

Research Paper

Investigating the performance of biopolymers in dust control on forest roads using wind tunnel simulation

Aidin Parsakhoo^{*,1} Mohammad Javan Mahjoub Doost² and Aiub Rezaei Motlagh³

1,*- (Corresponding author) Associate Professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I. R. Iran. (parsakhoo@gau.ac.ir)

2- MSc. Student of Forestry, Faculty of Natural Resources, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I. R. Iran. (mohammad.javanmd@gmail.com)

3- Research Expert (Ph.D. of forest management), Forest Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, AREEO, Tehran, I. R. Iran. (aiubrezaee@yahoo.com)

Received: 28 July 2025

Revised: 18 October 2025

Accepted: 26 October 2025

Extended Abstract

Background and Objective: Forest roads, which are predominantly unpaved, are highly susceptible to dust emission during vehicle traffic. This dust can lead to various complications, including health hazards for workers, mechanical damage to equipment, and environmental concerns. Dust control technologies are therefore crucial for mitigating these issues in forestry operations. Road dust suppression encompasses various methods aimed at minimizing the generation and suspension of airborne particles, particularly on unpaved roads. These methods can be broadly classified into reducing dust production, preventing its suspension, or capturing and removing it. This study aims to investigate the efficacy of biopolymers in controlling dust on the Arab-Dagh forest roads in Golestan Province.

Material and Methods: For this purpose, a wind tunnel with a contact surface area of 38×60 cm was utilized. Undisturbed surface samples from the region's forest roads were randomly selected. Three biopolymers—xanthan, guar, and beta-glucan—were applied separately at weight percentages of 0%, 0.5%, 1%, 2%, 3%, or 5% over the contact area of the wind tunnel. Subsequently, the treated road surfaces were exposed to wind speeds of 8 and 10 m/s using the wind tunnel apparatus. The duration of wind exposure was kept constant at two minutes for all samples. The accumulated wind-blown sediments were then collected in plastic cyclones and weighed with a precision of 0.1 mg. The experiments were conducted using a factorial design within a randomized complete block (RCB) framework. The primary treatments included the type of biopolymer (three levels), the application rate (four levels), and wind speed as the blocking factor (two levels). Three replicates were considered for each speed, resulting in a total of 24 treatments and 72 sediment samples. Statistical analyses were performed using SPSS software; data normality was verified via the Kolmogorov-Smirnov test, mean comparisons were conducted using the LSD test, and correlation analysis was carried out using the Pearson test.

Results: The results of the mean comparison tests indicated that all three biopolymer treatments significantly reduced dust emissions from the wind tunnel plots compared to the control group. Specifically, dust production for plots treated with beta-glucan, guar, and xanthan was 8.27, 7.23, and 7.78 g/m², respectively, whereas the control group yielded 11.58 g/m². Furthermore, increasing

the biopolymer concentration led to a significant decrease in dust levels, with the most pronounced reduction observed at the 5% concentration. As wind speed increased from 8 m/s to 10 m/s, dust production significantly rose from 7.85 g/m² to 9 g/m². The analysis further revealed that the greatest dust reduction occurred with the 5% guar treatment, which achieved a decrease of 76.5% and 66.3% at wind speeds of 8 m/s and 10 m/s, respectively. Across all biopolymer treatments, the highest dust emissions were recorded at the lowest concentration (0.5%).

Conclusion: Based on the findings of this study, applying high concentrations of biopolymers via tractor-mounted field sprayers enables the effective large-scale use of dust suppressants. The experimental results provide evidence that biopolymer spray applications can effectively mitigate dust emissions on forest roads and even in mining operations in the short term. Consequently, the tested biopolymers represent a promising, bio-based, and environmentally friendly alternative for dust control.

Keywords: Anti-dust treatments, Arab Dagh, Forest roads surface, Golestan province, Guar, Wind speed.

How to Cite This Article: Parsakhoo, A., Javan Mahjoub Doost, M., & Rezaei Mottagh, A. (2026). Investigating the performance of biopolymers in dust control on forest roads using wind tunnel simulation. *Forest Research and Development*, 11(4), 499-517. DOI: [10.30466/jfrd.2025.56429.1772](https://doi.org/10.30466/jfrd.2025.56429.1772)



Copyright ©2024 Parsakhoo et al. Published by Urmia University.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

بررسی عملکرد پلیمرهای زیستی در کنترل گرد و غبار جاده‌های جنگلی با استفاده از شبیه‌سازی تونل باد

آیدین پارساخو*^۱، محمدجوان محبوب‌دوست^۲ و ایوب رضایی مطلق^۳

- ۱- دانشیار، گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. (parsakhoo@gau.ac.ir)
- ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران و بهره‌برداری جنگل، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. (mohammad.javanmd@gmail.com)
- ۳- کارشناس بخش تحقیقات جنگل، موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. (aiubrezace@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۶

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: جاده‌های جنگلی که اغلب آسفالت نشده‌اند، هنگام تردد وسایل نقلیه در معرض تولید گرد و غبار قرار دارند. این گرد و غبار می‌تواند مشکلات مختلفی مانند خطرات سلامتی برای کارگران، آسیب به تجهیزات و نگرانی‌های زیست‌محیطی ایجاد کند. فناوری‌های کنترل گرد و غبار در کاهش این مشکلات در عملیات جنگلداری بسیار مهم هستند. کنترل گرد و غبار جاده‌ای شامل روش‌های مختلف برای به‌کمینه‌رساندن مقدار گرد و غبار تولید شده و معلق در هوا، به‌ویژه جاده‌های غیر آسفالت‌شده است. این روش‌ها را می‌توان به‌طور کلی به کاهش تولید گرد و غبار، جلوگیری از معلق شدن آن در هوا یا جذب و حذف گرد و غبار طبقه‌بندی کرد. هدف از این پژوهش، بررسی تاثیر پلیمرهای زیستی بر کنترل گرد و غبار جاده‌های جنگلی عرب‌داغ استان گلستان است.

مواد و روش‌ها: بدین‌منظور از یک دستگاه تونل باد با سطح تماس به ابعاد 60×38 سانتی‌متر استفاده شد. بر روی نمونه‌های دست‌نخورده رویه جاده‌های جنگلی منطقه که به‌صورت تصادفی انتخاب شدند، پلیمرهای زیستی زانتان، گوار و بتاگلوکان با درصدهای وزنی صفر، ۰/۵، یک، دو، سه یا پنج درصد به‌طور جداگانه به اندازه سطح تماس تونل باد پاشیده شد. در مرحله بعد با استقرار و راه‌اندازی دستگاه تونل باد روی نمونه، سطح جاده در معرض بادهایی با سرعت هشت و ۱۰ متر در ثانیه قرار گرفت. مدت زمان تاثیر باد روی کلیه قطعات یکسان و معادل دو دقیقه در نظر گرفته شد. سپس رسوبات بادی جمع‌شده در داخل سیلیکون‌های پلاستیکی جمع‌آوری و با دقت ۰/۱ میلی‌متر وزن شد. آزمایشات به‌صورت فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد. تیمار اصلی شامل نوع پلیمر زیستی در سه سطح و مقدار پلیمرها در چهار سطح و سرعت باد به‌عنوان بلوک در دو سطح بود. برای هر سرعت سه تکرار در نظر

گرفته شد (در کل ۲۴ تیمار و ۷۲ نمونه رسوب بادی). تجزیه و تحلیل‌های آماری در نرم‌افزار SPSS، نرمال بودن داده‌ها به کمک آزمون کولموگروف اسمیرنوف، مقایسه میانگین‌ها به کمک آزمون LSD و آنالیز همبستگی به کمک آزمون پیرسون انجام شد.

