

Evaluation of Compensation for Economic Damage Caused by Soil Loss Using an Opportunity Cost Approach in the Efin Watershed of South Khorasan

Javad Chezgi^{1,2}, Reza Chamani^{2,3}, Hadi Memarian^{2,4}, Halime Joloro⁵ and Negin Rashidi⁶

Received: 03-05-2026, Revised: 30-05-2026, Accepted: 03-06-2026, Published: 03-08-2026

<https://doi.org/10.22034/20.72.4>

Extended Abstract

Introduction

Today, in various parts of the world, especially in dry and semi-dry regions, land degradation, soil erosion, and loss of nutrients due to various climatic, human, and environmental factors have increased. This has led to a decline in the soil's developmental capacity, as well as the germination, establishment, and growth of plants in pastures, reducing the productivity of agricultural plants. In other words, after every heavy rainfall and runoff, soil erosion occurs, which moves soil from the watershed area downstream, depleting soil nutrients and impoverishing the local soil. However, a lack of understanding of the amount of displaced nutrients and the costs associated with this issue has resulted in its minimal inclusion in the policies and planning of managers. Therefore, identifying and quantifying the extent of erosion and the lost nutrients due to it, as well as the replacement costs of these elements, can significantly aid in understanding the various dimensions of soil erosion. Based on this, this study was conducted with the aim of better understanding the economic losses caused by soil loss in the Efin watershed in South Khorasan Province. In this regard, and in order to assess the replacement costs of the phosphorus and potassium elements lost due to soil erosion, the rainfall erosivity and vegetation cover change indices were first determined for the years 1386 to 1402, and the cost of nutrient loss was estimated using the replacement cost method.

Materials and Methods

For this research, daily precipitation data from three meteorological stations (Efin, Zohan, and Moghilan), located at the outlet, mid, and upstream of the watershed, as well as sediment and flow data recorded at the Efin station at the outlet of the watershed, were collected for the available period (2007 to 2023) from the Meteorological Organization and the Regional Water Company of South Khorasan. Subsequently, the model inputs for InVEST, including Rainfall Erosion (R), Soil Erodibility (K), Digital

1. Associate Professor, Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran. Corresponding Author: chezgi@birjand.ac.ir
2. Research Group on Futures Studies in Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran.
3. Assistant Professor, Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran.
4. Associate Professor, Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran.
5. PhD Student, Rangeland Management, Faculty of Natural Resources, Noor, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
6. MSc Graduate, Watershed Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Elevation Model (DEM), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and Land Management (P) corresponding to the precipitation and flow data for the period of 2007 to 2023, were prepared and resampled to 30-meter cells. The period from 2007 to 2016 was considered for calibration, and from 2017 to 2023 for model validation. After calibrating and validating the InVEST model, the amount of sediment output from the watershed was estimated for each year. The levels of phosphorus and potassium in each kilogram of sediment were extracted from previous studies. Finally, based on the determined amounts of phosphorus and potassium in the eroded soil each year, as well as their market prices from agricultural jihad data, the replacement costs for these elements were calculated for each year.

Results and Discussion

The results of this study indicate that the InVEST model exhibited sufficient efficiency, with errors of 0.58% and 13.30% in reproducing observed sediment during the calibration and validation periods, respectively, and the model is applicable for this research. Additionally, rainfall analysis shows a decrease in precipitation from the beginning to the end of the period at the Efin and Moghilan stations, while an increase was noted at the Zohan station. The maximum NDVI index value remained relatively stable in most years due to the presence of jujube orchards relying on groundwater resources, though the minimum value varied. Moreover, the sediment output during the evaluation period ranged from 31,910 to 142,310 tons across different years. Ultimately, the replacement costs for phosphorus and potassium were estimated to be between 393.57 to 1,755.17 million rials and 2,890.42 to 12,887.02 million rials, respectively, with total costs ranging from 3,284.00 to 14,642.19 million rials over the statistical period. Given the approximate stability of land use throughout the statistical period, climate has a greater impact, with sediment increasing alongside precipitation. While the presence of jujube orchards, influenced by spring and qanat irrigation, shows a relatively stable NDVI maximum, degradation in pasture and barren land could exacerbate erosion due to its greater extent.

Conclusion

Soil erosion and the loss of nutrient resources in the long term have a significantly negative impact on the lives of local communities and soil-dependent organisms. In other words, the lack of nutrients not only reduces agricultural soil productivity but also leads to the destruction of biodiversity. Therefore, adequate attention to this issue can illuminate hidden aspects and provide a clear picture of the negative effects of erosion. As the study results indicate, erosion in the Efin watershed is influenced by rainfall, and sediment levels change with variations in rainfall shape and volume. In this context, the extensive and less-covered rangelands in the Efin watershed play a significant role in erosion and the increase of replacement costs. It is recommended that, considering the region's dry and fragile climate, measures be taken to prevent surface soil degradation. Although rainfall is beyond human control and biological cover does not establish well due to the lack of precipitation, erosion can be prevented from intensifying and spreading by implementing biological-engineering projects and controlling the terrestrial factors affecting erosion. On the other hand, besides implementing bio-engineering measures, further communication and interaction among organizations and stakeholders influencing the watershed's performance can play an effective role in reducing degradation and improving vegetation cover.

Keyword: *Agricultural Productivity, Erosion, Nutrient Elements, Soil Economics, Soil Management*

Article Type: Research Article

Acknowledgement

This study was supported by the University of Birjand (Project No. 17737/D/14047). The authors would like to thank the University for its support

Conflicts of Interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the writing or publication of the contents and results of this research.

Data Availability Statement

The data and results used in this study will be made available through correspondence with the corresponding author.

Authors' Contribution

Javad Chezgi: Project management, research conceptualization, final editing of the manuscript.

Reza Chamani: Research conceptualization, determination of input data, calibration and validation of the INVEST model, writing the manuscript. Hadi Memarian: Research conceptualization, final editing of the manuscript. Halimeh Joloro: Calibration and validation of the INVEST model, running and preparing the results. Negin Rashidi: Preparation of input data, writing the manuscript.

Citation: Chezgi J, Chamani R, Memarian H, Joloro H, Rashidi N, Evaluation of compensation for economic damage caused by soil loss using an opportunity cost approach in the Efin watershed of South Khorasan. jwmseir 2026; 20 (72): 43-60

Iran-Watershed Management Science & Engineering, Year 2026, , Vol 20, No 72, PP 43-60

Publisher: Watershed Management Society of Iran

© Author(s)



ارزیابی جبران خسارت اقتصادی ناشی از هدر رفت خاک با رویکرد هزینه-جایگزین در حوزه آبخیز افین خراسان جنوبی

جواد چزگی^{۱*}، رضا چمنی^{۲،۳}، هادی معاریان^{۴،۵}، حلیمه جلورو^۵ و نگین رشیدی^۶
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۳، تاریخ داوری: ۱۴۰۵/۰۳/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۳، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۱۲
<https://doi.org/10.22034/20.72.4>

چکیده

امروزه در بخش‌های مختلف کره زمین متأثر از عوامل مختلف اقلیمی، انسانی و محیطی، فرسایش خاک و هدررفت عناصر غذایی ناشی از آن افزایش یافته است. لذا در این پژوهش سعی شده است میزان هدررفت خاک در حوزه آبخیز افین خراسان جنوبی تعیین گردد و در ادامه میزان هزینه ناشی از جایگزین عناصر از دست رفته فسفر و پتاسیم برای کمی‌سازی هزینه‌های جبران خسارات فرسایش خاک تعیین شود. برای انجام پژوهش حاضر، داده‌های بارندگی روزانه هواشناسی سه ایستگاه افین، ذهان و مغیلان برای دوره ۱۶ ساله از سال ۱۳۸۶ تا ۱۴۰۲ اخذ و ورودی‌های مدل InVEST متناظر با داده‌های بارش و دبی، آماده شد. پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل InVEST، میزان رسوب خروجی از آبخیز برای هر سال تخمین زده شد. پس از آن، میزان فسفر و پتاسیم موجود در هر کیلوگرم رسوب نیز از مطالعات قبلی استخراج شد. در نهایت بر اساس تعیین میزان حضور عناصر فسفر و پتاسیم در خاک فرسایش یافته هر سال و همچنین تعیین قیمت فروش این عناصر بر اساس داده‌های سازمان جهادکشاورزی، میزان هزینه-جایگزین این عناصر برای هر سال تعیین شد. نتایج پژوهش حاضر حاکی از آن است که مدل InVEST با ۰/۵۸ و ۱۳/۳۰ درصد خطا در بازتولید رسوب مشاهده‌ای به ترتیب در دوره واسنجی و اعتبارسنجی، از کارایی مناسبی برخوردار است. علاوه بر این میزان رسوب خروجی در بازه مورد ارزیابی از ۳۱۹۱۰ تا ۱۴۲۳۱۰ تن در سال‌های مختلف متغیر است. در نهایت هزینه-جایگزین عناصر فسفر و پتاسیم به ترتیب ۳۹۳/۵۷ تا ۱۷۵۵/۱۷ و ۲۸۹۰/۴۲ تا ۱۲۸۸۷/۰۲ میلیون ریال و هزینه کل از ۳۲۸۴/۰۰ تا ۱۴۶۴۲/۱۹ میلیون ریال در طول دوره آماری برآورد شد. براین اساس پیشنهاد می‌شود با توجه به اقلیم خشک و شکننده منطقه، از تخریب سطح خاک و دستخوردگی آن جلوگیری شود.

کلید واژه: اقتصاد خاک، بهره‌وری زراعی، عناصر غذایی، فرسایش، مدیریت خاک

نوع مقاله: پژوهشی

استناد: جواد چزگی، رضا چمنی، هادی معاریان، حلیمه جلورو، نگین رشیدی. ارزیابی جبران خسارت اقتصادی ناشی از هدر رفت خاک با رویکرد هزینه-جایگزین در حوزه آبخیز افین خراسان جنوبی. علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱۴۰۵؛ ۲۰(۷۲): ۶۰-۴۳

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران سال ۱۴۰۵، دوره ۲۰، شماره ۷۲، ۴۳-۶۰



ناشر: انجمن آبخیزداری ایران

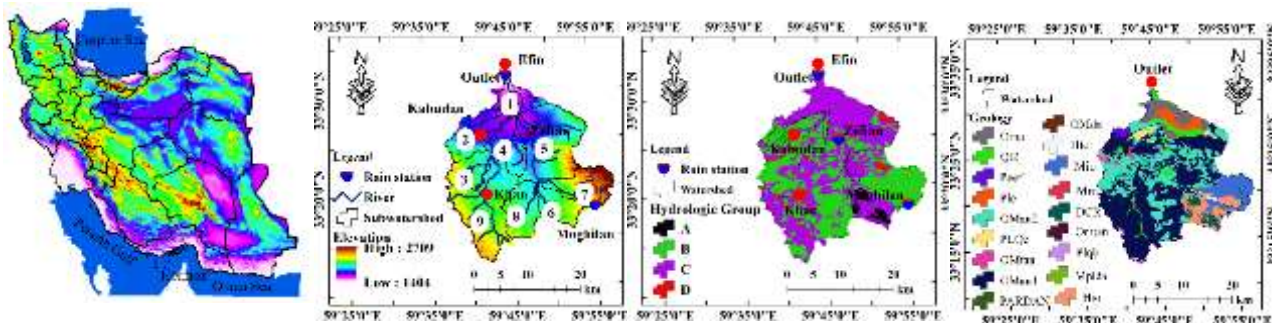
- ۱- دانشیار، مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. chezgi@birjand.ac.ir
- ۲- گروه پژوهشی آینده پژوهی در علوم محیطی، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
- ۳- استادیار، مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
- ۴- دانشیار، مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
- ۵- دانشجوی دکتری، مرتعداری، دانشکده منابع طبیعی نور، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- ۶- دانش آموخته کارشناسی ارشد، علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی نور، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

