



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مندان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

ارزیابی کارایی مدل‌های G2 و IntErO در برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب سالانه در آبخیز معرف کسلیان، استان مازندران

فائزه کمری یکدانگی^۱، عبدالواحد خالدی درویشان^{۲*}، سهیلا آقابگی امین^۳

- ۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران
 ۲ - (نویسنده مسئول) دانشیار، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران
 ۳ - استادیار، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

در سال‌های اخیر فرسایش خاک و تولید رسوب تهدیدی جدی برای امنیت غذایی به‌شمار می‌آید. در بسیاری از کشورها به منظور مدیریت و پیشگیری از فرسایش خاک و تولید رسوب پژوهش‌های پرشماری انجام شده است. با توجه به لزوم آگاهی از اندازه‌ی فرسایش و رسوب‌دهی در آبخیزها، این پژوهش با هدف برآورد اندازه‌ی فرسایش و رسوب آبخیز معرف کسلیان با استفاده از مدل‌های تجربی انجام شد. همچنین مدل‌های تجربی با داده‌های مشاهده‌ای، ارزیابی و مقایسه شدند.

مواد و روش‌ها

برای برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب در آبخیز معرف کسلیان در استان مازندران از دو مدل G2 و IntErO استفاده شد. سپس با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای و منحنی سنج‌های رسوب ایستگاه آب‌سنجی ولیک‌بن در خروجی آبخیز، تولید رسوب ویژه‌ی سالانه محاسبه شده و نتایج مدل‌ها ارزیابی شد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a.khaledi@modares.ac.ir

استناد: کمری یکدانگی، ف.، خالدی درویشان، ع.، آقابگی امین، س. ۱۴۰۳. ارزیابی کارایی مدل‌های G2 و IntErO در برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب سالانه در آبخیز معرف کسلیان، استان مازندران. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۷ (۲): ۷۳-۵۵.

شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/wmrj.2023.362025.1539

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۰، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۳۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱
 پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۳، دوره‌ی ۳۷، شماره ۲، شماره‌ی پیاپی ۱۴۳، تابستان ۱۴۰۳، صفحه‌های ۵۵ تا ۷۳

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



نتایج و بحث

در این آبخیز، نتایج مدل‌های G2 و IntErO اندازه‌ی فرسایش خاک را به ترتیب ۱/۳۰ و ۲/۳۵ تن بر هکتار در سال نشان داد. همچنین، رسوب ویژه‌ی سالانه با مدل‌های G2 و IntErO به ترتیب ۰/۴۴، ۰/۸۴ تن بر هکتار در سال برآورد شد و داده‌های مشاهده‌ای ۰/۱۶ تن بر هکتار در سال به دست آمد. در این آبخیز نتایج مدل G2 نشان داد که عامل نگهداشت پوشش گیاهی در مقایسه با عامل فرساینده‌ی باران تأثیر بیشتری بر فرسایش داشت. بیشتر مناطق آبخیز به دلیل نوع پوشش گیاهی در طبقه‌ی فرسایشی خیلی کم بود. نتایج مدل IntErO نشان داد که کشیدگی و شیب تند دامنه‌های آبخیز سبب شد بیشینه‌ی جریان خروجی در دوره‌ی بازگشت ۲۰ سال ۱۳۷/۸۱ مترمکعب بر ثانیه باشد. همچنین فرسایش غالب در این آبخیز از نوع فرسایش سطحی بود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش مدل‌های تجربی بررسی شده نتایجی مشابهی را نشان دادند. بر پایه‌ی تغییرات کاربری در آبخیز معرف کسلیان اندازه‌های برآوردی فرسایش و تولید رسوب سالانه قابل قبول و منطقی بود، اما تفاوت نتایج با داده‌های مشاهده‌ای بسیار زیاد بود و این یافته نشان‌دهنده‌ی کارایی کم مدل‌ها بود. اما شایان ذکر است که در این آبخیز نامناسب بودن فاصله‌های زمانی نمونه‌برداری آب‌دهی و رسوب، دلیل بسیار مهمی برای کم بودن اندازه‌ی رسوب‌دهی سالانه مبتنی بر داده‌های مشاهده‌ای بود. به عبارت دیگر، فاصله‌های اندازه‌گیری روزانه در این آبخیز کوچک موجب شد تا داده‌های واقعی غلظت رسوب هم‌زمان با ساعات سیلابی یا آب‌دهی‌های اوج که بیشترین انتقال رسوب را داشتند، برداشت نشود. برای حل این مشکل در آبخیزهای کوچک پیشنهاد می‌شود نمونه‌برداری در فاصله‌های زمانی کوتاه‌تر (چندین بار در روز و یا حتی ساعتی) انجام شود تا غلظت‌های زیاد رسوب هم‌زمان با آب‌دهی‌های زیاد نمونه‌برداری شود و در محاسبه‌ی رسوب‌دهی لحاظ شود.

واژگان کلیدی: استان مازندران، رسوب‌دهی ویژه، فرسایش‌پذیری خاک، فرساینده‌ی باران، نسبت تحویل رسوب، هدررفت خاک

مقدمه

۲۰۱۹، ساگا و همکاران ۲۰۲۱، بیلی و اسپالویچ ۲۰۲۲، لنس و همکاران ۲۰۲۲). اثرهای منفی فرسایش در محل رخداد نه تنها در دامنه‌ها و زمین‌های زراعی به شکل کاهش مواد آلی و توان تولیدی، از دست دادن مواد مغذی (موتازو و همکاران ۲۰۲۳) و نابودی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک پدیدار می‌شود، بلکه در محل خارج از رخداد نیز انباشت رسوب روی زمین‌های مرغوب کشاورزی، مراتع، منابع ذخیره آب و نه‌های آبیاری و ایجاد آلودگی با رسوبات، فلزات سنگین و مواد شیمیایی همراه آن امروزه بیش از هر زمان دیگری قابل مشاهده است (کاریداس و پاناگوس ۲۰۱۸) و می‌تواند پایداری کشاورزی و امنیت غذایی نسل کنونی و آینده را به خطر بیندازد (توارس و همکاران ۲۰۲۱). در سراسر جهان، آگاهی داشتن از فرسایش و حفاظت خاک، به منظور تصمیم‌گیری و طرح‌ریزی امور زیست محیطی (موتازو و همکاران ۲۰۲۳) به شکل چشم‌گیری گسترش یافته است (بارفورد و همکاران ۲۰۰۱، لال و همکاران ۲۰۰۳). لازم‌هی ارائه راهکارها و برنامه‌های مناسب برای مهار فرسایش و حفاظت خاک، اطلاعات پایه‌ای برای شناسایی و درک دقیق عامل‌های موثر بر نابودی منابع خاک و آب است (صادقی ۲۰۱۱).