یافته‌ها: نتایج آزمون مقایسه میانگین‌ها نشان داد که هر سه تیمار پلیمر زیستی توانستند به‌طور معنی‌داری مقدار گرد و غبار حاصل از پلات‌های مستقر در تونل باد را در مقایسه با تیمار شاهد کاهش دهند. به‌طوری‌که مقدار تولید گرد و غبار در پلات تیمار شده با بتاگلوکان، گوار و زانتان به ترتیب ۸/۲۷، ۷/۲۳ و ۷/۷۸ گرم در مترمربع و در تیمار شاهد ۱۱/۵۸ گرم در مترمربع بود. همچنین با افزایش غلظت پلیمرهای زیستی مقدار گرد و غبار به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و شیب این کاهش در تیمار با غلظت پنج درصد بیشتر از تیمارهای دیگر بود. با افزایش سرعت باد از هشت متر بر ثانیه به ۱۰ متر بر ثانیه، مقدار گرد و غبار حاصل از پلات‌های مستقر در تونل باد به‌طور معنی‌داری از ۷/۸۵ گرم در متر مربع به نه گرم در مترمربع افزایش یافت. بررسی‌ها نشان داد که بیشترین مقدار کاهش گرد و غبار در تیمار گوار با غلظت پنج درصد حاصل شد. در این تیمار در سرعت‌های باد هشت و ۱۰ متر در ثانیه به ترتیب ۷۶/۵ و ۶۶/۳ درصد کاهش در مقدار گرد و غبار حاصل از پلات‌های مستقر در تونل باد گزارش شد. در تمام تیمارهای پلیمر زیستی بیشترین مقدار گرد و غبار حاصل از پلات‌های مستقر در تونل باد در غلظت ۰/۵ درصد ثبت شد.

نتیجه‌گیری: بر اساس یافته‌های این بررسی، استفاده از غلظت‌های بالای بیوپلیمر به‌صورت اسپری با یک سمپاش مزرعه‌ای سوار بر تراکتور، امکان استفاده مؤثر از مواد ضد گرد و غبار را در مقیاس وسیع فراهم می‌کند. نتایج آزمایش‌ها شواهدی را ارائه می‌دهد که کاربرد اسپری بیوپلیمرها می‌تواند به‌طور مؤثر انتشار گرد و غبار را در جاده‌های جنگلی و حتی معادن در کوتاه مدت کاهش دهد. بنابراین، بیوپلیمرهای آزمایش‌شده، یک جایگزین امیدوارکننده زیستی و سازگار با محیط زیست برای کنترل گرد و غبار هستند.

واژه‌های کلیدی: تیمارهای ضدغبار، گوار، سرعت باد، رویه جاده جنگلی، عرب داغ، استان گلستان.

مهندسی آن تأثیر بگذارند. برهم‌کنش بیوپلیمرها با آب سبب افزایش محتوای آب توده خاک و بتن می‌شود که ارتباط مستقیمی با استحکام آنها دارد (Jang, 2020; Almajed et al., 2020; Judge et al., 2022).

صمغ زانتان نوعی پلی ساکارید از بیوپلیمر است که از تخمیر یک محیط کربوهیدراتی مانند گلوکز ایجاد می‌شود. صمغ زانتان از روی باکتری القاکننده فرآیند تخمیر *Xanthomonas campestris* نام‌گذاری شد. صمغ زانتان را می‌توان در آب سرد و گرم حل کرد. محلول‌های حاوی صمغ زانتان به‌شدت شبه-پلاستیک هستند. زنجیره‌های صمغ زانتان در محدوده وسیعی از مقادیر pH پایدار می‌مانند (Chen et al., 2021). بنابراین، می‌توان آن را با موفقیت در محصولات پاک‌کننده و همچنین افزودنی‌های غذایی اسیدی اجرا کرد. به‌غیر از آن، می‌توان آن را در صنایع آرایشی و بهداشتی، کشاورزی و صنعت حفاری نفت و همچنین عاملی برای بهبود ویژگی‌های مختلف خاک مورد استفاده قرار داد (Ayeldeen et al., 2017; Cabalar et al., 2017). صمغ گوار یک پلی‌ساکارید استخراج‌شده از *Cyamopsis tetragonoloba* است که معمولاً به‌عنوان لویا گوار یا گوار شناخته می‌شود. گوار را می‌توان در هند، پاکستان، سودان و برخی از مناطق ایالات متحده یافت. تجمع صمغ گوار در دانه-های گیاه گوار وجود دارد. در طی فرآیند استخراج، صمغ گوار از بقیه قسمت‌های گیاه جدا، آسیاب و الک و برای مقاصد تجاری به‌صورت پودر بسته‌بندی می‌شود. برخلاف بیشتر صمغ‌های گیاهی، صمغ گوار در ساختار مولکولی خود اسید اورونیک ندارد. همچنین، وزن مولکولی به‌نسبت بالایی در مقایسه با دیگر پلی‌ساکاریدهای محلول در آب دارد. شایان ذکر است که تشکیلات صمغ گوار در محدوده وسیعی از pH پایدار هستند. بنابراین، آب حل‌کننده اولیه صمغ

جاده‌های جنگلی عموماً آسفالت نمی‌شوند، از این‌رو، هنگام تردد وسایل نقلیه در معرض تولید گرد و غبار قرار دارند. این گرد و غبار می‌تواند مشکلات مختلفی مانند خطرات سلامتی برای کارگران، آسیب به تجهیزات و نگرانی‌های زیست‌محیطی ایجاد کند. فناوری‌های کنترل گرد و غبار در کاهش این مشکلات در عملیات جنگلداری بسیار مهم هستند (Jaddi Hosseini et al., 2025). کنترل گرد و غبار جاده‌ای شامل روش‌های مختلف برای به‌کمینه-رساندن مقدار گرد و غبار تولید شده و معلق در هوا، به‌ویژه جاده‌های غیر آسفالت‌ه است. این روش‌ها را می‌توان به‌طور کلی به کاهش تولید گرد و غبار، جلوگیری از معلق‌شدن آن در هوا یا جذب و حذف گرد و غبار طبقه‌بندی کرد. تکنیک‌های رایج شامل کاربرد آب، پوشش‌شن، کاهنده‌های گرد و غبار (مانند کلریدها و پلیمرها) و مدیریت ترافیک است (Yulevitch et al., 2020; Sieger et al., 2023; Yan et al., 2025). در این بین بیوپلیمرها محصولات طبیعی هستند که از گیاهان، قارچ‌ها، مخمرها و پوست حیوانات استخراج می‌شوند (Cabalar et al., 2017; Choi et al., 2022). تاکنون هیچ‌گونه اثر منفی از سوی بیوپلیمرها بر محیط زیست گزارش نشده است. به همین دلیل، آنها یک راه حل بالقوه سازگار با محیط زیست برای صنایع مختلف هستند. در صنعت مهندسی عمران، این مواد به‌عنوان تثبیت‌کننده خاک و بتون مورد بررسی قرار می‌گیرند (Fatehi et al., 2021). بیوپلیمرها در آب محلول هستند و بنابراین، بتون و خاک‌های تیمار شده با بیوپلیمر در معرض خیس‌شدن و خشک‌شدن چرخه‌ای می‌توانند به‌طور زیادی بر جرم خاک و یا بتون تیمار شده با بیوپلیمر و خواص