تعاملات پیچیده بین اقلیم، کاربری اراضی و پوشش گیاهی، بر فرسایش خاک و تولید رسوب تأثیر گذارند. به دلیل همین پیچیدگی‌ها، مدل‌های مدیریتی مانند InVEST به‌طور گسترده برای حمایت از مدیریت یکپارچه خاک و آب مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳۴]. مدل InVEST قابلیت نقشه‌برداری و سنجش کمی خدمات بوم‌سازگان مرتبط با تحویل و نگهداری رسوب را در مقیاس سالانه و تحت شرایط پایدار فراهم می‌آورد. هم‌چنین این مدل به‌عنوان یکی از ابزارهای کارآمد در ارزیابی خدمات بوم‌سازگان خاک، بر پایه معادله تجربی جهانی فرسایش خاک (RUSLE) عمل کرده و قادر است میزان فرسایش، و هم‌چنین الگوی مکانی انتقال و رسوب‌دهی رسوبات را شناسایی کند. پژوهش‌های متعددی به برآورد فرسایش و رسوب با استفاده از مدل InVEST پرداخته‌اند. در این راستا Zabihi و همکاران [۳۲] نیز با اولویت‌بندی زیرآب‌خیزهای حوزه آبخیز تالار با مدل InVEST بیان داشتند میزان هدررفت، نگهداشت و تولید رسوب سالانه به ترتیب ۶۵۲۶۸۳، ۷۵۷۵۸۸ و ۵۷۴۲۶ تن است. Tamire و همکاران [۲۷] نیز در آفریقا، ترکیب داده‌های تغییر کاربری زمین و تغییر اقلیم را با مدل InVEST-SDR شبیه‌سازی کردند و دریافتند که تغییرات اقلیمی سهم قابل‌توجهی در افزایش میزان رسوب دارد. هم‌چنین Chamani و همکاران [۳] با ارزیابی نقش عملیات اصلاحی زیستی بر فرآیند فرسایش خاک با استفاده از مدل InVEST در حوزه آبخیز شارقنج، خراسان جنوبی بیان داشتند مقدار رسوب تولیدشده در بارش‌های با دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰ و ۵۰ سال به ترتیب ۲۷/۶۶۹۹، ۵۶/۹۰۲۴، ۲۷/۱۷۴۵۲ و ۳۰/۲۰۸۶۲ تن بوده که بعد از اعمال سناریوی مدیریتی به‌ترتیب به ۳۹/۶۴۳۹، ۳۷/۸۶۶۸ و ۹۴/۱۶۸۹۲ تن رسیده است. علاوه بر این Qiao و همکاران [۲۳] تغییرات زمانی - مکانی فرسایش خاک را در حوزه آبخیز Yihe در شمال چین از سال ۱۹۵۶ تا ۲۰۲۰ با استفاده از مدل InVEST شبیه‌سازی کردند و میانگین فرسایش سالانه خاک ۲۱/۳۸ تن در هکتار در سال تعیین شد. در پژوهشی دیگر Namazi و همکاران [۲۰] به ارزیابی خدمت نگهداشت خاک در شهرستان سرخس در بازه زمانی ۲۱ سال از ۲۰۰۰ پرداختند، نتایج این پژوهش نشان داد که پتانسیل فرسایش خاک بین ۰/۴۷ تا ۰/۵۳ تن در پیکسل در سال متغیر بوده است. میزان نگهداشت خاک نیز به‌طور متوسط ۱/۰۶ تن در پیکسل در سال بوده و بیش‌ترین میزان نگهداشت خاک مربوط به کاربری مرتعی با مقدار ۵/۹۸ و کم‌ترین میزان نیز مربوط به کاربری مسکونی با مقدار ۰/۰۸ تن در پیکسل بوده است. همان‌طور که نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد تخریب خاک متأثر از عوامل مختلف اقلیمی و انسانی سبب هدررفت منابع غذایی در دسترس گیاهان زراعی و مرتعی می‌شود. اما توجه به هزینه‌های جایگزین آن در طول سال‌های مختلف کمتر مورد بحث قرار گرفته است. لذا در پژوهش حاضر سعی شده است میزان هدررفت خاک

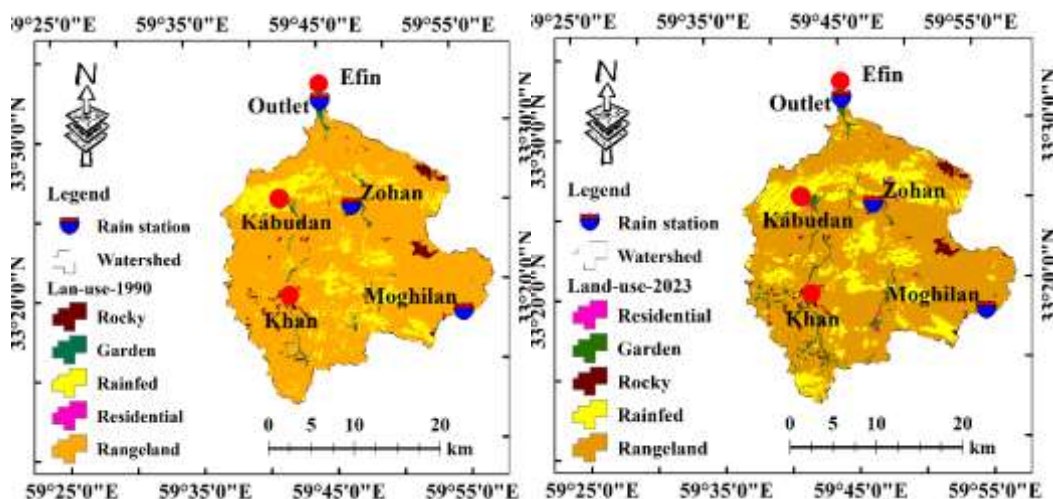
خدمات بوم‌سازگان‌ها^۱ به‌عنوان مزایای منحصربه‌فرد بوم‌سازگان‌های طبیعی، نقشی کلیدی در تعادل بوم‌شناسی و توسعه اجتماعی-اقتصادی ایفا می‌کنند. این خدمات امروزه بیش از هر زمان دیگری تحت تأثیر تخریب ناشی از فعالیت‌های انسانی و تغییرات در بارندگی قرار گرفته‌اند [۶]. در این میان، حفظ خاک، به‌عنوان یک خدمت بوم‌شناختی و هم‌چنین جلوگیری از تخریب و فرسایش آن اهمیت ویژه‌ای دارد. فرسایش خاک، که غالباً تحت تأثیر عوامل آبی رخ داده و با کاهش مواد مغذی همراه است، یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی تخریب خاک نیز محسوب می‌شود [۷]. به‌طور خاص، تغییر در شدت، فراوانی و توزیع زمانی بارش‌ها، فرسایش خاک را تشدید کرده و بار رسوبی را در بسیاری از حوزه‌های آبخیز به‌طور چشمگیری افزایش داده است [۲۹]. در این میان میزان بار رسوب خروجی^۲ از حوزه آبخیز، که تابعی از فرسایش سطحی خاک توسط فرآیند بارش-رواناب و هم‌چنین فرآیندهای انتقال رسوب متأثر از اتصال زمین^۳ است، به‌عنوان شاخص عملکرد آبخیزها در مخاطرات محیط‌زیستی در سطح جهانی در نظر گرفته می‌شود [۳۴، ۲۶، ۱۶، ۹، ۳]. خروج رسوب از منطقه، علاوه بر از دست دادن مواد مغذی حیاتی مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم، منجر به کاهش رطوبت خاک و بهره‌وری کشاورزی می‌شود [۲۴]. برآوردهای جهانی حاکی از آن است که سالانه بیش از ۲۳ میلیارد تن خاک از مزارع جهان از دسترس خارج می‌شود که این میزان، نشان‌دهنده نرخ فرسایش ۷ درصدی خاک در هر دهه است [۲۱].

در ایران، فرسایش خاک یکی از اصلی‌ترین تهدیدات علیه پایداری منابع طبیعی و توسعه پایدار محسوب می‌شود؛ به‌طوری‌که حدود ۳۶ درصد از اراضی زراعی و ۶۰ درصد از کل خاک‌های کشور در معرض خطر فرسایش قرار دارند [۱۴]. این روند، سالانه هزینه‌هایی معادل ۱۲/۸ میلیارد دلار آمریکا (حدود ۴ درصد تولید ناخالص داخلی) را صرفاً به‌دلیل تخریب آب و خاک و مصرف کود در بخش کشاورزی ایران تحمیل می‌کند [۸]. لذا، تعیین ارزش اقتصادی خاک فرسایش یافته، به‌منظور درک درست خسارات وارده و هدایت به سمت کاهش استفاده از نهاده‌های بیرونی و شیمیایی امری ضروری است [۱]. باتوجه به اینکه فرسایش خاک منجر به از دست رفتن گسترده مواد مغذی ضروری مانند فسفر، پتاسیم و کلسیم می‌شود تعیین خسارات اقتصادی ناشی از آن، اهمیتی دوچندان یافته است. روش‌های گوناگونی برای ارزش‌گذاری خاک وجود دارد که عمدتاً بر مبنای هزینه هستند. در میان این روش‌ها، رویکردهای هزینه جایگزین، هزینه فرصت از دست رفته^۴ و هزینه خسارت اجتناب شده^۵، بیش از سایرین در ارزش‌گذاری خاک و کارکردهای آن به

1. Ecosystem Services: ES
2. Sediment Export
3. Connectivity
4. Opportunity Cost Method
5. Damage Cost Avoided Method



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی، زمین‌شناسی و گروه هیدرولوژیکی منطقه مورد مطالعه
Fig 1. Geographical location, Geology and Hydrological Group of the study area



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی در سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۲۳ در آبخیز افین [۴]
Fig 2. Land use map in 1990 and 2023 in the Efin watershed [4]

باغ‌های زرشک در حاشیه رودخانه اصلی مقداری گسترش دیده می‌شود. در وضعیت بارندگی در ۲ ایستگاه افین و مغیلان کاهش بارندگی و در ایستگاه زهان افزایش بارش دیده شده است.

مدل InVEST

برای آماده‌سازی ورودی‌های مدل InVEST از داده‌های بارندگی سالیانه ایستگاه‌های دارای آمار مناسب و قابل دسترس واقع در منطقه برای دوره ۱۳۸۶ تا ۱۴۰۲ استفاده شد. در ادامه عامل‌های فرساینده باران، NDVI، فرسایش‌پذیری خاک^۲، مدیریت پوشش و عامل حفاظت تولید شد. قابل ذکر است در این پژوهش شاخص‌های فرساینده باران و NDVI برای هر سال جدا محاسبه شد.

مدل‌سازی فرسایش خاک و تولید رسوب با ابزار InVEST این پژوهش با بهره‌گیری از مدل InVEST به تخمین میزان

و هزینه‌های ناشی از جایگزین عناصر غذایی فسفر و پتاسیم در طول دوره آماری ۱۳۸۶ تا ۱۴۰۲ (دوره دسترسی به آمار بارندگی در منطقه) در حوزه آبخیز افین خراسان جنوبی مورد بررسی قرار گیرد.