از طرف دیگر، در کشورهای در حال توسعه از جمله ایران،

در جهان رخداد بیابان‌زایی و نابودی خاک با چالش‌های بوم‌شناختی، اجتماعی-اقتصادی، سیاسی و فرهنگی در دو مقیاس منطقه‌ای و محلی همراه است (استریچکر ۲۰۰۵، هلمینگ و همکاران ۲۰۱۱، دراگانیک و همکاران ۲۰۱۶). از عامل‌های اصلی تشدید آن می‌توان به افزایش جمعیت، استفاده بیش از حد از زمین (انصاری لاری و انصاری ۲۰۱۷، بالویی ۲۰۲۱)، افزایش دخالت انسان در بوم‌سازگان‌های طبیعی (فتح‌الله‌زاده و ثروتی ۲۰۱۲) و افزایش تقاضای محصولات کشاورزی و در نهایت تغییر کاربری زمین اشاره کرد (محمدی و همکاران ۲۰۲۱). در سطح جهان و ایران فرسایش خاک یک مشکل رو به افزایش و جدی است (دراگانیک و همکاران ۲۰۱۶) و خسارت‌های جبران‌ناپذیری بر بوم‌سازگان‌ها و شرایط مدیریتی حاکم بر آن وارد می‌کند (نور و عرب‌خدری ۲۰۲۰). در ایران برای اندازه‌ی فرسایش برآوردهای گوناگونی وجود دارد، اما تاکنون در این باره به توافق جمعی نرسیده‌اند؛ اما پژوهشگران درباره‌ی افزایش بیش از حد مجاز اندازه‌ی فرسایش هم‌عقیده هستند (عرب‌خدری ۲۰۱۴، نور و همکاران ۲۰۲۳). در این زمینه فرسایش آبی اهمیت بیشتری دارد. فرسایش خاک به وسیله‌ی آب یک نگرانی اولیه در نابودی خاک شناخته‌شده است (چالیس و همکاران

(SSY) (SDR) ۰/۲۶ و میانگین سالانه رسوب ویژه‌ی (SSY) ۳/۳۲ تن بر هکتار در سال بود. در کل ایران محمدی و همکاران (۲۰۲۱) پایش مکانی-زمانی فرسایش خاک را انجام دادند. در استان ایلام، بالویی (۲۰۲۱) اندازه‌ی فرسایش خاک را با استفاده از مدل G2 برآورد کرد. در آبخیز شیرین‌دره، خالدی‌درویشان و همکاران (۲۰۱۹) فرسایش خاک، رسوب بازده و بیشینه خروجی، با استفاده از مدل IntErO را ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که اندازه‌ی فرسایش، متوسط و از نوع سطحی بود و اوج آب‌دهی ۱۳/۵۱ مترمکعب بر ثانیه با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰ ساله بود. در پژوهشی خالدی‌درویشان و همکاران (۲۰۱۸) در آبخیز خامسان برای پیش‌بینی اندازه‌ی فرسایش خاک و اندازه‌ی رسوب از مدل IntErO استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که طبقه‌ی فرسایش، متوسط بود. همچنین این پژوهشگران داده‌های پیش‌بینی‌شده‌ی رسوب را با اندازه‌های مشاهده‌ای آن مقایسه کردند. و این یافته نشان‌دهنده‌ی عملکرد صحیح مدل بود. در پژوهشی کله‌هوئی و همکاران (۲۰۲۰) فرسایش خاک در آبخیز شازند را به‌وسیله‌ی مدل IntErO ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که ضریب ذاتی فرسایش در آبخیز ۰/۵۵ بود که بیان‌گر فرسایش شدید در این آبخیز بود. آرمین و همکاران (۲۰۲۱) در دو آبخیز دشت‌روم (منطقه‌ی بویراحمد) و کره (منطقه‌ی دنا) برای تعیین اندازه‌ی فرسایش و جریان خروجی، از بسته‌ی نرم‌افزاری مدل تحلیلی IntErO استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که در آبخیز دشت‌روم اندازه‌ی فرسایش کم و فرسایش غالب، از نوع عمیق بود. همچنین، در آبخیز کره، اندازه فرسایش متوسط و فرسایش غالب از نوع سطحی بود. آبخیز دشت‌روم به‌دلیل نسبت کمتر تحویل رسوب در مقایسه با آبخیز کره تولید رسوب کمتری نیز داشت. برپایه‌ی نتایج پژوهش‌های پیشین، در ایران برآورد رسوب با استفاده از مدل G2sed بررسی و مستند نشده‌است. از آنجایی که آگاهی از اندازه‌ی فرسایش و تولید رسوب در آبخیزها به‌منظور برآورد حجم و هزینه‌ی عملیات آبخیزداری، مبحث بسیار مهم و ضروری است، استفاده از امکانات و فناوری‌های نوین برای جمع‌آوری اطلاعات در این راستا نیز اجتناب‌ناپذیر است. از این رو، این پژوهش در آبخیز معرف کسلیان استان مازندران، با هدف برآورد اندازه‌ی فرسایش و تولید رسوب با استفاده از مدل G2 و IntErO انجام شد. سپس، نتایج به‌دست آمده با داده‌های مشاهده‌ای مقایسه و سنجش شدند.