داد که هر دو صمغ زانتان و صمغ گوار در افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت، بهبود مقاومت در برابر گرد و غبار و افزایش استحکام سطحی موثر بودند. NamdarKhojaste et al. (2016) برای ارزیابی تأثیر پلیمرهای زیستی بر تثبیت خاک سطحی، آزمایش‌هایی بر روی مقاومت فشاری نامحدود، پایداری خاکدانه مرطوب و مقاومت به فرسایش نمونه‌های خاک تیمارنشده و تیمار شده انجام دادند. در آزمایشگاه سرعت باد در تونل به تدریج از صفر به شش و ۲۵ متر بر ثانیه در مدت ۱۵ دقیقه افزایش می‌یابد. نتایج آزمون فرسایش باد، مقاومت فشاری و پایداری سنگدانه به وضوح نشان داد که نمونه‌های تیمار شده با پلیمرهای زیستی برای کنترل گرد و غبار در مناطق به نسبت خشک و نیمه خشک مفید بودند. Parsakhoo et al. (2021a) با استفاده از تیمارهای پلی اکریل آمید، بتونیت و ملاس نسبت به کنترل گرد و غبار جاده‌های جنگلی اقدام کردند و دریافتند که استفاده از تیمار پلی اکریل آمید به نسبت وزنی دو و چهار درصد بیشترین کارایی را در کاهش گرد و غبار جاده‌های جنگلی داشت.

در نواحی جنگلی شمال کشور اغلب جاده‌های دسترسی شن‌ریزی شده و متشکل از مصالح رودخانه‌ای و یا کوهی هستند. تردد وسایل نقلیه در این جاده‌ها به ویژه مسیرهای پرتراپیکی که بعد از تنفس جنگل کماکان قابل دسترس هستند، سبب تخریب مصالح، پرتاب ذرات ریز و درشت آن به اطراف و تولید گرد و غبار می‌شود (Shahmoradi et al., 2020; Parsakhoo et al., 2021b). بررسی‌ها نشان می‌دهد کمبود بررسی‌های بنیادی و آزمایش‌های کنترل شده‌ای که تأثیر فیزیکی تیمارهای ضدغبار بر انتشار گرد و غبار ناشی از باد را بررسی کنند، وجود دارد (Wang et al., 2025; Xia et al., 2025). نوآوری

گوار است و می‌توان آن را در آب سرد و گرم حل کرد. حتی غلظت‌های کوچک گوار به‌طور قابل توجهی ویسکوزیته محلول را افزایش می‌دهد. برخی از کاربردهای آن در صنایع آرایشی و بهداشتی، صنایع غذایی، کشاورزی و حفاری نفت یافت و اهداف مهندسی عمران می‌باشد. گیاه گوار در برابر شرایط سخت جوی مانند کم‌آبی، زمین‌های سنگی و تابش شدید خورشید بسیار مقاوم بوده و در شهرستان‌های خاش، راسک، قصرقند، نیک‌شهر، چابهار و کنارک کشت می‌شود. بتاگلوکان یک بیوپلیمر از نوع پلی- ساکارید است که از مولکول‌های گلوکز تشکیل شده است. طیفی از انواع بتاگلوکان وجود دارد که بر اساس منبع بتاگلوکان متفاوت است. آنها را می‌توان از سلول‌های مخمر، قارچ‌ها، برخی از انواع باکتری‌ها و انواع خاصی از غلات استخراج کرد. ساختار مولکولی بتاگلوکان‌ها به منبعی که از آن استخراج شده‌اند بستگی دارد. مولکول‌های بتاگلوکان می‌توانند بر اساس نوع پیوندها، انشعاب، وزن مولکولی، حلالیت و بار پلیمری متفاوت باشند (Anandha and Ramani, 2020). فرآیند استخراج بتاگلوکان به منبع اصلی و پیوندهای مولکولی پلیمر بستگی دارد. بتاگلوکان به شکل پودر آن می‌تواند در هر دمایی در آب حل شود که منجر به تشکیل محلول ژلاتینی می‌شود (Bacic et al., 2009). بتاگلوکان‌ها دارای پتانسیل اصلاح ویژگی‌های خاک هستند.

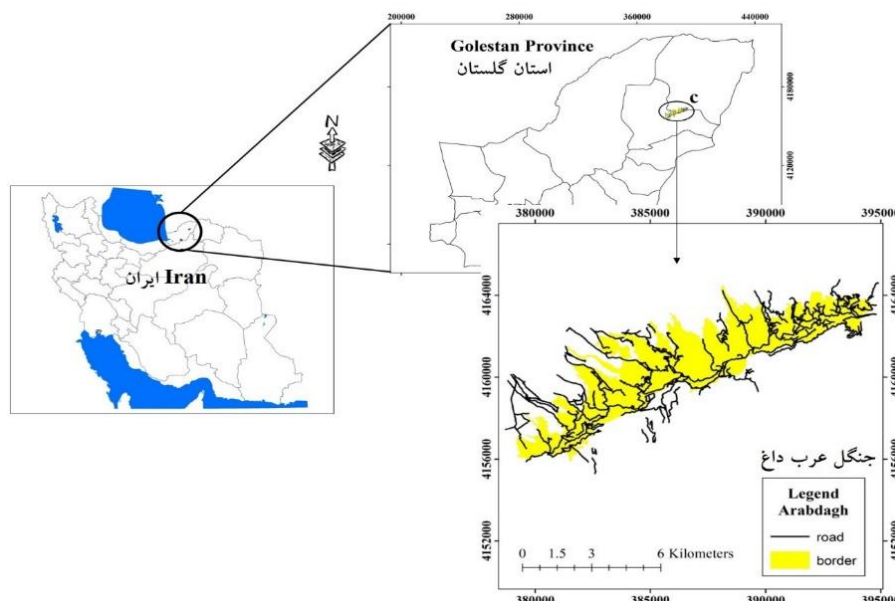
Chen et al. (2014) امکان استفاده از دو بیوپلیمر طبیعی و تجدیدپذیر، صمغ زانتان و صمغ گوار را برای تثبیت گرد و غبار بررسی کردند. آزمون‌های حفظ رطوبت و تونل باد به ترتیب برای ارزیابی افزایش ظرفیت نگهداری آب و بهبود مقاومت در برابر پراکندگی باد پس از تیمار با محلول‌های بیوپلیمری با غلظت‌های مختلف انجام شد. نتایج نشان

هکتار است. سری یک به مساحت ۱۳۲۰ هکتار در قسمت غرب غرب عرب داغ و سری دوم به مساحت ۹۲۰ هکتار در شرق سری یک واقع شده است. کمینه ارتفاع از سطح دریا ۱۰۰ متر و بیشینه ارتفاع ۲۰۰۰ متر است. با استناد به آمار ۱۰ ساله ایستگاه هواشناسی قپان متوسط بارندگی منطقه ۵۲۶ میلی‌متر است. طرح جنگلداری عرب‌داغ از نظر زمین‌شناسی مربوط به پیش از دوره اول (پروکامبرین) دوره دوم (ژوراسیک) و دوره چهارم (کواترنری) و عمده سازندهای تشکیل‌دهنده آن نهشته‌های رسوبی لسی می‌باشند. طول کل جاده موجود در این منطقه ۱۲۸ کیلومتر می‌باشد که از نوع جاده درجه یک (پنج درصد)، درجه دو (۵۰ درصد) و سه (۴۵ درصد) می‌باشند که طی سال‌های ۱۳۶۳ تا ۱۳۶۹ طراحی و احداث شده‌اند. تراکم طولی این جاده‌ها ۱۷/۵ و متوسط شیب آن‌ها پنج درصد می‌باشد. مواد مورد استفاده در روسازی این جاده‌ها بیشتر از مصالح رودخانه‌ای است (RezaciMutlagh et al., 2023).

