. (2006) گزارش کردند که وقتی مقدار Pb تا ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک افزایش یابد، خطر آن در محیط‌زیست برای گیاهان و ریزجانداران خاک آشکار می‌شود. آنان سطح بحرانی سمیت Pb برای گیاه برنج را ۵۰۰ میلی‌گرم Pb کل بر کیلوگرم خاک گزارش کردند.

عامل دیگری که به دلیل تشکیل کمپلکس پایدار با Pb در خاک، در کاهش سمیت Pb بسیار مورد توجه قرار گرفته، مواد آلی است. خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلایل مختلف مانند بارش کم، دمای زیاد، از بین بردن بقایای گیاهی، استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی و چرای بیش از حد، ماده آلی کمی دارند. لجن فاضلاب یک پسماند آلی است که با توجه به افزایش جمعیت، توسعه شهرنشینی و صنایع مختلف، تولید آن رو به افزایش است. افزودن لجن فاضلاب به خاک یک راه ایمن برای دفن این پسماند بوده و با افزایش ماده آلی، عنصرهای غذایی و زیست‌توده میکروبی خاک، سبب بهبود حاصلخیزی خاک و فعالیت‌های آنزیمی شده و شدت فتوسنتز گیاه، رشد و محصول آن را افزایش می‌دهد (Abbasi et al., 2013).

باتوجه به حجم زیاد انواع پسماندها به‌ویژه در مناطق پرجمعیت، لازم است این پسماندها به‌طور اصولی مدیریت شوند. یکی از روش‌های مورد استفاده در این راستا، فرایند تبدیل پسماندهای آلی به هیدروچار است. هیدروچار یک ماده جامد قهوه‌ای با ویژگی‌های مشابه زغال سنگ است که از حرارت دادن زیست‌توده در داخل آب در یک سامانه بسته و در فشار ۲۰ تا ۳۰ بار و دمای ۱۶۰ تا ۲۵۰ درجه سلسیوس و زمان واکنش یک تا چند ساعت تولید می‌شود. به این فرایند کربونیزه‌شدن گرم‌آبی گفته می‌شود (Novak et al., 2014; Azimzadeh et al., 2019). اثر هیدروچار بر ویژگی‌های خاک و گیاه بسته به ویژگی‌های هیدروچار، خاک و نوع گیاه یکسان نیست. مصرف هیدروچار در خاک، به علت pH اسیدی می‌تواند در افزایش فراهمی برخی عنصرهای غذایی در خاک‌های قلیایی ایران نقش مفیدی داشته باشد و سبب بهبود حاصلخیزی خاک شود. همچنین، مصرف هیدروچار با pH اسیدی در خاک‌های قلیایی، از یک طرف می‌تواند جذب فلزهای سنگین به‌وسیله گیاهان را افزایش و فرایند گیاه‌پالایی را بهبود بخشد و از طرف دیگر از طریق کمپلکس با فلزهای سنگین جذب سطحی آن‌ها، می‌تواند اثر سمیت آن‌ها را کاهش دهد (Novak et al., 2014; Azimzadeh et al., 2020; Maghsoodi et al., 2020).

Hu et al., 2010;) بیشتر (al., 2020; Abdolmaleki et al., 2022). از مزیت‌های هیدروچار نسبت به بیوچار می‌توان به عملکرد بیشتر (Hu et al., 2010) و هدررفت کم کربن و نیتروژن (Zhou et al., 2018) اشاره کرد. همچنین، بعد از مصرف لجن فاضلاب در خاک، این پسماند به سرعت تجزیه و گازهای گلخانه‌ای تولید می‌شود. با تبدیل لجن فاضلاب به هیدروچار، سرعت تجزیه آن و سرعت آزادسازی گازهای گلخانه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین، با تبدیل لجن فاضلاب به کمپوست آلودگی میکروبی آن حذف نخواهد شد و سرعت تجزیه آن هم در خاک زیاد خواهد بود. به نظر می‌رسد تبدیل لجن فاضلاب به ورمی کمپوست با توجه به شوری آن و وجود مواد سمی در آن امکان‌پذیر نباشد چون کرم‌های خاکی در چنین شرایطی نمی‌توانند فعالیت نمایند. زمان پایداری هیدروچار در خاک به‌وسیله (Lal, 2004)، حدود ۴ تا ۲۹ سال، به‌وسیله (Schulze et al., 2016)، ۴ تا ۱۵ سال و به‌وسیله (Granwald et al., 2016)، ۴ سال گزارش شده‌است. در ضمن، تبدیل لجن فاضلاب به هیدروچار، سبب ضدعفونی آن می‌شود که نسبت به سایر روش‌های ضدعفونی آن مانند پرتوتابی گاما برتری دارد زیرا امکانات روش پرتوتابی گاما در همه‌جا وجود ندارد و در دوزهای پرتوتابی بالا، هزینه آن بسیار زیاد می‌شود (Asgari, 2019). کاه برنج یک پسماند کشاورزی است که در تمام کشورهای تولیدکننده برنج به‌وفور یافت و معمولاً سوزانده می‌شود (Cavali et al., 2023). سوزاندن پسماندهای برنج، هوا را آلوده می‌کند و از طریق انتشار گازهای گلخانه‌ای سبب تشدید پدیده گرمایش جهانی می‌شود (Romasanta et al., 2017). با تبدیل پسماندهای کشاورزی مانند کاه برنج و پسماندهای هرس درختان به هیدروچار، می‌توان محصول‌های جامد و مایع با ارزش تهیه کرد. برای مثال، از هیدروچار می‌توان به‌عنوان یک کود کنده‌های آلی در کشاورزی استفاده کرد (Maghsoodi et al., 2020; Azimzadeh et al., 2021; Abdolmaleki et al., 2022).

Qingnan et al. (2020) گزارش کردند که استفاده از هیدروچار لجن فاضلاب در خاک غرقاب، سبب کاهش تصعید آمونیاک و افزایش نگهداری نیتروژن در خاک و استفاده بیشتر برنج از نیتروژن خاک شد. در نتیجه، با مصرف هیدروچار لجن فاضلاب، محصول دانه برنج نسبت به شاهد ۱/۲۴ برابر افزایش یافت. (Azimzadeh et al., 2021) نشان دادند که با مصرف هیدروچار پسماندهای هرس درختان سبب در خاک، رشد گیاهان ذرت بهبود یافت. (Abdolmaleki et al., 2022) گزارش کردند که مصرف هیدروچار لجن فاضلاب در یک خاک آلوده به مس، صفات زراعی گیاه برنج را بهبود داد. (Reza et al., 2014) اثر هیدروچار چغندر قند با سطوح ۲، ۴، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۸۰ درصد (حجمی/حجمی) را بر ماده خشک ریشه و ساقه گیاه قاصدک بررسی و مشاهده کردند که ماده خشک ریشه و ساقه با مصرف ۲ و ۴ درصد هیدروچار تغییر معنادار نکرد اما با مصرف سطوح ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۸۰ درصد افزایش یافت که نشانگر این است که اثر هیدروچار به سطح مصرفی آن بستگی داشت. به‌رحال، تأثیر هیدروچار بر رشد گیاهان مختلف متفاوت است و می‌تواند بی‌اثر، مفید و یا مضر باشد (Khosravi et al., 2022). (Rillig et al., 2010) گزارش نمودند که مصرف هیدروچار به‌میزان ۱۰ درصد برای رشد گیاه مضر بود اما سطح ۲۰ درصد آن برای هم‌زیستی قارچ - ریشه مفید بود. (Bargmann et al., 2014a) گزارش کردند که ماده خشک شاخساره گیاه تره‌فرنگی با افزودن هیدروچار پسماندهای چغندر قند به میزان ۲ و ۴ درصد افزایش و در سطح ۱۰ درصد کاهش یافت. (Amendola et al., 2017) مشاهده کردند که مصرف هیدروچار بقایای ذرت در خاک، ماده خشک شاخساره صنوبر را ۳۷ درصد افزایش داد. (Bargmann et al., 2013) نشان دادند که مصرف هر دو بخش جامد و مایع هیدروچار، به‌دلیل وجود برخی اسیدهای آلی، باعث کاهش جوانه‌زنی جو شد. بنابراین، هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر کاه برنج و لجن فاضلاب و هیدروچارهای حاصل از آن‌ها بر شاخص کلروفیل برگ‌ها و صفات زراعی گیاه برنج در یک خاک آلوده به سرب در شرایط گلخانه‌ای بود. همچنین، انتظار این بود که مصرف تلفیقی پسماندهای مختلف و هیدروچارهای آن‌ها، بر مصرف به‌تنهایی آن‌ها از نظر رشد گیاه برنج و کاهش سمیت سرب، برتری داشته باشد.

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش در مرکز تحصیلات تکمیلی دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز در سال ۱۴۰۱ اجرا شد. خاک مورد استفاده در این پژوهش، به صورت تصادفی از عمق صفر تا ۲۵ سانتی‌متری نقاط مختلف مزرعه‌ای در ایستگاه تحقیقات کشاورزی خلعت‌پوشان دانشگاه تبریز با طول جغرافیایی ۱۷°۴۶ و عرض جغرافیایی ۵۱°۳۷ نمونه‌برداری و نمونه مرکب تهیه شده به آزمایشگاه منتقل شد. پس از هواخشک شدن، خاک از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن تعیین شد. بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Or, 2002)، کلسیم کربنات معادل به روش خنثی‌سازی با اسید و تیتر کردن با سود (Allison and Moodie, 1965)، کربن آلی خاک به روش

اکسایش تر (Nelson and Sommers, 1996)، pH خاک در تعلیق ۱:۱ آب به خاک (Thomas, 1996)، EC در عصاره تعلیق ۱:۱ آب به خاک (Rhoades, 1996)، فسفر قابل جذب گیاه در خاک به روش اولسن (Kuo, 1996)، Cu، Fe، Zn، Mn و Pb قابل جذب به روش عصاره‌گیری با DTPA، Pb کل معادل با روش نیتریک اسید ۴ مولار (Sposito et al., 1982) و غلظت همه این فلزها در عصاره با دستگاه جذب اتمی (Lindsay and Norvell, 1978) و K و Na قابل جذب به روش عصاره‌گیری با آمونیوم استات و قرائت با دستگاه فلیم فتومتر (Jones, 2001) تعیین شدند. در جدول ۱ برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک مورد مطالعه ارائه شده است. این خاک آهکی غیرشور، نسبتاً درشت بافت و فقیر از نظر ماده آلی، نیتروژن و آهن بود (Hazelton and Murphy, 2007). زیاد بودن پتاسیم قابل جذب گیاه در این خاک ممکن است به مصرف سالانه کود پتاسیم در مزرعه مورد نظر که برای آموزش به دانشجویان در درس عملیات کشاورزی هر سال استفاده می‌شود، وجود پتاسیم زیاد در مواد مادری خاک، تجمع پتاسیم در سطح خاک بر اثر تبخیر آب و پتاسیم موجود در آب آبیاری (جدول ۲) مربوط باشد. بیشتر بودن غلظت روی قابل جذب نسبت به آهن ممکن است به بیشتر بودن غلظت روی در آب آبیاری نسبت به آهن (جدول ۲) مربوط باشد که سال‌ها از این آب در مزرعه مورد نظر استفاده می‌شود. در ضمن هر سال در درس عملیات کشاورزی به مزرعه مورد نظر کود روی داده می‌شود.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در پژوهش حاضر

گروه بافت	کربن آلی (%)	کلسیم کربنات معادل (%)	pH	EC (dS m ⁻¹)	کل N (%)	کل Pb (mg/kg)	غلظت عنصر قابل جذب گیاه در خاک (mg kg ⁻¹)							
							Pb	Zn	Cu	Mn	Fe	Na	K	P
لوم شنی	۰/۹۷	۱۷/۱	۸/۰۱	۰/۷۸	۰/۰۸	۱۲/۹	۲۱	۶۵۰	۱۰۸/۸	۲/۹۶	۱۲/۳	۱/۵۲	۴/۰۷	۰/۸۷

جدول ۲. ویژگی‌های شیمیایی آب مورد استفاده در مزرعه و گلخانه

pH	EC (dS/m)	غلظت عنصر (mg/L)					پتاسیم	کلسیم	منیزیم	سدیم	آهن	روی	منگنز	مس
		آهن	روی	سدیم	منیزیم	کلسیم								
۶/۹۷	۰/۴۹	۴/۹	۵/۷	۷/۴	۱۶/۵	ناچیز	۰/۸	ناچیز	۰/۱	ناچیز	ناچیز	ناچیز	ناچیز	

کاه برنج (*Oryza sativa* L.) از یک مزرعه شالیزار در شهرستان میانه و لجن فاضلاب مورد استفاده از تصفیه‌خانه فاضلاب شهر میانه، استان آذربایجان شرقی تهیه شد. کاه برنج به ذرات حدود ۲ سانتی‌متر خرد و با آب شهری و آب مقطر شسته شد و برای خشک شدن، در دمای ۷۰ درجه سلسیوس در آون فن‌دار به مدت ۲۴ ساعت نگهداری گردید. لجن فاضلاب شهری کوبیده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. برای تولید هیدروچار مقدار ۱۰۰ گرم از کاه برنج یا لجن فاضلاب شهری در درون دستگاه هیدروچار ریخته و ۱۰۰۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه به آن‌ها افزوده و درب دستگاه محکم بسته شد (Schimmelpfennig et al., 2014). سپس دمای دستگاه هیدروچار به تدریج با سرعت ۵ درجه در دقیقه به ۱۸۰ درجه سلسیوس رسانده شد و واکنش کربونیزه شدن گرم‌آبی در این دما و در فشار ۱۶ اتمسفر به مدت ۲ ساعت انجام و سپس دستگاه خاموش شد تا خنک شده و به دمای اتاق برسد. بخش جامد هیدروچار با استفاده از کاغذ صافی واتمن ۴۲ از بخش مایع واکنش جدا شد. سپس بخش جامد هیدروچار در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و به مدت ۲۴ ساعت در آون فن‌دار خشک و خرد شد و از الک ۱ میلی‌متری عبور داده شد (Fang et al., 2015). برخی ویژگی‌های شیمیایی مهم کاه برنج، لجن فاضلاب شهری و هیدروچارهای آن‌ها نظیر pH، EC و غلظت کل عنصرها تعیین (Westerman, 1990; Peters, 2003) و نتایج در جدول ۳ ارائه شد.

آزمایش گلخانه‌ای به صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار و دو فاکتور، ماده آلی در ۱۱ سطح (شاهد، کاه برنج، هیدروچار کاه برنج، لجن فاضلاب، هیدروچار لجن فاضلاب، کاه برنج + هیدروچار آن، لجن فاضلاب + هیدروچار آن، کاه برنج + لجن فاضلاب، هیدروچار کاه برنج + هیدروچار لجن فاضلاب، کاه برنج + هیدروچار لجن فاضلاب، لجن فاضلاب + هیدروچار کاه برنج) و سرب در دو سطح (۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم Pb بر کیلوگرم خاک از منبع سرب نترات، Pb(NO₃)₂) اجرا شد. کاه برنج، لجن فاضلاب شهری و هیدروچار آن‌ها به میزان ۱۰ گرم به هر کیلوگرم خاک و در تیمارهای تلفیقی از هر یک به میزان ۵ گرم به هر کیلوگرم خاک افزوده شد.

برای کشت از گلدان‌های پلاستیکی به قطر دهانه ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر استفاده شد. سپس، با انجام یک پیش‌آزمایش، حجمی از آب را که ۲/۵ کیلوگرم از خاک مورد مطالعه را اشباع کرده و حدود پنج سانتی‌متر آب روی سطح خاک باقی بماند، تعیین و به هر گلدان افزوده شد. عنصرهای غذایی مورد نیاز گیاه بر طبق آزمون خاک (جدول ۱) و به صورت محلول به آب درون گلدان‌ها افزوده شد. برای این کار، قبل از کشت گیاه، ۵۰ میلی‌گرم نیتروژن به هر کیلوگرم خاک از منبع اوره به صورت محلول افزوده شد. در طول دوره رشد، ۳ بار و هر بار ۵۰ میلی‌گرم نیتروژن در کیلوگرم خاک از منبع اوره به صورت محلول به خاک گلدان‌ها افزوده شد. مجموع نیتروژن مصرف شده در کل دوره رشد گیاه، ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بود.

