

Research Article

Effects of Chia Seed Mucilage on Some Chemical and Microbial Properties of Soil under Drought Stress and Lead Pollution

Parastoo Sharifi ^{1✉}, Mahdi Shorafa ², Mohammad-Hossein Mohammadi ³,
Hossein-Ali Alikhani ⁴

1-Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran.

E-mail: p.69.sharifi@ut.ac.ir

2-Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran.

E-mail: mshorafa@ut.ac.ir

3-Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran.

E-mail: mhmohmad@ut.ac.ir

4-Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: halikhan@ut.ac.ir

Received: June 01, 2026

Revised: June 27, 2026

Accepted: June 27, 2026

Published: June 28, 2026

Extended Abstract

Introduction

Soil degradation caused by the simultaneous occurrence of drought stress and heavy metal contamination is one of the most serious environmental challenges facing agricultural sustainability and ecosystem functioning, especially in arid and semi-arid regions such as Iran. Among heavy metals, lead (Pb) is particularly concerning due to its high persistence, non-biodegradability, and toxicity to soil organisms. Lead contamination disrupts soil biochemical processes, reduces microbial activity, and impairs nutrient cycling. These negative effects are intensified under drought conditions, which alter soil physicochemical properties and limit microbial functionality. In recent years, increasing attention has been paid to natural soil amendments that can enhance soil resilience under multiple stresses. Root mucilage, a gelatinous biopolymer secreted by plant roots, plays a vital role in improving soil aggregation, water retention, and creating a favorable microenvironment for rhizosphere microorganisms. However, due to the practical difficulties in collecting and manipulating natural root mucilage, chia seed mucilage has been proposed as a suitable natural analog and model system. The present study was conducted to investigate the interactive effects of low water stress and lead contamination on selected soil chemical and microbial properties and to evaluate the potential of chia seed mucilage as a soil amendment under these combined stresses. The main objective was to determine whether chia seed mucilage can mitigate the adverse impacts of drought and Pb on soil health.

Materials and Methods

This experiment was performed as a factorial completely randomized design (CRD) with three factors and three replications. The first factor was chia seed mucilage application at three levels (0, 0.3, and 0.6% w/w), the second factor was lead contamination at three levels (0, 150, and 300 mg kg⁻¹ soil) using lead nitrate (Pb(NO₃)₂), and the third factor consisted of two moisture regimes (field capacity as no-stress and low water stress). Soil was artificially contaminated with Pb and incubated for 4 months. Chia seed mucilage was extracted and uniformly mixed into the soil at the beginning of the experiment. Soil samples were then subjected to the respective moisture treatments for another 2 months. At the end of the incubation period, soil chemical properties including pH and electrical conductivity (EC) were measured. Biological properties, namely soil microbial respiration and microbial population, were also

determined using standard laboratory methods. All data were subjected to analysis of variance (ANOVA) using SAS software, and means were compared by Duncan's multiple range test at the 5% probability level.

Results

Low water stress significantly increased soil electrical conductivity and decreased soil pH, indicating changes in ion concentration and soil solution chemistry. Drought stress also caused a marked decline in microbial respiration and microbial population, highlighting the high sensitivity of soil microbial communities to water limitation. Lead contamination further intensified these negative effects. Increasing Pb concentrations (especially at 300 mg kg⁻¹) led to greater reductions in microbial activity and more pronounced disruptions in soil chemical balance. A significant synergistic interaction was observed between drought stress and Pb contamination, resulting in the most severe negative impacts on soil biological and chemical properties. Application of chia seed mucilage significantly improved soil conditions under both single and combined stress treatments. The 0.3% mucilage level was the most effective treatment, moderating the increase in EC, stabilizing soil pH, and notably enhancing microbial respiration and population compared to the control. This concentration effectively reduced the adverse effects of Pb and drought, likely through improved water retention, better soil structure, and decreased Pb bioavailability. In contrast, the 0.6% mucilage application showed weaker performance, suggesting that higher concentrations may not provide additional benefits and could potentially create less favorable conditions.

Conclusion

The findings of this study demonstrate that combined drought stress and lead contamination cause severe damage to soil chemical and microbial properties. However, the application of chia seed mucilage, particularly at 0.3% (w/w), can significantly mitigate these adverse effects by improving soil physicochemical conditions and supporting microbial communities. From a fundamental perspective, these results highlight the important ecological role of root mucilage-like substances in enhancing soil resilience under multiple environmental stresses. Moderate levels of mucilage appear to act as an effective natural amendment that improves water retention, stabilizes soil chemistry, and reduces heavy metal toxicity. This study suggests that the selection or breeding of plant species with higher root mucilage secretion capacity could be a promising, sustainable strategy for soil management in regions affected by drought and heavy metal pollution.

Keywords: Acidity, Contaminants, Drought stress, Microbial activity, Salinity.

Author Contributions

P. Sharifi, M. Shorafa, M.H. Mohammadi and H.A. Alikhani conceived and planned the experiments. P. Sharifi carried out the experiments. P. Sharifi wrote the first manuscript. M. Shorafa, M.H. Mohammadi and H.A. Alikhani provided critical feedback and helped shape the research, analysis, and manuscript. All authors contributed to the interpretation of the results.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors thank the University of Tehran for supporting this research.

Ethical considerations

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

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Cite this article: Sharifi, P., Shorafa, M., Mohammadi, M.H., & Alikhani, H.A. (2026). Effects of Chia seed mucilage on some chemical and microbial properties of soil under drought stress and lead pollution. *Journal of Soil and Plant Science*, 36(2), 41-58.

<https://doi.org/10.22034/sps.2026.72752.1044>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Copyright © 2026 The Authors.
Publisher: The University of Tabriz

OPEN ACCESS
JOURNALS



نشریه دانش خاک و گیاه، جلد ۳۶، شماره ۲

صفحه‌های ۴۱ تا ۵۸، ۱۴۰۵

<https://doi.org/10.22034/sps.2026.72752.1044>

E-ISSN: 3092-6106
<https://sps.tabrizu.ac.ir>



مقاله پژوهشی

تأثیر موسیلاژ دانه چیا بر برخی شاخص‌های شیمیایی و میکروبی خاک در شرایط تنش کم‌آبی و آلودگی سرب

پرستو شریفی^۱ , مهدی شرفا^۲ , محمدحسین محمدی^۳ , حسینعلی علیخانی^۴ 

۱- نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: p.69.sharifi@ut.ac.ir

۲- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: mshorafa@ut.ac.ir

۳- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: mhmohmad@ut.ac.ir

۴- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: Halikhan@ut.ac.ir

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۰۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۶

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی اثر متقابل تنش کم‌آبی و آلودگی سرب بر ویژگی‌های شیمیایی (قابلیت هدایت الکتریکی و pH) و زیستی خاک (تنفس میکروبی و جمعیت توده میکروبی) و نقش تعدیل‌کننده موسیلاژ دانه چیا (*Salvia hispanica* L.) به‌عنوان مدلی برای شبیه‌سازی اثر موسیلاژ ریشه گیاهان انجام شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی، با ۳ فاکتور، شامل غلظت موسیلاژ (صفر، ۰/۳ و ۰/۶ درصد وزنی)، غلظت سرب (صفر، ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و سطح تنش کم‌آبی (بدون تنش معادل رطوبت ظرفیت زراعی و با تنش کم‌آبی معادل ۴۰ درصد ظرفیت زراعی) اجرا گردید. نتایج نشان داد که تنش کم‌آبی باعث افزایش معنادار EC، کاهش pH، تنفس میکروبی و جمعیت میکروبی شد و حضور سرب در سطوح ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم این اثرها را تشدید کرد. کاربرد موسیلاژ در غلظت ۰/۳ درصد به‌طور مؤثری این اثرات منفی را تعدیل نمود، در حالی که غلظت ۰/۶ درصد عملکرد ضعیف‌تری داشت. از منظر یک پژوهش بنیادی، این مطالعه تأکید دارد که موسیلاژ ریشه گیاهان می‌تواند سازوکاری کلیدی در افزایش مقاومت خاک به تنش‌های هم‌زمان کم‌آبی و سرب به‌عنوان فلز سنگین باشد. بنابراین، انتخاب ارقام گیاهی با توانایی بیشتر ترشح موسیلاژ به‌وسیله ریشه (معادل تقریبی ۰/۳ درصد) می‌تواند راهبردی پایدار برای بهبود کیفیت خاک در شرایط تنش خشکی و آلودگی فلزات سنگین محسوب شود.

واژه‌های کلیدی: آلاینده، اسیدیته، خشکی، شوری، فعالیت میکروبی.