این پژوهش آن است که برای نخستین بار از آزمایش شبیه‌سازی تونل باد برای بررسی اثر سه نوع بیوپلیمر برای کنترل گرد و غبار جاده‌های جنگلی استفاده می‌شود. اهداف اصلی پژوهش بررسی عملکرد غلظت‌های مختلف انواع پلیمر زیستی بر مقدار گرد و غبار جاده‌های جنگلی تحت شبیه‌سازی در تونل باد و همچنین بررسی تأثیر سرعت باد در مقدار انتشار گرد و غبار بود.

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه مورد بررسی و تهیه پلیمرهای زیستی طرح جنگلداری عرب‌داغ در ۴۰ کیلومتری شمال شرقی شهرستان کلالة و در حوزه ۹۶ طرح جامع جنگل‌های شمال کشور و در حوزه استحفاظی سرچنگلبانی گلی‌داغ از توابع اداره منابع طبیعی آبخیزداری شهرستان کلالة و در محدوده طول جغرافیایی $55^{\circ}37'04''$ تا $55^{\circ}47'07''$ و عرض جغرافیایی $37^{\circ}32'01''$ تا $37^{\circ}36'05''$ واقع شده است (شکل ۱). این طرح شامل دو سری با مساحت ۲۲۴۰

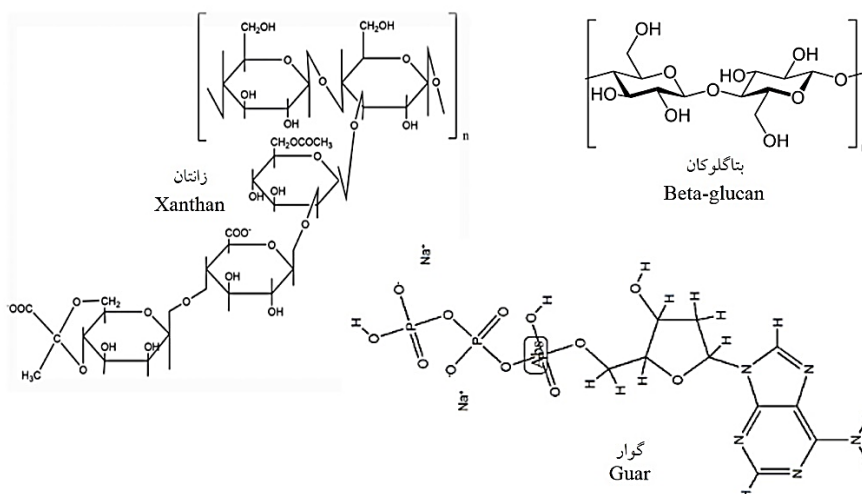


شکل ۱- موقعیت جغرافیایی مناطق مورد بررسی

Figure 1. Geographical location of the study areas

پلیمرهای زیستی در جدول ۱ ارائه شده است. این پلیمر از شرکت‌های مربوطه با قیمت ۱/۸ میلیون تومان به ازای هر کیلوگرم در سال ۱۴۰۳ خریداری شد.

در این پژوهش از سه نوع پلیمر زیستی شامل زانتان، گوار و بتاگلوکان برای کنترل گردوغبار استفاده شد (شکل ۲). خلاصه مشخصات اثبات شده این



شکل ۲- ساختار شیمیایی پلیمرهای زیستی مورد استفاده

Figure 2. Chemical structure of the biopolymers used

جدول ۱- مشخصات فیزیکوشیمیایی پلیمرهای زیستی مورد استفاده (Jang, 2020)

Table 1. Physicochemical characteristics of the biopolymers used (Jang, 2020)

نوع بار الکتریکی Type of electrical charge	وضعیت Condition	مزیت Benefit	منشاء Origin	پلیمر زیستی Biopolymer
آنیونی Anionic	پودر خشک و کرم رنگ و محلول در آب Dry powder and cream color, soluble in water	نفوذپذیری را کاهش می دهد و رطوبت را به دلیل پیوند هیدروژنی قوی حفظ می کند. Reduces permeability and retains moisture due to strong hydrogen bonding.	تخمیر کربوهیدرات‌ها در حضور باکتری گزاتوموناس Fermentation of carbohydrates in the presence of Xanthomonas bacteria	زانتان Xanthan
آنیونی/کاتیونی Anionic/Cationic	پودر سفید یا زرد کم رنگ و به صورت هیدروکلوئیدی در آب White or pale-yellow powder and hydrocolloid in water	نفوذ پذیری را کاهش و شاخص های مقاومت برشی را افزایش می دهد. Reduces permeability and increases shear strength parameters.	دانه های گیاه گوار Guar Plant seeds	گوار Guar
کاتیونی Cationic	پودر سفید یا مایل به سفید و محلول در آب White or off-white powder, soluble in water	رطوبت را جذب و نفوذ پذیری خاک را کاهش می دهد. Absorbs moisture and reduces soil permeability.	دیواره سلولی مخمر و جو دوسر و جو Yeast and oats and barley cell walls	بتاگلوکان Beta-glucan

روش پژوهش

هر سرعت سه تکرار در نظر گرفته شد (در کل ۲۴ تیمار و ۷۲ نمونه رسوب بادی). نمونه‌های دست-نخورده روسازی جاده‌های جنگلی منطقه به صورت تصادفی انتخاب شدند و سپس پلیمرهای زیستی زانتان، گوار و بتاگلوکان با درصدهای وزنی (نسبت به وزن مصالح رویه جاده) صفر، ۰/۵، یک، دو، سه یا پنج درصد به صورت محلول و به طور جداگانه به اندازه سطح تماس تونل باد روی نمونه‌ها اسپری شدند. در مرحله بعد با استقرار و راه‌اندازی دستگاه تونل باد روی نمونه، سطح جاده در معرض بادهایی با سرعت هشت و ۱۰ متر در ثانیه قرار گرفت. این دو سرعت مشابه سرعت باد ناشی از تردد خودرو در اطراف چرخه‌ستند. مدت زمان تأثیر باد روی کلیه قطعات یکسان و معادل دو دقیقه در نظر گرفته شد. سپس رسوبات بادی جمع شده در داخل سیلیکون‌های پلاستیکی جمع‌آوری و با دقت ۰/۱ میلی‌متر وزن شد. در این پژوهش تجزیه و تحلیل‌های آماری در نرم‌افزار SPSS، نرمال بودن داده‌ها به کمک آزمون کولموگروف اسمیرنوف، مقایسه میانگین‌ها به کمک آزمون LSD و آنالیز همبستگی به کمک آزمون پیرسون انجام شد.

