

Research Paper

## The effect of gravel cover characteristics on dust control of Arab-Dagh Forest roads in Golestan province

Ebrahim Hosseinzade<sup>1</sup>, Aidin Parsakhoo<sup>2</sup>, Sättar Ezzati<sup>\*3</sup>

1- MSc. student of Forestry, Department of Forestry, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I. R. Iran. (frydh7817@gmail.com)

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

3- Assistant Professor, Department of Forestry, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I. R. Iran. (sattar.ezzati@gau.ac.ir)

Received: 29 October 2025

Revised: 14 February 2025

Accepted: 15 February 2025

### Extended Abstract

**Background and Objective:** Most forest roads in Golestan Province are unpaved or gravel-surfaced and generate considerable amounts of dust during the dry season, particularly in summer, due to vehicle traffic and wind action. Besides reducing driver visibility and traffic safety, dust emissions contribute to environmental pollution, diminish the recreational value of forest areas, and accelerate surface deterioration of forest roads. Therefore, identifying sustainable dust control measures is essential. One practical approach in arid and semi-arid regions is the application of gravel mulch, which increases surface roughness, reduces near-surface wind velocity, and traps fine particles. This study aimed to evaluate the effects of gravel type and surface cover percentage on dust suppression along the Arab-Dagh forest roads in eastern Golestan Province.

**Material and Methods:** A portable wind tunnel was used to simulate wind-induced soil erosion and dust emission under field conditions. The tunnel had a contact area of 60 × 38 cm, and road sections with similar geometric characteristics (slope, curvature, and width) were randomly selected. Three gravel types, including small cobbles (>3 cm), almond-shaped gravel (1.5–3 cm), and fine gravel (<1.5 cm), were applied at four surface cover levels (0, 25, 50, and 75%). After application, the treated surfaces were compacted using a manual cylindrical roller to ensure initial stability. Experiments were conducted at wind velocities of 2 and 4 m s<sup>-1</sup>, representing typical airflow generated by moving vehicles. Each treatment was replicated three times, resulting in a total of 72 experimental units. Dust collected in the silicone chamber at the end of the wind tunnel was weighed using a digital balance with a precision of 0.1 mg. Data were analyzed as a factorial experiment using the General Linear Model (GLM) in SPSS at the 99% confidence level.

**Results:** Gravel type, surface cover percentage, and wind velocity each had significant effects on dust production ( $P < 0.01$ ). The interaction between gravel type and cover percentage was also significant, whereas the three-way interaction with wind velocity was not ( $P > 0.05$ ). All gravel treatments significantly reduced dust emissions compared with the control, with small cobbles showing the greatest effectiveness. Mean dust production decreased from 15.17 g m<sup>-3</sup> in the untreated control to 9.72, 11.09, and 11.87 g m<sup>-3</sup> for small cobbles, almond-shaped gravel, and fine gravel, respectively. Increasing surface cover significantly enhanced dust suppression. At 75%

coverage, small cobbles reduced dust emissions by 81% and 71% under wind speeds of 2 and 4 m s<sup>-1</sup>, respectively. Under the same coverage, almond-shaped gravel reduced dust by 44% and 50%, while fine gravel achieved approximately 44% reduction at both wind speeds. The lowest dust suppression occurred at 25% surface cover. Increasing wind velocity from 2 to 4 m s<sup>-1</sup> significantly increased dust emissions. The results further demonstrated that gravel size and particle shape play a key role in improving soil surface stability. Small cobbles increased surface roughness, reduced near-bed airflow velocity, filled surface voids, and effectively trapped suspended particles, thereby providing the highest dust control efficiency.

**Conclusion:** Depending on particle size and surface coverage, gravel mulch can substantially reduce wind erosion and dust emissions from forest roads. Given the availability of suitable rock borrow sources in eastern Golestan Province, applying small cobbles at approximately 75% surface coverage is recommended as an economical, durable, and environmentally friendly method for controlling dust along the Arab-Dagh forest road network. Further studies are recommended to evaluate the long-term durability and seasonal performance of gravel mulch under natural rainfall and field conditions.

**Keywords:** Forest road maintenance; small cobbles; roller compaction; wind tunnel; surface cover; road protection.

**How to Cite This Article:** Hosseinzade, E., Parsakhoo, A., and Ezzati, S. (2026). The effect of gravel cover characteristics on dust control of Arab-Dagh Forest roads in Golestan province. *Forest Research and Development*, 12(2), 261-276. DOI: [10.30466/jfrd.2026.56699.1788](https://doi.org/10.30466/jfrd.2026.56699.1788)



Copyright ©2024 Hosseinzade 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.

## تأثیر مشخصات مالچ سنگریزه‌ای بر کنترل گرد و غبار جاده‌های جنگلی منطقه عرب‌داغ استان گلستان

ابراهیم حسین‌زاده<sup>۱</sup>، آیدین پارساخو<sup>۲</sup> و ستار عزتی<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. (frydh7817@gmail.com)

۲- دانشیار، گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. (parsakhoo@gu.ac.ir)

۳- استادیار، گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. (Sattar.ezzati@gu.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۷

### چکیده

**مقدمه و هدف:** شبکه جاده‌های جنگلی استان گلستان بیشتر خاکی یا شن‌ریزی شده‌اند و در فصل‌های گرم سال به‌ویژه تابستان، تحت تأثیر وزش باد و تردد وسایل نقلیه، مقدار قابل‌توجهی گرد و غبار تولید می‌کنند. این پدیده علاوه بر کاهش کیفیت دید رانندگان و تهدید ایمنی عبور و مرور، موجب آلودگی محیط‌زیست، نارضایتی گردشگران و تسریع در فرسایش سطحی جاده‌ها می‌شود. از این‌رو، شناسایی راهکارهای پایدار برای کنترل گرد و غبار جنگل راه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از روش‌های متداول و قابل‌اجرا در اراضی خشک و نیمه‌خشک استفاده از پوشش‌های سنگ‌ریزه‌ای (مالچ سنگ‌ریزه) است که می‌تواند با ایجاد زبری سطحی، نفوذ باد به لایه‌های خاک را کاهش داده و درعین‌حال ذرات گرد و غبار را به‌دام اندازد. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر نوع و درصد پوشش سنگ‌ریزه بر کنترل گرد و غبار جاده‌های جنگلی عرب‌داغ در شرق استان گلستان انجام شد.