استناد به این مقاله: شریفی، پ.، شرفا، م.، محمدی، م.ح. و علیخانی، ح.ع. (۱۴۰۵). تأثیر موسیلاژ دانه چیا بر برخی شاخص‌های شیمیایی و میکروبی خاک در شرایط تنش کم‌آبی و آلودگی سرب. نشریه دانش خاک و گیاه، ۳۶(۱)، ۵۸-۴۱.

<https://doi.org/10.22034/sps.2026.72752.1044>

مقدمه

خاک به عنوان یکی از مهم‌ترین زیست‌بوم‌ها در بیوسفر، نقش اساسی در حفظ سلامت محیط زیست و تولیدات کشاورزی ایفا می‌کند. در این میان، فعالیت‌های زیستی خاک به‌ویژه عملکرد ریزجانداران، از عوامل کلیدی در چرخه عناصر غذایی و حفظ حاصلخیزی خاک محسوب می‌شوند. شاخص‌هایی نظیر تنفس میکروبی (SR) و جمعیت ریزجانداران، به عنوان معیارهای مهم ارزیابی کیفیت زیستی خاک شناخته می‌شوند و تغییرات آن‌ها بازتابی از وضعیت عملکرد زیست‌بوم خاک است (Amarasinghe et al., 2024; Soares et al., 2024).

تنش کم آبی به عنوان یکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی، اثرهای قابل توجهی بر فعالیت‌های زیستی خاک دارد. کاهش رطوبت خاک موجب محدود شدن فعالیت متابولیکی ریزجانداران شده و در نتیجه باعث کاهش تنفس میکروبی و زیست‌توده میکروبی می‌شود (Zhuang et al., 2024). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که خشکی می‌تواند به طور معناداری ساختار و عملکرد جامعه میکروبی خاک را تغییر داده به طوری که کارایی مصرف کربن به وسیله ریزجانداران را کاهش دهد (Lavallee et al., 2024; Amarasinghe et al., 2024).

علاوه بر تنش کم آبی، آلودگی خاک به فلزات سنگین، به‌ویژه سرب، یکی دیگر از چالش‌های مهم زیست‌محیطی محسوب می‌شود (Zolotareva & Plekhanov, 2024). سرب به عنوان یک عنصر سمی، می‌تواند با تأثیر بر ساختار سلولی و فعالیت‌های آنزیمی ریزجانداران، موجب کاهش فعالیت‌های زیستی خاک شود. پژوهش‌های جدید نشان داده‌اند که آلودگی به فلزات سنگین می‌تواند به طور قابل توجهی تنفس میکروبی را کاهش داده و ساختار جامعه میکروبی خاک را تغییر دهد (Soares et al., 2024; Szili-Kovács & Takács, 2024).

قابلیت هدایت الکتریکی خاک (EC) به عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های شیمیایی، نشان‌دهنده غلظت کل یون‌های محلول در خاک بوده و به طور گسترده به عنوان معیاری برای ارزیابی شوری خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. تغییرات EC می‌تواند تحت تأثیر عواملی نظیر میزان رطوبت خاک، ترکیب یونی، حضور فلزات سنگین و مدیریت‌های اصلاحی قرار گیرد (Krzyżak et al., 2023). در شرایط تنش کم آبی، به دلیل کاهش رطوبت و افزایش غلظت یون‌ها در محلول خاک، معمولاً مقدار EC افزایش می‌یابد (Teletos et al., 2025). همچنین، حضور فلزات سنگین مانند سرب می‌تواند با افزایش غلظت کاتیون‌ها، موجب افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک شود (Akbar et al., 2024).

pH خاک نیز یکی از شاخص‌های کلیدی در تعیین وضعیت شیمیایی خاک و زیست‌فراهمی عناصر غذایی و سمیت فلزات سنگین به شمار می‌رود. pH خاک می‌تواند بر حل‌پذیری، تحرک و زیست‌فراهمی فلزاتی مانند سرب تأثیر مستقیم داشته باشد، به طوری که در pH‌های پایین‌تر، تحرک و سمیت فلزات سنگین افزایش می‌یابد (Manzoor et al., 2024). همچنین تغییرات pH می‌تواند به طور غیرمستقیم بر فعالیت ریزجانداران خاک و فرایندهای زیستی اثرگذار باشد. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که تنش‌های محیطی و افزودن مواد اصلاح‌کننده آلی می‌توانند منجر به تغییرات معنادار در pH خاک شوند (Pérez et al., 2026).

در سال‌های اخیر، استفاده از مواد اصلاح‌کننده زیست‌پایه به عنوان راهکاری پایدار برای کاهش اثرات تنش‌های محیطی و بهبود کیفیت خاک مورد توجه قرار گرفته است. بیوپلیمرها یا زیست‌بسپارهای طبیعی، به‌ویژه ترکیبات پلی‌ساکاریدی (با تشکیل موسیژل)، می‌توانند از طریق افزایش ظرفیت نگهداری آب، بهبود ساختار خاک و

¹-Soil respiration

²-Biopolymer

فراهم‌سازی منابع کربنی، شرایط مناسبی برای رشد و فعالیت ریزجانداران فراهم کنند (Shu et al., 2022). موسیلاژ دانه چیا (*Salvia hispanica* L.) به‌عنوان یک پلیمر آلی و طبیعی، دارای ویژگی‌هایی نظیر ظرفیت بالای نگهداری آب و توانایی بهبود ویژگی‌های فیزیکی و زیستی خاک است. این ماده می‌تواند با ایجاد شرایط رطوبتی مناسب و تأمین منابع کربنی، فعالیت ریزجانداران را در شرایط تنش افزایش دهد. همچنین گزارش شده است که برخی پلیمرهای طبیعی قادرند از طریق برهم‌کنش با فلزات سنگین، تحرک و زیست‌فراهمی آن‌ها را در خاک کاهش دهند (Afridi et al., 2024).

در این راستا، استفاده از پلیمرهای طبیعی مانند موسیلاژ می‌تواند علاوه بر بهبود ویژگی‌های زیستی خاک، بر ویژگی‌های شیمیایی آن از جمله EC و pH نیز تأثیرگذار باشد (Nazari et al., 2022). این ترکیبات با دارا بودن گروه‌های عاملی فعال، قادرند از طریق برهم‌کنش با یون‌ها و فلزات سنگین، موجب کاهش تحرک آن‌ها و تعدیل شرایط شیمیایی خاک شوند (Akbar et al., 2024). همچنین با بهبود نگهداری آب در خاک، می‌توانند از افزایش بیش‌ازحد غلظت یون‌ها در شرایط تنش کم‌آبی جلوگیری کرده و در نتیجه، تغییرات EC را کنترل نمایند (Hayat et al., 2021). ریشه گیاهان با ترشح موسیلاژ، در تنظیم ریزمحیط خاک نقش مهمی ایفا می‌کند. Pandey et al. (۲۰۲۲) افزایش ترشح موسیلاژ، رسانایی هیدرولیکی خاک را بهبود می‌بخشد و مقاومت گیاه به تنش کم‌آبی را افزایش می‌دهد (Pandey et al., 2022). همچنین اصلاح‌کننده‌های بیوپلیمری می‌توانند اثرات خشکی و آلودگی را بر خواص شیمیایی و بیولوژیکی خاک تعدیل کنند (Kuang et al., 2025).

با توجه به نقش هم‌زمان شاخص‌های زیستی و شیمیایی در ارزیابی کیفیت خاک، بررسی تغییرات EC و pH در کنار شاخص‌های زیستی می‌تواند نگاه جامع‌تری نسبت به عملکرد خاک در شرایط تنش کم‌آبی و آلودگی به فلزات سنگین فراهم نماید. از این‌رو، در این پژوهش علاوه بر شاخص‌های زیستی، تغییرات قابلیت هدایت الکتریکی و pH خاک نیز مورد ارزیابی قرار گرفت تا اثر متقابل تنش‌ها و کاربرد موسیلاژ دانه چیا به‌صورت یکپارچه بررسی شود.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی خاک

خاک مورد استفاده در این پژوهش از یک زمین کشاورزی با کاربری زراعی و بافت لوم شنی نمونه‌برداری شد. نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه در دمای محیط هواخشک، سپس بقایای گیاهی و سنگ‌ریزه‌ها از آن جدا و خاک از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. ویژگی‌های فیزیکی اولیه خاک شامل بافت به روش هیدرومتری، جرم مخصوص حقیقی با استفاده از پیکنومتر (Dane & Topp, 2020) و چگالی ظاهری با برداشت نمونه دست‌نخورده به روش استوانه فلزی تعیین گردید (Gee & Or, 2002). پایداری خاکدانه‌ها به‌وسیله الک در دستگاه تک غربال (Kemper & Rosenau, 1986) و رطوبت اشباع خاک نیز با روش آون اندازه‌گیری شد. ویژگی‌های شیمیایی خاک شامل pH و EC در عصاره اشباع، کربن آلی به روش والکی-بلک (Walkley & Black, 1934)، نسبت سدیم جذب با اندازه‌گیری غلظت کاتیون‌های سدیم، منیزیم و کلسیم در عصاره اشباع خاک و قرار دادن در رابطه ۱ محاسبه شد (Suarez, 1981). ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) مطابق با روش اشباع آمونیوم استات (NH_4OAc) در pH 7 تعیین شدند (Nelson & Sommers, 1996; Sparks et al., 2020).