در این بررسی از یک دستگاه تونل باد (به ابعاد ۲ × ۰/۴ × ۰/۴ متر) که به صورت یک مدل فیزیکی-آزمایشگاهی در هر زمان و مکان می‌تواند بادهایی با سرعت متفاوت روی سطح جاده مورد نظر ایجاد کند استفاده شد. در کف این تونل یک سطح تماس به ابعاد ۶۰ × ۳۸ سانتی‌متر تعبیه شده است که با تماس شدن کف دستگاه با سطح رویه جاده، جریان باد داخل تونل، خاک را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. این دستگاه در انتها دارای یک محفظه پلاستیکی دو جداره سیلیکون مانند است که موجب جمع‌آوری گرد و غبار یا همان مواد فرسایش یافته از سطح تماس و خروج هوای صاف می‌شود. دستگاه مذکور که توسط نگارنده طراحی و ساخته شده است، در آزمایشگاه مهندسی جنگل دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان قرار داشته و با نیروی برق کار می‌کند. سرعت باد داخل تونل از هشت تا ۱۰ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری قابل تنظیم است (شکل ۳). آزمایشات به صورت فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی انجام پذیرفت. تیمار اصلی شامل نوع پلیمر زیستی در سه سطح، مقدار یا درصد وزنی پلیمر در چهار سطح و سرعت باد به عنوان بلوک در دو سطح است. برای



شکل ۳- ساختمان تونل باد مورد استفاده در پژوهش حاضر

Figure 3. Wind tunnel structure used in the present study

نتایج

سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). بدین ترتیب که با افزایش غلظت پلیمرهای زیستی مقدار گرد و غبار کاهش و با افزایش سرعت باد مقدار گرد و غبار افزایش یافت. اثر متقابل نوع پلیمر زیستی و سرعت باد و همچنین نوع پلیمر زیستی، غلظت پلیمر زیستی و سرعت باد بر مقدار گرد و غبار حاصل از پلات‌های مستقر در تونل باد معنی‌دار نبود ($P>0.05$ ؛ جدول ۲).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر مستقل نوع پلیمر زیستی، غلظت پلیمر زیستی و سرعت باد بر مقدار گرد و غبار حاصل از پلات‌های مستقر در تونل باد در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار بود. علاوه بر این، اثر متقابل نوع پلیمر زیستی و غلظت پلیمر زیستی و همچنین غلظت پلیمر زیستی و سرعت باد بر مقدار گرد و غبار حاصل از پلات‌های مستقر در تونل باد در

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر مستقل و متقابل تیمارهای مختلف بر گرد و غبار حاصل از پلات‌های مستقر در تونل باد

Table 2. ANOVA of the independent and interaction effects of different treatments on dust from plots located in the wind tunnel

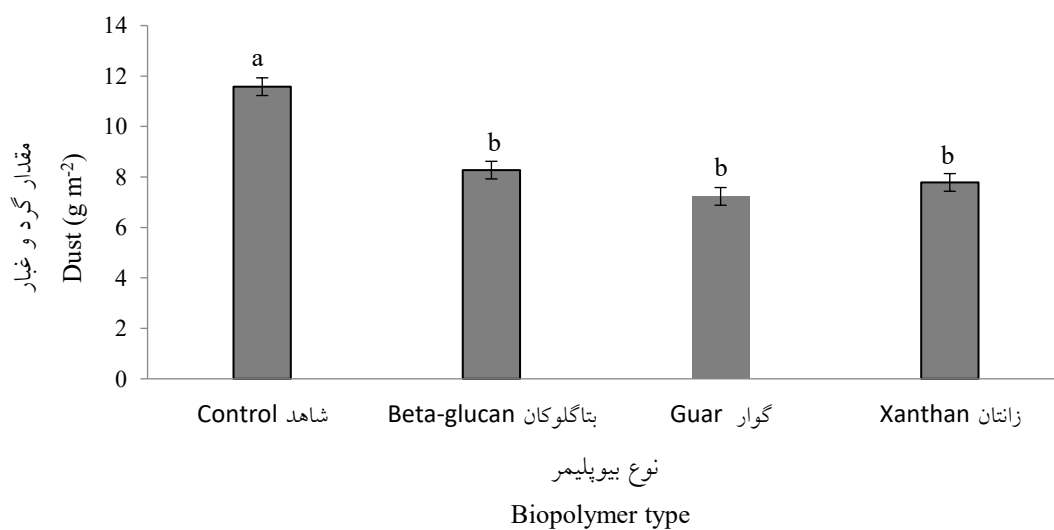
مقدار F F-value	میانگین مربعات Mean squares	درجه آزادی df	مجموع مربعات Sum of squares	منبع تغییرات Sources
52.57**	23.23	813.17	35	مدل تصحیح شده Corrected Model
17.35**	7666.92	7666.92	1	عرض از مبدا Intercept
30.39**	13.43	26.86	2	نوع بیوپلیمر Biopolymer type
325.90**	144.04	720.19	5	غلظت بیوپلیمر Biopolymer concentration
81.00**	35.80	35.80	1	سرعت باد Wind speed
3.48*	1.54	15.37	10	نوع بیوپلیمر × غلظت بیوپلیمر Biopolymer type × Biopolymer concentration
3.32*	1.47	7.33	5	سرعت باد × غلظت بیوپلیمر Wind speed × Biopolymer concentration
1.12 ^{ns}	0.50	0.99	2	نوع بیوپلیمر × سرعت باد Biopolymer type × Wind speed
1.50 ^{ns}	0.67	6.63	10	نوع بیوپلیمر × سرعت باد × غلظت بیوپلیمر Biopolymer type × Wind speed × Biopolymer concentration
	0.44	31.82	72	خطا Error
		8511.91	108	کل Total
		844.99	107	کل تصحیح شده Corrected total

** معنی‌دار در سطح احتمال ۹۹ درصد، * معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵ درصد، ns معنی‌دار نیست.

**Significant at the 99% probability level, * Significant at the 95% probability level, ns not significant.

افزایش غلظت پلیمرهای زیستی مقدار گرد و غبار به-طور معنی‌داری کاهش یافت ($P < 0.05$) و شیب این کاهش در تیمار با غلظت پنج درصد بیشتر از تیمارهای دیگر بود (شکل ۵). با افزایش سرعت باد از هشت متر بر ثانیه به ۱۰ متر بر ثانیه، مقدار گرد و غبار حاصل از پلات‌های مستقر در تونل باد به طور معنی-داری از ۷/۸۵ گرم در مترمربع به نه گرم در مترمربع افزایش یافت ($P < 0.05$; شکل ۶).

نتایج آزمون مقایسه میانگین‌ها نشان داد که هر سه تیمار پلیمر زیستی توانستند به‌طور معنی‌داری مقدار گرد و غبار حاصل از پلات‌های مستقر در تونل باد را در مقایسه با تیمار شاهد کاهش دهند ($P < 0.05$). به‌طوری‌که مقدار تولید گرد و غبار در پلات تیمار شده با بتاگلوکان، گوار و زانتان به ترتیب ۸/۲۷، ۷/۲۳ و ۷/۷۸ گرم در مترمربع و در تیمار شاهد ۱۱/۵۸ گرم در مترمربع بود (شکل ۴). همچنین با

