Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University

Journal of Watershed Management Research, Vol. 17, Issue 1, 2026 ..... p: 82-93

OPEN ACCESS

Research Paper

Investigation and Comparison of Runoff and Sediment Yields in Different Sections of a Forest Road

Mostafa Moghaddami Rad[1] **and Vahid Rizvandi**[2]

1- Expert, General Directorate of Natural Resources and Watershed Management of Golestan Province, Golestan, Iran, (Corresponding Author: moghadami.mostafa@yahoo.com)
2- Staff Member, Vice-Chancellor for Research, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

Received: 23 August, 2025 Revised: 24 Novedmber, 2025 Accepted: 27 December, 2025

Extended Abstract

Background: Forest roads, as crucial developmental infrastructure in forested areas, play a significant role in the exploitation of natural resources, facilitation of transportation, and forest management. However, the construction of these roads has several environmental impacts, the most important of which include alterations in the hydrological regime, increased surface runoff, reduced soil permeability, and increased erosion and sedimentation. Over time, these changes can lead to decreased soil quality, habitat degradation, and reduced groundwater recharge, ultimately threatening the sustainability of forest ecosystems. Given that forest roads are divided into different sections based on topography and environmental conditions, such as the road shoulder, road surface, and side slopes, their impact on runoff and sediment production can vary across these sections. Therefore, quantitative and comparative assessment of these effects in different parts of forest roads is essential for sustainable natural resource management and mitigation of associated environmental damage. Considering the importance of this issue, the present study was conducted in the Kouhmian-Azadshahr forest to investigate changes in runoff volumes and sediment concentrations in different sections of a forest road.

Methods: Runoff and sediment were investigated using a rainfall simulator with one-square-meter plots. Experiments were conducted on three sections of the forest road: the roadbed, cut slopes, and fill slopes, with a rainfall intensity of 80 mm/hour for 32 minutes. Runoff and sediment were measured at 4-minute intervals, and soil samples were collected for physical analysis. Initial soil moisture was measured using an HB-2 moisture meter. After the experiment, runoff and sediment samples were transferred to the laboratory. The collected runoff volume in the designated areas was measured following each simulated rainfall event. Laboratory analyses included the determination of suspended solids, measurement of sediment concentration, and analysis of the physicochemical properties of the samples. Sediment samples were separated using Whatman No. 42 filters and dried in an oven at 105 °C. Soil physical parameters, including texture, organic matter content, and bulk density, were measured. Data were analyzed using the Kolmogorov-Smirnov test to examine data normality and Levene's test to assess variance homogeneity. To compare mean data between different road sections, the analysis of variance (ANOVA) and the least significant difference (LSD) test were used to determine the significance of differences in runoff and sediment yields among the sections.

Results: Runoff and sediment yields in different sections of the forest road were significantly influenced by soil physical properties, vegetation cover, and slope gradient. The roadbed exhibited the highest runoff volume due to high soil compaction, high bulk density, lack of vegetation cover, and reduced permeability. In contrast, cut slopes produced the highest amount of sediment, which was attributed to the high proportion of silt particles, steep slope, and less vegetation cover. Fill slopes, on the other hand, had the lowest runoff and sediment yields, potentially due to the increased percentage of vegetation cover and higher organic matter content in these areas. During the experimental period, runoff volume on the roadbed showed a linear increasing trend, while cut and fill slopes exhibited fluctuating changes after an initial increase, indicating the influence of soil saturation and surface crust formation. The runoff coefficient reached its maximum value (0.49 to 1) on the roadbed and its minimum value (0.14 to 0.51) on the fill slopes. Changes in sediment concentration also showed different patterns; at the beginning of the experiment, cut slopes had the highest sediment concentration, which decreased over time due to particle settling. This trend is attributed to sediment deposition as runoff energy decreased.

Copyright ©2026. Moghaddami Rad & Rizvandi. Published by Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 Unported License, 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.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1308]

Conversely, the roadbed, due to its compacted structure and high impermeability, produced less sediment than the cut slopes.
Conclusion: The findings of this study demonstrate that slope, vegetation cover, soil texture, and organic matter content are the main factors affecting runoff and sediment yields in different sections of forest roads. The results highlight the importance of appropriate road slope design, conservation and development of vegetation cover on cut and fill slopes, and the use of sustainable methods to reduce erosion and sedimentation. However, implementing appropriate management practices, including increasing vegetation cover, soil stabilization, and optimal road slope design, can mitigate negative impacts. Implementing these strategies will not only improve road stability but also protect water and soil resources and reduce erosion. Finally, it is recommended to pay special attention to sustainable forest road stabilization approaches in macro-level natural resource policymaking. Furthermore, future studies using hydrological models and long-term assessments of road construction impacts on water resource quality are recommended to ensure sustainable management of forest roads and reduce environmental damage.

Keywords: Cut Slope, Fill Slope, Runoff, Rainfall Simulator, Roadbed, Sediment

How to Cite This Article: Moghaddami Rad, M., & Rizvandi, V. (2026). Investigation and Comparison of Runoff and Sediment Yields in Different Sections of a Forest Road. *J Watershed Manage Res,* 17(1), 82-93. DOI: 10.61882/jwmr.2026.1308

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1308]

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

مقاله پژوهشی

بررسی و مقایسه مقدار رواناب و رسوب در بخش‌های مختلف جاده جنگلی

مصطفی مقدمی‌راد[1] و وحید ریزوندی[2]

۱- کارشناس، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان، گلستان، ایران، (نویسنده مسوول: moghadami.mostafa@yahoo.com)
۲- کارمند، معاونت پژوهشی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶
صفحه: ۸۲ تا ۹۳

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: جاده‌های جنگلی به عنوان یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های توسعه‌ای در مناطق جنگلی، نقش به سزایی در بهره‌برداری از منابع طبیعی، تسهیل حمل‌ونقل و مدیریت جنگل دارند. با این حال، احداث این جاده‌ها اثرات زیست‌محیطی متعددی به‌دنبال دارد که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به تغییرات در رژیم هیدرولوژیکی، افزایش رواناب سطحی، کاهش نفوذپذیری خاک و افزایش میزان فرسایش و رسوب‌زایی اشاره کرد. این تغییرات می‌توانند به مرور زمان باعث کاهش کیفیت خاک، تخریب زیستگاه‌های طبیعی، کاهش نفوذ آب به سفره‌های زیرزمینی و در نهایت، تهدید پایداری اکوسیستم‌های جنگلی شوند. از آنجا که جاده‌های جنگلی بر اساس توپوگرافی و شرایط محیطی به بخش‌های مختلفی مانند شانه جاده، سطح جاده و شیب‌های کناری تقسیم می‌شوند، میزان تأثیر آن‌ها بر تولید رواناب و رسوب می‌تواند در بخش‌های مختلف جاده متفاوت باشد. بنابر این، ارزیابی کمی و مقایسه‌ای این اثرات در بخش‌های مختلف جاده‌های جنگلی در مدیریت پایدار منابع طبیعی و کاهش خسارات محیط زیستی ناشی از آن‌ها مؤثر است. با توجه به اهمیت این موضوع، مطالعه حاضر در جنگل کوهمیان-آزادشهر با هدف بررسی تغییرات مقدار رواناب و غلظت رسوب در بخش‌های مختلف جاده جنگلی انجام شد.

مواد و روش‌ها: برای بررسی رواناب و رسوب، از شبیه‌ساز باران با پلات‌های یک مترمربعی استفاده شد. آزمایش‌ها در سه بخش جاده جنگلی شامل بستر جاده، ترانشه‌های خاکبرداری و ترانشه‌های خاکریزی با شدت بارش ۸۰ میلی‌متر در ساعت و طی ۳۰ دقیقه انجام گرفت. رواناب و رسوب در فواصل ۴ دقیقه‌ای اندازه‌گیری و نمونه‌های خاک برای تحلیل فیزیکی جمع‌آوری شدند. رطوبت اولیه خاک با دستگاه رطوبت‌سنج HB-2 اندازه‌گیری شد و پس از پایان آزمایش، نمونه‌های رواناب و رسوب به آزمایشگاه منتقل گردیدند. پس از هر بار بارندگی، حجم رواناب جمع‌آوری‌شده در مناطق مشخص شده اندازه‌گیری شد. آنالیزهای آزمایشگاهی شامل تعیین میزان ذرات معلق، اندازه‌گیری غلظت رسوب و تجزیه و تحلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها بود. نمونه‌های رسوب از طریق فیلترهای واتمن ۴۲ جدا و در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. پارامترهای فیزیکی خاک شامل بافت، ماده آلی و وزن مخصوص اندازه‌گیری گردیدند. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف برای بررسی نرمال بودن داده‌ها و آزمون لون برای بررسی همگنی واریانس‌ها انجام شد. جهت مقایسه میانگین داده‌ها بین بخش‌های مختلف جاده، از آزمون تحلیل واریانس (ANOVA) و آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) استفاده گردید تا میزان تفاوت رواناب و رسوب در بخش‌های مختلف جاده بررسی شود.

