

Spatial Analysis and Identification of Erosion and Sediment Hot-Spots Along Zagros Forest Roads

Saleh Yousefi* , Seyed Naeim Emami, Mohammad Nekooimehr and Sara Mardanian¹

(Received: October 23-2024 ; Revised: January 20-2025 ; Accepted: April 28-2025)

1. Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Chaharmahal and Bakhtiari Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Shahrekord, Iran.

*: Corresponding author Email: ssaleh.yousefi@gmail.com

Abstract

In the present study, the Road Sediment Delivery Model (SEDMODL) and Geographic Information System (GIS) were utilized to estimate the average annual sedimentation caused by the forest road network in the oak forests in the west of Iran, Chaharmahal and Bakhtiari Provinces (Nazi forest road with a length of 5171 meters). Sedimentation from the study forest road network was estimated based on three basic factors in the model. Also, 30 erosion benchmarks were installed to measure the erosion and sedimentation rate at different distances from the road and in different parts of the study road and changes were measured during a year. The results showed that the average soil erosion at different distances from the Nazi road based on erosion benchmarks is 5.7 mm per year. In addition, the estimated erosion and sedimentation rate of the entire study road network based on the SEDMODL model is 2875 and 570 tons per year per kilometer, respectively. Model evaluation using erosion benchmarks showed that SEDMODL is a suitable model for estimating soil erosion on forest roads in the west of Iran ($R^2=0.78$ and $RMSE=0.73$). It should be noted that statistical analysis of erosion hot-spot analysis showed that 39 percent of forest roads in Nazi showed very high erosion. Based on the results of the present study, it is suggested that conservative, protective, and road maintenance measures in areas with high erosion risk should be prioritized by decision-makers.

Keywords: Road density, Sediment production, Zagros oak forestland, Surface soil erosion, Erosion benchmarks

How to cite this article: Yousefi, S., Emami, S. N., Nekooimehr, M. and Mardanian, S. 2025. Spatial Analysis and Identification of Erosion and Sediment Hot-Spots Along Zagros Forest Roads. *J. Water and Soil Sci.* 29(2):167-181. DOI: [10.47176/jwss.29.2.65961](https://doi.org/10.47176/jwss.29.2.65961)

Copyright © 2025 Yousefi et al. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

تجزیه و تحلیل مکانی و شناسایی مناطق با خطر زیاد فرسایش و رسوب در طول جاده‌های جنگلی زاگرس

صالح یوسفی*^{id}، سید نعیم امامی، محمد نکوئی مهر و سارا مردانیان^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۸/۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۲/۸)

۱. گروه تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شهرکرد، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: ssaleh.yousefi@gmail.com

چکیده

در مطالعه حاضر از مدل تحویل رسوب جاده (SEDMODL) و سامانه اطلاعات جغرافیایی برای تخمین میزان و درصد رسوبدهی متوسط سالانه ناشی از شبکه جاده‌های جنگلی در جنگل‌های بلوط غرب کشور در استان چهارمحال و بختیاری (جاده جنگلی نازی به طول ۵۱۷۱ متر) برای اولین بار در کشور استفاده شد. بر اساس سه عامل پایه در مدل، رسوبدهی ناشی از شبکه جاده جنگلی مطالعاتی برآورد شد. همچنین در این پژوهش به منظور اندازه‌گیری میدانی میزان فرسایش و رسوب در فواصل مختلف از جاده و در قسمت‌های مختلف جاده مطالعاتی، ۳۰ میخ فرسایشی نصب و در طول یک سال میزان تغییرات آن‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد میانگین فرسایش خاک در فواصل مختلف از جاده نازی بر اساس میخ‌های فرسایشی ۵/۷ میلی‌متر در سال است. همچنین بر اساس مدل SEDMODL، برآورد میزان فرسایش و رسوبدهی کل شبکه جاده مطالعاتی به ترتیب ۲۸۷۵ و ۵۷۰ تن در سال در کیلومتر است. ارزیابی مدل با استفاده از میخ‌های فرسایشی نشان داد که SEDMODL مدلی مناسب برای برآورد فرسایش خاک در جاده‌های جنگلی غرب کشور است ($R^2=0/78$ و $RMSE=0/73$). گفتنی است که تحلیل آماری لکه‌های داغ فرسایش نشان داد، ۳۹ درصد از جاده‌های جنگلی نازی دارای تولید فرسایش بسیار زیاد هستند. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر پیشنهاد می‌شود اقدامات اصلاحی، حفاظتی و مراقبت از جاده در مناطق با خطر زیاد فرسایش در اولویت تصمیم‌گیران قرار گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: تراکم جاده، تولید رسوب، جنگل‌های بلوط زاگرس، فرسایش سطحی، میخ‌های فرسایش

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۴.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت

شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



مقدمه

راه‌های ارتباطی و جاده‌ها به‌عنوان شاه‌رگ‌های حیاتی یک جامعه محسوب می‌شوند، به‌طوری که در صورت عدم توسعه و گسترش آن‌ها، حیات و توسعه اقتصادی و اجتماعی جامعه مختل خواهد شد. ولی از سوی دیگر جاده‌سازی به‌عنوان یکی از عوامل تخریب عرصه‌های منابع طبیعی به‌شمار می‌آید، به‌گونه‌ای که امروزه این موضوع به‌عنوان یکی از معضلات اساسی حوزه‌های آبخیز مطرح است (۱۲، ۲۳ و ۲۹).

یکی از بزرگ‌ترین مشکلات ناشی از جاده‌سازی، ایجاد و افزایش اشکال مختلف فرسایش از قبیل فرسایش آب‌کندی و توده‌ای در اطراف جاده‌هاست (۴، ۶، ۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۶). علت اصلی آن از بین بردن پوشش گیاهی، تخریب ساختمان خاک، افزایش سرعت رواناب و ناپایدار کردن شیب دامنه است (۵، ۲۰، ۲۵، ۲۷ و ۲۹). علاوه بر این جاده‌سازی عاملی در راستای فراهم‌شدن زمینه برای وقوع سایر رخساره‌های فرسایشی است (۲، ۱۶، ۱۸ و ۱۹). میزان تخریب محیط‌زیست و عرصه جنگل‌ها و مراتع در اثر جاده‌سازی بستگی به عوامل گوناگونی از جمله نوع جاده، توپوگرافی منطقه، حساسیت خاک‌ها و سازندهای زمین‌شناسی مسیر جاده دارد (۸).

در سال‌های اخیر فعالیت‌های ساخت‌وساز، تعمیر و نگهداری جاده‌های جنگلی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است؛ زیرا احداث جاده‌ها افزایش نگرانی‌ها در مورد تأثیرات کوتاه‌مدت و بلندمدت بر محیط‌زیست و تخریب را به‌دنبال دارد (۴). از این‌رو در طراحی شبکه جاده نه تنها میزان هزینه‌ها بلکه مدیریت صحیح آب و خاک نیز باید منظور شود (۲۲ و ۲۴).