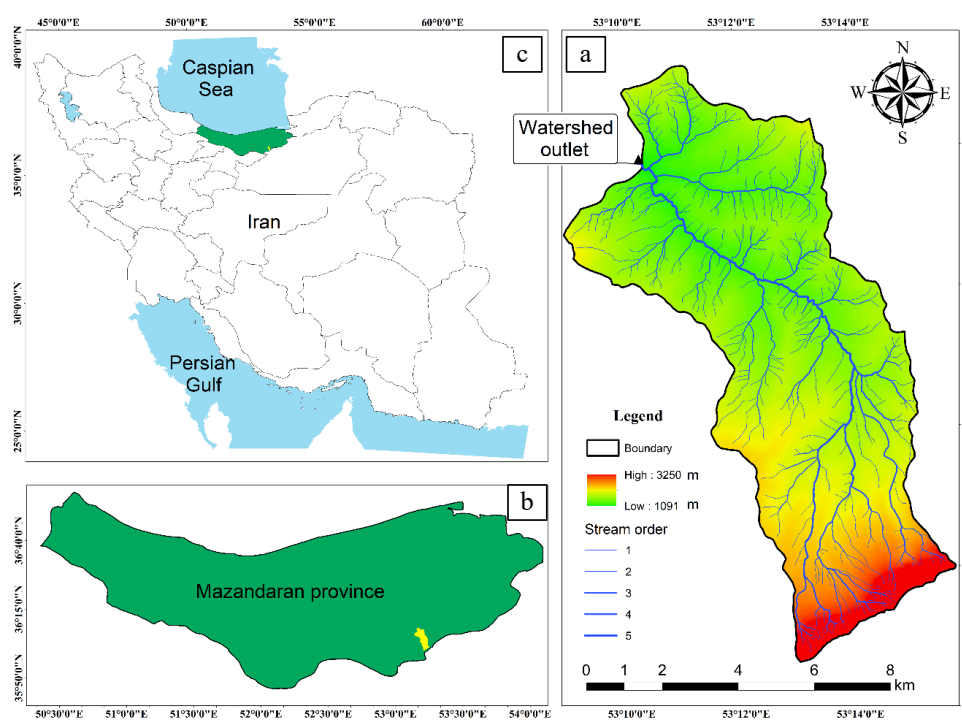
مهم‌ترین مشکل برای مطالعه و برآورد اندازه‌ی فرسایش و تولید رسوب، کمبود آمار و اطلاعات مناسب و نبودن ایستگاه‌های اندازه‌گیری است (آرمین و همکاران ۲۰۲۱). روش‌های سنتی با هزینه و وقت‌گیر است (البرادیا و همکاران ۲۰۱۱). از این رو، مدل‌های تجربی برای برآورد فرسایش و رسوب به‌کار برده شده‌است. در دهه‌های اخیر، مدل‌ها برای افزایش دانش و درجه‌ی تاب‌آوری در حل مشکلات مزبور توسعه یافته‌اند (تانیاس و همکاران ۲۰۱۵). یکی از این مدل‌های توسعه‌یافته مدل G2 بود. این مدل بر اساس معادله‌ی جهانی اصلاح‌شده هدررفت خاک (RUSLE) برای فرسایش خاک پیشنهاد شد. همچنین، روش فرسایش بالقوه (EPM) برای تولید رسوب و برای حل مشکلات مدل‌های مزبور ارائه شد (کله و وادسولا ۲۰۱۲). مدل توسعه‌یافته‌ی دیگر مدل IntErO بود که برای پیش‌بینی اندازه‌ی فرسایش خاک، رسوب ویژه‌ی سالانه و بیشینه‌ی جریان خروجی از آبخیز به‌کار برده شد (صبری و همکاران ۲۰۱۹، کله‌هوئی و همکاران ۲۰۲۰). این مدل نیز بر پایه‌ی روش فرسایش بالقوه خاک بود (اسپالویچ ۲۰۱۹) که نسخه‌ی کامل و نسل دوم برنامه‌ی اندازه‌گیری فاصله و سطح (اسپالویچ و همکاران ۱۹۹۹) و برنامه‌ی آبخیز (اسپالویچ و همکاران ۲۰۰۰) بود. در راستای استفاده از مدل‌های تجربی مزبور پژوهش‌های پرشماری در داخل و خارج از کشور انجام شده‌است. در جنوب استرالیا جینیو و همکاران (۲۰۲۱) نقشه‌ی تغییرات مکانی و زمانی فرسایش خاک را با استفاده از مدل G2 برای بازه‌ی زمانی ۲۰۱۷-۲۰۰۱ تهیه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که اگرچه میانگین فرسایش سالانه در دوره‌ی مطالعه‌شده نسبتاً کم بود، اما، فرسایش در بخش‌هایی از منطقه بیشترین تأثیر را گذاشته بود. پولووینا و همکاران (۲۰۲۱) در منطقه‌ی شهری بلگراد صربستان، فرسایش خاک را با مدل G2 برآورد و ارزیابی کردند. افزایش میانگین فرسایش خاک در مناطق طبیعی و نیمه‌طبیعی در دوره‌ی مطالعه‌شده به‌وسیله‌ی این پژوهشگران، به‌ترتیب ۱۶/۱۴٪ و ۴۳/۲۹٪ بود. کاریداس و همکاران (۲۰۲۰) در آبخیز رود کاندلارو نقشه‌ی زمانی و مکانی فرسایش خاک را با استفاده از مدل G2 و تصویرهای ماهواره‌ی سنتینل ۲ در مقیاس‌های زمانی ماهانه و سالانه تهیه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که میانگین سالانه‌ی فرسایش خاک ۰/۸۷ تن بر هکتار بود. در قبرس، کاریداس و پانگوس (۲۰۱۶) فرسایش خاک و تولید رسوب ماهانه را مدل‌سازی کردند. در این پژوهش نتایج به‌دست آمده از مدل G2 نشان داد که میانگین نسبت تحویل رسوب