جدول ۳. ویژگی‌های کاه برنج، لجن فاضلاب و هیدروچارهای مورد استفاده در پژوهش حاضر

غلظت کل عنصر (g kg ⁻¹)										EC	pH	ماده آلی
Zn	Cu	Mn	Fe	Na	Mg	Ca	K	P	N	(dS m ⁻¹)		
۰/۲۶	۰/۰۰۲	۰/۰۷	۰/۴۷	۰/۶۵	۰/۵	۱/۸۵	۲/۵۵	۰/۲۸	۴/۲۵	۵/۷۰	۶/۰۵	کاه برنج
۰/۲۰	۰/۰۰۴	۰/۰۵	۰/۴۲	۰/۵۷	۰/۲۵	۰/۸۹	۱/۲۱	۰/۱۴۰	۳/۴۶	۳/۹۰	۴/۲۰	هیدروچار کاه برنج
۱/۳۳	۰/۱۳	۰/۱۴	۲/۸۰	۲/۷۹	۳/۱۸	۱۶/۵	۲/۴۳	۲۲/۸۳	۴۲/۷	۱/۷۲	۶/۲۰	لجن فاضلاب
۰/۲۷	۰/۲	۰/۱۴	۳/۵۱	۰/۹۳	۱/۸۰	۲۱/۴	۱/۵۲	۱۴/۶	۳۳/۴	۱/۰۹	۵/۵۰	هیدروچار لجن فاضلاب

در تیمارهای دارای ۵۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک، یک محلول سرب نترات تهیه و ۱۰۰ میلی‌لیتر از آن به هر گلدان افزوده و خوب مخلوط شد. مقدار نیتراتی که در این تیمارها همراه سرب به خاک افزوده شد، محاسبه گردید و در تیمارهای بدون آلودگی سرب، یک محلول سدیم نترات (NaNO₃) تهیه و ۱۰۰ میلی‌لیتر از آن به هر گلدان افزوده و خوب مخلوط شد تا غلظت نیترات در تیمارهای با و بدون آلودگی سرب یکسان باشد. سپس ۲/۵ کیلوگرم از خاک مورد مطالعه کم کم به داخل گلدان‌ها ریخته شد. در تیمارهای دارای ماده آلی، ابتدا ۲۵ گرم از هر ماده آلی مورد استفاده به ۲/۵ کیلوگرم خاک افزوده و خوب مخلوط شد. در تیمارهای تلفیقی از هر ماده آلی، ۱۲/۵ گرم بر ۲/۵ کیلوگرم خاک استفاده شد. سپس مخلوط خاک و ماده آلی کم کم به داخل گلدان‌ها ریخته شد. در تمام گلدان‌ها تعلیق خوب به هم زده شد تا کاملاً یکنواخت شود. گلدان‌ها به مدت ۱۴ روز در این شرایط نگهداری شدند تا خاک غرقاب درون گلدان‌ها به وضعیت نسبتاً متعادلی برسد. در این مدت روزانه به گلدان‌ها آب داده شد تا ارتفاع حدود دو سانتی‌متری آب روی خاک گلدان‌ها حفظ شود تا در مرحله بعد بتوان بذرهای جوانه‌دار شده را در سطح خاک کاشت (Najafi and Towfighi, 2012).

برای کشت گیاهان، ابتدا بذرهای برنج رقم هاشمی تهیه شده از مؤسسه تحقیقات برنج کشور در رشت، داخل محلول ۴ درصد سدیم کلرید ریخته شدند. بذرهای پوک روی آب شور شناور شده و دور ریخته شدند. بعد از آن، بذرها با آب شهری شسته و با محلول ۰/۵ درصد سدیم هیپوکلریت ضد عفونی و در میان چند لایه پارچه متقالی با رطوبت مناسب، جوانه‌دار شدند. سپس تعداد ۲۰ عدد بذر جوانه‌دار شده در هر گلدان کشت و بعد از دو هفته رشد دانه‌ها در گلدان‌ها، بوته‌ها به تعداد ۱۰ عدد تنک شدند. پس از استقرار گیاهان در خاک، ۵ سانتی‌متر آب در سطح خاک نگهداری شد (Najafi and Towfighi, 2012). گیاهان تا مرحله خوشه‌دهی در گلخانه پژوهشی با نور طبیعی خورشید در دمای بیشینه ۳۰ و کمینه ۱۸ درجه سلسیوس نگهداری شدند. برای افزایش رطوبت نسبی هوای گلخانه، در طول روز کف گلخانه با آب دادن خیس نگه‌داشته شد. برای رفع کمبود نیتروژن، در طول دوره رشد چند بار کود اوره در غلظت ۱ در هزار و به صورت محلول به آب همه گلدان‌ها افزوده شد. جمع کود نیتروژن مصرف شده ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بود. در طول دوره رشد، شاخص کلروفیل برگ‌ها با استفاده از دستگاه کلروفیل‌متر (Hansateah مدل CL-01) و ارتفاع گیاهان در زمان‌های مختلف تعیین شدند. پس از ۱۰۵ روز رشد و قبل از برداشت گیاهان، تعداد پنجه در بوته، تعداد خوشه در بوته، تعداد برگ سالم در بوته و تعداد کل برگ در بوته شمارش شدند. همچنین، بلندترین ارتفاع گیاه در گلدان، طول برگ و طول خوشه به وسیله متر و عرض برگ، قطر پنجه و قطر ساقه در محل طوقه به وسیله کولیس دیجیتالی اندازه‌گیری شدند. در این پژوهش شاخص کلروفیل و ارتفاع گیاه به ترتیب در سه و چهار زمان مختلف اندازه‌گیری شدند. درجه آزادی خطا برای شاخص کلروفیل و ارتفاع گیاه به ترتیب ۱۳۲ و ۱۷۶ بود که برای کاهش حجم مقاله در جدول ۳ ارائه نشد. هنگام برداشت، شاخساره‌ها از محل طوقه بریده و ریشه‌ها از خاک جدا شدند. پس از تعیین وزن تر شاخساره کل، خوشه‌ها از شاخساره جدا و وزن تر آن‌ها تعیین شدند. سپس، ریشه‌ها با آب شهری و با آب مقطر شسته شدند و با دستمال کاغذی تمیز، آب اضافی آن‌ها جذب و وزن تر آن‌ها با ترازوی دیجیتالی اندازه‌گیری شد. شاخساره و خوشه‌ها نیز با آب شهری و با آب مقطر تمیز شسته شدند. هر سه قسمت

گیاهان به پاکت‌های کاغذی جداگانه منتقل و در آون فن‌دار به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سلسیوس نگهداری شدند تا خشک شوند. سپس، وزن خشک شاخساره، خوشه و ریشه اندازه‌گیری شد.

تحلیل آماری

تحلیل آماری داده‌ها شامل آزمون نرمال بودن توزیع داده‌ها، تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها با نرم‌افزار MSTATC و رسم نمودارها با نرم‌افزار Excel انجام شدند. مقایسه میانگین‌ها با آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

یافته‌های پژوهشی

شاخص کلروفیل برگ‌ها

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرهای اصلی ماده آلی و سرب در سطح احتمال یک درصد بر شاخص کلروفیل برگ معنادار بودند اما اثر متقابل ماده آلی × سرب بر شاخص کلروفیل برگ معنادار نبود (جدول ۴). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که شاخص کلروفیل برگ با افزایش سن گیاه در طول دوره رشد به‌طور معنادار افزایش یافت که با توجه به نقش نیتروژن در ساختمان کلروفیل، ناشی از مصرف کود نیتروژن در زمان‌های مختلف و وقوع پدیده اثر تغلیظ بود. اگر کود نیتروژن مصرف نمی‌شد، انتظار این بود که با افزایش سن گیاه، به دلیل کاهش غلظت نیتروژن برگ بر اثر پدیده اثر رقت، شاخص کلروفیل آن نیز کاهش یابد (Marschner, 2012). Gholizadeh et al. (2017) گزارش دادند که شاخص کلروفیل برگ با غلظت کلروفیل، غلظت نیتروژن و محصول دانه برنج همبستگی‌های مثبت و معنادار داشت. همچنین، آلودگی سرب (سطح 500 mg/kg) نسبت به شاهد، شاخص کلروفیل برگ‌ها را کاهش داد (شکل ۱). شکل ۱-A نشان می‌دهد که این کاهش در دو زمان اول معنادار نبود، اما در زمان سوم معنادار بود که با نتایج سایر پژوهشگران مطابقت داشت (Chatterjee et al., 2019; Amanifar et al., 2019; Ashraf et al., 2017; Ashraf & Tang, 2017; et al., 2004). کاهش شاخص کلروفیل برگ‌ها در شرایط سمیت سرب را می‌توان به تولید گونه‌های فعال اکسیژن همچون سوپراکسید، پراکسید و هیدروکسیل و مختل شدن تغذیه گیاهان نسبت داد که سبب آسیب‌دیدگی ساختارهای درون یاخته‌ها و تجزیه کلروفیل، مختل شدن سوخت‌وساز یاخته‌ها و مختل شدن فرایند تشکیل کلروفیل می‌شود (Chatterjee et al., 2004; Khan et al., 2018).

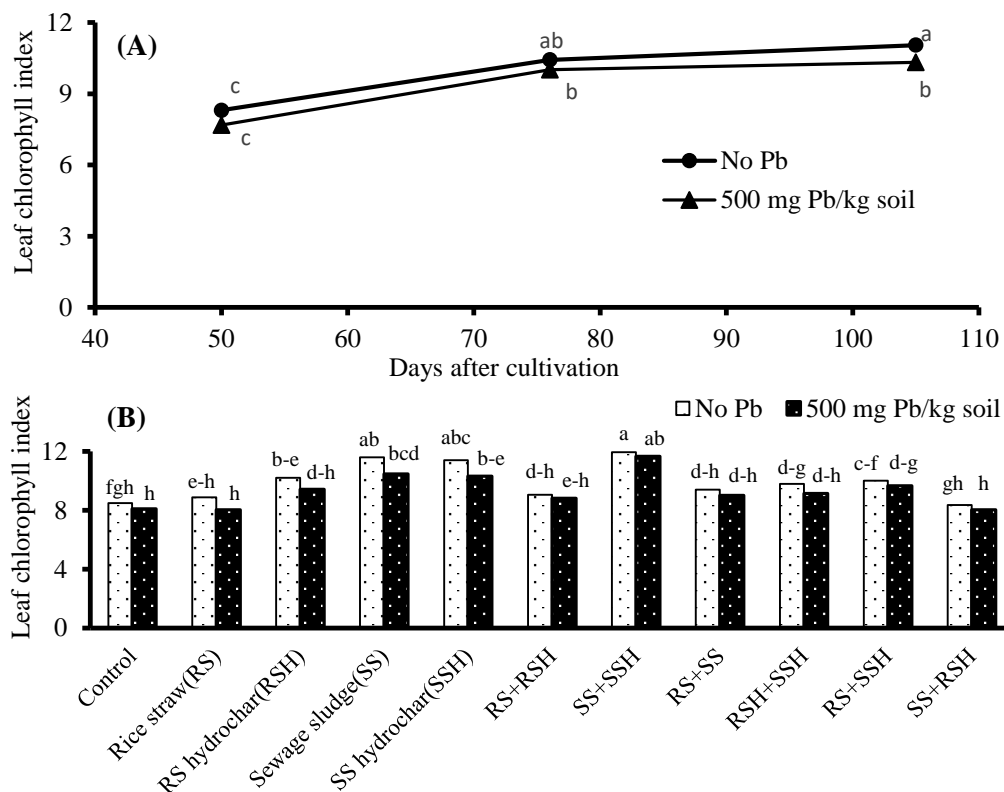
جدول ۴. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر ماده آلی و سرب بر شاخص کلروفیل برگ و برخی صفات زراعی مورد مطالعه در این پژوهش

منبع تغییر	درجه آزادی	شاخص کلروفیل	ماده خشک شاخساره	ماده خشک ریشه	نسبت ماده خشک شاخساره به ریشه	ماده خشک	تعداد خوشه	طول خوشه
ماده آلی (OM)	۱۰	۲۵/۵۵**	۸۵۸/۳**	۷۳/۳۳**	۴/۳۷**	۳۵/۳۷**	۳/۵۹**	۲/۵۸**
سرب (Pb)	۱	۱۷/۱۱**	۲۷/۸۰ ^{ns}	۳/۰۵ ^{ns}	۰/۰۴ ^{ns}	۲/۲۴*	۰/۰۱۵ ^{ns}	۳/۸۷*
OM × Pb	۱۰	۰/۴۸ ^{ns}	۴/۵۳ ^{ns}	۰/۲۵ ^{ns}	۰/۰۲ ^{ns}	۰/۱۳۵ ^{ns}	۰/۰۱۶ ^{ns}	۰/۳۰۶ ^{ns}
خطا	۴۴	۱/۸۷	۱۰/۷۳	۱/۷۷	۰/۲۷	۱/۳۹	۰/۰۵۴	۰/۹۱۹
ضریب تغییرات (%)	-	۱۴/۲۱	۷/۱۹	۱۲/۹۳	۱۱/۱۵	۱۳/۷۳	۷/۱۳	۴/۴۰

جدول ۴. ادامه

منبع تغییر	درجه آزادی	ارتفاع گیاه	تعداد برگ	طول برگ	عرض برگ	قطر ساقه	تعداد پنجه
ماده آلی (OM)	۱۰	۱۵۵/۰۴**	۲۹۹/۳**	۲۰/۸۶**	۰/۸۰۳**	۱۵۷/۷**	۵/۹۸**
سرب (Pb)	۱	۶۸/۰۱**	۱۳/۳۶*	۸/۹۴ ^{ns}	۲/۴۰**	۱۸/۹۸*	۰/۱۴ ^{ns}
OM × Pb	۱۰	۱۲/۰۸ ^{ns}	۱/۴۰ ^{ns}	۱/۰۷ ^{ns}	۰/۰۷ ^{ns}	۰/۴۸ ^{ns}	۰/۰۴ ^{ns}
خطای آزمایشی	۴۴	۷/۰۲	۳/۱۱	۷/۱۴	۰/۲۰۷	۲/۷۳	۰/۰۸
ضریب تغییرات (%)	-	۴/۱۰	۶/۷۷	۶/۴۸	۷/۰۹	۶/۹۵	۷/۷۱

^{ns}، * و **، به ترتیب غیرمعنادار و معنادار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد



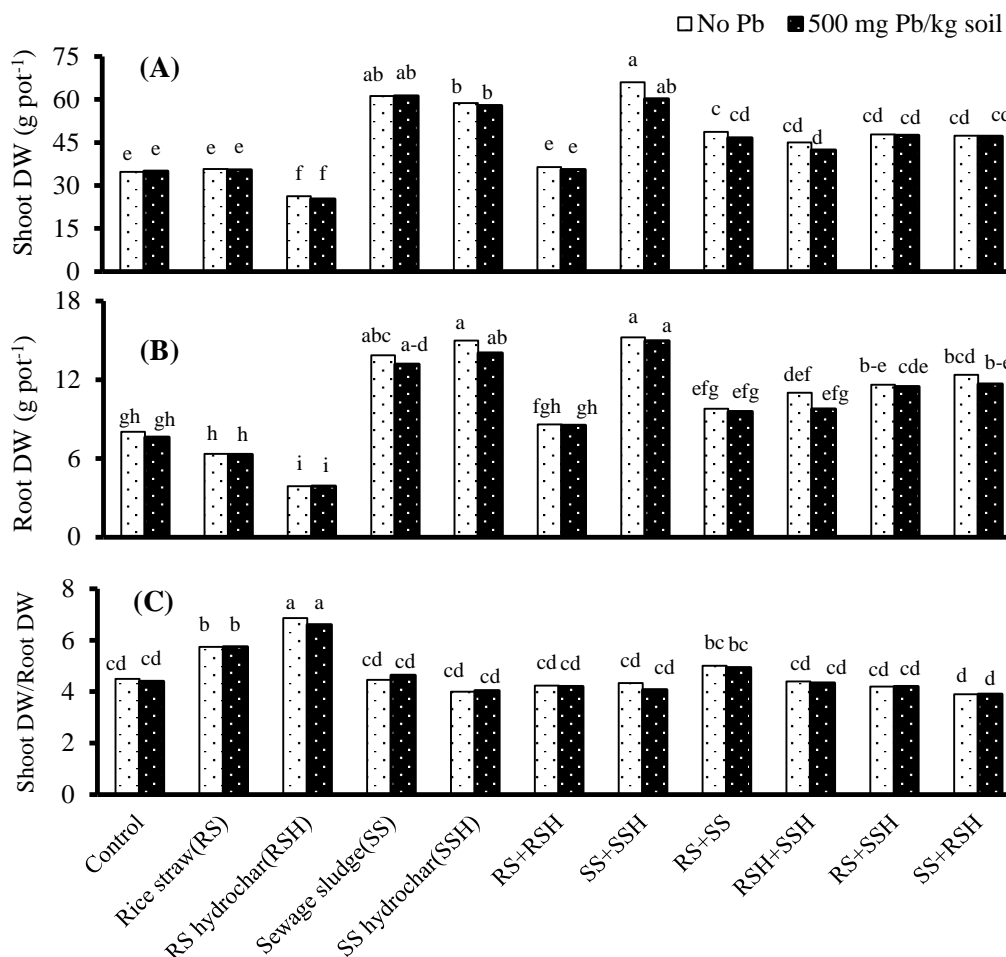
شکل ۱. اثر متقابل زمان \times Pb (A)، میانگین ۳۳ عدد، ۳ تکرار و ۱۱ سطح ماده آلی) و اثر متقابل ماده آلی \times Pb (B)، میانگین ۹ عدد، ۳ تکرار و ۳ سطح زمان) بر شاخص کلروفیل برگ