سیوتالوای و بکدهال (۲۲) در مطالعه‌ای مروری به مطالعات انجام‌شده روی فرسایش جاده‌ای در دنیا پرداختند و بیان کردند که از بین بردن پوشش گیاهی توسط جاده‌سازی یکی از عوامل مهم تشدید فرسایش خاک در حوزه‌های آبخیز است. یوسفی و همکاران (۲۹) در مطالعه‌ای در جنگل‌های شمال ایران به بررسی نقش جاده‌های جنگلی بر فرسایش خاک و هدررفت عناصر غذایی خاک پرداختند. نتایج مطالعه ایشان نشان داد،

جاده‌سازی موجب ایجاد انواع اشکال فرسایش از قبیل آبراهه‌ای، خندقی و زمین لغزش در منطقه شده است. همچنین بیان کردند جاده‌سازی موجب ایجاد عارضه‌های فرسایشی در فاصله حداکثر ۵۷ متری از جاده شده است. یورولماز و گوموس (۲۸) در مطالعه‌ای به مقایسه مدل‌های WEPP، Road Batch Model و ABAG در برآورد فرسایش خاک سطحی در قسمت خاک‌ریزی جاده‌های جنگلی ترکیه پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که برای مدل‌های WEPP و ABAG میزان هدررفت سالانه خاک ۷/۹۳ و ۱۵/۵ تن در سال در هکتار است. همچنین در داخل کشور اسدالهی و همکاران (۳) در مطالعه‌ای در شمال کشور با استفاده از مدل SEDMODL و سامانه اطلاعات جغرافیایی به بررسی رسوب‌زایی جاده‌های بین زمین‌های کشاورزی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان فرسایش ناشی از این شبکه جاده بدون در نظر گرفتن نرخ تحویل رسوب حدود ۴۲۳/۹ تن در سال است. همچنین در مطالعه‌ای ابیات و همکاران (۱) به بررسی برآورد تولید رسوب جاده با استفاده از تلفیق روش‌های نمونه‌گیری آماری با مدل WARSEM در حوزه‌ای در استان تهران پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد میزان رسوب برآوردی توسط مدل، ۳۳۸۴ تن در سال معادل ۱۵۷ تن بر هکتار در محدوده جاده‌های مطالعاتی است و بیان کردند که مدل دارای صحت قابل قبولی است.

بررسی سوابق پژوهش و مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات در ایران و خارج از کشور در مناطق جنگلی بارانی (مانند شمال کشور) صورت گرفته است. حال آنکه شرایط اکولوژیکی، زمین‌شناسی، بارش و... در جنگل‌های بلوط زاگرس کاملاً با شرایط شمال کشور متفاوت است. همچنین استفاده از میخ‌های فرسایشی و اندازه‌گیری تغییرات آن‌ها می‌تواند راهکاری مناسب برای ارزیابی مدل و تغییرات فرسایش خاک باشد که در این پژوهش برای اولین بار به آن پرداخته شده است. در مطالعه حاضر از مدل تحویل رسوب جاده SEDMODL و سامانه اطلاعات جغرافیایی GIS به‌منظور تخمین رسوب‌دهی متوسط سالانه شبکه جاده‌ای در یک بازه

زیست محیطی فعالیت های جنگل داری افزایش یافت. پژوهشگران به بررسی روش های مؤثرتر برای مدیریت و کاهش فرسایش پرداختند و متوجه شدند که جاده های جنگلی به عنوان یکی از عوامل اصلی تولید رسوب شناخته می شوند. در اوایل دهه ۲۰۰۰، SEDMODL با استفاده از داده های میدانی و مطالعات موردی از انواع مختلف جنگل ها و جغرافیای گوناگون بهبود یافت.

رسوب دهی از یک جاده به طور معمول تحت تأثیر سه نوع جریان آب در سطح جاده، ترانشه خاک برداری و آبراهه های کنار جاده است. در واقع مدل مورد استفاده در این پژوهش، SEDMODL بر پایه این سه عامل بنا شده است (۲). همچنین در این مدل مجموع رسوب دهی به تن در سال از هر بخش جاده بر پایه معادله (۱) محاسبه می شود.

$$\text{Total Sediment} \left(\frac{t}{\text{year}} \right) = (TS + CS) * Af \quad (1)$$

که در آن TS رسوب دهی ناشی از سطح جاده و آبراهه های کنار جاده، CS رسوب دهی ناشی از ترانشه خاک برداری و Af عامل سن جاده است. بر اساس معادله (۲)، TS نیز متأثر از عوامل طول جاده (Lr)، عرض جاده (W)، شدت فرسایش زمین شناسی (GER)، جنس سطح جاده (Sf)، ترافیک (Tf)، شیب جاده (Gf)، بارندگی (Pf) و عامل تحویل رسوب (Df) است.

$$TS = Lr * Wr * GER * Sf * Tf * Gf * Pf * Df \quad (2)$$

همچنین رسوب دهی ناشی از ترانشه خاک برداری (CS) بر اساس معادله (۳)، تابعی از عوامل شدت فرسایش زمین شناسی (GER)، پوشش گیاهی و سنگی اطراف جاده (CSf)، ارتفاع ترانشه خاک برداری (CSh)، طول جاده (Lr) و عامل تحویل رسوب (Df) است.

$$CS = GER * CSf * CSh * Lr * Df \quad (3)$$

رسوب دهی جاده در طول یک یا دو سال ابتدایی ساخت تا زمانی که ترانشه خاک برداری و پشته خاک ریزی به درستی توسط پوشش گیاهی تثبیت شود، دارای بیشینه مقدار خود است. بر اساس استاندارد مدل SEDMODL اثر عامل سن جاده (Af)، در سال اول ساخت ضریب ۱۰ و از دو سال بیشتر ضریب ۲ به خود می گیرد (۲ و ۱۷).

جاده جنگلی در شهرستان کوهرنگ، واقع در استان چهارمحال و بختیاری استفاده شد. همچنین پژوهش حاضر اولین پژوهش کاربردی در جنگل های کوهرنگ است که بر اساس مدل SEDMODL مناطق با بیشترین پتانسیل تولید فرسایش و رسوب (لکه های داغ) را در جاده های جنگلی معرفی می کند.

