

Soil resistance improvement against wind erosion by bacterium inoculation and addition of some modifiers

Maryam Dehghanpour¹, Naeimeh Enayatizamir^{*2}, Ahmad Landi³, Heidar Ghafari⁴

¹ Ph.D. Student, Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

² Professor, Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

³ Professor, Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

⁴ Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Extended Abstract

Introduction

Improving soil mechanical properties requires sustainable materials, particularly in regions affected by wind erosion. Khuzestan Province, Iran, experiences significant dust storms, making erosion control a pressing concern. This study explores the potential of plant growth-promoting bacteria and biopolymers to enhance soil stability. Chitosan and lignosulfonate were examined for their ability to protect sandy and silt-loam soils. Chitosan, a positively charged biopolymer, strengthens soil by adsorption, film formation, and particle bonding, yet remains underutilized in erosion control. Lignosulfonate, a negatively charged byproduct of the wood industry, improves soil cohesion through metal ion coordination, offering an environmentally friendly stabilization method.

Materials and Methods

Soil samples with a sandy texture were collected from the surface layer of critical wind erosion zones in southeastern Ahvaz (48°59'N, 31°12'E), while silty-loam textured soil was obtained from another location (48°51'N, 31°4'E). The experiment followed a completely randomized design for each soil type. Six treatments were applied: control (no treatment), bacterial inoculation with *Enterobacter cloacae*, calcium lignosulfonate (2% w/v), chitosan (2% w/v), a combination of calcium lignosulfonate and bacteria, and a mix of chitosan and bacteria. Metal containers (50 × 30 × 3 cm) were filled with 7–8 kg of soil, and bacterial suspension (1.5×10^6 CFU/ml) was separately sprayed onto the soil surface. Chitosan dissolved at a concentration of 3% by weight in citric acid and lignosulfonate in water were sprayed onto the soil surface. The samples were then stored for 60 days. A wind tunnel was used to assess the impact of treatments on soil wind erosion. After the experiment, trays containing soil samples were weighed using a digital scale, and the weight loss compared to the initial weight was recorded as total soil loss. Soil penetration and impact resistance were measured, and aggregate stability was evaluated using the dry-sieving method. Additionally, the erosion-susceptible particle fraction (EF) and the mean weighted diameter (MWD) of aggregates were calculated.

Results and Discussion

The analysis of variance for silty-loam and sandy soils revealed a significant impact of the treatments on the measured characteristics. Tukey's test confirmed notable differences among treatments in terms of penetration resistance, impact resistance, mean weighted diameter (MWD), and erosion-susceptible fraction (EF) at the 5% significance level. In silty-loam soil, the chitosan-bacteria treatment resulted in a 3.8-fold increase in penetration resistance, followed by the lignosulfonate-bacteria treatment, which showed a 3.47-fold increase compared to the control. Across both soil types, the penetration resistance increased by 2.85-fold relative to the control. Regarding impact resistance, treatments with chitosan-bacteria, as well as lignosulfonate-bacteria, led to a reduction of 92% and 72% in loamy-silty soil, respectively, while in sandy soil, the reductions were 61% and 67% compared to the control. The MWD of soil aggregates increased significantly in response to chitosan-bacteria and lignosulfonate-bacteria treatments. In silty-loam soil, these treatments enhanced MWD by 2.7 and 2.6 times, respectively, while in sandy soil, the increases were 3.6 and 3.4 times compared to the control. The EF decreased across all treatments. In silty-loam soil, the lowest EF values were observed in the chitosan-bacteria and lignosulfonate-bacteria treatments, measuring 53.1% and 54.8%, respectively. In sandy soil, these values were slightly higher, at 62.9% and 63.05%. The comparison of means revealed that soil loss in silty-loam soil was completely eliminated in the chitosan-bacteria and lignosulfonate-bacteria treatments. In chitosan, lignosulfonate, and bacteria treatments, soil loss decreased by 82%, 80%, and 69%, respectively, compared to the control. Similarly, in sandy soil, soil loss was reduced by 87%, 86%, 74%, 73%, and 53% in the chitosan-bacteria, lignosulfonate-bacteria, chitosan, lignosulfonate, and bacteria treatments, respectively. A positive correlation was observed between MWD and penetration resistance, whereas negative correlations were found between MWD and impact resistance, EF, and

soil loss in both soil types. Additionally, microbial biomass carbon increased across treatments, with the highest values recorded in the chitosan-bacteria treatment—2.7 times higher than the control in silty-loam soil and 2.9 times higher in sandy soil.

Conclusion

The findings indicate that integrating chitosan or lignosulfonate with *E. cloacae* significantly improved soil resistance to wind erosion compared to the control. These treatments enhanced penetration resistance and MWD while effectively reducing EF and soil loss. In particular, beneficial microorganisms and lignosulfonate offer practical benefits, as they can be easily applied using spraying equipment. However, further field studies are necessary to facilitate large-scale implementation.

Keywords: chitosan, calcium lignosulfonate, MWD, penetration resistance, soil loss.

Article Type: Research Article

Acknowledgement

The authors would like to express their gratitude to the Research Affairs Office of the Shahid Chamran University of Ahvaz for its support (SCU.AS1402.248).

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Maryam Dehghanpour: Conceptualization, experiment execution, writing the first draft of the article; **Naeimeh Enayatizamir:** Supervision, statistical analyses, editing and reviewing the article, controlling the results; **Ahmad Landi:** Supervision, Conceptualization, and reviewing the manuscript; **Heidar Ghafari:** Conceptualization, statistical analyses, and reviewing the manuscript.

*Corresponding Author, E-mail: n.enayatizamir@scu.ac.ir

Citation: Dehghanpour, M., Enayatizamir, N., Landi, A., & Ghafari, H. (2025). Soil resistance improvement against wind erosion by bacterium inoculation and addition of some modifiers. *Water and Soil Management and Modelling*, 5(2), 309-322

doi: 10.22098/mmws.2025.16806.1561

Received: 17 February 2025, Received in revised form: 26 May 2025, Accepted: 27 May 2025, Published online: 22 June 2025

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 2, pp. 309-322.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





بهبود مقاومت خاک در برابر فرسایش بادی با تلقیح باکتری و افزودن برخی اصلاح-کننده‌ها

مریم دهقان پور^۱، نعیمه عنایتی ضمیر^{۲*}، احمد لندی^۳، حیدر غفاری^۴

^۱ دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
^۲ استاد، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
^۳ استاد، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
^۴ استادیار، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

چکیده

فرسایش خاک توسط باد عامل مهم ایجاد گرد و غبار در مناطق خشک و نیمه‌خشک شناخته شده است و تهدید جدی برای محیط زیست و سلامت انسان ایجاد می‌کند. پژوهش حاضر با هدف استفاده از باکتری محرک رشد گیاه و بیوپلیمرهای کیتوسان و لیگنوسولفونات برای تثبیت خاک شنی و لوم‌سیلتی انجام شده است. دو نوع خاک با بافت شنی و بافت لوم سیلتی از لایه سطحی مناطق بحرانی فرسایش بادی جنوب شرق اهواز تهیه شد. آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی در دو نوع خاک انجام شد. تیمارها شامل کنترل (بدون تیمار)، تلقیح باکتریایی (*Enterobacter cloacae*)، لیگنوسولفونات کلسیم، کیتوسان، لیگنوسولفونات کلسیم + باکتری و کیتوسان + باکتری بود. نمونه‌ها در شرایط محیطی با حفظ رطوبت در حد ۷۰ تا ۷۵ درصد وزنی به مدت ۶۰ روز نگهداری و سپس برای بررسی اثر تیمارها بر فرسایش بادی خاک، از تونل باد با میانگین سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه استفاده شد. مقاومت فروروی و ضربه‌ای خاک، پایداری خاک‌دانه‌ها، ذرات حساس به فرسایش و کربن زیست‌توده میکروبی خاک اندازه‌گیری شدند. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تیمارها بر ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در هر دو خاک لوم سیلتی و شنی معنی‌دار بود. مقاومت فروروی در خاک لوم سیلتی و در تیمار کیتوسان به همراه باکتری به مقدار ۳/۸ برابر و پس از آن در تیمار لیگنوسولفونات به همراه باکتری به مقدار ۳/۴۷ برابر شاهد بود؛ این افزایش در خاک شنی بدون اختلاف معنی‌دار در هر دو تیمار به مقدار ۲/۸۵ برابر شاهد بود. مقاومت ضربه‌ای در تیمارهای کیتوسان به همراه باکتری و لیگنوسولفونات به همراه باکتری در خاک لوم سیلتی به ترتیب ۹۲ و ۷۲ درصد و در خاک شنی به میزان ۶۱ و ۶۷ درصد نسبت به شاهد کاهش داشت. میانگین وزنی قطر خاک‌دانه در تیمارهای کیتوسان به همراه باکتری و لیگنوسولفونات به همراه باکتری در خاک لوم سیلتی به ترتیب ۲/۷ و ۲/۶ و در خاک شنی ۳/۶ و ۳/۴ نسبت به شاهد افزایش داشت. میزان هدررفت خاک در خاک لوم سیلتی در تیمارهای کیتوسان-باکتری و لیگنوسولفونات-باکتری صفر بود. کربن زیست‌توده میکروبی با اعمال تیمارها افزایش یافت به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار در تیمار کیتوسان به همراه باکتری در خاک لوم سیلتی و شنی به ترتیب ۲/۷ و ۲/۹ برابر شاهد بود. تیمارهای مورد اشاره منجر به کاهش فرسایش بادی شدند. برای توصیه استفاده از این ترکیبات در مقیاس وسیع، ضروری است که ابتدا به‌صورت پایلوت مورد آزمایش قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: کیتوسان، لیگنوسولفونات کلسیم، مقاومت فروروی، میانگین وزنی قطر خاک‌دانه، هدررفت خاک.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: n.enayatzamir@scu.ac.ir