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که مصرف لجن فاضلاب و هیدروچار آن در هر دو شرایط با و بدون آلودگی سرب باعث افزایش شاخص کلروفیل شد که می‌تواند ناشی از افزایش فراهمی عنصرهای غذایی در خاک و بهبود تغذیه گیاه باشد (Havlin et al., 2017). پس از مصرف لجن فاضلاب افزایش شاخص کلروفیل برگ‌ها در گیاه آفتابگردان به‌وسیله (Kazemalilou و Najafi & Mardomi (2012) و (2018) et al.، در گیاه برنج به‌وسیله (Abbasi et al. (2013)، در گیاه ذرت به‌وسیله (Ahmadinejad et al. (2013)، در گیاه یونجه به وسیله (Mahmoudi et al. (2015) و در گیاه نعنای به‌وسیله (Asgari Lajayer et al. (2019) نیز گزارش شده‌است. افزایش شاخص کلروفیل برگ‌ها در حضور لجن فاضلاب را می‌توان به بهبود فراهمی نیتروژن، آهن، روی و عنصرهای غذایی دیگر نسبت داد (جدول ۲) که سبب بهبود تغذیه گیاه برنج به‌ویژه از نظر نیتروژن می‌شود. باتوجه به نقش نیتروژن در ساختمان کلروفیل، با مصرف لجن فاضلاب غلظت کلروفیل برگ زیاد می‌شود. بیشترین شاخص کلروفیل برگ در تیمار تلفیقی لجن فاضلاب + هیدروچار آن مشاهده شد هرچند که با تیمار لجن فاضلاب تفاوت معنادار نداشت. در شرایط آلودگی سرب، مصرف کاه برنج یا هیدروچار آن (به‌تنهایی یا تلفیقی) بر شاخص کلروفیل برگ اثر معنادار نداشت اما در شرایط غیرآلوده به سرب، مصرف هیدروچار کاه برنج شاخص کلروفیل برگ‌ها را به‌طور معنادار افزایش داد اما مصرف کاه برنج اثر معنادار نداشت. باتوجه به کاهش ماده خشک شاخساره در حضور هیدروچار کاه برنج، افزایش شاخص کلروفیل برگ‌ها در این شرایط را می‌توان به وقوع پدیده اثر تغلیظ نسبت داد (Marschner, 2012). افزایش غلظت کلروفیل برگ‌های آفتابگردان با مصرف بیوپچار کاه برنج به‌وسیله (Okla et al. (2024) گزارش شده‌است.

ماده خشک شاخساره

تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی بر ماده خشک شاخساره در سطح احتمال یک درصد معنادار بود اما اثر اصلی سرب و اثر متقابل ماده آلی \times سرب بر ماده خشک شاخساره معنادار نبودند (جدول ۴). معنادار نشدن اثر آلودگی سرب بر ماده خشک شاخساره برنج (شکل ۲-۱) نشانگر این است که این گیاه در برابر غلظت زیاد سرب در خاک متحمل است و پیش از این به‌وسیله (Mardomi et al. (2019a) نیز گزارش شده‌است. به‌نظر می‌رسد دلیل‌های این پدیده عبارتند از: ۱- رسوب ترکیب‌های آهن اکسی-هیدروکسید بر سطح ریشه‌های برنج و جذب فلزهای سنگین مانند سرب به‌وسیله آن که سبب کاهش جذب و انتقال سرب به‌وسیله ریشه گیاه برنج می‌شود (Wan et al., 2019). ۲- کاهش زیست‌فراهمی سرب پس از غرقاب شدن خاک (Mardomi et al., 2019b) که سبب کاهش جذب

سرب و غلظت آن در گیاه برنج می‌شود (Zou et al., 2018). ناپویایی سرب در خاک‌های غرقاب ممکن است به علت رسوب با لیگاندهای معدنی از قبیل کربنات‌ها و فسفات‌ها و جذب سرب به وسیله کانی‌های رسی و مواد آلی باشد (Gu et al., 2014; Svetlana et al., 2017; Mardomi et al., 2019b). فسفر قابل جذب گیاه در خاک مورد مطالعه، ۲۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود و پس از غرقاب می‌تواند تا بیش از دو برابر افزایش یابد (Najafi & Towfighi, 2012). با مصرف کود فسفر و با افزایش فراهمی فسفر در شرایط غرقاب، سرب با فسفات رسوب کرده و زیست‌فراهمی و سمیت آن کم می‌شود (Mardomi et al., 2019b).



شکل ۲. اثر متقابل ماده آلی × Pb بر ماده خشک شاخساره (A)، ریشه (B) و نسبت ماده خشک شاخساره به ریشه (C) برنج

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که استفاده از لجن فاضلاب، هیدروچار لجن فاضلاب، لجن فاضلاب + هیدروچار آن و تلفیق لجن فاضلاب و هیدروچار آن با کاه برنج یا هیدروچار کاه برنج، ماده خشک شاخساره را نسبت به شاهد به طور معنادار افزایش دادند (شکل ۲-۲-۱). باتوجه به جدول‌های ۱ و ۲، این افزایش را می‌توان به بهبود زیست‌فراهمی عنصرهای غذایی در این تیمارها و بهبود تغذیه گیاه نسبت داد. پس از مصرف لجن فاضلاب، افزایش ماده خشک شاخساره در گیاه جو به وسیله Antolin et al. (2005)، در گیاه آفتابگردان به وسیله Najafi & Mardomi (2012) و Kazemalilou et al. (2018)، در گیاه یونجه به وسیله Mahmoudi et al. (2015)، در گیاه نعنای به وسیله Asgari Lajayer et al. (2019)، در گیاه برنج به وسیله Asagi et al. (2007)، Singh & Agrawal (2010)، Abbasi et al. (2013) و Abdolmaleki et al. (2022) و در اسفناج به وسیله Ebrahim et al. (2017) نیز گزارش شده است. همچنین، افزایش ماده خشک شاخساره برنج پس از مصرف هیدروچار لجن فاضلاب به وسیله Abdolmaleki et al. (2022) نیز گزارش شده است. بیشترین ماده خشک شاخساره برنج در تیمار تلفیقی لجن فاضلاب + هیدروچار لجن فاضلاب و در شرایط بدون آلودگی Pb مشاهده شد هر چند با برخی تیمارها تفاوت معنادار نداشت (شکل ۲-۲-۱) که نشانگر برتری تیمار تلفیقی است.

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که اثر کاه برنج و کاه برنج + هیدروچار آن بر ماده خشک شاخساره نسبت به شاهد معنادار نبود اما

استفاده از هیدروچار کاه برنج، ماده خشک شاخساره را نسبت به شاهد به طور معنادار کاهش داد (شکل ۲-A) که با مطالعات Asmadi et al. (2023) مطابقت داشت. کاهش ماده خشک شاخساره برنج در حضور هیدروچار ممکن است به تولید ترکیب‌های هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای، دی‌بنزو دی‌اکسین‌ها و فنول‌ها در فرایند کربونیزه شدن گرم‌آبی مربوط باشد که اثرهای سمی بر گیاهان داشته و باعث کاهش رشد گیاه می‌شوند (Rogovska et al., 2012; Bargmann et al., 2013; Busch et al., 2013). همچنین، ترکیب‌های سمی موجود در هیدروچار شسته نشده می‌تواند جمعیت میکروبی خاک را کاهش دهد و از این راه باعث کاهش رشد گیاه شود (De Jager & Giani, 2021). Farru et al. (2022) گزارش کردند که کاهش رشد گیاه در حضور هیدروچار به دلیل وجود ترکیب‌های مضرمانند ترکیب‌های فنولی یا اسیدهای چرب فرار است که در طی فرایند کربونیزه شدن گرم‌آبی تولید می‌شوند. عامل دیگری که در کاهش ماده خشک شاخساره برنج در حضور هیدروچار کاه برنج می‌تواند مؤثر باشد، ایجاد غلظت بالای اسیدهای آلی با جرم مولکولی بالا در محلول خاک به‌ویژه در شرایط غرقاب است که سبب مسمومیت ریشه‌ها و کاهش رشد شاخساره می‌شود. (Marschner 2012) گزارش کرد که در شرایط غرقاب، استیک اسید و اسیدهای چرب فرار، ممکن است در غلظت‌های سمی در ریزوسفر تجمع یابند و از رشد ریشه و شاخساره حتی در گونه‌های سازش یافته با غرقاب، جلوگیری کنند. (Kalderis et al. 2019) نشان دادند که شستشوی هیدروچار با آب یا محلول قلیایی ضعیف، pH هیدروچار را بهبود بخشیده و می‌تواند مواد جانبی مضر را کاهش دهد. علاوه بر این، زمان سپری شده بعد از افزودن هیدروچار به خاک می‌تواند اثرهای سمی آن بر گیاهان را کاهش دهد و اثرهای مثبتی بر رشد گیاه داشته باشد. مطالعه‌ای توسط Puccini et al. (2018) نشان داد که هیدروچار افزوده شده به خاک پس از گذشت ۴ ماه، اثرهای سمی کمتری بر گیاهان داشت و دلیل آن، کاهش غلظت پلی‌فنول‌ها و اسیدهای چرب فرار در هیدروچار است که می‌تواند به دلیل تصعید جزئی مواد سمی فرار و تجزیه آن‌ها با گذشت زمان باشد. نتایج نشان داد که تلفیق کاه برنج با هیدروچار آن سبب تعدیل اثرهای منفی هیدروچار کاه برنج بر رشد گیاه و ماده خشک شاخساره شد (شکل ۲-A) که نشانگر برتری تیمار تلفیقی نسبت به کاربرد هیدروچار به تنهایی است. (Yao et al. 2002) بیان کردند که استفاده از کاه برنج و بیوچار آن، زیست‌فراهی سیلیسیم در خاک را افزایش می‌دهد که می‌تواند باعث بهبود رشد گیاه برنج شود. همچنین، تلفیق لجن فاضلاب و هیدروچار لجن فاضلاب با کاه برنج و هیدروچار آن، ماده خشک شاخساره را نسبت به مصرف فقط کاه برنج یا هیدروچار آن به‌طور معنادار افزایش داد (شکل ۲-A) که نشانگر کاهش اثرهای منفی کاه برنج و هیدروچار آن در حضور لجن فاضلاب و هیدروچار آن است. بهبود رشد گیاه در در این تیمارهای تلفیقی، می‌تواند ناشی از افزایش فراهمی عنصرهای غذایی در خاک و بهبود تغذیه گیاه باشد (McBride, 2002; Afyuni et al., 2006).

ماده خشک ریشه

تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی بر ماده خشک ریشه در سطح احتمال یک درصد معنادار بود اما اثر اصلی سرب و اثر متقابل ماده آلی × سرب بر ماده خشک ریشه معنادار نبودند (جدول ۴). معنادار نشدن اثر آلودگی سرب بر ماده خشک ریشه برنج (شکل ۲-B) نشانگر این است که این گیاه در برابر غلظت زیاد سرب در خاک متحمل است که با یافته‌های سایر پژوهشگران مطابقت داشت (Ashraf et al., 2017; Khan et al., 2018). با این حال، برخی پژوهشگران کاهش ماده خشک ریشه گیاه برنج در شرایط سمیت سرب را گزارش داده‌اند (Sharma & Dubey, 2005; Kibria et al., 2006; Awan et al., 2015). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که استفاده از لجن فاضلاب، هیدروچار لجن فاضلاب، لجن فاضلاب + هیدروچار آن ماده خشک ریشه را نسبت به شاهد به‌طور معنادار افزایش دادند (شکل ۲-B). باتوجه به جدول‌های ۱ و ۲، این افزایش را می‌توان به بهبود زیست‌فراهی عنصرهای غذایی در این تیمارها و بهبود تغذیه گیاه نسبت داد. پس از مصرف لجن فاضلاب، افزایش ماده خشک ریشه در گیاه کینوا به‌وسیله Afzalinejad et al. (2021)، در گیاه آفتابگردان به‌وسیله Najafi & Mardomi (2012)، در گیاه یونجه به‌وسیله Mahmoudi et al. (2015)، در گیاه نعنای به‌وسیله Asgari Lajayer et al. (2019)، در گیاه برنج به‌وسیله Zuo et al. (2021) و Abdolmaleki et al. (2022) و در اسفناج به‌وسیله Ebrahim et al. (2017) نیز گزارش شده است. همچنین، افزایش ماده خشک ریشه برنج پس از مصرف هیدروچار لجن فاضلاب به‌وسیله Abdolmaleki et al. (2022) گزارش شده است. Khan et al. (2013) گزارش کردند که مصرف بیوچار لجن فاضلاب موجب افزایش ماده خشک ریشه گیاه برنج به میزان ۷۱/۳ تا ۹۲/۲ درصد شد. بیشترین ماده خشک ریشه در تیمار تلفیقی لجن فاضلاب + هیدروچار آن مشاهده شد هرچند

که با تیمار لجن فاضلاب و هیدروچار آن تفاوت معنادار نداشت (شکل ۲-B).

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که اثر کاه برنج و کاه برنج + هیدروچار آن بر ماده خشک ریشه نسبت به شاهد معنادار نبود اما استفاده از هیدروچار کاه برنج، ماده خشک ریشه را نسبت به شاهد به‌طور معنادار کاهش داد (شکل ۲-B) که دلایل آن در بخش ماده خشک شاخساره بیان شد. کمترین ماده خشک ریشه در تیمار هیدروچار کاه برنج مشاهده شد. تلفیق کاه برنج با هیدروچار آن سبب تعدیل اثر منفی هیدروچار کاه برنج بر ماده خشک ریشه شد (شکل ۲-B). تأثیر منفی هیدروچار کاه برنج بر ماده خشک ریشه با نتایج Asmadi et al. (2023) مطابقت داشت. تلفیق کاه برنج و هیدروچار آن با لجن فاضلاب و هیدروچار لجن فاضلاب، ماده خشک ریشه را نسبت به شاهد به‌طور معنادار افزایش داد (شکل ۲-B). افزایش ماده خشک ریشه در تیمارهای تلفیقی را می‌توان به بهبود فراهمی نیتروژن، فسفر، آهن و عنصرهای غذایی دیگر نسبت داد (McBride, 2002; Afyuni et al., 2006). مطالعات Zhang et al. (2020) نشان داد که ترکیب کاه برنج و لجن فاضلاب در فرایند کربونیزه شدن گرم‌آبی، باعث ایجاد یک اثر هم‌افزایی می‌شود. در این فرایند، اسیدهایی که از هیدرولیز همی‌سلولز کاه برنج تولید می‌شوند، به تجزیه ترکیب‌های نیتروژن‌دار موجود در لجن فاضلاب (مثل آمیدها) کمک می‌کنند. این یعنی وقتی کاه برنج یا هیدروچار آن با لجن فاضلاب یا هیدروچار آن ترکیب می‌شوند، بهتر از زمانی عمل می‌کنند که به تنهایی استفاده شوند که با نتایج این پژوهش مطابقت داشت.