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{(Ca^{2+} + Mg^{2+})}{2}}} \quad \text{رابطه ۱}$$

افزودن سرب و گرماگذاری

برای شبیه‌سازی آلودگی فلز، سرب به صورت سرب نیترات $[Pb(NO_3)_2]$ در سه سطح صفر، ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک به نمونه‌ها افزوده و هم‌زمان مخلوط شد. سرب نیترات، به دلیل حلالیت بالا و کاربرد رایج در مطالعات آزمایشگاهی استفاده شده است. با توجه به غلظت نسبتاً پایین نیترات اضافه‌شده و دوره ۶ ماهه آزمایش، اثر مستقل نیترات کنترل نشد. حد استاندارد بحرانی سرب در خاک‌های کشاورزی ایران ۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم اعلام شده است (Shahbazi et al., 2020). از طرفی، تحقیقات نشان داده‌اند که در خاک‌های مجاور صنایع، معادن و جاده‌ها در ایران، غلظت سرب می‌تواند به ۱۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم (حتی بیشتر) برسد، غلظت‌های یاد شده‌ی سرب جهت این مطالعه، انتخاب شدند (Jahanbakhsh et al., 2023; Moore et al., 2014). نمونه‌ها به مدت چهار ماه در شرایط کنترل‌شده (دمای ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای) گرماگذاری^۱ شدند تا تعادل نسبی بین فاز جامد و محلول خاک برقرار شود و واکنش‌های تثبیت فلز در خاک انجام گیرد (Shahbazi et al., 2020; Chen et al., 2004; Reddy et al., 2005). این مرحله به منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی خاک‌های آلوده و جلوگیری از اثرگذاری اولیه فلزات سنگین انجام شد (Shahid et al., 2015).

استخراج موسیلاژ دانه چیا

در ابتدا نسبت ۱ به ۱۰ از بذر چیا (۳۰ گرم بذر چیا در ۳۰۰ سی‌سی آب مقطر) تهیه می‌گردد و برای تولید موسیلاژ در اطراف بذر، به مدت ۲ ساعت به صورت مغناطیسی هم زده تا هیدراته شوند (Muñoz et al., 2013). توری‌هایی دو لایه با اندازه‌های مشخص به نحوی تهیه خواهد گردید که امکان عبور موسیلاژ فراهم گردد، اما امکان مسدود شدن و یا عبور بذر چیا وجود نداشته باشد. این توری‌ها به جای کاغذ صافی در قیف بوختر استفاده می‌شود و به وسیله نیروی مکش حدود ۶۰ کیلو پاسکال، موسیلاژ از بذر استخراج می‌شود (Kroener et al., 2018). ابتدا نسبت ماده تر به خشک موسیلاژ تعیین گردید و سپس مقادیر معادل سطوح صفر، ۰/۳ و ۰/۶ درصد وزنی بر اساس وزن خاک خشک محاسبه شد؛ لازم به ذکر است که غلظت مصرفی موسیلاژ بر اساس مطالعات قبلی تعیین شده است (Fathinejad et al., 2024). موسیلاژ استخراج‌شده به صورت تر به خاک افزوده و به طور یکنواخت مخلوط شد. انتخاب این سطوح بر اساس مطالعات پیشین در زمینه اثر پلیمرهای آلی و موسیلاژ گیاهی بر ویژگی‌های هیدرولیکی و ساختاری خاک انجام شد (Kroener et al., 2018; Hayat et al., 2021).

طراحی آزمایش و تیمارها

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه فاکتور شامل موسیلاژ، سرب و تنش کم‌آبی انجام شد و به شرح زیر، فاکتورها اعمال گردیدند:

^۱-Incubation

فاکتور موسیلاژ در سه سطح شامل: M0، بدون موسیلاژ، M1، موسیلاژ با غلظت ۰/۳ درصد وزنی خشک، M2، موسیلاژ با غلظت ۰/۶ درصد وزنی خشک.

فاکتور سرب در سه سطح شامل: L0، بدون سرب، L1، سرب با غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، L2، سرب با غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم.

فاکتور تنش کم‌آبی در سه سطح شامل: I0، آبیاری بدون تنش در رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای (FC)، I1، آبیاری با تنش به‌صورت ۴۰ درصد ظرفیت مزرعه‌ای (0.4 FC).

برای هر تیمار سه تکرار در نظر گرفته شد که در مجموع شامل ۵۴ واحد آزمایشی می‌شد. چهار کیلوگرم خاک از الک ۴ میلی متری عبور داده شده، در ستون‌هایی با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و قطر ۲۰ سانتی‌متر ریخته شد. تیمارهای بدون تنش در حد رطوبتی ظرفیت مزرعه نگه داشته شدند، در حالی که تیمارهای در شرایط تنش کم‌آبی بر اساس منحنی رطوبتی خاک و کاهش ۶۰ درصد از آبیاری مرجع مدیریت شدند (Khan et al., 2021). لازم به ذکر است که تنش کم‌آبی، به‌عنوان یک تنش محیطی برای سیستم خاک و مؤثر بر فرآیندهای زیستی خاک در نظر گرفته شده است. جهت اعمال تنش کم‌آبی، ابتدا میزان محتوای رطوبت وزنی خاک در مکش ظرفیت مزرعه‌ای، به‌وسیله پرشر پلیت تعیین شد (جهت آبیاری خاک‌های بدون تنش)، سپس به میزان ۶۰ درصد از آن کسر و محاسبه شد؛ به همان میزان در هر بار آبیاری به تیمارهای با تنش کم‌آبی، به‌وسیله توزین ستون، آب اضافه می‌گردید. پس از یک دوره تثبیت دوماهه برای ایجاد برهم‌کنش کامل بین خاک و موسیلاژ، اندازه‌گیری‌ها انجام گرفت.

اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های شیمیایی و زیستی

بعد از دوره تثبیت دو ماهه، pH (مدل دستگاه: metrohm) و EC (مدل دستگاه: Jenway) در عصاره‌ی حاصل از گل اشباع تیمارها اندازه‌گیری و به منظور بررسی جمعیت و فعالیت زیستی، جمعیت باکتری‌ها به روش شمارش محتمل‌ترین تعداد^۱ (MPN) و میزان تنفس پایه میکروبی (Joergensen et al., 2024) اندازه‌گیری شدند. در روش MPN، لوله‌های سری رقت و لوله‌های حاوی محیط کشت (نوترینت براث) تهیه شدند، نتایج رشد ریزجانداران بعد از یک هفته گرماگذاری، بر طبق جدول استاندارد محاسبه و ثبت شدند (Alexander, 1982).

تحلیل آماری داده‌ها

داده‌ها با استفاده از تجزیه واریانس (ANOVA) (یک‌طرفه) و مقایسه میانگین‌ها در سطح احتمال ۵ درصد تجزیه و تحلیل شدند. کلیه تحلیل‌های آماری به‌وسیله آزمون چند دامنه‌ای دانکن با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام گرفت. گراف‌ها با نرم افزار Excel رسم شدند. البته به‌منظور کاهش ناهمگنی واریانس و نرمال‌سازی، از مقادیر حاصل از شمارش جمعیت میکروبی به روش MPN، لگاریتم پایه ۱۰ ($\log_{10}$) گرفته شد، سپس تجزیه‌های آماری بر روی داده‌ها انجام شد.

نتایج و بحث

با توجه به جدول ۱، خاک شاهد، غیرشور و غیر سدیمی است. pH خاک، خنثی و کربن آلی، آهک و سرب خاک نیز ناچیز است. به‌علاوه اینکه EC و pH مربوط به موسیلاژ مصرفی به ترتیب برابر با ۰/۶ و ۶/۰۷ می‌باشد.

^۱-Most probable number

جدول ۱- نتایج تجزیه خاک مورد استفاده در این پژوهش.