میروزاد و گلراد و از غرب به کوه گوتجا محدود می‌شود (درخشان ۲۰۱۱). در این آبخیز کمینه و بیشینه‌ی بلندی به ترتیب ۱۰۹۱ و ۳۲۵۰ متر از سطح دریا است. میانگین بارندگی در این آبخیز ۷۹۱ میلی‌متر است (جانی‌زاده و وفاخواه ۲۰۲۱). این آبخیز بر اساس طبقه‌بندی دومارتن اقلیم نیمه‌مرطوب تا بسیار مرطوب دارد (صادقی و همکاران ۲۰۰۷). موقعیت منطقه‌ی مطالعه‌شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه‌ی پژوهش

آبخیز معرف کسلیان یکی از سرشاخه‌های رود تالار است و در بلندی‌های ناحیه‌ی مرکزی سلسله کوه‌های البرز در استان مازندران است. این آبخیز در محدوده‌ی جغرافیایی $53^{\circ}08'$ تا $53^{\circ}15'$ طول شرقی و $35^{\circ}58'$ تا $36^{\circ}07'$ عرض شمالی با وسعت ۶۸/۷۴۷ کیلومتر مربع است (سعادت‌ی و همکاران ۲۰۰۶) که از شمال به کوه‌های ستیک و چهارتب، از شرق به کوه چهارتب، از جنوب به کوه‌های



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آبخیز معرف کسلیان (a) در استان مازندران (b) و ایران (c).
Figure 1- Geographical location of Kasilian representative watershed (a) in Mazandaran province (b), Iran (c).

است (کاریداس و پاناگوس ۲۰۱۸). از مزایای مدل G2 می‌توان به داشتن ترکیبی از قابلیت‌های دو مدل EPM و RUSLE، معرفی یک متغیر اصلاحی برای اثر پستی‌بلندی و در نظر گرفتن سنجه‌های مؤثر کاربری زمین اشاره کرد. افزون بر این، پایه‌ریزی اولیه و ساختار مدل برای استفاده از سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی (GIS) و به‌ویژه کاربرد گسترده‌ی تصویرهای ماهواره‌ای و سنجش از دور برای تهیه ورودی‌های لازم برای مدل سبب‌شده که بتوان از آن برای سال‌های متوالی و در مناطق وسیع استفاده کرد (محمدامینی و همکاران ۲۰۱۶). بنابراین، این مدل در زمینه‌ی برآورد اندازه‌ی فرسایش و رسوب در مقیاس‌های گوناگون زمانی (ماهانه، فصلی و سالانه) یکی از مدل‌های کارآمد شناخته شده‌است (پاناگوس و همکاران

روش پژوهش

در این پژوهش به‌منظور برآورد اندازه‌ی فرسایش و تولید رسوب از دو مدل G2 و IntErO که از مدل‌های توسعه‌یافته و نوین هستند، استفاده شد. اندازه‌ی فرسایش و رسوب سالانه‌ی آبخیز معرف کسلیان در سال ۲۰۲۱ برآورد شد. سپس با استفاده از داده‌های رسوب اندازه‌گیری‌شده در خروجی آبخیز در ایستگاه آب‌سنجی ولیک‌بن، تولید رسوب سالانه‌ی آبخیز محاسبه شد. سرانجام، نتایج دو مدل ارزیابی و مقایسه شدند.

مدل G2loss

مدل G2 یک مدل تجربی با دو بخش مجزا برای برآورد فرسایش خاک (G2loss) و برآورد بار رسوب (G2sed)

۲۰۱۴). در مدل G2loss پنج عامل ورودی در یک معادله‌ی جبری (رابطه‌ی ۱) ترکیب و اندازه‌ی فرسایش کمی برآورد می‌شود.

$$E = \left(\frac{R}{V}\right) \cdot S \cdot \left(\frac{T}{I}\right) \quad (1)$$

E: اندازه‌ی خاک برداشت‌شده از یک سطح مشخص در طول یک دوره‌ی زمانی معین (تن بر هکتار)، R: عامل فرسایش‌دگی باران برای یک دوره‌ی زمانی خاص (مگاژول میلی‌متر بر هکتار ساعت)، V: عامل نگهداشت پوشش گیاهی (بدون بعد)، S: عامل فرسایش‌پذیری خاک (تن هکتار ساعت بر هکتار مگاژول میلی‌متر)، T: عامل پستی‌بلندی (بدون بعد) و I: عامل تضعیف شیب که تصحیح‌کننده‌ی عامل T است (بدون بعد).

عامل فرسایش‌دگی باران

فرسایش‌دگی باران شاخصی است که در بسیاری از مناطق جهان با هدر رفت خاک بیشترین ارتباط را دارد (بالویی ۲۰۲۱). در این پژوهش با استفاده از داده‌های میانگین سالانه‌ی بارندگی ۱۱ ایستگاه داخل و محدوده پیرامون آبخیز، نقشه رقمی ارتفاعی با دقت مکانی ۱۲/۵ متر تهیه شد. سپس، با استفاده از رابطه‌ی ۲ عامل فرسایش‌دگی

باران محاسبه شد.

$$R = 0.38 * P + 81.5 \quad (2)$$

عامل نگهداشت پوشش گیاهی

نگهداشت پوشش گیاهی با استفاده از شاخص بهنجار شده‌ی پوشش گیاهی (NDVI) به‌دست آمده از تصویر MODIS از روش Google Earth Engine محاسبه می‌شود. در این پژوهش، بیشینه‌ی اندازه‌ی NDVI فصلی از تصویرها به‌دست آمد. سپس میانگین NDVI چهار فصل به‌عنوان NDVI سالانه محاسبه شد و با استفاده از آن پوشش جزء گیاهی به‌دست آمد که به‌عنوان شاخص نهایی برای محاسبات استفاده شد. همچنین، براساس طبقه‌بندی پوشش گیاهی (پاناگوس و همکاران ۲۰۱۴) برای کاربری زمین متغیر تجربی (LU) در نظر گرفته شد. سرانجام، نقشه‌ی عامل نگهداشت پوشش گیاهی با ابعاد پیکسل ۲۵ متر به‌دست آمد. معادله‌ی نگهداشت پوشش گیاهی به شکل رابطه‌ی ۳ است.

$$V = e^{(LU * Fcover)} \quad (3)$$

اندازه‌های متغیر تجربی کاربری زمین در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- اندازه‌های متغیر تجربی LU در آبخیز معرف کسلیان.