نسبت ماده خشک شاخساره به ریشه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی در سطح احتمال یک درصد بر نسبت ماده خشک شاخساره به ریشه معنادار بود اما اثر اصلی سرب و اثر متقابل ماده آلی × سرب بر نسبت ماده خشک شاخساره به ریشه معنادار نبودند (جدول ۴). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که فقط مصرف کاه برنج و هیدروچار آن در خاک باعث افزایش این نسبت شد و سایر تیمارها نسبت به شاهد تغییر معناداری در این نسبت ایجاد نکردند (شکل ۲-C). نتایج نشان داد که مصرف هیدروچار کاه برنج، ماده خشک شاخساره را کمتر از ریشه کاهش داد. به عبارت دیگر، حساسیت ماده خشک شاخساره به مصرف هیدروچار کاه برنج کمتر از ریشه بود. شاید یک دلیل برای این پدیده این باشد که ریشه در تماس مستقیم با ترکیب‌های سمی موجود در هیدروچار است و خودش به عنوان یک صافی برای بخش هوایی عمل می‌کند. پژوهشگران متعددی اثر مثبت لجن فاضلاب بر افزایش رشد و میزان فتوسنتز در گیاهان را گزارش کرده‌اند (Antolin & Sanchez, 2013; Diaz, 2010; Abbasi et al., 2013). افزایش شدت فتوسنتز سبب افزایش رشد ریشه و شاخساره گیاه می‌شود. در این پژوهش، چون افزایش ماده خشک ریشه و شاخساره پس از مصرف لجن فاضلاب و هیدروچار آن به‌طور متناسب انجام شد، نسبت ماده خشک شاخساره به ریشه تغییر معناداری نسبت به شاهد نکرد که با نتایج Ebrahem et al. (2017) در گیاه اسفناج مطابقت داشت. Asagi et al. (2007) گزارش کردند که نسبت ماده خشک شاخساره به ریشه در تیمار لجن فاضلاب به‌طور معناداری بیشتر از دو تیمار شاهد و کود شیمیایی بود.

ماده خشک خوشه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرهای اصلی ماده آلی در سطح احتمال یک درصد و سرب در سطح احتمال پنج درصد بر ماده خشک خوشه برنج معنادار بود اما اثر متقابل ماده آلی × سرب بر ماده خشک خوشه معنادار نبودند (جدول ۴). تأثیر منفی آلودگی سرب بر ماده خشک خوشه برنج با نتایج Ashraf et al. (2017)، Jasmin et al. (2019) و Cao et al. (2022) مطابقت داشت. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که استفاده از لجن فاضلاب ماده خشک خوشه‌ها را نسبت به شاهد به‌طور معنادار افزایش داد. بیشترین ماده خشک خوشه در تیمار لجن فاضلاب و بدون آلودگی سرب مشاهده شد (شکل ۳-A). Singh & Agrawal (2010) گزارش کردند که مصرف لجن فاضلاب محصول گیاه برنج را حدود ۶۰ تا ۱۳۷ درصد افزایش داد و باعث افزایش تعداد خوشه برنج و در نتیجه افزایش ماده خشک خوشه برنج شد. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که استفاده از هیدروچار کاه برنج ماده خشک خوشه را نسبت به شاهد به‌طور معنادار کاهش داد (شکل ۳-A) که با نتایج Asmadi et al. (2023) مطابقت داشت. کمترین ماده خشک خوشه در تیمار تلفیقی کاه برنج + هیدروچار آن مشاهده شد (شکل ۳-A). دلایل کاهش ماده خشک خوشه برنج در حضور هیدروچار کاه برنج پیش از این در بخش ماده خشک شاخساره ذکر شده است. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که ترکیب کاه برنج یا هیدروچار آن با لجن فاضلاب یا هیدروچار لجن فاضلاب، باعث کاهش ماده خشک خوشه نسبت به کاربرد لجن فاضلاب یا هیدروچار به تنهایی شد (شکل ۳-A). Zhang et al. (2020) گزارش کردند که فرایند کربونیزه شدن گرم‌آبی هم‌زمان کاه برنج و لجن فاضلاب سبب کاهش غلظت نیتروژن و گوگرد در هیدروچار حاصل می‌شود. دلیل اصلی این کاهش، اسیدهای آلی حاصل از تجزیه همی‌سلولز کاه برنج است که باعث تجزیه گروه‌های عاملی

آمیدی موجود در لجن فاضلاب می شود.

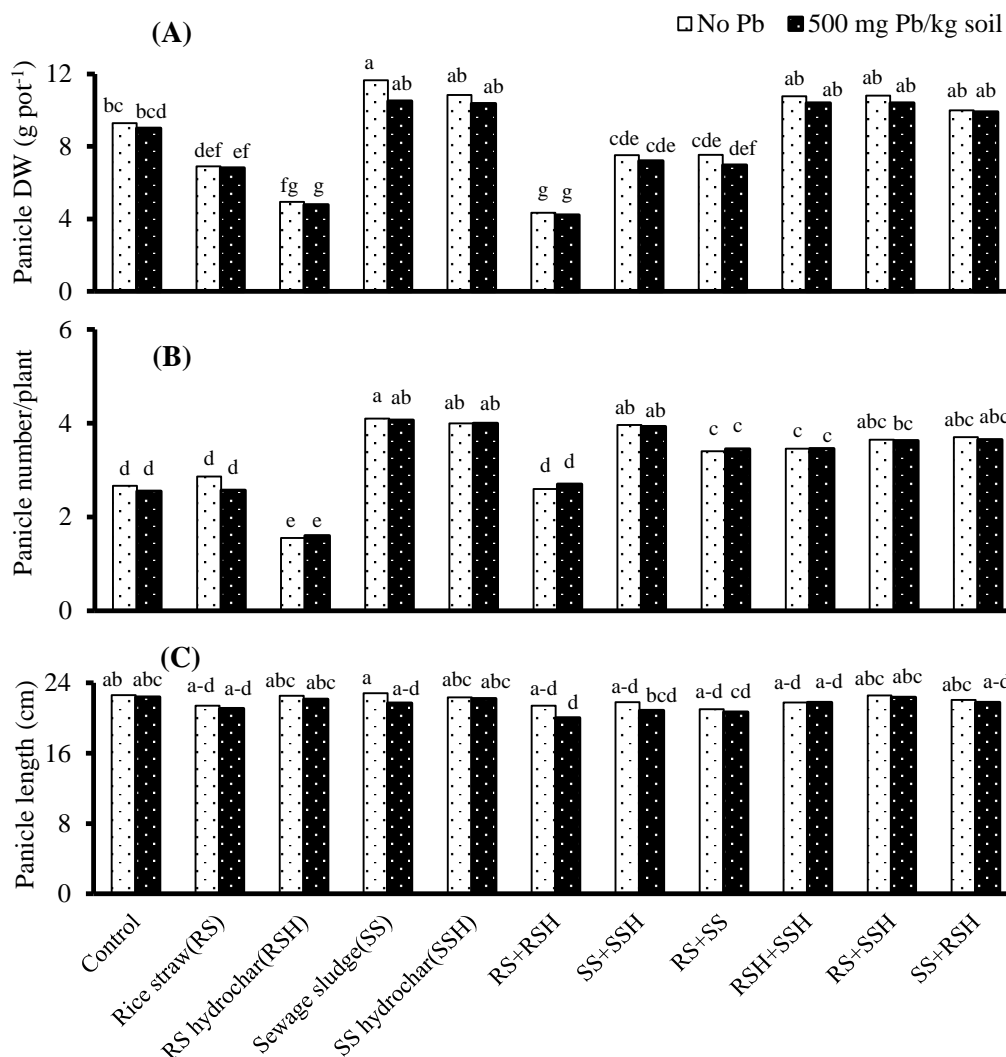
تعداد خوشه در بوته

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی در سطح احتمال یک درصد بر تعداد خوشه در بوته معنادار بود اما اثر اصلی سرب و اثر متقابل ماده آلی × سرب بر تعداد خوشه در بوته معنادار نبودند (جدول ۴). عدم تأثیر آلودگی سرب بر تعداد خوشه در تیمارهای مختلف (شکل ۳-B) حاکی از متحمل بودن برنج در برابر سمیت سرب است. (Khan et al. (2021) گزارش کردند که سمیت سرب سبب کاهش تعداد خوشه در بوته برنج شد. اگر در پژوهش ما از سطوح بالاتر سرب استفاده می شد، احتمالاً کاهش تعداد خوشه در بوته مشاهده می شد. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که استفاده از لجن فاضلاب، هیدروچار لجن فاضلاب، لجن فاضلاب + هیدروچار آن و تلفیق لجن فاضلاب و هیدروچار آن با کاه برنج و هیدروچار کاه برنج، تعداد خوشه در بوته را نسبت به شاهد به طور معنادار افزایش داد. بیشترین تعداد خوشه در بوته در تیمار لجن فاضلاب مشاهده شد (شکل ۳-B). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که مصرف هیدروچار لجن فاضلاب تعداد خوشه را در شرایط آلودگی سرب افزایش داد که حاکی از افزایش تحمل گیاه برنج در برابر سمیت سرب در حضور هیدروچار لجن فاضلاب بود. این نتایج با گزارش Chu et al. (2020) مطابقت داشت. آنان گزارش کردند که مصرف هیدروچار لجن فاضلاب، از طریق جذب سطحی آمونیم به وسیله گروه‌های عاملی کربوکسیل موجود در هیدروچار لجن فاضلاب، تصعید آمونیاک در خاک‌های غرقاب را کاهش و میزان نیتروژن موجود در خاک را افزایش داد. در نتیجه، کارایی مصرف نیتروژن و تعداد خوشه گیاه برنج را به طور معنادار افزایش داد. (Zhou et al. (2018) بیان کردند که استفاده از هیدروچار کاه گندم تصعید N_2O را در خاک‌های غرقاب کاهش داد. (Abdolmaleki et al. (2022) گزارش کردند که با مصرف لجن فاضلاب و هیدروچار آن و همچنین مصرف کود شیمیایی نیتروژن، تعداد خوشه برنج افزایش یافت. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تمام تیمارهای تلفیقی به استثنای کاه برنج + هیدروچار آن سبب افزایش تعداد خوشه برنج نسبت به شاهد شدند (شکل ۳-B) که این یک مزیت برای تیمارهای تلفیقی مذکور محسوب می شود. این اثر هم‌افزایی در تیمارهای تلفیقی با نتایج Zhang et al. (2020) مطابقت داشت.

مقایسه میانگین‌ها نشان داد استفاده از هیدروچار کاه برنج تعداد خوشه در بوته را نسبت به شاهد به طور معنادار کاهش داد و کم‌ترین تعداد خوشه در بوته در تیمار هیدروچار کاه برنج مشاهده شد (شکل ۳-B). (Liu et al. (2017) نشان دادند که هیدروچار حاصل از مواد لیگنوسلولزی مانند کاه برنج به دلیل دارا بودن نسبت کربن به نیتروژن بالاتر و سرعت تجزیه کمتر، برای ترسیب کربن در خاک مناسب‌تر است. در مقابل، هیدروچار کود دامی به دلیل وجود عنصرهای غذایی بیشتری، برای بهبود کیفیت خاک و افزایش حاصلخیزی آن مناسب‌تر می باشد. (Wilk et al. (2019) مشاهده کردند که وقتی مواد لیگنوسلولزی مانند کاه برنج با روش کربونیزه شدن گرم‌آبی به هیدروچار تبدیل می شوند، مقدار کربن موجود در هیدروچار به طور قابل توجهی افزایش می یابد. این افزایش کربن می تواند منجر به افزایش نسبت کربن به نیتروژن (C/N) شده و در نتیجه، رشد گیاه را کاهش دهد. سایر دلایل کاهش رشد گیاه در حضور هیدروچار کاه برنج پیش از این در بخش ماده خشک شاخساره بیان شده است. (Zheng et al. (2019) گزارش کردند که در فرایند تولید هیدروچار لجن فاضلاب، بخش عمده‌ای از پروتئین‌ها و پلی ساکاریدها تجزیه شده و وارد بخش مایع می شوند. در این بخش، واکنش‌های تراکم و پلیمری شدن منجر به تشکیل ترکیب‌های هیدروکربن جدیدی می شوند اما در مجموع، تغییرات قابل توجهی در مقدار کربن کلی هیدروچار لجن فاضلاب حاصل نمی شود. در مقابل، در فرایند تولید هیدروچار کاه برنج، ترکیب‌های قندی ساده‌ای که از تجزیه سلولز و همی سلولز به دست می آیند، بر اثر واکنش پلیمرزایی برای تبدیل شدن به هیدروکربن‌های با مقدار کربن بالاتر پتانسیل بیشتری دارند (Hu et al., 2019).

Huang et al. (2019) نشان دادند که استفاده از بیوچار باعث افزایش معنادار تعداد خوشه‌های گیاه برنج شد. (Oladele et al. (2019) بیان داشتند که استفاده از بیوچار به تنهایی ممکن است باعث کاهش عملکرد محصول شود. دلیل این نتیجه می تواند این باشد که گیاهان به سختی می توانند عنصرهای غذایی مانند نیتروژن و فسفر را از بیوچار جذب کنند ولی استفاده تلفیقی بیوچار و کود اوره تعداد خوشه‌های برنج را به طور معنادار افزایش داد که این اثر مثبت را می توان به دو عامل اصلی نسبت داد: ۱- تأمین مستقیم مواد غذایی مورد نیاز گیاه توسط کود و ۲- بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک که باعث افزایش جذب عنصرهای غذایی مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم توسط گیاه می شود. برخی از پژوهشگران به تأثیر زمان و طولانی بودن زمان تأثیر بیوچار بر رشد گیاهان اشاره داشتند و گزارش کردند که اثرهای مثبت بیوچار با گذشت زمان نمایان می شود (Gebremedhin et al., 2015; Yin et al., 2020). (Huang et al. (2019)

گزارش کردند که علت عدم تأثیر قطعی بیوپچار بر محصول برنج هنوز به طور کامل شناخته نشده است. مطالعات نشان می‌دهند که بیوپچار اغلب باعث افزایش رشد رویشی گیاه می‌شود، اما لزوماً منجر به افزایش محصول دانه نمی‌شود. پژوهشگران بر این باورند که تأثیر بیوپچار به میزان عنصرهای غذایی موجود در خاک ارتباط دارد. در خاک‌هایی که عنصر غذایی کمتری دارند، انتظار می‌رود که بیوپچار تأثیر بیشتری داشته باشد. همچنین، تأثیر طولانی‌مدت بیوپچار بر خاک و گیاه نیاز به بررسی بیشتری دارد (Wang et al. 2016). دلیل‌هایی که برای بیوپچار ذکر می‌شود، ممکن است در این پژوهش برای هیدروچار هم صدق کند.



شکل ۳. اثر متقابل ماده آلی × Pb بر ماده خشک خوشه (A)، تعداد خوشه (B) و طول خوشه (C) برنج.