**مواد و روش‌ها:** برای این منظور از دستگاه تونل باد پرتابل استفاده شد که می‌تواند با ایجاد جریان کنترل‌شده هوا در مسیر افقی، رفتار ذرات خاک و مقدار فرسایش بادی را در مقیاس میدانی شبیه‌سازی کند. سطح تماس تونل ۶۰ × ۳۸ سانتی‌متر در نظر گرفته شد و بخش‌هایی از شبکه جاده با ویژگی‌های هندسی یکنواخت (از نظر شیب، انحنا و عرض) به‌صورت تصادفی انتخاب شد. در این قطعات، تیمارهای مختلف پوشش سنگ‌ریزه با سه اندازه قلوه‌سنگ کوچک (بزرگ‌تر از سه سانتی‌متر)، سنگ‌ریزه بادمی (سه تا ۱/۵ سانتی‌متر) و ریگ (کوچک‌تر از ۱/۵ سانتی‌متر) با چهار سطح پوشش صفر (شاهد)، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد اجرا شد. پس از پاشش مصالح، سطوح تیمار شده با غلتک استوانه‌ای دستی متراکم شد تا پایداری اولیه سطح تأمین شود. آزمایش‌ها در دو سرعت جریان باد (دو و چهار متر بر ثانیه) که بیانگر شرایط واقعی باد در هنگام عبور خودروها بر سطح جاده هستند، انجام شد. برای هر سرعت سه تکرار و درمجموع ۷۲ نمونه آزمایشی مورد

ارزیابی قرار گرفت. گرد و غبار جمع‌آوری شده در محفظه سیلیکونی انتهای تونل پس از هر آزمایش توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ میلی گرم وزن شد. داده‌ها با طراحی آزمایش فاکتوریل و تجزیه آماری در قالب مدل خطی عمومی در سطح اطمینان ۹۹ درصد در نرم‌افزار SPSS تحلیل شد.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد که اثر مستقل نوع سنگ‌ریزه، درصد پوشش و سرعت باد بر مقدار گردوغبار تولیدشده در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود ( $P < 0.01$ ). همچنین، اثر متقابل نوع سنگ‌ریزه و درصد پوشش نیز معنی‌دار بود، اما برهم‌کنش این دو عامل با سرعت باد تفاوت آماری معنی‌داری نشان نداد ( $P > 0.05$ ). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که همه انواع سنگ‌ریزه نسبت به تیمار شاهد موجب کاهش معنی‌دار گردوغبار شدند، هرچند قلوه‌سنگ‌های کوچک بیشترین کارایی را داشتند. میانگین گردوغبار تولیدشده در تیمار شاهد ۱۷/۱۵ گرم بر مترمکعب بود که در تیمارهای قلوه‌سنگ کوچک، سنگ‌ریزه بادامی و ریگ به ترتیب به ۹/۷۲، ۱۱/۰۹ و ۱۱/۸۷ گرم بر مترمکعب کاهش یافت. افزایش درصد پوشش نیز به‌طور معنی‌داری میزان گردوغبار را کاهش داد؛ به‌طوری‌که پوشش ۷۵ درصد قلوه‌سنگ کوچک در سرعت‌های دو و چهار متر بر ثانیه به ترتیب موجب ۸۱ و ۷۱ درصد کاهش گردوغبار شد. در همین سطح پوشش، سنگ‌ریزه بادامی کاهش ۴۴ و ۵۰ درصدی و ریگ حدود ۴۴ درصد کاهش را در هر دو سرعت باد ایجاد کرد، در حالی که کمترین اثر کنترلی در پوشش ۲۵ درصد مشاهده شد. همچنین، افزایش سرعت باد از دو به چهار متر بر ثانیه باعث افزایش معنی‌دار تولید گردوغبار گردید. بررسی نتایج نشان داد که اندازه و شکل هندسی سنگ‌ریزه‌ها نقش مهمی در پایداری سطح خاک دارند؛ به‌گونه‌ای که قلوه‌سنگ‌های کوچک با افزایش زبری سطح، کاهش سرعت جریان نزدیک بستر و پر کردن منافذ خاک، توان فرسایش‌دگی باد را کاهش داده و در نتیجه بیشترین کارایی را در مهار انتشار ذرات معلق و کنترل گردوغبار نشان دادند.

**نتیجه‌گیری:** مالچ سنگ‌ریزه، بسته به اندازه و درصد پوشش، می‌تواند به‌طور قابل توجهی از فرسایش بادی سطح جاده‌های جنگلی پیشگیری کند و درعین حال مقدار گرد و غبار معلق در اثر تردد وسایل نقلیه را کاهش دهد. با توجه به دسترسی آسان به منابع قرضه سنگی در شرق استان گلستان، استفاده از قلوه‌سنگ‌های کوچک با تراکم حدود ۷۵ درصد به‌عنوان راهکاری اقتصادی، با دوام و زیست‌محیطی در کنترل گرد و غبار جاده‌های جنگلی عرب‌داغ توصیه می‌شود. با این حال، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، دوام زمانی این نوع مالچ و تغییر عملکرد آن در بازه‌های فصلی و تحت بارندگی‌های طبیعی بررسی شود تا از پایداری درازمدت و اثربخشی واقعی آن در شرایط میدانی اطمینان حاصل شود.

**واژه‌های کلیدی:** نگهداری شبکه جاده، قلوه‌سنگ کوچک، غلتک، تونل باد، پوشش سطحی، حفاظت جاده.

## مقدمه

گرد و غبار به ذرات معلق جامد در هوا که در اثر وزش باد ناشی از عبور ترافیک تا مسافت طولانی انتقال می‌یابد، گفته می‌شود. گرد و غبار جاده‌های جنگلی از سه بخش اصلی: غبار منتشر شده از آگروز وسایل نقلیه، غبار حاصل از ساییش تایر وسایل نقلیه با سطح جاده و غبار حاصل از فرسایش سطح راه، تشکیل شده است. گرد و غبار، محیط جاده‌ها را آلوده می‌کند و در صورت استنشاق توسط انسان، خطراتی برای سلامتی ایجاد می‌کند (Edvardsson, 2010; Gotosa et al., 2015). انتشار گرد و غبار از نیروی آئرودینامیکی باد برای کندن ذرات از سطح خاک استفاده می‌کند. ورود گرد و غبار از سطح خاک به شدت با فرآیند جهش مرتبط است (Swet et al., 2019; Shao et al., 1993). جهش زمانی آغاز می‌شود که تنش باد برای بلند کردن ذرات ریزدانه به اندازه ماسه (۶۳-۵۰۰ میکرومتر) به داخل جریان سیال ورد کند، ذرات بلندشده، مسیری شبیه به منحنی را طی می‌کنند تا به سطح برخورد کنند. ضربات حاصل می‌توانند ذرات جدید را به داخل جریان پرتاب کند (Jones, 1999; Monlux and Mitchell, 2007; Wang et al., 2025). در انتشار گرد و غبار توسط باد، فرسایش‌پذیری خاک عمدتاً با سنگ‌دانه‌هایی که کوچک‌تر از ۸۴۰ میکرومتر هستند مرتبط است. شاخص فرسایش‌پذیری بادی یک مقدار کمی را نشان می‌دهد که وزن سنگ‌ریزه‌های کوچک (>۸۴۰ میکرومتر) را نسبت به وزن کل نمونه خاک بیان می‌کند. پژوهش‌های متعددی ارتباط بین مقدار میانگین وزنی قطر سنگ‌دانه و پایداری خاک در برابر فرسایش بادی را بررسی کرده‌اند (He and Jiang, 2024; Lee et al., 2025; Ding et al., 2025). عامل اصلی پتانسیل انتشار گرد و غبار را بر اساس واحدهای زمینی در نظر می‌گیرد