یافته‌ها: میزان رواناب و رسوب در بخش‌های مختلف جاده جنگلی به‌طور معناداری تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی خاک، پوشش گیاهی و شیب زمین قرار داشت. بستر جاده بیشترین میزان رواناب را به دلیل تراکم زیاد خاک، وزن مخصوص بالا، عدم پوشش گیاهی و کاهش نفوذپذیری دارا بود. در مقابل، ترانشه‌های خاکبرداری بیشترین مقدار رسوب را تولید کردند که این امر به‌دلیل میزان بالای ذرات سیلت، شیب زیاد و پوشش گیاهی کمتر بود. همچنین، ترانشه‌های خاکریزی کمترین مقدار رواناب و رسوب را داشتند که می‌تواند به دلیل افزایش درصد پوشش گیاهی و وجود ماده آلی بیشتر در این مناطق باشد. در طول دوره آزمایش، میزان رواناب در بستر جاده روند افزایشی خطی داشت، درحالی‌که در ترانشه‌های خاکبرداری و خاکریزی پس از یک افزایش اولیه، تغییراتی نوسانی مشاهده شد که نشان‌دهنده تأثیر اشباع خاک و تشکیل سله سطحی است. ضریب رواناب در بستر جاده به بیشترین مقدار (۰/۴۹ تا ۱) و در ترانشه‌های خاکریزی به کمترین مقدار (۰/۱۴ تا ۰/۵۱) رسید. تغییرات غلظت رسوب نیز الگوهای متفاوتی نشان دادند، به‌طوری‌که در ابتدای آزمایش، ترانشه‌های خاکبرداری بالاترین مقدار غلظت رسوب را داشتند که در طول زمان به دلیل ته‌نشینی ذرات، کاهش یافت. این روند ناشی از ته‌نشینی رسوبات در اثر کاهش انرژی رواناب است. در مقابل، بستر جاده به دلیل ساختار متراکم و عدم نفوذپذیری بالا، میزان رسوب کمتری در مقایسه با ترانشه‌های خاکبرداری تولید کرد.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهند که شیب، پوشش گیاهی، بافت خاک و میزان ماده آلی از عوامل اصلی تأثیرگذار بر میزان رواناب و رسوب در بخش‌های مختلف جاده‌های جنگلی هستند. نتایج به‌دست‌آمده بر اهمیت طراحی مناسب شیب جاده، حفظ و توسعه پوشش گیاهی در ترانشه‌های خاکبرداری و خاکریزی، و استفاده از روش‌های پایدار برای کاهش فرسایش و رسوب تأکید دارند. با این حال، به‌کارگیری روش‌های مدیریتی مناسب از جمله افزایش پوشش گیاهی، تثبیت خاک و طراحی بهینه شیب جاده می‌تواند اثرات منفی را کاهش دهد. اجرای این راهکارها، علاوه بر بهبود پایداری جاده، موجب حفاظت از منابع آب و خاک و کاهش فرسایش خواهد شد. در نهایت، پیشنهاد می‌شود که رویکردهای پایدارسازی جاده‌های جنگلی در سیاست‌گذاری‌های کلان منابع طبیعی مورد توجه ویژه قرار گیرند. همچنین، مطالعات آتی با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی و بررسی بلندمدت اثرات جاده‌سازی بر کیفیت منابع آب توصیه می‌شود تا مدیریت پایدار جاده‌های جنگلی و کاهش خسارات محیط زیستی تضمین گردد.

واژه‌های کلیدی: باران‌ساز، بستر جاده، ترانشه خاکبرداری، ترانشه خاکریزی، رسوب، رواناب

مقدمه

جاده‌های جنگلی از جمله زیرساخت‌های کلیدی در مدیریت پایدار منابع طبیعی به‌شمار می‌روند و نقشی مهم را در تسهیل دسترسی برای پایش، برداشت کنترل‌شده، حفاظت از تنوع زیستی و مقابله با بحران‌هایی مانند آتش‌سوزی ایفا می‌کنند (Grebner *et al.*, 2021; Hernández-Romero *et al.*, 2022; Wemple *et al.*, 2018) با این‌حال، در صورت طراحی، ساخت و نگهداری نامناسب، این جاده‌ها می‌توانند به یکی از عوامل اصلی تخریب زیست‌محیطی تبدیل شوند. شواهد نشان می‌دهند که جاده‌های جنگلی با حذف پوشش گیاهی، تغییر کاربری ناگهانی سطوح، و ایجاد سطوح غیرقابل نفوذ، منجر به افزایش رواناب سطحی، فرسایش خاک و قطعه‌قطعه شدن زیستگاه‌ها می‌شوند (Yousefi *et al.*, 2024; Yu *et al.*, 2024; Ferreira *et al.*, 2024). ساخت جاده‌ها در اکوسیستم‌های جنگلی به‌طور مستقیم منجر به ایجاد سطوح غیرقابل نفوذ و اختلال در الگوهای طبیعی جریان سطحی می‌شود که در نتیجه‌ی آن افزایش رواناب، تمرکز جریان و تشدید فرسایش و تولید رسوب رخ می‌دهد (Kastridis, 2020; Sidle *et al.*, 2006).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1308]