روش کار

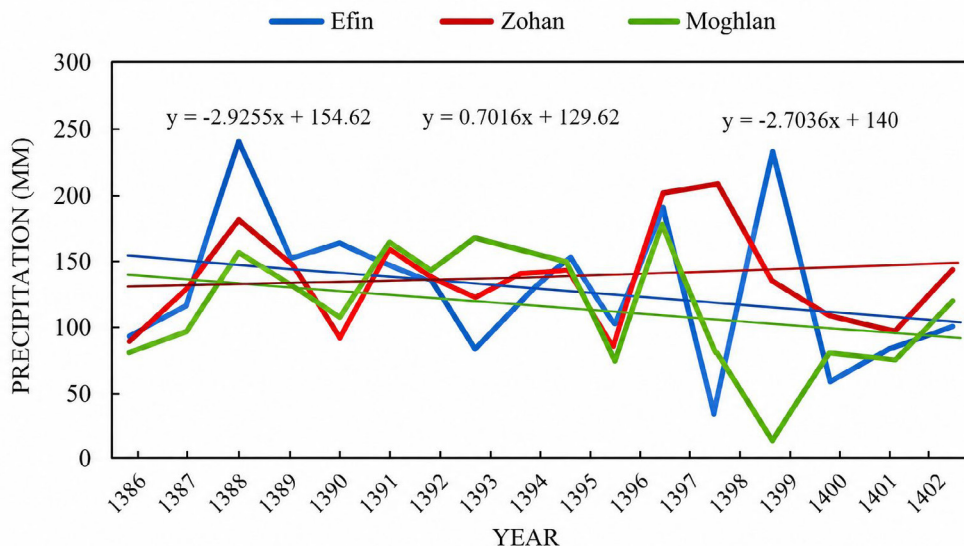
منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز افین با مساحتی بالغ بر ۶۴۱۸۰ هکتار در استان خراسان جنوبی واقع شده است. تغییرات ارتفاعی در این آبخیز از ۱۴۰۵ تا ۲۷۰۹ متر متغیر می‌باشد. اقلیم محدوده مطالعاتی براساس روش آمبرژه خشک تعیین شده است. در شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران نشان داده شده است.

کاربری اراضی و اقلیم

شکل ۲ نقشه‌های کاربری اراضی در سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۲۳ و شکل ۳ تغییرات زمانی بارندگی ایستگاه‌های مورد پژوهش در سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۴۰۲ را نشان می‌دهد. نقشه‌های کاربری اراضی از مطالعات پیشین استفاده شده است [۴]. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرات کاربری اراضی در این ۳۳ سال اندک بوده و در بخش

1. Rainfall Erosivity
2. Normalized Difference Vegetation Index
3. Soil Erodibility



شکل ۳- تغییرات بارندگی در دوره پژوهش در ایستگاه‌های باران‌سنجی آبخیز افین

Fig 3. Precipitation changes during the study period at the rain gauge stations of the Efin watershed

سالانه مجموع انرژی جنبشی رویدادهای بارندگی تعریف کرد که اثر ترکیبی بارندگی و رواناب را کمی‌سازی می‌کند [۵]. به عبارت دیگر، عامل R ابزاری برای ارزیابی اثر بارندگی و همچنین کمیت و سرعت رواناب ناشی از رویدادهای بارندگی است. بنابراین، عامل R تحت تأثیر عواملی چون الگوسازی بارش، توزیع جغرافیایی، شدت و انرژی جنبشی، و همچنین اندازه قطرات باران قرار می‌گیرد [۲] و [۱۱]. با توجه به محدودیت دسترسی به داده‌های شدت بارندگی در این پژوهش، از متوسط بارندگی روزانه ایستگاه‌های منتخب در دوره زمانی ۱۳۸۶ تا ۱۴۰۲ استفاده شد. در گام نخست، با اتکا به رابطه (۲)، شاخص فرسایندهی بر حسب مگاژول بر میلی‌متر بر هکتار بر ساعت، با استفاده از مدل Roose (۱۹۹۷) و بر مبنای متوسط بارندگی سالانه (P^*) محاسبه می‌گردد. متعاقباً، شاخص فرسایندهی باران سالیانه (R_{WS}) با استفاده از رابطه (۳) برای هر سال تعیین شد [۲۴ و ۲۵].

$$R_R = [0.5 + 0.05P^*] \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$R_{WS} = 6.5R_R + 1.52] \quad \text{رابطه (۳)}$$

عامل مدیریت پوشش (C):

پوشش گیاهی عامل بسیار تأثیرگذار در فرسایش خاک است. پوشش گیاهی از برخورد قطرات باران به سطح خاک جلوگیری می‌کند و انرژی قطرات باران را قبل از رسیدن به سطح خاک از بین می‌برد. مقدار C به نوع پوشش گیاهی، مرحله رشد آن و درصد پوشش گیاهی بستگی دارد [۱۰]. پوشش گیاهی نقشی حیاتی در مهار فرسایش آبی ایفا می‌کند که میزان این تأثیر از طریق شاخص C قابل سنجش است. در مناطقی که پوشش گیاهی اندک است، فرسایش خاکی ناشی از آب، شدت بیش‌تری دارد. در مقابل، در

رسوب پرداخته است. این مدل با تجزیه و تحلیل داده‌ها در مقیاس سلول‌های رقومی ارتفاع، قادر به تخمین سالانه میزان هدررفت خاک، نگهداری رسوب^۲ و رسوبات خروجی^۳ است. فرآیند مدل‌سازی با محاسبه هدررفت سالانه خاک آغاز می‌شود که این امر با استفاده از الگوریتم اختصاصی مدل InVEST و بر اساس اتصال هیدرولوژیکی آبخیز و نسبت تحویل رسوب (SDR^4) صورت می‌گیرد [۱۹]. سپس، مدل به تخمین تولید رسوب در مقیاس میانگین سالانه می‌پردازد. در محاسبه هدررفت خاک سالانه در هر پیکسل (USLEi)، از فرمول اصلاح شده جهانی هدررفت خاک (RUSLE) به شکل رابطه (۱) استفاده می‌شود:

$$USLEi = (R * K * LS * C * P) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن R : معرف شدت فرسایش باران، K : قابلیت فرسایش‌پذیری خاک، LS : فاکتور طول و درجه شیب، C : پوشش گیاهی و P : اقدامات حفاظتی است.

عامل فرسایندهی باران (R): عامل فرسایندهی بارندگی (R)، که تأثیر قابل توجهی بر فرسایش خاک در سراسر جهان دارد [۱۳]، معیاری کلیدی برای سنجش این پدیده محسوب می‌شود. این شاخص، که میزان تأثیر شدت بارش بر فرسایش خاک را منعکس می‌کند، مستلزم دسترسی به داده‌های بارش دقیق و پیوسته است. شاخص فرسایش بارندگی با در نظر گرفتن حجم، شدت و الگوی توزیع بارندگی تعیین می‌گردد، و در این میان، شدت به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی بارش، تعیین‌کننده اصلی درجه فرسایش محسوب می‌شود [۷]. علاوه بر این، عامل R را می‌توان به‌عنوان میانگین

1. Soil loss
2. Depth sediment
3. Export sediment
4. Sediment Delivery Ratio

خاک کمک شایانی می‌کنند [۲۲]. عامل P، در واقع، میزان کاهش تلفات خاک را به واسطه شیوه‌های کشاورزی نشان می‌دهد. سه رویکرد اصلی برای مدیریت فرسایش، شامل کشت روی خطوط تراز، احداث تراس و استفاده از عناصر حیاتی (مانند بادشکن‌ها یا پوشش گیاهی)، شناخته شده‌اند. مقادیر این عامل در بازه صفر تا یک قرار دارد. در این پژوهش، مقادیر P بر اساس مقادیر مورد استفاده در تحقیقات پیشین، از جمله مطالعات [۱۷ و ۲۸] اتخاذ شد.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل InVEST

برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل InVEST از داده‌های رسوب سالانه ایستگاه هیدرومتری افین واقع در خروجی آبخیز استفاده شد (شکل ۱). برای این منظور ابتدا با استفاده از داده‌های دبی و رسوب سیلابی ثبت شده در ایستگاه، رابطه همبستگی بین آن‌ها به صورت شکل ۴ تعیین شد. در ادامه با استفاده از داده‌های دبی روزانه برای دوره ۱۳۸۶ تا ۱۴۰۲ میزان رسوب سالانه تعیین و در نهایت بازه زمانی ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۴ برای واسنجی و ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۲ برای اعتبارسنجی تعیین شد. در شکل ۵ پراکنش مکانی لایه‌های مورد استفاده نشان داده شده است.

برآورد هزینه‌های فرسایش خاک به روش هزینه جایگزین

در روش هزینه جایگزین، هزینه یک آسیب خاص با استفاده از هزینه معادل یا جایگزین آن محاسبه و برآورد می‌شود. به عنوان مثال، در صورت تخمین یا برآورد خطر فرسایش خاک در یک مزرعه، لازم است که میزان هدررفت مواد مغذی ناشی از فرسایش محاسبه شده و سپس با استفاده از هزینه معادل، یعنی هزینه بازسازی خاک، در چهارچوب اقدامات زیر جبران گردد: الف) برآورد میانگین مقدار خاکی که در هر هکتار از دست می‌رود، ب) برآورد میزان کاهش مواد مغذی قابل جبران در خاک، ج) ارزش‌گذاری مواد مغذی از دست رفته در هر هکتار، با لحاظ کردن هزینه جایگزینی حاصلخیزی در بازار (عمدتاً کاهش عناصر غذایی اصلی مانند فسفر و پتاسیم). بر اساس این رویکرد، مجموع کل هدررفت مواد غذایی از طریق رابطه

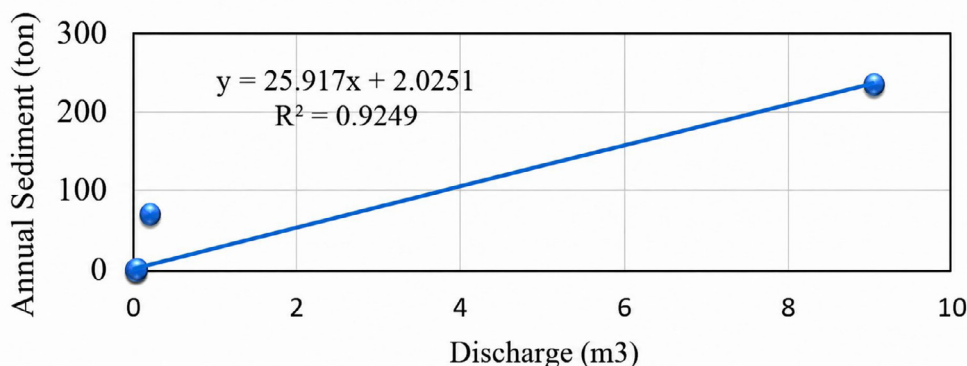
اراضی با پوشش گیاهی غنی، به دلیل محافظت فیزیکی بیشتر پوشش گیاهی از سطح خاک در برابر نیروهای فرسایشی، میزان فرسایش خاک به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. در نتیجه، تغییر کاربری اراضی به سمت افزایش تراکم و تنوع پوشش گیاهی می‌تواند به طور مؤثری در پیشگیری از فرسایش خاک مؤثر باشد [۷]. از این رو، عامل C برای روشن شدن نتیجه محصولات کشاورزی و سایر شیوه‌های مدیریتی بر شدت فرسایش استفاده می‌شود. لذا از آن برای اندازه‌گیری میزان کارآمدی راهبردهای مختلف مدیریت خاک و محصول در جلوگیری از تخریب خاک نیز بهره‌جسته می‌شود. به طور کلی عامل C نشان‌دهنده میزان حفظ خاک توسط پوشش گیاهی است، جایی که پوشش گیاهی نقش عمده‌ای در کند کردن روند فرسایش آبی دارد. یکی از پرکاربردترین ابزارها برای تعیین عامل C، شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی (NDVI) است. در این روش، داده‌های NDVI تولیدشده توسط ماهواره Landsat (داده‌های USGS) برای شناسایی عامل C و نشان دادن چگونگی تأثیر تغییرات پوشش گیاهی بر فرسایش خاک برای دوره ۱۳۸۶ تا ۱۴۰۲ مورد استفاده قرار گرفت. برای محاسبه شاخص NDVI از اختلاف بین باند مادون قرمز نزدیک (NIR) و قرمز (RED) و مجموع این دو باند با استفاده از رابطه (۴) استفاده می‌شود [۱۱]. شاخص C نیز از رابطه (۵) تعیین شد [۳۲].