موارد و روش ها

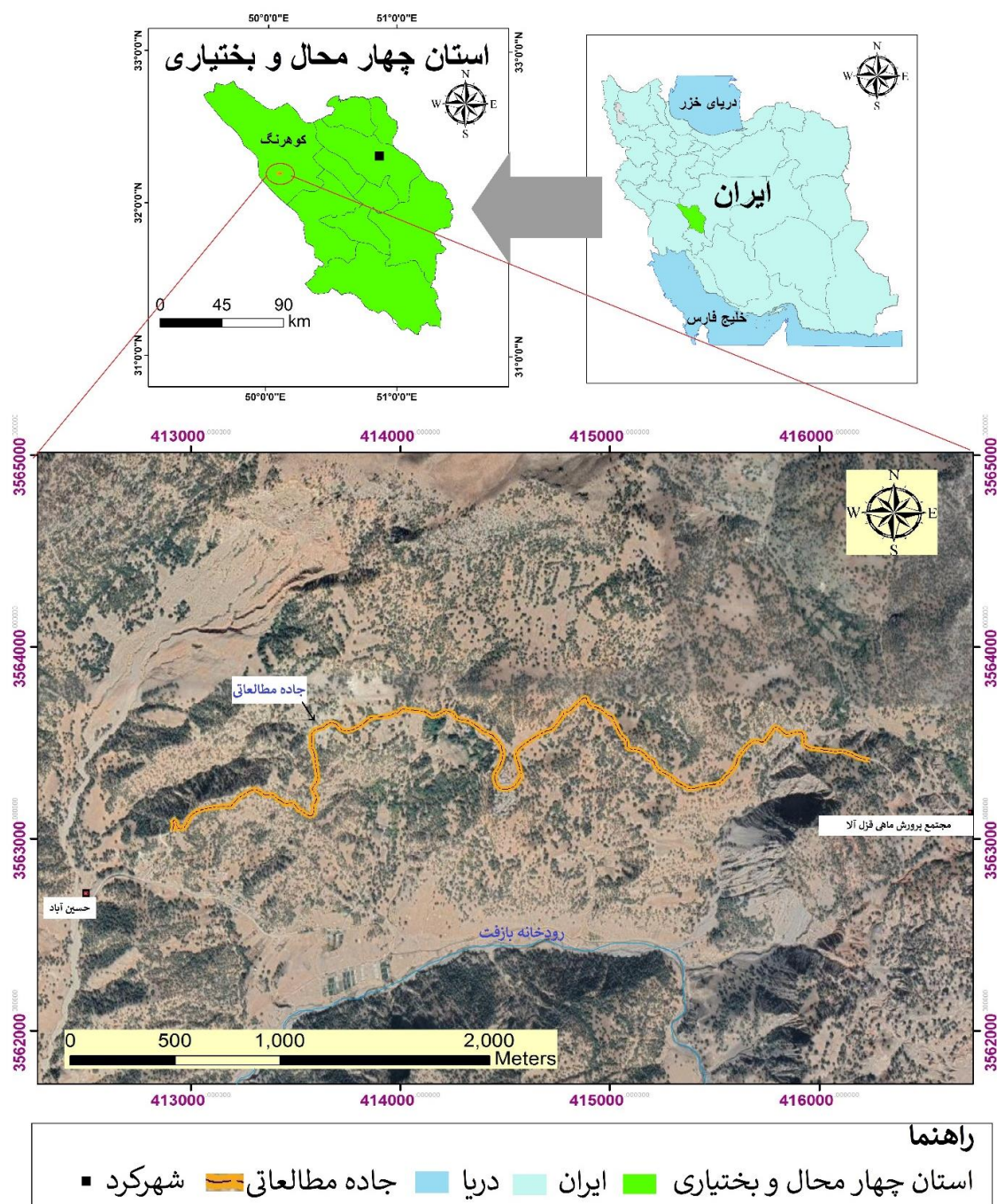
منطقه مطالعاتی

استان چهارمحال و بختیاری با مرکزیت شهرکرد با مساحتی حدود ۱۶۳۲۸۳۵ هکتار بین ۳۱ درجه و ۹ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۴۸ دقیقه عرض شمالی و نیز ۴۹ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی قرار دارد (۳۰). در پژوهش حاضر یک بازه مطالعاتی از جاده های جنگلی خاکی در شهرستان کوهرنگ برای مطالعه انتخاب شد. جاده مطالعاتی نازی از نوع خاکی با سطح شن ریزی شده به طول ۵۱۷۱ متر است که به منظور دسترسی به روستاهای منطقه از قبیل حسین آباد و نازی و همچنین تردد عشاير احداث شده است. طول بازه مطالعاتی ۵۱۷۱/۹ متر است. این جاده به صورت خاکی و شن ریزی شده است که در سال ۱۳۶۸ احداث شده است و دارای میانگین عرض شش متر است و در منطقه ای جنگلی و کوهستانی امتداد می یابد (شکل ۱). همچنین میزان متوسط سالانه دما و بارش منطقه بر اساس داده های ایستگاه هواشناسی کوهرنگ به ترتیب ۹ درجه سلسیوس و ۱۸۰۰ میلی متر است.

روش کار

مدل SEDMODL

SEDMODL (مدل رسوب برای جاده های جنگلی) ابزاری تخصصی است که برای ارزیابی و پیش بینی تولید و حمل رسوب از شبکه های جاده ای جنگلی توسعه یافته است. این ابزار به منظور مقابله با مشکل فرسایش خاک در عملیات جنگل داری طراحی شده است. توسعه SEDMODL به اوایل دهه ۱۹۹۰ برمی گردد، زمانی که نگرانی ها در مورد تأثیرات



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی جاده مطالعاتی نازی

عامل شدت فرسایش زمین شناسی (GEr)

خصوصیات خاک و زمین شناسی جاده های خاکی و جنگلی نقش بسیار زیادی در پتانسیل رسوب دهی جاده دارند (۲۸). میزان فرسایش برای سازندهای متفاوت با استفاده از جدول ۱ و بر اساس

استاندارد مدل SEDMODL مشخص شد (۲ و ۱۸). در این پژوهش از نقشه زمین شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شده از سازمان زمین شناسی کشور و همچنین ارزیابی میدانی متخصص زمین شناسی به منظور تهیه عامل شدت زمین شناسی استفاده شد.

جدول ۱. شدت فرسایش زمین‌شناسی بر اساس سنگ‌شناسی و سن سازند (تن/هکتار/سال) (۲)

سنگ‌شناسی	کواترنری	ترشیاری	مزوزوئیک	پالئوزوئیک	پرکامبرین
دگرگونی	—	۳۷	۳۷	۳۷	۳۷
شیست	—	۱۴۸	۱۴۸	۱۴۸	۱۴۸
بازالت	۳۷	۳۷	۷۴	۷۴	۷۴
آندزیت	۳۷	۳۷	۷۴	۷۴	۷۴
خاکستر آتشفشانی	۱۲۴	۱۲۴	۱۲۴	۱۲۴	۱۲۴
توف	۱۲۴	۱۲۴	۷۴	۷۴	۷۴
گابرو	—	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵
گرانیت	—	۴۹	۷۴	۷۴	۷۴
سنگ‌های بیرون‌زده	—	۳۷	۳۷	۳۷	۳۷
رسوبات سخت	—	۳۷	۳۷	۷۴	۷۴
سنگریزه	۳۷	۳۷	—	—	—
رسوبات نرم	۷۴	۷۴	—	—	—
رسوبات نرم ریزدانه	۱۴۸	۱۴۸	—	—	—

عامل جنس سطح جاده (Sf)

تهیه و ضریب شدت فرسایش شیب جاده به ترتیب ۰/۲، ۱ و ۲/۵ به سه طبقه شیب کمتر از پنج، پنج تا ۱۰ و بیشتر از ۱۰ درصد اختصاص یافت (۹ و ۱۴).

کیفیت مواد مادری سطح جاده تأثیر مستقیمی بر شدت رسوب‌دهی دارد. در مدل مورد استفاده مقادیر عامل سطح جاده برای انواع مختلف در جدول ۲ ارائه شده است (۲ و ۸).

عامل بارندگی (Pf)

میزان پتانسیل رسوب‌دهی از هر بخش جاده با میانگین بارش سالانه مرتبط است. با توجه به مدل مورد استفاده، عامل بارش بر پایه میانگین بارش سالانه در حوزه آبخیز طبق معادله (۴) محاسبه می‌شود. در معادله مزبور، P_{avr} متوسط بارش سالانه بر حسب میلی‌متر است. در این پژوهش از داده‌های ایستگاه هواشناسی کوه‌رنگ استفاده شد.

$$Pf = (P_{avr}/1542)0.8 \quad (4)$$

عامل ترافیک (Tf)

رسوب‌دهی از سطح جاده به نوع استفاده از آن و وضعیت ترافیک نیز وابسته است. رید و دون (۱۹) در پژوهش خود عامل ترافیک را از عوامل مؤثر در تولید رسوب معرفی کردند. مقادیر عامل ترافیک در جدول ۳ برای انواع متفاوت جاده بر اساس استاندارد مدل ارائه شده است. در این پژوهش بر اساس پرسش از افراد بومی منطقه میزان ترافیک منطقه تعیین شد.