مطالعات متعدد به طور مداوم نشان داده‌اند که جاده‌های جنگلی یک منبع دائمی آلودگی رواناب سطحی هستند که هم کیفیت آب و هم سلامت اکوسیستم را تحت تاثیر قرار می‌دهند (Brown *et al*., 2015; Jourgholami *et al*., 2020) حذف پوشش گیاهی، شیب‌برداری دامنه‌ها، و عدم تثبیت کناره‌های جاده از مهم‌ترین عوامل تشدید این روند هستند (Zhao *et al*., 2022; Fidelus-Orzechowska *et al*., 2025). همچنین، اختلالات ناشی از جاده، الگوهای مهاجرت حیات وحش را بر هم می‌زند و زیستگاه‌های پرندگان و دوزیستان را تجزیه می‌کند (Wemple *et al.,* 2018; Remo & Giri, 2024). در شرایط بارش شدید، دامنه‌های خاکریز و ترانشه‌ها به‌شدت مستعد حرکات توده‌ای، فرسایش نقطه‌ای و شسته شدن رسوبات به رودخانه‌ها هستند (Sadeghi *et al.,* 2022; Cao *et al.,* 2021). این تأثیرات اغلب با تغییر در پروفیل شیب، کانال‌زایی، و تخریب خاک زیرسطحی همراهند (Yu *et al.,* 2024; Laudon *et al.,* 2016) عدم وجود پوشش گیاهی حفاظتی در حاشیه جاده‌ها می‌تواند شدت فرسایش و فرآیندهای رسوب‌گذاری را افزایش دهد، زیرا پوشش گیاهی با جذب انرژی باران و کندکردن جریان رواناب، نقش حفاظتی حیاتی ایفا می‌کند (Kastridis, 2020; Zhao *et al.,* 2023). با وجود آن که در حوزه کشاورزی اقدامات گسترده‌ای برای کنترل فرسایش خاک انجام شده‌اند، سهم جاده‌های جنگلی در فرسایش و رسوب‌گذاری همچنان در بسیاری از مناطق، به‌ویژه در ایران، به‌طور جامع مورد بررسی قرار نگرفته است (Yousefi *et al.,* 2024). جاده‌های جنگلی از اجزایی مانند بستر جاده، کانال‌های حفاری و خاکریزها تشکیل شده‌اند که شیب‌های خاکریز معمولاً بین جاده و رودخانه‌های مجاور قرار گرفته‌اند و در صورت عدم مدیریت مناسب، به منبعی برای رسوب‌زایی مستقیم تبدیل می‌شوند (Cao *et al.,* 2021; Hernández-Romero *et al.,* 2022). روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری فرسایش خاک وجود دارند که این روش‌ها بسته به اهداف خاص و دقت موردنیاز متفاوت هستند. با توجه به محدودیت‌های مالی، زمانی و فیزیکی در بسیاری از مناطق حوزه‌های آبریز، شبیه‌سازهای بارش به‌عنوان یکی از ابزارهای مؤثر برای مطالعه و مدل‌سازی فرآیندهای فرسایش در شرایط کنترل‌شده، جایگاه ویژه‌ای در پژوهش‌های هیدرولوژیکی پیدا کرده‌اند (Sadeghi, 2010). اگرچه بارش طبیعی و شبیه‌سازی‌شده تفاوت‌هایی در بازتاب شرایط میدانی دارند (Arnaez *et al*., 2007)، اما شبیه‌سازهای بارش به دلیل امکان کنترل شدت، تداوم، و تکرار بارش، ابزار مناسبی برای تحلیل جزئی رفتار رواناب در محیط‌های ناهمگن به‌ویژه جاده‌های جنگلی محسوب می‌شوند (Nolan *et al*., 1997; Foster *et al*., 2000). مقدمی راد و همکاران (Moghadami Rad *et al.,* 2013) با استفاده از باران‌ساز با پلات ۱ متر مربعی اثر ترافیک را بر میزان رواناب و رسوب تولید بستر جاده بررسی کردند و نتایج نشان دادند که ترافیک اثر معنی داری روی افزایش رواناب و رسوب تولیدی جاده داشت. مطالعاتی مانند زیگلر و همکاران (Ziegler *et al*., 2000). در پژوهشی با عنوان تولید رواناب و رسوب در جاده‌های شنی و مسیرهای کشاورزی در تایلند شمالی، با استفاده از شبیه‌ساز بارش نشان دادند که در مراحل اولیه، غلظت رسوب در رواناب توانست به بیش از ۱۰۰ گرم در لیتر برسد و در گذر زمان به ۱ گرم در لیتر کاهش یافت. این مطالعه نشان داد که شدت فرسایش سطحی در آغاز بارندگی و در سطوح بدون پوشش گیاهی به‌مراتب بیشتر بود. حامد و همکاران (Hamed *et al*., 2002) از یک شبیه‌ساز برنارد برای شبیه‌سازی شرایط طبیعی استفاده کردند و نتایج را با اندازه‌گیری‌های رسوب از یک حوزه آبریز ۱۵۸ هکتاری در تونس مقایسه کردند. آنها دقت شبیه‌سازی را در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده واقعی ۹۶٪ گزارش کردند. مطالعات انجام شده توسط آرنائز و همکاران (Arnaez *et al*., 2004) و جوردن لوپز و همکاران (Jordan-Lopez *et al*., 2009) از شبیه‌سازهای بارش برای بررسی رواناب و رسوب‌گذاری در بخش‌های مختلف جاده‌های جنگلی استفاده کردند. نتایج نشان دادند که کانال‌های حفاری با مقادیر تا ۱۶۱ گرم در متر مربع بیشترین تولید رسوب را داشتند، که ۱۱ تا ۱۶ برابر بیشتر از اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در بستر جاده یا خاکریزها بود. زمک (Zemke, 2016) در آلمان از یک شبیه‌ساز بارش کوچک‌مقیاس برای ارزیابی نقش شیب، نوع خاک و پوشش گیاهی در تولید رواناب استفاده کرد. نتایج نشان دادند که شیب تند و حذف پوشش گیاهی باعث افزایش معنی‌دار رواناب و رسوب شدند. این پژوهش به‌خوبی نشان داد که حتی تغییرات جزئی در شرایط سطحی خاک می‌تواند منجر به واکنش‌های بزرگ هیدرولوژیکی شود. کائو و همکاران (Cao *et al.,* 2021) در ایالات متحده در مطالعه‌ای پس از آتش‌سوزی جنگلی، با ترکیب داده‌های میدانی و مدل‌سازی فضایی، تأثیر جاده‌های جنگلی بر فرسایش و رواناب را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که تغییرات پوشش گیاهی ناشی از آتش‌سوزی، همراه با شبکه جاده‌ای، باعث تشدید فرسایش در مقیاس چشمگیر شد. علاوه بر این، در ایران مطالعات اولیه توسط مقدمی‌راد (Moghadami rad, 2018) و فیروزی (Firoozi, 2016) در جنگل‌های کوهمیان استان گلستان نشان دادند که با افزایش شیب و کاهش پوشش گیاهی، نرخ‌های رواناب و رسوب‌گذاری به طور همزمان افزایش یافتند. این یافته‌ها بر اهمیت مطالعه دینامیک رواناب و رسوب‌گذاری از جاده‌های جنگلی تاکید می‌کنند، زیرا چنین دانشی برای مدیریت مؤثر جاده‌ها ضروری است. اسمالی اوری و همکاران (Esmali Ouri *et al.,* 2020) در حوزه آبخیز کوزتوپراقی در اردبیل، با تلفیق داده‌های حاصل از شبیه‌ساز بارش و مدل‌های داده‌کاوی مانند SVM و Random Forest به تهیه نقشه حساسیت فرسایش پرداختند. یافته‌ها نشان دادند که روش‌های ترکیبی می‌توانند عملکرد دقیقی در پیش‌بینی مناطق بحرانی داشته باشند. صفری و همکاران (Safari *et al.,* 2016) در جنگل‌های هیرکانی به بررسی اثر بخش‌های مختلف مسیرهای چوبکشی بر رواناب و فرسایش پرداختند. آن‌ها نشان دادند که ترانشه‌های فاقد پوشش گیاهی در مسیرهای کششی بیشترین میزان رسوب و بستر مسیر بیشترین رواناب را ایجاد کردند. این نتایج نشان‌دهنده اهمیت پوشش گیاهی در کاهش تأثیرات زیست‌محیطی جاده‌سازی در جنگل هستند. پارساخو و همکاران (Parsakhoo *et al.,* 2014) با استفاده از مدل SEDMODL و داده‌های مکانی، به پیش‌بینی فرسایش ناشی از شبکه جاده‌ای در جنگل‌های شمال پرداختند. این مطالعه توانست با دقت بالا، مناطق با پتانسیل بالای رسوب‌زایی را شناسایی کند و ابزار مناسبی را برای تصمیم‌گیری مدیریتی فراهم آورد. بر اساس مطالعه‌ای که توسط غلامی و همکاران (Gholami *et al*., 2018) انجام شد، اثر الگوهای مختلف بارش بر زمان آغاز رواناب و ضریب رواناب در مقیاس کرت، با استفاده از شبیه‌ساز باران مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش، چهار الگوی بارش با توزیع‌های زمانی و شدت‌های متفاوت شبیه‌سازی شد و متغیرهای هیدرولوژیکی مرتبط اندازه‌گیری گردید. نتایج تحلیل آماری نشان دادند که الگوهای بارندگی تأثیر معنی‌داری بر زمان شروع رواناب، حجم رواناب و ضریب رواناب داشتند (در سطح اطمینان ۹۹٪). به‌ویژه، الگوی I با شدت اولیه پایین، بیشترین تأخیر در شروع رواناب را نشان داد، در حالی‌که الگوی III که با شدت ابتدایی بالا آغاز می‌شد، بیشترین میزان حجم و ضریب رواناب را به‌همراه داشت. این یافته‌ها بر اهمیت نقش توزیع زمانی شدت بارش در مدل‌سازی دقیق رفتار رواناب در حوزه‌های آبخیز تأکید دارند. در استان گلستان

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1308]

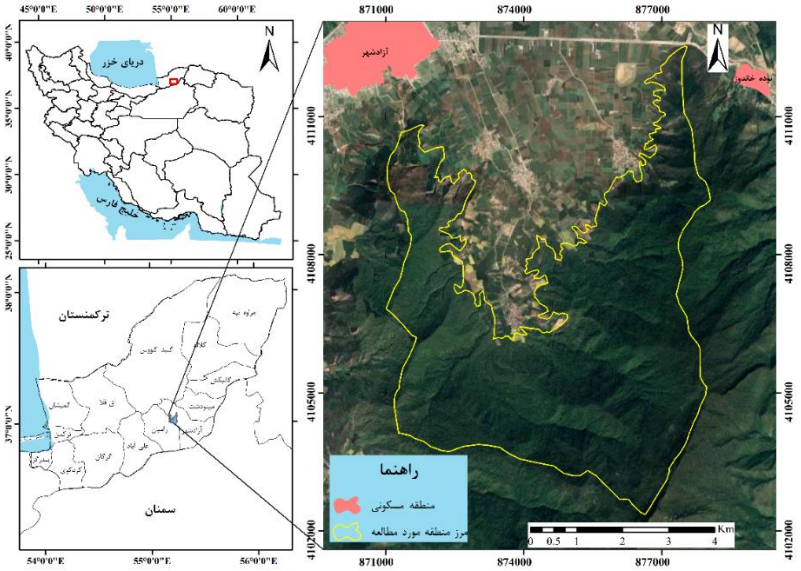
پارساخو و همکاران (Parsakhoo *et al*., 2023) نشان دادند که شدت بارندگی و عدم استفاده از تیمارهای حفاظتی، منجر به افزایش معنادار رسوب خروجی از جوی‌های کنار جاده شدند. این یافته‌ها اهمیت تحلیل تفکیکی اجزای جاده را در مدیریت پایدار منابع آب و خاک برجسته می‌سازند. در نهایت، پورفراش‌زاده و همکاران (Pourfarrashzadeh *et al.*, 2025) در پژوهشی با رویکرد اکولوژیکی–ژئومورفولوژیکی نشان دادند که جنگل‌زدایی در اطراف جاده‌ها به‌طور مستقیم با افزایش نرخ فرسایش و از بین رفتن پوشش گیاهی مرتبط بود. آن‌ها با مدل‌سازی آماری–مکانی نشان دادند که حضور جاده‌های جنگلی یک عامل کلیدی در تغییرات زیست‌محیطی منطقه بود.