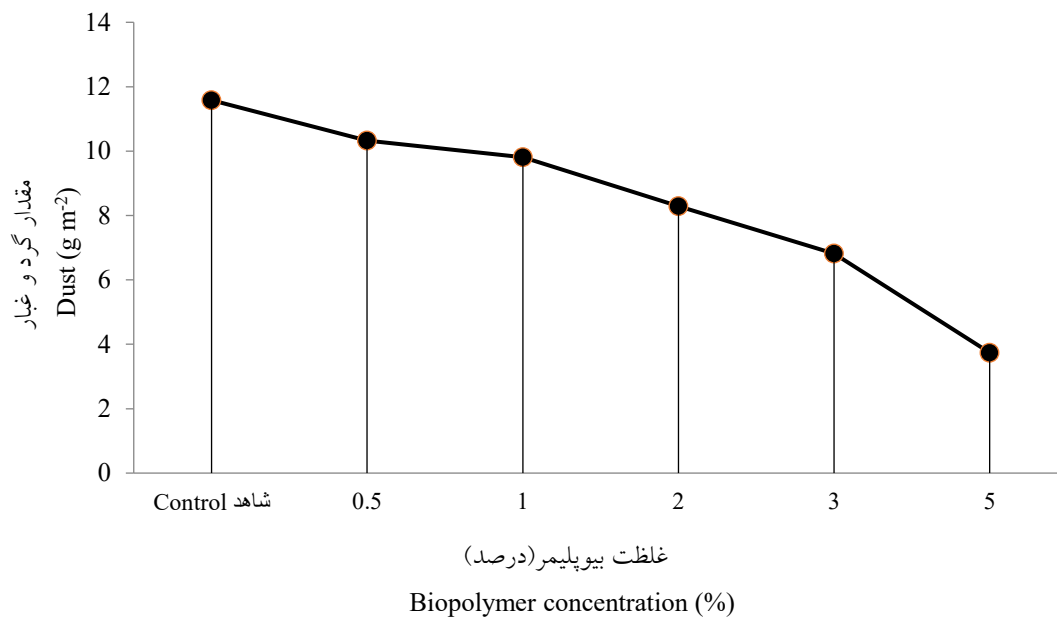


شکل ۴- مقایسه مقدار گرد و غبار حاصل از پلات‌های تیمار شده با انواع بیوپلیمر در تونل باد. (حروف متفاوت نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد)

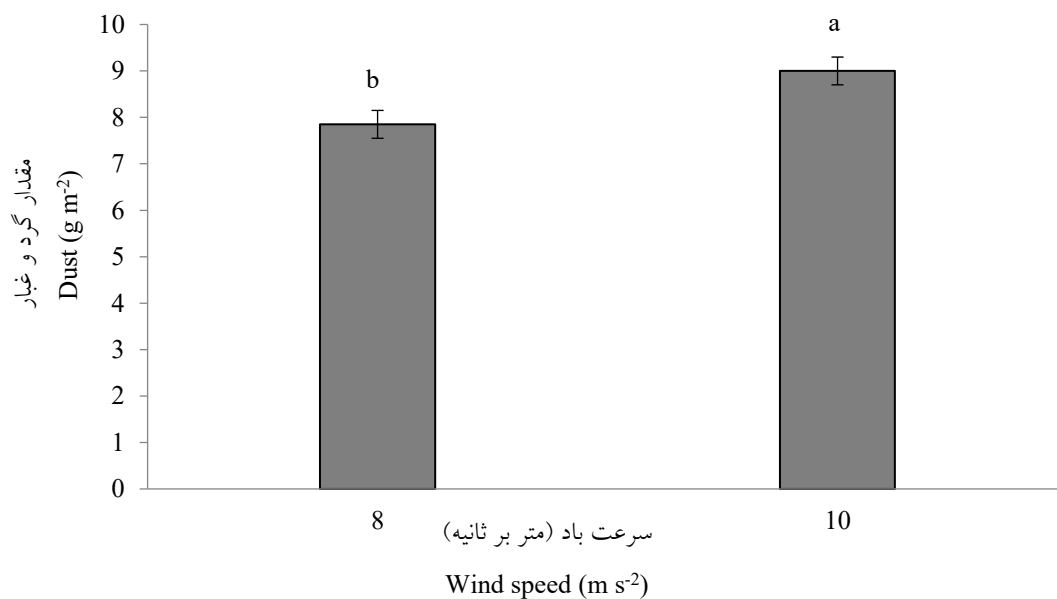
Figure 4. Comparison of the amount of dust produced from plots treated with various biopolymers. (Different letters indicate significant differences at the 5% probability level)

غبار به ترتیب ۶۷/۳۵ درصد و ۵۸/۷۱ درصد کاهش یافت. در مورد صمغ زانتان این مقادیر به ترتیب ۷۳/۹۱ درصد و ۶۳/۴۶ درصد بود. در تمام تیمارهای پلیمر زیستی بیشترین مقدار گرد و غبار حاصل از پلات‌های مستقر در تونل باد در غلظت ۰/۵ درصد ثبت شد (جدول ۳).

بررسی‌ها نشان داد که بیشترین مقدار کاهش گرد و غبار در تیمار گوار با غلظت پنج درصد حاصل شد. در این تیمار در سرعت‌های باد هشت و ۱۰ متر در ثانیه به ترتیب ۷۶/۵ و ۶۶/۳ درصد کاهش در مقدار گرد و غبار حاصل از پلات‌های مستقر در تونل باد گزارش شد. در غلظت پنج درصد بتاگلوکان و در سرعت‌های باد هشت و ۱۰ متر در ثانیه مقدار گرد و



شکل ۵- مقایسه مقدار گرد و غبار حاصل از پلات‌های تیماشده با غلظت‌های مختلف بیوپلیمر در تونل باد
 Figure 5. Comparison of the amount of dust produced from plots treated with different concentrations of biopolymer in the wind tunnel



شکل ۶- مقایسه اثر سرعت باد در انتشار گرد و غبار (حروف متفاوت نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد است)

Figure 6. Comparison of the effect of wind speed on dust emission. (Different letters indicate significant differences at the 5% probability level)

جدول ۳- مقایسه عملکرد تیمارهای مختلف در کاهش گرد و غبار حاصل از پلات‌های تیمار شده در تونل باد

Table 3. Comparison of the performance of different treatments in reducing dust from treated plots in the wind tunnel

درصد کاهش Reduction (%)	انحراف معیار Standard deviation	میانگین Mean (g m ⁻²)	غلظت بیوپلیمر (%) Biopolymer concentration (%)	سرعت باد (متر بر ثانیه) Wind speed (m s ⁻¹)	نوع تیمار بیوپلیمر Biopolymer type
8.44	±0.68	10.60 ^a	0.5	8	بتاگلوکان Beta-glucan
17.08	±0.76	9.60 ^a	1		
26.58	±0.20	8.50 ^{ab}	2		
28.99	±0.48	8.22 ^{ab}	3		
67.35	±0.60	3.78 ^b	5		
8.44	±0.79	10.60 ^a	0.5	10	گوار Guar
17.77	±0.29	9.52 ^a	1		
23.21	±0.59	8.89 ^{ab}	2		
28.99	±0.79	8.22 ^{ab}	3		
58.71	±0.55	4.78 ^b	5		
19.58	±0.76	9.31 ^a	0.5	8	زانتان Xanthan
23.30	±0.35	8.88 ^a	1		
41.09	±0.39	6.82 ^b	2		
56.38	±0.61	5.05 ^b	3		
76.50	±0.66	2.72 ^c	5		
11.12	±0.31	10.29 ^a	0.5	10	زانتان Xanthan
14.31	±0.39	9.92 ^a	1		
24.68	±0.35	8.72 ^{ab}	2		
42.21	±0.42	6.69 ^b	3		
66.31	±0.27	3.90 ^c	5		
11.89	±0.50	10.20 ^a	0.5	8	زانتان Xanthan
15.69	±0.36	9.76 ^a	1		
32.71	±0.34	7.79 ^b	2		
51.54	±0.52	5.61 ^c	3		
73.91	±0.10	3.02 ^d	5		
7.49	±0.45	10.71 ^a	0.5	10	زانتان Xanthan
10.25	±0.24	10.39 ^a	1		
22.09	±0.13	9.02 ^a	2		
38.67	±0.27	7.10 ^b	3		
63.46	±0.30	4.23 ^c	5		

حروف مختلف در هر ستون نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵ درصد است.

Different letters in each column indicate a significant difference at the 95% probability level.