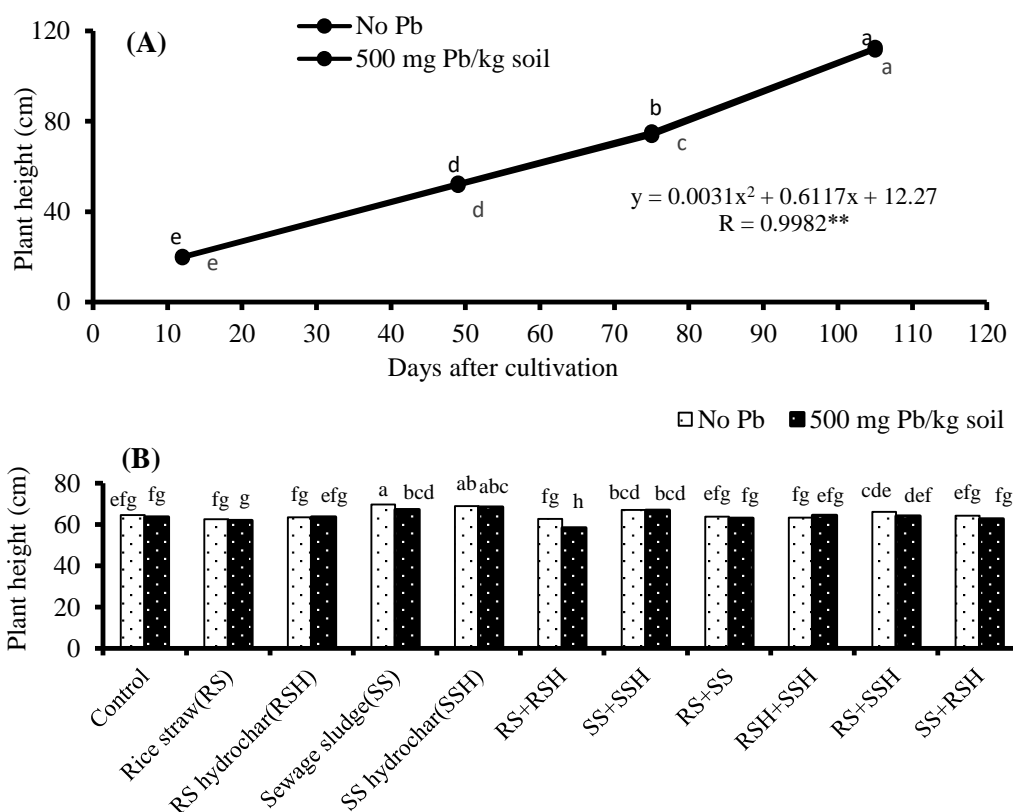
طول خوشه

از آنجایی که طول خوشه بیشتر می‌تواند تعداد دانه‌های بیشتری را فراهم کند، طول خوشه به‌عنوان یک ویژگی مهم در افزایش محصول محسوب می‌شود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرهای اصلی مواد آلی در سطح احتمال یک درصد و سرب در سطح احتمال پنج درصد بر طول خوشه برنج معنادار بودند اما اثر متقابل ماده آلی × سرب بر این صفت معنادار نبود (جدول ۴). کاهش طول خوشه برنج در شرایط آلودگی سرب (شکل ۳-۳) با نتایج Khan et al. (2021) مطابقت داشت. Jasmin et al. (2019) نشان دادند که آلودگی خاک به سرب با غلظت‌های مختلف (۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) باعث کاهش طول خوشه، ساقه و ریشه گیاه برنج شد. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که استفاده از لجن فاضلاب طول خوشه‌ها را نسبت به شاهد افزایش داد و بیشترین طول خوشه در تیمار لجن فاضلاب به‌دست آمد هر چند که از نظر آماری بین تیمارها تفاوت معناداری مشاهده نشد (شکل ۳-۳). Latare et al. (2014) گزارش کردند که مصرف ۴۰ تن در هکتار لجن فاضلاب، طول خوشه را نسبت به شاهد حدود ۷ درصد افزایش داد ولی از نظر آماری تفاوت معنادار با شاهد نداشت.

Jatav et al. (2022) بیان کردند که مصرف ۲۰ تا ۳۰ تن در هکتار لجن فاضلاب طول خوشه برنج را افزایش داد. بررسی ما نشان داد که مصرف کاه برنج و هیدروچار آن و تیمارهای تلفیقی بر طول خوشه تأثیری معنادار نداشتند (شکل ۳-C). سایر پژوهشگران نیز عدم تأثیر بیوچار بر طول خوشه گیاه برنج را گزارش کردند (Lai et al., 2017). با این حال، Ali et al. (2020) گزارش کردند که افزودن بیوچار و نیتروژن به خاک باعث افزایش قابل توجه طول خوشه شد. هر چند علت اثرهای مختلف بیوچار و نیتروژن به درستی مشخص نیست، اما به عقیده پژوهشگران می‌تواند مرتبط با زمان استفاده از بیوچار و منابع کود نیتروژن در گیاه برنج باشد (Yin et al., 2020).

ارتفاع بوته

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی و اثر اصلی سرب در سطح احتمال یک درصد بر ارتفاع گیاه معنادار بودند ولی اثر متقابل ماده آلی × سرب بر ارتفاع گیاه معنادار نبود (جدول ۴). همچنین، آلودگی سرب (سطح 500 mg/kg) نسبت به شاهد ارتفاع برگ‌ها را کاهش داد (شکل ۴). شکل ۴-A نشان می‌دهد که این کاهش در دو زمان اول و زمان آخر معنادار نبود اما در زمان سوم معنادار بود. دلیل این نتیجه می‌تواند این باشد با گذشت زمان، سرب در بافت‌های گیاهی تجمع می‌یابد و به تدریج به غلظت‌های سمی می‌رسد. این تجمع می‌تواند به اختلال در فرایندهای فیزیولوژیکی گیاه از جمله فتوسنتز، تنفس و تقسیم یاخته‌ای منجر شود و در نتیجه رشد گیاه را کاهش دهد. با این حال، ممکن است با افزایش ارتفاع گیاه، به دلیل اثر رقت، اثر سمیت سرب کاهش یابد. معنادار شدن اثر آلودگی سرب بر ارتفاع گیاه برنج با نتایج Ashraf et al. (2015)، Awan et al. (2015)، Khan et al. (2018)، Khan et al. (2018)، Hossain et al. (2015) مغایرت داشت. Liu et al. (2003) و Jasmin et al. (2021) و Ghouri et al. (2024) مطابقت و با نتایج Hossain et al. (2015) و Liu et al. (2003) و al. (2019) نشان دادند که سمیت سرب باعث کاهش ارتفاع بوته برنج شد. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که ارتفاع گیاه با افزایش سن گیاه در طول دوره رشد به طور معنادار افزایش یافت که نشانگر این است تیمارهای آزمایش سبب توقف رشد گیاه نشدند (شکل ۴-A).



شکل ۴. اثر متقابل زمان × Pb (A)، میانگین ۳۳ عدد، ۳ تکرار و ۱۱ سطح ماده آلی) و اثر متقابل ماده آلی × Pb (B)، میانگین ۱۲ عدد، ۳ تکرار و ۴ سطح زمان) بر ارتفاع گیاه برنج.

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در شرایط غیرآلوده به سرب، مصرف لجن فاضلاب، هیدروچار لجن فاضلاب و لجن فاضلاب + هیدروچار آن ارتفاع گیاه را نسبت به شاهد به طور معنادار افزایش داد و سایر تیمارها در شرایط بدون آلودگی سرب بر ارتفاع بوته اثر معناداری

نداشتند. بیشترین ارتفاع گیاه در تیمار لجن فاضلاب مشاهده شد (شکل ۴-B) که با نتایج (Shan et al. (2021) و Abdolmaleki et al. (2022) مطابقت و با نتایج Chu et al. (2020) مغایرت داشت. Chu et al. (2020) نشان دادند که استفاده از هیدروچار لجن فاضلاب ارتفاع گیاه برنج را نسبت به شاهد به طور معنادار کاهش داد. (Abdolmaleki et al. (2022) افزایش ارتفاع گیاه برنج در حضور لجن فاضلاب و هیدروچار آن را به فراهمی عناصر غذایی مورد نیاز گیاه و بهبود ویژگی‌های رشد نسبت دادند. با توجه به جدول‌های ۱ و ۲، غلظت نیتروژن در لجن فاضلاب و هیدروچار آن بیشتر از خود خاک بود. نیتروژن از طریق تولید و انتقال هورمون سیتوکینین از ریشه به اندام‌های هوایی، با افزایش سرعت تقسیم یاخته‌ها، موجب بهبود رشد رویشی گیاه شده و از این طریق موجب افزایش ارتفاع بوته و همچنین سرعت رشد محصول می‌گردد (Fageria & Santos, 2008). (Jahan et al. (2022) گزارش کردند که افزایش ارتفاع بوته در مقادیر بالای نیتروژن، به دلیل نقش نیتروژن در افزایش طول میانگره‌ها و بهبود فرآیند فتوسنتز و سوخت‌وساز است. Dastan et al. (2012) نیز نتایج مشابهی را گزارش کردند. (Verma et al. (2017) گزارش کردند که لجن فاضلاب، غنی از مواد آلی، نیتروژن، فسفر و روی بوده و می‌تواند جایگزین مناسبی برای استفاده از کودهای معدنی در محیط‌های کشت برنج باشد. این تفاوت در نتایج نشان می‌دهد که عوامل دیگری مانند سطح هیدروچار مصرفی نیز ممکن است بر این نتیجه تأثیرگذار باشند. (Mohammadnejad et al. (2015) گزارش کردند که مصرف کود دامی، لجن فاضلاب ارتفاع گیاه ذرت را نسبت به شاهد افزایش داد. (Lai et al. (2017) گزارش دادند که مصرف بیوچار کاه برنج بر ارتفاع گیاه برنج اثر معناداری نداشت در حالی که (Asmadi et al. (2023) گزارش کردند که مصرف هیدروچار کاه برنج ارتفاع گیاه اسفناج را کاهش داد.

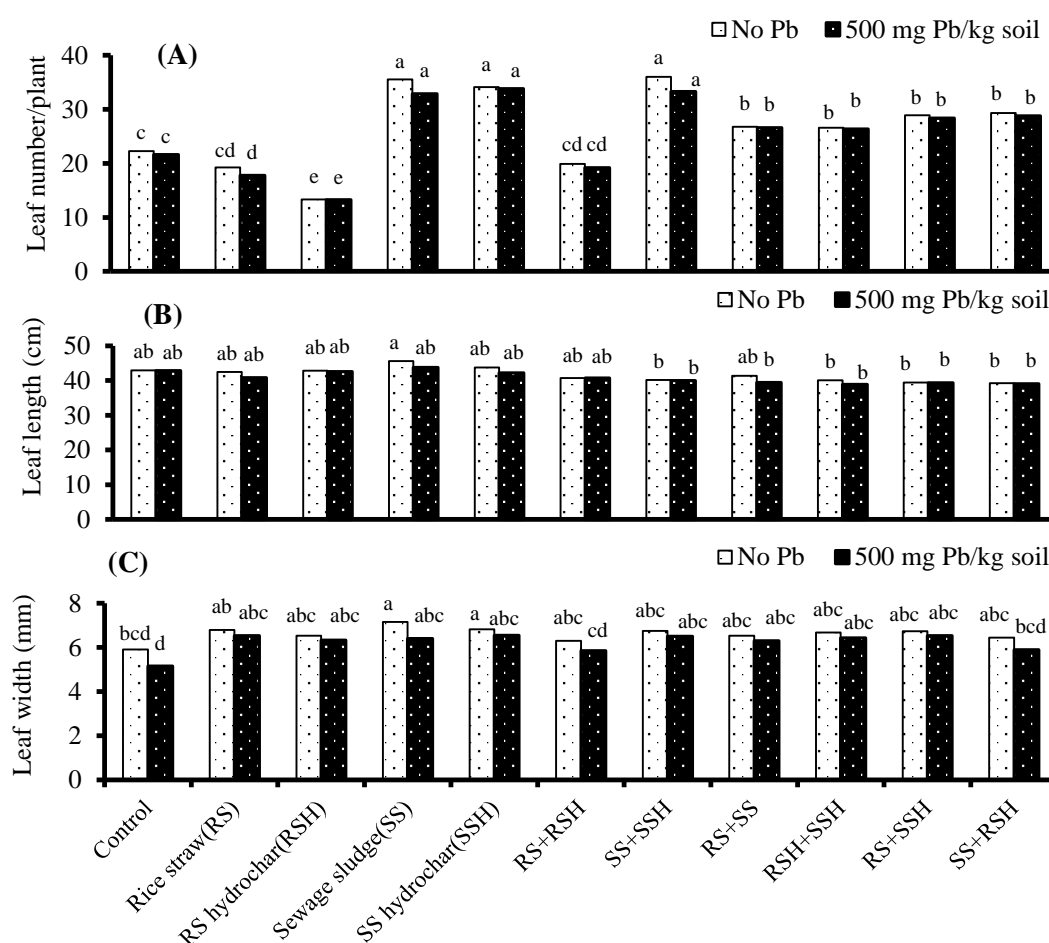
تعداد برگ در بوته

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی در سطح احتمال یک درصد و اثر اصلی سرب در سطح احتمال ۵ درصد بر تعداد برگ در بوته معنادار بودند اما اثر متقابل ماده آلی \times سرب معنادار نبود (جدول ۴). آلودگی سرب (سطح 500 mg/kg) تعداد برگ در بوته را نسبت به شاهد کاهش داد (شکل ۵-A) که با نتایج Chatterjee et al. (2004) در گیاه برنج و (Rahbari et al. (2019) در گیاه شوید مطابقت داشت. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که استفاده از لجن فاضلاب، هیدروچار لجن فاضلاب، لجن فاضلاب + هیدروچار آن و تلفیق این دو تیمار با کاه برنج و هیدروچار کاه برنج، تعداد برگ در بوته را نسبت به شاهد به طور معنادار افزایش دادند (شکل ۵-A) و بیشترین تعداد برگ در تیمارهای لجن فاضلاب، هیدروچار آن، لجن فاضلاب + هیدروچار آن مشاهده شد که با یافته‌های (Abbasi et al. (2013) و (Singh & Agrawal (2010) مطابقت داشت. علت افزایش تعداد برگ در حضور لجن فاضلاب به فراهمی بیشتر و سریع‌تر عنصرهای غذایی مورد نیاز گیاه در طول دوره رشد نسبت داده شده است (Abbasi et al., 2013). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که مصرف هیدروچار کاه برنج تعداد برگ در بوته را نسبت به شاهد به طور معنادار کاهش داد و کمترین تعداد برگ در بوته در تیمار هیدروچار کاه برنج مشاهده شد (شکل ۵-A) که با نتایج (Asmadi et al. (2023) مطابقت داشت. به نظر می‌رسد دلایل کاهش تعداد برگ در بوته در حضور هیدروچار کاه برنج همان‌هایی است که در بخش ماده خشک شاخساره پیش از این بحث شد. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تیمارهای تلفیقی تعداد برگ گیاه برنج را نسبت به شاهد افزایش دادند هر چند که در بعضی تیمارها این اثر معنادار نبود (شکل ۵-A).

طول و عرض برگ

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی بر طول و عرض برگ و اثر اصلی سرب بر عرض برگ در سطح احتمال یک درصد معنادار بودند اما اثر اصلی سرب بر طول برگ و اثر متقابل ماده آلی \times سرب بر طول و عرض برگ معنادار نبودند (جدول ۴). طول و عرض برگ شاخسی از سطح برگ هستند و هر چه برگ سطح بیشتری داشته باشد، فتوسنتز گیاه و تولید ماده خشک آن بیشتر خواهد بود (Marschner, 2012; Mohammadnejad et al., 2015). نتایج تجزیه واریانس نشان داد که سمیت سرب بر طول برگ برنج اثر معنادار نداشت ولی بر عرض برگ گیاه برنج اثر معنادار داشت و باعث کاهش عرض برگ شد. کاهش طول برگ گیاه برنج در شرایط تنش سمیت سرب به وسیله (Hossain et al. (2015) گزارش شده است. (Kulaz et al. (2021) کاهش شاخص سطح برگ را در گیاهان سویا هنگام قرار گرفتن در معرض سمیت سرب مشاهده کردند. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که مصرف لجن فاضلاب در هر دو شرایط با و بدون آلودگی سرب بر طول برگ نسبت به شاهد اثر معنادار نداشت؛ در حالی که استفاده از لجن فاضلاب عرض برگ را نسبت به شاهد به طور معنادار افزایش داد. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که هیچ یک از تیمارها نسبت به شاهد بر طول برگ اثر معناداری نداشتند. در مورد عرض برگ نیز فقط لجن فاضلاب و هیدروچار آن نسبت به شاهد، این صفت را افزایش دادند و سایر تیمارها اثر معناداری نداشتند (شکل

Urbianiak et al. (2017). (B و C-5). گزارش کردند که استفاده از لجن فاضلاب طول و مساحت برگ و تولید رنگدانه‌های فتوسنتزی را در درخت بید افزایش داد. Abdolmaleki et al. (2022) گزارش کردند که اثر مصرف لجن فاضلاب و هیدروچار آن بر طول و عرض برگ برنج به سطوح نیتروژن بستگی داشت؛ به طوری که در سطح ۲۵۰ میلی گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک، مصرف لجن فاضلاب و هیدروچار آن بر طول و عرض برگ اثر معنادار نداشت، اما در شرایط عدم مصرف نیتروژن مصرف لجن فاضلاب و هیدروچار آن، طول و عرض برگ را نسبت به شاهد افزایش داد. باتوجه به نقش نیتروژن در ساختمان دو هورمون رشد اکسین و سیتوکینین (Marschner, 2012)، شاید یک دلیل برای افزایش عرض برگ در حضور لجن فاضلاب به نیتروژن، روی و سایر عنصرهای غذایی موجود در لجن فاضلاب باشد. بهبود تغذیه روی گیاه با مصرف کودهای آلی می‌تواند غلظت هورمون رشد اکسین در گیاه را افزایش دهد (Havlin et al., 2017).