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$C = \frac{1 - NDVI}{2} \quad \text{رابطه (۵)}$$

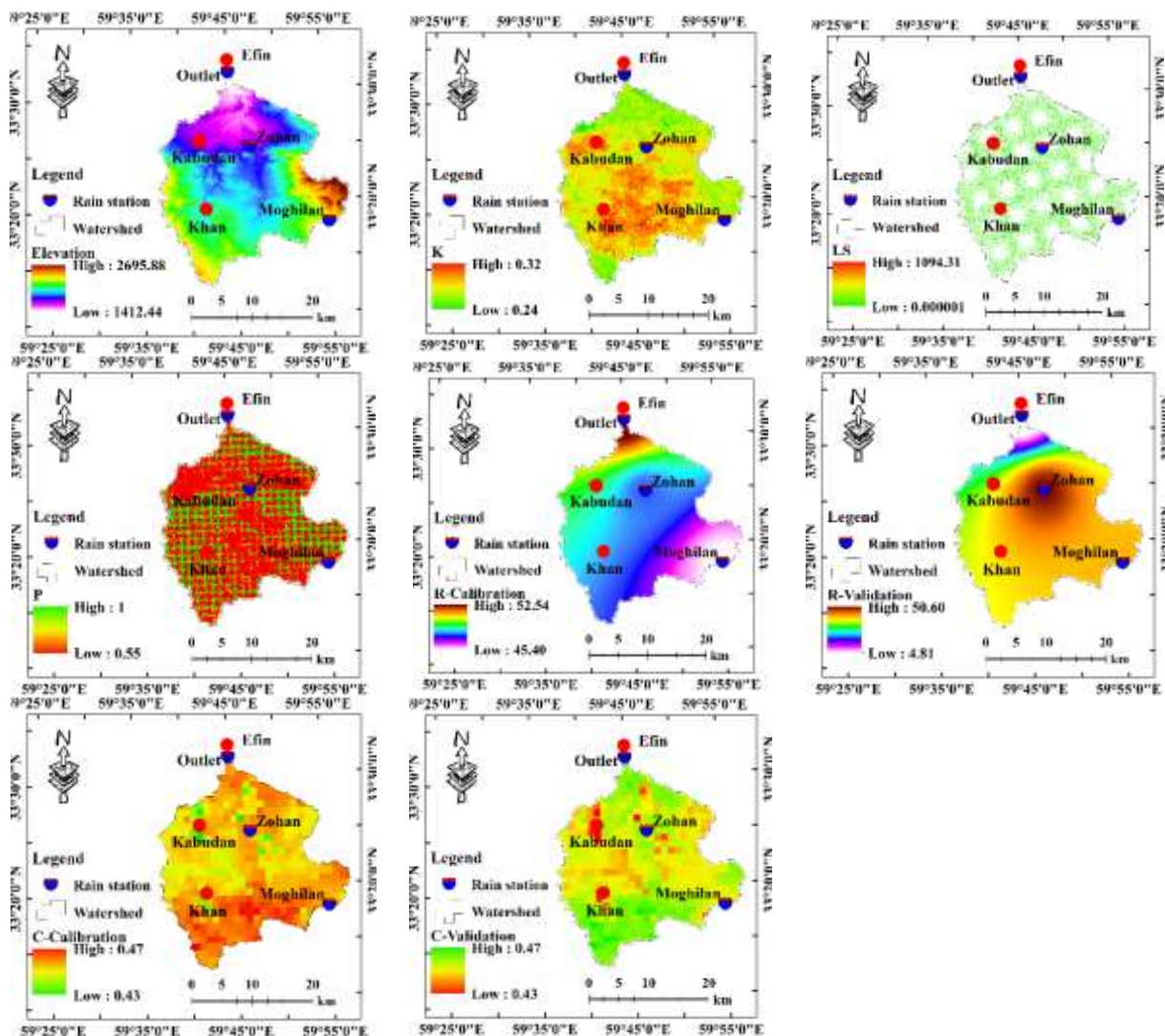
عامل حفاظتی (P):

عامل عملیات حفاظتی (P) به عنوان یک شاخص، میزان اثربخشی اقدامات حفاظتی را در به حداقل رساندن فرسایش خاک ارزیابی می‌کند. روش‌هایی مانند کشاورزی بر روی خطوط تراز، ایجاد تراس، کشت عمود بر شیب (کشت در شیب متقاطع) و کشت نواری، همگی به کاهش حجم رواناب و در نتیجه کاهش فرسایش



شکل ۴- رابطه همبستگی بین دبی و رسوب ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری افین

Fig 4. Correlation between discharge and sediment recorded at the Efin hydrometric station



شکل ۵- پراکنش مکانی متغیرهای مورد استفاده در واسنجی و اعتبارسنجی مدل InVEST
Fig 5. Spatial distribution of variables used in the calibration and validation of the InVEST model

نتایج

واسنجی و اعتبارسنجی مدل InVEST

در جدول ۱ نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل InVEST در ایستگاه افین ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد دوره واسنجی مدل با دقت بالای ۰/۵۸ درصد میزان رسوب مشاهده‌ای را پیش‌بینی کرده است. این در حالی است که در دوره اعتبارسنجی مدل از ۱۳/۳۰ درصد خطا برخوردار است. بر همین اساس، دقت پیش‌بینی مدل در مرحله واسنجی بسیار مطلوب تعیین شد به گونه‌ای که دوره واسنجی با دقت بالای ۰/۵۸ درصد خطا، میزان رسوب مشاهده‌ای را به خوبی بازتولید کرده است. این موضوع نشان می‌دهد که پارامترهای واسنجی شده مدل توانسته‌اند فرآیندهای تولید و انتقال رسوب در شرایط حاکم بر افین را به خوبی شبیه‌سازی کنند. با این حال، در دوره اعتبارسنجی خطای مدل افزایش یافته و ۱۳/۳۰

(۶) برآورد خواهد شد [۳].

$$An = DnK + DnP$$

رابطه (۶)

که در آن، An جمع کل هدررفت مواد غذایی، DnK و DnP به ترتیب میزان هدررفت فسفر و پتاسیم است. با در نظر گرفتن قیمت کودهای جانشین برای جبران عناصر از دست رفته خاک، ارزش اقتصادی عناصر با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$V = PKDK + PPDP$$

رابطه (۷)

که در آن، PK و PP به ترتیب قیمت کودهای جانشین برای عناصر فسفر و پتاسیم و V ارزش اقتصادی کل عناصر به ریال است [۹]. در این پژوهش قیمت هر کیلوگرم کودهای شیمیایی فسفر و پتاسیم براساس گزارش‌های موجود در سازمان‌های جهاد کشاورزی در سال ۱۴۰۵ به ترتیب حدود ۸۰۰/۰۰۰ و ۲۷۵/۰۰۰ ریال در نظر گرفته شد.

درصد برآورد شده است؛ یعنی عملکرد مدل در داده‌های مستقل از دوره واسنجی هم‌چنان قابل قبول ولی محدودتر است.

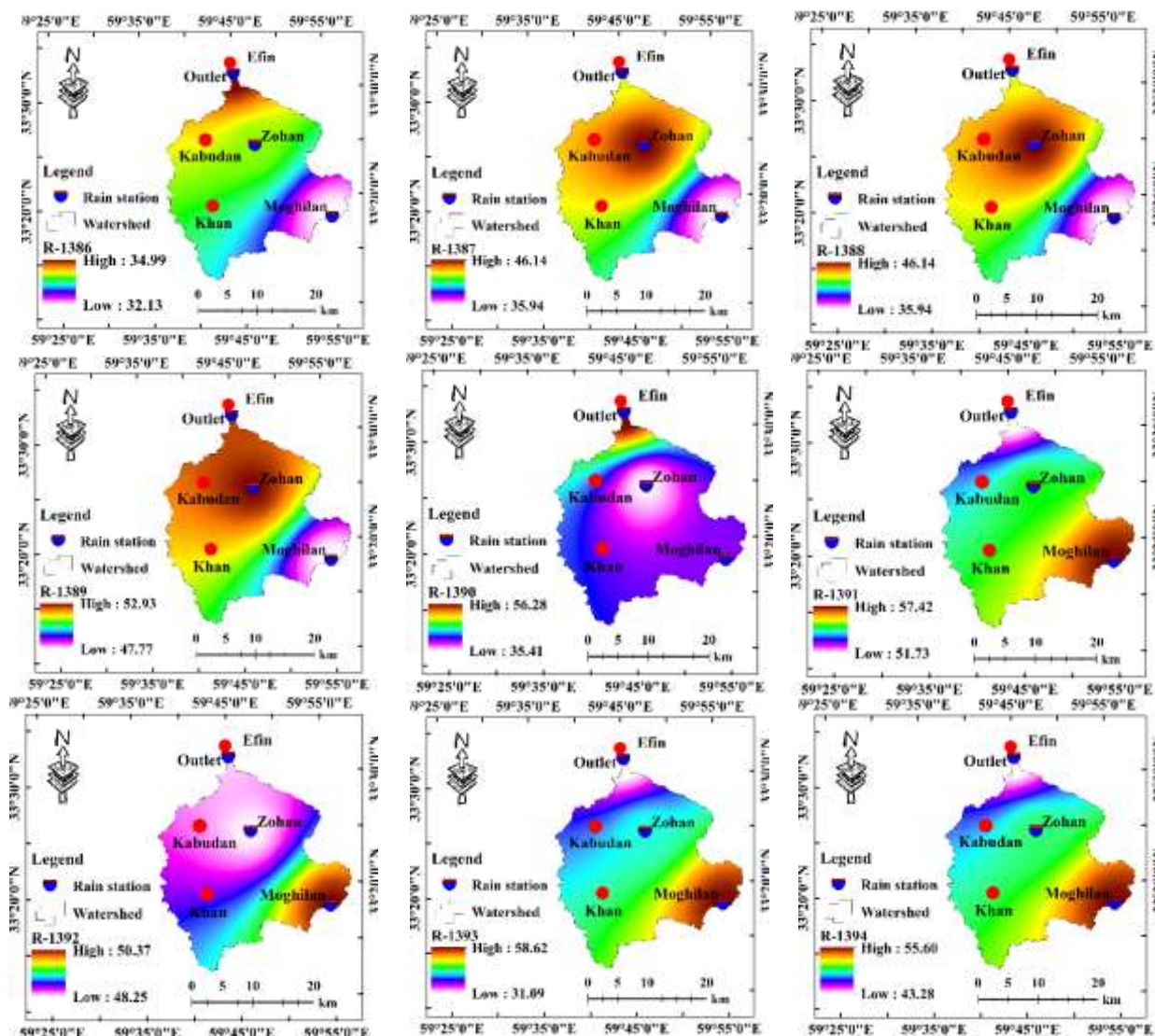
جدول ۱- درصد خطای مدل InVEST در دوره واسنجی و

اعتبارسنجی در ایستگاه افین

Table 1. Percentage error of the InVEST model during calibration and validation at the Efin station