بنابر این، انجام تحقیقات با بهره‌گیری از ابزارهای پیشرفته مانند شبیه‌سازهای بارش و مدل‌های پیش‌بینی فرسایش برای درک بهتر دینامیک رواناب و رسوب‌گذاری در اکوسیستم‌های جنگلی ضروری است. یکی از نوآوری‌های این پژوهش، تمرکز دقیق بر تحلیل عملکرد اجزای مختلف جاده‌های جنگلی (بستر جاده، ترانشه، خاکریزها) به صورت مجزا با استفاده از داده‌های حاصل از شبیه‌ساز بارش است. این روش برخلاف بسیاری از مطالعات قبلی که بیشتر به بررسی کلی شبکه جاده‌ای پرداخته‌اند، امکان تحلیل تفکیکی و دقیق‌تری از منشأ رسوب و رواناب را فراهم می‌کند که برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در طراحی و نگهداری پایدار جاده‌ها ارزشمند است (Rahbarisisakht *et al*., 2025; Kantartzis *et al*., 2021). بنابر این، این پژوهش با تمرکز بر رویکرد تفکیکی و تلفیق داده‌های میدانی و مدل‌سازی، به دنبال توسعه ابزاری برای تصمیم‌گیری دقیق‌تر در کاهش اثرات زیست‌محیطی جاده‌های جنگلی است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی

طرح جنگلداری کوهمیان با مساحتی بالغ بر ۳۶۷۱ هکتار در حوزه آبخیز ۸۹ از تقسیمات جنگل‌های شمال کشور (طرح جامع مقدمات) درحوزه اداره کل منابع طبیعی استان گلستان– گرگان واقع شده است (شکل ۱). سری کوهمیان از شمال به روستاهای کوهمیان، مرزبن، فاضل‌آباد، خاندوز سادات و سرکهریزا از جنوب و غرب به طرح جنگلداری نعیم‌آباد و شرق به طرح جنگلداری وطن محدود است. طول جغرافیائی منطقه مورد مطالعه بین ″۴۹ '۴۴ °۵۵ تا ″۳۰ '۱۰ °۵۵ و عرض جغرافیائی آن بین ″۱۵ '۵۶ °۳۷ تا °۳۷ شمالی واقع است. از جمله گونه های درختی منطقه می‌توان به بلوط، ممرز، آزاد، افرا، انجیلی، توسکا، خرمندی، ارغوان و بارانک اشاره کرد. از گونه‌های درختچه‌ای غالب در منطقه می‌توان به ازگیل و ولیک، و از مهمترین گونه‌های علفی و بوته‌ای جنگل می‌توان به انواع کارکس‌ها، آقطی، فرفیون، تمشک، گرامینه، آسپرولا، النا اشاره کرد. جاده های جنگلی منطقه از نوع اصلی جنگلی هستند که عرض حدود ۵/۵ متر دارند. سطح رویه جاده‌های منطقه مورد مطالعه از نوع مصالح شن و ماسه است. مقدار متوسط نزولات در این جنگل ۷۰۰ میلی‌متر در سال است (Anonymus, 2010).



شکل ۱– نقشه منطقه مورد مطالعه –ایران
Figure 1. The map of the study area, Iran

روش انجام پژوهش

در این مطالعه، به‌منظور اندازه‌گیری و مقایسه مقدار رواناب و رسوب بخش‌های مختلف جاده جنگلی شامل بستر جاده، ترانشه‌های خاک‌برداری و خاکریز، از شبیه‌ساز بارش قابل حمل مدل Deltalab EID 330 ساخت فرانسه (نسخه اصلاح‌شده دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان) برای شبیه‌سازی بارندگی در شرایط کنترل‌شده استفاده شد (Shahriari & Moghaddamirad, 2018). این دستگاه از نوع پاششی با نازل مخروطی تمام‌گرد است و توانایی تولید بارندگی با شدت یکنواخت در بازه‌های مختلف (تا ۱۰۰ میلی‌متر در ساعت) را دارد (Manning, 2021; Zemke, 2016). نازل مخروطی در ارتفاع اسمی ۳ متر نسبت به سطح زمین نصب شد، اما با توجه به نصب پایه‌های تلسکوپی روی زمین شیب‌دار، ارتفاع مؤثر نازل تا پلات حدود ۲ متر برآورد گردید که با یکنواختی شدت بارش، با پنج تکرار انجام گرفت. برای شبیه‌سازی بارش، تداوم‌هایی که از نظر تولید رواناب و ایجاد فرسایش و رسوب اهمیت و کاربرد بیشتری داشتند مد نظر قرار گرفت (Sheykh Rabiee *et al*., 2011). شدت بارش اعمال‌شده ۸۰ میلی‌متر بر ساعت و مدت بارش ۳۲ دقیقه انتخاب شدند، که معادل

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1308]

بارش تجمعی ۴۲/۶۷ لیتر بر مترمربع است. این شدت بر پایه تحلیل داده‌های آماری ایستگاه هواشناسی نوده‌خاندوز و با استفاده از توزیع لوگ پیرسون تیپ ۳ برای بارندگی با دوره بازگشت ۲۵ ساله استخراج گردید (Kavian *et al*., 2011). پلات‌های آزمایشی به ابعاد ۱ × ۱ متر مربع با دیواره فلزی، در بخش‌های مختلف جاده مستقر شدند: بستر جاده :با خاک کوبیده‌شده و فاقد پوشش گیاهی، ترانشه خاک‌برداری :دارای شیب تند و پوشش گیاهی پراکنده، خاکریز جاده :دارای شیب ملایم‌تر و پوشش علفی کم‌پشت؛ پلات‌ها در نقاطی با جهت شیب یکسان، فاصله کافی از اختلالات محیطی و با رطوبت اولیه برابر نصب شدند. پیش از آغاز شبیه‌سازی بارش، رطوبت پیشین خاک در سه بخش جاده با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج HB-2 اندازه‌گیری شد و سپس باران‌ساز در سه بخش جاده در نقاطی با رطوبت یکسان مستقر گردید. مقدار رواناب تولیدی در هر بخش جاده با پنج تکرار از طریق خروجی پلات و با استفاده از بشر اندازه‌گیری شد (شکل ۲). برای بررسی وضعیت رواناب و رسوب در حالت اشباع مدت زمان شبیه‌سازی ۳۲ دقیقه بود و رواناب هر ۴ دقیقه یک بار جمع‌آوری شد. پس از آن، نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل گردیدند و مقدار رسوب تولیدی پس از عبور نمونه‌های رواناب از کاغذ صافی واتمن ۴۲ به‌دست آمد (شکل ۲). در این مطالعه، ضریب رواناب به‌عنوان نسبت حجم رواناب تولیدی به حجم کل بارش واردشده بر سطح پلات (با مساحت ۱ متر مربع) محاسبه شد (Nicosia *et al.*, 2024). برای این کار، شدت بارش اعمال‌شده ۸۰ میلی‌متر بر ساعت و مدت بارش ۳۰ دقیقه بودند که معادل بارش تجمعی حدود ۴۲/۶۷ لیتر بر هر پلات است. این شدت و مدت بارندگی بر اساس معیارهای فنی و مطالعات پیشین انتخاب شدند تا نمایانگر بارش‌های سنگین و بحرانی باشند که بیشترین پتانسیل تولید رواناب و رسوب را دارند. چنین بارش‌هایی از نظر هیدرولوژیکی معرف شرایط بحرانی برای حوزه‌های آبخیز و جاده‌های جنگلی هستند و می‌توانند رفتار رواناب و فرسایش خاک را در شرایط حداکثری آشکار کنند. بنابر این، این شدت و مدت بارش به‌عنوان سناریوی مرجع برای ارزیابی دقیق ضریب رواناب و تولید رسوب در بخش‌های مختلف جاده‌ای انتخاب گردید. حجم رواناب خروجی از هر پلات با بشر اندازه‌گیری و نسبت آن به حجم بارندگی برای هر بخش جاده‌ای محاسبه شد. سپس نمونه‌های رسوب در دستگاه آون و در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت یک شبانه‌روز قرار گرفتند. پس از این مدت، نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت یک هزارم وزن شدند (Manning, 2021). مقدار کل رسوب تولیدی در هر واحد سطح، از طریق جمع‌بندی مقادیر اندازه‌گیری‌شده در بازه‌های زمانی مختلف و بر مبنای پلات یک مترمربعی، به‌عنوان شاخص رسوب کل سطحی مورد استفاده قرار گرفت. برای ارزیابی ویژگی‌های خاک، نمونه‌برداری با استفاده از سیلندرهای فولادی با طول ۱۰ سانتی‌متر و قطر داخلی ۵ سانتی‌متر صورت گرفت. در ادامه، وزن مخصوص ظاهری خاک با روش سیلندری تعیین شد (Blake & Hartge, 1986; Davari *et al*., 2024). بافت خاک به‌روش کلاسیک هیدرومتری و با تفسیر بر اساس استاندارد USDA مورد تحلیل قرار گرفت (Bouyoucos, 1962). و مقدار ماده آلی نیز به‌روش Walkley–Black تعیین شد که همچنان به‌عنوان یک روش استاندارد در مطالعات خاک‌شناسی به‌کار می‌رود (Walkley & Black, 1934). نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف- اسمیرنوف بررسی گردید (Geissen *et al*., 2009). برابری واریانس‌ها نیز با استفاده از آزمون لون (Levene's Test) بررسی گردید. جهت بررسی تفاوت بین گروه‌ها، از روش حداقل تفاوت معنی‌داری استفاده شد (Behboodian, 2010).