استناد: دهقان پور، مریم، عنایتی ضمیر، نعیمه، لندی، احمد، و غفاری، حیدر (۱۴۰۴). بهبود مقاومت خاک در برابر فرسایش بادی با تلقیح باکتری و افزودن برخی اصلاح-کننده‌ها. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۵(۲)، ۳۲۲-۳۰۹.
doi: 10.22098/mmws.2025.16806.1561

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۶، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۲، صفحه ۳۰۹ تا ۳۲۲.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

خاک منبعی طبیعی است که برای تشکیل آن هزاران سال زمان نیاز است (Sulaeman and Westhoff, 2020). فرسایش بادی و تولید گرد و غبار از چالش‌های عمده مرتبط با تغییرات اقلیمی در جهان و به‌ویژه در خاورمیانه هستند. ایران در کمربند خشک و نیمه‌خشک قرار دارد؛ دو سوم ایران دارای شرایط بیابانی است (Kouchami-Sardoo et al., 2019; Rezaei et al., 2022) و به‌عنوان یک منشأ مهم گرد و غبار در این منطقه محسوب می‌شود. هر ساله میلیون‌ها تن خاک غنی و حاصلخیز به‌دلیل مدیریت نامناسب از بین می‌رود (Mohammadi et al., 2018). مهم‌ترین عوامل فرسایش خاک در ایران شامل استعداد و حساسیت خاک، تغییرات کاربری زمین، توسعه غیرضروری و نامناسب زیرساخت‌ها و بهره‌برداری غیرقانونی از منابع طبیعی هستند. فرسایش خاک توسط باد یکی از عوامل مهم ایجاد طوفان‌های گرد و غبار شناخته شده است. طوفان‌های گرد و غبار از سطح خاک‌های خشک توسط باد سطحی ایجاد می‌شوند. فرسایش بادی عمدتاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک که در آنجا بارندگی و پوشش گیاهی کم است، بادهای قوی و مکرر می‌وزد، رخ می‌دهد و مواد سطحی سست به راحتی توسط باد جابه‌جا می‌شوند (Alzahrani et al., 2024). حرکت ذرات گرد و غبار تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله سرعت بالای باد در سطح خاک، پوشش گیاهی کم، شرایط خشک خاک و مدیریت نادرست اراضی مانند چرای بیش از حد و جنگل‌زدایی قرار دارد. این عوامل فرسایش خاک و جدا شدن ذرات را تشدید می‌کنند و آنها را بیش‌تر در معرض حمل توسط باد قرار می‌دهند (Alsubhi et al., 2022). طوفان‌های گرد و غبار بیش از دو میلیارد نفر در سراسر جهان و تقریباً ۴۰ درصد از سطح زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهند و سالانه حدود دو میلیارد تن گرد و غبار را جابه‌جا می‌کنند و تهدیدی جدی برای محیط زیست و سلامت انسان ایجاد می‌کند (Middleton et al., 2021). این فرایندها خاک سطحی را تخریب می‌کنند، حاصلخیزی خاک را کاهش می‌دهند و موجب تشکیل تپه‌های شنی، مسدود کردن آبراه‌ها، دفن زمین‌های قابل کشت و ایجاد چالش‌های بزرگ اقتصادی و اجتماعی می‌شوند (Alsubhi et al., 2022).

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله اندازه ذرات خاک، پایداری خاک‌دانه‌ها، زبری سطح، کربن آلی و رطوبت خاک می‌توانند شدت فرسایش بادی را تحت تأثیر قرار دهند (Zamani and Mahmoodabadi, 2013; Sirjani et al., 2019).

برای بهبود خواص مکانیکی خاک‌ها، موادی مورد نیاز است که کم‌تر به محیط زیست آسیب برسانند. یک روش جدید و سازگار با محیط زیست برای بهبود خواص مکانیکی و هیدرولیکی خاک، استفاده از بیوپلیمرها است. بیوپلیمرها از منابع طبیعی تجدیدپذیر مانند گیاهان، پوسته‌های سخت‌پوستان، تخمیر میکروبی و سایر زیست‌توده‌ها به‌دست می‌آیند (Mosallanejad et al., 2017; Hataf et al., 2018). بیوپلیمرها مواد سازگار با محیط زیست هستند که به‌طور گسترده در حذف فلزات سنگین از آب، کاهش هدایت هیدرولیکی خاک، کنترل فرسایش و بهبود خاک استفاده می‌شوند (Chang et al., 2020). کیتوسان یک بیوپلیمر است که معمولاً از داستیلاسیون کیتین به‌دست می‌آید. کیتوسان از منابع مختلفی مانند میگو، خرچنگ، کریل، خرچنگ دریایی و لابستر ساخته می‌شود (Younes and Rinaudo, 2015). افزودن کیتوسان پتانسیل افزایش چسبندگی بین ذرات و بهبود قابل توجه خواص مکانیکی خاک شنی را دارد (et al., 2020). (Shariatmadari 2020). کاربرد کیتوسان برای تثبیت خاک به‌دلیل حلالیت بسیار ضعیف آن در آب که تا حدی بسته به وزن مولکولی، درجه داستیلاسیون و ساختار کریستالی تغییر می‌کند (Cho et al., 2000) و یا به‌دلیل نرخ بالای تجزیه زیستی آن محدود است (Adamczuk and Jozefaciuk, 2022).

در یک مطالعه، کیتوسان برای تثبیت شیارهای فرسایش‌یافته ناشی از آب استفاده شد. این ماده در آزمایشگاه توانست خاک را به‌خوبی پایدار کند، اما در شرایط طبیعی، تأثیر آن بیش‌تر در بخش ابتدایی شیار مشاهده شد. این اثر به‌دلیل پیوند قوی کیتوسان با ذرات خاک در نزدیکی محل استفاده توضیح داده می‌شود (Orts et al., 2000). لیگنوسولفونات^۱ یک پلیمر زیستی غیرسمی است که از صنایع چوب و کاغذ تولید می‌شود و در بهبود خاک کاربرد دارد (Verma et al., 2021). این ماده یک پلیمر آمورف مشتق از لیگنین به رنگ زرد قهوه‌ای روشن است که دارای پیوندهای عرضی و بار منفی خالص است و با یک یون فلزی پیوند تشکیل می‌دهد. هنگامی که به‌عنوان تثبیت‌کننده خاک استفاده می‌شود، خواص خاک بهبود می‌یابد. لیگنوسولفونات کلسیم هنگامی که در غلظت‌های کم استفاده می‌شود، به‌طور مؤثری ذرات خاک را سیمانی کرده و چسبندگی خاک و مقاومت کششی خاک را افزایش می‌دهد (Amulya et al., 2021). لیگنوسولفونات باعث افزایش pH و شکنندگی خاک نمی‌شود (Chen and Indraratna, 2015). افزودن لیگنوسولفونات به خاک ضریب فرسایش خاک و ضخامت لایه دوگانه رس را کاهش می‌دهد. لیگنوسولفونات هیچ تهدیدی برای پوشش گیاهی یا آلودگی