عامل تحویل رسوب (Df)

مشکل‌ترین بخش پیش‌بینی مدل تخمین درصد رسوب‌دهی از یک بخش جاده به آبراهه است. قسمت‌هایی از جاده که در فاصله بیشتری از آبراهه‌ها قرار دارند، معمولاً درصد کمی از

عامل شیب جاده (Gf)

نقشه شیب منطقه با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی DEM (اندازه سلول پنج‌متر) مستخرج از نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ موجود در منطقه و در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8

جدول ۲. فاکتور جنس سطح برای جاده‌های مختلف (۲)

نوع سطح جاده	مقادیر عامل سطح جاده
آسفالت	۰/۰۳
گراول	۰/۲۰
دارای پستی و بلندی	۰/۵۰
پوشش علفی طبیعی	۰/۵۰
سطح طبیعی	۱
سطح طبیعی و وجود ریشه‌ها	۲

جدول ۳. مقادیر عامل ترافیک برای انواع مختلف جاده بر اساس مدل SEDMODL (۲)

نوع جاده	توضیحات	مقادیر عامل ترافیک جاده
بزرگراه	بزرگراه اصلی	۱۲۰
جاده‌های اصلی	تحت استفاده زیاد در طول سال با ماشین‌های سنگین - مسیرهای ارتباطی اصلی	۱۲۰
جاده‌های شهری	جاده‌های عریض در مناطق مسکونی پرتراکم	۵۰
جاده‌های اولیه	جاده‌های با ترافیک زیاد تا متوسط در سال که بخش‌های مهم حوزه آبخیز را به هم وصل می‌کند	۱۰
جاده‌های ثانویه	جاده‌های با ترافیک سبک در سال که گاهی به عنوان مسیرهای چوب‌کشی و تفرجگاهی با ماشین‌های سبک استفاده می‌شوند.	۲
جاده فرعی	جاده‌های فرعی برای دسترسی سریع‌تر به یک واحد	۱
جاده‌های رهاشده	جاده‌هایی که توسط خاکریزی ماشین‌های سنگین مسدود شده و مدت زیادی استفاده نمی‌شود	۰/۱

عامل پوشش گیاهی و سنگی اطراف جاده (CSf)

این عامل به عنوان درصدی از پوشش سنگ یا گیاه تخریب‌نشده و یا ترمیم‌شده سطح جاده، ترانسه خاک‌برداری و ترانسه خاک‌ریزی تعریف می‌شود (۲۱). بر اساس استاندارد مدل SEDMODL، جدول ۴ مقدار عامل پوشش گیاهی ارائه شده بر اساس درصد پوشش گیاهی و سنگی مناطق خاک‌برداری جاده را بیان می‌کند.

عامل ارتفاع ترانسه خاک‌برداری (CSH)

با بالا رفتن ارتفاع ترانسه خاک‌برداری میزان رسوب‌دهی از این مناطق از طریق خزش و شستشوی ورقه‌ای خاک به درون آبراهه کناری افزایش می‌یابد (۵). اندازه‌گیری این عامل امری بسیار مشکل و در بعضی مناطق غیر ممکن است (۲۴). بر این اساس

رسوب تولیدی را به آبراهه‌ها وارد می‌کنند (۲ و ۱۳)؛ اگرچه بخش زیادی از رسوب تولیدی در جاده‌های جنگلی به واسطه پوشش بالا کنترل و به آبراهه‌ها نمی‌رسد. در این مدل میزان تحویل رسوب برای هر بخش از جاده بر پایه فاصله نقطه میانی جاده از نزدیک‌ترین آبراهه اندازه‌گیری می‌شود (۲). بر اساس استاندارد و دستورالعمل مدل SEDMODL برای بخش‌هایی از جاده که رسوب‌دهی مستقیم به آبراهه دارند؛ یعنی جاده و آبراهه یکدیگر را قطع می‌کنند، میزان تحویل رسوب ۱۰۰ درصد، برای بخش‌هایی از جاده که در فاصله ۳۰ و ۶۰ متر از شبکه آبراهه هستند، میزان تحویل رسوب ۳۵ و ۱۰ درصد و برای برای بخش‌هایی از جاده که در فاصله بیش از ۶۰ متر از آبراهه واقع شده‌اند، به دلیل فیلتر شدن رسوبات توسط پوشش گیاهی میزان تحویل رسوب صفر محاسبه می‌شود (۲ و ۱۸).

جدول ۴. مقادیر عامل پوشش گیاهی و سنگی اطراف جاده بر اساس درصد پوشش (۲)

درصد پوشش گیاهی و سنگی	شدت فرسایش	درصد پوشش گیاهی و سنگی	عامل پوشش
۱۰۰	۰/۱۰۲۳	۴۰	۰/۴۴۳۵
۹۰	۰/۱۵۰۰	۳۰	۰/۵۲۲۲
۸۰	۰/۲۰۰۳	۲۰	۰/۶۱۵۵
۷۰	۰/۲۵۴۰	۱۰	۰/۷۷۰۰
۶۰	۰/۳۱۱۶	۰	۱/۰۰۰۰
۵۰	۰/۳۷۴۲	—	—

می‌توان از نقشه شیب که در طبقات متفاوت طبقه‌بندی شده است، استفاده کرد. بر اساس استاندارد مدل SEDMODL، نقشه شیب به چهار طبقه ۰-۱۵، ۱۵-۳۰، ۳۰-۶۰ و بیشتر از ۶۰ درصد طبقه‌بندی شد. مقادیر عامل ارتفاع ترانشه خاک‌برداری برای هر کدام از طبقه‌ها به ترتیب ۰/۷۵، ۱/۵، ۳ و ۷/۵ اختصاص داده شد (۲ و ۱۸). این عامل در پژوهش حاضر بر اساس مشاهدات میدانی تعیین شد.

برآورد رسوب‌دهی ناشی از سطح جاده و آبراهه‌های کناری

رسوب‌دهی ناشی از سطح جاده و آبراهه‌های کناری (TS) با توجه به معادله (۲) به عوامل مختلف مانند مشخصات ریخت‌سنجی جاده (عرض، طول، شیب)، جنس جاده، بارش و زمین‌شناسی منطقه وابسته است.

برآورد رسوب‌دهی ناشی از ترانشه خاک‌برداری

رسوب‌دهی ناشی از ترانشه خاک‌برداری (CS) با توجه به معادله (۳) به عوامل زمین‌شناسی، پوشش گیاهی و سنگی اطراف جاده، طول جاده و عامل تحویل رسوب وابسته است.