و نشان می‌دهد که آبرفت، مخروط افکنه‌ها و دشت‌های آبرفتی، نقش مهمی در رسوبات فرسایش‌پذیر مؤثر در انتشار گرد و غبار دارند (Salehi et al., 2023). پژوهش Tanner et al. (2016) همبستگی منفی بین اندازه سنگ‌ریزه و انتشار گردوغبار با قطر کمتر از ۱۰ میکرومتر را نشان دادند. آنها اعلام کردند که برای افزایش پایداری سطح خاک و به‌منظور حفاظت جاده در مقابل فرسایش بادی و آبی می‌توان از پوشش سنگ-ریزه‌ای استفاده کرد (Lotfalian et al., 2018). بررسی‌های تجربی قبلی، انتشار گرد و غبار را در رابطه با توزیع اندازه سنگ‌ریزه‌های خاک بررسی کرده‌اند. با این حال، اطلاعات مربوط به نقش اندازه‌های مختلف سنگ‌ریزه در انتشار گرد و غبار هنوز محدود است. در پژوهشی که برای بررسی اثر پوشش سنگ‌ریزه‌ای و زبری بر مقدار فرسایش و سرعت آستانه فرسایش بادی به‌وسیله دستگاه سنجش فرسایش بادی در آزمایشگاه ژئومورفولوژی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه یزد انجام شد، مشخص شد که بین درصد پوشش ۵۰ و ۷۵ درصد تفاوت چندانی وجود ندارد و بیشترین اختلاف بین این دو پوشش با پوشش ۲۵ درصد و صفر (شاهد) است. یافته‌های این بررسی، استفاده از ماسه‌سنگ درشت‌دانه (قلوه‌سنگ‌های کوچک) مازاد در معادن شن و ماسه با تراکم ۵۰ درصد را به‌عنوان مناسب‌ترین نوع پوشش سنگ‌ریزه‌ای در اراضی حساس به فرسایش پیشنهاد دادند (Ahmadi, 1990). پژوهش Gelbart and Katra (2020) به بررسی آستانه انتشار گرد و غبار در اندازه‌های مختلف سنگ‌دانه‌های یک خاک لسی نیمه‌خشک پرداختند. برای این‌منظور، از آزمایش تونل باد استفاده شد. نتایج نشان داد که آستانه گرد و غبار در سرعت‌های برشی ۰/۲۴-۰/۵۲ متر بر ثانیه به‌اندازه سنگ‌دانه‌ها بستگی دارد. گروه سنگ‌دانه‌های ۶۳-۲۵۰ میکرومتر بیشترین سهم را در کل انتشار گرد و غبار

داشت. (Hamidi et al. (2011) به بررسی تأثیرات شکل و اندازه سنگریزه بر ویژگی‌های مقاومتی خاک پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که سنگریزه‌های تیز گوشه نسبت به سنگریزه‌های گرد گوشه به اندازه بیشتری مقاومت مصالح را نسبت به عوامل فرساینده افزایش می‌دهند. به همین ترتیب، سنگریزه‌های با قطر دانه  $25/4$  میلی‌متر نیز نسبت به سنگریزه‌های با قطر دانه  $12/5$  میلی‌متر به مقدار بیشتری بر روی متغیرهای اشاره شده در بالا تأثیر می‌گذارند. نتایج شبیه‌سازی تونل باد و یک آزمایش میدانی توسط (Li et al. (2001 نشان داد که مالچ سنگریزه، دو عملکرد در کنترل فرسایش بادی دارد. اول، می‌تواند از فرسایش خاک توسط باد جلوگیری کند؛ دوم، می‌تواند گرد و غبار حمل‌شده توسط باد را به دام اندازد. طبق آزمایش شبیه‌سازی تونل باد، مالچ سنگریزه، مقدار فرسایش بادی را در سرعت‌های مختلف باد  $10$  تا  $26$  متر بر ثانیه در مقایسه با نمونه‌های کنترل،  $84$  تا  $96$  درصد کاهش داد. بررسی‌های میدانی نشان داد که مالچ سنگریزه می‌تواند  $1/6$  تا  $1/8$  برابر بیشتر از نمونه کنترل، گرد و غبار را به دام بیناندازد. آزمایش‌های تونل باد که توسط (Yang et al. (2024 انجام شد نشان داد بادهای متلاطم در تونل باد تأثیر کمی بر انتقال گرد و غبار دارند، درحالی‌که گردی ذرات تأثیر قابل توجهی بر انتقال دارد. ذرات رس و ذرات گرد و غبار در مناطق با خاک لسی منشأ و مسیرهای انتقال یکسانی دارند.

با توجه به مرور منابع مشخص می‌شود که بررسی‌های میدانی راجع به روش‌های مقابله با گرد و غبار جاده‌های جنگلی تحت شرایط وزش باد کنترل‌شده به کمک تونل باد پورتابل در کشور ما انجام نشده و در جهان نیز محدود است. درحالی‌که، این روش به دلیل نزدیکی به واقعیت میدانی می‌تواند درصد اطمینان به نتایج را افزایش و مقدار اشتباه اندازه‌گیری را کاهش

دهد. در برخی جاده‌های جنگلی استان گلستان به دلیل مشخصات اقلیم و سازندهای زمین‌شناسی منطقه کانون گرد و غبار هستند. همچنین توقف طرح‌های جنگلداری و به تبع آن توقف عملیات دوره‌ای حفاظت و نگهداری سبب استهلاک جاده‌ها و انباشتگی رسوبات بادی و آبرفتی روی سطح جاده شد که این موضوع سبب تشدید انتشار گردوغبار هنگام تردد وسایل نقلیه می‌شود. در نواحی شرقی استان، وجود رسوبات بادی به صورت ذرات سیلت و رس و ماسه در بستر خاکی سبب تولید گرد و غبار انبوه و در نتیجه، تخریب سریع روسازی شبکه جاده می‌شود (Parsakhoo et al., 2021). مبارزه با گرد و غبار جاده‌های خاکی یا شن‌ریزی شده برای اطمینان از ایمنی تردد، آسایش گردشگران، کاهش هزینه‌های نگهداری جاده و حفظ سلامت محیط زیست از ضرورت بالایی برخوردار است. یکی از روش‌های کنترل گرد و غبار جاده‌ها استفاده از مالچ سنگریزه است. دست‌یابی سریع و آسان به منابع قرضه و اثرگذاری سریع و دوام طولانی مدت از جنبه‌های مثبت این شیوه کنترل گرد و غبار در شرق استان است. اثربخشی مالچ سنگریزه در کنترل فرسایش خاک توسط باد و انتشار گرد و غبار در عمل پذیرفته شده است، اما بررسی‌ها و داده‌های تجربی بسیار کمی در مقالات موجود است؛ بنابراین، هدف از این پژوهش بررسی تأثیر مشخصات پوشش سنگ‌ریزه‌ای بر کنترل گرد و غبار جاده‌های جنگلی عرب‌داغ استان گلستان است.