¹ Lignosulfonate

(Pirhadi et al., 2024) نگهداری شدند و در ادامه برخی از ویژگی‌های خاک مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. در صورت خشک شدن سطح خاک، آب مقطر بر روی سطح خاک اسپری شد. برای بررسی تأثیر تیمارها در تونل باد، خاک سینی‌ها پیش از انجام آزمایش تحت شرایط محیطی خشک شدند. برای بررسی تأثیر تیمارها بر میزان فرسایش بادی خاک از یک تونل باد با طول هشت متر و عرض ۰/۷ متر و یک فن دمنده مدل زیمنس 1LA5 با دور موتور ۳۵۲۵ rpm استفاده شد. سینی‌های حاوی نمونه‌های خاک به مدت پنج دقیقه در اتاق آزمون تونل باد (شکل ۱) قرار گرفتند (Nikseresht et al., 2020). در پایان آزمایش، سینی‌های حاوی نمونه خاک توسط ترازوی دیجیتالی وزن و مقدار کاهش وزن سینی‌ها نسبت به وزن اولیه به‌عنوان مقدار کل فرسایش (تلفات خاک) در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری مقاومت فروری^۱ خاک از دستگاه نفوذسنج دستی مدل ASTM D1558 در سه نقطه از سطح نمونه خاک استفاده شد. برای اندازه‌گیری مقاومت ضربه‌ای^۲ از یک میله با نوک مخروطی استفاده شد. با رها کردن میله به وزن ۱۵۰ گرم بر سطح خاک، میزان مقاومت به ضربه بررسی شد. اگر میله بیش از دو سانتی‌متر در خاک فرو رود، امتیاز صفر، تا دو سانتی‌متر فرو رود امتیاز یک، میله تا یک سانتی‌متر فرو رود امتیاز دو و اگر میله در خاک فرو نرود امتیاز چهار تعلق می‌گیرد (بی‌نام). میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها (رابطه ۱) و جزء حساس به فرسایش^۳ (رابطه ۲) توسط آزمون الک خشک به‌صورت دستی تعیین شد (Colazo et al., 2010).

$$MWD = \sum X_i \cdot W_i \quad (1)$$

$$EF = \frac{W_{<0.84 \text{ mm}}}{TW} \times 100 \quad (2)$$

در این روابط، X_i میانگین قطر، W و W_i وزن خاک‌دانه‌های باقی‌مانده روی هر الک و TW وزن خاک خشک است. جزء حساس به فرسایش، درصد خاک‌دانه‌های با قطر کوچکتر از ۰/۸۴ میلی‌متر است (Chepil, 1950). برای تعیین جزء حساس به فرسایش مقدار مشخصی از خاک در یک سری از الک‌ها با قطر ۰/۸۴، ۰/۴۲۵، ۰/۲۵، ۰/۱۵ و ۰/۰۷۵ میلی‌متر قرار گرفت. این سری الک‌ها به مدت ۳۰ ثانیه تکان داده شد. خاک باقی‌مانده بر روی هر الک جمع‌آوری و توزین شد. سپس از روی منحنی توزیع اندازه خاک‌دانه‌ها، درصد خاک‌دانه‌های کوچکتر از ۰/۸۴ میلی‌متر برای هریک از نمونه‌های خاک محاسبه شد (Ahmadi et al., 2011). تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها در هر دو نوع بافت در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار با استفاده از نرم‌افزار استاتستیک

آب‌های زیرزمینی به دلیل pH بالا ایجاد نمی‌کند (Verma et al., 2021).

استان خوزستان، واقع در جنوب غرب ایران، دارای هفت کانون فعال گرد و غبار است. کانون جنوب شرق اهواز با مساحت تقریبی ۱۱۲ هزار هکتار، به‌عنوان بزرگ‌ترین کانون فوق بحرانی گرد و غبار در استان خوزستان معرفی شده است (Heidarian et al., 2015). فرسایش بادی نه تنها موجب تخریب ساختار خاک و کاهش حاصل‌خیزی آن می‌شود، بلکه پیامدهای زیست‌محیطی گسترده‌ای نیز به دنبال دارد. از این رو، حفظ خاک در برابر فرسایش بادی در این مناطق ضروری است. در مطالعه حاضر از باکتری *Enterobacter cloacae*، کیتوزان و لیگنوسولفونات برای حفاظت از خاک در برابر فرسایش بادی استفاده شده است. استفاده از این ترکیبات، به‌عنوان اصلاح‌کننده‌های زیست‌سازگار، می‌تواند منجر به افزایش استحکام خاک، کاهش پراکندگی ذرات معلق و بهبود شرایط محیطی در مناطق بحرانی شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

خاک با بافت شنی از لایه سطحی مناطق بحرانی فرسایش بادی در جنوب شرق اهواز با مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه و ۵۹ دقیقه شمالی و ۳۱ درجه و ۱۲ دقیقه شرقی و بافت لوم‌سیلی با مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه و ۵۱ دقیقه شمالی و ۳۱ درجه و ۴ دقیقه شرقی تهیه شد. برخی ویژگی‌های خاک در جدول ۱ آورده شده است.

تیمارهای آزمایش شامل شاهد (بدون تیمار)، مایه‌زنی باکتری (*Enterobacter cloacae*)، لیگنوسولفونات کلسیم (دو درصد وزنی/حجمی)، کیتوسان (دو درصد وزنی/حجمی)، لیگنوسولفونات کلسیم+باکتری و کیتوسان+باکتری بود. مقدار معینی خاک (هشت کیلوگرم) در ظرف‌های فلزی با ابعاد ۳۰×۳۰×۵۰ سانتی‌متر ریخته شد. کشت تازه باکتری با جمعیت $10^8 \times 1/5$ CFU/ml در محیط نوترینت براث تهیه شد و بر اساس تیمار مربوطه با جمعیتی معادل $10^6 \times 1/5$ CFU/ml در آب مقطر اضافه و به‌طور جداگانه به هر یک از سینی‌ها اسپری شد به‌طوری‌که رطوبت خاک در حد ۷۵ درصد ظرفیت زراعی باشد. کیتوسان حل شده در اسید سیتریک (Wang et al., 2025; Adamczuk and Jozefaciuk, 2022) و لیگنوسولفونات در آب (Ding et al., 2018; Ding et al., 2022) به مقدار دو لیتر در مترمربع بر سطح خاک اسپری شدند. نمونه‌ها به مدت ۶۰ روز تحت شرایط محیطی

³ Erodible fraction

¹ Penetration resistance

² Impact resistance

نسخه ۱۰ انجام شد. مقایسه میانگین ها با استفاده از آزمون توکی (Tukey's HSD) انجام شد.

جدول ۱- برخی ویژگی های خاک های مورد مطالعه.

Table 1 Some properties of studied soils

بافت خاک	رس (درصد)	سیلت (درصد)	شن (درصد)	کربن آلی (درصد)	pH	ECe (دسی زیمنس بر متر)	کربنات کلسیم معادل
شنی	3.65	5.35	91	0.034	7.7	0.67	24
لوم سیلتی	6.36	56.35	37.29	0.29	7.3	14	25

شکل ۱- تصویر تونل باد و محل قرار گرفتن نمونه.

Table 1 Wind tunnel and the location of the sample.



۳- نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده ها در خاک لوم سیلتی و شنی نشان دهنده تأثیر معنی دار تیمارها بر ویژگی های اندازه گیری شده بود (جدول ۲).

جدول ۲- میانگین مربعات اثر تیمارها بر برخی ویژگی های اندازه گیری شده در خاک.

Table 2- The mean square of the effects of treatments on some measured soil properties.

لوم سیلتی							
منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین وزنی قطر خاک دانه	مقاومت فروروی	مقاومت برشی	هدررفت خاک	جزء حساس به فرسایش	کربن زیتوده میکروبی
تیمار	5	3.24**	36908.2**	2.0*	1690.6**	217.67*	956.92**
خطا	12	0.53	458.7	0.01	6.42	9.25	69.306
ضریب تغییرات	-	21	6.89	13.61	14.32	4.92	13.96
شنی							
تیمار	5	1.67**	10157.2**	1.47*	2263.9**	294.23*	872.17**
خطا	12	0.15	123.3	0.07	6.72	8.26	3.814
ضریب تغییرات	-	19.8	6.08	18.35	8.38	4.06	3.74

** و * نشان دهنده معناداری به ترتیب در سطح یک و پنج درصد است.

فروروی شد، به طوری که در خاک شنی این افزایش ۱/۹ برابر و در خاک لوم سیلتی ۲/۶ برابر تیمار شاهد بود. سایر تیمارها نیز در هر دو نوع خاک موجب افزایش معنی دار مقاومت فروروی نسبت به شاهد شدند، اما میزان این افزایش در تیمارهای ترکیبی بیش تر از تیمارهای منفرد بود.