بافت خاک	Pb (g cm ⁻³)	Ps (g cm ⁻³)	WSA (%)	CEC (cmol _c kg ⁻¹)	SAR	pH	EC (dS m ⁻¹)
لوم شنی	۱/۴۳	۲/۶۹	۸۷/۹۶	۱۲/۷۱	۰/۶۳	۷/۵۸	۱/۰۲

Pb: جرم مخصوص ظاهری، Ps: جرم مخصوص حقیقی، WSA: پایداری خاکدانه‌ها، CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی، SAR: نسبت جذب سدیم، EC: قابلیت هدایت الکتریکی.

در جدول ۲، نتایج مربوط به تجزیه واریانس و ضریب تغییرات را در اسیدیت، قابلیت هدایت الکتریکی، تنفس و جمعیت میکروبی مشاهده می‌کنید. غالباً فاکتورها تأثیر معناداری داشته‌اند.

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر فاکتورهای مورد مطالعه بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و زیستی.

Source of variation	df	EC	pH	RS	MPN
M	2	0.97**	0.09**	0.69**	9.91**
L	2	0.07 ^{ns}	0.02**	0.27**	1.37**
I	1	1.18**	0.12**	0.07**	7.03**
M x L	4	0.05 ^{ns}	0.03**	0.02**	1.26**
M x I	2	1.44**	0.11**	0.01**	0.65**
L x I	2	0.07 ^{ns}	0.02*	0.00*	0.17**
M x L x I	4	0.05 ^{ns}	0.01*	0.00*	0.21**
Error	36	0.02	0.00	0.00	0.01
%CV	-	18.36	0.78	7.86	2.65

ns: non-significant, *: significant at $p \leq 0.05$ and **: significant at $p \leq 0.01$

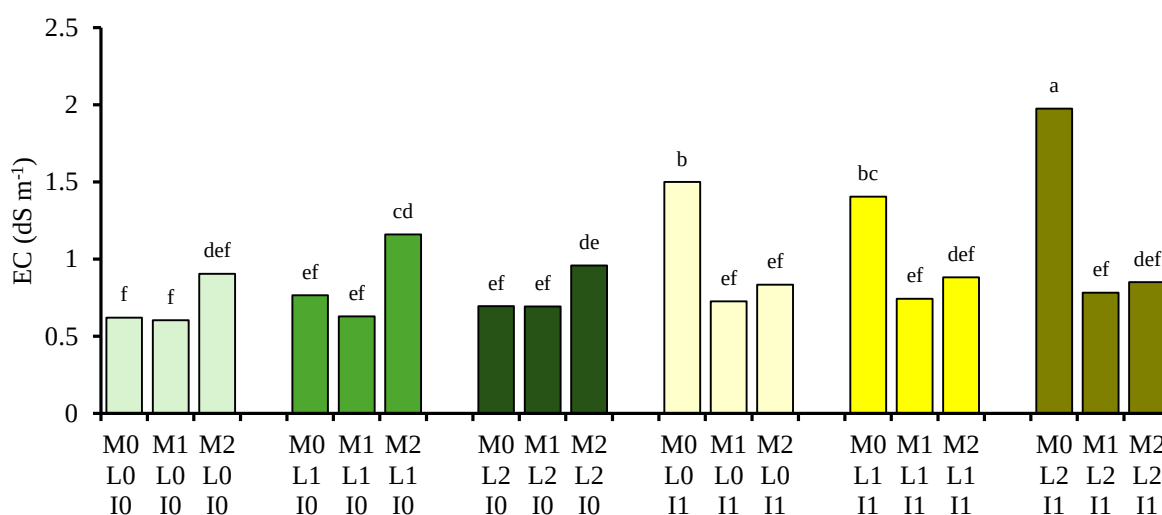
قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع

شکل ۱ نشان می‌دهد که اعمال تنش کم‌آبی موجب افزایش معنادار قابلیت هدایت الکتریکی (EC) خاک شده است. به‌طوری‌که در اغلب تیمارهای موسیلاژ و سرب، مقادیر EC در شرایط I1 به‌طور محسوسی بالاتر از I0 قرار گرفته‌اند. بیشترین مقدار EC مربوط به تیمار بدون موسیلاژ با غلظت بالای سرب و تنش کم‌آبی (M0L2I1)، حدود ۲ دسی زیمنس بر متر بود که در بالاترین گروه آماری (a) قرار گرفت. این نتیجه نشان داد که حضور سرب به‌عنوان کاتیون سنگین، غلظت املاح محلول را افزایش می‌دهد و در شرایط تنش کم‌آبی این تجمع تشدید می‌شود (Boudjabi et al., 2023; Omar et al., 2024).

افزایش غلظت سرب از L0 به L2 موجب تغییر معنادار EC خاک نشد، فقط در شرایط تنش کم‌آبی (I1). در تیمارهای بدون موسیلاژ (M0)، با افزایش سطح سرب، EC خاک به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. این روند نشان داد که حضور سرب به‌عنوان یک فلز سنگین، موجب افزایش غلظت املاح محلول و در نتیجه افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک گردید (Wyszkowska et al., 2024; Zhu et al., 2024; Amiri et al., 2025). در شرایط بدون تنش (I0)، کاربرد موسیلاژ اثر نسبتاً ملایم و کنترل‌شده‌ای بر EC خاک داشت. در هر سه سطح سرب، افزایش سطح موسیلاژ، باعث افزایش جزئی EC شد، اما این افزایش در اغلب موارد معنادار نبود. این کاهش احتمالاً به دلیل بهبود ظرفیت نگهداری آب به‌وسیله موسیلاژ، کاهش تبخیر و برهم‌کنش گروه‌های عاملی پلی‌ساکاریدی با یون‌ها و کاهش

قدرت یونی آزاد محلول است (Hayat et al., 2021; Ahmad et al., 2025). در حالیکه در شرایط تنش کم آبی، نقش موسیلاژ در تغییر EC خاک برجسته‌تر و معنادارتر بود. در تمامی سطوح سرب، افزودن موسیلاژ (به‌ویژه در سطح ۰/۳ درصد) باعث کاهش EC نسبت به تیمار بدون موسیلاژ (M0) شد. در سطح L2، مقدار EC در تیمار بدون موسیلاژ بیشترین مقدار را نشان داد، در حالی‌که با افزودن موسیلاژ، EC به‌طور معناداری کاهش یافت. این نتیجه نشان داد که موسیلاژ توانسته از تجمع بیش‌ازحد یون‌ها در محلول خاک در شرایط تنش جلوگیری کند (Diehl et al., 2023; Roskopf et al., 2022; Warren et al., 2026).

نتایج این پژوهش نشان داد، در شرایط تنش کم آبی و سطوح بالای سرب، تیمار بدون موسیلاژ، بیشترین EC را داشت، در حالی که کاربرد موسیلاژ، به‌ویژه در سطح ۰/۳ درصد، موجب تعدیل اثر سرب و کاهش شوری ظاهری خاک شد. به‌طور کلی تنش کم آبی موجب افزایش معنادار EC خاک شد. افزایش غلظت سرب باعث افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک گردید. موسیلاژ، به‌ویژه در شرایط تنش کم آبی، نقش مؤثری در کاهش EC و تعدیل تجمع یون‌ها ایفا کرد. EC بیش از آنکه تابع غلظت یک یون خاص باشد، به قدرت یونی کل محلول و ترکیب یون‌ها وابسته است (Liu, 2015; Boudjabi et al., 2023; Wu et al., 2023).



شکل ۱- مقایسه قابلیت هدایت الکتریکی (EC) محلول خاک در تیمارهای مورد مطالعه. M0: بدون موسیلاژ، M1:

موسیلاژ با غلظت ۰/۳ درصد وزنی، M2: موسیلاژ با غلظت ۰/۶ درصد وزنی، L0: بدون سرب، L1: سرب با غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، L2: سرب با غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، I0: آبیاری بدون تنش در رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای (FC)، I1: آبیاری با تنش خشکی در ۴۰ درصد ظرفیت مزرعه‌ای (0.4FC).