### مواد و روش‌ها

#### مشخصات منطقه مورد پژوهش

نمونه‌های پژوهشی این بررسی از جاده‌های جنگلی منطقه عرب‌داغ واقع در شرق استان گلستان تهیه شد

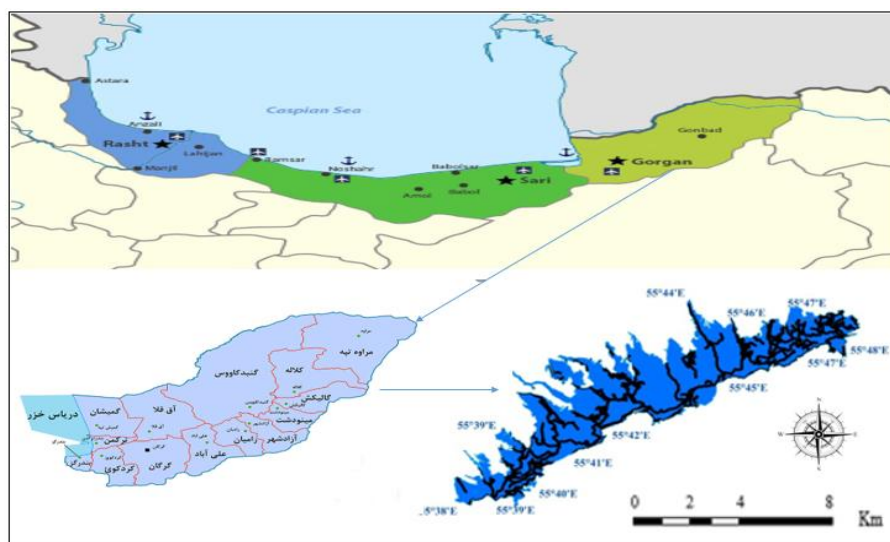
(شکل ۱). مشخصات عمومی این منطقه به شرح جدول

۱ است.

جدول ۱- مشخصات عمومی منطقه مورد بررسی

Table 1. General characteristics of the study area

| مشخصات                                    | Location                  |
|-------------------------------------------|---------------------------|
| طول جغرافیایی                             | 55°37'04" to 55°47'07" E  |
| Longitude                                 |                           |
| عرض جغرافیایی                             | 37°32'01" to 37°36'05" N  |
| Latitude                                  |                           |
| مساحت (هکتار)                             | 2240                      |
| Area (ha)                                 |                           |
| محدوده ارتفاعی (متر)                      | 200-1000                  |
| Elevation range (m)                       |                           |
| نوع اقلیم (دومارتن)                       | Semi-arid                 |
| Climate type (De Martonne classification) |                           |
| نوع خاک                                   | Loess-derived sedimentary |
| Soil type                                 |                           |
| میانگین بارندگی سالانه (میلی متر)         | 536.70                    |
| Mean annual precipitation (mm)            |                           |
| میانگین حرارت سالیانه (درجه سانتی گراد)   | 16.90                     |
| Mean annual temperature (°C)              |                           |
| طول جاده جنگلی (کیلومتر)                  | 30                        |
| Total length of forest roads (km)         |                           |



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی مناطق مورد بررسی

Figure 1. Geographical location of the study areas

### مشخصات دستگاه تونل باد قابل حمل

در این بررسی از یک دستگاه تونل باد قابل حمل که به صورت یک مدل فیزیکی - صحرایی که قادر به تولید باد با سرعت متفاوت بر روی سطح جاده است استفاده شد. در کف این تونل یک سطح تماس به ابعاد  $60 \times 38$  سانتی متر تعبیه شد که با مماس شدن کف دستگاه با سطح جاده، جریان باد داخل تونل، خاک را نیز تحت تأثیر قرار می دهد. این دستگاه در انتها دارای یک محفظه پلاستیکی دوجداره سیلیکون مانند است که موجب

جمع آوری گرد و غبار یا همان مواد فرسایش یافته از سطح تماس و خروج هوای صاف می شود. دستگاه مذکور به وسیله خودرو سواری به منطقه مورد نظر حمل شده و به کمک یک موتور برق سیار راه اندازی شد. سرعت باد داخل تونل از دو تا چهار متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۵ سانتی متری قابل تنظیم بود. جداره داخلی دستگاه مجهز به هانی کام برای هدایت جریان باد بود (Raupach and Leys, 1990; Ahmadi, 1990; Wang et al., 2019).



شکل ۲- شبیه سازی جریان باد و نمونه برداری گرد و غبار در عرصه

Figure 2. Simulation of wind flow and dust sampling in the field

### روش پژوهش

قطعاتی از شبکه جاده که از نظر شیب طولی، انحنا، عرض عبور و دیگر موارد فنی یکنواخت بود، به صورت تصادفی انتخاب شد. این قطعات دارای شیب طولی کمتر از چهار درصد، عرض عبور ۵/۵ متر و بدون قوس و انحنا بودند. در مجموع ۷۲ قطعه نمونه به ابعاد  $60 \times 38$  سانتی متر روی جاده مشخص و سنگ ریزه با ابعاد

قلوه سنگ (بزرگ تر از ۳ سانتی متر)، بادامی ( $3-1/5$  سانتی متر) و ریگ (کوچک تر از  $1/5$  سانتی متر) با پوشش سطحی صفر یا شاهد، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد روی قطعات پاشیده شد (Ahmadi, 1990). در مرحله بعد، قطعات تیمار شده توسط غلتک استوانه ای غیرمکانیزه (دستی) ۱۵۰ کیلوپی با فشار وارد بر سطح  $0/38$  کیلوگرم بر سانتی متر مربع کوبیده شد تا به تراکم برسد.

## نتایج

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر مستقل نوع تیمار سنگریزه، درصد پوشش تیمار سنگریزه و سرعت باد بر مقدار گرد و غبار حاصل از پلات‌های مستقر در تونل باد در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار بود. همچنین اثر متقابل نوع تیمار سنگریزه و درصد پوشش تیمارهای سنگریزه بر مقدار گرد و غبار حاصل از پلات‌های مستقر در تونل باد در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار بود. بدین ترتیب که با افزایش درصد پوشش تیمارهای سنگریزه، مقدار گرد و غبار کاهش یافت. اثر متقابل نوع تیمار سنگریزه و سرعت باد، درصد پوشش تیمارهای سنگریزه و سرعت باد و همچنین نوع تیمار سنگریزه، درصد پوشش تیمارهای سنگریزه و سرعت باد بر مقدار گرد و غبار حاصل از پلات‌های مستقر در تونل باد معنی‌دار نبود ( $P>0.05$ ؛ جدول ۲).

سپس دستگاه تونل باد در ارتفاع ۱۵ سانتی‌متری تنظیم و روی هر قطعه قرار گرفت و آزمایش‌های شبیه‌سازی باد آغاز و سطح جاده در معرض بادهایی با سرعت دو و چهار متر در ثانیه قرار گرفت (متأثر از سرعت باد حین عبور خودروها). برای هر سرعت سه تکرار در نظر گرفته شد (در کل ۲۴ تیمار و ۷۲ نمونه گردوغبار). مدت زمان تأثیر باد روی کلیه قطعات یکسان و معادل دو دقیقه در نظر گرفته شد. گرد و غبار جمع‌آوری‌شده داخل سیلیکون‌های پلاستیکی توسط ترازو دیجیتالی با دقت ۰/۱ گرم وزن شد.

## تجزیه و تحلیل آماری

آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل در قالب آزمایش فاکتوریل انجام شد. تجزیه و تحلیل‌های آماری در نرم-افزار SPSS، نرمال بودن داده‌ها به کمک آزمون Shapiro-Wilk و مقایسه میانگین‌ها به کمک آزمون LSD انجام شد.

