

GES	Geography and Environmental Studies, 14 (55), 2025 Publisher: Islamic Azad University – Najafabad Branch https://sanad.iau.ir/journal/ges E-ISSN: 2345-5985 Doi: 10.71740/ges.2025.1215215	
-----	---	---

Research Paper

Received: 18 August 2025

Revised: 1 September 2025

Accepted: 22 September 2025

Online Publication: 23 September 2025

Soil Erosion Analysis Using the Universal RUSLE Model and Its Relationship with Environmental Indices (Case Study: Ghouri Chay Watershed)

Aghil Madadi^{1*}, AmirHesam Pasban²

1. Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. (Corresponding Author)

Email: aghil48madadi@yahoo.com

2. Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Abstract

Abstract

In this study, the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) was applied to estimate and analyze soil erosion in the Ghouri-Chay watershed, located in Ardabil Province, Iran. Five main factors of the model—rainfall erosivity, soil erodibility, slope length and steepness, vegetation cover, and conservation practices—were calculated, and the corresponding maps for each factor were prepared in ArcGIS 10.8. The input data included a 12.5 m resolution Digital Elevation Model (Alos PALSAR), rainfall statistics from the Iran Meteorological Organization, the Iranian soil texture map at a scale of 1:250,000, and Sentinel-2 satellite images for 2024. In addition to the RUSLE factors, the influence of environmental indices such as the Topographic Wetness Index (TWI), Stream Power Index (SPI), slope curvature, slope gradient, and vegetation cover on erosion was examined. Pearson's correlation test and linear regression analysis were used to calculate correlation coefficients and coefficients of determination (R^2). The final annual soil erosion map indicated that erosion rates in the watershed range from 0 to 18.37 t/ha/year, with the highest intensities occurring in the western, northeastern, and some central areas. These regions are mainly characterized by steep slopes, sparse vegetation cover, high rainfall erosivity, and erosion-prone soil textures. Statistical analysis results revealed that slope had the highest correlation with soil erosion ($r = 0.33$, $R^2 = 0.11$), highlighting the significant role of topography and elevation differences in erosion intensity. The SPI and NDVI indices also showed positive and significant correlations ($r = 0.20$ and $r = 0.22$, respectively), whereas the TWI and slope curvature indices exhibited no significant relationships. The findings of this study underscore the necessity of implementing protective measures such as vegetation stabilization, land use management, and runoff control in high-risk areas of the watershed.

Keywords: RUSLE, Environmental Indices, Pearson correlation, coefficient of determination (R^2), Ghouri-Chay watershed.

Citation: Madadi, A.; Pasban, A.H. (2025), Soil Erosion Analysis Using the Universal RUSLE Model and Its Relationship with Environmental Indices (Case Study: Ghouri Chay Watershed), Geography and Environmental Studies, 14 (55), 6-25. Doi: 10.71740/ges.2025.1215215.

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author (s), with publication rights granted to Journal of Geography and Environmental Studies. This is an open – access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



جغرافیا و مطالعات محیطی

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

شاپا الکترونیکی: 2345-5985

Sanad.iau.ir/journal/ges

Doi: 10.71740/ges.2025.1215215



مقاله پژوهشی

تحلیل فرسایش خاک با استفاده از مدل جهانی RUSLE و ارتباط آن با شاخص های محیطی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز قوری چای)

عقیل مددی، امیرحسام پاسبان

گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

aghil48madadi@yahoo.com

چکیده

در این پژوهش به منظور برآورد و تحلیل میزان فرسایش خاک در حوضه آبخیز قوری چای واقع در استان اردبیل از مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح شده (RUSLE) استفاده شد. در این مطالعه، پنج عامل اصلی مدل شامل بارندگی، فرسایش پذیری خاک، طول و درجه شیب، پوشش گیاهی و عملیات حفاظتی برآورد و نقشه های مربوط به هر عامل در محیط ArcGIS 10.8 تهیه شد. داده های ورودی شامل مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر (Alos Palsar)، آمار بارندگی سازمان هواشناسی کشور، نقشه بافت خاک ایران با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ و تصاویر ماهواره ای سنتینل-۲ سال ۲۰۲۴ بود. علاوه بر عوامل مدل RUSLE، تأثیر شاخص های محیطی شامل شاخص رطوبت توپوگرافی، توان آبراهه، انحنا، دامنه، شیب و پوشش گیاهی بر فرسایش مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، از آزمون همبستگی پیرسون و تحلیل رگرسیون خطی برای محاسبه ضرایب همبستگی و ضرایب تعیین (R^2) استفاده شد. از این رو نقشه نهایی فرسایش سالانه خاک نشان داد که مقدار فرسایش در حوضه بین صفر تا ۳۷/۱۸ تن بر هکتار در سال متغیر است و بیشترین شدت در بخش های غربی، شمال شرقی و برخی نواحی مرکزی مشاهده شد. این مناطق عمدتاً دارای شیب تند، پوشش گیاهی ضعیف، فرسایش پذیری بالایی باران و بافت خاک حساس هستند. همچنین نتایج حاصل از تحلیل های آماری نیز نشان داد که عامل شیب با ضریب همبستگی ۰/۳۳ و R^2 معادل ۰/۱۱ بیشترین ارتباط را با فرسایش خاک دارد و بیانگر نقش مهم ناهمواری و اختلاف ارتفاع در شدت فرسایش است. شاخص های SPI و NDVI نیز به ترتیب با ضرایب ۰/۲۰ و ۰/۲۲ همبستگی مثبت و معنادار داشتند، در حالی که شاخص های TWI و انحنا دامنه فاقد ارتباط معنادار بودند. نتایج این مطالعه بیانگر ضرورت اجرای اقدامات حفاظتی نظیر تثبیت پوشش گیاهی، مدیریت کاربری اراضی و کنترل رواناب در نواحی پرخطر حوضه است.

کلمات کلیدی: مدل جهانی فرسایش خاک، شاخص های محیطی، پیرسون، تعیین R^2 ، حوضه قوری چای.

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۵/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

تاریخ انتشار برخط: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

نویسنده مسئول: عقیل مددی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. aghil48madadi@yahoo.com

نحوه ارجاع به مقاله:

مددی، عقیل؛ پاسبان، امیرحسام (۱۴۰۴)، تحلیل فرسایش خاک با استفاده از مدل جهانی RUSLE و ارتباط آن با شاخص های محیطی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز قوری چای)، فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی، ۱۴ (۵۵)، ۲۵-۶. Doi: 10.71740/ges.2025.1215215

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author (s), with publication rights granted to Journal of Geography and Environmental Studies. This is an open – access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



مقدمه

فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی و تهدیدی جدی برای پایداری منابع طبیعی، امنیت غذایی و توسعه پایدار در مناطق مختلف جهان به‌شمار می‌آید. این پدیده تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی رخ می‌دهد که در میان آن‌ها تغییرات کاربری اراضی نقشی اساسی و روزافزون دارد (Wondie et al., 2018). این تغییرات نه تنها تهدیدی جدی برای تنوع زیستی و تخریب اراضی محسوب می‌شود، بلکه تأثیرات منفی بر تکه‌تکه شدن جنگل‌ها و تعاملات پیچیده بین زمین و جو زمین دارد. تحقیقات اخیر نشان‌دهنده روندهای جهانی جایگزینی جنگل‌های طبیعی، مراتع و ساواناها با اراضی زراعی است (Serbaji et al., 2023). این روند، هرچند در سطح جهانی قابل مشاهده است، اما ویژگی‌های خاصی دارد که تحت تأثیر عواملی همچون فعالیت‌های انسانی، توسعه اقتصادی و فشارهای جمعیتی قرار دارد (قربان‌نیا و آرمن، ۱۴۰۳؛ Birhanu et al., 2024). به‌طور کلی، روند تغییرات پوشش زمین و کاربری آن در مناطق مختلف جهان تفاوت‌های چشم‌گیری دارد که شناخت دقیق این تغییرات برای مدیریت پایدار منابع طبیعی ضروری است. تغییرات در کاربری و پوشش زمین از اصلی‌ترین علل فرسایش خاک در حوضه‌های آبخیز هستند (Othman et al., 2023). شیوه‌های کشاورزی، رشد جمعیت، فقر و سیاست‌های نادرست مدیریت زمین، این تغییرات را تسریع کرده‌اند (Margiorou et al., 2022). عوامل توپوگرافی (مانند شیب)، تغییرات اقلیمی، الگوهای پوشش زمین و ویژگی‌های خاک نیز نقش مهمی در تعیین نرخ‌های فرسایش خاک ایفا می‌کنند. در سال‌های اخیر، توجه به تغییرات محیطی، به‌ویژه اثرات تغییر پوشش زمین و استفاده از منابع طبیعی، افزایش یافته است. تأثیرات انسانی و رویدادهای طبیعی مختلف، ماهیت پیچیده و پویای تغییرات در کاربری و پوشش زمین را تشدید کرده‌اند (Mukanov et al., 2019). این تغییرات تهدیدات جدی برای محیط زیست و اقتصاد در سطح جهانی و محلی ایجاد می‌کنند. در کشورهای در حال توسعه، جایی که معیشت و اقتصاد به شدت به بهره‌وری زمین وابسته است، فرسایش خاک و شیوه‌های نادرست مدیریت منابع خاک، باعث فرسایش لایه‌های سطحی خاک و کاهش بازده کشاورزی می‌شود که این امر در نهایت به تشدید مشکلات امنیت غذایی می‌انجامد (Ma et al., 2023). بررسی مقالات علمی نشان می‌دهد که حدود ۴۸ درصد از تخریب زمین در جهان به دلیل فرسایش خاک است که بیش‌تر آن از زمان جنگ جهانی دوم رخ داده است و تولید محصولات زراعی و آسیب‌های زیست‌محیطی را تا ۱۵ درصد کاهش داده است. بنابراین پیش‌گیری از این پدیده یکی از مهم‌ترین عوامل حفاظت از منابع طبیعی تلقی می‌شود (آرخی و نیازی، ۱۳۸۹). از آنجایی که فرسایش خاک و تخریب زمین باعث ایجاد مشکلات عمده در بسیاری از کشورها شده است، تلاش‌های زیادی برای توسعه مدل‌های فرسایش خاک صورت گرفته است. ایجاد و اجرای مدل مؤثر می‌تواند داده‌ها و اطلاعات مناسبی در مورد وضعیت فعلی و روند فرسایش و همچنین پتانسیل تجزیه و تحلیل سناریوهای مختلف مدیریت و حفاظت ارائه دهد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۷). مدل‌های زیادی جهت برآورد فرسایش خاک خصوصاً فرسایش آبی و توسعه طرح‌های مدیریتی فرسایش خاک ارائه شده‌اند که بسیاری از این مدل‌ها نیز در نواحی مختلف ایران مورد تحقیق قرار گرفته است. از جمله مدل‌های پرکاربرد در ارزیابی فرسایش خاک می‌توان به مدل اصلاح‌شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE) (Renard et al., 1997) اشاره کرد. در واقع مدل معادله جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده یک مدل تجربی است که بر اساس معادله جهانی فرسایش خاک طراحی شده است. با توجه به این که حوضه آبخیز قوری‌چای در استان اردبیل با ویژگی‌های اقلیمی، توپوگرافی و کاربری متنوع، طی سال‌های گذشته دستخوش تغییرات قابل توجهی در الگوهای کاربری اراضی شده است. بررسی روند این تغییرات و اثرات آن بر شدت و الگوی مکانی فرسایش خاک، به‌ویژه در ارتباط با عوامل محیطی می‌تواند درک عمیق‌تری از فرآیندهای فرسایشی فراهم کند. علی‌رغم اهمیت موضوع، مطالعات جامع و چندمتغیره‌ای که به‌صورت همزمان به پایش تغییرات کاربری اراضی، ارزیابی اثر آن بر فرسایش خاک و تحلیل همبستگی آن با عوامل محیطی در این حوضه پرداخته‌اند، محدود یا ناکافی بوده است. از این‌رو، ضرورت انجام پژوهشی با رویکردی تلفیقی،