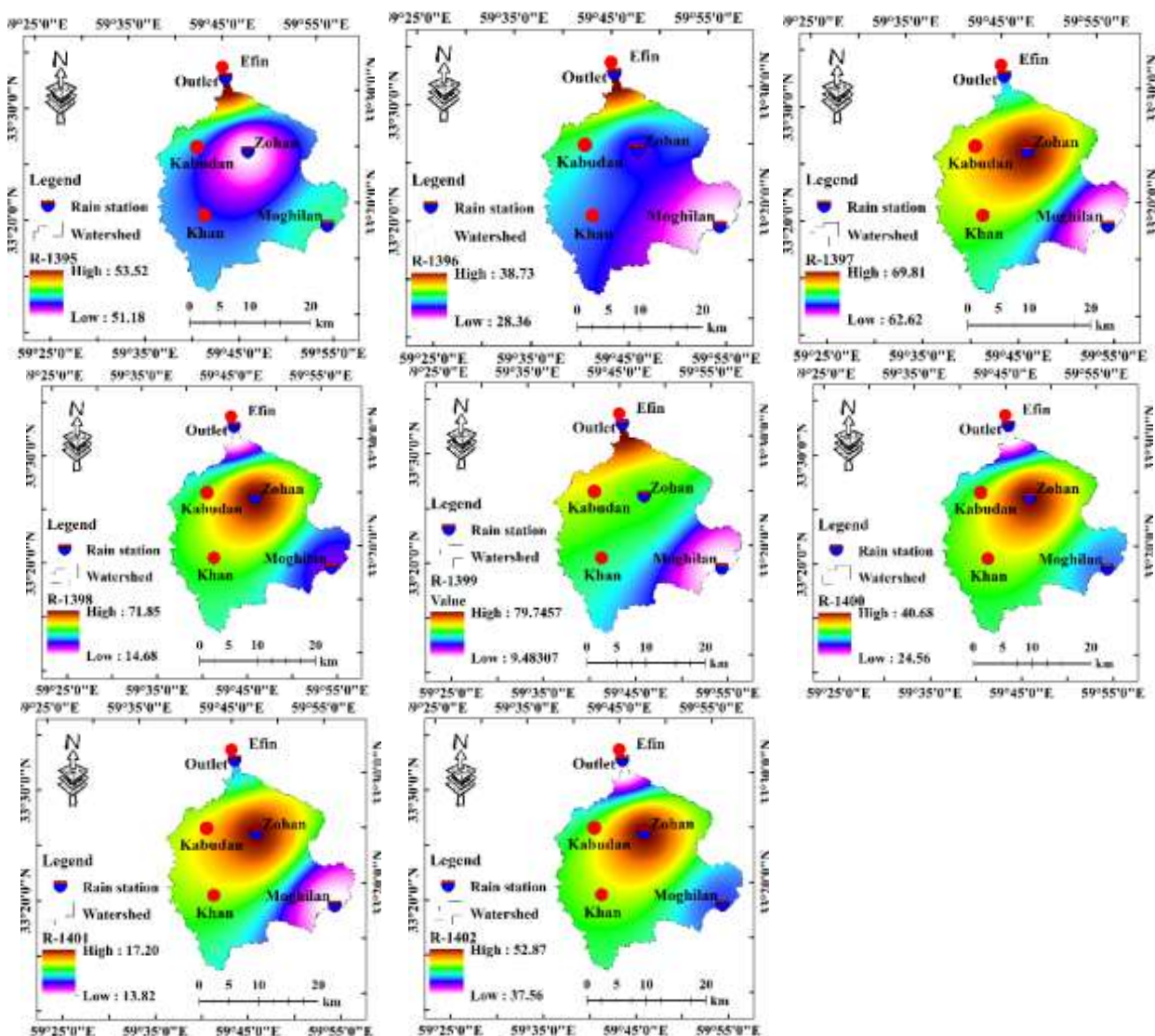
دوره	زمان	مشاهده‌ای Observation	پیش‌بینی Forecast	درصد خطا Error
Time pride	Time	متوسط رسوب سالانه (تن) Average annual sediment (ton)		(%)
واسنجی	-1394	111574.50	110931.04	0.58
Calibration	1386			
اعتبارسنجی	-1395	121280.20	107034.50	13.30
Validation	1402			

تغییرات مکانی شاخص‌های فرساینده‌گی باران و NDVI
در شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب تغییرات مکانی شاخص‌های فرساینده‌گی باران و NDVI به صورت متوسط سالانه برای دوره ۱۳۸۶ تا ۱۴۰۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد پراکنش مکانی و زمانی شاخص فرساینده‌گی باران از شکل یکسانی برخوردار نیست. در سال ۱۳۹۹ به ترتیب با ۷۹/۴۷ و ۹/۴۸ بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار این شاخص دیده شده است. برخلاف شاخص فرساینده‌گی باران، شاخص NDVI از وضعیت متعادل‌تری برخوردار است. با توجه به فقیر بودن مراتع و هم‌چنین وجود اراضی غالباً سنگی در بخش جنوب و غرب آبخیز افین، شاخص NDVI بیش‌تر متأثر از اراضی باغی و زراعت زرشک است که به صورت کشت آبی در منطقه وجود دارد و کمتر با تغییر در بارندگی واکنش نشان می‌دهد.



شکل ۶- پراکنش مکانی تغییرات شاخص فرساینده‌گی باران در طول دوره آماری در آبخیز افین

Fig 6. Spatial distribution of changes in rainfall erosivity index over the statistical period in the Efin watershed



ادامه شکل ۶- پراکنش مکانی تغییرات شاخص فرسایشی باران در طول دوره آماری در آبخیز افین

Continue Fig 6. Spatial distribution of changes in rainfall erosivity index over the statistical period in the Efin watershed

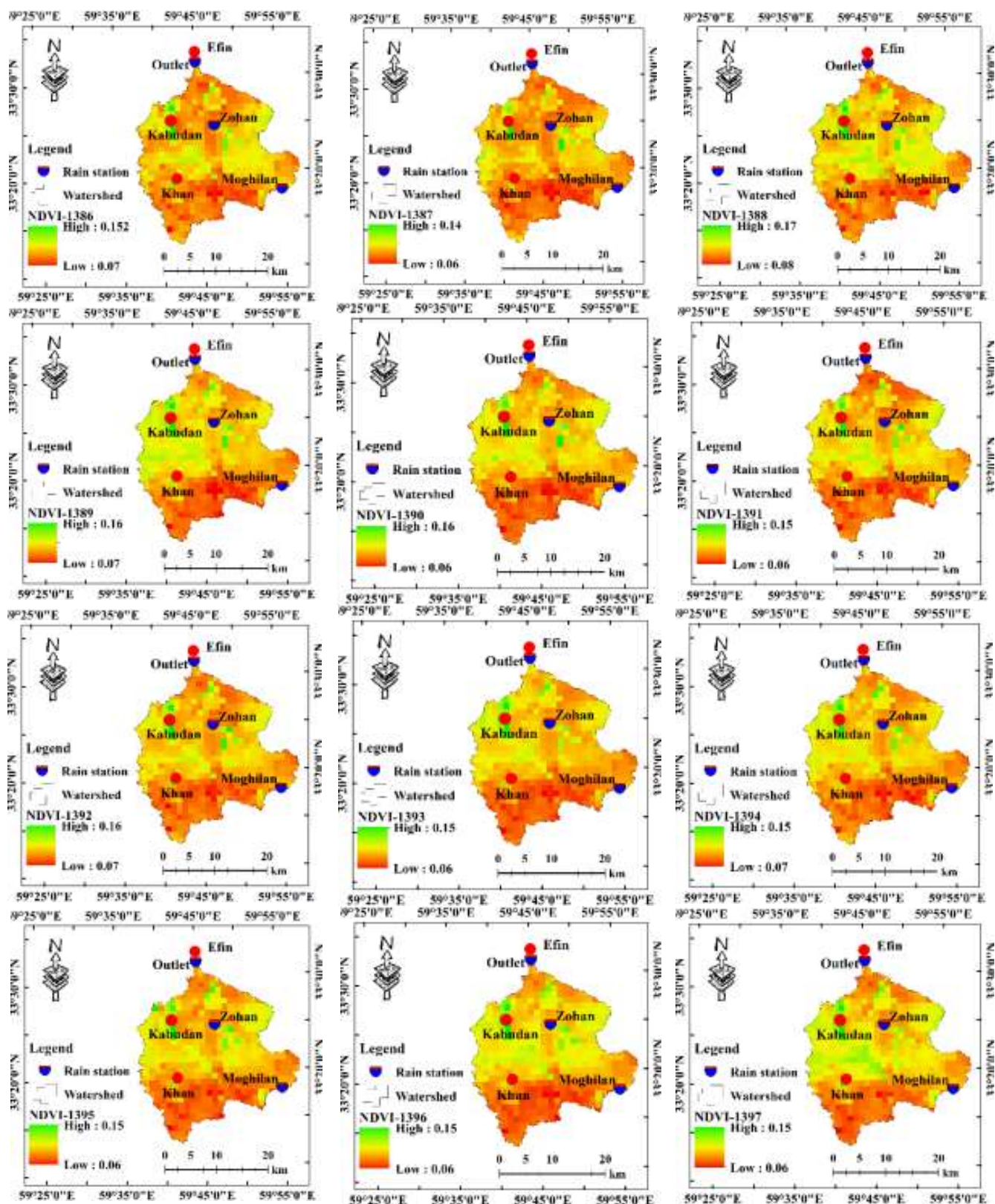
۹۹۰/۶۶ و ۱۹۸۰/۰۵ میلیون ریال بیشترین میزان هزینه جایگزین را در عنصر پتاسیم داشته است. در همین سال در عنصر فسفر نیز کاربری‌های مذکور به ترتیب با ۲۵۷/۲۵، ۱۱۹/۱۰ و ۱۳۷۸/۸۳ میلیون ریال بیشترین مقدار هزینه را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۴۰۱ نیز در عنصرهای پتاسیم و فسفر، کاربری مرتع و بایر با ۲۲۳/۴۰ و ۵۸/۶۷، کاربری زراعت با ۲۲۳/۴۰ و ۲۶/۸۶ و کاربری باغ با ۴۵۱/۶۰ و ۳۰۸/۰۵ میلیون ریال کمترین میزان هزینه- جایگزین را در بین سال‌های آماری دارا هست. مجموع هزینه فسفر، پتاسیم و هزینه کل نیز بیان کننده آن است که سال ۱۳۹۷ به ترتیب با ۱۷۵۵/۱۸، ۱۲۸۸۷/۰۲ و ۱۶۶۲۲/۲۰ بیشترین هزینه و کمترین آن در سال ۱۴۰۱ با مقدار ۳۹۳/۵۸، ۲۸۹۰/۴۳ و ۳۲۸۴/۰۰ میلیون ریال را به خود اختصاص داده است.

تغییرات رسوب در دوره آماری

در شکل ۸ تغییرات رسوب خروجی در کاربری‌های باغ، کشاورزی، مرتع-اراضی بایر در آبخیز افین نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کاربری‌های مرتع-اراضی بایر به دلیل وسعت زیاد و فقر پوشش گیاهی، بیشترین میزان رسوب را تولید کرده‌اند.

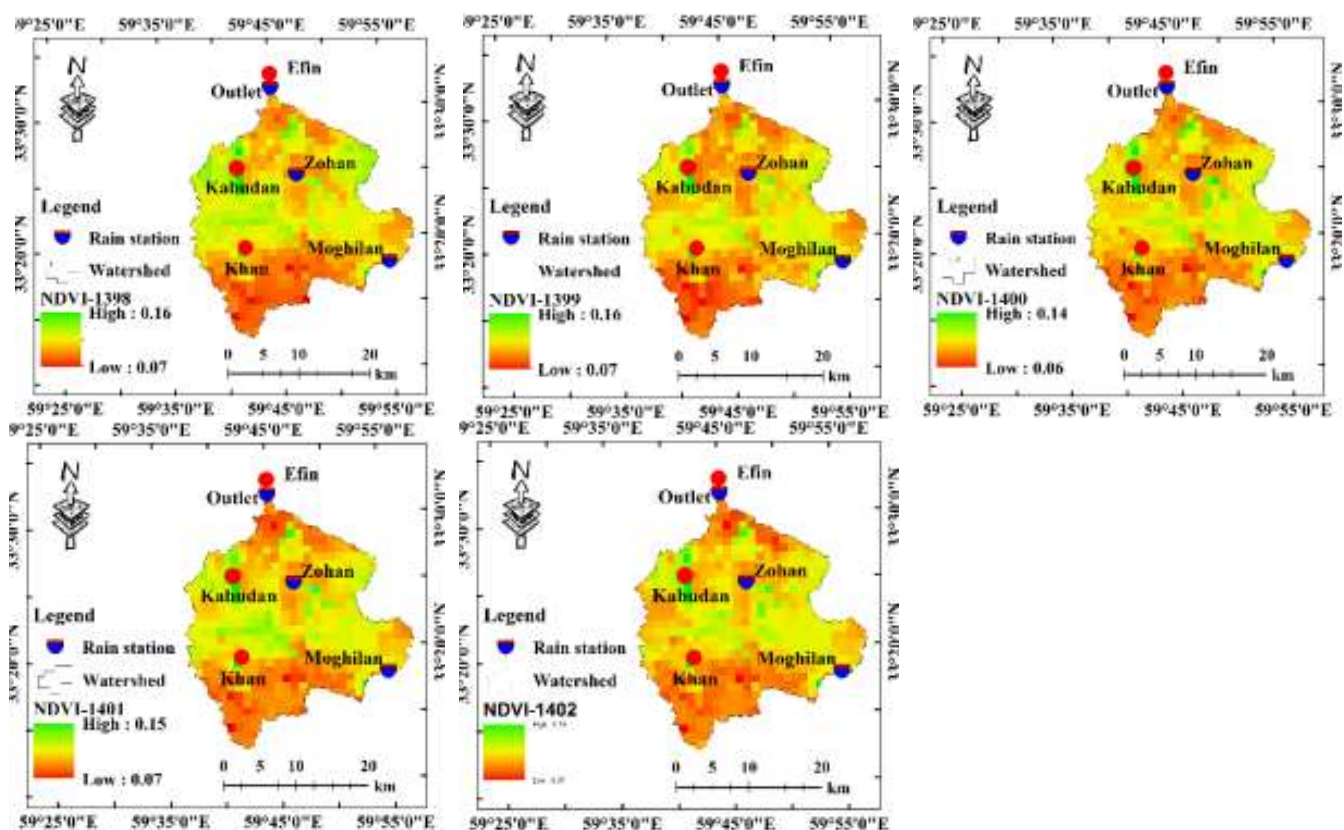
هزینه جایگزین ناشی از فرسایش

در جدول ۲ هزینه جایگزین ناشی از هدررفت فسفر و پتاسیم در کاربری‌های مرتع و بایر، زراعت و باغ و در شکل‌های ۹ تا ۱۱ روند هزینه فسفر و پتاسیم در هر کاربری و هزینه کل (فسفر و پتاسیم) در طول دوره آماری ارائه شده است. بر اساس جدول ۲، در سال ۱۳۹۷ کاربری‌های مرتع و بایر، زراعت و باغ به ترتیب با ۹۹۱۶/۱۳،