نتایج به دست آمده نشان می دهد که مقاومت ضربه ای خاک تحت تأثیر تیمارهای مختلف به طور معنی داری کاهش یافته است. مقاومت ضربه ای در تیمارهای کیتوسان به همراه باکتری و لیگنوسولفونات به همراه باکتری در خاک لوم سیلتی به ترتیب ۹۲ و ۷۲ درصد و در خاک شنی به میزان ۶۱ و ۶۷ درصد نسبت به شاهد کاهش یافت (جدول ۳). بر اساس دستورالعمل ارزیابی

نتایج آزمون توکی نشان داد که تیمارهای مختلف تأثیر معنی داری بر مقاومت فروروی در هر دو نوع خاک لوم سیلتی و شنی دارند (جدول ۳). کمترین مقاومت فروروی در هر دو نوع خاک در تیمار شاهد و بیشترین مقدار در تیمار کیتوسان به همراه باکتری و پس از آن لیگنوسولفونات به همراه باکتری بود. در خاک لوم سیلتی، مقاومت فروروی در تیمار کیتوسان به همراه باکتری ۳/۸ برابر و در تیمار لیگنوسولفونات به همراه باکتری ۳/۴۷ برابر تیمار شاهد بود؛ که اختلاف معنی داری با هم نداشتند. این افزایش در خاک شنی بدون اختلاف معنی دار در تیمارهای کیتوسان به همراه باکتری و لیگنوسولفونات به همراه باکتری ۲/۸۵ برابر شاهد بود. تیمار باکتری به تنهایی نیز موجب افزایش معنی دار مقاومت

باکتری، لیگنوسولفونات به همراه باکتری، کیتوسان، لیگنوسولفونات، باکتری بود (جدول ۳). نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که اعمال تیمارهای کیتوسان به همراه باکتری و لیگنوسولفونات به همراه باکتری به طور قابل توجهی موجب کاهش جزء حساس به فرسایش در هر دو نوع خاک لوم سیلتی و شنی شد (جدول ۳).

کیفیت خاک، با توجه به این که میله حداکثر تا یک سانتی متر در خاک فرو رفته است امتیاز ۲ به این تیمارها تعلق گرفت و از نظر کیفیت خوب ارزیابی شد. میانگین وزنی قطر خاکدانه در تیمارهای کیتوسان به همراه باکتری و لیگنوسولفونات به همراه باکتری در خاک لوم سیلتی به ترتیب ۲/۷ و ۲/۶ و در خاک شنی ۳/۴ و ۳/۶ نسبت به شاهد افزایش یافت. تأثیر تیمارها بر افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه به ترتیب به صورت کیتوسان به همراه

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر تیمارها بر ویژگی‌های مورد مطالعه (الف- خاک لوم سیلتی، ب- خاک شنی). ستون‌های با حروف مشابه از لحاظ آماری در سطح پنج درصد با آزمون توکی اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

Table 3- Comparison of the mean effect of treatments on studied properties. Columns with the same letters are not statistically different at the 5% level with Tukey's test. Data are means $\pm$ standard deviation, n = 3.

الف- خاک شنی	میانگین وزنی قطر خاکدانه (میلی‌متر)	مقاومت فروروی (کیلو پاسکال)	مقاومت ضربه‌ای (سانتی‌متر)	جزء حساس به فرسایش (درصد)	هدررفت خاک (گرم)	کربن زیتوده میکروبی (میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم)
شاهد	0.76 $\pm$ 0.06	78.00 $\pm$ 5.30	2.7 $\pm$ 0.091	88.79 $\pm$ 1.63	83.66 $\pm$ 2.70	23.85 $\pm$ 1.89
کیتوزان	2.22 $\pm$ 0.57	213.50 $\pm$ 7.72	1.08 $\pm$ 0.14	66.80 $\pm$ 0.18	20.83 $\pm$ 1.66	59.23 $\pm$ 1.39
لیگنوسولفونات کلسیم	2.04 $\pm$ 0.26	209.10 $\pm$ 9.25	1.43 $\pm$ 0.04	67.50 $\pm$ 2.42	22.03 $\pm$ 0.73	49.56 $\pm$ 1.34
باکتری	1.56 $\pm$ 0.04	149.23 $\pm$ 3.35	2.00 $\pm$ 0.28	75.19 $\pm$ 0.45	38.33 $\pm$ 1.31	44.02 $\pm$ 1.37
کیتوزان+باکتری	2.78 $\pm$ 0.37	222.9 $\pm$ 4.24	0.85 $\pm$ 0.28	62.9 $\pm$ 1.97	10.16 $\pm$ 0.78	70.73 $\pm$ 2.36
لیگنوسولفونات کلسیم +باکتری	2.64 $\pm$ 0.31	222.5 $\pm$ 6.63	1.00 $\pm$ 0.19	63.05 $\pm$ 1.96	11.50 $\pm$ 1.45	65.74 $\pm$ 1.7

ب- خاک لوم سیلتی	میانگین وزنی قطر خاکدانه (میلی‌متر)	مقاومت فروروی (کیلو پاسکال)	مقاومت ضربه‌ای (سانتی‌متر)	جزء حساس به فرسایش (درصد)	هدررفت خاک (گرم)	کربن زیتوده میکروبی (میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم)
شاهد	1.52 $\pm$ 0.00	114.78 $\pm$ 15.90	2.4 $\pm$ 0.096	76.4 $\pm$ 3.13	63.66 $\pm$ 2.40	30.36 $\pm$ 1.89
کیتوزان	4.01 $\pm$ 0.27	309.92 $\pm$ 11.92	0.21 $\pm$ 0.028	59.2 $\pm$ 0.17	11.0 $\pm$ 1.52	64.08 $\pm$ 1.7
لیگنوسولفونات کلسیم	3.29 $\pm$ 0.32	307.73 $\pm$ 7.95	0.83 $\pm$ 0.00	60.8 $\pm$ 0.54	12.16 $\pm$ 0.0	54.20 $\pm$ 1.22
باکتری	2.81 $\pm$ 0.43	300.73 $\pm$ 7.95	1.12 $\pm$ 0.096	66.1 $\pm$ 0.50	19.33 $\pm$ 1.83	55.00 $\pm$ 2.8
کیتوزان+باکتری	4.22 $\pm$ 0.34	436.18 $\pm$ 9.94	0.18 $\pm$ 0.06	53.1 $\pm$ 1.42	0.0 $\pm$ 0.0	82.56 $\pm$ 2.3
لیگنوسولفونات کلسیم +باکتری	4.1 $\pm$ 0.76	396 $\pm$ 17.23	0.65 $\pm$ 0.07	54.8 $\pm$ 2.46	0.0 $\pm$ 0.0	71.56 $\pm$ 2.1

باکتری مشاهده شد، به طوری که در خاک لوم سیلتی ۲/۷ برابر و در خاک شنی ۲/۹ برابر بیش تر از شاهد بود. تیمار لیگنوسولفونات به همراه باکتری نیز موجب افزایش ۲/۵ برابری نسبت به شاهد در خاک لوم سیلتی و ۲/۷ برابری در خاک شنی شد. تیمارهای جداگانه کیتوسان و لیگنوسولفونات نیز موجب افزایش کربن زیست توده میکروبی شدند؛ اما تأثیر آن‌ها نسبت به ترکیب این مواد با باکتری کمتر بود. این نتایج نشان می‌دهد که ترکیب پلیمرهای استفاده شده و میکروارگانیسم‌ها تأثیر هم‌افزایی در بهبود پایداری خاک دارد.

مقایسه ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در دو خاک با آزمون T-Test جفت شده (جدول ۴) نشان داد که میانگین وزنی قطر خاکدانه، مقاومت فروروی و کربن زیست توده میکروبی در خاک شنی نسبت به خاک لوم سیلتی کمتر بود؛ اما مقاومت ضربه‌ای، هدررفت خاک و جزء حساس به فرسایش در خاک شنی بیش تر از خاک لوم سیلتی بود.

این کاهش در تیمارهای ذکر شده در خاک لوم سیلتی، به ترتیب ۵۳/۱ و ۵۴/۸ درصد و در خاک شنی ۶۲/۹ و ۶۳/۰۵ درصد بود. این تیمارها بیش ترین میانگین وزنی قطر خاکدانه را نیز داشتند. مقدار هدررفت خاک در تیمارهای کیتوسان به همراه باکتری و لیگنوسولفونات به همراه باکتری در خاک لوم سیلتی به صفر رسید. سایر تیمارها نیز کاهش معنی‌داری را در میزان هدررفت خاک نشان دادند؛ به طوری که در تیمارهای کیتوسان، لیگنوسولفونات و باکتری به ترتیب ۸۲، ۸۰ و ۶۹ درصد کاهش نسبت به شاهد مشاهده شد. در خاک شنی، تیمارهای کیتوسان به همراه باکتری، لیگنوسولفونات به همراه باکتری، کیتوسان، لیگنوسولفونات و باکتری به ترتیب ۸۷، ۸۶، ۷۴، ۷۳ و ۵۳ درصد کاهش هدررفت خاک نسبت به شاهد داشتند (جدول ۳).