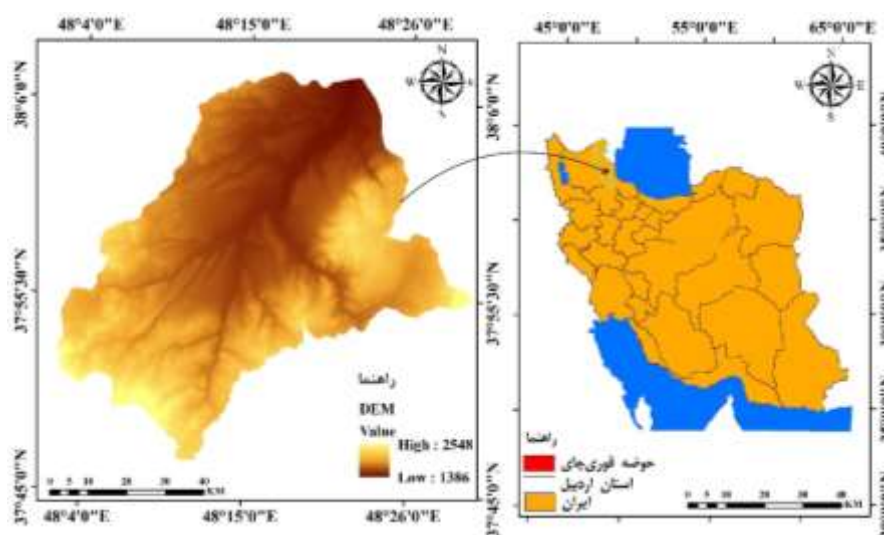
بهره‌گیری از فن‌آوری‌های نوین سنجش‌ازدور، GIS و مدل‌های کمی، برای شناسایی و تحلیل دقیق اثرات تغییرات کاربری اراضی بر فرسایش خاک در حوضه قوری‌چای بیش از پیش احساس می‌شود. تاکنون مطالعاتی زیادی در این خصوص در داخل و خارج کشور انجام شده است که در زیر به آن‌ها اشاره شده است. برای مثال، احمدی لمراسکی و همکاران (۱۴۰۳)، شبیه‌سازی سناریوهای عملیات بیولوژیکی خاک بر تغییرات فرسایش حوضه آبخیز مرگاو در استان مازندران را با استفاده از مدل RUSLE مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد میانگین هدررفت خاک در اراضی کشاورزی، باغی و مناطق جنگلی برابر ۲۵/۴ تن بر هکتار در سال بود. همچنین در بین عوامل مدل RUSLE نقش عامل LS بیش‌تر از سایر عوامل بر فرسایش منطقه اثرگذار بود. داودی و همکاران (۱۴۰۳)، برآورد مکانی فرسایش و رسوب در حوزه آبخیز رودزرد در استان خوزستان را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها در این پژوهش با استفاده از مدل‌های SEDD و RUSLE به این نتایج دست یافتند که متوسط فرسایش سالانه خاک با استفاده از مدل RUSLE برابر با ۷/۲ تن در هکتار در سال به‌دست آمد که بیش‌ترین مقدار آن مربوط به مناطق جنگلی با شیب تند بود. همچنین براساس نتایج مدل SEDD نسبت تحویل رسوب در کل حوضه بین ۰ تا ۰/۹۹ متغیر بود. عابدینی و پاسبان (۱۴۰۳)، با هدف پهنه‌بندی میزان فرسایش خاک و ارتباط آن با شاخص‌های هیدروژئومورفیک و پوشش گیاهی در حوضه آبخیز خیاوچای را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقدار فرسایش سالانه خاک با استفاده از مدل RUSLE برابر ۱۵۰/۵۴ تن بر هکتار در سال به‌دست آمد؛ و در بین عوامل مورد استفاده مدل عامل توپوگرافی با ضریب همبستگی ۰/۹۲ درصد بیش‌ترین تاثیرگذاری را داشت. از طرفی در بین شاخص‌های مورد استفاده نیز پوشش گیاهی و انحناء مقطع به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین نقش را برخوردار بودند. غلامی و همکاران (۱۴۰۳)، با هدف اثر تغییر کاربری اراضی بر فرسایش خاک در حوضه آبخیز چرداول ایلام را با استفاده از مدل RUSLE مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده این بود که میانگین فرسایش در سال ۲۰۰۵، ۱۳/۲۳ تن بر هکتار در سال به‌دست آمد. درحالی‌که برای سال ۲۰۲۰، ۲۰/۱۳ تن بر هکتار در سال بود. در بین کاربری‌های موجود، اراضی بایر به دلیل عدم وجود پوشش گیاهی، بیش‌ترین مقدار فرسایش خاک را دارا بود. گرشاسبی و جوکار سرهنگی (۱۴۰۳)، تاثیر تغییرات کاربری اراضی و بارش بر میزان فرسایش خاک در حوضه اوارد نکارود را با استفاده از مدل جهانی فرسایش خاک مورد بررسی قرار دادند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که میانگین سالانه فرسایش خاک در دوره اول (۱۹۸۰-۲۰۰۰) ۱/۶۴ تن در هکتار در سال و در دوره دوم (۲۰۰۰-۲۰۲۰) ۱/۷۵ تن در هکتار در متغیر بوده که ناشی از کاهش پوشش گیاهی در منطقه بود. همچنین مساحت جنگل‌ها و مراتع روندی کاهشی داشته و در مقابل به مساحت جنگل‌های تخریب، زمین‌های زراعی و مناطق مسکونی افزوده شده است. مددی و همکاران (۱۴۰۳)، بررسی تغییرات کاربری اراضی بر فرسایش خاک را با استفاده از طبقه‌بندی شی‌گرا و مارکوس در حوضه آبریز قلعه‌رودخان فومن مورد ارزیابی و مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها بیانگر این بود که کاربری مسکونی با افزایش ۲۷/۱۷ کیلومتر مربعی از سال ۱۳۷۱ تا ۱۴۰۲ بیش‌ترین تغییر را در بازه زمانی ۳۰ ساله داشت. همچنین با توجه به نقشه پهنه‌بندی فرسایش، مساحت طبقه با پتانسیل فرسایش بسیار زیاد و زیاد از ۱۸/۰۴ درصد در سال ۱۳۷۱ به ۲۲/۵۲ و ۳۲/۳۴ درصد در سال ۱۴۰۲ افزایش پیدا کرده است. مددی و شریفی (۱۴۰۳)، در پژوهشی با تلفیق شاخص‌های ژئومورفومتری و پوشش گیاهی جهت برآورد خطر فرسایش خاک در حوضه آبخیز سامیان را مورد ارزیابی قرار دادند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که نرخ فرسایش خاک برای کل حوضه در دامنه بین ۰ تا ۱۴/۳۲ تن در هکتار در سال برآورد شد همچنین در بین عوامل موثر مدل عامل توپوگرافی بیش‌ترین هم‌بستگی (۰/۹۶) را نسبت به سایر عوامل را برخوردار بود. از طرفی شاخص تفاضل پوشش گیاهی عادی شده با ضریب تعیین ۰/۷۵ نسبت به سایر شاخص‌های مورد مطالعه دارای هم‌بستگی بیش‌تری بوده است. قادری‌دهکردی و همکاران (۱۴۰۴)، تغییرات فرسایش خاک و تولید رسوب در حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان را در یک قرن اخیر مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که از ۱۲۰-۱۰۰ سال گذشته تا به امروز شدت فرسایش در سطح آبخیز افزایش یافته است. به‌طوری‌که

متوسط فرسایش کل، متوسط رسوب گذاری کل و متوسط فرسایش خالص در دوره زمانی ۱۲۰-۱۰۰ سال اخیر نسبت به دوره زمانی ۶۰ سال اخیر به ترتیب حدود دو برابر، سه برابر و دو برابر افزایش پیدا کرده است. Aneseyee و همکاران (۲۰۲۱)، با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و مدل RUSLE، به بررسی تغییرات کاربری اراضی و تأثیر آن بر فرسایش خاک در حوضه وینیکی واقع در کشور اتیوپی طی دوره‌ای بیست‌ساله (۱۹۹۸ تا ۲۰۱۸) پرداختند. یافته‌های این مطالعه نشان داد که گسترش اراضی کشاورزی در این بازه زمانی، موجب افزایش قابل توجه فرسایش خاک شده است؛ به گونه‌ای که مقدار فرسایش از ۱۰/۰۲ تن در هکتار در سال ۱۹۹۸ به ۴۳/۴۸ تن در هکتار در سال ۲۰۱۸ افزایش یافته است. نتایج همچنین بیانگر آن بود که اراضی زراعی بیش‌ترین سهم را در تولید رسوب در این حوضه دارند. Baharat و همکاران (۲۰۲۱)، با استفاده از پارامترهای مورفومتریک، وضعیت فرسایش خاک را در حوضه کالینادی واقع در جنوب غرب هند مورد ارزیابی قرار دادند. بر اساس نتایج، بیش‌تر زیرحوضه‌های این منطقه در طبقات دارای پتانسیل بالای فرسایش قرار گرفتند. همچنین، مقایسه خروجی مدل با داده‌های مشاهداتی در دو زیرحوضه منتخب، حاکی از انطباق و هم‌خوانی بالای نتایج مدل با شرایط واقعی منطقه بود. در مطالعه‌ای دیگر، Sengupta و همکاران (۲۰۲۱)، با بهره‌گیری از پارامترهای مورفومتریک، به ارزیابی خطر فرسایش در حوضه تنگات واقع در هند پرداختند. نتایج این تحقیق حاکی از آن بود که این حوضه به پنج طبقه با پتانسیل فرسایش از بسیار زیاد تا بسیار کم تقسیم می‌شود، به طوری که حدود ۷۶ درصد از سطح حوضه در دو طبقه با خطر زیاد و بسیار زیاد قرار داشتند. Merchan و همکاران (۲۰۲۳)، با به کارگیری مدل RUSLE و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، فرسایش خاک را در حوضه آبخیز اریباس دل دوروه مورد بررسی قرار دادند. یافته‌ها نشان داد که بیش‌ترین میزان فرسایش (بیش از ۲۰۰ تن در هکتار در سال) در نواحی با شیب زیاد، خاک‌های ضعیف و پوشش گیاهی کم یا فاقد پوشش رخ می‌دهد. در مقابل، نواحی مسطح با خاک‌های توسعه یافته و پوشش گیاهی انبوه، نرخ فرسایش به مراتب کم‌تری (تا ۱۰ تن در هکتار در سال) داشتند. Serbaji و همکاران (۲۰۲۳)، با استفاده از مدل RUSLE، به پیش‌بینی میزان فرسایش در جنوب عراق پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که نرخ فرسایش در این منطقه در بازه‌ای بین ۰ تا ۱۸۹ تن در هکتار در سال قرار دارد. در پژوهشی دیگر، DeCrop و همکاران (۲۰۲۳)، با هدف ارزیابی خطر نسبی رسوب و فرسایش خاک از معادله بازنگری‌شده RUSLE و مدل توزیع رسوب (SEDD) استفاده کردند. بر اساس نتایج، حوضه‌های آبریز مورد مطالعه به دلیل شیب تند (میانگین ۲۱ درصد) به شدت مستعد از دست دادن خاک بودند. همچنین، با توجه به اندازه نسبتاً کوچک این حوضه‌ها (میانگین حدود ۲۰۳ هکتار)، مقدار زیادی از خاک فرسایش یافته وارد دریاچه‌ها شده و در آنجا رسوب گذاری صورت می‌گیرد. بنابراین هدف از این پژوهش تحلیل فرسایش خاک با استفاده از مدل جهانی RUSLE و ارتباط آن با شاخص‌های محیطی در حوضه آبخیز قوری‌چای می‌باشد.