شکل ۲- استقرار باران‌ساز برروی ترانشه خاکریزی جاده جنگلی و عبور رواناب از کاغذ صافی
Figure 2. Installation of the rainwater collection system on the excavated soil trench of the forest road and the passage of runoff through the filter paper

نتایج و بحث

توصیف پلات‌ها

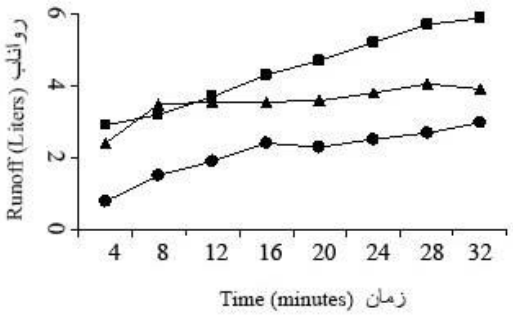
جدول ۱ میانگین برخی مشخصات فیزیکی خاک، شیب، درصد پوشش گیاهی و ماده آلی در بخش‌های مختلف جاده در پلات‌های آزمایشی و تحلیل واریانس (ANOVA) را برای بخش‌های مختلف جاده نشان می‌دهد. طبق نتایج به‌دست‌آمده از جدول ۱، بیشترین مقدار درصد شن در بستر جاده با ۹۴٪ و سپس در ترانشه خاکریزی با ۳۵٪ مشاهده شد، در حالی‌که بیشترین مقدار سیلت در ترانشه خاکبرداری (۴۱٪) و سپس در ترانشه خاکریزی (۲۴٪) بود. درصدهای رس، پوشش گیاهی و ماده آلی خاک در ترانشه خاکریزی به ترتیب بالاترین مقدار را با ۵۵/۴۱ و ۱/۹٪ داشتند. همچنین، وزن مخصوص خاک به‌ترتیب در بستر جاده، ترانشه خاکبرداری و ترانشه خاکریزی بیشترین مقدار را نشان داد. نتایج آنالیز واریانس (جدول ۱) نشان دادند که از نظر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مانند وزن مخصوص خاک، ماده آلی و درصد پوشش گیاهی بین بخش‌های مختلف جاده در سطح ۱ درصد تفاوت معنی‌داری وجود داشت. این یافته‌ها با مطالعات پیشین در ایران و سایر کشورها هم‌راستا هستند (Kastridis, 2020; Parsakhoo *et al*., 2014; Safari *et al*., 2016).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1308]

جدول ۱- مقایسه میانگین‌های مشخصات فیزیکی بخش‌های مختلف جاده در پلات‌های آزمایشی
Table 1. A comparison of the average physical properties of various sections of the road in the experimental plots

F-value	معنی داری Significance (p-value)	بستر جاده Roadbed	ترانشه خاکریزی Fill Slope	ترانشه خاکبرداری Cut Slope	Variable متغیر
724.56	0.00	94 a, c	35 a, b	27 b, c	Sand شن (٪)
428.27	0.00	2 a, c	24 a, b	41 b, c	Silt سیلت (٪)
343.00	0.00	4 a, c	41 a, b	32 b, c	Clay رس (٪)
146.00	0.00	0 a, c	1.9 a, b	1.1 b, c	Organic Matter ماده آلی (٪)
154.50	0.00	0 a, c	55 b	45 c	Vegetation Cover پوشش گیاهی (٪)
70.08	0.00	1.82 a, c	1.12 b	1.24 c	وزن مخصوص خاک Bulk Density (g/cm³)
202.17	0.00	7.5 a, c	55 a, b	75 b, c	Slope شیب (٪)

a: میانگین ترانشه خاکریزی و بستر جاده تفاوت معنی‌داری با میانگین ترانشه خاکبرداری دارد.
b: میانگین ترانشه خاکبرداری و ترانشه خاکریزی تفاوت معنی‌داری با میانگین بستر جاده دارد.
c: میانگین بستر جاده تفاوت معنی‌داری با میانگین ترانشه خاکریزی و میانگین ترانشه خاکبرداری دارد.



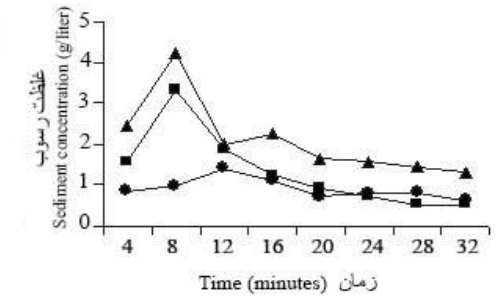
شکل ۳- تغییرات میانگین رواناب در مدت زمان ۳۲ دقیقه در سه بخش جاده (■ رواناب بسترجاده، ▲رواناب ترانشه خاکبرداری و ● رواناب ترانشه خاکریزی)
Figure 3. Changes in the average runoff over a 32-minute period in three road sections (■ Roadbed runoff,▲ Excavation trench runoff, and ● Embankment trench runoff).

تولید رواناب و رسوب

شکل ۳ روند تغییرات میانگین رواناب را در مدت زمان ۳۲ دقیقه در آزمایش شبیه‌ساز باران نشان می‌دهد. با توجه به شکل، مقدار رواناب تولیدی در هر سه بخش جاده در طول زمان افزایش یافته است.

مطابق شکل ۳، مقدار رواناب در بستر جاده به‌طور خطی افزایش شدیدی دارد. در ترانشه خاکبرداری تا دقیقه ۸ و ترانشه خاکریزی تا دقیقه ۱۶ مقدار رواناب روند افزایشی دارد که پس از آن یک روند کاهشی و دوباره روند افزایشی مشاهده می‌شود. در انتهای زمان، در هر سه بخش جاده شیب خط به‌علت اشباع و سله بستن خاک (در ترانشه خاکبرداری و خاکریزی) تقریباً به‌حالت ثابت رسید. بیشترین درصد ضریب رواناب در بستر جاده بین ۰/۴۹ تا ۱ و کمترین ضریب رواناب در طول آزمایش در تراشه خاکریزی بین ۰/۱۴ تا ۰/۵۱ مشاهده گردید. درصد ضریب رواناب در تراشه خاکبرداری بین ۰/۴۱ تا ۰/۶۶ افزایش داشت.

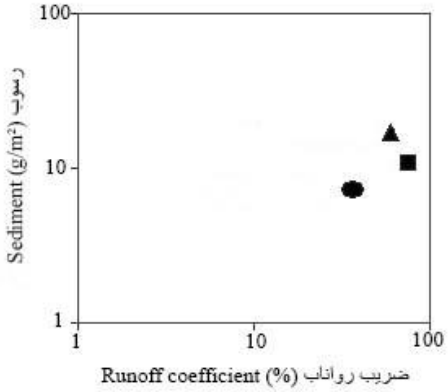
شکل ۴ روند تغییرات غلظت رسوب را در دوره‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد. مطابق شکل ۴، مقادیر میانگین رسوب کل تولیدی در طول دوره آزمایش در ترانشه خاکبرداری، بستر جاده و ترانشه خاکریزی به‌ترتیب ۱۶/۸۸، ۱۰/۶۳ و ۷/۲۹ گرم بر لیتر بودند. این تفاوت‌ها به‌دلیل شیب، پوشش گیاهی و قطعات سنگریزه بودند. غلظت رسوب تولیدی در شروع آزمایش به‌طور خطی در سه بخش جاده به‌علت زمان لازم برای مرطوب شدن خاک و هم‌چنین جدا شدن ذرات افزایش یافت. غلظت رسوب بعد از ۸ دقیقه از شروع آزمایش در بخش‌های بستر جاده و ترانشه خاکبرداری و بعد از ۱۲ دقیقه در ترانشه خاکریزی مختلف جاده روند کاهشی داشت (به‌جز بازه زمانی ۱۲-۱۶ در ترانشه خاکبرداری که روند افزایشی داشت).



شکل ۴- تغییرات میانگین غلظت رسوب تولیدی (گرم/لیتر) در مدت زمان ۳۲ دقیقه در سه بخش جاده (■ رسوب بسترجاده، ▲رسوب ترانشه خاکبرداری و ● رسوب ترانشه خاکریزی)
Figure 4. Changes in the average concentration of produced sediment (g/L) over a 32-minute period in three road sections (■ Roadbed runoff,▲ Excavation trench runoff, and ● Embankment trench runoff).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1308]

نتایج به‌دست آمده از شکل ۵ نشان می‌دهند که پلات‌ها در بخش ترانشه خاکریزی دارای کمترین مقدار رواناب و رسوب هستند، درصورتی‌که بستر جاده دارای بیشترین مقدار رواناب و ترانشه خاکبرداری بیشترین مقدار رسوب را در بین سه بخش جاده نشان می‌دهد (شکل۵). نتایج تجزیه واریانس تیمارها (زمان، مکان و اثر متقابل) بر مقدار رواناب و رسوب در جدول ۲ ارائه شده‌اند.



شکل ۵- رابطه بین مقدار رواناب و رسوب در بخش‌های مختلف جاده که هر نقطه نمایانگر میانگین همه شبیه‌سازی است (■ رسوب بسترجاده، ▲رسوب ترانشه خاکبرداری و ● رسوب ترانشه خاکریزی)

Figure 5. The relationship between runoff and sediment in various road sections. Each point represents the mean of all simulations (■ Roadbed runoff,▲ Excavation trench runoff, and ● Embankment trench runoff).