سرعت باد بر مقدار گرد و غبار حاصل از پلات‌های

مستقر در تونل باد معنی‌دار بود. بدین ترتیب که با افزایش غلظت پلیمرهای زیستی مقدار گرد و غبار کاهش و با افزایش سرعت باد مقدار گرد و غبار افزایش یافت. در این پژوهش هر سه تیمار پلیمر زیستی توانستند به‌طور معنی‌داری مقدار گرد و غبار حاصل از پلات‌های مستقر در تونل باد را در مقایسه با تیمار شاهد کاهش دهند که این یافته با نتایج بررسی‌های Khojaste Namdar et al (2016) و et al. (2020) NamdarKhojaste et al. (2016) مطابقت دارد.

بحث

در مبارزه با گرد و غبار جاده‌ای، تعامل بین بیوپلیمر و غبار نقش حیاتی دارد. این تعامل، انسجام بین دانه‌های غبار و وزن ذرات را افزایش می‌دهد. هیدروژل حاصل از بیوپلیمرها به سرعت با ذرات غبار درگیر می‌شوند، ذرات را می‌پوشانند و پیوند پایداری ایجاد می‌کنند. بدین ترتیب نیروهای مقاومتی شامل نیروهای چسبندگی و گرانس مانع از برخاستن گرد و غبار در هوا می‌شود (Singh and Ram, 2024). نتایج نشان داد که اثر نوع پلیمر زیستی، غلظت پلیمر زیستی و

طوری که ۰/۲، ۰/۴، ۰/۸، یک و ۱/۲ گرم از بیوپلیمر در هر مترمربع از سطح نمونه پراکنده شد. آزمایش‌های تونل باد بر روی نمونه‌ها با سرعت هفت متر بر ثانیه تا ۱۵ متر بر ثانیه انجام شد. نتایج آزمایش نشان داد که پوسته مقاوم تشکیل شده روی سطح خاک در اثر پاشش سوسپانسیون گوار می‌تواند مقاومت خاک را در برابر فرسایش بادی به اندازه زیادی افزایش دهد. ۱/۲ گرم در مترمربع از گوار می‌تواند فرسایش را تا ۹۸ درصد کاهش دهد. نتایج تجزیه و تحلیل الک خاک نشان داد که صمغ گوار سبب بزرگ شدن خاکدانه‌های خاک و در نتیجه کاهش فرسایش و افزایش سرعت آستانه باد از هفت به ۱۰ متر بر ثانیه می‌شود. Chen و همکاران (۲۰۱۴) نیز نشان دادند که هر دو صمغ زانتان و صمغ گوار در افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت، بهبود مقاومت در برابر گرد و غبار و افزایش استحکام سطحی موثر بودند. این عمدتاً به این دلیل است که پلیمرهای زیستی پوشش‌هایی را روی ذرات تشکیل داد و بین آنها پیوند ایجاد کرد. بر اساس یافته‌های پژوهش حاضر با افزایش غلظت پلیمرهای زیستی مقدار گرد و غبار به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. همچنین با افزایش سرعت باد از هشت متر بر ثانیه به ۱۰ متر بر ثانیه، مقدار گرد و غبار حاصل از پلات‌های مستقر در تونل باد به‌طور معنی‌داری افزایش یافت که این یافته با نتایج پژوهش Chiou and Tsai (2001) مطابقت دارد. آنها دریافتند که افزایش سرعت باد از نه تا ۱۰ متر بر ثانیه به ۱۰ تا ۱۲ متر بر ثانیه غلظت گرد و غبار منتشر شده را به‌طور زیادی افزایش داد. یافته‌های بررسی به ما نشان می‌دهد که سطوح جاده‌های آسفالت نشده صرف نظر از تردد وسایل نقلیه، در معرض انتشار گرد و غبار توسط باد نیز قرار دارند و به‌طور کلی این امر می‌تواند سهم قابل توجهی در انتقال آلودگی داشته باشد. لازم به ذکر است که

دریافتند که وقتی پلیمرهای زیستی روی خاک اعمال می‌شود، بخشی از آنها فضای خالی خاک را پر می‌کنند و بخشی دیگر روی سطح خاکدانه‌ها باقی می‌مانند. گروه‌های پلی‌الکترولیت در ساختار مولکولی آن واکنش شیمیایی با یون‌های مثبت دانه‌های خاک رس داشتند و پیوندهای فیزیکی شیمیایی بین مولکول‌ها و دانه‌های خاک با پیوندهای یونی، هیدروژنی یا واندروالس ایجاد می‌کردند. نمونه تیمار نشده پیوندی بین مولکول‌ها و خاکدانه‌ها نداشت، بنابراین مقاومت فشاری و پایداری سنگدانه‌ها در این نمونه‌ها بسیار ضعیف بود.

Almajed et al. (2020) از آزمایش تونل باد برای ارزیابی نرخ فرسایش بادی نمونه‌های تیمار شده با غلظت‌های مختلف بیوپلیمرها استفاده کردند. نتایج نشان داد که ترکیب رسوب کربناته ناشی از آنزیم و بیوپلیمر سدیم آلژینات منجر به بهبود قابل توجهی در نرخ فرسایش در مقایسه با نمونه‌های تیمار نشده، با نتایج موثر در غلظت‌های پایین‌تر سدیم آلژینات شد. این بهبود بیشتر به اثر پیوند بین ذره‌ای هر دو رسوب‌کننده کربنات و بیوپلیمر نسبت داده می‌شود. استحکام نامحدود پوسته‌ای که با استفاده از محلول تشکیل می‌شود با افزایش غلظت پلیمر زیستی افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل ویسکوزیته کمتر محلول بیوپلیمر و پیوند متقابل بیوپلیمر به دلیل وجود یون‌های کلسیم دو ظرفیتی است. خاک تیمار شده با رسوب کربناته ناشی از آنزیم به تنهایی کمترین استحکام را داشت و افزایش غلظت مولی کلرید کلسیم تأثیری بر مقاومت سطحی نداشت. بررسی‌ها نشان داد که بیشترین مقدار کاهش گرد و غبار در تیمار گوار با غلظت پنج درصد حاصل شد. در همین راستا Malekhamadi et al. (2021) به بررسی تأثیر بیوپلیمر گوار بر فرسایش بادی خاک پرداختند. به-

نتایج این بررسی نشان داد که استفاده از غلظت‌های بالای بیوپلیمر به‌صورت اسپری با یک سمپاش مزرعه‌ای سوار بر تراکتور، امکان استفاده مؤثر از مواد ضد گردوغبار را در مقیاس وسیع فراهم می‌کند. همچنین دستگاه آزمایشی تونل باد که توسط نگارنده طراحی شد برای اندازه‌گیری انتشار گردوغبار از قطعات خاک تیمار شده با بیوپلیمر و با قراردادن آنها در معرض جریان هوای تولید شده توسط دمنده هوا استفاده شد. استفاده از تونل باد روشی ساده و انعطاف‌پذیر برای بررسی مقاومت در برابر وزش باد و انتشار گردوغبار از خاک‌های در معرض سرعت‌های متغیر باد می‌باشد. در مجموع نتایج آزمایش‌ها شواهدی را ارائه می‌دهد که کاربرد اسپری بیوپلیمرها می‌تواند به‌طور مؤثر انتشار گردوغبار را در جاده‌های جنگلی و حتی معادن در کوتاه مدت کاهش دهد. بنابراین، بیوپلیمرهای آزمایش شده، یک جایگزین امیدوار کننده زیستی و سازگار با محیط زیست برای کنترل گردوغبار هستند.