روش تحقیق

موقعیت منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز قوری‌چای در استان اردبیل قرار دارد و بخش‌هایی از شهرستان‌های نیر، اردبیل و کوثر را در بر می‌گیرد. بخش عمده این حوضه در محدوده شهرستان نیر واقع شده است. از نظر موقعیت جغرافیایی، این حوضه بین طول‌های شرقی ۴۸ درجه و ۲ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۳۱ دقیقه و عرض‌های شمالی ۳۷ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۱ دقیقه قرار گرفته است. وسعت حوضه حدود ۸۰۳ کیلومتر مربع است. رودخانه قوری‌چای به عنوان آبراهه اصلی حوضه، از دامنه‌های شمال شرقی رشته کوه بزقوش (در منطقه گچی‌قیران) و از ارتفاعی حدود ۲۵۰۰ متر از سطح دریا سرچشمه می‌گیرد (مددی و همکاران، ۱۳۹۹).



شکل (۱): موقعیت منطقه مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر به منظور برآورد میزان فرسایش خاک حوضه آبخیز قوری چای در استان اردبیل از مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح شده (RUSLE) استفاده شد. دلیل استفاده از این مدل به دلیل ساختار نیمه تجربی، سادگی در اجرا و نیاز به داده‌های محدود، یکی از کاربردی‌ترین مدل‌های برآورد فرسایش خاک است. این مدل بر اساس پنج عامل اصلی شامل بارندگی، نوع خاک، شیب، پوشش گیاهی و مدیریت اراضی عمل می‌کند و امکان تطبیق و کالیبراسیون آن برای شرایط مختلف اقلیمی و جغرافیایی وجود دارد. در گام بعد ما به دنبال بررسی تأثیر عوامل محیطی همچون رطوبت توپوگرافی (TWI)، توان آبراهه (SPI)، انحنا دامنه (Curvature)، شیب (Slope)، و پوشش گیاهی (NDVI) بر میزان فرسایش در منطقه هستیم. در این راستا برای بررسی روابط بین شاخص‌های محیطی و فرسایش خاک، از ۵۰۰ نقطه نمونه برداری تصادفی در سطح حوضه استفاده شد که به طور یکنواخت و بدون سوگیری در محیط GIS استخراج گردیدند. مقادیر مدل RUSLE و شاخص‌های محیطی در این نقاط استخراج و سپس با آزمون همبستگی پیرسون و رگرسیون خطی تحلیل شدند. این تحلیل به ما کمک می‌کند تا عوامل اصلی مؤثر بر فرسایش خاک را شناسایی کرده و راهکارهای مناسب برای کاهش آن را ارائه دهیم. جهت دستیابی به هدف پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ مربوط به سال ۲۰۲۴ برای تولید نقشه پوشش گیاهی استفاده شد. مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متری (Alos Palsar)، آمار بارندگی ماهانه و سالانه اخذ شده از سازمان هواشناسی کشور، نقشه بافت خاک ایران با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ استفاده شد. همچنین در این پژوهش از نرم‌افزار ArcGIS 10.8 و سامانه گوگل ارث انجین جهت ترسیم و تولید نقشه‌ها و از نرم‌افزارهای SPSS و Excel جهت محاسبات آماری و روابط رگرسیونی معادلات استفاده شد.

مدل RUSLE

در این پژوهش جهت برآورد میانگین سالانه فرسایش خاک از مدل RUSLE استفاده شد. مدل RUSLE تابعی از شش فاکتور ورودی فرسایش‌دهی باران (R)، فرسایش‌پذیری خاک (K)، طول و درجه شیب (LS)، مدیریت پوشش گیاهی (C) و عملیات حفاظتی (P) است.

حساسیت خاک به فرسایش، تابعی از خصوصیات خاک است و تغییر خصوصیات خاک با کاربری اراضی و توپوگرافی در ارتباط است (Pradhan et al., 2012). فرسایش خاک بر اساس مدل RUSLE با استفاده از رابطه (۱) زیر محاسبه می‌شود (Wischmeier and Smith, 1978).

$$A=R.K.LS.C.P$$

رابطه ۱

در این رابطه A میانگین فرسایش خاک در واحد سطح (تن در هکتار در سال)، R فاکتور فرساینده‌گی باران ($\text{mm h}^{-1} \text{y}^{-1} \text{h}^{-1}$)، K فاکتور فرسایش پذیری خاک ($\text{t h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$)، LS فاکتور توپوگرافی، C فاکتور پوشش گیاهی و P فاکتور عملیات حفاظتی خاک می‌باشد. LS و C و P بدون واحد می‌باشند.

عامل فرساینده‌گی باران (R)

مفهوم عبارت فرساینده‌گی باران توسط ویسمایر و اشمیت به منظور لحاظ تاثیر اقلیم بر فرسایش خاک ارائه شد. پتانسیل باران در ایجاد فرسایش، فرساینده‌گی باران نامیده می‌شود که تابعی از خصوصیات فیزیکی بارندگی است و با انرژی مستقیم باران، انرژی جنبشی بارندگی و حداکثر شدت بارندگی ۳۰ دقیقه ای در ارتباط است (Wischmeier and Smith, 1978). در منطقه مورد مطالعه ایستگاه‌های مجهز به باران نگار وجود ندارد، در صورت عدم وجود چنین ایستگاه‌هایی معمولاً از شاخص‌هایی مبتنی بر مقادیر بارش‌های سالانه و ماهانه مثل شاخص فورنیه در مدل‌های USLE و RUSLE استفاده می‌شود (Renard and Freidmund, 1994). بنابراین شاخص اصلاح شده فورنیه بر اساس رابطه زیر برای تمامی ایستگاه‌ها محاسبه، سپس با جاگذاری این شاخص در رابطه‌های بعدی که برای مناطق فاقد داده‌های تفصیلی شدت بارندگی پیشنهاد شده است (Renard and Freidmund, 1994). مقدار فاکتور R برای ایستگاه‌های هواشناسی برآورد گردید. ابتدا انتخاب ایستگاه‌های مناسب از نظر طول دوره آماری، انتخاب پایه زمانی مشترک، کنترل کیفی، همگن سازی و رفع نواقص قبل از محاسبه شاخص مبتنی بر مقدار بارندگی در ایستگاه‌های باران سنجی انجام شد. برای انجام این تحقیق داده‌های بارش از دوره آماری ۱۰ ساله ایستگاه باران سنجی موجود در داخل و اطراف حوضه کسب شد. سپس با کاربرد روابط (۲، ۳ و ۴) زیر مقدار R مورد محاسبه قرار گرفت.

$$MFI = \sum_{i=1}^{12} P_i^2 / P$$

رابطه ۲

که در این رابطه P_i متوسط بارندگی به میلی‌متر در ماه i و P متوسط بارندگی سالیانه (میلی‌متر) است.

$$R = 0.07397 \times MFI^{1.847} \quad MFI < 55 \text{mm}$$

رابطه ۳

$$R = (95.77 - 6.081 \times F + 0.4770 \times MFI^2) / 1 \quad MFI \geq 55 \text{mm}$$

رابطه ۴

در این رابطه R متوسط فرساینده‌گی بر حسب $\text{Mj.mm.ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{month}^{-1}$ برای دوره آماری، n تعداد سال‌های آماری، m تعداد حوادث فرساینده برای ماه j و EL_{30} میزان فرساینده‌گی باران برای رخداد K است. فرساینده‌گی باران برای هر رخداد بارش به دست می‌آید. پس از محاسبه عامل R در ایستگاه‌های مورد مطالعه، تغییرات مکانی آن با استفاده از روش درونیابی عکس فاصله وزنی (IDW^1) مورد بررسی و نقشه تغییرات مکانی عامل R تهیه می‌گردد.

عامل فرسایش پذیری خاک (K)

عامل فرسایش پذیری خاک بیانگر حساسیت ذاتی خاک به فرسایش است و سهولت جدا شدن ذرات خاک بر اثر انرژی جنبشی قطرات باران و انتقال آن‌ها به وسیله نیروی رواناب را نشان می‌دهد (کلارستاقی و همکاران، ۱۳۹۸). مورگان برای ضریب فرسایش پذیری خاک‌های مختلف اعدادی را پیشنهاد نموده است که در جدول ۱ نشان داده شده است (احمدی، ۱۳۸۸). به منظور تهیه نقشه عامل عامل فرسایش پذیری خاک (K) از نقشه بافت خاک ۱:۲۵۰۰۰۰ ایران و اطلاعات جدول ۱ استفاده می‌گردد.

¹- Inverse distance weighting

جدول (۱): ضریب فرسایش پذیری خاک (K) (منبع: احمدی، ۱۳۸۸)

وضعیت خاک	K	وضعیت خاک	K
خاک سطحی با پوشش سنگ ریزه‌ای	۰/۵	اراضی مقاوم به فرسایش	۰/۱
خاک‌های ماسه‌ای	۰/۱۶	خاک‌های ماسه‌ای نرم	۰/۴۲
خاک‌های لومی شنی	۰/۱۲	خاک‌های لومی با ماسه بسیار ریز	۰/۴۲
خاک‌های سیلتی لومی	۰/۴۸	خاک‌های لومی	۰/۳۷
خاک‌های سیلتی رسی	۰/۲۵	خاک‌های لومی رسی	۰/۳۷

عامل طول و درجه شیب (LS)

فاکتور درصد شیب، تابعی از درجه شیب و منعکس کننده اثر درجه شیب بر مقدار فرسایش است. فاکتور طول شیب نیز تابعی از طول شیب اندازه گیری شده برحسب متر است. حاصل ضرب دو فاکتور یاد شده، به عنوان فاکتور توپوگرافی شناخته می‌شود (محمدی و همکاران، ۱۳۹۷). برای تهیه نقشه فاکتور توپوگرافی، از مدل رقومی ارتفاعی منطقه استفاده می‌شود. فاکتور توپوگرافی نیازمند نقشه‌های تجمیع جریان و شیب است. که از نقشه مدل رقومی ارتفاعی استخراج می‌شوند و در نهایت با استفاده از رابطه (۵) فاکتور توپوگرافی به دست می‌آید.

$$LS = [(Flow\ accumulation\ grid) \times (cell\ size/22.13)]^{0.4} \times [Sin\ (slope\ grid) \times 0.01745/0.0896]^{1.3}$$

رابطه ۵

که در آن Flow Accumulation تجمع جریان به سمت بالای شیب برای هر سلول، Cell Size اندازه سلول‌های شبکه و Slope شیب، به دست آمده از نقشه شیب می‌باشد. از عدد ۰/۰۱۷۴۵ برای تبدیل واحد به رادیان در محیط ArcGIS استفاده می‌شود.

عامل پوشش گیاهی (C)

فاکتور پوشش گیاهی بیانگر نسبت مقدار خاک از بین رفته از زمین زیر کشت، به خاک فرسوده شده از همان قطعه زمین در طی آیش مداوم و عاری از پوشش یا بقایای گیاهی می‌باشد (Wischmeier and Smith, 1978). مقدار عامل پوشش گیاهی از رابطه (۶) زیر محاسبه می‌شود.

$$C = \exp(-\alpha NDVI/\beta - NDVI)$$

رابطه ۶

که در آن NDVI شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده $\alpha-2$ و $\beta-1$ پارامترهایی هستند که شکل رابطه منحنی بین NDVI و C را مشخص می‌کنند.

عامل عملیات حفاظتی خاک (P)

عامل کارهای حفاظتی را به عنوان مقدار خاک از بین رفته در واحد سطح یک زمین حفاظت شده، به زمینی که لخت باشد و در جهت تندترین شیب و شخم خورده باشد، تعریف کرده‌اند. هرچه مقدار این عامل کم‌تر باشد، کارهای حفاظتی مؤثرتر و هدررفت خاک کم‌تر است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۷). همچنین در صورتی که عملیات اصلاحی و مدیریتی صورت نگرفته باشد ارزش P برای کل حوضه ۱ در نظر گرفته می‌شود.