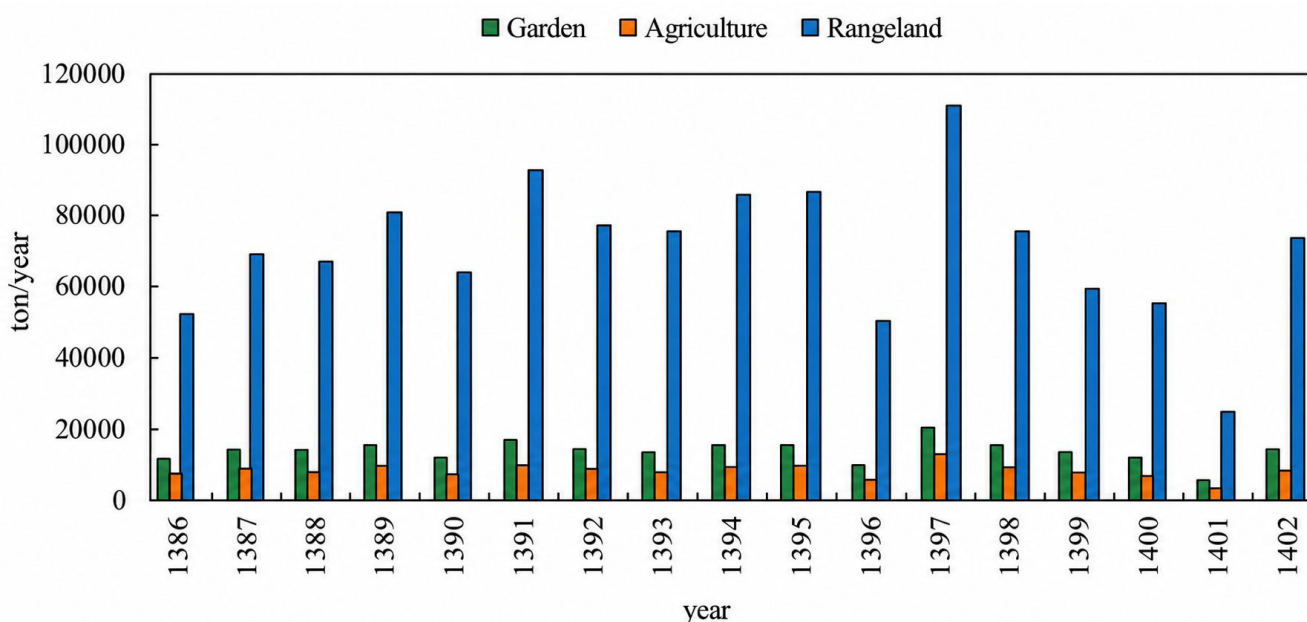


شکل ۷- پراکنش مکانی شاخص NDVI در طول دوره آماری در آبخیز اefin

Fig 7. Spatial distribution of NDVI index over the statistical period in the Efin watershed



ادامه شکل ۷- پراکنش مکانی شاخص NDVI در طول دوره آماری در آبخیز افین
Continue Fig 7. Spatial distribution of NDVI index over the statistical period in the Efin watershed

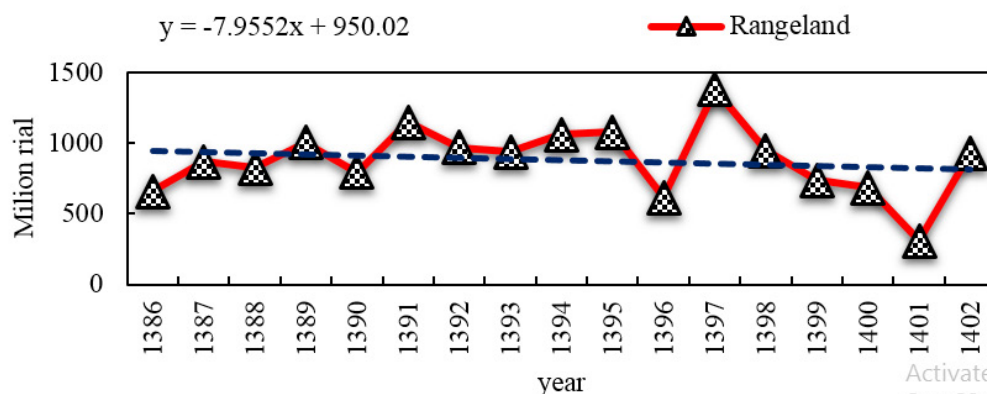
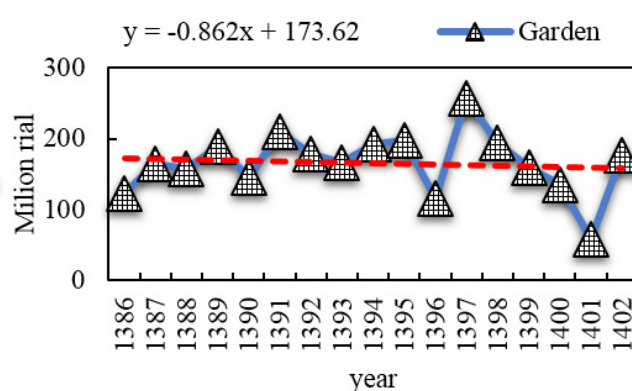
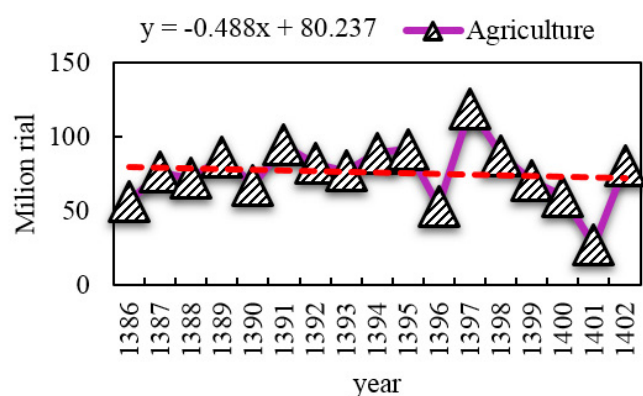


شکل ۸- تغییرات زمانی رسوب خروجی از آبخیز در کاربری‌های مختلف در آبخیز افین
Fig 8. Temporal changes in sediment output from the watershed under different land uses in the Efin watershed

جدول ۲- هزینه جایگزین هدررفت فسفر و پتاسیم ناشی از فرسایش خاک در کاربری‌های مختلف برحسب میلیون ریال

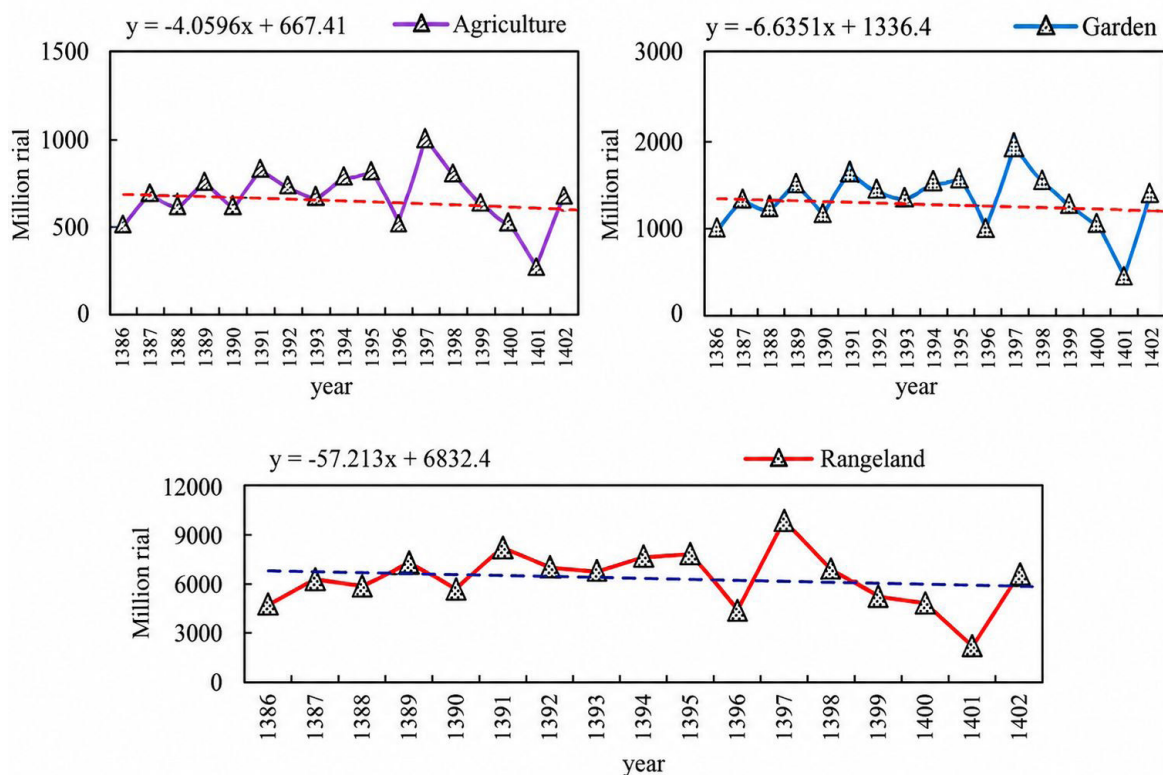
Table 2. Replacement cost of phosphorus and potassium losses due to soil erosion under different land uses, in million rials