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر زمان و مکان (سه بخش جاده) بر مقدار رواناب و رسوب

Table 2. Variance analysis of the effects of time and space (three road sections) on runoff and sediment

منابع تغییرات Source of Variation	متغیر Variable	درجه آزادی Degrees of Freedom	میانگین مربعات Mean Squares	معنی‌داری Significance (p-value)	F-value
مکان Location	رواناب Runoff	2	0.942	0.00	252.62
زمان Time		7	0.147	0.00	39.37
اثر متقابل Interaction		14	0.014	0.00	3.80
مکان Location	رسوب Sediment	2	8.88	0.00	307.65
زمان Time		7	3.94	0.00	136.46
اثر متقابل Interaction		14	0.785	0.00	27.20

جاده‌های جنگلی به‌عنوان زیرساخت‌هایی ضروری برای مدیریت و بهره‌برداری پایدار از جنگل‌ها شناخته می‌شوند، اما ساخت و نگه‌داری آن‌ها می‌توانند اثرات منفی قابل‌توجهی بر ویژگی‌های خاک، رواناب و فرسایش وارد کنند. این اثرات بسته به ساختار فیزیکی بخش‌های مختلف جاده، از جمله بستر جاده، ترانشه‌های حفاری و خاکریزها، متفاوت هستند. درک این تفاوت‌ها برای کاهش پیامدهای زیست‌محیطی اهمیت بالایی دارد.

افزایش شیب و درصد سیلت خاک سبب کاهش چسبندگی ذرات می‌شوند و در نتیجه، حساسیت خاک به فرسایش را افزایش می‌دهند (Elliot *et al*., 2009). همچنین، بیشترین مقدار رواناب تولیدی در بستر جاده مشاهده شد (شکل‌های ۳ و ۵)، که با یافته‌های زیگلر و همکاران (Ziegler *et al*., 2000) و آرنائز و همکاران (Arnaez *et al*., 2004) هم‌راستا است. علت اصلی این موضوع، فشردگی بالای خاک در بستر جاده است که منجر به کاهش نفوذپذیری سطحی می‌شود و در نتیجه، رواناب افزایش می‌یابد. فشردگی بستر جاده اگرچه رواناب را افزایش می‌دهد، اما به پایداری مسیر و تحمل وزن ماشین‌آلات نیز کمک می‌کند و از تخریب سریع مسیر جلوگیری می‌نماید. همچنین، این فشردگی می‌تواند تولید رسوب را کاهش دهد، زیرا موجب اتصال ذرات خاک و کاهش جابجایی آن‌ها می‌شود. به‌همین دلیل، در برخی موارد نسبت به ترانشه‌های خاکبرداری با وجود رواناب بالا، رسوب کمتری تولید می‌کنند. نصب سیستم‌های زهکشی عرضی با فاصله مناسب در بستر جاده‌ها می‌تواند رواناب مازاد و اثرات منفی آن بر نواحی پایین‌دست، مانند ترانشه‌های خاکریزی را کاهش دهد.

کمترین مقدار رواناب نیز در ترانشه خاکریزی مشاهده شد که با نتایج محققینی مانند آرنائز و همکاران (Arnaez *et al*., 2004) و مارتینز- زالاوا و همکاران (Martinez-Zavala *et al*., 2008) مطابقت دارد. وجود ذرات ریز در این بخش‌ها موجب افزایش نفوذپذیری خاک و کاهش رواناب می‌شود. افزون بر این، پوشش گیاهی متراکم نسبت به سایر بخش‌های جاده، فرسایش ناشی از بارش را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. پوشش گیاهی با قطع انرژی ضربه‌ای باران، کاهش رواناب سطحی و تثبیت خاک از طریق ریشه‌ها نقش مؤثری ایفا می‌کند (Phillips *et al*., 2024). با این‌حال، نفوذ آب در این ترانشه‌ها می‌تواند به بی‌ثباتی خاک منجر شود و خطر لغزش خاک را افزایش دهد. شکل ۴ نشان می‌دهد که ترانشه‌های خاکبرداری به‌دلیل شیب تندتر و درصد بالای سیلت، بیشترین تولید رسوب را داشته‌اند. پس از آن، به‌ترتیب بستر جاده و ترانشه‌های خاکریزی در رتبه‌های بعدی قرار دارند که با نتایج تحقیقات محققین از جمله (Arnaez *et al*., 2004; Jordan-Lopez *et al*., 2009; Martinez-Zavala *et al*., 2008) همسویی دارد. مطالعات پوسون و همکاران (Poesen *et al*., 1990) و دسکروکس و همکاران (Descroix *et al*., 2001) نشان دادند که به‌دلیل وجود شن در بستر جاده، رواناب سطحی در این نواحی بیشتر بود. با توجه به این‌که فرسایش در جاده‌های جنگلی تابع عواملی مانند نفوذپذیری، پوشش گیاهی و شدت رواناب است (Foltz *et al*., 2009)، و افزایش وزن مخصوص خاک با کاهش حجم منافذ، موجب کاهش نفوذپذیری و در نتیجه افزایش رواناب می‌شود (Kavian *et al*., 2011)، به‌همین دلیل، بستر جاده با ترکیب شن، فشردگی بالا و پوشش گیاهی اندک، بیشترین رواناب را

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1308]

تولید می‌کند و انتظار می‌رود که رسوب بیشتری نیز ایجاد کند. با این حال، ذرات شن و ماسه به دلیل وزن و پایداری بالاتر، نسبت به سایر ذرات کمتر مستعد انتقال هستند و برای حرکت آن‌ها نیروی بیشتری لازم است (Morgan, 2009). اندازه‌گیری میزان ماده آلی نشان داد که ترانشه‌های خاکریزی بالاترین و بستر جاده پایین‌ترین مقادیر ماده آلی را دارا بودند. بین میزان ماده آلی و مقاومت خاک در برابر فرسایش، همبستگی مثبت وجود داشت (Le Bissonnais, 1996). کاودیر و همکاران (Kavdir *et al*., 2004) نیز گزارش کردند که پایداری ذرات خاک بیش از هر عامل دیگری به میزان ماده آلی بستگی داشت. ماده آلی موجب به‌هم‌پیوستگی ذرات، بهبود نفوذپذیری و افزایش ثبات خاک می‌شود (Morgan, 2009). یک همبستگی منفی بین محتوای ماده آلی و تولید رسوبات در مطالعات تجادا و گنزالس (Tejada & Gonzalez, 2008) و کاویان و همکاران (Kavian *et al*., 2011) مشاهده شد. با توجه به حجم بالای رواناب و نبود زهکش‌های عرضی در بستر جاده مورد مطالعه، توصیه می‌شود که سیستم‌های زهکشی طبق دستورالعمل شماره ۱۳۱ سازمان برنامه‌وبودجه کشور اجرا شوند (Sarikhani & Majnounian, 1994). همچنین، با توجه به رسوبات قابل‌توجه تولیدشده در ترانشه‌های حفاری، احیای پوشش گیاهی در این بخش‌ها به‌عنوان اقدام حفاظتی پیشنهاد می‌شود. اطمینان از شیب مناسب در حین ساخت ترانشه می‌تواند تاثیرات زیست‌محیطی ساخت جاده‌ها در مناطق جنگلی را به حداقل برساند. علاوه بر این، ادغام شیوه‌های پایدار مانند اقدامات کنترل فرسایش و نگهداری منظم سیستم‌های زهکشی می‌تواند اثرات زیست‌محیطی بلندمدت زیرساخت‌های جاده‌ای در محیط‌های جنگلی را کاهش دهد (Bodí *et al*., 2014).

نتیجه‌گیری کلی

بر اساس یافته‌های این پژوهش، ساخت و نگهداری جاده‌های جنگلی تأثیرات قابل‌توجهی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، الگوی رواناب سطحی و شدت فرسایش دارد. این اثرات به‌ویژه در بخش‌هایی مانند بستر جاده و ترانشه‌های حفاری که دارای تراکم خاک بالا، شیب تند و پوشش گیاهی حداقلی هستند، مشهودتر است. در چنین شرایطی، کاهش نفوذپذیری و افزایش هدایت سطحی منجر به افزایش حجم رواناب و تشدید فرآیندهای فرسایشی می‌شود. اقدامات مدیریتی مانند تقویت پوشش گیاهی، تثبیت مکانیکی شیب‌ها، استفاده از تله‌های رسوب، شیارهای زیستی و طراحی و نصب سیستم‌های زهکشی عرضی، از جمله مؤثرترین راهکارهای کاهش بار رسوبی و حفظ کیفیت آب محسوب می‌شوند (Lang *et al*., 2017; Kastridis, 2020). مطالعات متعدد اثبات کرده‌اند که پوشش گیاهی می‌تواند با افزایش پایداری شیب‌ها، کاهش سرعت رواناب و بهبود نفوذپذیری خاک، در کاهش چشمگیر فرسایش نقش کلیدی ایفا کند (Lann *et al.,* 2024). طراحی و استقرار مناسب زهکش‌های عرضی، در ترکیب با تله‌های رسوبی، می‌تواند جریان رواناب متمرکز را به‌طور مؤثری قطع کند و انتقال رسوبات به بخش‌های پایین‌دست را کاهش دهد. به‌ویژه در شبکه‌های جاده‌ای با شیب زیاد و خاک حساس به فرسایش، این ترکیب مدیریتی عملکرد مؤثری دارد (Yousefi *et al*., 2024; Keller, 2025; Toot *et al*., 2025).