نتایج مقایسه میانگین‌های کربن زیست توده میکروبی نشان داد که اعمال تیمارها موجب افزایش این شاخص شدند. بیش ترین مقدار کربن زیست توده میکروبی در تیمار کیتوسان به همراه

جدول ۴- مقایسه ویژگی های دو نوع خاک با استفاده از آزمون T-Test جفت شده.

Table 4 Comparison of the properties of two soil types using a paired T-Test.

ویژگی	نوع خاک	میانگین	میانگین	t value
میانگین وزنی قطر خاکدانه	خاک شنی	2.00	خاک لوم سیلتی	3.32
مقاومت فروروی	خاک شنی	182.57	خاک لوم سیلتی	310.87
مقاومت ضربه ای	خاک شنی	1.5054	خاک لوم سیلتی	0.9019
جزء حساس به فرسایش	خاک شنی	70.73	خاک لوم سیلتی	61.77
هدررفت خاک	خاک شنی	31.00	خاک لوم سیلتی	17.69
کربن زیتوده میکروبی	خاک شنی	52.19	خاک لوم سیلتی	59.64

** معنی دار در سطح آماری یک درصد

بررسی ضرایب همبستگی پیرسون نشان داد که همبستگی مثبتی بین میانگین وزنی قطر خاکدانه با مقاومت فروروی وجود دارد، درحالی که این ویژگی با مقاومت ضربه ای، جزء حساس به فرسایش و هدررفت خاک در هر دو نوع خاک همبستگی منفی نشان داد. مقدار هدررفت خاک با میانگین وزنی قطر خاکدانه و مقاومت فروروی همبستگی منفی و با مقاومت ضربه ای و جزء

حساس به فرسایش همبستگی مثبت داشت. علاوه بر این، کربن زیتوده میکروبی خاک با میانگین وزنی قطر خاکدانه و مقاومت فروروی خاک همبستگی مثبت و با مقاومت ضربه ای، جزء حساس به فرسایش و هدررفت خاک همبستگی منفی داشت که نشان دهنده تأثیر مثبت میکروارگانیسم های خاک در بهبود پایداری خاکدانه و کاهش فرسایش بادی خاک است (جدول ۵).

جدول ۵- ضرایب همبستگی پیرسون بین ویژگی های مورد مطالعه.

Table 5 Pearson correlation coefficients between the studied properties.

ویژگی	نوع خاک	میانگین وزنی قطر خاکدانه	مقاومت فروروی	مقاومت ضربه ای	جزء حساس به فرسایش	هدررفت خاک	کربن زیتوده میکروبی
میانگین وزنی قطر خاکدانه	خاک شنی	1	0.73**	-0.62**	-0.76**	-0.79**	0.78**
خاکدانه	خاک لوم سیلتی	1	0.7**	-0.81**	-0.80**	-0.83**	0.81**
مقاومت فروروی	خاک شنی		1	-0.91**	-0.94**	-0.96**	0.95**
	خاک لوم سیلتی		1	-0.87**	-0.92**	-0.94**	0.93**
مقاومت ضربه ای	خاک شنی			1	0.88**	0.89**	-0.93**
	خاک لوم سیلتی			1	0.92**	0.87**	-0.87**
جزء حساس به فرسایش	خاک شنی				1	0.95**	-0.94**
	خاک لوم سیلتی				1	0.91**	-0.91**
هدررفت خاک	خاک شنی					1	-0.91**
	خاک لوم سیلتی					1	-0.90**

** معنی دار در سطح آماری یک درصد

بافت خاک در تشکیل خاکدانه موثر است (Wick et al., 2009). همبستگی مثبتی بین مقدار رس و پایداری خاکدانه گزارش شده است (Rivera and Bonilla, 2020). ذرات رس به دلیل سطح ویژه بزرگ تر، برهمکنش های قوی تر با مواد آلی ایجاد می کنند و در نتیجه در پایداری خاکدانه موثر هستند (Lützow et al. 2006). مواد آلی نیز با افزایش فعالیت میکروبی در تشکیل و پایداری خاکدانه نقش دارند (Liu et al., 2021). در پژوهشی استفاده از لیگنوسولفونات در خاک رسی، موجب افزایش تنش برشی و کاهش ضریب فرسایش خاک شد. مکانیسم تأثیر لیگنوسولفونات در خاک و کارایی آن به طور کامل مورد بحث قرار نگرفته است (Khajeh et al., 2024). این ماده به عنوان یک تثبیت کننده بسیار امیدوارکننده برای کاهش شکنندگی و حساسیت به تورم در خاک های چسبنده و غیرچسبنده شناخته شده

است. استفاده از آن به طور قابل توجهی مقاومت در برابر چرخه های خیس یا خشک شدن و مقاومت در برابر فرسایش را بهبود بخشیده است و از دست دادن جرم را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد (Alazigha et al., 2018; Khajeh et al., 2024).

لیگنوسولفونات کلسیم بارهای منفی روی سطح ذرات گرد و غبار را خنثی می کند؛ با پیوندهای کووالانسی و هیدروژنی بین زنجیره پلیمری و ذرات گرد و غبار باعث جلوگیری از پراکنده شدن ذرات گرد و غبار می شود (Amulya et al., 2022; Chiranjeevi et al., 2024). افزودن لیگنوسولفونات می تواند مقاومت فشاری و انسجام خاک را دو برابر کند و سازگار با محیط زیست برای تثبیت خاک است (Bagheri et al., 2023). لیگنوسولفونات با بهبود مقاومت کششی خاک پتانسیل بالایی

Shariatmadari et al., 2022). در پژوهشی، (Jozefaciuk, 2022) اثرات کیتوسان حل شده در اسید استیک را بر تثبیت خاک شنی بررسی کردند. مقاومت فشاری نمونه‌های تیمار شده در روزهای ۷، ۱۴ و ۲۸ در شرایط خشک بالاتر از نمونه‌های تیمار شده در شرایط اشباع بود. در مقابل، (Hataf et al., 2018) مشاهده کردند که ژل کیتوسان مقاومت خاک را بهبود می‌بخشد، اما اثر آن با کاهش آب و خشک شدن خاک کاهش می‌یابد. افزودن مخلوط کربوکسی‌متیل سلولز و کیتوزان به میزان یک درصد در خاکی با رطوبت ۳۰ درصد مقدار مقاومت فشاری خاک را به ۱۵۰ کیلوپاسکال رساند (Zinchenko et al., 2022).

مصرف کیتوسان به میزان ۱/۵ درصد در خاک شنی و دو درصد در خاک کاتولینیتی مقاومت فشاری را به ترتیب به ۱۴۸۰ کیلوپاسکال و ۲۲۹۰ کیلوپاسکال رساند. اگرچه خاک شنی به دلیل ساختار دانه‌درشت خود و تسهیل اختلاط مؤثر با کیتوسان در ابتدا عملکرد بهتری داشت؛ اما در غلظت‌های بالاتر بیوپلیمر، خاک کاتولینیتی عملکرد بهتری نشان داد. تأثیر کیتوسان به وجود پیوندهای هیدروژنی، تعاملات الکترواستاتیکی و پیوندهای هیدروفوبیک نسبت داده شد که شبکه‌ای محکم ایجاد کرده و حرکت ذرات خاک را محدود و مقاومت را افزایش داد. هر دو نوع خاک شنی و کاتولینیتی طی یک دوره ۱۲۰ روزه افزایش چشم‌گیری در مقاومت فشاری نشان دادند. بیش‌ترین افزایش مقاومت در هفت روز اول، به‌ویژه در خاک شنی، مشاهده شد که طی یک روز به دلیل ساختار متخلخل خود افزایش سریعی در مقاومت داشت. تثبیت مقاومت فشاری پس از ۱۴ روز مشاهده شد که نشان‌دهنده دوام اتصالات کیتوسان-خاک در طول زمان است (Wang et al., 2025).