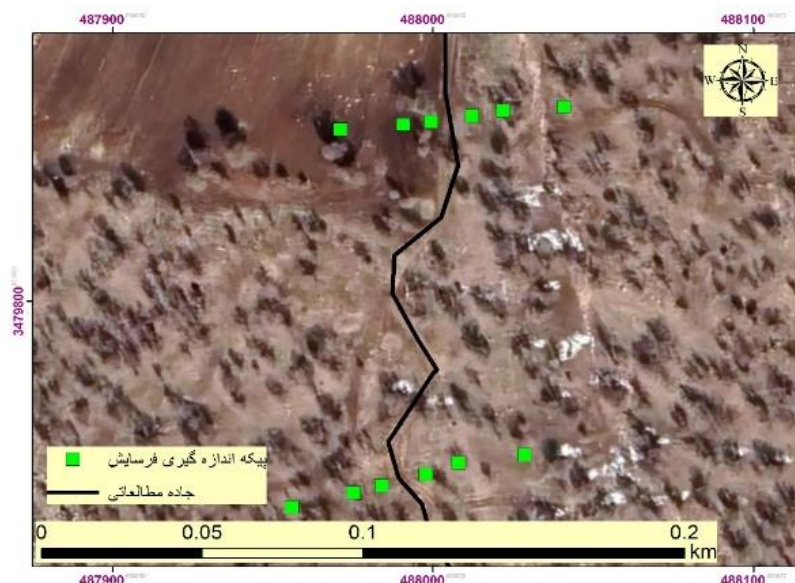
اندازه‌گیری میدانی فرسایش و رسوب جاده‌های جنگلی

به منظور اندازه‌گیری میدانی فرسایش و رسوب در جاده جنگلی مطالعاتی با توجه به شیب، توپوگرافی، نوع جاده و زمین‌شناسی منطقه و همچنین نظر کارشناسی اقدام به اجرا و نصب میخ‌های

فرسایشی چوبی در دو طرف جاده شد. بدین ترتیب در اطراف جاده نازی ۳۰ میخ فرسایشی با قطر ۱/۵ سانتی‌متر و طول ۳۵ سانتی‌متر نصب شد (شکل ۲). میخ‌های اندازه‌گیری در راستای عمود بر جاده در شرایط مختلف زمین‌شناسی، پوشش گیاهی و شیب بخش‌های مختلف بازه مورد بررسی و در دو دامنه بالادست و پایین‌دست جاده به فواصل پنج‌متر، ۱۵ متر و ۲۵ متر از جاده نصب شدند. سپس با استفاده از یک متر لیزری با دقت ۰/۰۲ میلی‌متر ارتفاع هر میخ اندازه‌گیری شد. ارتفاع هر میخ به صورت پنج تکرار اندازه‌گیری و میانگین این پنج تکرار به عنوان ارتفاع میخ در هر مرحله تعیین شد. در طول دوره پژوهش، چهار مرتبه به فاصله تقریباً هر سه ماه یکبار و در شرایط خشک بودن زمین (حداقل ۲ هفته بدون بارندگی) به منظور کاهش خطای اندازه‌گیری ناشی از انبساط و انقباض خاک بر اثر رطوبت خاک اندازه‌گیری از میخ‌های فرسایشی انجام شد.

ارزیابی و صحت‌سنجی مدل SEDMODL

در پژوهش حاضر با استفاده از ۳۰ میخ فرسایش در فاصله کمتر از پنج متری جاده و در طول جاده مطالعاتی و تغییرات سالانه آن‌ها، مدل مطالعاتی SEDMODL با استفاده از پارامترهای آماری ضریب همبستگی (R) بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر تخمینی فرسایش خاک و همچنین پارامتر آماری ریشه مربعات خطا (RMSE) مورد ارزیابی و صحت‌سنجی قرار گرفت.



شکل ۲. اندازه‌گیری میدانی فرسایش و رسوب به کمک میخ‌های فرسایشی در منطقه

جدول ۵. مشخصات و ویژگی‌های جاده مطالعاتی نازی

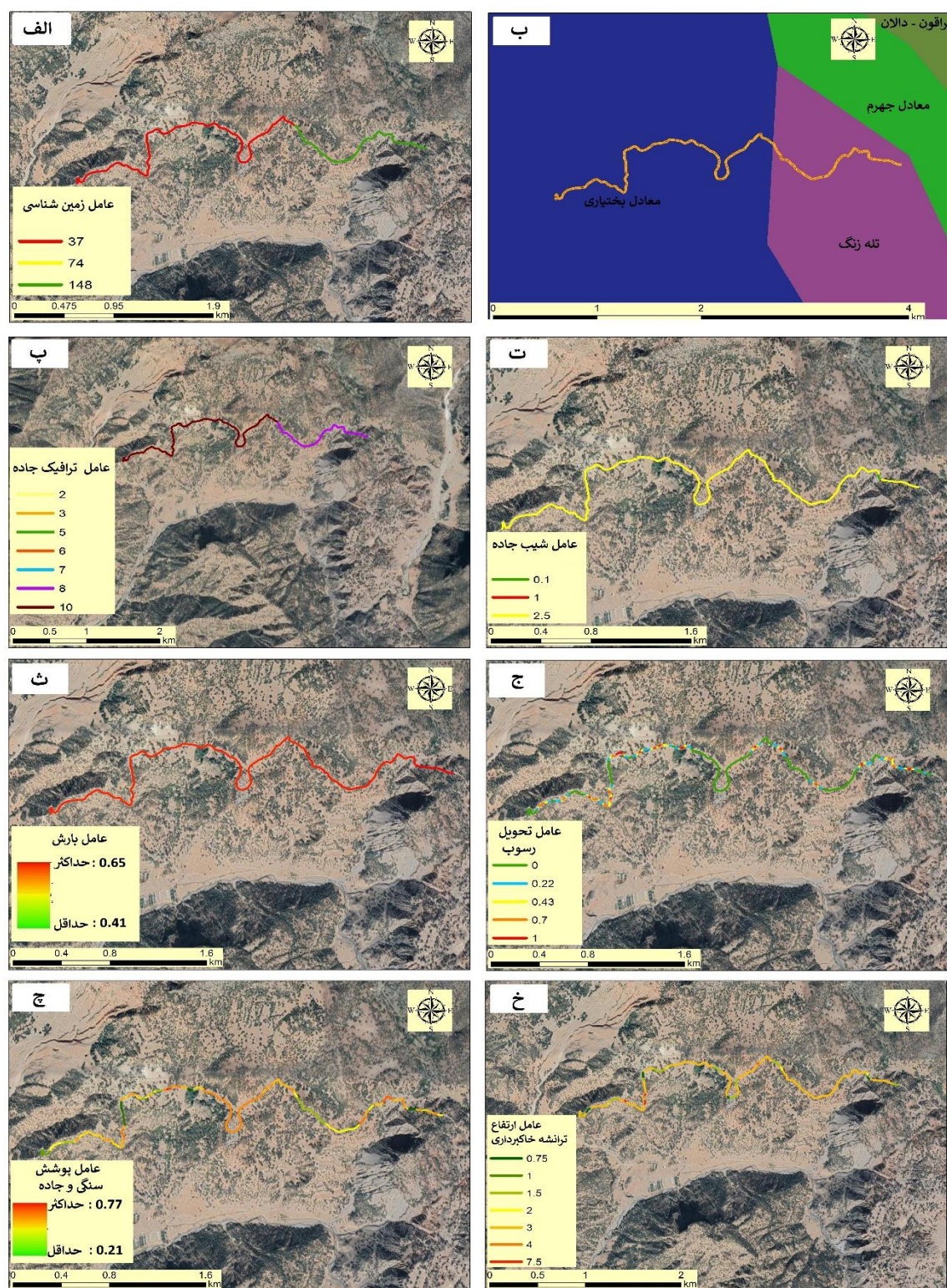
نام جاده	شهرستان	طول جاده (متر)	میانگین عرض جاده (متر)	ترافیک (میانگین تردد در ساعت)	سن جاده (سال)	نوع مواد سطحی جاده	نوع جاده (بر اساس مدل)
نازی	کوه‌رنگ	۵۱۷۱/۹	۶	۸	۳۱	شن‌ریزی	گراول- پستی و بلندی