Table 1- LU empirical variable in Kasilian representative watershed.

Landuse	LU Parameter
Agriculture	6
Forest	9
Rangeland	6
Residential area	9
Rock	1

عامل فرسایش‌پذیری خاک

در این پژوهش نقشه‌ی خاک با استفاده از نتایج آزمایشات آب‌سنجی، ماده‌ی آلی ۳۷ نمونه خاک برداشت‌شده از آبخیز و روش درون‌یابی عکس فاصله‌ی وزنی (IDW) تهیه شد. عامل فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از رابطه‌ی ۴ برآورد شد (کاریداس و پاناگوس ۲۰۱۶).

(۴)

$$S = 0.1317 * \left\{ \frac{[2.1 * 10^{-4} * M^{1.14} * (12 - OM) + 3.25 * (s - 2) + 2.5 * (P - 3)]}{100} \right\}$$

S: عامل فرسایش‌پذیری خاک، M: عامل بافت خاک

(مجموع سیلت و شن ریز بر حسب درصد)، OM: محتوای ماده‌ی آلی (بر حسب درصد)، S: وضعیت ساختمان خاک و P وضعیت نفوذپذیری است.

عامل پستی‌بلندی

برای محاسبه این عامل ابتدا با استفاده از مدل رقمی ارتفاعی با دقت مکانی ۱۲/۵ متر لایه‌های جهت جریان و سپس تجمع جریان تهیه شد. سپس، لایه‌ی شیب نیز با استفاده از مدل رقمی ارتفاعی تهیه شد. در این پژوهش معادله‌ی نهایی محاسبه‌ی عامل پستی‌بلندی به‌شکل رابطه‌ی ۵ به‌دست آمد.

آبخیز از بسته‌ی برنامه‌ی IntErO که یک مدل کامپیوتری-گرافیکی است، استفاده می‌شود (صبری و همکاران ۲۰۱۹). این مدل به عامل‌های مؤثر بر فرسایش در مقیاس یک آبخیز مانند دما، میانگین بارندگی سالانه، کاربری خاک، ویژگی‌های زمین‌شناسی و ... بستگی دارد (خالدی‌رویشان و همکاران ۲۰۱۷، صبری و همکاران ۲۰۲۲). ویژگی اساسی این مدل سادگی کاربرد آن در ارزیابی تعداد زیادی از داده‌های ورودی است (آرمین و همکاران ۲۰۲۰). کارایی مدل IntErO برای پیش‌بینی اوج خروجی، فرسایش خاک و عملکرد رسوب نیز ارزیابی شده است. نتایج این ارزیابی نشان داد که مدل IntErO می‌تواند در آبخیزهای با اندازه‌های گوناگون و با کاربری‌های گوناگون استفاده شود (اسپالویچ ۲۰۱۱، صبری و همکاران ۲۰۱۹).

در ابتدا این مدل برای اجرا نیازمند ۲۶ داده ورودی شامل ویژگی‌های هندسی، پستی‌بلندی، بیشینه‌ی جریان خروجی، آب‌شناسی، هواشناسی و اندازه‌ی فرسایش هماهنگ با استانداردهای لازم است. نخست به‌منظور برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب با استفاده از مدل IntErO، ویژگی‌های هندسی و آب‌شناختی آبخیز از لایه‌ی وکتوری مرز و آبراهه‌های آبخیز تعیین شد. سپس، خطوط پستی‌بلندی از نقشه‌ی DEM با دقت ۱۲/۵ متر به‌دست آمد. ورودی‌های عامل پستی‌بلندی تهیه شد. همچنین، ویژگی‌های نفوذپذیری آبخیز با استفاده از نقشه‌ی خاک منطقه تعیین شد. کاربری زمین نیز با استفاده از روش سنجش از دور (RS) و تصویر لندست ۸ در نرم‌افزار ENVI ۵.۶ با مدل شبکه‌ی عصبی^۱ تعیین شد. میانگین دمای سالانه با شیب دمایی موجود در بررسی‌های اجرایی منطقه با استفاده از نرم‌افزار ArcMap10.8 و نقشه‌ی DEM محاسبه شد. بلندای بارندگی سیل‌آسا از داده‌های بیشینه‌ی بارش ۲۴ ساعته ایستگاه هواشناسی محاسبه شد و سرانجام داده‌های نشان‌دهنده‌ی اندازه‌ی فرسایش خاک با اطلاعات موجود و دیدگاه کارشناسان جمع‌آوری و کامل شد.

از مزیت‌های این مدل می‌توان به قابل استخراج بودن اکثر ورودی‌ها برای اغلب آبخیزهای کشور، قابل فهم بودن تمام متغیرهای به‌کاربرده شده، در دسترس بودن نرم‌افزاری با همین نام برای کاربرد ساده‌تر و بهتر آن و هشدار دادن در هنگام ورود اطلاعات اشتباه در محاسبات اشاره کرد (حزبوی و همکاران ۲۰۱۹، محمدی و همکاران ۲۰۲۱).

$$T = \left(\frac{A_s}{22.13}\right)^{0.4} * \left(\frac{\sin B}{0.0896}\right)^{1.3} \quad (5)$$

T: عامل پستی‌بلندی و اندازه‌ی آن بزرگتر یا مساوی یک است (بدون بعد). A_S: تجمع جریان برحسب متر و شیب برحسب رادبان است.