پژوهش لطفعلیان و همکاران (Lotfalian *et al.,* 2019) در جنگل‌های هیرکانی شمال ایران نشان داد که به‌کارگیری مواد تثبیت‌کننده خاک از جمله گچ و پلیمرهای محلول، نقش مؤثری در کاهش رواناب سطحی و بار رسوبی داشت. این ترکیبات با بهبود پیوند میان ذرات خاک و افزایش انسجام ساختاری سطح، توانستند مقاومت خاک در برابر پاشش قطرات باران و جریان رواناب را به‌طور معناداری افزایش دهند. به‌طور مشابه، مطالعه خاکبازان و کیالاشکی (Khakbazan, & Keyalashki, 2014) استفاده از خاکستر پوسته برنج را به‌عنوان یک ماده تثبیت‌کننده پایدار و زیست‌سازگار مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان دادند که این ماده ضمن کاهش ۴۰ درصدی میزان رسوب، ویژگی‌های فیزیکی خاک را به‌ویژه در شیب‌های جاده‌ای تثبیت و تقویت کرد.

در نهایت بر اساس این یافته‌ها، تلفیق رویکردهای تثبیت خاک با برنامه‌های مدیریتی مانند بازسازی پوشش گیاهی، طراحی مناسب زهکش‌های عرضی و اجرای سازه‌های کنترل رسوب، می‌تواند بخشی از بسته سیاستی مدیریت بهترین شیوه (BMPs) در حفاظت از زیرساخت‌های جنگلی باشد. اجرای این اقدامات همراه با پایش مستمر و اصلاح ساختاری طراحی جاده‌ها، راهبردی مؤثر برای افزایش تاب‌آوری زیست‌محیطی و کاهش تخریب منابع خاک و آب در اکوسیستم‌های جنگلی محسوب می‌شود

References

Anonymus. (2010). Golestan Province Natural Resources Administration. Kouhmian Forestry Plan. 250 pages. [In Persian]

Arnáez, J., Larrea, V., & Ortigosa, L. (2004). Surface runoff and soil erosion on unpaved forest roads from rainfall simulation tests in northeastern Spain. *Catena*, *57*(1), 1-14.

Arnaez, J., Lasanta, T., Ruiz-Flaño, P., & Ortigosa, L. (2007). Factors affecting runoff and erosion under simulated rainfall in Mediterranean vineyards. *Soil and Tillage Research*, *93*(2), 324-334.

Behboodian, J. 2010. Introduction to Statistics and Probability. Astan Quds Razavi Publications, Mashhad. 349 pages. [In Persian]

Blake, G., & Hartge, K. H. (1986). Bulk density. Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods, 5, 363-375.

Bodí, M. B., Martin, D. A., Balfour, V. N., Santín, C., Doerr, S. H., Pereira, P., ... & Mataix-Solera, J. (2014). Wildland fire ash: Production, composition and eco-hydro-geomorphic effects. *Earth-Science Reviews*, *130*, 103-127.

Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy Journal*, *54*(5), 464-465.

Brown, K. R., McGuire, K. J., Aust, W. M., Hession, W. C., & Dolloff, C. A. (2015). The effect of increasing gravel cover on forest roads for reduced sediment delivery to stream crossings. *Hydrological Processes*, *29*(6), 1129-1140.

Cao, L., Elliot, W., & Long, J. W. (2021). Spatial simulation of forest road effects on hydrology and soil erosion after a wildfire. *Hydrological Processes*, *35*(6), e14139.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1308]

Davari, M., Saeidpoor, B., Khaleghpanah, N., & Moradi, S. (2024). Impacts of land use/cover change on soil hydrological properties, runoff, and erosion: results from micro-plots in Western Iran. *Environmental Earth Sciences*, *83*(17), 508.

Descroix, L., Viramontes, D., Vauclin, M., Barrios, J. G., & Esteves, M. (2001). Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the Western Sierra Madre (Durango, Northwest Mexico). *Catena*, *43*(2), 115-135.

Elliot, W. J., Foltz, R. B., & Robichaud, P. R. (2009). Recent findings related to measuring and modeling forest road erosion. In *In: Anderssen, RS; Braddock, RD; Newham, LTH, eds. 18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on modelling and simulation; July 13-17, 2009; Cairns, Australia. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand; and International Association for Mathematics and Computers in Simulation,* 4078-4084.

Esmali Ouri, A., Golshan, M., Janizadeh, S., Cerdà, A., & Melesse, A. M. (2020). Soil erosion susceptibility mapping in Kozetopraghi catchment, Iran: a mixed approach using rainfall simulator and data mining techniques. *Land*, *9*(10), 368.

Ferreira, C. S. S., Keesstra, S., Destouni, G., Solomun, M. K., & Kalantari, Z. (2024). Soil degradation in the Mediterranean region: drivers and future trends. In *Environmental Sustainability in the Mediterranean Region: Challenges and Solutions*. Cham: Springer International Publishing. (81-112).

Fidelus-Orzechowska, J., Wałdykowski, P., Chrobak-Žuffová, A., Krzemień, K., & Sosnowska, A. (2025). Erosion rates for forest roads in the Gorce and Western Tatra Mountains in southern Poland. *Earth Surface Processes and Landforms*, *50*(1), e70001.

Firoozi, A. 2016. Impact of Forest Road Excavation Slope Characteristics on Runoff and Sediment Yield. Master's Thesis, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University. 97 pages. [In persian]

Foltz, R. B., Copeland, N. S., & Elliot, W. J. (2009). Reopening abandoned forest roads in northern Idaho, USA: Quantification of runoff, sediment concentration, infiltration, and interrill erosion parameters. *Journal of Environmental Management*, *90*(8), 2542-2550.

Foster, I. D. L., Fullen, M. A., Brandsma, R. T., & Chapman, A. S. (2000). Drip-screen rainfall simulators for hydro-and pedo-geomorphological research: the Coventry experience. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, *25*(7), 691-707.

Geissen, V., Sánchez-Hernández, R., Kampichler, C., Ramos-Reyes, R., Sepulveda-Lozada, A., Ochoa-Goana, S., ... & Hernández-Daumas, S. (2009). Effects of land-use change on some properties of tropical soils—an example from Southeast Mexico. *Geoderma*, *151*(3-4), 87-97.

Gholami, L., Kavian, A., Khaledi Darvishan, A., Alipour, A., & Basarand, Z. (2018). Effect of rainfall pattern on changes of runoff starting time and runoff coefficient at plot scale. Watershed Engineering and Management, 10(4), 516–528. https://sid.ir/paper/234610/fa

Grebner, D.L., Bettinger, P., Siry, J.P., & Boston, K. (2021). *Introduction to Forestry and Natural Resources* (2nd ed.). Academic Press.

Hamed, Y., Albergel, J., Pepin, Y., Asseline, J., Nasri, S., Zante, P., Berndtsson, R., Niazy, M., Balah, M. 2002. Comparison between rainfall simulator erosion and observed reservoir sedimentation in an erosion-sensitive semiarid catchment. *Catena* 50(1), 1-16.

Hernández-Romero, G., Álvarez-Martínez, J. M., Pérez-Silos, I., Silió-Calzada, A., Vieites, D. R., & Barquín, J. (2022). From forest dynamics to wetland siltation in mountainous landscapes: A RS-based framework for enhancing erosion control. *Remote Sensing*, *14*(8), 1864.

Jordán-López, A., Martínez-Zavala, L., & Bellinfante, N. (2009). Impact of different parts of unpaved forest roads on runoff and sediment yield in a Mediterranean area. *Science of the Total Environment*, *407*(2), 937-944.

Jourgholami, M., Karami, S., Tavankar, F., Lo Monaco, A., & Picchio, R. (2020). Effects of slope gradient on runoff and sediment yield on machine-induced compacted soil in temperate forests. *Forests*, *12*(1), 49.

Kantartzis, A., Malesios, C., Stergiadou, A., Theofanous, N., Tampekis, S., & Arabatzis, G. (2021). A geographical information approach for forest maintenance operations with emphasis on the drainage infrastructure and culverts. *Water*, *13*(10), 1408.

Kastridis, A. (2020). Impact of forest roads on hydrological processes. *Forests*, 11(11), 1201.

Kavdir, Y., Özcan, H., Ekinci, H., Yüksel, O., & Yiğini, Y. (2004). The influence of clay content, organic carbon and land use types on soil aggregate stability and tensile strength. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 28(3), 155-162.

Kavian, A., Fathollah Nejad, Y., Habibnejad, M., Soleimani, K. (2011). Modeling Seasonal Rainfall Erosivity on a Regional scale: A case Study from Northeastern Iran. *International Journal of Environment Research* 5, 939-950.

Keller, G. R. (2025). Infrastructure Adaptation and Climate Resilience for California's National Forests. *Transportation Research Record*, 2679(1), 250-263.