تلفیق لایه‌ها و تهیه نقشه فرسایش خاک

پس از تهیه لایه‌ها و طبقه‌بندی هر کدام از آن‌ها مطابق شرایط منطقه و دامنه اعداد به‌دست آمده، نقشه نهایی فرسایش خاک با هم‌پوشانی لایه‌های مذکور تهیه و به کلاس‌های مختلف فرسایش طبقه‌بندی می‌شوند. آماده‌سازی و تهیه لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز به صورت رستری باید باشند. از این‌رو مقدار هدررفت سالیانه خاک از طریق حاصل ضرب عامل‌های مدل RUSLE با توجه به رابطه ۱ و با استفاده از توابع Spatial Analyst و گزینه Raster Calculator در محیط ArcGIS بر حسب تن بر هکتار در سال محاسبه شد.

عوامل محیطی مورد استفاده

در پژوهش حاضر، بررسی فرسایش خاک با تمرکز بر تأثیر عوامل محیطی انجام شده است. این عوامل شامل پوشش گیاهی (NDVI)، شیب زمین (SLOPE)، رطوبت توپوگرافیک (TWI)، توان آبراهه (SPI) و انحنای دامنه (Curvature) هستند که هر یک نقش مهمی در فرآیند فرسایش خاک ایفا می‌کنند که در زیر به توضیحات آن پرداخته شده است. پرکاربردترین معیار رویش پوشش گیاهی، شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) است که با استفاده از فن‌آوری سنجش‌ازدور به‌دست می‌آید. برای تصویر لندست این شاخص به صورت رابطه ۷ می‌باشد.

$$NDVI = (IR - R) / (IR + R)$$

رابطه ۷

این شاخص معرف انعکاس انرژی خورشیدی از سطح زمین است که انواع شرایط پوشش گیاهی را نشان می‌دهد. مقادیر NDVI بین ۱- و ۱+ در نوسان است. زمانی که پاسخ طیفی اندازه‌گیری شده از سطح زمین برای هر دو باند خیلی مشابه باشد، مقادیر NDVI به صفر نزدیک می‌شود. پوشش گیاهی سالم (دارای فعالیت فتوسنتزی) در بخش طیفی مادون قرمز (IR) (باند ۴ لندست) در مقایسه با بخش طیفی مرئی قرمز (R) (باند ۳ لندست) انعکاس بیش‌تری دارد؛ بنابراین مقادیر NDVI برای پوشش گیاهی سبز مثبت خواهد شد. مناطق با پوشش گیاهی کم یا بدون پوشش گیاهی مانند مناطق شهری و اراضی بایر معمولاً مقادیر NDVI بین ۰/۱+ و ۰/۱- را نشان می‌دهند. ابرها و منابع آبی مقادیر منفی یا صفر را نشان می‌دهند. شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) برای محاسبه داده‌های طیفی زمینی استفاده شده و نتایج آن نشان داده که این شاخص، همبستگی بالایی با زیست‌توده سطح زمین دارد (آرخی و نیازی، ۱۳۸۹).

شیب زمین (SLOPE) یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر فرسایش خاک است و نشان‌دهنده میزان تندی یا زاویه دامنه در یک منطقه می‌باشد. شیب‌های تند باعث افزایش سرعت جریان آب سطحی می‌شوند و انرژی کافی برای جابجایی ذرات خاک را فراهم می‌کنند، در نتیجه فرسایش در این مناطق شدت بیش‌تری دارد. علاوه بر این، شیب بر عمق نفوذ آب و تجمع رسوبات نیز تأثیرگذار است؛ شیب‌های کم جریان آب را کاهش می‌دهند و احتمال رسوب‌گذاری را افزایش می‌دهند، در حالی که شیب‌های زیاد باعث شست‌وشوی سریع خاک و کاهش بار مواد مغذی می‌شوند. بنابراین، تحلیل نقشه شیب به عنوان شاخصی کلیدی در شناسایی مناطق پرخطر فرسایش خاک اهمیت فراوان دارد (Aneseyee et al., 2020).

نظریه شاخص رطوبت توپوگرافی اولین بار به وسیله بون و کرکی (۱۹۷۹) در مدل بارش-رواناب TOPMODEL معرفی شد که می‌تواند تأثیر توپوگرافی را بر تولید رواناب به صورت کمی بیان کند و به عنوان یک شاخص فیزیکی، مکان مناطق اشباع سطحی و توزیع مکانی رطوبت خاک را برآورد می‌کند (ملکی و همکاران، ۱۳۹۳). این شاخص بر اساس شیب و طول مسیر جریان آب محاسبه می‌شود و نقاطی با مقدار TWI بالاتر معمولاً رطوبت بیش‌تری دارند و احتمال تجمع آب و فرسایش موضعی در آن‌ها بیش‌تر است. از سوی دیگر، مناطق با TWI پایین سریع‌تر خشک می‌شوند و کم‌تر در معرض فرسایش ناشی از جریان سطحی قرار دارند. تحلیل TWI در مطالعات فرسایش خاک به شناسایی نقاط حساس و مدیریت منابع آب و خاک کمک شایانی می‌کند و

نقش مهمی در تعیین نواحی پرخطر فرسایش ایفا می کند. شاخص رطوبت توپوگرافی به صورت رابطه ۸ ارائه شده است (Moore and Grayson, 1991).

$$TWI = A_s / \tan \beta$$

رابطه ۸

در رابطه ذکر شده A_s سطح ویژه حوضه برحسب مساحت تجمعی بالادست (مساحت بالادست در واحد طول خط تراز)، β درجه شیب می باشد. این شاخص، گرایش آب را به جمع شدن در هر نقطه از درجه شیب می باشد. این شاخص، گرایش آب را به جمع شدن در هر نقطه از حوضه (برحسب A_s) و تمایل نیروهای گرانشی را به انتقال آب به پایین دست (برحسب $\tan \beta$) به عنوان شیب هیدرولیکی تقریبی توصیف می کند.

توان آبراهه (SPI)، میزان زمان مصرف انرژی است و به طور گسترده در مطالعات فرسایش و محل رسوب به عنوان اندازه گیری قدرت فرسایش آب جاری استفاده می شود. مقادیر بالای SPI نشان دهنده آبراهه های قوی و متمرکز هستند که انرژی کافی برای حمل ذرات خاک و ایجاد فرسایش شدید دارند، در حالی که مقادیر پایین تر بیانگر جریان پراکنده و کم انرژی است که تأثیر کمتری بر فرسایش دارد. همچنین این شاخص ظرفیت انتقال فضایی توزیع شده را محاسبه می کند و ممکن است برای ارزیابی چشم انداز فرسایش بیش از سایر رویکردها مناسب باشد، زیرا این امر منجر به انعطاف و انحراف جریان می شود. این توزیع فضایی، پتانسیل خسارت خاک را با استفاده از بارش رواناب و باران یکنواخت محاسبه می کند. شاخص توان آبراهه به صورت رابطه ۹ محاسبه می شود (Sharma, 2010).

$$SPI = A_s \tan B$$

رابطه ۹

در رابطه ذکر شده $\tan B$ و A_s هستند به ترتیب منطقه خالص حوضه و شیب محلی هستند. انحنا دانه شاخصی است که شکل و جهت سطح زمین را توصیف می کند و تأثیر مستقیمی بر جریان آب دارد. مقادیر انحنا دانه، مورفولوژی توپوگرافی را نشان می دهد که دارای یک انحنا مثبت (محدب) باعث پراکندگی جریان آب و کاهش فرسایش می شود، و یک انحنا منفی (مقعر) که جریان را متمرکز کرده و احتمال فرسایش و تجمع رسوبات را افزایش می دهد همچنین مقدار صفر نشان دهنده سطوح صاف است (Rejith et al., 2019). از این رو شاخص انحنا دانه با استفاده از DEM در محیط ArcGIS تهیه می گردد که به صورت رابطه ۱۰ ارائه می شود.

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I$$

رابطه ۱۰

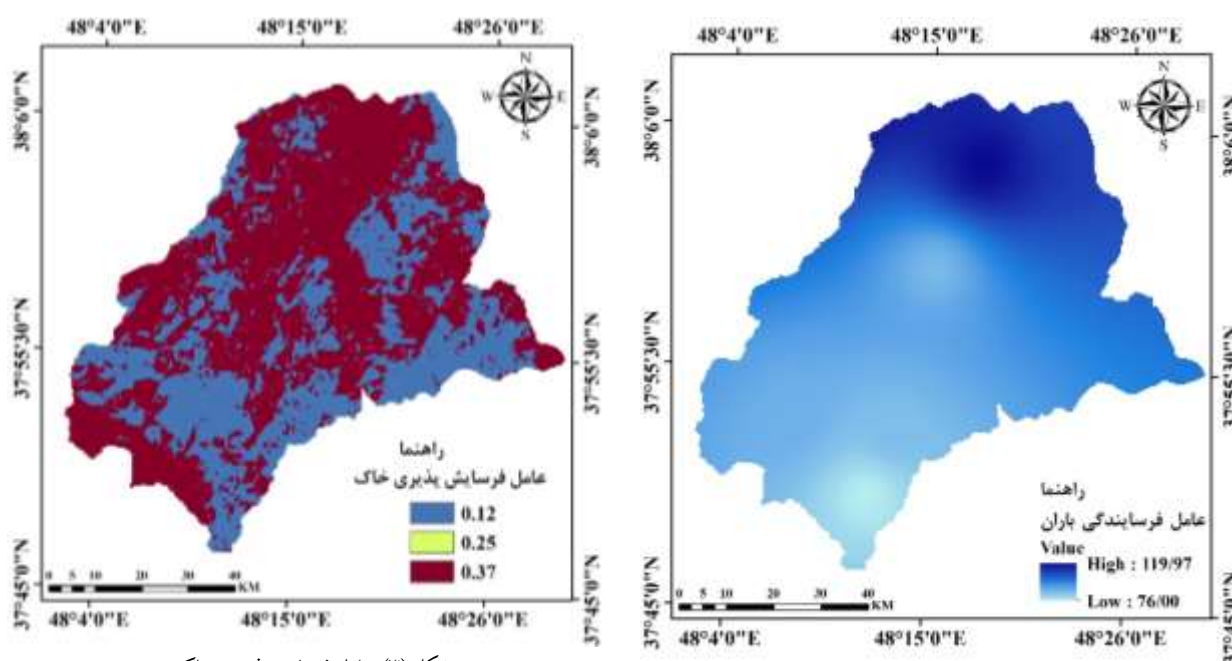
آزمون همبستگی پیرسون

آزمون همبستگی پیرسون یک روش آماری برای سنجش میزان و جهت رابطه خطی بین دو متغیر کمی است. مقدار ضریب همبستگی پیرسون بین ۱- تا ۱+ قرار می گیرد؛ مقدار مثبت نشان دهنده رابطه مستقیم و مقدار منفی نشان دهنده رابطه معکوس بین دو متغیر است، و هرچه مقدار ضریب نزدیک تر به ۱ یا ۱- باشد، شدت رابطه بیش تر است. بنابراین در این پژوهش با هدف بررسی ارتباط بین فرسایش خاک و شاخص های محیطی مورد استفاده قرار گرفت تا بتوان تأثیر هر عامل بر شدت فرسایش را به صورت کمی تحلیل کرد. علاوه بر ضریب همبستگی، سطح معناداری (p-value) را نیز تعیین می کند که آیا رابطه مشاهده شده از نظر آماری قابل اعتماد است یا خیر (شگرخدايي و همکاران، ۱۴۰۲).