باکتری‌ها با تولید مواد زیستی می‌توانند خواص مکانیکی و هیدرولوژیک خاک‌ها مانند پیوند بین ذرات، سختی، مقاومت و نفوذپذیری را تغییر دهند (Martinez and Jiang et al., 2017; DeJong, 2009; Mitchell and Santamarina, 2005). بیوفیلم ترکیبی از سلول‌های باکتریایی و مواد پلیمری خارج سلولی ژل مانند است. این مواد ژل مانند نرم (یا بیوپلیمرها) منافذ خاک را پر کرده و باعث انسداد منافذ خاک و کاهش هدایت هیدرولیکی می‌شوند (Bouwer et al., 2000; Dunsmore et al., 2004). Baveye et al., 1998). استفاده از بیوپلیمرها برای بهبود مقاومت در برابر فرسایش محدود است و مکانیسم‌ها و میزان استفاده از مواد پلیمری خارج سلولی برای تغییر مقاومت خاک در برابر فرسایش به‌ندرت مورد بررسی قرار گرفته است (Ham et al., 2018). باکتری *Enterobacter cloacae*، به‌عنوان یک باکتری محرک رشد گیاه از ریزوسفر نیشکر جداسازی شده و قادر به ترشح اسیدهای آلی و پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی است

برای افزایش مقاومت خاک در برابر فرسایش دارد (Verma et al., 2021). استفاده از ۳ درصد لیگنوسولفونات در خاک رسی شنی درجه فرسایش‌پذیری خاک را از بسیار سریع به نسبتاً کند تغییر داد (Koohepeyma et al., 2013). احتمال تشکیل ترک در خاک تیمار شده با ۰/۵ درصد لیگنوسولفونات به دلیل افزایش چسبندگی و انعطاف‌پذیری خاک توسط لیگنوسولفونات به شدت کاهش یافت (Vakili et al., 2018). مقاومت فروری با کاربرد ۱۰ درصد لیگنوسولفونات سدیم از ۳/۱۵ نیوتن به ۹/۶۱ نیوتن افزایش یافت (Ding et al., 2018). استفاده از لیگنوسولفونات در خاک رسی در مقادیر مختلف (۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد) باعث افزایش مقاومت فشاری شد که در مقدار کاربرد ۰/۷۵ درصد از ۲۷۶ کیلوپاسکال در شاهد به ۳۹۷ کیلوپاسکال افزایش یافت. با این حال، این مقدار با افزایش میزان لیگنوسولفونات کاهش پیدا کرد. افزایش در مقاومت فشاری به کنار هم قرار گرفتن ذرات خاک نسبت داده شد (Ta'hegonbadi and Noorzad, 2017). از کیتوسان برای جلوگیری از فرسایش آبی و بادی استفاده شده است (Zinchenko et al., 2022; Badakhshan et al., 2023). این ماده یک لایه محافظ بر روی سطح خاک تشکیل می‌دهد که تأثیر نیروهای آب و باد بر خاک را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، می‌توان آن را با خاک‌ها مخلوط کرد تا پایداری آن‌ها را افزایش داده و انتشار گرد و غبار را کاهش دهد (Jamshidi et al., 2023). کیتوسان می‌تواند مانند هر بیوپلیمر دیگری بر روی سطوح ذرات خاک، جذب شود؛ ذرات مجاور را به هم متصل کند و باعث ایجاد چسبندگی بین ذرات خاک از طریق پیوند هیدروژنی یا پل‌زنی ذرات خاک از طریق یون‌های چندظرفیتی شود. اتصال مستقیم یک پلیمر باردار به اجزای خاک با بار منفی (کانی‌های رسی، سیلیکا، فلدسپات‌ها، مواد آلی) با نیروهای الکترواستاتیک به‌نظر می‌رسد که ویژگی نادری از کیتوسان باشد، زیرا برخلاف اکثر بیوپلیمرهای طبیعی (مانند کاراگینان، زانتان، گوار، آگار، پکتین، آلژینات، لیپیدها، کارژین، سلولز) که دارای ماهیت آنیونی یا غیریونی هستند، کیتوسان در محدوده وسیعی از مقادیر pH خنثی و اسیدی دارای بار مثبت است (Gooneh-Farahani et al., 2021). این ماده می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مانند استحکام، فشردگی و نفوذپذیری را تغییر دهد. کیتوسان می‌تواند مقاومت مکانیکی خاک را افزایش داده و منجر به تثبیت، تراکم و سخت شدن خاک می‌شود. هم‌چنین می‌تواند برای محدود کردن فرسایش سطحی خاک و جلوگیری از آلودگی هوا توسط گرد و غبار استفاده شود. با این حال، در میان بیوپلیمرهای مختلفی که در سال‌های اخیر برای تثبیت خاک، کاهش فرسایش و کنترل گرد و غبار به کار رفته‌اند، کیتوسان به‌ندرت استفاده شده است (Adameczuk and

(Pourjasem et al., 2020). این ترکیبات به اتصال ذرات خاک و تشکیل خاکدانه کمک می کنند. پایداری خاکدانه ها نقش مهمی در فرسایش پذیری خاک دارد و کاهش آن سبب افزایش تخریب خاک می شود (Noori et al., 2022). بهبود پایداری ساختمان خاک و میانگین قطر وزنی خاک توسط محصولات تجزیه مواد آلی و اتصال ذرات خاک گزارش شده است (Grosbellet et al., 2011). مواد آلی به دلیل خواص چسبندگی خود، به اتصال ذرات خاک، تشکیل و پایداری خاکدانه کمک می کنند (Peng et al., 2015; Yu et al., 2015). تثبیت کننده های شیمیایی خاک، پیوندهای قوی بین ذرات خاک ایجاد می کنند و سرعت آستانه ای باد را برای حرکت ذرات خاک افزایش می دهند (Fick et al., 2020). سیانوباکتری ها و ماده آلی شده و خاک را در برابر فرسایش مقاوم می کند (Sadeghi et al., 2023; Jafarpour et al., 2025).

استفاده از کیتوزان به عنوان یک محرک زیستی، جمعیت میکروفلور مفید خاک را افزایش می دهد. در پژوهشی استفاده از ۴ گرم در لیتر کیتوزان در خاک جمعیت باکتری های تثبیت کننده نیتروژن و حل کننده های فسفات را طی ۶۰ روز بهبود بخشید (Shibana and Deepa, 2024). افزایش نسبت قارچ به باکتری در خاک های اصلاح شده با کیتوزان در مقایسه با خاک شاهد ۹۰ روز پس از تیمار گزارش شده است. استفاد از کیتوزان قارچ های میکوریز آربسکولار، نسبت باکتری های گرم منفی به باکتری های گرم مثبت و نسبت باکتری های هوازی به بی هوازی را افزایش داد (Park and Chang, 2012). لیگنوسولفونات کلسیم نیز به عنوان یک محرک زیستی بر رشد گیاه، تولید محصول، میکروارگانیسم های ریزوسفر و خاک، سلامت عمومی خاک و فعل و انفعالات گیاه و محیط تأثیر مثبت می گذارد. بخش های آبدوست لیگنوسولفونات دارای بارهای منفی است و سورفکتانت لیگنوسولفونات کلسیم دارای ساختار زنجیره ای کوتاه است که حلالیت خوبی در آب دارد (Elsawy et al., 2022).

۴- نتیجه گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که تیمارهای مختلف تأثیر چشم گیری بر ویژگی های فیزیکی خاک داشتند. مقاومت فروروی در هر دو نوع خاک لوم سیلتی و شنی به طور معنی داری افزایش یافت، به خصوص با استفاده از کیتوسان به همراه باکتری و لیگنوسولفونات به همراه باکتری. این تیمارها همچنین باعث افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه ها شدند که نشان دهنده بهبود پایداری خاک است. مقاومت ضربه ای کاهش یافت و کیفیت خاک در تیمارهای کیتوسان و لیگنوسولفونات به همراه باکتری، خوب

ارزیابی شد. همچنین، اعمال این تیمارها هدررفت خاک و جزء حساس به فرسایش را به طور قابل ملاحظه ای کاهش دادند، به طوری که در خاک لوم سیلتی هدررفت در بعضی تیمارها به صفر رسید. کربن زیتوده میکروبی نیز افزایش چشم گیری داشت، به ویژه در تیمارهای کیتوسان به همراه باکتری. به طور کلی، خاک لوم سیلتی نسبت به خاک شنی عملکرد بهتری در بیش تر ویژگی ها نشان داد، در حالی که خاک شنی حساسیت بیش تری به فرسایش و هدررفت داشت. این یافته ها اهمیت استفاده از ترکیباتی مانند کیتوسان و لیگنوسولفونات همراه با باکتری را برای بهبود کیفیت و پایداری خاک تأیید می کند. با وجود نتایج به دست آمده در شرایط آزمایشگاهی، پیش از ارائه توصیه نهایی برای استفاده گسترده از این ترکیبات، ضروری است که ابتدا در مقیاس پایلوت مورد آزمایش قرار گیرند.

سپاسگزاری

بدین وسیله نویسندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز (SCU.AS1402.248) تشکر و قدردانی می نمایند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می دارند که هیچ گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

مریم دهقان پور: مفهوم سازی، انجام آزمایش، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ نعیمه عنایتی ضمیر: راهنمایی، تحلیل های آماری، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛ احمد لدی: راهنمایی، مفهوم سازی، بازبینی متن مقاله؛ حیدر غفاری: مشاوره، تحلیل های آماری، بازبینی متن مقاله

منابع

بی نام. دستورالعمل فنی ارزیابی کارایی تثبیت کننده های خاک (مالج). ۱۳۹۸. سازمان برنامه و بودجه کشور، سازمان حفاظت محیط کشور.
حیدریان، پیمان، اژدری، علی، جودکی، محمد، درویشی خاتونی، جواد، و شهبازی، رضا (۱۳۹۳). شناسایی کانون های گردو غبار در استان خوزستان.