هزینه کل Total cast	مجموع فسفر Total phosphor	مجموع پتاسیم Total potassium	فسفر- phosphor			پتاسیم- potassium			سال year
			باغ garden	زراعت agriculture	مرتع Rangeland	باغ garden	زراعت agriculture	مرتع Rangeland	
6988.40	837.76	6150.64	658.53	56.47	122.76	944.91	469.72	4736.01	1386
9264.07	1110.24	8153.83	869.02	76.25	164.96	1269.72	634.27	6249.84	1387
8791.45	1053.58	7737.88	823.98	72.07	157.53	1212.50	599.48	5925.90	1388
10673.24	1279.39	9393.85	1004.38	86.57	188.45	1450.48	720.05	7223.31	1389
8389.08	1005.91	7383.17	793.89	67.23	144.80	1114.50	559.17	5709.49	1390
12112.19	1452.63	10659.56	1148.11	94.44	210.08	1617.00	785.52	8257.05	1391
10232.74	1226.89	9005.85	966.93	81.98	177.99	1369.96	681.88	6954.01	1392
9866.98	1183.60	8683.39	939.50	77.02	167.08	1286.05	640.64	6756.70	1393
11176.00	1340.21	9835.79	1059.22	89.01	191.98	1477.70	740.37	7617.72	1394
11395.13	1366.26	10028.87	1077.10	91.64	197.51	1520.28	762.29	7746.30	1395
6536.42	783.52	5752.90	615.25	53.10	115.17	886.50	441.64	4424.76	1396
14642.20	1755.18	12887.02	1378.83	119.10	257.25	1980.05	990.66	9916.31	1397
10263.16	1228.83	9034.32	946.62	87.27	194.94	1500.50	725.87	6807.95	1398
8063.77	964.86	7098.91	734.91	70.27	159.67	1229.03	584.51	5285.37	1399
7331.80	878.49	6453.31	683.92	59.74	134.82	1037.72	496.95	4918.64	1400
3284.00	393.58	2890.43	308.05	26.86	58.67	451.60	223.40	2215.43	1401
9856.03	1181.26	8674.78	924.95	80.35	175.95	1354.31	668.38	6652.08	1402



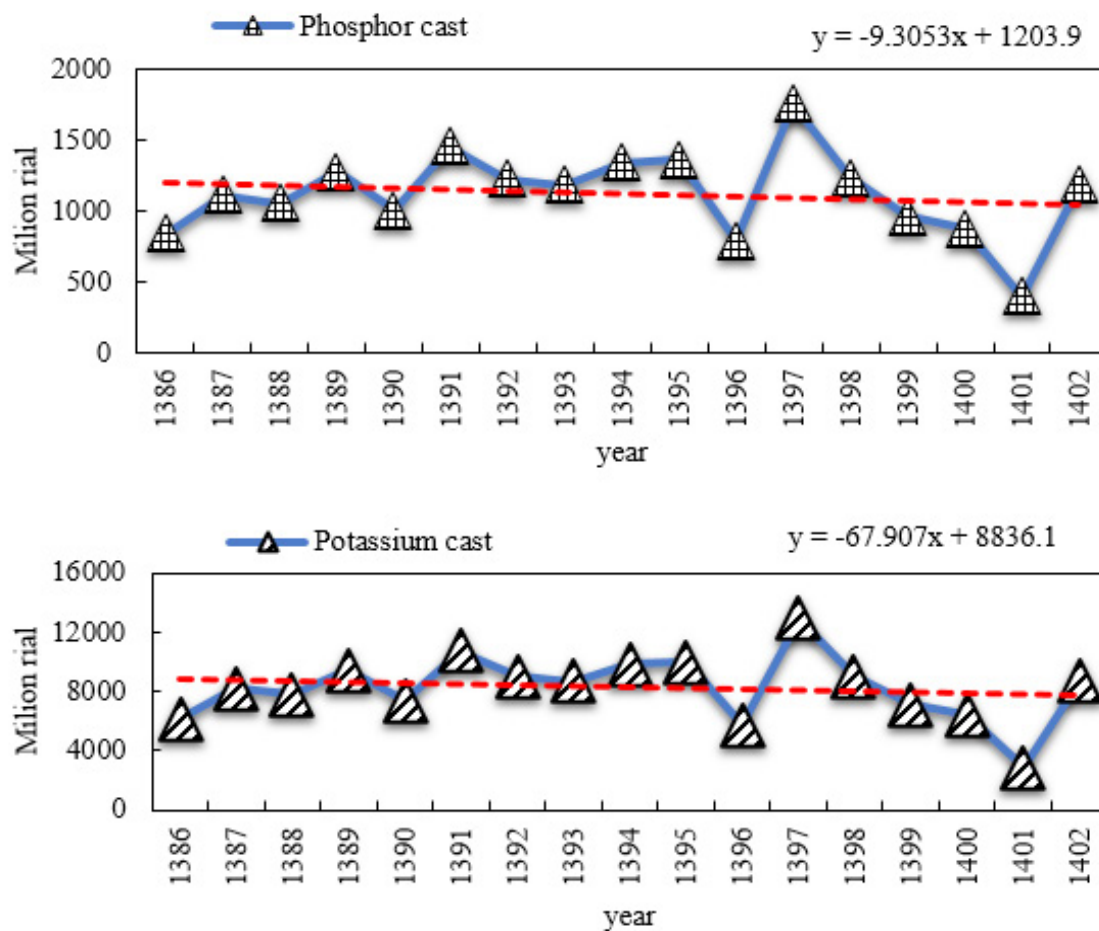
شکل ۹- روند تغییرات هزینه ناشی از هدررفت فسفر در کاربری‌های مختلف در دوره آماری ۱۳۸۶ تا ۱۴۰۲

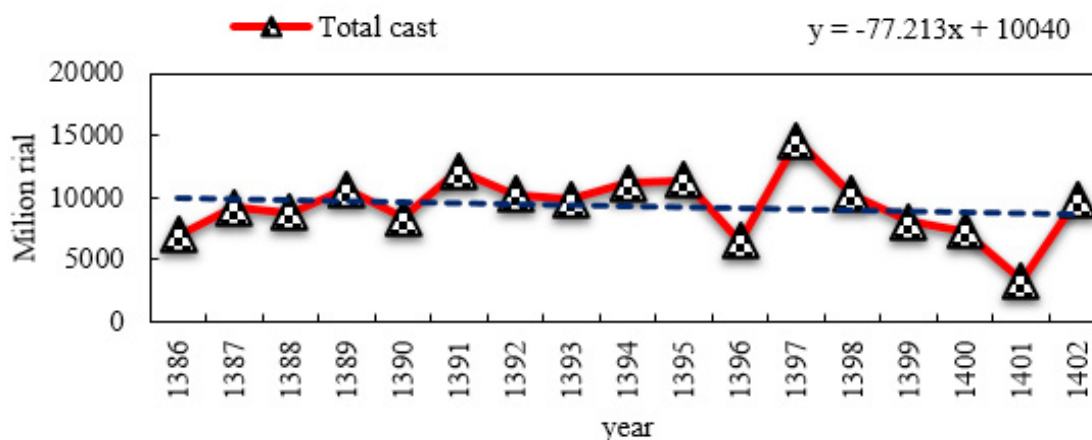
Fig 9. Trend of changes in the cost caused by phosphorus loss in different land uses during the statistical period 1386 to 1402



شکل ۱۰- روند تغییرات هزینه ناشی از هدررفت پتاسیم در کاربری‌های مختلف در دوره آماری ۱۳۸۶ تا ۱۴۰۲

Fig 10. Trend of changes in the cost caused by potassium loss in different land uses during the statistical period 1386 to 1402





شکل ۱۱- روند تغییرات مجموع هزینه ناشی از هدررفت فسفر و پتاسیم و هزینه کل در دوره آماری ۱۳۸۶ تا ۱۴۰۲

Fig 11. Trend of changes in the total cost caused by phosphorus and potassium loss and the total cost during the statistical period 1386 to 1402

است؛ زیرا در آبخیزهایی مانند آبخیز افین که بارش‌ها عمدتاً به صورت رگباری و کوتاه مدت رخ می‌دهد، انرژی فرساینده گیاهی و افزایش یافته و در مناطق فاقد پوشش گیاهی، فرسایش پاشماني و سطحی به شدت تشدید می‌شود [۳۱]. هم‌چنین، مطالعات داخلی نیز نشان داده‌اند که همزمانی بارش‌های شدید با اراضی بایر و مراتع فقیر، بیش‌ترین سهم را در تولید رسوب دارد [۱۵] در مقابل، اراضی کشاورزی کم‌ترین مقدار رسوب را ایجاد کرده‌اند که احتمالاً ناشی از وجود عملیات مدیریت حفاظتی مانند تراس‌بندی، کشت نواری یا شخم در امتداد خطوط تراز است؛ اقداماتی که می‌توانند شدت تأثیر بارش‌های رگباری بر فرسایش خاک را کاهش دهند [۱۲].

داده‌های حاصل از هزینه‌های جایگزینی پتاسیم و فسفر در آبخیز افین (۱۳۸۶ تا ۱۴۰۲)، بازتاب مستقیمی از تعامل میان دینامیک اقلیم و مداخلات انسانی در مدیریت آبخیز است. اوج هزینه‌ها در سال ۱۳۹۷ (با مجموع ۱۶۶۴۲ میلیون ریال)، همبستگی معناداری با نرخ بالای فرساینده گیاهی باران و تولید رسوب دارد که در این شرایط، خاک‌های مرتعی و اراضی کشاورزی به دلیل فقدان حفاظت کافی، بیش‌ترین هدررفت عناصر غذایی (به‌ویژه پتاسیم) را تجربه کرده‌اند. این یافته با مطالعات بین‌المللی که فرسایش ناشی از باران‌های حدی را عامل اصلی حذف مواد مغذی از لایه‌های سطحی خاک می‌دانند، کاملاً همسو است [۳۳]. در مقابل، روند نزولی هزینه‌ها تا سال ۱۴۰۲ می‌تواند ناشی کاهش بارندگی‌ها و هم‌چنین اجرای طرح‌های زیستی مهندسی آبخیزداری باشد که با کاهش انتقال بار رسوبی، نقش کلیدی در حفظ عناصر غذایی در اراضی ایفا کرده است. اگرچه اثربخشی اقدامات آبخیزداری انجام نشده است. یافته‌های فعلی مؤید این دیدگاه است که در مناطق خشک، مدیریت سازه‌ای رسوب‌گیر، با ایجاد پایداری در سطح خاک و جداسازی پاسخ‌های گیاهی از نوسانات اقلیمی، هزینه‌های اقتصادی احیای حاصلخیزی را به‌طور

بحث و نتیجه‌گیری

تحلیل شاخص اقلیمی و پوشش گیاهی

تحلیل تغییرات مکانی-زمانی در آبخیز افین نشان می‌دهد که شاخص فرساینده گیاهی باران (R-factor) در دوره ۱۳۸۶ تا ۱۴۰۲ با نوسانات شدیدی همراه بوده است که این ناپایداری با الگوهای جهانی تغییرات اقلیمی که منجر به افزایش رخدادهای بارش حدی (Extreme events) می‌شود، همخوانی دارد [۳۳]. شاخص NDVI حاکی از آن است که حد بالا و پایین این شاخص تغییرات زیادی نداشته است. به عبارتی دیگر اگرچه شاخص فرساینده گیاهی باران در مقیاس‌های زمانی کوتاه پاسخ‌های نوسانی شدیدی نشان می‌دهد، شاخص NDVI در آبخیز افین به دلیل تسلط اراضی سنگی و مراتع فقیرتر، رفتاری متعادل‌تر از خود بروز داده است. عدم واکنش خطی NDVI به نوسانات بارندگی در این آبخیز را می‌توان به تأثیر غالب کشاورزی آبی (به‌ویژه باغات زرشک) نسبت داد؛ امری که با یافته‌های پژوهش‌های اخیر در مناطق خشک مطابقت دارد، به‌طوری که نشان می‌دهد در اراضی تحت مدیریت انسانی، دسترسی به منابع آب زیرزمینی، محدودیت‌های اقلیمی را برای پوشش گیاهی جبران کرده و باعث جدایی پاسخ پوشش گیاهی از بارش‌های فصلی می‌شود [۱۸ و ۳۰]. این پدیده نشان می‌دهد که پایداری پوشش گیاهی در آبخیز افین بیش از آنکه متأثر از تغییرات اقلیمی باشد، تحت کنترل مداخلات انسانی و مدیریت منابع آب است که می‌تواند به عنوان یک عامل تعدیل‌کننده در برابر فرسایش ناشی از نوسانات شدید فرساینده گیاهی باران عمل کند.