یافته‌ها

تحلیل عوامل مدل RUSLE

جهت محاسبه عامل فرساینده‌گی باران (R)، آمار بارش ماهانه و سالانه ۲۰ ساله ایستگاه‌های باران سنجی مورد استفاده قرار گرفت. سپس با استفاده از شاخص اصلاح شده فورنیه با استفاده از رابطه (۲) مقادیر فرساینده‌گی باران مورد محاسبه قرار گرفت. با انتقال این اعداد به محیط برنامه ArcGIS و اعمال درونیابی به روش IDW نقشه رستری ۳۰ متری تغییرات مکانی (R) تهیه شد که در شکل (۲) ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار R از ۷۶ تا ۱۱۹/۹۷ (مگاژول بر میلی متر بر هکتار در سال) متغیر است که بیش‌ترین مقدار آن مربوط به قسمت‌های شمالی و کم‌ترین آن مربوط به قسمت‌های مرکزی و جنوب حوضه است. در شکل (۳)، عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) ارائه شده است که جهت تهیه این عامل نیز از جدول (۱) و نقشه بافت خاک ایران با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ بهره گرفته شد. در گام بعد نقشه رستری ۳۰ متری عامل فرسایش‌پذیری خاک تهیه شد. براساس نتایج به دست آمده مقدار K در سه طبقه ۰/۱۲، ۰/۲۵ و ۰/۳۷ متغیر است.

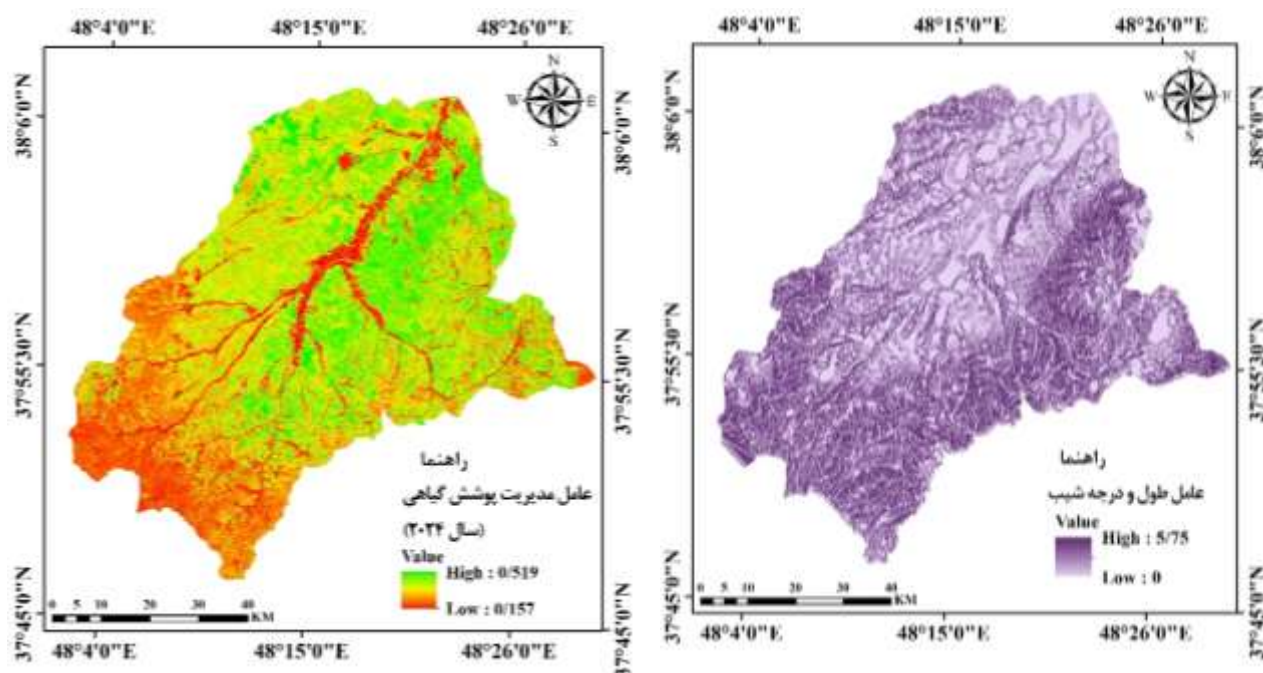


شکل (۲): عامل فرساینده‌گی باران

شکل (۳): عامل فرسایش‌پذیری خاک

جهت تهیه عامل طول و درجه شیب از مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر Alos Palsar استفاده شد. با استفاده از این نقشه و ابزار ArcHydro در محیط برنامه ArcGIS ابتدا نقشه جهت جریان تهیه شد و در مرحله بعد با استفاده از این عامل نقشه جریان تجمعی تهیه و تولید شد. در گام بعد نقشه شیب منطقه مورد مطالعه برحسب درجه و با استفاده نقشه DEM تهیه شد. در نهایت با استفاده از رابطه (۴) نقشه رستری ۳۰ متری LS تهیه شد که در شکل (۴) ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده مقدار LS از صفر تا ۵/۷۵ متغیر است. مناطق شمال شرقی، جنوب و جنوب غربی حوضه دارای LS بیش‌تری می‌باشد. نقشه عامل پوشش گیاهی (C) نیز با استفاده از شاخص NDVI برای سال ۲۰۲۴ مورد محاسبه قرار گرفت. همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود عامل C بین ۰/۱۵ تا ۰/۵۱ متغیر است. بخش‌های مرکزی و شمالی حوضه از مقدار C بیش‌تری برخوردار است در مقابل مناطق جنوب و جنوب غرب حوضه دارای مقادیر پایین‌تری از پوشش گیاهی را شامل می‌شود.

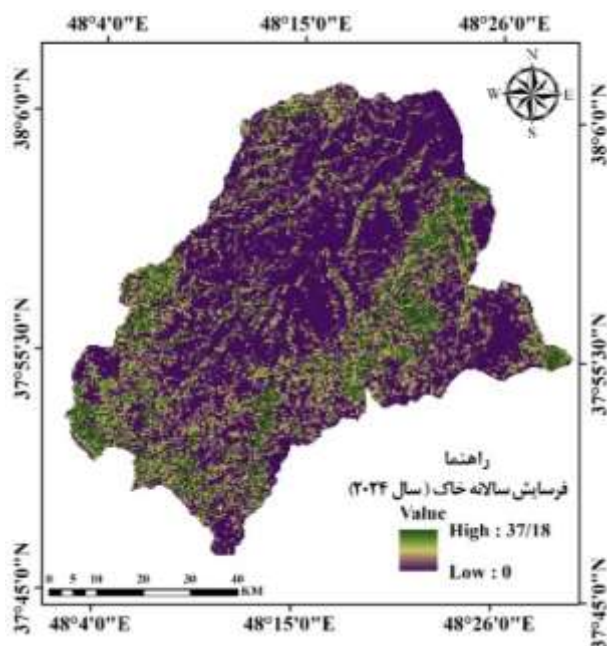
عامل عملیات حفاظتی خاک (P) نیز برای کل حوضه ۱ در نظر گرفته شد.



شکل (۵): عامل مدیریت پوشش گیاهی

شکل (۴): عامل طول و درجه شیب

در نهایت از ترکیب و تلفیق عوامل مدل RUSLE نقشه نهایی فرسایش سالانه خاک (A) در دامنه بین ۰ الی ۳۷/۱۸ تن بر هکتار در سال به دست آمد. همان طور که در شکل (۶) ماحضه می شود بیش ترین شدت فرسایش در نواحی غربی، شمال شرقی و بخش هایی از مرکز- جنوب حوضه متمرکز است که این مناطق تحت تأثیر همزمان سه عامل اصلی شامل توپوگرافی، پوشش گیاهی ضعیف و مقدار بالای فرسایش باران قرار دارند. همچنین بخش هایی با بافت خاک حساس تر بالاتر می توانند شدت فرسایش را تشدید کرده باشند. در مقابل، مناطق وسیعی از بخش های مرکزی و شرقی دارای مقادیر بسیار پایین یا نزدیک به صفر هستند که به طور عمده ناشی از شیب ملایم، پوشش گیاهی متراکم تر و بافت خاک مقاوم تر در برابر فرسایش است. پراکندگی لکه ای مقادیر بالای فرسایش در امتداد شبکه آبراه ها و پای دامنه ها نیز بیانگر نقش تمرکز رواناب و انرژی برشی جریان های سطحی در تشدید فرآیند فرسایش است. این نتایج اهمیت تمرکز اقدامات مدیریتی و حفاظتی خاک، از جمله تثبیت پوشش گیاهی، مدیریت کاربری اراضی و کنترل رواناب را در نواحی پرخطر حوضه نشان می دهد تا از تخریب بیش تر منابع خاک جلوگیری شود.



شکل (۶): فرسایش سالانه خاک (تن برهکتار در سال)

تحلیل شاخص‌های محیطی مورد استفاده و ارتباط آن با فرسایش خاک حوضه قوری‌چای

شیب: برای تهیه شیب حوضه آبخیز مورد مطالعه از مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر (Alos Palsar) استفاده شد. میانگین شیب در حوضه قوری‌چای حدود ۱۲ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده درجه ناهمواری بالای منطقه مطالعاتی، فراوانی شیب‌های تند و اندک بودن اراضی هموار است. بر اساس نقشه شیب ارائه‌شده (شکل ۷)، محدوده مورد مطالعه در پنج طبقه شیب از ۰ تا بیش از ۷۶ درصد تقسیم‌بندی شده است. بخش عمده‌ای از سطح حوضه، به‌ویژه در مناطق مرکزی و شمال‌غربی، در طبقه شیب ملایم قرار دارد که معمولاً دارای پتانسیل فرسایش کم‌تر و مناسب‌تر برای فعالیت‌های کشاورزی و استقرار سکونتگاه‌ها است. طبقات ۱۵-۳۰ درصد و ۳۰-۴۶ درصد عمدتاً در حاشیه کوهپایه‌ها، میان‌دامنه‌ها و اطراف شبکه‌های زهکشی گسترش یافته‌اند که به دلیل افزایش سرعت رواناب و کاهش نفوذپذیری، حساسیت بیش‌تری نسبت به فرسایش دارند. شیب‌های بسیار زیاد ۴۶-۶۱ درصد و بیش از ۶۱ درصد به‌طور پراکنده در بخش‌های شرقی، جنوب‌غربی و برخی نواحی شمال شرقی دیده می‌شوند که اغلب مربوط به ارتفاعات و دیواره‌های تند دامنه‌ای است. این مناطق، به دلیل ناپایداری مکانیکی و انرژی بالای جریان‌های سطحی، مستعد وقوع فرسایش شدید، لغزش و ریزش هستند.