عامل تعدیل شیب

لایه‌ی I، با استفاده از یک فیلتر سوبل (فیلتر شناسایی لبه بدون جهت) از تصویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ با وضوح ۱۰ متر تهیه شد. لایه‌ی SF، حاصل میانگین دو لایه‌ی سوبل عمودی و سوبل افقی است.

$$I = 1 + \sqrt{\frac{S_F}{DN_{Max}}} \quad (6)$$

SF: اندازه‌ی فیلتر سوبل تصویر در محدوده‌ی 0-DNmax است.

مدل G2sed

بخش دوم مدل، مربوط به برآورد بار رسوب است، در این بخش، از مفهوم و معادله‌ی نسبت تحویل رسوب در روش فرسایش بالقوه (EPM) استفاده شده است (کاریداس و پاناگوس ۲۰۱۸). در این پژوهش تولید رسوب ویژه با استفاده از رابطه‌ی ۷ محاسبه شد.

$$SSY = SDR \cdot E \quad (7)$$

SDR: نسبت تحویل رسوب و E: اندازه‌ی هدررفت خاک در دوره‌ی زمانی معین برحسب تن بر هکتار است. معادله‌ی اصلی محاسبه‌ی نسبت تحویل رسوب یک آبخیز به‌شکل رابطه‌ی ۸ ارائه شد.

$$SDR = \frac{\sqrt{P \cdot Z} \cdot (L_p + L_s)}{(L_p + 10)A} \quad (8)$$

P: محیط (کیلومتر)، Z: کمینه‌ی تفاوت بلندی از میانگین بلندی (کیلومتر)، L_p و L_s: به‌ترتیب طول کل بخش‌های جریان اولیه و ثانویه (کیلومتر) و A: مساحت سطح‌های برجسته (کیلومتر مربع) است.

مدل IntErO

اولین بار اسپالویچ از مدل IntErO استفاده کرد (اسپالویچ و همکاران ۲۰۱۳). برای برآورد اندازه فرسایش خاک و بیشینه‌ی جریان خروجی در مقیاس

داده‌های مشاهده‌ای

از آمار و اطلاعات سال‌های ۱۴۰۰-۱۳۸۰ مربوط به آب‌دهی روزانه و رسوب اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه آب‌سنجی ولیک‌بن (بخش خروجی آبخیز)، برای رسم منحنی و استخراج معادله‌ی سنجه‌ی رسوب استفاده شد. سپس، با معادله‌ی خطی به‌دست آمده و داده‌های آب‌دهی روزانه‌ی ایستگاه آب‌سنجی، اندازه‌ی رسوب روزانه محاسبه شد. سرانجام، کل رسوب تولیدی سالانه‌ی آبخیز معرف کسلیان به‌دست آمد و برای سنجش کارایی مدل‌های مزبور با رسوب تولیدی سال ۲۰۲۱ مقایسه شد.

نتایج و بحث

در این پژوهش نقشه‌ها و داده‌های ورودی لازم برای مدل‌های بررسی‌شده تهیه شد. فرسایش و رسوب در آبخیز معرف کسلیان به‌دست آمد و اندازه‌ی برآوردی هر دو مدل با داده‌های مشاهده‌ای و مطالعات پیشین مقایسه شد.

نتایج مدل G2

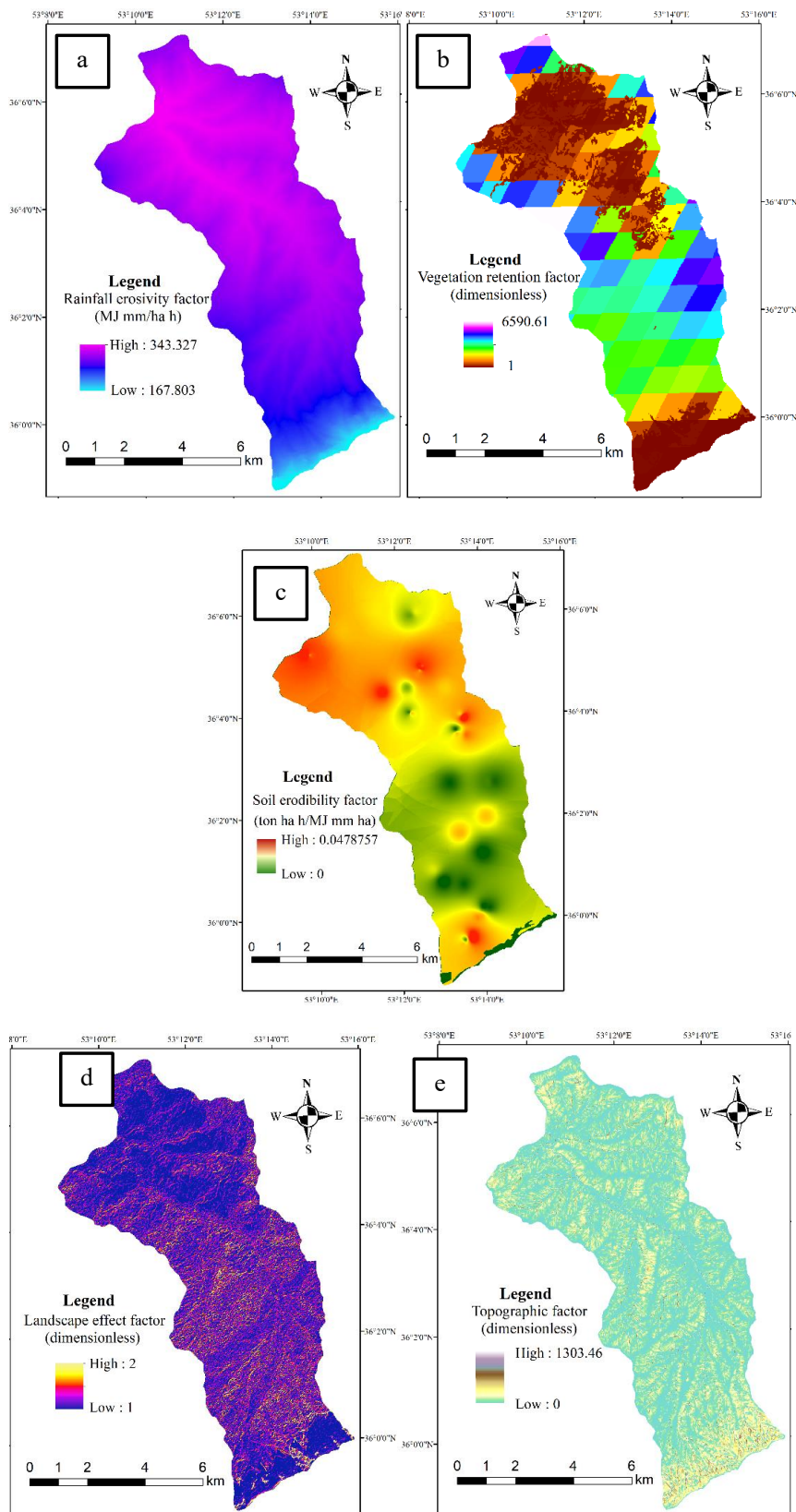
به‌منظور برآورد اندازه‌ی فرسایش و رسوب در آبخیز معرف کسلیان، با استفاده از مدل G2 نقشه‌های فرسایشی باران، نگهداشت پوشش گیاهی، فرسایش پذیری خاک،