تلفیق شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم ژنتیک در بخشی از اراضی جنوب شرقی قزوین، پژوهش‌های فرسایش محیطی، (۴۵)، ۱-۱۲.

References

- Adamczuk, A., & Jozefaciuk, G. (2022). Impact of chitosan on the mechanical stability of soils. *Molecules*, 27(7), 2273. doi: 10.3390/molecules27072273
- Ahmadi, A., Neyshabouri, M. R., Rouhipour, H., & Asadi, H. (2011). Fractal dimension of soil aggregates as an index of soil erodibility. *Journal of Hydrology*, 400(3-4), 305-311. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.01.045
- Alazigha, D. P., Indraratna, B., Vinod, J. S., & Heitor, A. (2018). Mechanisms of stabilization of expansive soil with lignosulfonate admixture. *Transportation Geotechnics*, 14, 81-92. doi: 10.1016/j.trgeo.2017.11.001
- Alsubhi, Y., Qureshi, S., Assiri, M. E., & Siddiqui, M. H. (2022). Quantifying the impact of dust sources on urban physical growth and vegetation status: A case study of Saudi Arabia. *Remote Sensing*, 14(22), 5701. doi: 10.3390/rs14225701
- Alzahrani, A. J., Alghamdi, A. G., & Ibrahim, H. M. (2024). Assessment of Soil Loss Due to Wind Erosion and Dust Deposition: Implications for Sustainable Management in Arid Regions. *Applied Sciences*, 14(23), 10822. doi: 10.3390/app142310822
- Amulya, G., Moghal, A.A.B. and Almajed, A., 2021. A state-of-the-art review on suitability of granite dust as a sustainable additive for geotechnical applications. *Crystals*, 11(12), p.1526. doi: 10.3390/cryst11121526
- Amulya, G., Moghal, A.A.B., Basha, B.M. and Almajed, A., 2022. Coupled effect of granite sand and calcium lignosulphonate on the strength behavior of cohesive soil. *Buildings*, 12(10), p.1687. doi: 10.3390/buildings12101687
- Anonymous. (2019). *Technical Guidelines for Evaluating the Performance of Soil Stabilizers (Mulches)*. Plan and Budget Organization of Iran, Department of Environment. [In Persian]
- Badakhshan, E., Noorzad, A., & Vaunat, J. (2023). Stabilization of soft clays exposed to freeze-thaw cycles using chitosan. *Journal of Cold Regions Engineering*, 37(2), 04023004. doi: 10.1061/JCRGEI.CRENG-690
- Bagheri, P., Gratchev, I., Son, S., & Rybachuk, M. (2023). Durability, strength, and erosion resistance assessment of lignin biopolymer treated soil. *Polymers*, 15(6), 1556. doi: 10.3390/polym15061556
- Baveye, P., Vandevivere, P., Hoyle, B. L., DeLeo, P. C., & de Lozada, D. S. (1998). Environmental impact and mechanisms of the biological clogging of saturated soils and aquifer materials. *Critical reviews in environmental science and technology*, 28(2), 123-191. doi: 10.1080/10643389891254197
- Bouwer, E., H. Rijnaarts, A. B. Cunningham, and R. Gerlach. 2000. Biofilms in porous media. In *Biofilms II: Process analysis and applications*, 123-158. New York: Wiley.
- Chang, I., Lee, M., Tran, A. T. P., Lee, S., Kwon, Y. M., Im, J., & Cho, G. C. (2020). Review on biopolymer-based soil treatment (BPST) technology in geotechnical engineering practices. *Transportation Geotechnics*, 24, 100385. doi: 10.1016/j.trgeo.2020.100385
- Chen, Q., & Indraratna, B. (2015). Deformation behavior of lignosulfonate-treated sandy silt under cyclic loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(1), 06014015. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001210
- Chepil, W. S. (1950). Properties of soil which influence wind erosion: II. Dry aggregate structure as an index of erodibility. *Soil Science*, 69(5), 403-414.
- Chiranjeevi, V., Singh, K. and Kishan, D., 2024. Soil stabilization by integrating dust particles with calcium lignosulphanate. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 48(1), pp.60-78.
- Cho, Y. W., Jang, J., Park, C. R., & Ko, S. W. (2000). Preparation and solubility in acid and water of partially deacetylated chitins. *Biomacromolecules*, 1(4), 609-614. doi: 10.1021/bm000036j
- Colazo, J. C., & Buschiazzi, D. E. (2010). Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. *Geoderma*, 159(1-2), 228-236. doi: 10.1016/j.geoderma.2010.07.016
- Ding, X., Luo, Z., Cheng, F., & Deng, J. (2022). Dust control performance enhancement of red sand via the synergistic application of Na-and Ca-lignosulfonates. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(8), 7993-8006. doi: 10.1007/s13762-021-03486-w
- Ding, X., Xu, G., Kizil, M., Zhou, W., & Guo, X. (2018). Lignosulfonate treating bauxite residue dust pollution: enhancement of mechanical properties and wind erosion behavior. *Water, Air, & Soil Pollution*, 229, 1-13. doi: 10.1007/s11270-018-3876-0
- Dunsmore, B. C., Bass, C. J., & Lappin-Scott, H. M. (2004). A novel approach to investigate biofilm accumulation and bacterial transport in porous matrices. *Environmental Microbiology*, 6(2), 183-187. doi: 10.1046/j.1462-2920.2003.00546.x

- Elsawy, H. I., Alharbi, K., Mohamed, A. M., Ueda, A., AlKahtani, M., AlHusnain, L., ... & Shahein, A. M. (2022). Calcium lignosulfonate can mitigate the impact of salt stress on growth, physiological, and yield characteristics of two barley cultivars (*Hordeum vulgare* L.). *Agriculture*, 12(9), 1459. doi: 10.3390/agriculture12091459
- Fick, S. E., Barger, N., Tatarko, J., & Duniway, M. C. (2020). Induced biological soil crust controls on wind erodibility and dust (PM10) emissions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(1), 224-236. doi: 10.1002/esp.4731
- Goonch-Farahani, S., Naghib, S. M., Naimi-Jamal, M. R., & Seyfoori, A. (2021). A pH-sensitive nanocarrier based on BSA-stabilized graphene-chitosan nanocomposite for sustained and prolonged release of anticancer agents. *Scientific Reports*, 11(1), 17404.
- Grosbellet, C., Vidal-Beaudet, L., Caubel, V., & Charpentier, S. (2011). Improvement of soil structure formation by degradation of coarse organic matter. *Geoderma*, 162(1-2), 27-38. doi.org. 10.1016/j.geoderma.2011.01.003
- Ham, S. M., Chang, I., Noh, D. H., Kwon, T. H., & Muhunthan, B. (2018). Improvement of surface erosion resistance of sand by microbial biopolymer formation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(7), 06018004. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001900
- Hataf, N., Ghadir, P., & Ranjbar, N. (2018). Investigation of soil stabilization using chitosan biopolymer. *Journal of cleaner production*, 170, 1493-1500. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.09.256
- Heidarian P, Joudaki M, Darvishi Khatoni J, Shahbazi R., (2015). Recognized Dust Sources in Khuzestan Province, Mine and Trade Geological Survey of Iran South West Regional Center, [In Persian]
- Jafarpour, A., Sadeghi, S. H., Homae, M., & Darki, B. Z. (2025). Improvability of quality main indices of a marl soil using endemic microorganisms. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 137, 103812. doi: 10.1016/j.pce.2024.103812
- Jamshidi, M., Mokheri, M., Vakili, A. H., & Nasehi, A. (2023). Effect of chitosan bio-polymer stabilization on the mechanical and dynamic characteristics of marl soils. *Transportation Geotechnics*, 42, 101110. doi: 10.1016/j.trgeo.2023.101110
- Jiang, N. J., Soga, K., & Kuo, M. (2017). Microbially induced carbonate precipitation for seepage-induced internal erosion control in sand-clay mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(3), 04016100. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001559
- Khajeh, A., Nazari, Z., Movahedrad, M., & Vakili, A. H. (2024). A state-of-the-art review on the application of lignosulfonate as a green alternative in soil stabilization. *Science of The Total Environment*, 173500. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.173500
- Koohpeyma, H. R., Vakili, A. H., Moayedi, H., Panjsetooni, A., & Nazir, R. (2013). Investigating the effect of lignosulfonate on erosion rate of the embankments constructed with clayey sand. *The Scientific World Journal*, 2013(1), 587462. doi: 10.1155/2013/587462
- Kouchami-Sardoo, I., Shirani, H., Esfandiarpour-Boroujeni, I., Besalatpour, A. A., & Hajabbasi, M. A. (2020). Prediction of soil wind erodibility using a hybrid genetic algorithm—Artificial neural network method. *Catena*, 187, 104315. doi: 10.1016/j.catena.2019.104315
- Liu, S., Guo, Z. C., Halder, M., Zhang, H. X., Six, J., & Peng, X. H. (2021). Impacts of residue quality and soil texture on soil aggregation pathways by using rare earth oxides as tracers. *Geoderma*, 399, 115114. doi: 10.1016/j.geoderma.2021.115114
- Lützow, M. V., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., & Flessa, H. (2006). Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions—a review. *European journal of soil science*, 57(4), 426-445. doi: 10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x
- Martinez, B. C., & DeJong, J. T. (2009). Bio-mediated soil improvement: Load transfer mechanisms at the micro-and macro-scales. In *Advances in ground improvement: research to practice in the United States and China* (pp. 242-251).
- Middleton, N., Kashani, S. S., Attarchi, S., Rahnama, M., & Mosalman, S. T. (2021). Synoptic causes and socio-economic consequences of a severe dust storm in the Middle East. *Atmosphere*, 12(11), 1435. doi: 10.3390/atmos12111435
- Mitchell, J. K., & Santamarina, J. C. (2005). Biological considerations in geotechnical engineering. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 131(10), 1222-1233. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:10(1222)
- Mohammadi, Sh, H. R. Karimzadeh, & M. Alizadeh. (2018). Spatial estimation of soil erosion in Iran using RUSLE model. *Ecohydrology*, 5(2), 551–569. doi:10.22059/ije.2018.239777.706.
- Mosallanejad, A., Taghvaei, H., Mirsoleimani-azizi, S. M., Mohammadi, A., & Rahimpour, M. R. (2017). Plasma upgrading of 4methylanisole: A novel approach for hydrodeoxygenation of bio oil without using a hydrogen source. *Chemical Engineering Research and Design*, 121, 113-124. doi: 10.1016/j.cherd.2017.03.011