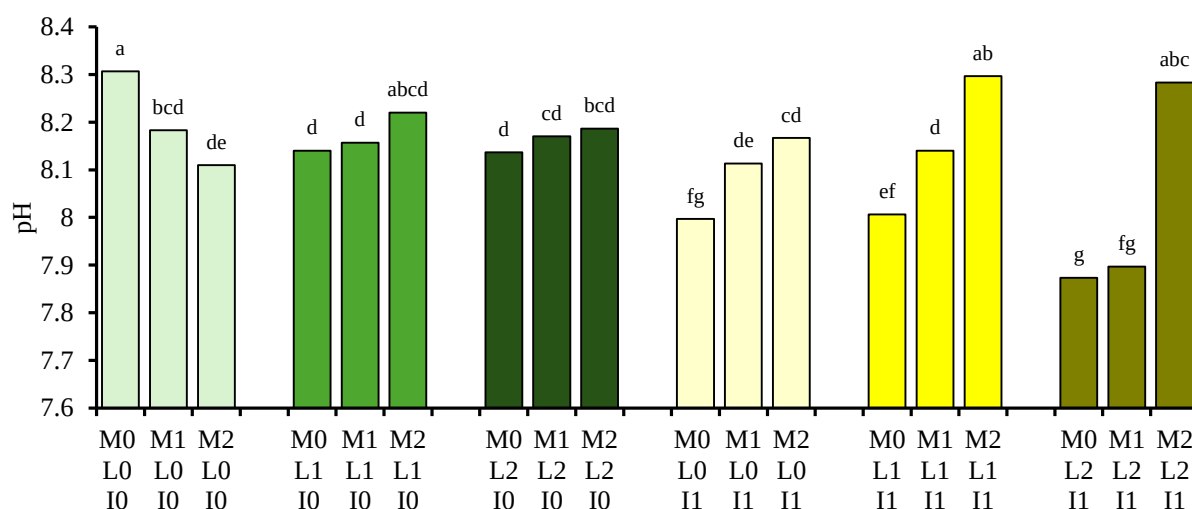
pH عصاره اشباع

طبق شکل ۲، در شرایط بدون تنش کم آبی pH خاک در بیشتر تیمارها بالاتر از شرایط تنش (I1) بود. در واقع تنش کم آبی باعث کاهش pH خاک شد. کاهش رطوبت خاک می‌تواند بسته به شرایط یونی خاک و واکنش‌های جذب سطحی باعث تجمع هیدروژن در محلول خاک شود که pH را کاهش دهد. در اینجا تنش کم آبی باعث افزایش فعالیت H^+ و H_3O^+ در محلول و باعث کاهش pH گردید.

در هر دو شرایط با و بدون تنش کم آبی، به طور کلی با افزایش سطح سرب، کمی کاهش pH خاک دیده شد، اگرچه در برخی تیمارها تفاوت معنادار نبود. کاتیون فلز سنگین سرب باعث جابجایی کاتیون‌ها با H^+ در محل‌های جذب سطحی در خاک شوند. این فرایند معمولاً سبب افزایش فعالیت H^+ در محلول می‌شود که نتیجه‌اش کاهش pH است (Stevenson *et al.*, 1994; McBride, 1994) تحقیقات نشان دادند که حضور ترکیبات آلی (مانند پلی‌ساکاریدها و موسیلاژها) نقش کلیدی در تعدیل pH خاک‌های آلوده دارند (Sauvé *et al.*, 2000).

در شرایط بدون تنش کم آبی (I0)، افزایش سطح موسیلاژ موجب تغییرات محدود و عمدتاً غیرمعنادار در pH عصاره خاک شد. در شرایط رطوبتی مناسب، خاک از ظرفیت بافری بالاتری برخوردار بود و تعادل یون‌های H^+ نسبتاً پایدار باقی ماند. در چنین شرایطی، افزودن موسیلاژ اگرچه توانست از طریق گروه‌های عاملی خود بر تبادل کاتیونی اثر بگذارد، اما این اثر به وسیله آب کافی و بافر طبیعی خاک تعدیل شد و منجر به تغییرات معنادار pH نگردید (Kroener *et al.*, 2018).

در شرایط تنش کم آبی (I1)، افزایش سطح موسیلاژ موجب افزایش معنادار pH عصاره خاک شد، به طوری که تیمارهای دارای موسیلاژ (به ویژه M2) در گروه‌های آماری بالاتری نسبت به تیمار بدون موسیلاژ (M0) قرار گرفتند. در شرایط تنش کم آبی، کاهش رطوبت خاک باعث کاهش ظرفیت بافری و افزایش نوسانات شیمیایی محلول خاک شد. در این وضعیت، حضور موسیلاژ با ظرفیت تبادل یونی بالا توانست نقش مؤثرتری در جذب یون‌های H^+ ، تثبیت کاتیون‌ها و کاهش اسیدی شدن محیط خاک ایفا کند. به همین دلیل، اثر موسیلاژ بر افزایش pH در شرایط تنش کم آبی آشکارتر و معنادارتر از شرایط بدون تنش مشاهده شد (Ahmad *et al.*, 2014).



شکل ۲- مقایسه pH خاک در تیمارهای مورد مطالعه. M0: بدون موسیلاژ، M1: موسیلاژ با غلظت ۰/۳ درصد وزنی، M2: موسیلاژ با غلظت ۰/۶ درصد وزنی، L0: بدون سرب، L1: سرب با غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، L2: سرب با غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، I0: آبیاری بدون تنش در رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای (FC)، I1: آبیاری با تنش خشکی در ۴۰ درصد ظرفیت مزرعه‌ای (0.4FC).

برهم کنش فاکتورها نشان داد که بیشترین کاهش pH در تیمارهای بدون موسیلاژ و با سرب بالا (L2) در شرایط تنش کم آبی بود، در حالی که حضور موسیلاژ تا حدی توانسته این اثر را کاهش دهد. وقتی میزان سرب زیاد شد، ترکیب آن با ظرفیت جذب خاک توانست H^+ را بیشتر آزاد کند. گروه‌های کربوکسیل و هیدروکسیل موجود در

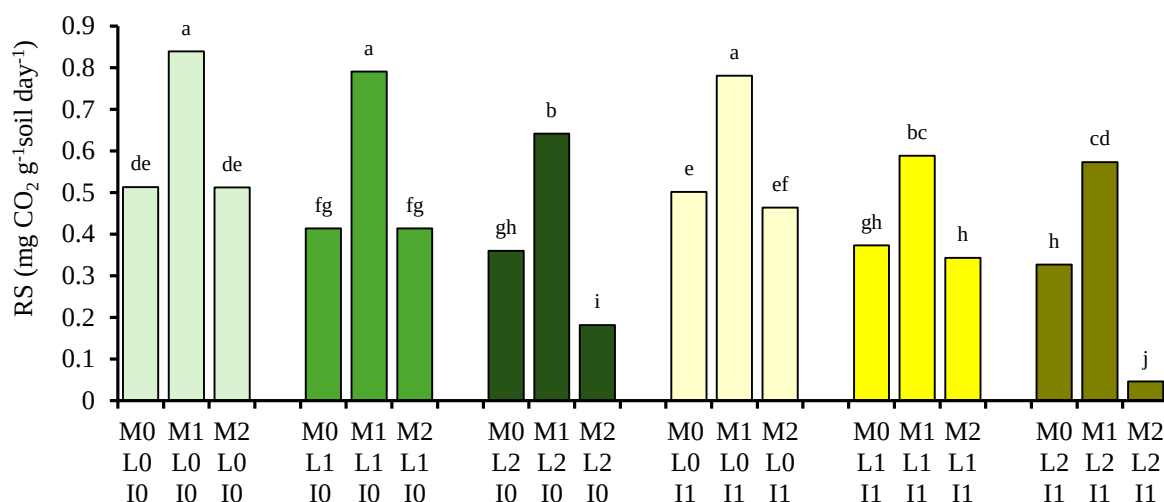
موسیلاژ دانه چیا قادر به جذب H^+ و تثبیت کاتیون‌های سنگین هستند و بدین ترتیب نقش بافرکننده ایفا می‌کند. این اثر در شرایط بدون تنش ضعیف‌تر بود که نشان‌دهنده وابستگی عملکرد اصلاحی موسیلاژ به شرایط تنش است (Sparks et al., 2022).

تنفس میکروبی

شکل ۳ نشان داد که اثر موسیلاژ در هر سه سطح میزان مصرفی سرب و ایجاد تنش کم‌آبی، دارای یک روند کاملاً مشخص بود به طوری که در سطح (۰/۳ درصد) بیشترین مقدار تنفس میکروبی را نشان داد. در سطوح صفر و ۰/۶ درصد موسیلاژ، با تفاوت معنادار، نسبت به سطح ۰/۳ درصد موسیلاژ کمتر شد. افزودن مقدار متوسط موسیلاژ (۰/۳ درصد) باعث افزایش کربن قابل دسترس برای ریزجانداران و بهبود ساختار خاک و نگهداری رطوبت و در نتیجه افزایش فعالیت تنفسی میکروبی شد. اما در سطح ۰/۶ درصد موسیلاژ، با وجود احتمال ایجاد شرایط چسبندگی زیاد یا کاهش تهویه خاک یا حتی محدودیت اکسیژن باعث کاهش نسبی تنفس میکروبی نسبت به تیمار ۰/۳ درصد موسیلاژ گردید.