نتایج و بحث

SEDMODL

طی بازدیدهای میدانی انجام‌شده، عامل‌های جنس سطح جاده، ترافیک، ارتفاع ترانشه خاک‌برداری برای جاده نازی استخراج شد (جدول ۵). لایه رقومی آبراهه‌ها از نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ موجود در منطقه استخراج و با بازدیدهای میدانی خطاهای احتمالی رفع شد. لایه مدل رقومی ارتفاعی (DEM) منطقه مطالعاتی با استفاده از دستور 3D-Analysis در نرم‌افزار ArcGIS و بر مبنای لایه رقومی توپوگرافی یادشده با

اندازه سلول ۵ مترمربع تهیه شد. همچنین نقشه شیب منطقه با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی تهیه‌شده از لایه توپوگرافی با اندازه سلول ۵ متر تعیین شد. به‌منظور تهیه نقشه بارش از میانگین سالانه ایستگاه‌های مجاور جاده‌های جنگلی استفاده شد و لایه هم‌بارش سالانه برای هر منطقه تهیه شد. به این ترتیب عامل شدت فرسایش زمین‌شناسی (GER)، عامل ترافیک (Tf)، عامل شیب جاده (Gf)، عامل بارش (Pf)، عامل تحویل رسوب (Df)، عامل پوشش گیاهی و سنگی اطراف جاده (CSf) و عامل ارتفاع ترانشه خاک‌برداری (Chf) برای جاده مطالعاتی تعیین شد (شکل ۳).



شکل ۳. الف: نقشه عامل شدت فرسایش زمین‌شناسی (Ger)، ب: سازندهای زمین‌شناسی منطقه، پ: عامل ترافیک (Tf)، ت: عامل شیب جاده (Gf)، ث: عامل بارش (Pf)، ج: عامل تحویل رسوب (Df)، چ: عامل پوشش گیاهی و سنگی اطراف جاده (CSf) و خ: عامل ارتفاع ترانشه خاکبرداری (Chf) برای جاده مطالعاتی نازی

در تخریب دامنه‌ها را مربوط به مناطق با شیب زیاد و پوشش گیاهی تخریب شده می‌دانند. همچنین سکوت و همکاران (۲۱) بیان کردند که شرایط زمین‌شناسی و سازندهای حساس به فرسایش بیشترین نقش را در تولید رسوب جاده‌های جنگلی دارند که با یافته‌های پژوهش حاضر همخوانی دارد.

ارزیابی و صحت‌سنجی مدل SEDMODL با استفاده از داده‌های ۳۰ پیکه فرسایشی در طول جاده مطالعاتی و تغییرات سالانه آن‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که ضریب همبستگی بین داده‌های حاصل از مدل SEDMODL و داده‌های اندازه‌گیری شده ۰/۷۸ است. همچنین مقدار ریشه مربعات خطا نیز ۰/۷۳ است که بیانگر کارایی به نسبت مناسب مدل در تخمین هدررفت خاک در جاده جنگلی نازی است.

تحلیل آماری نتایج

به منظور مطالعه و بررسی نقش و میزان تأثیر پارامترهای اندازه‌گیری شده و ورودی به مدل بر میزان فرسایش، از آزمون همبستگی پیرسون استفاده شده و نتایج آن در جدول ۷ ارائه شده است. همان‌گونه که نتایج آزمون آماری همبستگی نشان می‌دهد، همبستگی قوی و معنی‌داری بین میزان فرسایش کل جاده با عامل زمین‌شناسی، عرض جاده و عامل بارش وجود دارد. همان‌طور که یاد شد با احداث جاده پوشش گیاهی و خاک مناطق اطراف جاده نیز بر اثر خاک‌برداری و خاک‌ریزی دچار تغییر می‌شوند. برای جبران این تغییرات و بازگشت به شرایط اولیه، اکوسیستم نیاز به زمان دارد. بدیهی است که هرچه عمر این تغییرات ایجاد شده بیشتر باشد، بوم‌سازگان به حالت پایدار نزدیک‌تر شده و مقدار فرسایش و تخریب خاک آن نیز کمتر است.

شناسایی مناطق با خطر زیاد فرسایش و رسوب جاده‌ای

در این پژوهش به منظور شناسایی مناطق با میزان فرسایش زیاد (نقاط داغ فرسایشی جاده‌ها) از روش تحلیل آماری Hotspot analysis استفاده شد (شکل ۴). همچنین نتایج این بخش از

بر اساس عامل‌های تهیه‌شده مربوط به مدل که به صورت راقمی و در جاده مطالعاتی تهیه شد، رسوب‌دهی سطح جاده و رسوب‌دهی ترانشه خاک‌برداری به تفکیک بازه مطالعاتی تعیین و استخراج شد (جدول ۶). همچنین در نهایت رسوب‌دهی کل جاده مطالعاتی بر اساس مدل SEDMODL از مجموع رسوب‌دهی ناشی از سطح جاده و آبراهه‌های کناری (TS) و حاصل ضرب رسوب‌دهی ناشی از ترانشه خاک‌برداری (CS) در مقدار عامل سن جاده (Af) تعیین شد (جدول ۶). نتایج اندازه‌گیری میخ‌های فرسایشی نشان داد میانگین فرسایش خاک در اطراف جاده مطالعاتی نازی ۵/۷ میلی‌متر در سال است. همان‌طور که نتایج این پژوهش نشان داد، مدل SEDMODL توانمندی زیادی در شناسایی مناطق حساس به فرسایش و برآورد نرخ شدت رسوب‌دهی ناشی از جاده‌های جنگلی دارد. نتایج مطالعه حاضر با یافته‌های اسدالهی و همکاران (۳) که بیان کردند مدل SEDMODL قابلیت زیادی در برآورد میزان فرسایش و رسوب جاده‌های جنگلی دارد، در یک راستاست. به عبارت دیگر می‌توان بیان کرد که جاده‌های جنگلی درصد کمی از مساحت حوزه آبخیز را در بر می‌گیرند؛ اما مقدار رسوب تولید آن‌ها به مراتب بیشتر است. این نسبت اهمیت توجه به رعایت اصول صحیح در جاده‌سازی، طراحی شبکه مناسب مانند حفاظت از دامنه خاک‌برداری با استفاده از شبکه‌های توری و بوته کاری، کمینه کردن طول جاده‌ها و مدیریت صحیح جاده‌ها به منظور به کمینه رساندن فرسایش خاک و رسوب در این مناطق را نمایان می‌کند. نتایج این بخش از پژوهش با یافته‌های حبیب‌زاده (۱۱) در جنگل‌های ارسباران به کمک مدل SEDMODL هم‌راستاست. ایشان بیان کردند رسوب‌گذاری ناشی از جاده‌ای جنگلی به طول ۱۰ کیلومتر حدوداً ۱۹۰۰۰ تن بوده و از طرف دیگر کل رسوبگذاری حوزه آبخیزی که آن جاده مطالعاتی در آن واقع شده است (با مساحت ۱۴۶۱۵ هکتار)، ۴۶۰۰۰ تن بوده است. پارساخو و همکاران (۱۸) بیشترین میزان آسیب‌پذیری جاده