- Nikseresht, F., Landi, A., Sayyad, G., Ghezelbash, G. R., & Schulin, R. (2020). Sugarcane molasse and vinasse added as microbial growth substrates increase calcium carbonate content, surface stability and resistance against wind erosion of desert soils. *Journal of environmental management*, 268, 110639. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110639
- Noori, A., Eftekhari, K., Efandiari, M., Mohammadi Torkashvand, A., & Ahmadi, A. (2022). Estimation of soil erodible fraction using artificial neural network models and integration of artificial neural network with genetic algorithm in the part of Qazvin province. *Environmental Erosion Research Journal*, 12(1), 145-159. [In Persian]
- Orts, W. J., Sojka, R. E., & Glenn, G. M. (2000). Biopolymer additives to reduce erosion-induced soil losses during irrigation. *Industrial Crops and Products*, 11(1), 19-29. doi: 10.1016/S0926-6690(99)00030-8
- Park, K. C., & Chang, T. H. (2012). Effect of chitosan on microbial community in soils planted with cucumber under protected cultivation. *Horticultural Science & Technology*, 30(3), 261-269. Doi: 10.7235/hort.2012.11148
- Peng, X., Yan, X., Zhou, H., Zhang, Y. Z., & Sun, H. (2015). Assessing the contributions of sesquioxides and soil organic matter to aggregation in an Ultisol under long-term fertilization. *Soil and Tillage Research*, 146, 89-98. doi: 10.1016/j.still.2014.04.003
- Pirhadi, N., Nadian, H., Khalilimoghadam, B., & Motamedi, H. (2024). The effect of vinasse as a carbon source on the activity of urease-producing bacteria in the microbially induced calcite precipitation (MICP) approach. *Desert*, 29(1), 53-70.
- Pourjasem, L., Landi, A., Enayatzamir, N., & Hojati, S. (2020). The release of some elements from vermiculite during the short periods of incubation by heterotrophic bacteria. *Eurasian Soil Science*, 53, 223-229. doi: 10.1134/S106422932002009X
- Rezaei, M., Mina, M., Ostovari, Y., & Riksen, M. J. (2022). Determination of the threshold velocity of soil wind erosion using a wind tunnel and its prediction for calcareous soils of Iran. *Land Degradation & Development*, 33(13), 2340-2352.
- Rivera, J. I., & Bonilla, C. A. (2020). Predicting soil aggregate stability using readily available soil properties and machine learning techniques. *Catena*, 187, 104408. doi: 10.1016/j.catena.2019.104408
- Sadeghi, S. H., Jafarpour, A., Homaei, M., & Gharemahmudli, S. (2023). Controllability of soil loss and runoff using soil microorganisms: A review. *Ecohydrology & Hydrobiology*. doi: 10.1016/j.ecohyd.2023.11.006
- Sadeghi, S.H., Zabihi, M., Vafakhah, M. & Hazbavi, Z. (2017). Spatiotemporal mapping of rainfall erosivity index for different return periods in Iran. *Natural Hazards*, 87, 35-56. doi: 10.1007/s11069-017-2752-3.
- Shariatmadari, N., Reza, M., Tasuji, A., Ghadir, P., & Javadi, A. A. (2020). Experimental study on the effect of chitosan biopolymer on sandy soil stabilization. In *E3S Web of conferences* (Vol. 195, p. 06007). EDP Sciences. doi: 10.1051/e3sconf/202019506007
- Shibana, S. N., & Deepa, S. Nair. (2024). Effect of chitosan on increasing beneficial soil microflora and disease suppression in turmeric plants in humid tropics of Kerala, India. *International Journal of Plant & Soil Science*, 36, 170-176. doi: 10.9734/ijpss/2024/v36i14346
- Sirjani, E., Sameni, A., Moosavi, A. A., Mahmoodabadi, M., & Laurent, B. (2019). Portable wind tunnel experiments to study soil erosion by wind and its link to soil properties in the Fars province, Iran. *Geoderma*, 333, 69-80. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.07.012
- Sulaeman, D., & Westhoff, T. (2020). The causes and effects of soil erosion, and how to prevent it. *World Resources Institute: Washington, DC, USA*, 4.
- Ta'negonbadi, B., & Noorzad, R. (2017). Stabilization of clayey soil using lignosulfonate. *Transportation Geotechnics*, 12, 45-55. doi: 10.1016/j.trgeo.2017.08.004
- Vakili, A. H., Kaedi, M., Mokhberi, M., bin Selamat, M. R., & Salimi, M. (2018). Treatment of highly dispersive clay by lignosulfonate addition and electroosmosis application. *Applied Clay Science*, 152, 1-8.
- Verma, H., Ray, A., Rai, R., Gupta, T., & Mehta, N. (2021). Ground improvement using chemical methods: A review. *Heliyon*, 7(7). doi: 10.1016/j.clay.2017.11.039
- Wang, R., Ong, D. E., Sadighi, H., Goli, M., Xia, P., Fatehi, H., & Yao, T. (2025). Optimizing Soil Stabilization with Chitosan: Investigating Acid Concentration, Temperature, and Long-Term Strength. *Polymers*, 17(2), 151. doi: 10.3390/polym17020151
- Wick, A. F., Huzurbazar, S. V., & Stahl, P. D. (2009). Use of Bayesian methods to model soil aggregation in undisturbed semiarid grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, 73(5), 1707-1714. doi: 10.2136/sssaj2008.0185
- Younes, I., & Rinaudo, M. (2015). Chitin and chitosan preparation from marine sources. Structure, properties and applications. *Marine drugs*, 13(3), 1133-1174. doi: 10.3390/md13031133
- Yu, M., Zhang, L., Xu, X., Feger, K. H., Wang, Y., Liu, W., & Schwärzel, K. (2015). Impact of land-use changes on soil hydraulic properties of Calcaric Regosols on the Loess Plateau, NW

- China. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 178(3), 486-498. doi: 10.1002/jpln.201400090
- Zamani, S., & Mahmoodabadi, M. (2013). Effect of particle-size distribution on wind erosion rate and soil erodibility. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59(12), 1743-1753. doi: 10.1080/03650340.2012.748984
- Zinchenko, A., Sakai, T., Morikawa, K., & Nakano, M. (2022). Efficient stabilization of soil, sand, and clay by a polymer network of biomass-derived chitosan and carboxymethyl cellulose. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(1), 107084. doi: 10.1016/j.jece.2021.107084