از طرفی، با افزایش آلودگی در خاک، کاهش تنفس را در تیمارها دیده شد؛ سرب یک فلز سنگین سمی است که فعالیت آنزیمی ریزجانداران را مختل می‌کند، باعث کاهش جمعیت میکروبی شده و تنفس میکروبی را سرکوب می‌کند (Serrani et al., 2022). ژانگ و همکاران (۲۰۲۱) نیز نشان دادند که افزایش غلظت سرب و سایر فلزات باعث کاهش تنفس و رشد میکروبی می‌شود. همچنین تغییر در ساختار جامعه میکروبی به سمت گونه‌های مقاوم مشاهده شد. تنش کم‌آبیاری، باعث کاهش تنفس میکروبی در تمامی تیمارها شد. کم‌آبی باعث کاهش فعالیت متابولیکی ریزجانداران، کاهش تحرک سوبستراها در خاک و محدود شدن انتقال مواد غذایی و در نتیجه کاهش تنفس میکروبی گردید.

در شرایط متقابل فاکتورها موسیلاژ در سطح ۰/۳ درصد حتی در حضور سرب و تنش کم‌آبیاری، توانسته اثر منفی سرب و کم‌آبی را تا حدی جبران کند. موسیلاژ نقش بافرکننده تنش کم‌آبی را دارد، احتمالاً با حفظ رطوبت خاک، توانسته محیط مناسب برای ریزجانداران ایجاد کند (Borgulat et al., 2021). در مقابل سرب بسیار بالا، کم‌آبی و موسیلاژ زیاد (۰/۶ درصد) باعث شدیدترین محدودیت زیستی شد (Wang et al., 2025).



شکل ۳- مقایسه تنفس میکروبی خاک (RS) در تیمارهای مورد مطالعه. M0: بدون موسیلاژ، M1: موسیلاژ با غلظت ۰/۳ درصد وزنی، M2: موسیلاژ با غلظت ۰/۶ درصد وزنی، L0: بدون سرب، L1: سرب با غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، L2: سرب با غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، I0: آبیاری بدون تنش در رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای (FC)، I1: آبیاری با تنش خشکی در ۴۰ درصد ظرفیت مزرعه‌ای (0.4FC).

جمعیت توده میکروبی خاک

شکل ۴ جمعیت توده میکروبی را در تیمارهای مورد مطالعه، نشان می‌دهد. افزودن موسیلاژ در سطح ۰/۳ درصد منبع غنی کربن آلی محلول فراهم می‌کند و باعث تحریک رشد طیف وسیعی از ریزجانداران (هوازی و بی‌هوازی) می‌شود. موسیلاژ حتی می‌تواند محیط ریزوسفر را نیز از نظر رطوبتی و تغذیه‌ای بهبود دهد (Babur et al., 2025). اما در سطح ۰/۶ درصد، احتمال افزایش گرانروی^۱ و کاهش تبادل گاز وجود دارد که شرایط نسبتاً بی‌هوازی شدیدتر یا محدودکننده، باعث کاهش نسبی جمعیت نسبت به تیمار ۰/۳ درصد گردید.

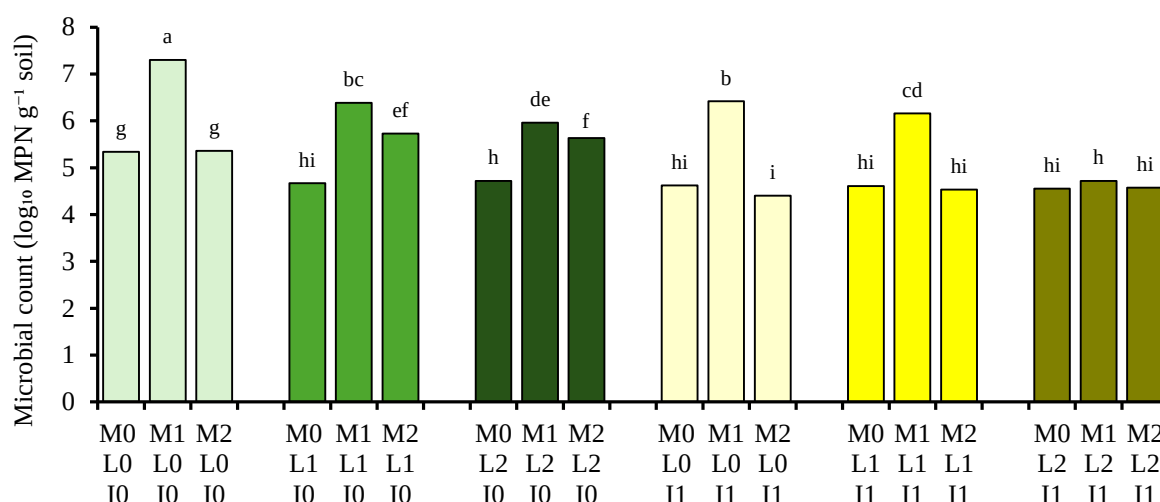
سرب نیز باعث تخریب غشای سلولی، مهار آنزیم‌های حیاتی و کاهش تکثیر میکروبی گردیده که روند تقریباً کاهشی را بعضاً نشان داد. گرچه این روند، غالب نمی‌باشد. مقدار سرب در سطح ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم جمعیت میکروبی به طور قابل توجهی کاهش داد. موسیلاژ (۰/۳ درصد) توانسته اثر سمی سرب را تا حدی خنثی کند (احتمالاً از طریق تثبیت سرب یا کاهش زیست‌فراهمی آن). باراکاراسیلو و ترنزی (۲۰۲۱) بیان کردند ترشحات ریشه‌ای مانند موسیلاژ می‌توانند با کلاته کردن فلزات، زیست‌فراهمی آن‌ها را کاهش دهند. این فرآیند موجب افزایش مقاومت میکروبی در برابر تنش‌های محیطی می‌شود. نتایج ژو و همکاران (۲۰۲۵) نیز نشان داد که افزایش غلظت فلزات سنگین موجب کاهش معنادار تنوع و فراوانی میکروبی می‌شود. علاوه بر این، گونه‌های مقاوم به فلزات جایگزین گونه‌های حساس شدند.

تنش کم‌آبی بعضاً سبب کاهش جمعیت میکروبی در تیمارها شده است، هرچند این کاهش معنادار نبود، کم‌آبی، دسترسی به آب را محدود می‌کند، انتقال مواد غذایی را کاهش می‌دهد و رشد میکروبی را محدود می‌کند (Lehmann et al., 2017). در این پژوهش، کل جمعیت (حتی میکروب‌های بی‌هوازی) اندازه‌گیری شد؛ این امکان

¹-Viscosity

²-Diversity & abundance

محتمل است که برخی ریزجانداران به کم‌آبی مقاوم باشند یا وارد فاز غیرفعال شده باشند، ولی بعد از تلقیح و گرماگذاری، هنوز شمارش شوند. بنابراین کاهش جمعیت میکروبی نسبت به تنفس میکروبی کمتر محسوس است. اثر هم‌زمان سمیت سرب در ۳۰۰ پی پی ام و اعمال تنش کم‌آبی، باعث کاهش شدید جمعیت میکروبی در تمامی تیمارها شد. بیشترین مقدار MPN در تیمار ۰/۳ درصد موسیلاژ مشاهده شد که نشان‌دهنده نقش مثبت آن در تأمین منابع کربنی و بهبود شرایط زیستی برای رشد ریزجانداران است (Serrani et al., 2022; Zhong et al., 2021).



شکل ۴- مقایسه جمعیت توده میکروبی خاک در تیمارهای مورد مطالعه. M0: بدون موسیلاژ، M1: موسیلاژ با غلظت ۰/۳ درصد وزنی، M2: موسیلاژ با غلظت ۰/۶ درصد وزنی، L0: بدون سرب، L1: سرب با غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، L2: سرب با غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، I0: آبیاری بدون تنش در رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای (FC)، I1: آبیاری با تنش خشکی در ۴۰ درصد ظرفیت مزرعه‌ای (0.4FC).

نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش با هدف بررسی اثر متقابل تنش کم‌آبی و آلودگی به سرب بر ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک و نقش تعدیل‌کننده موسیلاژ دانه چیا به‌عنوان مدل شبیه‌سازی‌کننده برای موسیلاژ ریشه گیاهان انجام شد. نتایج نشان داد که تنش کم‌آبی و سطوح بالای سرب (به‌ویژه ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) به‌طور معناداری کیفیت خاک را کاهش داد؛ کاربرد موسیلاژ دانه چیا در غلظت ۰/۳ درصد توانست با بهبود ظرفیت نگهداری آب، تنظیم قدرت یونی محلول، افزایش pH و تأمین منبع کربنی قابل دسترس، شرایط مساعدتری برای فعالیت جامعه میکروبی فراهم کرد. در مقابل، غلظت بالاتر (موسیلاژ ۰/۶ درصد) عملکرد ضعیف‌تری نشان داد که احتمالاً ناشی از محدودیت‌های فیزیکی مانند افزایش ویسکوزیته و کاهش تهویه خاک بوده است. به‌طور کلی، با توجه به شباهت موسیلاژ دانه چیا به موسیلاژ ریشه گیاهان، این مطالعه بنیادی تأکید می‌کند که انتخاب و استفاده از ارقام گیاهی با توانایی ترشح بالاتر موسیلاژ ریشه (معادل تقریبی ۰/۳ درصد وزنی) می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد زیستی مؤثر برای افزایش مقاومت خاک و گیاهان در برابر تنش‌های محیطی مورد توجه قرار گیرد. ضمناً بررسی مولکولی ژن‌های مرتبط با تولید موسیلاژ ریشه، ارزیابی عملکرد ارقام با ترشح موسیلاژ بالا در شرایط مزرعه، و مطالعات بلندمدت بر پویایی جامعه میکروبی پیشنهاد می‌شود.

شفاف‌سازی استفاده از هوش مصنوعی

در مراحل مختلف پژوهش حاضر اعم از ایده‌پردازی، طراحی، جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها، نگارش متن، ویرایش یا ترجمه، از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نشده‌است.

منابع مورد استفاده

References

- Afridi, M. S., Kumar, A., Javed, M. A., Dubey, A., de Medeiros, F. H. V., & Santoyo, G. (2024). Harnessing root exudates for plant microbiome engineering and stress resistance in plants. *Microbiological Research*, 279, 127564. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127564>
- Ahmad, M. N., Anuar, M. I., Abd Aziz, N., & Murdi, A. A. (2025). Function and application of Soil Electrical Conductivity (EC) sensor in agriculture: A Review. *Advances in Agricultural and Food Research Journal*, 6(1). <https://doi.org/13/06877/aafrj.a0000552>
- Ahmed, M. A., Kroener, E., Holz, M., Zarebanadkouki, M., & Carminati, A. (2014). Mucilage exudation facilitates root water uptake in dry soils. *Functional Plant Biology*, 41(11), 1129–1137. <https://doi.org/10.1071/FP14007>
- Akbar, Z., Akbar, W. A., Irfan, M., Rahim, H. U., Khan, U., Saleem, A., ... & Khan, K. (2024). Comparative effects of organic and inorganic amendments on heavy metal co-contaminated soil remediation, reducing heavy metal bioavailability and enhancing nutrient accessibility for maize growth. *Land Degradation & Development*, 35(16), 4741–4753. <https://doi.org/10.1002/ldr.5254>
- Alexander, M. (1982). Most-probable-number method for microbial populations. Pp. 1467–1472. In: A.L. Page (Ed.) *Methods of Soil Analysis: Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Agronomy Monographs 9, American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc. Madison, USA. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed>
- Amarasinghe, A., Chen, C., Van Zwieten, L., & Rashti, M. R. (2024). The role of edaphic variables and management practices in regulating soil microbial resilience to drought-a meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 912, 169544. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169544>
- Amiri, M., & Ghasemi, A. (2025). Investigation of the impact of heavy metal lead on the geotechnical and environmental properties of marl soils with a special focus on desorption behavior in industrial areas. *Results in Engineering*, 27, 105957. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105957>
- Babur, E., Ozlu, E., & Uslu, O.S. (2025). Soil respiration, microbial biomass, and stoichiometry within riparian buffers and adjacent land use. *Scientific Reports*, 15(1), Article 40445. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-23152-2>
- Barra Caracciolo, A., & Terenzi, V. (2021). Rhizosphere microbial communities and heavy metals. *Microorganisms*, 9(7), 1462. <https://doi.org/13/0390/microorganisms9071462>
- Borgulat, J., Łukasik, W., Borgulat, A., Nadgórska-Socha, A., & Kandziora-Ciupa, M. (2021). Influence of lead on the activity of soil microorganisms in two Beskid landscape parks. *Environmental monitoring & assessment*, 193(12), 839. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09503-2>
- Boudjabi, S., Ababsa, N., & Chenchouni, H. (2023). Enhancing soil resilience and crop physiology with biochar application for mitigating drought stress in durum wheat (*Triticum durum* L.). *Heliyon*, 9(12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22909>

- Chen, Y., Shen, Z., & Li, X. (2004). The use of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) in the phytoremediation of soils contaminated with heavy metals. *Applied Geochemistry*, 19(10), 1553-1565. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.02.003>
- Dane, J. H., & Topp, C. G. (Eds.). (2020). *Methods of soil analysis*, Part 4: *Physical methods*. SSSA Book Series 5.4, American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc. Madison, USA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4>
- Diehl, D., Knott, M., & Schaumann, G. E. (2023). Purification effects show seed and root mucilage's ability to respond to changing rhizosphere conditions. *Biopolymers*, 114(8), Article e23561. <https://doi.org/10.1002/bip.23561>
- Fathinejad, A., Mohammadi, M. H., Etesami, H., & Zarebanadkouki, M. (2024). Mucilage effects on the soil water characteristics curve, mechanical consistency, and penetration resistance of compacted heavy and light texture soils. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3702178/v1>
- Gee, G. W., & Or, D. (2002). Particle-size analysis. Pp. 255-293. In: Dane, J.H., & Topp, C.G. (Eds.) *Methods of soil analysis: Part 4. Physical methods*. SSSA Book Series 5.4, American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc. Madison, USA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c12>
- Hayat, F., Abdalla, M., & Munir, M. U. (2021). Effect of chia seed mucilage on the rhizosphere hydraulic characteristics. *Sustainability*, 13(6), 3303. <https://doi.org/10.3390/su13063303>
- Jahanbakhsh, M., Fard, R. F., Karimi, B., Bashardoust, P., Fahiminia, M., & Yari, A. (2023). Health risk assessment of lead pollution from air and soil in the biggest special economic zone of Iran. *Research Square Platform LLC*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3017130/v1>
- Joergensen, R. G., Hemkemeyer, M., Beule, L., Iskakova, J., Oskonbaeva, Z., Rummel, P. S., ... & Wichern, F. (2024). A hitchhiker's guide: estimates of microbial biomass and microbial gene abundance in soil. *Biology & Fertility of Soils*, 60(4), 457-470. <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01810-3>
- Kemper, W.D. and Rosenau, R.C. (1986). Aggregate stability and size distribution. Pp. 425-460. In: Klute A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*. Second Edition, SSSA Book Series 5.1, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, WI, USA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>
- Khan, N., Ali, S., Shahid, M. A., Mustafa, A., Sayyed, R. Z., & Curá, J. A. (2021). Insights into the interactions among roots, rhizosphere, and rhizobacteria for improving plant growth and tolerance to abiotic stresses: a review. *Cells*, 10(6), 1551. <https://doi.org/10.3390/cells10061551>
- Kroener, E., Holz, M., Zarebanadkouki, M., Ahmed, M., & Carminati, A. (2018). Effects of mucilage on rhizosphere hydraulic functions depend on soil particle size. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 1-11. <https://doi.org/10.2136/vzj2017.03.0056>
- Krzyżak, J., Rusinowski, S., Sitko, K., Szada-Borzyszkowska, A., Stec, R., Janota, P., ... & Pogrzeba, M. (2023). The effect of combined drought and trace metal elements stress on the physiological response of three *Miscanthus* hybrids. *Scientific Reports*, 13(1), 10452. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37564-5>
- Kuang, H., Wu, B., Peng, F., Yu, Y., Ma, X., & Shangguan, Y. (2025). Sustainable remediation of heavy metal contaminated soil through phytostabilization with the in-situ immobilization by mercapto-based palygorskite. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1659418. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1659418>