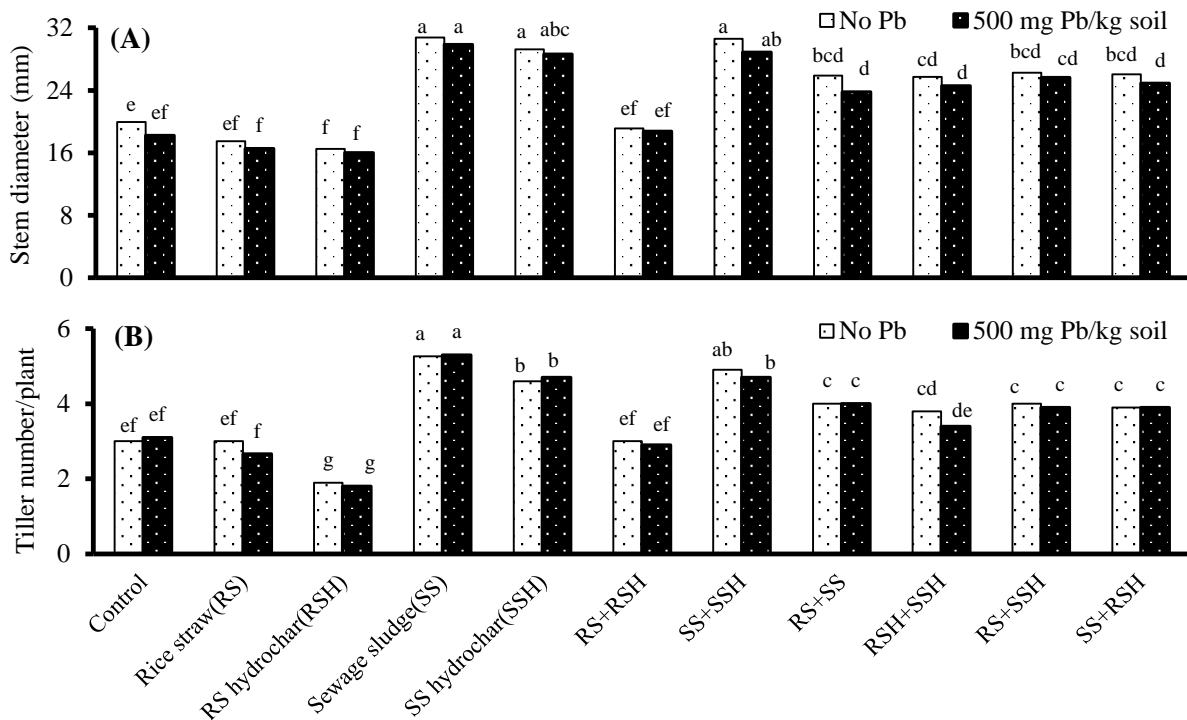
شکل ۵. اثر متقابل ماده آلی × Pb بر تعداد برگ (A)، طول برگ (B) و عرض برگ (C) برنج.

قطر ساقه در محل طوقه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی در سطح احتمال ۱ درصد و اثر اصلی سرب در سطح احتمال ۵ درصد بر قطر ساقه در محل طوقه معنادار بود ولی اثر متقابل ماده آلی × سرب بر قطر ساقه معنادار نبود (جدول ۴). آلودگی سرب (سطح 500 mg/kg) نسبت به شاهد، قطر ساقه در محل طوقه گیاه برنج را کاهش داد (شکل ۶-A) که با نتایج Kabata-Pendias & Pendias (2001) مطابقت داشت. کاهش قطر ساقه در محل طوقه بر اثر سمیت سرب را به مختل شدن فرایندهای زیستی مختلف مانند فتوسنتز، رشد و تقسیم یاخته‌ها و تخریب کلروفیل نسبت داده‌اند (Kabata-Pendias & Pendias, 2001). مقاومت در برابر خوابیدگی یک ویژگی مهم برای دستیابی به عملکرد بالای دانه برنج است (Khush, 1997) و با افزایش قطر ساقه، این مقاومت بیشتر می‌شود. Dzhmirze et al. (2021) گزارش کردند که بین مقاومت ساقه برنج در برابر خم شدن و قطر میان‌گره پایین همبستگی مثبت و معناداری وجود داشت. این رابطه بر تولید محصول و مقاومت در برابر خوابیدگی برنج تأثیرگذار بود. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که استفاده از لجن فاضلاب و هیدروچار

آن، لجن فاضلاب + هیدروچار آن و تلفیق لجن فاضلاب و هیدروچار آن با کاه برنج و هیدروچار آن، قطر ساقه برنج را نسبت به شاهد در شرایط با و بدون آلودگی سرب به طور معنادار افزایش داد (شکل ۶- A). پس از مصرف لجن فاضلاب افزایش قطر ساقه در محل طوقه آفتابگردان به وسیله Najafi & Mardomi (2012)، در گیاه برنج به وسیله Abdolmaleki et al. (2022) و Abbasi et al. (2013) و در گیاه ذرت به وسیله Mohammadnejad et al. (2015) نیز گزارش شده است. افزایش قطر ساقه در حضور لجن فاضلاب و هیدروچار آن را می توان به حضور عنصرهای غذایی مختلف در این ترکیبها نسبت داد (جدول ۲) که سبب بهبود تغذیه گیاه برنج به ویژه از نظر نیتروژن می شود. Abdolmaleki et al. (2022) گزارش کردند که کاربرد لجن فاضلاب و هیدروچار آن باعث افزایش قطر ساقه و سایر ویژگی های رشد گیاه برنج شد.

مقایسه میانگینها نشان داد که مصرف کاه برنج بر قطر ساقه اثر معنادار نداشت اما استفاده از هیدروچار کاه برنج در شرایط بدون آلودگی سرب، قطر ساقه برنج را نسبت به شاهد به طور معناداری کاهش داد (شکل ۶- A) که با نتایج Belda et al. (2016) مطابقت و با نتایج Yang et al. (2004) مغایرت داشت. واکنش گیاهان به تیمار هیدروچار بسته به مواد اولیه مورد استفاده برای ساخت هیدروچار، فرایند تولید هیدروچار و گونه گیاهی، متفاوت است و اثرهای سمی هیدروچار لزوماً در همه موارد رخ نمی دهد (Reza et al., 2014). چون در پژوهش حاضر، بخش جامد هیدروچار بعد از جداسازی از بخش مایع، با آب شسته نشد، ممکن است غلظت بالای مواد سمی تولید شده در هنگام کربونیزه شدن گرم آبی گیاه را مسموم کرده و قطر ساقه برنج را کاهش داده است. Yang et al. (2004) گزارش کردند که مصرف تلفیقی کودهای شیمیایی و کاه برنج باعث افزایش معنادار قطر ساقه گیاه برنج و در نتیجه کاهش ارتفاع ساقه برنج شد که تمام این عاملها باعث افزایش مقاومت ساقه به ورس می شود. با توجه به پتاسیم و سیلیسیم موجود در کاه برنج، آنان دلیل افزایش قطر ساقه و در نتیجه مقاومت به ورس را افزایش غلظت پتاسیم و سیلیسیم ساقه برنج دانستند. Marschner (2012) بیان داشت که در خاکهای غرقاب بر اثر تجزیه مواد آلی به وسیله ریزجانداران خاک به ویژه پس از افزودن بقایای گیاهی، ترکیبهای فنولی و اسیدهای چرب تصعید شونده انباشته می شوند و بر سوخت و ساز ریشه و رشد آن اثر مضر دارند. کاهش رشد ریشه های جانبی بر اثر این مواد سمی باعث کاهش رشد بخش هوایی و در نتیجه کاهش قطر ساقه می شود. مقایسه میانگینها نشان داد که تلفیق هیدروچار کاه برنج با لجن فاضلاب و هیدروچار آن سبب تعدیل اثرهای منفی هیدروچار کاه برنج بر قطر ساقه گیاه برنج شد (شکل ۶- A).



شکل ۶. اثر متقابل ماده آلی × Pb بر قطر ساقه در محل طوقه (A) و تعداد پنجه (B) گیاه برنج.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ماده آلی در سطح احتمال یک درصد بر تعداد پنجه در بوته معنادار بود اما اثر اصلی سرب و اثر متقابل ماده آلی \times سرب معنادار نبودند (جدول ۴). اثر غیرمعنادار سمیت سرب بر تعداد پنجه در بوته برنج با نتایج سایر پژوهشگران مغایرت داشت (Sharma & Duby, 2005; Chatterjee et al., 2013; Ashraf et al., 2017; Ashraf & Tang, 2017) به نظر می‌رسد به دلیل کمتر بودن سطح سرب در خاک از آستانه سمیت سرب برای برنج می‌باشد. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که استفاده از لجن فاضلاب و هیدروچار آن، لجن فاضلاب + هیدروچار آن و تلفیق لجن فاضلاب و هیدروچار آن با کاه برنج و هیدروچار آن، تعداد پنجه را نسبت به شاهد به طور معنادار افزایش داد. بیشترین تعداد پنجه در بوته با مصرف لجن فاضلاب در هر دو شرایط با و بدون آلودگی سرب مشاهده شد هر چند که با تیمار تلفیقی لجن فاضلاب + هیدروچار آن تفاوت معناداری نداشت (شکل ۶-B). این نتیجه با گزارش‌های سایر پژوهشگران مطابقت داشت (Abdolmaleki et al., 2022; Khan et al., 2013; Abbasi et al., 2013) که می‌تواند به بهبود فراهمی عنصرهای غذایی و رشد گیاه در حضور لجن فاضلاب و هیدروچار آن (جدول‌های ۱ و ۲) مربوط باشد. باتوجه به بهبود فراهمی نیتروژن در حضور لجن فاضلاب و هیدروچار آن، بهبود تغذیه نیتروژن گیاه برنج در مرحله پنجه‌زنی سبب افزایش شدت فتوسنتز، افزایش سطح برگ و بهبود رشد برنج می‌شود (Kheyri et al., 2018; Kheyri et al., 2018; Ali et al., 2020; Jahan et al., 2022). بیشترین تعداد پنجه در بوته برنج را در تیمار نیتروژن + کمپوست + ورمی کمپوست مشاهده کردند. Bengtsson et al. (2003) گزارش دادند که با تبدیل لجن فاضلاب به هیدروچار، میکروکروبی‌های خطرناک آن از بین رفته و استفاده از آن شاخص‌های فیزیولوژیک گیاه برنج را نسبت به شاهد بهبود داد. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تیمار هیدروچار کاه برنج تعداد پنجه در بوته را نسبت به شاهد به طور معنادار کاهش داد و کم‌ترین تعداد پنجه در بوته در تیمار هیدروچار کاه برنج در هر دو شرایط با و بدون آلودگی سرب در خاک مشاهده شد (شکل ۶-B). کاهش تعداد پنجه در بوته در تیمار هیدروچار کاه برنج در این پژوهش را می‌توان به ترکیب‌های سمی مانند ترکیب‌های فنولی و اسیدهای چرب فرار (مثل اسید استیک) تولید شده در فرایند کربونیزه شدن گرم‌آبی نسبت داد که باعث کاهش رشد ریشه و به دنبال آن کاهش ماده خشک شاخساره و کاهش تعداد پنجه در بوته شد (Bargmann et al., 2013; Busch et al., 2013; Kern et al., 2021). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تلفیق هیدروچار کاه برنج با کاه برنج، لجن فاضلاب و هیدروچار آن سبب تعدیل اثرهای منفی هیدروچار کاه برنج بر قطر ساقه گیاه برنج شد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که آلودگی خاک به سرب بر شاخص کلروفیل برگ، ماده خشک خوشه، طول خوشه، ارتفاع گیاه، تعداد برگ، عرض برگ و قطر ساقه گیاه مورد مطالعه تأثیر منفی داشت. همچنین، استفاده از لجن فاضلاب و هیدروچار آن باعث افزایش شاخص کلروفیل برگ و بهبود سایر صفات زراعی گیاه شد. این نتیجه نشانگر افزایش فعالیت فتوسنتزی و بهبود رشد گیاه به دلیل تأمین عنصرهای ضروری پس از مصرف لجن فاضلاب و هیدروچار آن می‌باشد. ماده خشک شاخساره در حضور هیدروچار لجن فاضلاب نیز افزایش قابل توجهی داشت و به دلیل نقش هیدروچار در کاهش فلزهای سنگین و آلودگی توصیه می‌شود به عنوان یک کود آلی مورد استفاده قرار گیرد. در مقابل، هیدروچار کاه برنج بر برخی ویژگی‌ها مانند ماده خشک شاخساره، ریشه و طول برگ اثرهای منفی داشت. کاه برنج بر برخی صفات مانند ماده خشک خوشه و تعداد برگ اثر منفی داشت اما بر سایر صفات مورد مطالعه اثر معنادار نداشت. با این حال، تلفیق لجن فاضلاب و هیدروچار آن با کاه برنج و هیدروچار آن اثرهای منفی کاه برنج و هیدروچار آن را کاهش داد. چون در این مطالعه بخش جامد هیدروچار شسته نشد، پیشنهاد می‌شود هیدروچار کاه برنج ابتدا با آب شسته شود و سپس اثر آن بر صفات زراعی گیاه برنج مطالعه شود. انتظار این است که با این کار اثرهای منفی هیدروچار به دلیل کاهش غلظت مواد سمی آن، کم شود. این مطالعه در شرایط گلخانه‌ای انجام شد و ممکن است نتایج آن در شرایط مزرعه‌ای متفاوت باشد. بنابراین، انجام این پژوهش در شرایط مزرعه‌ای در یک خاک آلوده به سرب توصیه می‌شود. همچنین، در این مطالعه فقط از یک نوع خاک و یک رقم برنج استفاده شد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های بعدی در خاک‌های مختلف و چند رقم رایج برنج در ایران انجام شود.

منابع

احمدی‌نژاد، راشد، نجفی، نصرت اله، علی‌اصغرزاد، ناصر، و اوستان، شاهین. (۱۳۹۲). اثر کودهای آلی و نیتروژن بر کارایی مصرف آب، عملکرد و ویژگی‌های رشد گندم (رقم الوند). *دانش آب و خاک*، ۲۳(۲): ۱۹۷-۱۷۷.

افضلی نژاد، فاطمه، قاسمی، سمیه، سیفتی، ابراهیم، و شهبازی، شیما. (۱۳۹۹). تأثیر لجن فاضلاب بر رشد و برخی عناصر غذایی سه ژنوتیپ کینوا در یک خاک آهکی و شور. *علوم آب و خاک*، (۴)۳۴، ۱۳۹-۱۲۷.

خیری، نوراله، نیک‌نژاد، یوسف، و عباسعلی‌پور، مریم. (۱۳۹۷). اثر کاربرد کودهای آلی و بیولوژیک با کاهش کود نیتروژن بر عملکرد کیفی و کمی برنج. *اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی*، (۱۲)۴۷، ۴۴۵-۴۶۰.

عباسی، معصومه، نجفی نصرت‌اله، علی‌اصغرزاد ناصر، و اوستان شاهین. (۱۳۹۲). اثر شرایط آب خاک و مصرف لجن فاضلاب، کود مرغی و کودهای شیمیایی بر ویژگی‌های رشد و کارایی مصرف آب گیاه برنج در یک خاک آهکی. *دانش آب و خاک*، (۱)۳۳، ۱۸۹-۲۰۸.

عبدالمملکی، الناز، نجفی، نصرت‌اله، و ریحانی‌تبار، عادل. (۱۴۰۰). اثر هیدروچار لجن فاضلاب و نیتروژن بر ویژگی‌های رشد گیاه برنج در یک خاک آلوده به مس در شرایط گلخانه‌ای. *دانش آب و خاک*، (۴)۳۱، ۵۳-۳۹.

عظیم‌زاده، یاسر، نجفی، نصرت‌اله، ریحانی‌تبار، عادل، و اوستان، شاهین. (۱۳۹۷). بررسی ویژگی‌های بخش مایع و جامد هیدروچارهای تولید شده از ضایعات چوب سیب در دما و زمان‌های مختلف کربونیزه‌شدن گرم‌آبی. *پژوهش‌های خاک*، (۴)۳۲، ۴۹۳-۵۱۰.

عظیم‌زاده، یاسر، نجفی، نصرت‌اله، عبدالمملکی، الناز، و امیرلو، بهناز. (۱۳۹۸). تغییرات برخی ویژگی‌های شیمیایی مواد آلی مختلف پس از تبدیل به بیوچار و هیدروچار. *تحقیقات کاربردی خاک*، (۴)۷، ۱۷-۱.