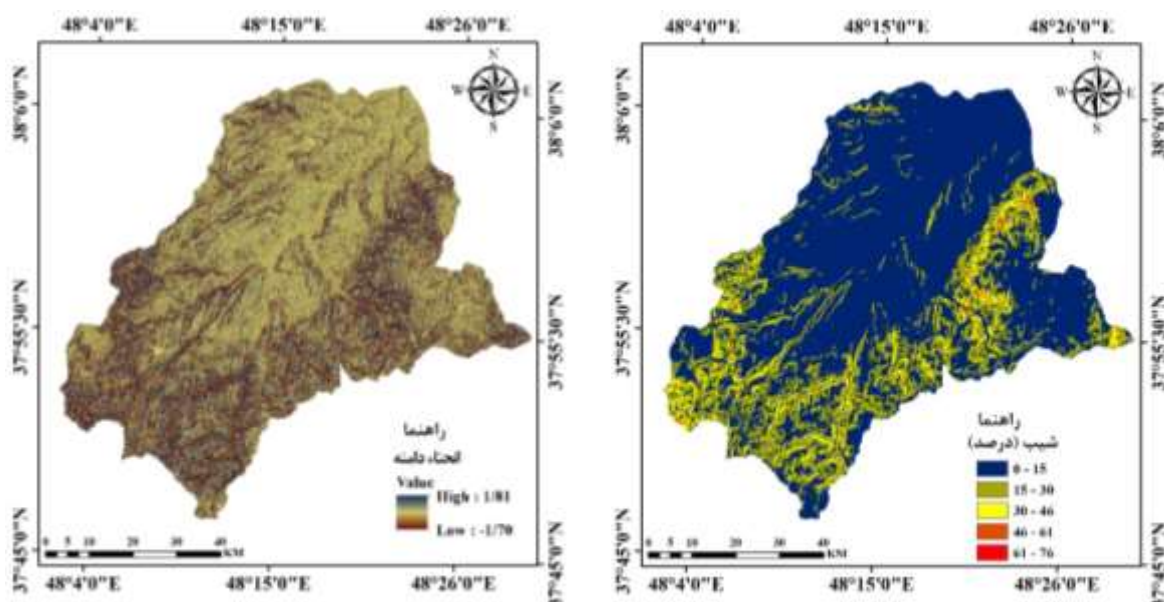
نقشه انحناى دامنه (شکل ۸) نشان‌دهنده تغییرات هندسی سطح زمین و شکل دامنه‌ها در محدوده مورد مطالعه است. مقادیر مثبت (دامنه ۱/۸۱) بیانگر انحناى محدب هستند که عمدتاً در نواحی بالادست، خط‌الرأس‌ها و برجستگی‌های توپوگرافی مشاهده می‌شوند؛ این مناطق معمولاً محل تمرکز فرسایش سطحی و آغاز حرکت ذرات خاک به دلیل جریان‌های سطحی هستند. در مقابل، مقادیر منفی (تا -۱/۷۰)، که نشان‌دهنده انحناى مقعر می‌باشند، بیش‌تر در پای دامنه‌ها، فرورفتگی‌ها و امتداد آبراهه‌ها دیده می‌شوند؛ این نواحی مستعد تجمع رسوبات، افزایش رطوبت خاک و فرآیندهای رسوب‌گذاری هستند. بخش‌های دارای مقادیر نزدیک به صفر به‌طور نسبی صاف بوده و تغییر شکل ناچیزی در سطح زمین دارند که معمولاً پایداری بیش‌تری در برابر فرسایش دارند. از سوی دیگر مناطق با انحناى محدب و شیب تند در کنار پوشش گیاهی ضعیف، پتانسیل بالاتری برای فرسایش خاک دارند، درحالی‌که نواحی مقعر می‌توانند به‌عنوان مناطق انباشت رسوب و کاهش‌دهنده سرعت رواناب عمل کنند.

نقشه ارائه‌شده در شکل (۹)، شاخص پوشش گیاهی (NDVI) سال ۲۰۲۴ در محدوده حوضه آبخیز قوری‌چای را نشان می‌دهد که مقادیر آن بین ۰/۰۳- تا ۰/۶۸ متغیر است. مقادیر بالاتر NDVI بیانگر تراکم و سلامت بالای پوشش گیاهی هستند و عمدتاً در

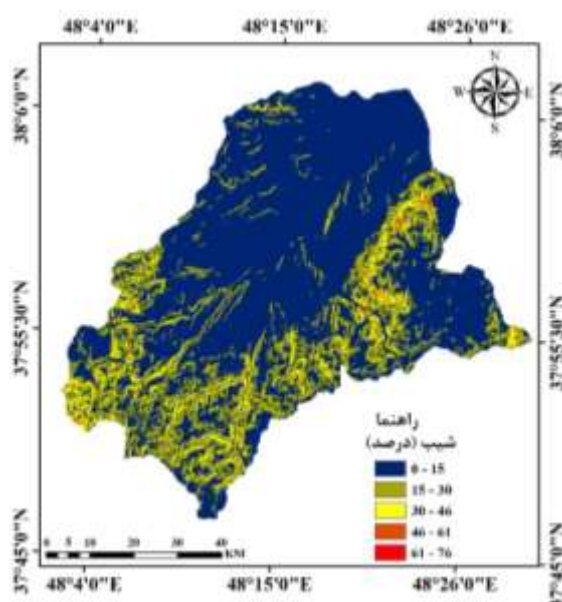
مناطق جنگلی، مراتع انبوه و اراضی کشاورزی مشاهده می‌شوند. در مقابل، مقادیر پایین معرف اراضی کم‌پوشش یا فاقد پوشش گیاهی قابل توجه هستند و معمولاً شامل نواحی بایر، مناطق شهری، اراضی سنگی و یا سطوح آبی می‌شوند. الگوی مکانی NDVI در این نقشه نشان می‌دهد که بخش‌های جنوبی و غربی حوضه دارای پوشش گیاهی متراکم‌تر بوده، در حالی که بخش‌های شمال شرقی و برخی مناطق مرکزی از تراکم گیاهی کم‌تری برخوردارند که ناشی از شرایط اقلیمی، نوع کاربری اراضی یا فعالیت‌های انسانی باشد.

شکل (۱۰) شاخص توان آبراهه را نشان می‌دهد که مقادیر آن بین ۶/۱۷- تا ۸/۴۹ متغیر است. نواحی دارای مقادیر بالا (نزدیک به ۸/۴۹) بیانگر بخش‌هایی با توان بالای آبراهه هستند که معمولاً در مناطق با شیب زیاد و یا در محل تلاقی جریان‌ات آبی مشاهده می‌شوند و پتانسیل بالاتری برای فرسایش و انتقال رسوب دارند. در مقابل، نواحی با مقادیر پایین (نزدیک به ۶/۱۷-) عمدتاً در اراضی مسطح‌تر و یا بالادست آبراهه‌ها قرار دارند که انرژی جریان در آن‌ها کم‌تر بوده و نقش کم‌تری در فرسایش دارند. توزیع فضایی مقادیر SPI در این نقشه نشان می‌دهد که بیش‌ترین توان آبراهه در مناطق جنوبی و بخش‌هایی از مرکز حوضه متمرکز است که به دلیل تمرکز شبکه زهکشی و اختلاف ارتفاع بیش‌تر، قدرت فرسایش در آن‌ها بالاتر است.

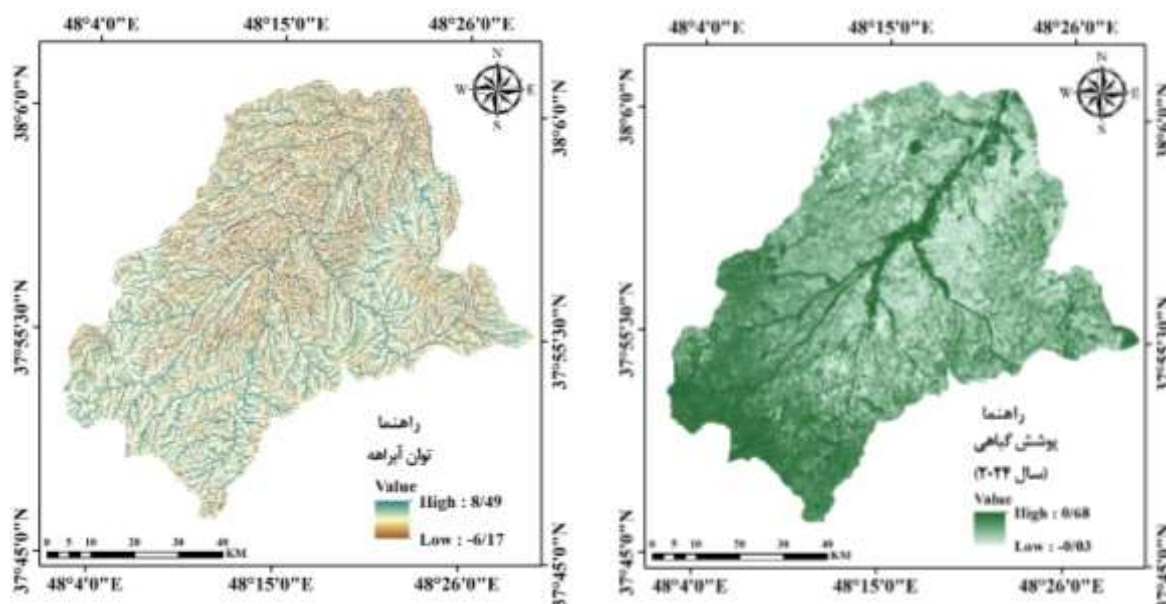
نتایج شاخص رطوبت توپوگرافی در دامنه بین ۳/۶۸ تا ۲۶/۲۶ به‌دست آمد (شکل ۱۱). مقادیر بالای TWI معمولاً در مناطق پایین‌دست، مجاورت آبراهه‌ها و یا نقاط با شیب کم مشاهده می‌شوند که قابلیت تجمع آب و رطوبت بیش‌تری دارند و از نظر هیدرولوژیکی مستعد اشباع و فرسایش آبی هستند. در مقابل، مقادیر پایین TWI عمدتاً در اراضی مرتفع و شیب‌دار دیده می‌شوند که به دلیل زهکشی سریع، رطوبت کمی را در خود نگه می‌دارند. الگوی مکانی TWI در این حوضه نشان داد که بخش‌های میانی و پایین‌دست شبکه زهکشی بیش‌ترین پتانسیل رطوبت‌پذیری را دارند.



شکل (۸): شاخص انحناء دامنه

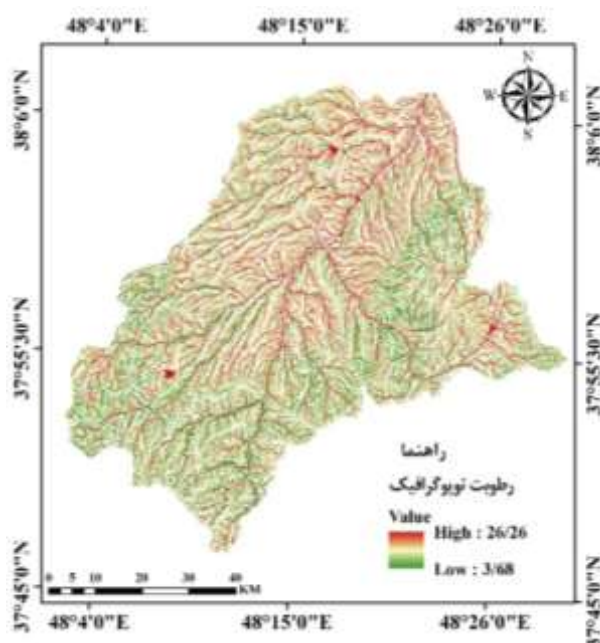


شکل (۷): شاخص شیب (درصد)