پستی‌بلندی و عامل تعدیل شیب در مقیاس زمانی سالانه تهیه شد. عامل فرسایشی باران از ۱۶۷/۸ تا ۳۴۳/۳ مگاژول میلی‌متر بر هکتار سال متغیر بود. بیش‌ترین اندازه‌ی این عامل در مناطق خروجی آبخیز و کم‌ترین اندازه‌ی آن به‌دلیل نوع بارش در مناطق بالادست آبخیز بود. رابطه‌ی عامل نگهداشت پوشش گیاهی با فرسایش منفی بود. بیشینه‌ی اندازه‌ی این عامل در بخش‌های جنگلی با فرسایش کم بود. نقشه‌ی فرسایش‌پذیری خاک نیز با نتایج تجزیه‌ی ۳۷ نمونه خاک و با استفاده از نرم‌افزار ArcMap با روش‌های گوناگون درون‌یابی تهیه شد. در این راستا، با توجه به میانگین مربعات خطا (RMSE) و تطابق چشمی با کاربری‌های منطقه، روش IDW به‌عنوان مناسب‌ترین روش درون‌یابی، انتخاب شد (جدول ۲). تغییرات متفاوت عامل پستی‌بلندی که با استفاده از لایه‌ی شیب به‌دست آمد در بخش‌های گوناگون آبخیز از صفر تا ۱۳۰۳/۵ بود. در مدل G2 رابطه‌ی عامل تعدیل شیب همچون عامل نگهداشت پوشش گیاهی با اندازه‌ی فرسایش منفی بود. کمینه و بیشینه‌ی اندازه‌ی عامل تعدیل شیب به‌ترتیب ۱ و ۲ بود. نقشه‌های ورودی‌های مدل G2 در شکل ۳ نشان‌داده شده‌است.

جدول ۲- نتایج روش‌های گوناگون درون‌یابی برای تهیه‌ی نقشه‌ی فرسایش‌پذیری خاک در آبخیز معرف کسلیان.

Table 4- Results of different interpolation methods for soil erodibility mapping in Kasilian representative watershed.

No.	Method	RMSE
1	CoKriging	0.0124
2	Kriging	0.0119
3	IDW	0.0123



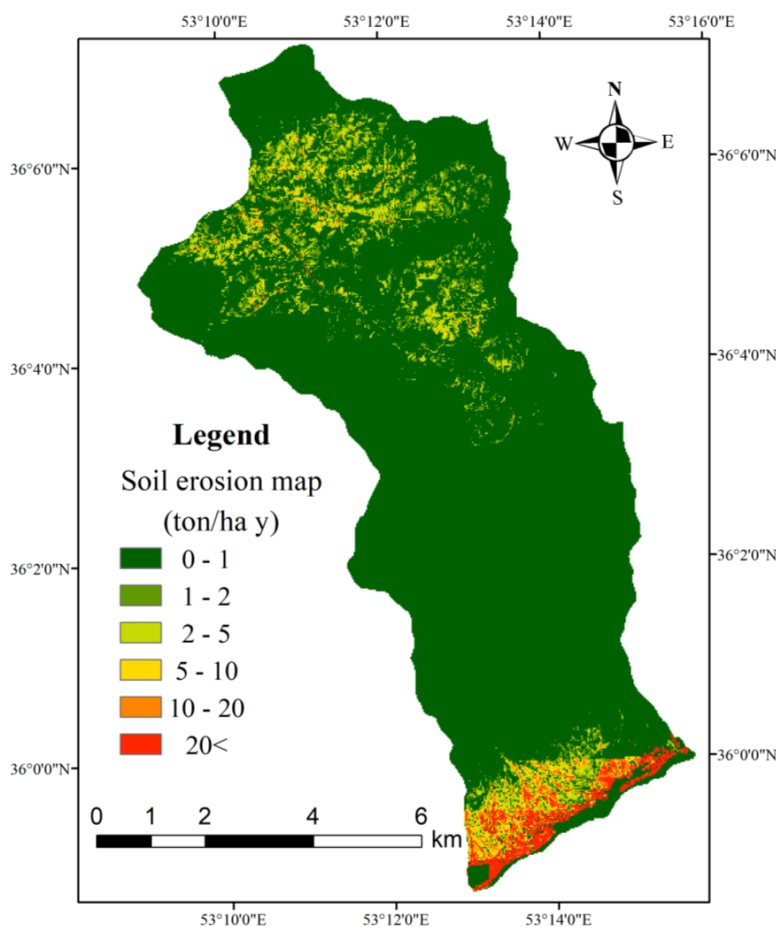
شکل ۳- نقشه‌های ورودی‌های مدل $G2_{loss}$ در آبخیز معرف کاسلیان؛ (a) عامل فرساینده باران، (b) عامل نگهداشت

پوشش گیاهی، (c) عامل فرسایش‌پذیری خاک، (d) عامل پستی‌بلندی و (e) عامل تعدیل شیب.