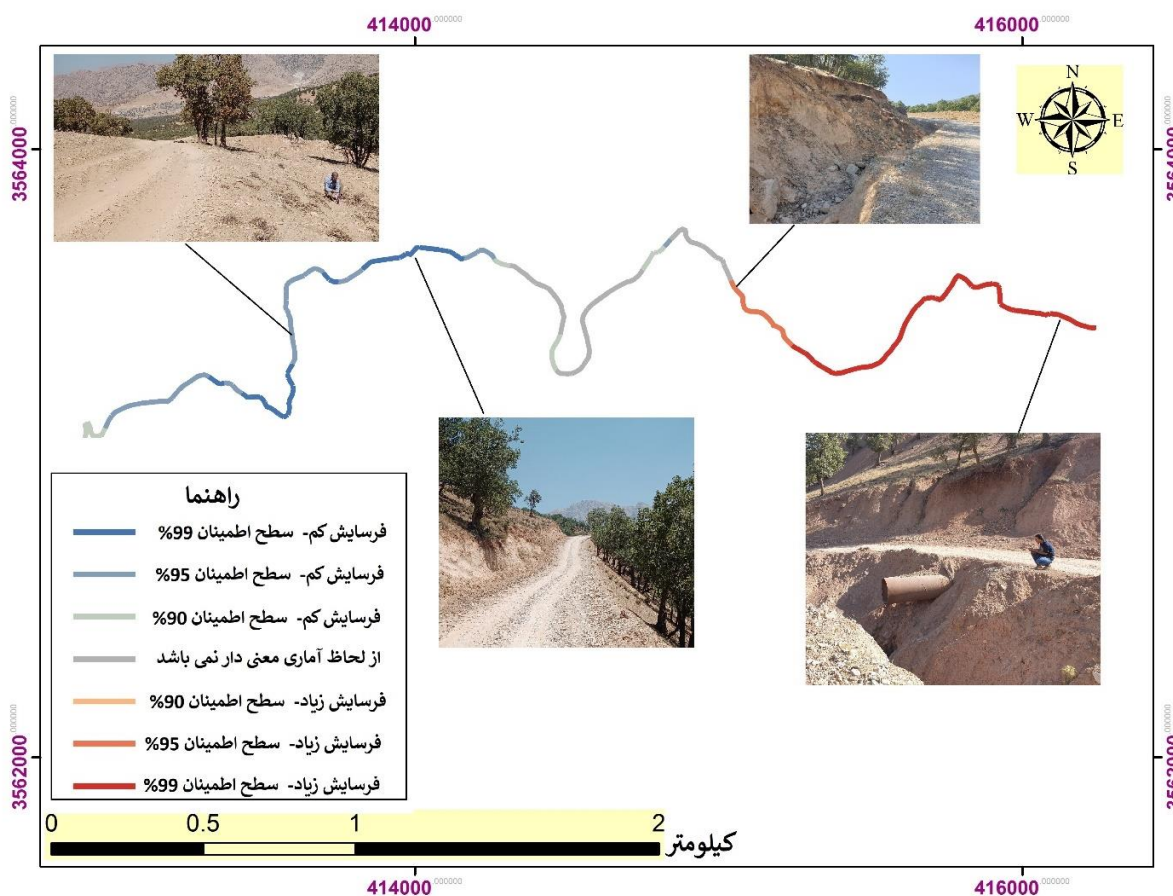
جدول ۶. برآورد رسوب‌دهی کل مدل تحویل رسوب SEDMODL در جاده نازی

نام جاده	طول جاده (متر)	فاکتور سن جاده	رسوب‌دهی سطح جاده (سال/تن)	رسوب‌دهی کناره جاده (سال/تن)	رسوب کل (سال/تن)
نازی	۵۱۷۱	۲	۱۳۹۲	۸۰/۷	۲۹۴۷

جدول ۷. نتایج آنالیز همبستگی پیرسون

طول جاده	عرض جاده	عامل جنس سطح جاده	عامل ترافیک جاده	عامل زمین‌شناسی	عامل بارش	عامل پوشش گیاهی و سنگی اطراف جاده	عامل ارتفاع کناره جاده	عامل زمین‌شناسی	فرسایش کل	همبستگی پیرسون
۰/۰۸۰	۰/۴۹۳**	۰/۲۴۷**	۰/۳۲۸**	۰/۲۶۹**	۰/۳۹۳**	۰/۰۷۹	۰/۲۵۰**	۰/۸۸۲**	۱	همبستگی پیرسون
۰/۰۶۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۶۴	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	Sig.	فرسایش کل
۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰	N	

**همبستگی معنی دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد



شکل ۴. نقشه تحلیل آماری لکه داغ میزان فرسایش جاده نازی

جاده‌های جنگلی لازم است در طراحی جاده‌ها شیب، زاویه تلاقی و مکان‌های تخلیه رواناب دقت ویژه شود.

نتیجه‌گیری کلی

در جریان احداث جاده، سطح وسیعی از عرصه جنگل‌ها و مراتع در طول و حاشیه مسیر آن تخریب می‌شود. همچنین حجم بسیاری زیادی خاک و سنگ از محل خود جابه‌جا شده یا روی اراضی مجاور ریخته شده که موجب مضاعف‌شدن شدت تخریب محیط زیست می‌شود و یا به‌طور مستقیم وارد آبراهه‌ها و رودخانه‌ها شده و در نهایت به‌صورت رسوب وارد مخازن سدها، تالاب‌ها، دریاچه‌ها و دریاها می‌شود. در این پژوهش از جاده جنگلی منطقه نازی به طول ۵۱۷۱ متر که به‌صورت خاکی و عمدتاً به‌منظور سهولت دسترسی به مناطق مسکونی (روستا)، عشایری و تفریحی در مناطق جنگلی استان چهارمحال و بختیاری احداث شده است، به‌عنوان منطقه مطالعاتی استفاده شد. نتایج نشان داد میانگین فرسایش خاک در فواصل مختلف از جاده نازی بر اساس میخ‌های فرسایشی ۵/۷ میلی‌متر در سال است. همچنین بر اساس مدل SEDMODL، برآورد میزان فرسایش و رسوب‌دهی کل شبکه جاده مطالعاتی به‌ترتیب ۲۸۷۵ و ۵۷۰ تن در سال در کیلومتر است. بنابراین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر پیشنهاد می‌شود اقدامات اصلاحی، حفاظتی و مراقبتی از جاده در مناطق با خطر زیاد فرسایش در اولویت تصمیم‌گیران قرار گرفته شود.

پژوهش نشان داد، با درجه اطمینان بیشتر از ۹۵ درصد (Confidence level >95%) برای جاده نازی ۳۰/۸ درصد (۱۵۹۳ متر از بازه مورد بررسی) به‌عنوان مناطق با تولید فرسایش بسیار زیاد و به‌عنوان لکه داغ مشخص می‌شود. نخستین مرحله در تحلیل فضایی، شناسایی ساختار پراکندگی و لکه داغ (Hot spot) داده‌هاست. در این قسمت از پژوهش از روش تحلیل آماری Hotspot analysis در نرم‌افزار ArcGIS 10.8 استفاده شد. این ابزار برای نقاطی که دارای یک ویژگی عددی باشند (مثل میزان فرسایش و یا رسوب‌دهی خاک) یا وزن عوارض به‌کار گرفته می‌شود. نتیجه آن به‌صورت یک نقشه خواهد بود که بیانگر لکه‌های داغ و سرد است که دارای ویژگی‌های آماری قابل توجهی باشند. تحلیل‌ها بر اساس آماره Getis ord GI ایجاد می‌شود. بر اساس نقشه‌های تولیدی در این بخش مشخص شد در مناطق با شیب زیاد و حساس از نظر زمین‌شناسی (مارن‌ها در منطقه نازی) میزان فرسایش خاک بیشتر است و این قسمت‌ها بیشترین نقش را در تولید رسوب جاده دارند. گفتنی است که بازدیدهای میدانی نیز بیانگر وجود فرسایش و هدررفت خاک در این مناطق بوده است (شکل ۴). مشاهدات انجام‌شده از جاده نازی بیانگر نقش بسیار مهم پوشش گیاهی در اطراف جاده‌ها برای جلوگیری از توسعه انواع فرسایش تشدیدشونده است (شکل ۴). همچنین به‌منظور کاهش میزان فرسایش خاک و متمرکز شدن رواناب در سطح و حاشیه