شکل (۱۰): شاخص توان آبراهه

شکل (۹): شاخص پوشش گیاهی

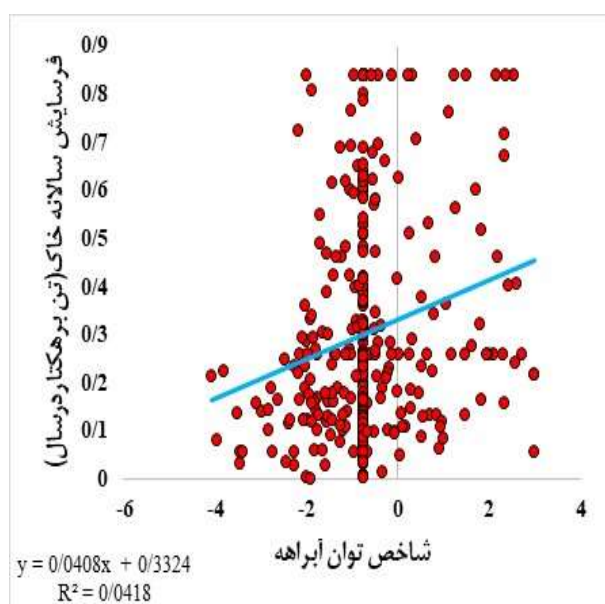


شکل (۱۱): شاخص رطوبت توپوگرافیک

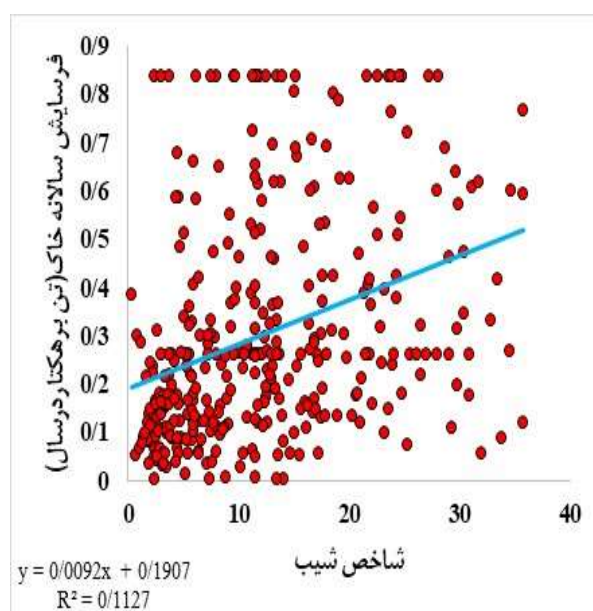
تحلیل و بررسی همبستگی بین عوامل محیطی با فرسایش سالانه خاک

برای بررسی روابط بین شاخص‌های محیطی و فرسایش خاک، از ۵۰۰ نقطه نمونه برداری تصادفی در سطح حوضه استفاده شد که به‌طور یکنواخت و بدون سوگیری در محیط GIS استخراج گردیدند. مقادیر مدل RUSLE و شاخص‌های محیطی در این نقاط استخراج و سپس با آزمون همبستگی پیرسون و رگرسیون خطی تحلیل شدند. براساس نتایج همبستگی پیرسون میزان فرسایش خاک برآورده شده با مدل RUSLE با شاخص‌های محیطی نشان داد که توان آبراهه با ضریب همبستگی ۰/۲۰ پوشش گیاهی با ضریب ۰/۲۲ و شیب با ضریب ۰/۳۳ ارتباط مثبت و معنادار در سطح اطمینان ۹۹ درصد دارد. این نتایج نشان می‌دهد که افزایش مقادیر NDVI، SPI و به‌ویژه شیب، با روند افزایشی فرسایش خاک همسو است. در این میان، شیب بیش‌ترین ضریب همبستگی را با RUSLE نشان داده و بیانگر نقش پررنگ ناهمواری و اختلاف ارتفاع در فرآیندهای فرسایشی است. مقادیر مثبت و معنادار همبستگی برای SPI و NDVI نیز می‌تواند ناشی از این باشد که توان آبراهه و تراکم پوشش گیاهی، در شرایط خاص منطقه،

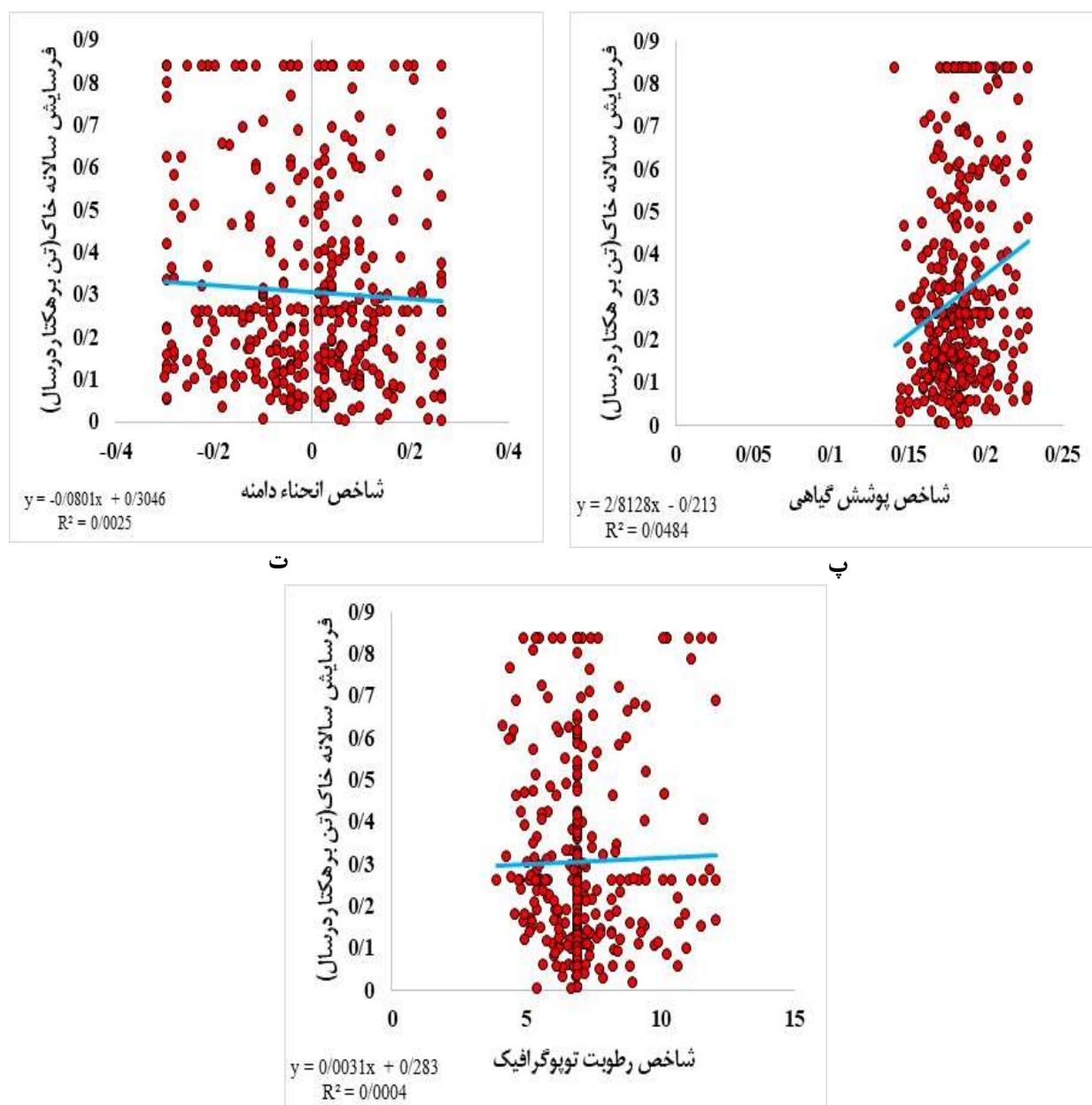
به‌طور غیرمستقیم یا مستقیم بر شدت فرسایش اثر می‌گذارند. از سوی دیگر، شاخص رطوبت توپوگرافی با ضریب ۰/۰۲ و همچنین شاخص انحنای با ضریب ۰/۰۵- فاقد رابطه معنادار با فرسایش خاک هستند. این امر حاکی از آن است که این دو عامل در محدوده مورد مطالعه نقش مستقیم و بارزی در تغییرات مکانی فرسایش ندارند یا اثر آن‌ها تحت تأثیر سایر عوامل غالب قرار گرفته است. از طرفی دیگر نتایج ضرایب تعیین (R^2) حاصل از تحلیل رگرسیون خطی نیز این الگو را تأیید می‌کند. بیش‌ترین مقدار R^2 بین فرسایش خاک و شیب (۰/۱۱) مشاهده شد که نشان‌دهنده سهم نسبی بالاتر این متغیر در توضیح تغییرات فرسایش نسبت به سایر شاخص‌ها است. پس از آن، شاخص NDVI با مقدار (۰/۰۴) و شاخص SPI با مقدار (۰/۴۱) قرار دارند که گرچه از نظر آماری معنادارند، اما قدرت تبیین‌کنندگی آن‌ها محدود است. این موضوع بیان می‌کند که هرچند پوشش گیاهی و توان آبراهه می‌توانند بر فرسایش اثرگذار باشند، اما بخش عمده تغییرات مکانی و شدت فرسایش بیش‌تر تحت تأثیر ویژگی‌های توپوگرافی، به‌ویژه شیب، قرار دارد. مقادیر بسیار پایین R^2 برای شاخص‌های رطوبت توپوگرافیک و انحناء دامنه نیز مؤید آن است که این دو عامل تأثیر ناچیزی بر پیش‌بینی تغییرات فرسایش خاک در محدوده مورد مطالعه دارند. به‌طور کلی، ترکیب نتایج همبستگی و ضرایب تعیین نشان می‌دهد که در منطقه مورد مطالعه، عوامل مورفومتری مانند شیب و شاخص‌های هیدرولوژیک نظیر SPI نسبت به شاخص‌های مرتبط با رطوبت و انحنای زمین، نقش مهم‌تری در بروز و شدت فرسایش خاک ایفا می‌کنند؛ به‌گونه‌ای که مدیریت و کنترل فرسایش در چنین شرایطی نیازمند توجه ویژه به کنترل فرسایش در اراضی شیب‌دار و مدیریت جریان‌های آب سطحی در آبراهه‌ها است. در شکل (۱۲) و جدول (۲) ضریب تبیین (R^2) و همبستگی میان متوسط فرسایش خاک با شاخص‌های محیطی ارائه شده است.



ب



الف



شکل (۱۲): ضریب تبیین (R^2) متوسط فرسایش خاک با شاخص‌های محیطی: الف) شیب، ب) توان آبراهه، پ) پوشش گیاهی، ت) انحاء دامنه، ث) رطوبت توپوگرافیک

جدول (۲): همبستگی مقادیر شاخص‌های مورد مطالعه با فرسایش سالانه خاک در حوضه آبخیز قوری چای

فرسایش سالانه خاک	توان آبراهه	پوشش گیاهی	انحاء دامنه	رطوبت توپوگرافیک	شیب
	۰/۲۰۴ **	۰/۲۲۰ **	-۰/۰۵	۰/۰۲۰	۰/۳۳۶ **

* اطمینان در سطح ۹۵ درصد ** اطمینان در سطح ۹۹ درصد

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح شده (RUSLE) ابزاری مناسب برای برآورد و تحلیل الگوی مکانی فرسایش خاک در حوضه آبخیز قوری چای است. این مدل با ترکیب پنج عامل اصلی شامل بارندگی، فرسایش‌پذیری خاک، طول و درجه شیب، پوشش گیاهی و عملیات حفاظتی خاک توانست نقشه‌ای دقیق از شدت فرسایش ارائه دهد. بر اساس