کاظم علیلو، سولماز، نجفی، نصرت‌اله، ریحانی‌تبار، عادل، و غفاری، مهدی. (۱۳۹۶). اثر مصرف تلفیقی کود فسفر و لجن فاضلاب بر شاخص کلروفیل و برخی ویژگی‌های رشد آفتابگردان در شرایط تنش کم‌آبی. *مدیریت خاک و تولید پایدار*، (۴)۷، ۱۸-۱.

محمدنژاد، آرش، نجفی، نصرت‌اله، و نیشابوری، محمدرضا. (۱۳۹۴). تأثیر سه نوع کود آلی بر ویژگی‌های رشد و کارایی مصرف آب ذرت در سطوح مختلف فشردگی خاک. *مدیریت خاک و تولید پایدار*، (۲)۵، ۴۷-۲۵.

محمودی، شهاب، نجفی، نصرت‌اله، و ریحانی‌تبار، عادل. (۱۳۹۴). اثر رطوبت خاک و کاربرد کمپوست لجن فاضلاب بر برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک و غلظت عناصر پرمصرف علوفه یونجه در شرایط گلخانه‌ای. *علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای (روابط خاک و گیاه)*، (۲۲)۶، ۵۵-۳۷.

مردمی، سنیه، نجفی، نصرت‌اله، ریحانی‌تبار، عادل، و دهقان، غلامرضا. (۱۳۹۸a). تأثیر فسفر بر غلظت سرب و روی در ریشه برنج و تشکیل کانی‌های حاوی آن‌ها در یک خاک آهکی آلوده. *دانش آب و خاک*، (۴)۲۹، ۵۶-۴۳.

مردمی، سنیه، نجفی، نصرت‌اله، ریحانی‌تبار، عادل، و دهقان، غلامرضا. (۱۳۹۸b). تأثیر فسفر و آلودگی سرب و روی بر سینتیک استخراج فسفر، سرب و روی قابل جذب از یک خاک آهکی در شرایط غرقاب. *دانش آب و خاک*، (۲)۲۹، ۴۲-۲۹.

نجفی، نصرت‌اله، و توفیقی، حسن. (۱۳۹۱). اثر رایزوسفر گیاه برنج بر شکل‌های فسفر معدنی در خاک‌های شالیزار شمال ایران: پس از کاربرد کود فسفر. *تحقیقات آب و خاک ایران*، (۳)۴۳، ۲۴۲-۲۳۱.

نجفی، نصرت‌اله، و مردمی، سنیه. (۱۳۹۰). اثر غرقاب، لجن فاضلاب و کود دامی بر ویژگی‌های رشد گیاه آفتابگردان در یک خاک شن لومی. *آب و خاک*، (۶)۲۵، ۱۲۷۶-۱۲۶۴.

References

- Abbasi, M., Najafi, N., Aliasgharzad, N., & Oustan, S. (2013). Effects of soil water conditions, sewage sludge, poultry manure and chemical fertilizers on the growth characteristics and water use efficiency of rice plant in a calcareous soil. *Water and Soil Science*, 23(1), 189–208. (In Persian with English abstract)
- Abdolmaleki, E., Najafi, N., & Reyhanitabar, A. (2022). Effects of sewage sludge-derived hydrochar and nitrogen on growth characteristics of rice in a Cu-spiked soil under greenhouse conditions. *Water and Soil Science*, 31(4), 39–53. (In Persian with English abstract)
- Afyuni, M., Rezaeinejad, Y., & Schulin, R. (2006). Extractability and plant uptake of Cu, Zn, Pb and Cd from a sludge-amended haplargid in central Iran. *Arid Land Research and Management*, 20(1), 29–41.
- Afzalinejad, F., Ghasemi, S., Seyfati, S. E., & Shahbazi, S. (2021). The Effect of sewage sludge on the growth and some nutrient elements of three Quinoa genotypes in a calcareous and saline soil. *Journal of Water and Soil Science*, 24(4), 127–139. (In Persian with English abstract)
- Ahmadinejad, R., Najafi, N., Aliasgharzad, N., & Oustan, S. (2013). Effects of organic and nitrogen fertilizers on water use efficiency, yield and the growth characteristics of wheat. *Water and Soil Science*, 23(2), 177–197. (In Persian with English abstract)
- Ali, I., He, L., Ullah, S., Quan, Z., Wei, S., Iqbal, A., & Ligeng, J. (2020). Biochar addition coupled with nitrogen fertilization impacts on soil quality, crop productivity, and nitrogen uptake under double-cropping system. *Food and Energy Security*, 9(3), 1–20.
- Allison, L.E., & Moodie, C.D. (1965). Carbonates. In: *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Monograph No. 9, Soil Science Society of America, Madison, WI, USA. Pp.

1379-1396.

- Amanifar, S., Aliasgharzad, N., Najafi, N., Esteki, M., Oustan, S., & Bolandnazar, S. (2019). Evaluation of the effects of mycorrhizal inoculation on Pb uptake and growth of alfalfa in Pb-contaminated soil. *Iran Agricultural Research*, 38(1), 1–6.
- Amendola, C., Montagnoli, A., Terzaghi, M., Trupiano, D., Oliva, F., Baronti, S., & Scippa, G. S. (2017). Short-term effects of biochar on grapevine fine root dynamics and arbuscular mycorrhizae production. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 239, 236–245.
- Anonymous. (2023). Statistics of Agricultural Crops Production in Iran, Year 2022. Statistics, Information and Communication Technology Center, Ministry of Agriculture Jihad, Tehran, Iran. (In Persian with English abstract)
- Antolin, M. C., Muro, I., & Sanchez-Diaz, M. (2010). Application of sewage sludge improves growth, photosynthesis and antioxidant activities of nodulated alfalfa plants under drought conditions. *Environmental and Experimental Botany*, 68(1), 75–82.
- Antolin, M. C., Pascual, I., Garcia, C., Polo, A., & Sanchez-Diaz, M. (2005). Growth, yield and solute content of barley in soils treated with sewage sludge under semiarid Mediterranean conditions. *Field Crops Research*, 94(2-3), 224–237.
- Asagi, N., Ueno, H., & Ebid, A. (2007). Effects of sewage sludge application on rice growth, soil properties, and N fate in low fertile paddy soil. *International Journal of Soil Science*, 2, 171–181.
- Asgari Lajayer, B., Najafi, N., Moghiseh, E., Mosafieri, M., & Hadian, J. (2019). Effects of gamma irradiated and non-irradiated sewage sludge on growth characteristics, leaf chlorophyll index, and macronutrients concentrations in basil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19, 580–591.
- Ashraf, U., & Tang, X. (2017). Yield and quality responses, plant metabolism and metal distribution pattern in aromatic rice under lead (Pb) toxicity. *Chemosphere*, 176, 141–155.
- Ashraf, U., Kanu, A.S., Deng, Q., Mo, Z., Pan, S., Tian, H., & Tang, X. (2017). Lead (Pb) toxicity, physio-biochemical mechanisms, grain yield, quality, and Pb distribution proportions in scented rice. *Frontiers in Plant Science*, 8, 259–276.
- Ashraf, U., Kanu, A.S., Mo, Z., Hussain, S., Anjum, S.A., Khan, I., & Tang, X. (2015). Lead toxicity in rice: Effects, mechanisms, and mitigation strategies—a mini review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 18318–18332.
- Asmadi, A.A., Tamunaidu, P., Masafumi, G., & Motoo, U. (2023). Effects of rice husk and rice straw hydrochar as soil amendment. *Chemical Engineering Transactions*, 106, 1225–1230.
- Awan, S., Jabeen, M., Imran, Q.M., Ullah, F., Mehmood, Z., Jahngir, M., & Jamil, M. (2015). Effects of lead toxicity on plant growth and biochemical attributes of different rice (*Oryza sativa* L.) varieties. *Journal of Bio-Molecular Sciences*, 3(1), 44–55.
- Azimzadeh Y., Najafi N., Abdolmaleki E., & Amirloo B. (2020). Changes in some chemical properties of various organic materials after converting in biochar and hydrochar. *Applied Soil Research*, 7(4), 1–17. (In Persian with English abstract)
- Azimzadeh Y., Najafi N., Reyhanitabar A., & Oustan S. 2019. Investigation of properties of liquid and solid fractions of hydrochars produced from apple wood wastes at different temperatures and times of hydrothermal carbonization. *Iranian Journal of Soil Research*, 32(4), 493–510. (In Persian with English abstract)
- Azimzadeh, Y., Najafi, N., Reyhanitabar, A., Oustan, S., & Khataee, A. (2021). Effects of phosphate loaded LDH-biochar/hydrochar on maize dry matter and P uptake in a calcareous soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 67(12), 1649–1664.
- Bargmann, I., Martens, R., Rillig, M.C., Kruse, A., & Kucke, M. (2014a). Hydrochar amendment promotes microbial immobilization of mineral nitrogen. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(1), 59–67.
- Bargmann, I., Rillig, M.C., Buss, W., Kruse, A., & Kuecke, M. (2013). Hydrochar and biochar effects on germination of spring barley. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 199(5), 360–373.
- Belda, R.M., Lidon, A., & Fornes, F. (2016). Biochars and hydrochars as substrate constituents for soilless growth of myrtle and mastic. *Industrial Crops and Products*, 94, 132–142.
- Bengtsson, G., Bengtson, P., & Mansson, K.F. (2003). Gross nitrogen mineralization, immobilization and nitrification rates as a function of soil C/N ratio and microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 35(1), 143–154.
- Busch, D., Stark, A., Kammann, C.I., & Glaser, B. (2013). Genotoxic and phytotoxic risk assessment of fresh and treated hydrochar from hydrothermal carbonization compared to biochar from



- pyrolysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 97, 59–66.
- Cao, M., Zhu, W., Hong, L., Wang, W., Yao, Y., Zhu, F., & He, S. (2022). Assessing Pb-Cr pollution thresholds for ecological risk and potential health risk in selected several kinds of rice. *Toxics*, 10(11), 645.
- Cavali, M., Junior, N.L., De Sena, J.D., Woiciechowski, A.L., Soccol, C.R., Belli Filho, P., & De castilhos junior, A.B. (2023). A review on hydrothermal carbonization of potential biomass wastes, characterization and environmental applications of hydrochar, and biorefinery perspectives of the process. *Science of the Total Environment*, 857, 159627.
- Chatterjee, C., Dube, B.K., Sinha, P., & Srivastava, P. (2004). Detrimental effects of lead phytotoxicity on growth, yield, and metabolism of rice. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35(1-2), 255–265.
- Chu, Q., Xue, L., Singh, B.P., Yu, S., Muller, K., Wang, H., & Yang, L. (2020). Sewage sludge-derived hydrochar that inhibits ammonia volatilization, improves soil nitrogen retention and rice nitrogen utilization. *Chemosphere*, 245, 125558.
- Dabral, S., Varma, A., Choudhary, D.K., Bahuguna, R.N., & Nath, M. (2019). Biopriming with piriformospora indica ameliorates cadmium stress in rice by lowering oxidative stress and cell death in root cells. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 186, 109741.
- Dastan, S., Morteza, S., Dariush, Z., Abbas, G.M., Reza, Y., Ehsan, G.D., & Reza, N.A. (2012). Application of nitrogen and silicon rates on morphological and chemical lodging related characteristics in rice (*Oryza sativa* L.) at North of Iran. *Journal of Agricultural Science*, 4(6), 12–18.
- De Jager, M., & Giani, L. (2021). An investigation of the effects of hydrochar application rate on soil amelioration and plant growth in three diverse soils. *Biochar*, 3(3), 349–365.
- Dzhamirze, R.R., Ostapenko, N.N., & Chinchenko, N.N. (2021). Lodging resistance of modern domestic rice varieties. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, Bristol, UK. 677(5), 052097
- Ebrahim, E.M., El-Bebany, A.F., Alrumman, S.A., Hesham, A.E.L., Taher, M.A., & Fawy, K.F. (2017). Effects of different sewage sludge applications on heavy metal accumulation, growth and yield of spinach (*Spinacia oleracea* L.). *International Journal of Phytoremediation*, 19(4), 340–347.
- Fageria, N.K., & Santos, A.B. (2008). Yield physiology of dry bean. *Journal of Plant Nutrition*. 31, 983–1004
- Fakhri, Y., Bjorklund, G., Bandpei, A.M., Chirumbolo, S., Keramati, H., Pouya, R.H., & Ghasemi, S.M. (2018). Concentrations of arsenic and lead in rice (*Oryza sativa* L.) in Iran: A systematic review and carcinogenic risk assessment. *Food and Chemical Toxicology*, 113, 267–277.
- Fang, J., Gao, B., Chen, J., & Zimmerman, A.R. (2015). Hydrochars derived from plant biomass under various conditions: Characterization and potential applications and impacts. *Chemical Engineering Journal*, 267, 253–259.
- Farru, G., Dang, C.H., Schultze, M., Kern, J., Cappai, G., & Libra, J.A. (2022). Benefits and limitations of using hydrochars from organic residues as replacement for peat on growing media. *Horticulturae*, 8(4), 325.
- Gebremedhin, G.H., Bereket, H., Daniel, B., & Tesfaye, B. (2015). Effect of biochar on yield and yield components of wheat and post-harvest soil properties in Tigray, Ethiopia. *Journal of Fertilizers & Pesticides*, 6(2), 2–5.
- Gee, G.W. & Or, D. (2002). Particle size analysis. In: *Methods of soil analysis*. Part 4. *Physical methods*. SSSA Book Series No. 5, Soil Science Society of America, Madison, WI, USA. Pp. 201–214.
- Gholizadeh, A., Saberi, M., Boruvka, L., Wayayok, A., Amin, M., & Soom, M. (2017). Leaf chlorophyll and nitrogen dynamics and their relationship to lowland rice yield for site-specific paddy management. *Information Processing in Agriculture*, 4(4), 259–268.
- Ghourfi, F., Shahid, M.J., Zhong, M., Zia, M.A., Alomrani, S.O., Liu, J., & Shahid, M.Q. (2024). Alleviated lead toxicity in rice plant by co-augmented action of genome doubling and TiO₂ nanoparticles on gene expression, cytological and physiological changes. *Science of The Total Environment*, 911, 168709.
- Gronwald, M., Vos, C., Helfrich, M., & Don, A. (2016). Stability of pyrochar and hydrochar in agricultural soil-A new field incubation method. *Geoderma*, 284, 85-92.
- Gu, X., Sun, J. and Evans, L.J. (2014). The development of a multi-surface soil speciation model for Cd (II) and Pb (II): Comparison of two approaches for metal adsorption to clay fractions. *Applied Geochemistry*, 47, 99–108.
- Havlin, J.L., Beaton, J.D., Tisdale, S.L., & Nelson, W.L. (2017). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management*. Eighth Edition, Pearson India Education Services, Tamil Nadu, India.