تحلیل فرسایش و هزینه جایگزین آن

همانطور که نتایج پژوهش نشان داد اراضی بایر و فاقد پوشش گیاهی نقش زیادی در تولید رسوب و تخریب سرزمین در آبخیز افین دارند. این امر با توجه به الگوی بارش منطقه نیز قابل توضیح

منابع مورد استفاده

1. Arslan, A., Belotti, F. and Lipper, L. 2017. Smallholder productivity and weather shocks: Adoption and impact of widely promoted agricultural practices in Tanzania. Food Policy. 69, 68-81. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2017.03.005>.
2. Carollo, F.G., Ferro, V., Serio, M. A. 2018. Predicting rainfall erosivity by momentum and kinetic energy in Mediterranean environment. Journal of Hydrology. 560 (2): 173-183. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.03.026>.
3. Chamani, R., Mostafaei Younjali, S. Sadeghi, S.H.R. 2023. Role of biological measures in soil erosion processes using InVEST model in the Sharghong Watershed, South Khorasan, Iran. Water and Soil Resources Conservation, 13(2), 95-108. <https://doi.org/10.30495/WSRCJ.2023.73563.11380>. (In Persian).
4. Chamani, R., Vafakhah, M., Sadeghi, S.H.R. 2024. Effect of hydrologic services changes resulted from watershed management measures on effective watershed health. Ph.D. Dissertation. Faculty of Natural Resources. Tarbiat Modares University, 125 pages. (In Persian).
5. Chatterjee, S., Krishna, A.P., Sharma, A.P. 2014. Geospatial assessment of soil erosion vulnerability at watershed level in some sections of the Upper Subarnarekha river basin, Jharkhand, India. Environmental Earth Sciences, 71:357-374. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2439-3>.
6. Cui, X., Guo, L., Li, C., Liu, M., Wu, G., Jiang, G. 2021. The total biomass nitrogen reservoir and its potential of replacing chemical fertilizers in China. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 135. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110215>.
7. Debie, E., Awoke, Z. 2023. Assessment of the effects of land use/cover changes on soil loss and sediment export in the Tul Watershed, Northwest Ethiopia using the RUSLE and InVEST models, International Journal of River Basin Management. 1-16. <https://doi.org/10.1080/15715124.2023.2187399>.
8. Emadodin, I., Narita, D., Bork, H. R. 2012. Soil degradation and agricultural sustainability: an overview from Iran. Environment, development and sustainability. 14(5): 611-625. <https://doi.org/10.1007/s10668-012-9351-y>.
9. Garshasbi, P., Rajab Nejad, S., Khani, S. H. 2012. Investigating the role of opportunity value of land in revitalizing watersheds. Abkhizdari, 1(1), 19-26. (In Persian). <https://civilica.com/doc/1866774>.
10. Ghosal, K., Das Bhattacharya, S. 2020. A review of RUSLE model. Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 48(4):

چشمگیری کاهش می‌دهد [۱۸ و ۳۰]. در واقع، کاهش هزینه‌های جایگزینی، مستقیماً ناشی از افزایش کارایی سازه‌های کنترلی در مدیریت حجم و انرژی سیلاب‌های فرساینده است که تراز اقتصادی حفاظت از خاک را در حوزه آبخیز افین به‌سوی پایداری سوق داده است.

تخریب و هدررفت خاک در مناطق خشک و نیمه خشک سبب شده است تا علاوه بر رخداد فرسایش و خروج خاک از آبخیزها، مواد غذایی موجود در خاک نیز از دسترس منابع گیاهی و جانوری خاک خارج شوند. براین اساس ارزیابی میزان فرسایش و تخمین هزینه جایگزین آن می‌تواند درک روشن‌تری از خسارت‌های پیدا و پنهان فرسایش برای مدیران عرصه خاک و آب فراهم سازد. در حوزه آبخیز افین در خراسان جنوبی نیز فرسایش خاک و تخریب اراضی سبب کاهش پوشش سطحی و هم‌چنین افزایش سیلاب شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد باتوجه به وجود خاک لخت در منطقه و پایین بودن سطح پوشش در مراتع که بخش زیادی از این آبخیز را دربر می‌گیرند، با افزایش بارش، فرسایش و خروج خاک از منطقه افزایش می‌یابد. به‌عبارتی دیگر علاوه بر هدررفت آب و بروز سیلاب، مواد غذایی محدود در منطقه نیز از دسترس جوامع وابسته به خاک خارج می‌شود. براین اساس پیشنهاد می‌شود هرگونه تغییر در سطح خاک، تغییر در تعداد دام و انجام اقدامات مدیریتی با دقت و پس از ارزیابی‌های لازم صورت پذیرد تا زمینه تشدید فرسایش و از بین رفتن خاک را فراهم نکند.

سپاس‌گزاری

این پژوهش بر اساس تحقیقاتی انجام شده است که توسط دانشگاه بیرجند تحت پروژه شماره 18368 / د / ۱۴۰۴ حمایت شده است. نویسندگان از حمایت این پژوهش سپاسگزارند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچگونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

شارکت نویسندگان

جواد چزگی: مدیریت پروژه، مفهوم‌سازی پژوهش، ویرایش نهایی متن. رضا چمنی: مفهوم‌سازی پژوهش، آماده‌سازی لایه‌های ورودی، واسنجی و اعتبارسنجی مدل InVEST، نگارش متن. هادی معماریان: مفهوم‌سازی پژوهش، ویرایش نهایی متن. حلیمه جلورو: واسنجی و اعتبارسنجی مدل InVEST، اجرای مدل، نگین رشیدی: آماده‌سازی لایه‌های ورودی، نگارش متن.

service using the InVEST model in northeastern Iran. *Modeling and Management of Water and Soil*, 5(3), 277–295. <https://doi.org/10.22098/mmws.2025.17666.1612>

21. Nosrati, K., Jalali, S. 2016. Investigating the amount of suspended sediment production in the Ziyarat watershed of Gorgan in different seasons using the technique of sediment origin. *Ecohydrology*, 4(3), 887-895. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/IJE.2017.62646>

22. Okenmuo, F. C., Ewemoje, T. A. 2023. Estimation of soil water erosion using RUSLE, GIS, and remote sensing in Obibia River watershed, Anambra, Nigeria. *DYSONA-Applied Science*, 4(1), 6-14. <https://doi.org/10.30493/DAS.2022.349144>

23. Qiao, X., Li, Z., Lin, J., Wang, H., Zheng, S., Yang, S. 2024. Assessing current and future soil erosion under changing land use based on InVEST and FLUS models in the Yihe River Basin, North China. *International Soil and Water Conservation Research*, 12(2), 298-312. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.07.001>.

24. Sadeghi, S. H. R., Najafi, S. 2014. Source ascription for fluvial sediment in watersheds (concepts, methods and technologies). *Jihad Daneshgahi*, P. 256. (In Persian).

25. Sadeghi, S. H. R., Tavangar, S. 2015. Development of stational models for estimation of rainfall erosivity factor in different timescales. *Natural Hazards*, 77(1), 429-443. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1608-y>

26. Sadeghi, S. H. R., Jafarpour, A., Farajolahi, M., Khatibi Roodbarsara, D., Moradi Sefidchehayi, M., Zabihi Silabi, M., Khosravi, M., Kolani, E., Mohammadi, B., Adibi, M.J., Azarniya, H. 2021. Biological Management of Soil Erosion (Case Study: Gavoshan Watershed, Kermanshah Province, Iran). *Water and Soil*, 35(4), 551-566. <https://doi.org/10.22067/jsw.2021.70989.1060>. (In Persian).

27. Tamire, C., Elias, E., Argaw, M. 2022. Spatiotemporal dynamics of soil loss and sediment export in Upper Bilate River Catchment (UBRC), Central Rift Valley of Ethiopia. *Heliyon*, 8(11). doi: 10.1016/j.heliyon. 2022.e11220y.

28. Thapa, P. 2020. Spatial estimation of soil erosion using RUSLE modeling: a case study of Dolakha district, Nepal. *Environmental Systems Research*, 9(1), 1-10. <https://doi.org/10.1186/s40068-020-00177-2>

29. Wang, L., Li, Y., Gan, Y., Zhao, L., Qin, W., Ding, L. 2024. Rainfall erosivity index for monitoring global soil erosion. *Catena*, 234, 107593. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107593>.

30. Wang, L., Yue, Y., Cui, J., Liu, H., Shi, L., Liang, B., ... & Wang, K. 2024. Precipitation sensitivity of vegetation growth in southern

689-707. <https://doi.org/10.1007/s12524-019-01097-0>

11. Hagra, A. 2023. Estimating water erosion in the EL-Mador Valley Basin, South-West Matrouh City, Egypt, using revised universal soil loss equation (RUSLE) model through GIS. *Environmental Earth Sciences*. 82(1): 1-17. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10722-0>

12. Hashemi, N., Keshavarzi, B., Amini-Birami, F., Biester, H., Zafarani, G. G., & Zarei, M. 2025. Potentially toxic elements in sediment and water of Amirkalayeh Wetland: Impacted by intensive rice farming. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(7), 742. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14139-7>

13. Hermassi, T., El Amami, H., Ben, K.W. 2017. Impact of anthropogenic activities on erosive behavior of Nebhana Watershed Tunisia. *Water and Land Security in Drylands*. Springer, Cham, pp 185–195. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54021-4_17

14. Heydarnejad, S., Ranjbar Fordoei, A., Mousavi, S. H., Mirzaei, R. 2020. Estimation of soil erosion using SLEMSA model and OWA approach in Lorestan Province (Iran). *Environmental Resources Research*, 8(1), 11-24. <https://doi.org/10.22069/ijerr.2020.5089> (In Persian).

15. Jafarian, Z., Beshtar, V., & Kaviani, A. 2017. Simulation effects of improvement and restoration operations of rangeland on soil loss using RUSLE model. *Physical Geography Research*, 49(1), 55-69.

<https://doi.org/10.22059/JPHGR.2017.61579>

16. Jafari, M., Ekhtesasi, M. R., Fatahi Ardakani, A. 2020. Economic prioritization of watershed management projects based on the impact on water, soil and plant resources. *Journal of Watershed Management Research*, 11(22), 132-141. (In Persian). <https://doi.org/10.52547/jwmr.11.22.132>

17. Kumar, S., Kushwaha, S. P. S. 2013. Modelling soil erosion risk based on RUSLE-3D using GIS in a Shivalik sub-watershed. *Journal of Earth System Science* 122(2):389–398. <https://doi.org/10.1007/s12040-013-0276-0>

18. Li, Z., Zhang, L., Liu, W. 2023. Decoupling of vegetation growth and precipitation in arid and semi-arid regions: A global perspective. *Journal of Hydrology*, 618, 129205.

19. Mohammadyari, F., Abdollahi, K., Tavakoli, M., & Birvydienė, R. 2025. Modeling soil retention, erosion potential, and sedimentation risk using the invest sdr model. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 33(4), 389-399. <https://doi.org/10.3846/jeelm.2025.25195>

20. Namazi, M., Akbari, M., Memarian, H., Asadollahi, Z., Parvian, N. 2025. Assessment of the soil conservation ecosystem

33. Zhang, B., Fang, H., Wu, S., Li, C., Wang, Y., & Siddique, K. H. (2024). Soil erosion prediction and spatiotemporal heterogeneity in driving effects of precipitation and vegetation on the northern slope of Tianshan Mountain. *Journal of Cleaner Production*, 459, 142561. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142561>

34. Zhou, Q., Chen, L., Singh, V. P., Zhou, J., Chen, X., Xiong, L. 2019. Rainfall-runoff simulation in karst dominated areas based on a coupled conceptual hydrological model. *Journal of Hydrology*. 573,524-533. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.099>.

China depends on geological settings. *Journal of Hydrology*, 643, 131916. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131916>

31. Wischmeier, W. H., Smith, D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. USDA Handbook No. 537.

32. Zabihi, M., Moradi, H. R., Khaledi Darvishan, A., Gholamalifard, M. 2021. Application of InVEST ecosystem services model to prioritize sub-watersheds of Talar in term of soil erosion, sediment retention and yield. *Environment and Water Engineering*, 7(2), 293-303. <https://doi.org/10.22034/jewe.2020.257980.1470>