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

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

| منبع تغییرات                | درجه آزادی | مجموع مربعات   | میانگین مربعات | مقدار F | سطح معنی‌داری |
|-----------------------------|------------|----------------|----------------|---------|---------------|
| Source of Variation         | df         | Sum of Squares | Mean Square    | F-Value | P-Value       |
| مدل تصحیح‌شده               | 23         | 1167.96        | 50.78          | 46.28   | 0.000**       |
| Corrected Model             |            |                |                |         |               |
| عرض از مبدأ                 | 1          | 11397.04       | 11397.04       | 10.39   | 0.001**       |
| Intercept                   |            |                |                |         |               |
| نوع تیمار سنگریزه (A)       | 2          | 76.27          | 38.13          | 34.76   | 0.000**       |
| Gravel Type (A)             |            |                |                |         |               |
| سرعت باد (B)                | 1          | 84.37          | 84.37          | 76.90   | 0.000**       |
| Gravel Type (A)             |            |                |                |         |               |
| درصد پوشش سنگریزه (C)       | 3          | 919.12         | 306.37         | 279.22  | 0.000**       |
| Gravel Cover Percentage (C) |            |                |                |         |               |
| A×C                         | 6          | 75.06          | 12.51          | 11.40   | 0.001         |
| B×C                         | 3          | 3.79           | 1.26           | 1.15    | 0.062         |
| A×B                         | 2          | 2.44           | 1.22           | 1.11    | 0.071         |
| A×B×C                       | 6          | 6.90           | 1.15           | 1.05    | 0.085         |

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

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

ادامه جدول ۲.

Continued Table 2.

| منبع تغییرات        | درجه آزادی | مجموع مربعات   | میانگین مربعات | مقدار F | سطح معنی داری |
|---------------------|------------|----------------|----------------|---------|---------------|
| Source of Variation | df         | Sum of Squares | Mean Square    | F-Value | P-Value       |
| خطا                 | 72         | 79.00          | 1.10           |         |               |
| Error               |            |                |                |         |               |
| کل                  | 96         | 12644.00       |                |         |               |
| Total               |            |                |                |         |               |
| کل تصحیح شده        | 95         | 1246.96        |                |         |               |
| Corrected Total     |            |                |                |         |               |

\*\* معنی دار در سطح احتمال ۹۹ درصد، ns معنی دار نیست.

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

نتایج همچنین نشان داد که بیشترین مقدار کاهش گرد و غبار در تیمار قلوه سنگ با پوشش ۷۵ درصد حاصل شد. در این تیمار در سرعت های باد دو و چهار متر در ثانیه به ترتیب ۸۱ و ۷۱ درصد کاهش در مقدار گرد و غبار حاصل از پلات های مستقر در تونل باد مشاهده شد. در تیمار سنگ ریزه بادامی با پوشش ۷۵ درصد و در سرعت های باد دو و چهار متر در ثانیه مقدار گرد و غبار در تیمار قلوه سنگ با پوشش ۷۵ درصد یافت. در مورد تیمار ریگ با پوشش ۷۵ درصد مقدار کاهش گرد و غبار در هر دو تیمار سرعت باد برابر با ۴۴ درصد بود. در تمام تیمارهای سنگ ریزه بیشترین مقدار گرد و غبار حاصل از پلات های مستقر در تونل باد در پوشش ۲۵ درصد ثبت شد (جدول ۳).

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

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

| نوع سنگ ریزه                  | سرعت باد (متر در ثانیه)         | درصد پوشش | میانگین گرد و غبار (گرم در متر مکعب) | انحراف معیار (±)       | کاهش (درصد)   |
|-------------------------------|---------------------------------|-----------|--------------------------------------|------------------------|---------------|
| Gravel type                   | Wind speed (m s <sup>-1</sup> ) | Cover (%) | Mean dust (g m <sup>-3</sup> )       | Standard deviation (±) | Reduction (%) |
| قلوه سنگ<br>Cobble            | 2                               | 0         | 14.8 <sup>a</sup>                    | 1.4                    | -             |
|                               |                                 | 25        | 10.0 <sup>b</sup>                    | 0.8                    | 32            |
|                               |                                 | 50        | 6.70 <sup>c</sup>                    | 1.2                    | 55            |
|                               |                                 | 75        | 2.80 <sup>d</sup>                    | 0.8                    | 81            |
|                               |                                 |           |                                      |                        |               |
| بادامی<br>Almond-sized gravel | 4                               | 0         | 16.50 <sup>a</sup>                   | 0.9                    | -             |
|                               |                                 | 25        | 12.50 <sup>b</sup>                   | 0.6                    | 24            |
|                               |                                 | 50        | 9.70 <sup>c</sup>                    | 0.9                    | 41            |
|                               |                                 | 75        | 4.80 <sup>d</sup>                    | 0.6                    | 71            |
|                               |                                 |           |                                      |                        |               |
|                               | 2                               | 0         | 13.50 <sup>a</sup>                   | 1.2                    | -             |
|                               |                                 | 25        | 10.70 <sup>b</sup>                   | 0.9                    | 21            |
|                               |                                 | 50        | 9.50 <sup>b</sup>                    | 1.0                    | 30            |
|                               |                                 | 75        | 7.50 <sup>c</sup>                    | 0.5                    | 44            |
|                               |                                 |           |                                      |                        |               |
|                               | 4                               | 0         | 160.0 <sup>a</sup>                   | 0.8                    | -             |
|                               |                                 | 25        | 13.00 <sup>b</sup>                   | 0.8                    | 19            |
|                               |                                 | 50        | 10.50 <sup>c</sup>                   | 0.6                    | 34            |
|                               |                                 | 75        | 8.00 <sup>d</sup>                    | 0.8                    | 50            |
|                               |                                 |           |                                      |                        |               |

حروف مختلف در یک ستون نشان دهنده وجود تفاوت معنی دار در سطح احتمال پنج درصد است.

Different letters in a column indicate a significant difference at the 5% probability level.

ادامه جدول ۳.

Continued Table 3.

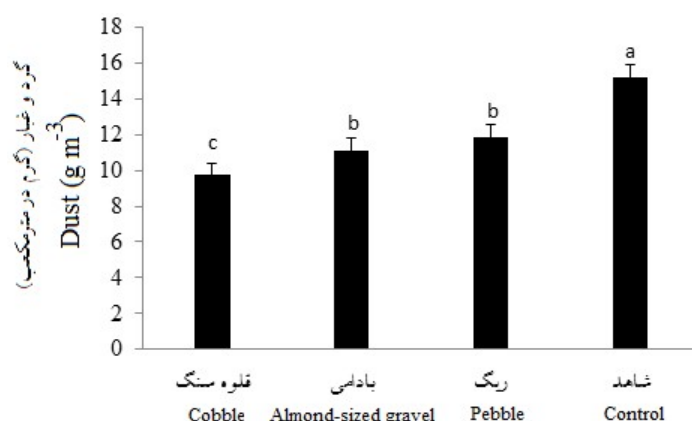
| کاهش (درصد)<br>Reduction (%) | انحراف معیار (±)<br>Standard deviation (±) | میانگین گرد و غبار (گرم در مترمکعب)<br>Mean dust (g m <sup>-3</sup> ) | درصد پوشش<br>Cover (%) | سرعت باد (متر در ثانیه)<br>Wind speed (m s <sup>-1</sup> ) | نوع سنگریزه<br>Gravel type |
|------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------|
| -                            | 1.6                                        | 13.70 <sup>a</sup>                                                    | 0                      | 2                                                          | ریگ<br>Pebble              |
| 15                           | 0.9                                        | 11.70 <sup>a</sup>                                                    | 25                     |                                                            |                            |
| 22                           | 0.9                                        | 10.70 <sup>a</sup>                                                    | 50                     |                                                            |                            |
| 44                           | 0.7                                        | 7.70 <sup>b</sup>                                                     | 75                     |                                                            |                            |
| -                            | 1.9                                        | 16.50 <sup>a</sup>                                                    | 0                      | 4                                                          |                            |
| 18                           | 0.6                                        | 13.50 <sup>b</sup>                                                    | 25                     |                                                            |                            |
| 29                           | 1.1                                        | 11.70 <sup>b</sup>                                                    | 50                     |                                                            |                            |
| 44                           | 1.0                                        | 9.20 <sup>c</sup>                                                     | 75                     |                                                            |                            |

حروف مختلف در یک ستون نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد است.