- Lavallee, J. M., Chomel, M., Alvarez Segura, N., De Castro, F., Goodall, T., Magilton, M., ... & Bardgett, R. D. (2024). Land management shapes drought responses of dominant soil microbial taxa across grasslands. *Nature Communications*, 15(1), 29. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43864-1>
- Lehmann, A., Zheng, W., & Rillig, M. C. (2017). Soil biota contributions to soil aggregation. *Nature ecology & evolution*, 1(12), 1828-1835. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0344-y>
- Liu, F. (2015). *Electrical Conductivity in Soils: A Review*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4868.2964>
- Manzoor, M. Z., Sarwar, G., Alamery, S., Ibrahim, M., Sami, A., Ahmed, B., ... & Ullah, I. (2024). Efficacy of various amendments for immobilization of potentially toxic elements in wastewater contaminated soils. *Scientific Reports*, 14(1), 17350. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65686-x>
- McBride, M. B. (1994). Environmental chemistry of soils.
- Moore, F., Dehghani, S., & Keshavarzi, B. (2014). Characterization of soil contamination in Miduk mining district, SW Iran. *Soil & Sediment Contamination: An International Journal*, 23(6), 614-627. <https://doi.org/10.1080/15320383.2014.856856>
- Muñoz, L. A., Cobos, A., Diaz, O., & Aguilera, J. M. (2013). Chia seed (*Salvia hispanica*): an ancient grain and a new functional food. *Food reviews international*, 29(4), 394-408. <https://doi.org/10.1080/87559129.2013.818014>
- Nazari, M., Bickel, S., Benard, P., Mason-Jones, K., Carminati, A., & Dippold, M. A. (2022). Biogels in soils: plant mucilage as a biofilm matrix that shapes the rhizosphere microbial habitat. *Frontiers in Plant Science*, 12, 798992. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.798992>
- Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1996). Total carbon, organic carbon and organic matter. Pp. 961–1010. In: Sparks D.L., Page A.L., Helmke P.A., Loeppert R.H., Soltanpour P.N., Tabatabai M.A., Johnston C.T. and Sumner M.E. (Eds). *Methods of Soil Analysis*. Part 3. Chemical Methods. Soil Science Society of America Book Series 5, Madison, USA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34>
- Omar, M. D. M., Shitindi, M. J., Massawe, B. H., Pedersen, O., Meliyo, J. L., & Fue, K. G. (2024). Modeling the electrical conductivity relationship between saturated paste extract and 1: 2.5 dilution in different soil textural classes. *Frontiers in Soil Science*, 4, 1421661. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2024.1421661>
- Pandey, B., Suthar, S., & Chand, N. (2022). Effect of biochar amendment on metal mobility, phytotoxicity, soil enzymes, and metal-uptakes by wheat (*Triticum aestivum* L.) in contaminated soils. *Chemosphere*, 307, 135889. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135889>
- Pérez, D. I. G., Mizser, S., Horváth, R., & Tózsér, D. (2026). Do soil amendments have a significant influence on element accumulation in plant organs? A meta-analysis. *Journal of Plant Growth Regulation*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s00344-026-12095-1>
- Reddy, M. S., Basha, S., Joshi, H. V., & Ramachandraiah, G. (2005). Seasonal distribution and contamination levels of total PHCs, PAHs and heavy metals in coastal waters of the Alang–Sosiya ship scrapping yard, Gulf of Cambay, India. *Chemosphere*, 61(11), 1587-1593. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.04.093>
- Roskopf, U., Uteau, D., & Peth, S. (2022). Effects of mucilage concentration at different water contents on mechanical stability and elasticity in a loamy and a sandy soil. *European Journal of Soil Science*, 73(1), e13189. <https://doi.org/10.1111/ejss.13189>
- Sauvé, S., Hendershot, W., & Allen, H. E. (2000). Solid–solution partitioning of metals in contaminated soils: Dependence on pH, total metal burden, and organic matter.

- Environmental Science & Technology*, 34(7), 1125–1131.
<https://doi.org/10.1021/es9907764>
- Serrani, D., Ajmone-Marsan, F., Corti, G., Cocco, S., Cardelli, V., & Adamo, P. (2022). Heavy metal load and effects on biochemical properties in urban soils of a medium-sized city, Ancona, Italy. *Environmental Geochemistry & Health*, 44(10), 3425-3449.
<https://doi.org/10.1007/s10653-021-01088-8>
- Shahbazi, K., Fathi-Gerdelidani, A. and Marzi, M., (2022). Investigation of the status of heavy metals in soils of Iran: A comprehensive and critical review of reported studies. *Iranian Journal of Soil & Water Research*, 53(5), 1163-1212. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.341586.669245>
- Shahbazi, K., Marzi, M., & Rezaei, H. (2020). Heavy metal concentration in the agricultural soils under the different climatic regions: a case study of Iran. *Environmental Earth Sciences*, 79(13), 324. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09072-6>
- Shahid, M., Khalid, S., Abbas, G., Shahid, N., Nadeem, M., Sabir, M., ... & Dumat, C. (2015). Heavy metal stress and crop productivity. pp. 1-25. In: *Crop production and global environmental issues*. Springer International Publishing, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-23162-4_1
- Shu, X., He, J., Zhou, Z., Xia, L., Hu, Y., Zhang, Y., ... & Wang, C. (2022). Organic amendments enhance soil microbial diversity, microbial functionality and crop yields: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 829, 154627.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154627>
- Soares, M., Rabow, S., & Rousk, J. (2024). Can heavy metal pollution stress reduce microbial carbon-use efficiencies? *Soil Biology & Biochemistry*, 195, 109458.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109458>
- Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., & Loeppert, R. H. (Eds.). (2020). Methods of soil analysis, part 3: *Chemical methods*. John Wiley & Sons.
<https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3>
- Sparks, D. L., Singh, B., & Siebecker, M. G. (2022). *Environmental soil chemistry*. 3rd Ed. Elsevier.
- Stevenson, F. J. (1994). *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. John Wiley & Sons.
- Suarez, D. L. (1981). Relation between pHc and sodium adsorption ratio (SAR) and an alternative method of estimating SAR of soil or drainage waters. *Soil Science Society of America Journal*, 45(3), 469-475.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500030005x>
- Szili-Kovács, T., & Takács, T. (2024). Microbial biomass and rhizosphere soil properties in response to heavy metal-contaminated flooding. *Agriculture*, 14(5), 756.
<https://doi.org/10.3390/agriculture14050756>
- Teletos, E., Tsiakmakis, K., Hatzopoulos, A. T., & Stefanou, S. (2025). Development of a Low-Cost Measurement System for Soil Electrical Conductivity and Water Content. *AgriEngineering*, 7(10), 329. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7100329>
- Walkley, A. and Black, I. A. (1934). An examination of the dictagraph method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-38.
- Wang, Z., Yun, S., An, Y., Shu, L., Li, S., Sun, K., & Zhang, W. (2025). Effect of fungicides on soil respiration, microbial community, and enzyme activity: A global meta-analysis (1975–2024). *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 289, 117433.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117433>

- Warren, C. R., Rabbi, S. M., & Young, I. M. (2026). Mucilage addition increases aggregate stability and tolerance of microbes to soil drying. *Plant & Soil*, 1-19.
<https://doi.org/10.1007/s11104-026-08585-6>
- Wu, Y., Wang, X., Zhang, L., Zheng, Y., Liu, X., & Zhang, Y. (2023). The critical role of biochar to mitigate the adverse impacts of drought and salinity stress in plants. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1163451. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1163451>
- Wyszkowska, J., Boros-Lajszner, E., & Kucharski, J. (2024). The impact of soil contamination with lead on the biomass of maize intended for energy purposes, and the biochemical and physicochemical properties of the soil. *Energies*, 17(5), 1156.
<https://doi.org/10.3390/en17051156>
- Zhao, Z., Wang, Y., Kong, L., Zhao, L., Li, Y., He, T., ... & Li, B. (2025). Response of soil microbial community composition and function to prolonged heavy metal exposure. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(8), 883.
<https://doi.org/10.1007/s10661-025-13345-7>
- Zhong, Q., Cruz-Paredes, C., Zhang, S., & Rousk, J. (2021). Can heavy metal pollution induce bacterial resistance to heavy metals and antibiotics in soils from an ancient land-mine? *Journal of Hazardous Materials*, 411, Article 124962.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124962>
- Zhu, X., Xiong, G., Nie, H., Miao, A., Yu, G., Wang, Y., ... & Wu, J. (2024). Patterns of electrical properties change of heavy metal-organic compound contaminated media in soil-groundwater systems: From laboratory experiments to site application. *Science of The Total Environment*, 945, 174126. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174126>
- Zhuang, W., Li, Y., Kang, X., Yan, L., Zhang, X., Yan, Z., ... & Che, R. (2024). Changes in soil oxidase activity induced by microbial life history strategies mediate the soil heterotrophic respiration response to drought and nitrogen enrichment. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1375300. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1375300>
- Zolotareva, O. A., & Plekhanov, I. O. (2024). Changes in the cellulolytic activity and microbial respiration of soils of different types under conditions of contamination with heavy metals. *Agricultural Chemistry*, (2), 70-78.
<https://doi.org/10.1016/S0002188124020086>