- Hazelton, P., & Murphy, B. (2007). *Interpreting soil test results: What do all the numbers mean?* CSIRO Publishing, Australia.
- Hossain, M.T., Soga, K., Wakabayashi, K., & Hoson, T. (2015). Effects of lead toxicity on growth and cell wall extensibility in rice seedlings. *Bangladesh Journal of Botany*, 44(2), 333–336.
- Hu, B., Wang, K., Wu, L., Yu, S.H., Antonietti, M., & Titirici, M.M. (2010). Engineering carbon materials from the hydrothermal carbonization process of biomass. *Advanced Materials*, 22(7), 813–828.
- Hu, X., Nango, K., Bao, L., Li, T., Hasan, M.M., & Li, C.Z. (2019). High yields of solid carbonaceous materials from biomass. *Green Chemistry*, 21(5), 1128–1140.
- Huang, M., Long, F.A.N., Jiang, L.G., Yang, S.Y., Zou, Y.B., & Uphoff, N. (2019). Continuous applications of biochar to rice: Effects on grain yield and yield attributes. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(3), 563–570.
- Jahan, A., Islam, A., Sarkar, M.I.U., Iqbal, M., Ahmed, M.N., & Islam, M.R. (2022). Nitrogen response of two high yielding rice varieties as influenced by nitrogen levels and growing seasons. *Geology, Ecology and Landscapes*, 6(1), 24–31.
- Jasmin, P., Prian, W. Z., Mondol, M. N., Ullah, S. M., & Chamon, A. S. (2019). Effects of lead on growth, yield and mineral nutrition of rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Biodiversity Conservation and Bioresource Management*, 5(2), 83–92.
- Jatav, S., Singh, S., Kumar, S., Parihar, M., Patra, A., Rana, K., & Jatav, H. (2022). Effect of direct and residual sewage-sludge application on physiological attributes of rice-wheat cropping system. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*. 92(6), 00–00.
- Jones, J.B. (2001). *Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis*. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, USA. 363 Pages.
- Kabata-Pendias, A., & Pendias, H. (2001). *Trace elements in soils and plants*. Third Edition, CRC Press, Boca Raton, New York, Washington, D.C., USA.
- Kalderis, D., Papameletiou, G., & Kayan, B. (2019). Assessment of orange peel hydrochar as a soil amendment: impact on clay soil physical properties and potential phytotoxicity. *Waste and Biomass Valorization*, 10, 3471–3484.
- Kazemalilou, S., Najafi, N., & Reyhanitabar, A. (2018). Effects of integrated application of phosphorus fertilizer and sewage sludge on leaf chlorophyll index and some growth characteristics of sunflower under water deficit conditions. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 7(4), 1–18. (In Persian with English abstract)
- Kern, J., Tammeorg, P., Shanskiy, M., Sakrabani, R., Knicker, H., Kammann, C., & Glaser, B. (2017). Synergistic use of peat and charred material in growing media—an option to reduce the pressure on peatlands? *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 25(2), 160–174.
- Khan, F., Hussain, S., Tanveer, M., Khan, S., Hussain, H.A., Iqbal, B., & Geng, M. (2018). Coordinated effects of lead toxicity and nutrient deprivation on growth, oxidative status, and elemental composition of primed and non-primed rice seedlings. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 21185–21194.
- Khan, M., Rolly, N.K., Al Azzawi, T.N.I., Imran, M., Mun, B.G., Lee, I.J., & Yun, B.W. (2021). Lead (Pb)-induced oxidative stress alters the morphological and physio-biochemical properties of rice (*Oryza sativa* L.). *Agronomy*, 11(3), 409.
- Khan, S., Chao, C., Waqas, M., Arp, H.P., & Zhu, Y.G. (2013). Sewage sludge biochar influence upon rice (*Oryza sativa* L.) yield, metal bioaccumulation and greenhouse gas emissions from acidic paddy soil. *Environmental Science and Technology*, 47(15), 8624–8632.
- Kheyri, N., Niknejad, Y., & Abbasalipour, M. (2018). The effects of using organic and biological fertilizer along with lower rate of chemical nitrogen fertilizer on quality and quantity of rice yield. *Journal of Crop Ecophysiology*. 12(3), 445– 460. (In Persian with English abstract)
- Khosravi, A., Zheng, H., Liu, Q., Hashemi, M., Tang, Y., & Xing, B. (2022). Production and characterization of hydrochars and their application in soil improvement and environmental remediation. *Chemical Engineering Journal*, 430, 133142.
- Khush, G.S. (1997). Origin, dispersal, cultivation and variation of rice. *Plant Molecular Biology*, 35, 25-34.
- Kibria, M.G., Osman, K.T., & Ahmed, M.J. (2006). Cadmium and lead uptake by rice (*Oryza sativa* L.) grown in three different textured soils. *Soil and Environment*, 25(2), 70–77.
- Kulaz, H., Eryigit, T., Tuncturk, R., & Tuncturk, M. (2021). Effects of heavy metal (Pb) stress on some growth parameters and chemical changes in the soybean plant (*Glycine max* L.). *Journal of Elementology*, 26(3), 683-695.
- Kuo, S. (1996). Phosphorus. In: *Methods of soil analysis*. Part 3. *Chemical methods*. Soil Science Society of



- America, Madison. WI, USA. Pp. 869–918.
- Lai, L., Ismail, M.R., Muharam, F.M., Yusof, M.M., Ismail, R., & Jaafar, N.M. (2017). Effects of rice straw biochar and nitrogen fertilizer on rice growth & yield. *Asian Journal of Crop Science*, 9(4), 159–166.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1-2), 1–22.
- Latare, A.M., Kumar, O., Singh, S.K., & Gupta, A. (2014). Direct and residual effect of sewage sludge on yield, heavy metals content and soil fertility under rice–wheat system. *Ecological Engineering*, 69, 17–24
- Lindsay, W.L., & Norvell, W. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42, 421–428.
- Liu, J., Li, K., Xu, J., Zhang, Z., Ma, T., Lu, X., Yang, J., & Zhu, Q. (2003). Lead toxicity, uptake, and translocation in different rice cultivars. *Plant Science*, 165, 793–802.
- Liu, Y., Yao, S., Wang, Y., Lu, H., Brar, S.K., & Yang, S. (2017). Bio-and hydrochars from rice straw and pig manure: inter-comparison. *Bioresource Technology*, 235, 332–337.
- Madhavan, S., Rosenman, K.D., & Shehata, T. (1989). Lead in soil: Recommended maximum permissible levels. *Environmental Research*, 49(1), 136–142.
- Maghsoodi M.R., Najafi N., Reyhanitabar A., & Oustan, S. (2020). Hydroxyapatite nanorods, hydrochar, biochar, and zeolite for controlled-release urea fertilizers. *Geoderma*, 347(114644), 1–15.
- Mahmoudi, S., Najafi, N., & Reyhanitabar, A. (2015). Effects of soil moisture and sewage sludge compost on leaf chlorophyll index and some growth traits of alfalfa in greenhouse conditions. *Journal of Soil and Plant Interactions*, 5(20), 207–220. (In Persian with English abstract)
- Mardomi S., Najafi N., Reyhanitabar A., & Dehghan, G. (2020). Effect of phosphorus on lead and zinc concentrations in rice root and formation of minerals containing them in a calcareous contaminated soil. *Water and Soil Science*, 29(4), 43–56. (In Persian with English abstract)
- Mardomi, S., Najafi, N., Reyhanitabar, A., & Dehghan, G. (2019a). Antioxidant enzymes activities and dry matter of rice plant as affected by interactions of lead, phosphorus and zinc. *The Philippine Agricultural Scientist*, 102(4), 310–321.
- Mardomi, S., Najafi, N., Reyhanitabar, A., & Dehghan, G. (2019b). Effects of phosphorous and contamination of lead and zinc on extraction kinetics of the available P, Pb and Zn in a calcareous soil under waterlogged conditions. *Water and Soil Science*, 29(2), 29–42. (In Persian with English abstract)
- Marschner P. (2012). Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Third Edition, Academic Press, London, UK.
- McBride, M. B. (2002). Cadmium uptake by crops estimated from soil total Cd and pH. *Soil Science*, 167(1), 62-67.
- Mohammadnejad, A., Najafi, N., & Nishabouri, M.R. (2015). Effects of three types of organic fertilizers on the growth characteristics and water use efficiency of corn at different levels of soil compaction. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 5(2), 25–47. (In Persian with English abstract)
- Najafi, N., & Mardomi, S. (2012). The effects of waterlogging, sewage sludge and manure on the growth characteristics of sunflower in a sandy loam soil. *Water and Soil*, 25(6), 1264–1276. (In Persian with English abstract)
- Najafi, N., & Towfighi, H. (2012). Effects of rhizosphere of rice plant on the inorganic phosphorus fractions in the paddy soils (in North Iran) following P fertilizer application. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 43(3), 231–242. (In Persian with English abstract)
- Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: *Methods of soil analysis*. Part 3. *Chemical methods*. Soil Science Society of America, Madison. WI, USA. Pp. 961–1010.
- Nevidomskaya, D.G., Minkina, T.M., Soldatov, A.V., Shuvaeva, V.A., Zubavichus, Y.V., & Podkovyrina, Y.S. (2016). Comprehensive study of Pb (II) speciation in soil by X-ray absorption spectroscopy (XANES and EXAFS) and sequential fractionation. *Journal of Soils and Sediments*, 16, 1183–1192.
- Novak, J.M., Spokas, K.A., Cantrell, K.B., Ro, K.S., Watts, D.W., Glaz, B., & Hunt, P.G. (2014). Effects of biochars and hydrochars produced from lignocellulosic and animal manure on fertility of a Mollisol and Entisol. *Soil Use and Management*, 30(2), 175–181.
- Okla, M.K., Mumtaz, S., Javed, S., Saleh, I.A., Zomot, N., Alwasel, Y.A., Abdel-Maksoud, M.A., Song, B., & Adil, M.F. (2024). Elucidating the role of rice straw biochar in modulating *Helianthus annuus* L. antioxidants, secondary metabolites and soil post-harvest characteristics in different types of microplastics. *Plant Physiology and Biochemistry*, 213, 108865.
- Oladele, S.O., Adeyemo, A.J., & Awodun, M.A. (2019). Influence of rice husk biochar and inorganic fertilizer on soil nutrients availability and rain-fed rice yield in two contrasting soils. *Geoderma*, 336, 1-11.

- Peters, J. (2003). Recommended Methods of Manure Analysis. *Cooperative Extension publishing, University of Wisconsin, USA*.
- Puccini, M., Ceccarini, L., Antichi, D., Seggiani, M., Tavarini, S., Hernandez Latorre, M., & Vitolo, S. (2018). Hydrothermal carbonization of municipal woody and herbaceous prunings: hydrochar valorisation as soil amendment and growth medium for horticulture. *Sustainability*, 10(3), 846.
- Qingnan, ch., Xue, L., Singh, B.P., Yu, S., Müller, K., Wang, H., & Yang, L. (2020). Sewage sludge-derived hydrochar that inhibits ammonia volatilization, improves soil nitrogen retention and rice nitrogen utilization. *Chemosphere*, 245, 125558.
- Rahbari, A., Esmailpour, B., Fatemi, H., & Soltani, T.A.A. (2019). Effect of silicon nutrition on growth, physiological and biochemical characteristics of dill (*Anethum graveolens* L.) under Pb stress conditions. *Journal of Plant Process and Function*, 30(8), 81–94. (In Persian with English abstract)
- Rajapaksha, A.U., Vithanage, M., Ok, Y.S., & Oze, C. (2013). Cr (VI) formation related to Cr (III)-muscovite and birnessite interactions in ultramafic environments. *Environmental Science and Technology*, 47(17), 9722–9729.
- Reza, M.T., Andert, J., Wirth, B., Busch, D., Pielert, J., Lynam, J.G., & Mumme, J. (2014). Hydrothermal carbonization of biomass for energy and crop production. *Applied Bioenergy*, 1(1), 11–29.
- Rhoades, J.D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In: *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA. Pp. 417–435.
- Rillig, M.C., Wagner, M., Salem, M., Antunes, P.M., George, C., Ramke, H.G., & Antonietti, M. (2010). Material derived from hydrothermal carbonization: Effects on plant growth and arbuscular mycorrhiza. *Applied Soil Ecology*, 45(3), 238–242.
- Rogovska, N., Laird, D., Cruse, R.M., Trabue, S. & Heaton, E. (2012). Germination tests for assessing biochar quality. *Journal of Environmental Quality*, 41(4), 1014-1022
- Romasanta, R.R., Sander, B.O., Gaihre, Y.K., Alberto, M.C., Gummert, M., Quilty, J., & Wassmann, R. (2017). How does burning of rice straw affect CH₄ and N₂O emissions? A comparative experiment of different on-field straw management practices. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 239, 143–153.
- Schimmelpfennig, S., Muller, C., Grunhage, L., Koch, C., & Kammann, C. (2014). Biochar, hydrochar and uncarbonized feedstock application to permanent grassland-effects on greenhouse gas emissions and plant growth. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 191, 39–52.
- Schulze, M., Mumme, J., Funke, A., & Kern, J. (2016). Effects of selected process conditions on the stability of hydrochar in low-carbon sandy soil. *Geoderma*, 267, 137–145.
- Shan, Y., Lv, M., Zuo, W., Tang, Z., Ding, C., Yu, Z., & Bai, Y. (2021). Sewage sludge application enhances soil properties and rice growth in a salt-affected mudflat soil. *Scientific Reports*, 11(1), 1402.
- Sharma, P.S., & Dubey, R.S. (2005). Lead toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17, 35–52.
- Singh, R.P., & Agrawal, M. (2010). Variations in heavy metal accumulation, growth and yield of rice plants grown at different sewage sludge amendment rates. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73(4), 632–641.
- Sposito, G., Lund, L.J., & Chang, A.C. (1982). Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in solid phases. *Soil Science Society of America Journal*, 46:260–264.
- Svetlana A., Frohne, T., Kresovic, M., Stark, H.J., Tomic, Z., Licina, V., & Rinklebe, J. (2017). Biogeochemistry of Ni and Pb in a periodically flooded arable soil: Fractionation and redox-induced immobilization. *Journal of Environmental Management*, 186, 141–150.
- Thomas, G.W. (1996). Soil pH and soil acidity. Pp. 475–489. In: Sparks D.L. (Ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 3-Chemical Methods*. Book Series No. 5, SSSA and ASA, Madison, WI, USA.
- Urbaniak, M., Wyrwicka, A., Tołoczko, W., Serwecinska, L., & Zielinski, M. (2017). The effect of sewage sludge application on soil properties and willow (*Salix* sp.) cultivation. *Science of the Total Environment*, 586, 66–75.
- Verma, A.K., Singh, R.D., Yadav, B., Meena, R.K., & Kumawat, C. (2017). Effect of sludge addition on biological properties of soil under rice cultivation. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(5), 2677–2683.
- Wan, Y., Huang, Q., Camara, A.Y., Wang, Q., & Li, H. (2019). Water management impacts on the solubility of Cd, Pb, As and Cr and their uptake by rice in two contaminated paddy soils. *Chemosphere*, 228, 360–369.
- Wang, J., Xiong, Z., & Kuzyakov, Y. (2016). Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and



- priming effects. *GCB Bioenergy*, 8(3), 512–523.
- Wei, H., Zhu, Y., Qiu, Y., Han, S., Hu, C., Xu, L., Zhou, D., Xing, N.B., Hu, Z.P., Cui, Y.J., Dai, P.Y., & Zhang, H.C. (2018). Combined effect of shading time and nitrogen level on grain filling and grain quality in japonica super rice. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(11), 2405–2417.
- Westerman, R.L. (1990). *Soil testing and plant analysis*. 3rd Edition, Soil Science Society of America Book Series No. 3, Madison, WI, USA.
- Wilk, M., Magdziarz, A., Jayaraman, K., Szymanska-Chargot, M., & Gokalp, I. (2019). Hydrothermal carbonization characteristics of sewage sludge and lignocellulosic biomass. A comparative study. *Biomass and Bioenergy*, 120, 166-175.
- Yang, C., Yang, L., Yan, T., & Ouyang, Z. (2004). Effects of nutrient and water regimes on lodging resistance of rice. *Journal of Applied Ecology*, 15(4), 646–650.
- Yao, D., Wu, J., Gao, H., Wu, D., & Wei, Z. (2022). Changes in soil silicon forms and availability as affected by rice straw and its biochar. *European Journal of Soil Science*, 73(6), e13316.
- Yin, X., Chen, J., Cao, F., Tao, Z., & Huang, M. (2020). Short-term application of biochar improves post-heading crop growth but reduces pre-heading biomass translocation in rice. *Plant Production Science*, 23(4), 522–528.
- Zeng, L.S., Liao, M., Chen, C.L., & Huang, C.Y. (2006). Effects of lead contamination on soil microbial activity and rice physiological indices in soil–Pb–rice (*Oryza sativa* L.) system. *Chemosphere*, 65(4), 567–574.
- Zhang, S., Pi, M., Su, Y., Xu, D., Xiong, Y., & Zhang, H. (2020). Physiochemical properties and pyrolysis behavior evaluations of hydrochar from co-hydrothermal treatment of rice straw and sewage sludge. *Biomass and Bioenergy*, 140, 105664.
- Zheng, C., Ma, X., Yao, Z., & Chen, X. (2019). The properties and combustion behaviors of hydrochars derived from co-hydrothermal carbonization of sewage sludge and food waste. *Bioresourcetechnology*, 285, 121347.
- Zhou, B., Feng, Y., Wang, Y., Yang, L., Xue, L., & Xing, B. (2018). Impact of hydrochar on rice paddy CH₄ and N₂O emissions: A comparative study with pyrochar. *Chemosphere*, 204, 474–482.
- Zou, L., Zhang, S., Duan, D., Liang, X., Shi, J., Xu, J., & Tang, X. (2018). Effects of ferrous sulfate amendment and water management on rice growth and metal (loid) accumulation in arsenic and lead co-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 8888–8902.
- 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, 7476–7490.