Different letters in a column indicate a significant difference at the 5% probability level.

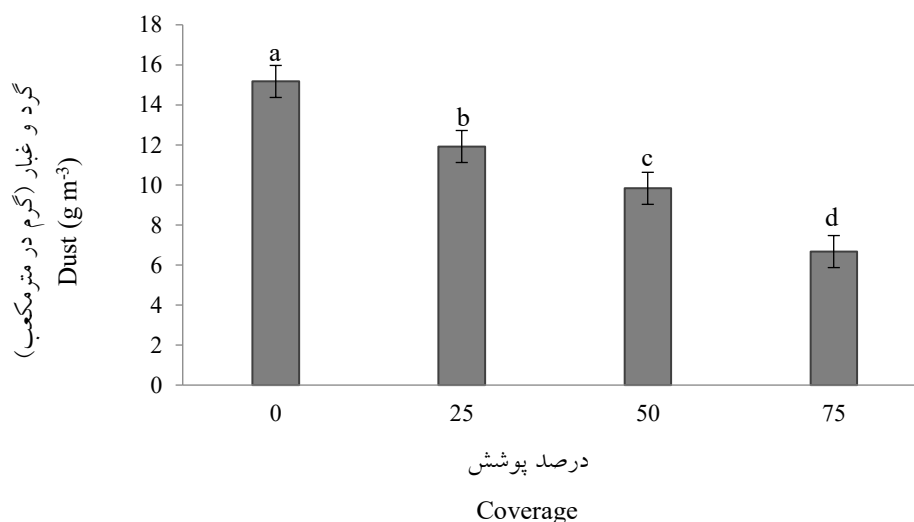
تیمارهای سنگریزه در سطح پلات مقدار گرد و غبار به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و این کاهش در تیمار با پوشش ۷۵ درصد بیشتر از تیمارهای دیگر بود (شکل ۴). با افزایش سرعت باد از دو متر بر ثانیه به چهار متر بر ثانیه، مقدار گرد و غبار حاصل از پلات‌های مستقر در تونل باد به‌طور معنی‌داری از ۹/۹۶ گرم در مترمکعب به ۱۱/۹۰ گرم در مترمکعب افزایش یافت ( $P < 0.05$ ; شکل ۵).

نتایج آزمون مقایسه میانگین‌ها نشان داد که هر سه تیمار سنگریزه توانستند به‌طور معنی‌داری مقدار گرد و غبار حاصل از پلات‌های مستقر در تونل باد را در مقایسه با تیمار شاهد کاهش دهند. طوری‌که مقدار تولید گردوغبار در پلات تیمار شده با قلوه‌سنگ، سنگریزه بادامی و ریگ به‌ترتیب ۹/۷۲، ۱۱/۰۹ و ۱۱/۸۷ گرم در مترمکعب و در تیمار شاهد ۱۵/۱۷ گرم در مترمکعب بود (شکل ۳). همچنین با افزایش درصد پوشش



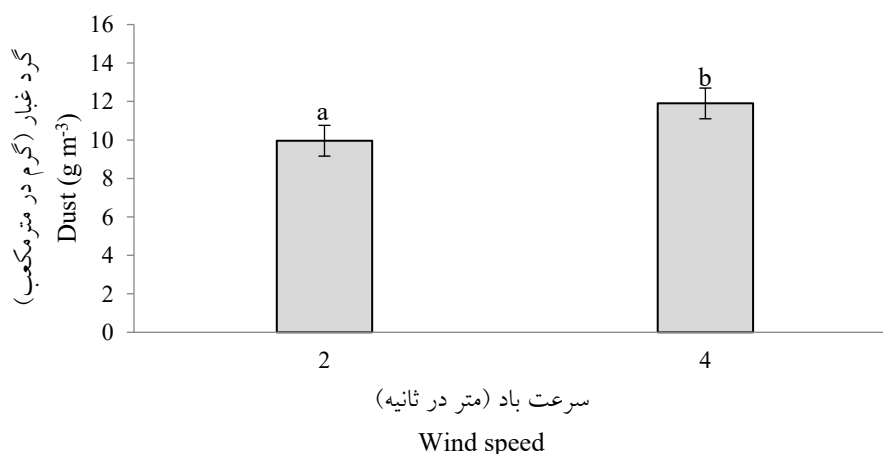
شکل ۳- مقایسه مقدار گرد و غبار حاصل از پلات‌های تیمار شده با انواع سنگریزه در تونل باد بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد

Figure 3. Comparison of the amount of dust produced from plots treated with various aggregates in the wind tunnel based on the LSD test at a probability level of 5%.



شکل ۴- مقایسه مقدار گرد و غبار حاصل از پلات‌های تیمار شده با درصد پوشش‌های مختلف سنگ‌ریزه در تونل باد

Figure 4. Comparison of the amount of dust produced from plots treated with different coverages of biopolymer in the wind tunnel



شکل ۵ - مقایسه اثر سرعت باد در انتشار گرد و غبار بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد

Figure 5. Comparison of the effect of wind speed on dust emission based on the LSD test at a probability level of 5 percent.

ایجاد زبری ناشی از وجود (Zobeck et al., 2013).

سنگ‌ریزه بر کاهش شدت فرسایش و انتشار گرد و غبار تأثیرگذار است. زبری سطح خاک یک عامل کاهنده سرعت باد در سطح تماس جریان باد و خاک بوده و سبب می‌شود که قدرت فرساینده باد قادر به حمل ذرات نباشد (Hevia et al., 2007; Yulevitch et al., 2020). پوشش سنگ‌ریزه سطح روسازی جاده، علاوه بر افزایش زبری سطح و ممانعت از انتقال ذرات، سبب کاهش اثر

بحث

ماهیت پوشش سنگ‌ریزه‌ای به‌گونه‌ای است که به انسجام مواد متشکله روسازی کمک کرده و از این طریق می‌توان تجدید مصالح را به تعویق انداخت (Morgan et al., 2005). برای این کار، استفاده از مواد روسازی با ترکیب مناسب که تمامی طبقات قطری را شامل شود ضرورت دارد؛ زیرا ممکن است ترکیبات مصالح خود عامل تولید غبار شوند (Van Pelt et al., 2013;).

تونل باد به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. این یافته با نتایج بررسی‌های Wang et al., (2024) مطابقت دارد. آنها دریافتند که اندازه سنگریزه مهم‌ترین عاملی است که مقدار انتشار گرد و غبار را تعیین می‌کند. همچنین مشخص شد که سرعت باد بر مقدار انتشار گرد و غبار اثر مستقیم افزایشی دارد.