Khakbazan, A., & Keyalashki, A. (2014). Effect of rice husk ash on road stabilization: A case study of Mazandaran. In *National Conference on Civil Engineering, Urban Planning, and Sustainable Development* (Tehran, Iran). Retrieved from https://civilica.com/doc/345923.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1308]

Lang, A. J., Aust, W. M., Bolding, M. C., McGuire, K. J., & Schilling, E. B. (2017). Forestry best management practices for erosion control in haul road ditches near stream crossings. *Journal of Soil and Water Conservation*, *72*(6), 607-618.

Lann, T., Bao, H., Lan, H., Zheng, H., Yan, C., & Peng, J. (2024). Hydro-mechanical effects of vegetation on slope stability: A review. *Science of the Total Environment*, *926*, 171691.

Laudon, H., Kuglerová, L., Sponseller, R. A., Futter, M., Nordin, A., Bishop, K., ... & Ågren, A. M. (2016). The role of biogeochemical hotspots, landscape heterogeneity, and hydrological connectivity for minimizing forestry effects on water quality. *Ambio*, *45*(Suppl 2), 152-162.

Le Bissonnais, Y. L. (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of soil Science*, *47*(4), 425-437.

Lotfalian, M., Babadi, T. Y., & Akbari, H. (2019). Impacts of soil stabilization treatments on reducing soil loss and runoff in cutslope of forest roads in Hyrcanian forests. *Catena,* 172, 158-162.

Manning, C. J. W. (2021). *Rainfall Simulator Construction and Evaluation of Erosion Control Practices* (Master's thesis, Auburn University). Auburn University. https://etd.auburn.edu/bitstream/handle/10415/8030/Manning_Thesis_V_Final.pdf

Martínez-Zavala, L., López, A. J., & Bellinfante, N. (2008). Seasonal variability of runoff and soil loss on forest road backslopes under simulated rainfall. *Catena*, *74*(1), 73-79.

Moghadami Rad, M., Abdi, E., Moeiri, M. H., & Ghorbani Vaezi, H. (2018). Effect of upslope forest road slope on runoff and soil loss (Case study: Kouhmiyan Forest, Azadshahr). *Journal of Forest and Wood Products*, 71(2), 105–115. https://doi.org/10.22059/jfwp.2018.221783.799

Moghadami Rad, M., Abdi, E., Mohseni Saravi, M., Rouhani, H., & Majnounian, B. (2013). The effect of traffic on forest road surface erosion (Case study: Kohmian Forest, Azadshahr). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 20(4), 634. https://www.magiran.com/p1114289

Morgan, R.P.C. (2009). *Soil Erosion and Conservation*, Third Edition, Blackwell, 304 p.

Nicosia, A., Di Stefano, C., Palmeri, V., Serio, M. A., & Ferro, V. (2024). Assessing a transitional and turbulent overland flow resistance law for surfaces with different roughness. *Journal of Hydrology*, *641*, 131858.

Nolan, S. C., Vliet, L. V., Goddard, T. W., & Flesch, T. K. (1997). Estimating storm erosion with a rainfall simulator. *Canadian Journal of Soil Science*, *77*(4), 669-676.

Parsakhoo A, Yolma G, Bordi Sheykh V, Mohamadi J, Rezaee Motlaq A. (2023). The Relations of Rainfall Duration and Intensity and Sediment Yield from Treated Ditch by Conservation Practices in Forest Roads. *Ecology of Iranian Forest*. *11*(21), 54-61. [In Persian]

Parsakhoo, A., Lotfalian, M., & Kavian, A. (2014). Prediction of the soil erosion in a forest and sediment yield from road network through GIS and SEDMODL. *International Journal of Sediment Research, 29*(1), 118–125. https://doi.org/10.1016/S1001-6279(14)60027-5 [In persian]

Phillips, C., Betts, H., Smith, H. G., & Tsyplenkov, A. (2024). Exploring the post-harvest 'window of vulnerability'to landslides in New Zealand steepland plantation forests. *Ecological Engineering*, *206*, 107300.

Poesen, J., Ingelmo-Sanchez, F., & Mucher, H. (1990). The hydrological response of soil surfaces to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer. *Earth Surface Processes and Landforms*, *15*(7), 653-671.

Pourfarrashzadeh, F., Madadi, A., Gharachorlu, M., & Sareskanrood, S. A. (2025). Spatial-statistical modeling of deforestation from an ecogeomorphic approach in typical hyrcanian forests, Northern Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, *197*(3), 324.

Rahbarisisakht, S., Labelle, E. R., LeBel, L., & Gautam, S. H. (2025). Managing forest road networks in the face of a changing climate: a conceptual framework based on a comprehensive review. *Current Forestry Reports*, *11*(1), 19.

Ramos-Scharrón, C. E., & MacDonald, L. H. (2007). Runoff and suspended sediment yields from an unpaved road segment, St John, US Virgin Islands. *Hydrological Processes: An International Journal*, *21*(1), 35-50.

Remo, J. W. F., & Giri, T. L. (2024). *Assessing geomorphic and hydraulic changes related to an unplanned reconnection of the middle Mississippi River and its floodplain near Miller City, Illinois, USA*. Geomorphology, 449, 109062.

Sadeghi, S. H. R., Khazayi, M., & Mirnia, S. K. (2022). Effect of soil surface disturbance on overland flow, sediment yield, and nutrient loss in a hyrcanian deciduous forest stand in Iran. *Catena*, *218*, 106546.

Sadeghi, S.H.R. (2010). Study and Measurement of Water Erosion. Tarbiat Modares University Press, Center for Scientific Publications, First Edition. 200 pages. [In Persian]

Safari, A., Kavian, A., Parsakhoo, A., Saleh, I., & Jordán, A. (2016). Impact of different parts of skid trails on runoff and soil erosion in the Hyrcanian forest (northern Iran). *Geoderma*, *263*, 161-167.

Sarikhani, N., & Majnounian, B. (1994). Guide to the design, construction, and operation of forest roads Program and Budget Publication, Management and Planning Organization of Iran, (131). https://sid.ir/paper/427620 [In Persian].

Seutloali, K. E., & Beckedahl, H. R. (2015). A review of road-related soil erosion: an assessment of causes, evaluation techniques and available control measures. *Earth Sciences Research Journal*, *19*(1), 73-80.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1308]

Shahriari, Moghaddamirad. (2018). An Introduction to Methods for Measuring and Estimating Runoff and Sediment in Forest Ecosystems. University of Sistan and Baluchestan. 271pp. [In Persian]

Sheykh Rabiee, M. R., Feiznia, S., & Peyrowan, H. R. (2011). Study runoff and soil Lose in map units of Hiv watershed, measurements and comparision at the rainfall simulator scale. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 20(80), 57-62.

Sidle, R. C., Ziegler, A. D., Negishi, J. N., Nik, A. R., Siew, R., & Turkelboom, F. (2006). Erosion processes in steep terrain—Truths, myths, and uncertainties related to forest management in Southeast Asia. *Forest Ecology and Management*, 224(1-2), 199-225.

Tejada, M., & Gonzalez, J. L. (2008). Influence of two organic amendments on the soil physical properties, soil losses, sediments and runoff water quality. *Geoderma*, *145*(3-4), 325-334.

Toot, R., Handler, S., Shannon, P. D., Amman, A., Blinn, C., Butler-Leopold, P., ... & Janowiak, M. K. (2025). Climate change considerations for forest operations in northern forests. *Gen. Tech. Rep. NRS-223. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. 223*, 1-39.

Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, *37*(1), 29-38.

Wemple, B. C., Browning, T., Ziegler, A. D., Celi, J., Chun, K. P., Jaramillo, F., ... & Sawyer, D. (2018). Ecohydrological disturbances associated with roads: Current knowledge, research needs, and management concerns with reference to the tropics. *Ecohydrology*, *11*(3), e1881.

Yousefi, S., Emami, S. N., Nekoeimehr, M., Rahmati, O., Imaizumi, F., Gomez, C., & Valjarevic, A. (2024). A hot-spot analysis of forest roads based on soil erosion and sediment production. *Land*, *13*(10), 1583.

Yu, J., Zhao, Q., Yu, Z., Liu, Y., & Ding, S. (2024). A review of the sediment production and transport processes of forest road erosion. *Forests*, *15*(3), 454.

Zemke, J. J. (2016). Runoff and soil erosion assessment on forest roads using a small-scale rainfall simulator. *Hydrology*, *3*(3), 25.

Zhao, Q., Jing, Y., Wang, A., Yu, Z., Liu, Y., Yu, J., ... & Ding, S. (2022). Response of sediment connectivity to altered convergence processes induced by forest roads in mountainous watershed. *Remote Sensing*, *14*(15), 3603.

Zhao, Q., Wang, A., Yu, Z., Yu, J., Liu, Y., Zhang, G., ... & Ding, S. (2023). Factors contributing to rill erosion of forest roads in a mountainous watershed. *Journal of Environmental Management*, *326*, 116829.

Ziegler, A. D., Sutherland, R. A., & Giambelluca, T. W. (2000). Runoff generation and sediment production on unpaved roads, footpaths and agricultural land surfaces in northern Thailand. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, *25*(5), 519-534.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1308]