نتایج، عامل فرساینده‌گی باران (R) در محدوده ۷۶ تا ۱۱۹/۹۷ مگاژول میلی‌متر بر هکتار در سال متغیر بوده و بیش‌ترین مقدار آن در بخش‌های شمالی حوضه مشاهده شد. عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) در سه طبقه ۰/۱۲، ۰/۲۵ و ۰/۳۷ تن‌ساعت بر مگاژول میلی‌متر قرار گرفت که بیانگر حساسیت متفاوت بافت خاک در بخش‌های مختلف حوضه است. عامل طول و درجه شیب (LS) نیز بین ۰ تا ۵/۷۵ متغیر بوده و بیش‌ترین مقادیر آن در مناطق شمال‌شرقی، جنوب و جنوب‌غربی مشاهده شد که دارای شیب‌های تند و طول دامنه زیاد هستند. عامل پوشش گیاهی (C) نیز بر اساس شاخص NDVI سال ۲۰۲۴ در محدوده ۰/۱۵ تا ۰/۵۱ محاسبه شد که مقادیر بالاتر عمدتاً در بخش‌های مرکزی و شمالی و مقادیر پایین‌تر در جنوب و جنوب‌غرب حوضه مشاهده شد. عملیات حفاظتی (P) برای کل حوضه برابر با ۱ در نظر گرفته شد. ترکیب این عوامل در مدل RUSLE نشان داد که میزان فرسایش سالانه خاک (A) در حوضه قوری‌چای بین ۰ تا ۳۷/۱۸ تن بر هکتار در سال متغیر است. بیش‌ترین شدت فرسایش در بخش‌های غربی، شمال‌شرقی و برخی مناطق مرکزی مشاهده شد که ناشی از هم‌زمانی شیب زیاد، پوشش گیاهی ضعیف، فرساینده‌گی بالای باران و بافت خاک حساس است. برای بررسی روابط بین شاخص‌های محیطی و فرسایش خاک، از ۵۰۰ نقطه نمونه‌برداری تصادفی در سطح حوضه استفاده شد که به‌طور یکنواخت و بدون سوگیری در محیط GIS استخراج گردیدند. مقادیر مدل RUSLE و شاخص‌های محیطی در این نقاط استخراج و سپس با آزمون همبستگی پیرسون و رگرسیون خطی تحلیل شدند. نتایج تحلیل آماری نیز نشان داد که از میان شاخص‌های محیطی، شیب با ضریب همبستگی (۰/۳۳) و ضریب تعیین (۰/۱۱) بیش‌ترین ارتباط را با فرسایش خاک دارد. شاخص‌های توان آبراهه با (۰/۲۰) و پوشش گیاهی با (۰/۲۲) نیز همبستگی مثبت و معنادار داشتند، اما شاخص‌های رطوبت توپوگرافی با (۰/۰۲) و انحنای دامنه با (۰/۰۵-) فاقد ارتباط معنادار بودند. این نتایج بیانگر اهمیت کنترل فرسایش در اراضی شیب‌دار و مدیریت جریان‌های سطحی در آبراهه‌ها است. با توجه به نتایج به دست آمده، پیشنهاد می‌شود که مدیریت فرسایش خاک در حوضه قوری‌چای بر اساس اولویت‌بندی مناطق پرخطر انجام شود. این مناطق شامل بخش‌هایی با شیب بالا، پوشش گیاهی ضعیف، فرساینده‌گی باران زیاد و بافت خاک حساس هستند. اقدامات پیشنهادی شامل تثبیت و احیای پوشش گیاهی به ویژه در دامنه‌ها و حاشیه آبراهه‌ها، استفاده از روش‌های مدیریت بهینه کاربری اراضی، احداث تراس‌بندی و کاهش سرعت رواناب از طریق ایجاد موانع طبیعی و مصنوعی است. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب مدل RUSLE با تحلیل شاخص‌های محیطی و استفاده از داده‌های سنجش از دور و GIS ابزاری کارآمد برای شناسایی و مدیریت مناطق مستعد فرسایش خاک فراهم می‌آورد. این رویکرد نه تنها امکان برنامه‌ریزی دقیق‌تر اقدامات حفاظتی را فراهم می‌کند، بلکه به سیاست‌گذاران و مدیران منابع طبیعی کمک می‌کند تا با تخصیص بهینه منابع، اثرگذاری اقدامات حفاظتی را به حداکثر برسانند و از تخریب بیش‌تر منابع خاک در حوضه‌های آبخیز جلوگیری کنند.

منابع

۱. احمدی لمراسکی، رضا و دیگران (۱۴۰۳). شبیه‌سازی سناریوهای عملیات بیولوژیکی حفاظت خاک بر تغییرات فرسایش با استفاده از مدل RUSLE (حوزه آبخیز مرگاو-بخش فریم استان مازندران). *انجمن آبخیزداری ایران*. ۶۴ (۱۸)، ۲۸-۱۵.
۲. احمدی، حسین (۱۳۸۸). *ژئومورفولوژی کاربردی (فرسایش آبی)*. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
۳. آرخی، صالح؛ نیازی، یعقوب (۱۳۸۹). بررسی کاربرد GIS و RS برای تخمین فرسایش خاک و بار رسوب با استفاده از مدل RUSLE (مطالعه موردی: حوضه بالادست سد ایلام). *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*. ۱۷ (۲)، ۲۷-۱.
۴. داودی، شکوفه؛ غفاری، حیدر؛ فرخیان فیروزی، احمد (۱۴۰۳). برآورد مکانی فرسایش و رسوب در محیط GIS با استفاده از مدل SEDD و RUSLE در حوزه آبخیز رودزرد استان خوزستان. *انجمن آبخیزداری ایران*. ۶۶ (۱۸)، ۷-۱.

۵. شگر خدایی، سیده زینب؛ فتح‌نیا، امان‌اله؛ هاشمی دره‌بادامی، سیروس (۱۴۰۲). بررسی ارتباط آلاینده‌های هوا با شاخص‌های سنجش از دور LST، NDBI، NDVI و ATI در شهر تهران. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۱۲ (۳)، ۱۴۴-۱۲۳.
۶. عابدینی، موسی؛ پاسبان، امیرحسام (۱۴۰۳). تجزیه و تحلیل و پهنه‌بندی میزان فرسایش خاک و ارتباط آن با شاخص‌های هیدروژئومورفیک و پوشش گیاهی، مطالعه موردی: حوضه آبریز خیاوچای، مشکین‌شهر. *هیدروژئومورفولوژی*. ۱۰ (۳۵)، ۵۹-۱۹.
۷. غلامی، لیلا و دیگران (۱۴۰۳). ارزیابی اثر تغییر کاربری اراضی بر فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE در حوزه آبخیز چرداول ایلام. *انجمن آبخیزداری ایران*. ۶۵ (۱۸)، ۱-۱۱.
۸. قادری‌دهکردی، نگین و دیگران (۱۴۰۴). تحلیل تغییرات فرسایش خاک و تولید رسوب در یک قرن اخیر در حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان. *مهندسی و مدیریت آبخیز*. ۱۷ (۱)، ۱-۱۳.
۹. قربان‌نیا، وجیهه؛ آرمین، محسن (۱۴۰۳). تجزیه و تحلیل اقتصادی فرسایش خاک در حوزه آبخیز نهضت آباد در شهرستان کهگیلویه. *جغرافیا و مطالعات محیطی*. ۱۳ (۵۰)، ۳۶-۲۴.
۱۰. کلارستاقی، عطاله و دیگران (۱۳۸۷). پیش‌بینی تغییرات احتمالی کاربری جنگل به دیم کاری با استفاده از مدل‌سازی احتمالاتی در حوزه آبخیز فریم صحرا-استان مازندران. *پژوهش و سازندگی*. ۲۱، ۶۲-۵۲.
۱۱. گرشاسبی، فاطمه؛ جوکار سرهنگی، عیسی (۱۴۰۳). بررسی تاثیر تغییرات کاربری اراضی و بارش بر میزان فرسایش خاک در حوضه اوارد نکارود. *پژوهش‌های فرسایش محیطی*. ۵۳ (۱۴)، ۱۲۰-۱۰۴.
۱۲. محمدی، شاهین؛ کریم‌زاده، حمیدرضا؛ علیزاده، میثم (۱۳۹۷). برآورد مکانی فرسایش خاک کشور ایران با استفاده از مدل RUSLE/کوهیدروولوژی. ۵ (۲)، ۵۶۹-۵۵۱.
۱۳. مددی، عقیل؛ اصغری سراسکانرود، صیاد؛ حاجت‌پور قلعه رودخانی، حسین (۱۴۰۳). بررسی تغییرات کاربری اراضی با تاکید بر پوشش جنگلی و اثرات آن بر فرسایش خاک با استفاده از طبقه‌بندی شی گرا و تکنیک چندمعیاره مارکوس مطالعه موردی: حوضه آبریز قلعه رودخان فومن. *هیدروژئومورفولوژی*. ۳۹ (۱۱)، ۱۶۴-۱۴۱.
۱۴. مددی، عقیل و دیگران (۱۳۹۹). پهنه‌بندی خطر سیلاب در حوضه آبریز قوری‌چای کورائیم در استان اردبیل. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*. ۹ (۲)، ۹۷-۸۱.
۱۵. مددی، عقیل؛ شریفی، زهرا (۱۴۰۳). تلفیق شاخص‌های ژئومورفومتری و پوشش گیاهی برای برآورد خطر فرسایش خاک در حوضه آبخیز سامیان، استان اردبیل. *جغرافیا و روابط انسانی*. 10.22034/gahr.2024.451130.2083.
16. Aneseyee, A.B. et al (2020). Land use/land cover change effect on soil erosion and sediment delivery in the Winike watershed, Omo Gibe Basin, Ethiopia. *Science of the Total Environment*. 728, 138776.
17. Bharath, A. et al (2021). Drainage morphometry based sub-watershed prioritization of Kalinadi basin using geospatial technology. *Environmental Challenges*. 5, 100277.
18. Birhanu, L. et al (2024). Impact of land use and land cover change on soil erosion in Dondor Watershed, Blue Nile Basin, Northwestern Ethiopia. *Sustainability*. 16 (23), 10421.
19. De Crop, W. et al (2023). Accelerated soil erosion and sedimentation associated with agricultural activity in Crater-Lake Catchments of Western Uganda. *Land*. 12 (5), 976.
20. Ma, S. et al (2023). Impacts of land use/land cover and soil property changes on soil erosion in the black soil region, China. *Environ Manag*. 328, 117024.
21. Margiorou, S.; Kastridis, A. & Sapountzis, M. (2022). Pre/post-fire soil erosion and evaluation of check-dams effectiveness in Mediterranean Suburban catchments based on field measurements and modeling. *Land*. 11, 1705.
22. Merchan, L. et al (2023). Water erosion risk analysis in the Arribes del Duero natural park (Spain) using RUSLE and GIS techniques. *Sustainability*. 15 (2), 1627.
23. Moore, I.D. & Grayson, R.B. (1991). Landson. digital terrain modeling: A review of hydrological, geomorphological and biological application. *Hydrol*. 5, 3-30.
24. Mukanov, Y. et al (2019). Estimation of annual average soil loss using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) integrated in a Geographical Information System (GIS) of the Esil River basin (ERB), Kazakhstan. *Acta Geophys*. 67, 921-938.

25. Othman, A.A. et al (2023). Insights for estimating and predicting reservoir sedimentation using the RUSLE-SDR approach: A case of Darbandikhan Lake Basin, Iraq–Iran. *Remote Sens.* 15, 697.
26. Pradhan, B. et al (2012). Soil erosion assessment and its correlation with landslide events using remote sensing data and GIS: A case study at Penang Island, Malaysia. *Environmental monitoring and assessment.* 184 (2), 715-727.
27. Renard, K.G. et al (1996). Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agriculture handbook.* 703.
28. Renard, K.G. & Freidmund, J.R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the RUSLE, National Agricultural Library. *Journal of Hydrology.* 157, 287-306.
29. Sengupta, S.; Mohinuddin, S. & Arif, M. (2021). Sub-watershed prioritization for soil erosion potentiality estimation in tenughat catchment, India. *Geocarto International.* 16. 1-30.
30. Serbaji, M.M.; Bouaziz, M. & Weslati, O. (2023). Soil water erosion modeling in Tunisia using RUSLE and GIS integrated approaches and Geospatial Data. *Land.* 12 (3), 548.
- Sharma, A., (2010). Integrating terrain and vegetation indices for identifying potential soil erosion risk area. *Geo-Spatial Information Science.* 13 (13), 201-209.
31. Wischmeier, W.H. & Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning Department of Agriculture, *Science and Education Administration.*
- Wondie, M. & Mekuria, W. (2018). Planting of *Acacia decurrens* and dynamics of land cover change in Fagita Lekoma district in the Northwestern highlands of Ethiopia. *MtRes Dev.* 38, 230–239.