در این پژوهش هر سه تیمار سنگریزه توانستند به‌طور معنی‌داری مقدار گرد و غبار حاصل از پلات‌های مستقر در تونل باد را در مقایسه با تیمار شاهد کاهش دهند. تیمارهای سنگریزه با ایجاد یک حائل بین جاده و وسایل نقلیه به جلوگیری از پرتاب ذرات گرد و غبار از جاده به هوا توسط خودروها کمک می‌کنند (Ghanji et al., 2025; Colazo and Buschiazzi, 2010). همچنین سنگریزه‌های سطح جاده یک عامل کاهش دهنده سرعت باد بوده و قدرت فرساینده آن را کاهش می‌دهند (Kuttah and Olsson, 2025). در تمام تیمارهای سنگریزه بیشترین مقدار گرد و غبار حاصل از پلات-های مستقر در تونل باد در پوشش ۲۵ درصد ثبت شد. این یافته با نتایج بررسی‌هایی که در آزمایشگاه ژئومورفولوژی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه یزد توسط Ahmadi (1990) تطابق دارد. آنها دریافتند که بیشترین مقدار انتشار گرد و غبار در تیمار سنگریزه با پوشش ۲۵ درصد و کمترین مقدار غبار در پوشش‌های ۵۰ و ۷۵ درصد اتفاق افتاده بود. مقدار تولید گرد و غبار در پلات تیمار شده با قلوه‌سنگ، سنگریزه بادامی و ریگ به ترتیب ۹/۷۲، ۱۱/۰۹ و ۱۱/۸۷ گرم در مترمکعب و در تیمار شاهد ۱۵/۱۷ گرم در مترمکعب بود. کمترین مقدار انتشار گرد و غبار در تیمار قلوه‌سنگ کوچک با پوشش ۷۵ درصد مشاهده شد. درحالی‌که تیمارهای سنگریزه بادامی و ریگ حتی با پوشش ۷۵ درصد نتوانستند

فرساینده‌گی باران نیز می‌شود. یافته‌های این پژوهش نشان داد که نوع تیمار سنگریزه، درصد پوشش تیمار سنگریزه و سرعت باد بر مقدار انتشار گرد و غبار اثر معنی‌دار دارد. نوع تیمار سنگریزه بیشتر متأثر از اندازه و شکل سنگریزه‌ها است، طوری‌که منظور از تیمار قلوه‌سنگ کوچک، سنگریزه با ابعاد بزرگ‌تر از سه سانتی‌متر، بادامی سه تا ۱/۵ سانتی‌متر و ریگ کوچک‌تر از ۱/۵ سانتی‌متر است. پژوهش‌های متعددی ارتباط بین اندازه سنگریزه و پایداری خاک در برابر فرسایش بادی را نشان داده‌اند. در این راستا، پژوهش Tanner et al. (2016) نشان دادند که با افزایش اندازه سنگریزه‌ها مقدار انتشار گرد و غبار کاهش معنی‌داری پیدا کرده که این موضوع با یافته‌های این پژوهش مطابقت دارد. بررسی Hamidi et al., (2011) نیز اشاره داشتند که سنگریزه‌های با قطر دانه ۲۵/۴ میلی‌متر نسبت به سنگریزه‌های با قطر دانه ۱۲/۵ میلی‌متر عملکرد بهتری در کنترل گرد و غبار از خود نشان دادند. یکی از دلایل عملکرد مطلوب تیمار قلوه‌سنگ آن است که اندازه بزرگ دانه‌های تشکیل‌دهنده آن در مقایسه با تیمارهای دیگر سبب به دام انداختن گرد و غبار شده و مانند سدی مانع انتشار و ادامه حرکت ذرات می‌شود (Li et al., 2001). سرعت‌های برشی باد (۰/۵۲-۰/۲۴ متر بر ثانیه) بیشترین تأثیر را در تولید گرد و غبار از طریق مکانیسم فروپاشی سنگ‌دانه‌ها دارند. در سنگ‌دانه‌های بزرگ‌تر، سرعت برشی قوی برای شروع جهش و ایجاد شکستگی و انتشار گرد و غبار مورد نیاز است (Sirjani et al., 2019; Gelbart and Kutra, 2020). از این‌رو، در این پژوهش سطح جاده در معرض بادهایی با سرعت دو و چهار متر در ثانیه قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت باد از دو متر بر ثانیه به چهار متر بر ثانیه، مقدار گرد و غبار حاصل از پلات‌های مستقر در

عملکردی بهتر از تیمار قلوه سنگ داشته باشند. سنگ-ریزه‌های با ابعاد بزرگ‌تر با داشتن وزن بیشتر، فشار بیشتری را به بستر راه وارد می‌سازد. همین موضوع سبب می‌شود تا دانه‌های گردوغبار تحت فشار امکان انتشار نداشته باشند. همچنین درکنار هم قرارگرفتن قلوه‌سنگ‌ها و بیرون‌زدگی سطحی آنها حتی پس از غلتک زدن سبب می‌شود تا همانند سدی گردوغبار را به دام ببنداند. لازم به ذکر است که نوع مالچ به کاررفته که به عنوان بخشی از مصالح رویه جاده نیز محسوب می‌شود در مقدار انتشار گرد و غبار تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد (Swet and Katra, 2016). به عنوان مثال، برخی از شن‌های آهکی می‌توانند به شدت گرد و غبار ایجاد کنند درحالی‌که رسوبات یخچالی شنی همراه رس با خمیری بالا می‌توانند خاصیت چسبندگی قوی پیدا کنند که در برابر گرد و غبار به طور مؤثری مقاومت می‌کند. یکی از موارد مهمی که نیاز به بررسی‌های بیشتر دارد، مدت زمان دوام تیمارهای مالچ سنگ‌ریزه‌ای در کنترل غبار جاده‌ای است، لازم است در پژوهش‌های آینده به آن توجه شود.

### نتیجه‌گیری کلی

بر اساس یافته‌های پژوهش، مالچ سنگ‌ریزه با دو عملکرد خود نقش مهمی در کنترل گرد و غبار جاده‌ای ایفا می‌کنند. اول آنکه می‌توانند با پوشاندن سطح خاک،

base material and ancillary palygorskite-based biopolymer surfactant. *Construction and Building Materials* **2025**, 494, 145163.

Edvardsson, K. *Evaluation of Dust Suppressants for Gravel Roads: Methods Development and Efficiency Studies*; PhD Thesis, Royal Institute of Technology: Stockholm, Sweden, **2010**; p 70.

Gelbart, G.; Katra, I. Dependence of the dust emission on the aggregate sizes in loess soils. *Applied Sciences* **2020**, 10(16), 5410.

Ghanji Vatan, A.; Ezzati, S.; Tavankar, F.; Rahmani, R. The effect of skid trail designs on the recovery of soil physical properties.

مانع فرسایش خاک یا مصالح ریزدانه توسط باد شوند و دوم، می‌توانند گرد و غبار حمل‌شده توسط باد را به دام ببندد. این مورد تا حدود زیادی به اندازه سنگ‌ریزه بستگی دارد. سنگ‌ریزه‌های بزرگ‌تر و در اندازه قلوه-سنگ امکان به دام انداختن مقدار گرد و غبار بیشتری را دارند و این قابلیت با پوشاندن سطح بیشتری از رویه جاده بهتر نیز می‌شود. از ویژگی‌های مالچ سنگ‌ریزه‌ای در مقایسه با دیگر افزودنی‌های ضدغبار آن است که در اثر نور و تابش خورشید در درازمدت از بین نمی‌رود و به فناوری پیچیده‌ای نیاز نداشته و در تمام طول سال قابل استفاده است. با استفاده از درصد پوشش مناسب سنگ‌ریزه، هزینه کنترل گرد و غبار سالانه و همچنین اثرات زیست محیطی را می‌توان به طور قابل توجهی کاهش داد. در این بررسی مشخص شد استفاده از قلوه-سنگ با اندازه‌های بزرگ‌تر از سه سانتی‌متر و با پوشش ۷۵ درصد، مناسب‌ترین نوع پوشش سنگ‌ریزه‌ای به منظور حفاظت از جاده‌های جنگلی منطقه عرب‌داغ است.

### تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه/علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان از نویسنده اول در قالب پایان‌نامه دانشجویی با کد ۱۲۳۴۵۴۰۱ انجام شده است.

### References

- Ahmadi, H. M. R. Investigation of the effect of gravel mulch to control wind erosion of saline clay soils (Daq) that cannot be biologically restored. *Desert Journal* **1990**, 5(2), 1–16. (In Persian).
- Colazo, J. C.; Buschiazzi, D. E. Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. *Geoderma* **2010**, 159, 228–236.
- Ding, X.; Wang, T.; Fu, Q.; Xu, Q.; Luo, Z.; Wang, K.; Wei, T.; Wang, Y.; Zhang, Y.; Ma, M. A novel haul road dust suppression system using de-alkalized red mud as road

- Journal of Forest Research and Development* **2025**, 11(2), 205–222. (In Persian).
- Gotosa, J.; Nyamadzawo, G.; Mtetwa, T.; Kanda, A.; Dudu, V. P. Comparative road dust suppression capacity of molasses stillage and water on gravel road in Zimbabwe. *Advances in Research* **2015**, 3(2), 198–208.
- Hamidi, A.; Salimi, N.; Yazdanjo, V. Effects of sand grain shape and size on shear strength properties of sandy soils. *Quarterly Journal of Earth Sciences* **2011**, 20(80), 189–196. (In Persian).
- He, C.; Jiang, W. Research on particle size distribution and composition of road deposit dust in Xi'an: From the perspective of non-exhaust emissions. *Journal of Cleaner Production* **2024**, 470, 124136.
- Hevia, G. G.; Mendez, M.; Buschiazzi, D. E. Tillage affects soil aggregation parameters linked with wind erosion. *Geoderma* **2007**, 140, 90–96.
- Jones, D. Holistic approach to research into dust and dust control on unsealed roads. *Transportation Research Record* **1999**, 1652(2), 3–9.
- Kuttah, D.; Olsson, N. A. Field assessment of enzyme-based stabilization for sustainable forest roads in Sweden. *European Transport Studies* **2025**, 2, 24–32.
- Lee, M. G.; Ryu, H.; Chung, W.; Hyun, M.; Lee, S. H.; Pak, M.; Kim, M.; Hur, J.; Kwon, J. T.; Lee, J.; Kim, Y. Influence of road roughness and slope on the accumulation and distribution of tire-wear particles and heavy metals in road dust. *Environmental Research* **2025**, 282, 21–36.
- Li, X.; Liu, L.; Gong, J. Influence of pebble mulch on soil erosion by wind and trapping capacity for windblown sediment. *Soil and Tillage Research* **2001**, 59(3–4), 137–142.
- Lotfalian, M.; Parsakhoo, A.; Sadeghi, M.; Nazariani, N. Comparison of soil compaction recovery methods on skid trails. *Journal of Forest Research and Development* **2018**, 4(1), 59–71. (In Persian).
- Monlux, S.; Mitchell, M. Chloride stabilization of unpaved road aggregate surfacing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* **2007**, 1989(2), 50–58.
- Morgan, R. J.; Schaefer, V. R.; Sharma, R. S. *Determination and Evaluation of Alternative Methods for Managing and Controlling Highway-Related Dust: Phase II – Demonstration Project*; IHRB Project TR-506, Iowa Highway Research Board: Ames, IA, USA, **2005**; p 107.
- Parsakhoo, A.; Hosseini, S. A.; Lotfalian, M.; Mohammadi, J.; Salarijazi, M. Efficiency of different anti-dust agents in reducing dust emission from forest road and deposition on leaf surface. *Croatian Journal of Forest Engineering* **2021**, 42(2), 269–282.
- Raupach, M.; Leys, J. Erodynamics of a portable wind erosion tunnel for measuring soil erodibility by wind. *Soil Research* **1990**, 28, 177–191.
- Salehi, F.; Panahi, F.; Abbasi, H. Wind tunnel and threshold wind velocity simulation in different land-units of sand and dust storm sources. *Ecopersia* **2023**, 11(4), 369–380. (In Persian).
- Shao, Y.; Raupach, M.; Findlater, P. Effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **1993**, 98, 12719–12726.
- Sirjani, E.; Sameni, A.; Moosavi, A. A.; Mahmoodabadi, M.; Laurent, B. Portable wind tunnel experiments to study soil erosion by wind and its link to soil properties in the Fars Province, Iran. *Geoderma* **2019**, 333, 69–80.
- Swet, N.; Elperin, T.; Kok, J. F.; Martin, R. L.; Kutra, H. Y. I. Can active sands generate dust particles by wind-induced processes? *Earth and Planetary Science Letters* **2019**, 506, 371–380.
- Swet, N.; Kutra, I. Reduction in soil aggregation in response to dust emission processes. *Geomorphology* **2016**, 268, 177–183.
- Tanner, S.; Kutra, I.; Haim, A.; Zaady, E. Short-term soil loss by eolian erosion in response to different rain-fed agricultural practices. *Soil and Tillage Research* **2016**, 155, 149–156.
- Van Pelt, R.; Baddock, M.; Zobeck, T.; Schlegel, A.; Vigil, M.; Martinez, V. A. Field wind tunnel testing of two silt loam soils on the North America Central High Plains. *Aeolian Research* **2013**, 10, 53–59.
- Wang, J.; Luo, Z.; Zhang, G.; Chen, J.; Du, C.; Wang, Y.; Ding, X. Experimental and numerical simulation of road dust distribution and transport characteristics under disturbance of automobile tire in open-pit mine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **2025**, 266, 321–339.

- Wang, R.; Li, Q.; Zhou, N.; Chang, C.; Guo, Z.; Li, J. Effect of wind speed on aggregate size distribution of windblown sediment. *Aeolian Research* **2019**, 36, 1–8.
- Wang, R.; Zhang, Y.; Zhang, S.; Li, Q.; Wang, R.; Li, Z.; Chang, C.; Guo, Z.; Zhou, N. Comprehensive effect of soil particle size composition and wind speed on dust emission efficiency. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **2024**, 129(3), 156–181.
- Yang, J.; Li, X.; Wang, W.; Chai, H.; An, M.; Dai, Q. The mechanism of dust transportation based on wind tunnel experiments and numerical simulations. *Water* **2024**, 16(7), 1006.
- 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. *Atmospheric Pollution Research* **2020**, 11, 261–268.
- Zobeck, T.; Popham, T.; Skidmore, E.; Lamb, J.; Merrill, S.; Lindstrom, M. Aggregate-mean diameter and wind-erodible soil predictions using dry aggregate-size distributions. *Soil Science Society of America Journal* **2013**, 67, 425–436.