منابع مورد استفاده

References

1. Abiat, S., M. Arabkhedri and A. Ahmadi. 2015. Estimation of road sediment production by combining statistical sampling methods with WARSEM model. *Watershed Management Research* 28(108): 26–39.
2. Akay, A.E., O. Erdas, M. Reis and A. Yuksel. 2008. Estimating sediment yield from a forest road network by using a sediment prediction model and GIS techniques. *Building and Environment* 43(5): 687–695.
3. Asadolahi, Z., S. Yousefi and M. Mohammady. 2013. Determining the contribution of roads in watershed sediment production using sediment delivery model and GIS. *Journal of Environmental Science and Technology* 3(2):13–26.
4. Barber, C.P., M.A. Cochrane, C.M. Souza and W.F. Laurance. 2014. Roads, deforestation, and the mitigating effect of protected areas in the Amazon. *Biological Conservation* 177:203–209.
5. Burroughs, E.R. and J.G. King. 1989. Reduction of soil erosion on forest roads. Gen Tech Rep - US Dep Agric For Serv. 264 (INT-264).
6. Cao, L., W. Elliot and J.W. Long. 2021. Spatial simulation of forest road effects on hydrology and soil erosion after a wildfire. *Hydrological Processes* 35(6): e14139.
7. Cerdà A. 2007. Soil water erosion on road embankments in eastern Spain. *Science of the Total Environment*

- 378(1-2):151-155.
8. Conroy, W.J., K.V. Dubé and T.E. Koler. 2000. Comparison of methods to evaluate surface erosion from logging roads using watershed analyses. PP. 1-10. *In*: M. Flug, D. Frevert and D.W. Watkins (Eds.), *Watershed Management and Operations Management* 2000. American Society of Civil Engineers, Colorado.
9. Elliot, W.J., R.B. Foltz and P.R. Robichaud. 2009. Recent findings related to measuring and modeling forest road erosion. *In*: 18th World IMACS Congress and MODSIM - International Congress on Modelling and Simulation, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand; and International Association for Mathematics and Computers in Simulation, Cairns, Australia.
10. Gayen, A., H.R. Pourghasemi, S. Saha, S. Keesstra and S. Bai. 2019. Gully erosion susceptibility assessment and management of hazard-prone areas in India using different machine learning algorithms. *Science of the Total Environment* 668:124-38.
11. Habibzadeh, A. 2018. Investigating SEDMODEL performance model in forest road sedimentation report (case study of Asheklou watershed). Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), 91 p.
12. Hawks, B.S., W.M. Aust, M.C. Bolding, S.M. Barrett, E. Schilling and J.A.H. Fielding. 2022. Linkages between Forestry Best Management Practices and erosion in the southeastern U.S. *Journal of Environmental Management* 305:114411.
13. Kavian, A., A. Safari and A. Parsakhoo. 2016. Assessment of forest roads sediment yield using WARSEM, SEDMODL and direct measurement through rainfall simulation. *Journal of Range and Watershed Management* 69(1):167-186.
14. Kramer, B.W. 2001. Forest road contracting, construction, and maintenance for small forest woodland owners. Oregon State University, College of Forestry, Forest Research Laboratory, Corvallis.
15. Misirlioğlu, G., S. Gümüş and T. Yoshimura. 2022. Comparison of WEPP:Road Batch Model and ABAG Model for Estimating Amount of Top Soil Erosion in Forest Road Fill Slopes. *European Journal of Forest Engineering* 8(1): 26-34.
16. Moayedi, H., M. Mehrabi, M. Mosallanezhad, A.S.A. Rashid and B. Pradhan. 2019. Modification of landslide susceptibility mapping using optimized PSO-ANN technique. *Engineering with Computers* 35(3): 967-984.
17. Naghdi, R., P. Dalir, V. Gholami and H.R. Pourghasemi. 2017. Modeling of sediment generation from forest roads employing SEDMODL and its calibration for Hyrcanian forests in northern Iran. *Environmental Earth Sciences* 76(12): 1-12.
18. Parsakhoo, A., M. Lotfalian, A. Kavian and S.A. Hosseini. 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.
19. Reid, L.M. and T. Dunne. 1984. Sediment production from forest road surfaces. *Water Resources Research* 20(11): 1753-1761.
20. Rijdsdijk, A., L.A. Sampurno Bruijnzeel and C.K. Sutoto. 2007. Runoff and sediment yield from rural roads, trails and settlements in the upper Konto catchment, East Java, Indonesia. *Geomorphology* 87(1-2): 28-37.
21. Sekot, W., F. Holzleitner, D. Stathis, C. Kirkenidis, M. Sapountzis, M.C. Lafavor and et al. 2021. Estimating sediment yield from a forest road network using SEDMODEL and GIS technique (case study Arasbaran forests). *Ecopersia* 9(4): 235-249.
22. Seutloali, K.E. and H.R. Beckedahl. 2015. A review of road-related soil erosion: An assessment of causes. *Earth Sciences Research Journal* 19(1):73-80.
23. Sidle, R.C., A.D. Ziegler, J.N. Negishi, A. Rahim, R. Siew and F. Turkelboom. 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.
24. Solgi, A., R. Naghdi, E.K. Zenner, V. Hemmati, F.K. Behjou and A. Masumian. 2021. Evaluating the effectiveness of mulching for reducing soil erosion in cut slope and fill slope of forest roads in hyrcanian forests. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering* 42(2): 259-268.
25. Sun, G. and S.G. McNulty. 1998. Modeling soil erosion and transport on forest landscape. *In*: Winning solutions for risky problems Proceedings of conference 29, International Erosion Control Association, Reno, USA.
26. Vahabzadeh, G., A. Safari, M.H. Farhoudi, H.R. Abdollahi, H. Fathizad and G.R. Khosravi. 2015. Assessment of Erosion Value and Sediment Delivery Ratio in the Unsealed and Forest Roads. *Journal of Water and Soil Science* 18(70): 295-313.
27. Varol, T., M. Ertuğrul, H.B. Özel, T. Emir and M. Çetin. 2019. The effects of rill erosion on unpaved forest road. *Applied Ecology and Environmental Research* 17(1): 825-839.
28. Yorulmaz, G. and S. Gumus. 2022. Comparison of Wepp:Road Batch Model and ABAG Model Results for Estimating the Amount of Top Soil Erosion in Forest Road Fill Slopes. *European Journal of Forest Engineering* 8(1): 26-34.

29. Yousefi, S., H. Moradi, J. Boll and S. Schönbrodt-Stitt. 2016. Effects of road construction on soil degradation and nutrient transport in Caspian Hyrcanian mixed forests. *Geoderma* 284: 103–112.
30. Yousefi, S., H.R. Pourghasemi, S.N. Emami, S. Pouyan, S. Eskandari and J.P. Tiefenbacher. 2020. A machine learning framework for multi-hazards modeling and mapping in a mountainous area. *Scientific Reports* 10(1): 1–14.