References

- A. Almajed, A.; Lemboye, K.; Arab, M.G.; Alnuaim, A., Mitigating wind erosion of sand using biopolymer-assisted EICP technique. *Journal of Soils and Foundations* **2020**, *60*(2), 356-371.
- nandha, K.S.; Ramani, S.E., Performance evaluation of β -glucan treated lean clay and efficacy of its choice as a sustainable alternative for ground improvement. *Journal of Geomechanics and Engineering* **2020**, *21*(5), 413-422.
- Bacic, A.; Fincher, G.B.; Stone, B.A., Chemistry, Biochemistry, and Biology of 1-3 Beta Glucans and Related Polysaccharides. *Academic Press* **2009**, *1*(3), 10-23.

موضوع اقتصادی بودن تیمارها نیاز به بررسی‌های بیشتر از نظر هزینه‌یابی خسارات ناشی از گرد و غبار و بررسی دوام تیمارها دارد که در این پژوهش انجام نشده است و از این‌رو، در اینجا نمی‌توان در خصوص مقرون به‌صرفه بودن تیمارها اظهار نظر قطعی و علمی کرد.

نتیجه‌گیری کلی

کاربرد بیوپلیمرها به‌عنوان تثبیت‌کننده‌های سازگار با محیط‌زیست برای تقویت خاک‌ها در سال‌های اخیر توجه روزافزونی را به خود جلب کرده است. این مقاله یک بررسی تجربی و عددی از کاربرد صمغ زانتان، گوار و بتاگلوکان به‌عنوان بیوپلیمرهای سبز، برای تثبیت گرد و غبار جاده‌های جنگلی ارائه داد. صرف‌نظر از سرعت باد، در تمام قطعات آزمایشی تیمار شده با بیوپلیمر، کاهش قابل توجهی در انتشار گردوغبار مشاهده شد، در حالی که قطعات تیمار نشده مقدار زیادی گرد و غبار تولید کردند. جریان هوای تولید شده توسط پنکه سبب تولید مقادیر قابل توجهی گرد و غبار در قطعات آزمایشی تیمار نشده گردید.

- Cabalar, A.F.; Wiszniewski, M.; Skutnik, Z., Effects of Xanthan Gum Biopolymer on the Permeability, Oedometer, Unconfined Compressive and Triaxial Shear Behavior of a Sand. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering* **2017**, *54*(6), 356-361.
- Chen, R.; Ding, X.; Lai, H.; Zhang, J. Improving dust resistance of mine tailings using green biopolymer. *Journal of Environmental Geotechnics* **2021**, *8*(6), 382-391.
- Chen, R.; Lee, I.; Zhang, L., Biopolymer Stabilization of Mine Tailings for Dust Control. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **2014**, *141*(2), 110-117.
- Chiou, S.F.; Tsai, C.J., Measurement of emission factor of road dust in a wind

- tunnel. *Journal of Powder Technology* **2001**, *118*(2), 10-15.
- Choi, S.J.; Bae, S.H.; Lee, J.; Bang, E.; Choi, H.Y.; Ko, H.M., Effect of Bio-Inspired Polymer Types on Engineering Characteristics of Cement Composites. *Journal of Polymers* **2022**, *14*(9), 180-188.
- Fatehi, H.; Ong, D.E.L.; Yu, J.; Chang, I., Biopolymers as Green Binders for Soil Improvement in Geotechnical Applications: A Review. *Journal of Geosciences* **2021**, *11*(7), 291p.
- Jaddi Hosseini, S.A.R.; Parsakhoo, A.; Ezzati, S.; Rezaei Motlagh, A., The effect of using agricultural waste ash on improving the mechanical properties of forest roadbed soil. *Journal of Forest Research and Development* **2025**, *11*(2), 249-265. (In Persian).
- Jang, J. 2020. A Review of the Application of Biopolymers on Geotechnical Engineering and the Strengthening Mechanisms between Typical Biopolymers and Soils. Hindawi, *Advances in Materials Science and Engineering* **2020**, *1*(5), 1-16.
- Judge, P.K.; Sundberg, E.; DeGroot, D.J.; Zhang, G., Effects of biopolymers on the liquid limit and undrained shear strength of soft clays. *Journal of Bulletin of Engineering Geology and the Environment* **2022**, *81*(1), 342-349.
- Malekhamadi, K.; Hashemi, M.; Dehnavi, A.; Heidari, F. A., Study on Effect of Guar Biodegradable Biopolymer on Soil Wind Erosion. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering* **2021**, *15*(53), 46-57. (In Persian).
- NamdarKhojaste, D.; Bahrami, H.A.; Keyanirad, M., Comparison of different polymer formulations on dust stabilization and aggregate stability. *Journal of Watershed Management Research* **2016**, *29*(1), 51-62. (In Persian).
- Parsakhoo, A.; Hosseini, SA; Lotfalian, M; Mohammadi, J; Salarijazi, M., Efficiency of different anti-dust agents in reducing the dust emission from forest road and deposition on leaf surface. *Croatian Journal of Forest Engineering* **2021a**, *42*(2), 269-282.
- Parsakhoo, A.; Rezaei Motlagh, A.; Matinnia, B., Effect of hydro-mulches on runoff and soil loss rate from steep slopes. *Journal of Forest Research and Development* **2021b**, *7*(1), 15-26. (In Persian).
- Rezaeimotlagh, A.; Parsakhoo, P.; Najafi, A.; Mohammadi, J., Development of a Sustainable Maintenance Strategy for Forest Road Wearing Courses in Different Climate Zones, *Croatian Journal of Forest Engineering* **2023**, *45*(1), 1-18.
- Shahmoradi, G.; Parsakhoo, A.; Lotfalian, M., Investigating the efficiency of DS-300 and CaCl₂ in dust mitigation from gravel forest roads. *Journal of Forest Research and Development* **2020**, *6*(4), 559-571. (In Persian).
- Sieger, J.L.; Lottermoser, B.G.; Freer, J., Effectiveness of protein and polysaccharide biopolymers as dust suppressants on mine soils: Results from wind tunnel and penetrometer testing. *Journal of Applied Sciences*. **2023**, *13*(7), 3-27.
- Singh, R.; Ram, K., Meta-analysis of polyaromatic hydrocarbons in road dust: An emerging threat in urban environment. *Journal of Urban Climate* **2024**, *58*(1), 102-107.
- Wang, J.; Du, C.; Luo, Z.; Ding, X., Study on starting mechanism and chemical control of road dust under disturbance of automobile tire in open-pit mine. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **2025**, *13*(3), 116-121.
- Xia, S.; Song, Z.; Zhao, X.; Gao, Z.; Wen, Y.; Li, Y., Preparation of a vegetable-oil film-type emulsion dust suppressant and adsorption performance study on road dust surface in open-pit coal mines. *Journal of Environmental Research* **2025**, *278*(1), 121-127.
- Yan, J.; Yang, F.; Zhang, W.; Li, P.; Zhou, W.; Lu, X.; Li, K., Characterization of road dust and formulation of a molasses-based dust suppressant for heavy-duty haul roads in open-pit coal mine. *Journal of Atmospheric Pollution Research* **2025**, *16*(9), 102-109.
- Yulevitch, G.; Danon, M.; Krasovitev, B.; Fominykh, A.; Swet, N.; Tsesarsky, M.; Katra, I., Evaluation of wind-induced dust-PM emission from unpaved roads varying in silt content by experimental results. *Journal of Atmospheric Pollution Research* **2020**, *11*(2), 261-268.