Figure 3- Input maps of the $G2_{loss}$ Model in Kasilian representative watershed; a) Rainfall erosion factor, b) Vegetation retention factor, c) Soil erodibility factor, d) Topographic factor, and e) Slope intercept factor.

همراه با پستی‌بلندی‌های خشن و پوشش گیاهی ضعیف مشاهده شد. از این رو، در بخش‌های پایین دست آبخیز به دلیل دخالت‌های انسانی لکه‌هایی با فرسایش بیش‌تر از ۱۰ تن بر هکتار در سال مشاهده شد. بر اساس نتایج این مدل، میانگین فرسایش در آبخیز مطالعه‌شده ۱/۳۰ تن بر هکتار در سال برآورد شد. با استفاده از مدل G2sed نیز، نسبت تحویل رسوب سالانه ۰/۳۴ محاسبه شد. سپس تولید سالانه‌ی رسوب ویژه ۰/۴۴ تن بر هکتار برآورد شد.

سرانجام مدل G2loss با استفاده از نقشه‌های پنج عامل مزبور اجرا شد و نقشه‌ی طبقه‌بندی فرسایش خاک در آبخیز بررسی شده به دست آمد (شکل ۴). بر پایه‌ی شکل ۴، فرسایش بخش‌های جنگلی آبخیز در کمترین طبقه ۰-۱ تن بر هکتار در سال بود، زیرا نوع کاربری و نبودن دخالت‌های انسانی بر دیگر عامل‌ها از جمله پستی‌بلندی، نوع بارش، دما، سازند و ... غالب بود. بیش‌ترین فرسایش نیز در بخش بالادست آبخیز (بلندی‌های جنوبی آبخیز)



شکل ۴- نقشه‌ی طبقه‌بندی فرسایش خاک (تن بر هکتار در سال) در آبخیز معرف کسلیان.

Figure 4- Soil erosion classification map ($\text{ton ha}^{-1}\text{y}^{-1}$) in Kasilian representative watershed.

طبقه‌ی IV بود. در آبخیز مطالعه‌شده با استفاده از مدل IntErO اندازه‌ی فرسایش کم به دست آمد. فرسایش غالب نیز از نوع سطحی بود. اندازه‌ی فرسایش سالانه‌ی خاک در آبخیز مطالعه‌شده ۲/۳۵ تن بر هکتار بود. همچنین، رسوب ویژه سالانه ۰/۸۴ تن بر هکتار در سال و نسبت تحویل رسوب ۰/۳۶ محاسبه شد. سرانجام، بر اساس طبقه‌بندی گاوریلوویچ، آبخیز معرف کسلیان با فرسایش بسیار ضعیف در طبقه‌ی V قرار گرفت.

نتایج مدل IntErO

ورودی‌ها و خروجی‌های لازم برای مدل IntErO در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. خروجی‌های مدل نشان‌دهنده‌ی کشیدگی شکل آبخیز و شیب تند آن بود. همچنین، در این آبخیز آب‌دهی اوج ۱۳۷/۸۱ مترمکعب بر ثانیه با دوره‌ی بازگشت ۲۰ ساله بود. ضریب فرسایش آبخیز ۰/۱۶۵ به دست آمد. اندازه‌ی این ضریب نشان‌دهنده‌ی قدرت نابودی و معادل با طبقه بندی روش EPM (عابدینی ۲۰۲۲) در

جدول ۳- متغیرهای ورودی مدل IntErO در آبخیز معرف کسلیان.

Table 4- Input variables for the IntErO Model in Kasilian representative watershed.

Input	Symbol	Value	Input	Symbol	Value
River basin area (km ²)	F	68.747	Natural length of the main watercourse (km)	Lv	17.433
The length of the watershed (km)	O	45.658	The area of the bigger river basin part (km ²)	Fv	41.11
River basin length measured by a series of parallel lines (km)	Lb	13.72	The area of the smaller river basin part (km ²)	Fm	27.64
		0.70			0.028
		16.89			2.987
Contour line length (km)	Liz	.	The area between the two neighboring contour lines (km ²)	Fiz	.
		.			.
		3.11			0.214
		0.77			0.037
Altitude of the first contour line (m)	h ₀	1100	The lowest river basin elevation (m)	Hmin	1091
Equidistance (m)	Δh	100	The highest river basin elevation (m)	Hmax	3250
A part of the river basin with very permeable rocks (%)	fp	74.24	A part of the river basin under forests (%)	fs	71.66
A part of the basin area consisted of medium permeable rocks (%)	fpp	1.004	A part of the basin under grass, meadows, pastures and orchards (%)	ft	15.20
A part of the basin consisted of poor water permeability rocks (%)	fo	24.74	A part of the basin under plough-land and without grass (%)	fg	13.14
The total length of the watercourse with tributaries of I&II classes (km)	ΣL	184.44	The shortest distance between the fountainhead and mouth (km)	Lm	7.187
The volume of the torrent rain (mm)	hb	104	Types of soil products and related types	Y	-
Average annual air temperature (°C)	T ₀	9.32	River basin planning, coefficient of the river basin planning	Xa	-
Average annual precipitation (mm)	hgod	733.3	Numeral equivalents of clearly exposed erosion process	φ	-

شکل ۵ نشان‌دهنده شده است. بر اساس معادله‌ی به‌دست آمده، رسوب تولیدی روزانه در سال ۲۰۲۱ برآورد شد و رسوب ویژه‌ی سالانه آبخیز معرف کسلیان ۰/۱۶۳ تن بر هکتار در سال محاسبه شد. شایان ذکر است که داده‌های مشاهده‌ای در طول بازه‌ی مزبور بسیار کم و در فاصله‌های زمانی نامنظم برداشت‌شده بودند. این موضوع منبع خطای به‌وجود آمده بود.

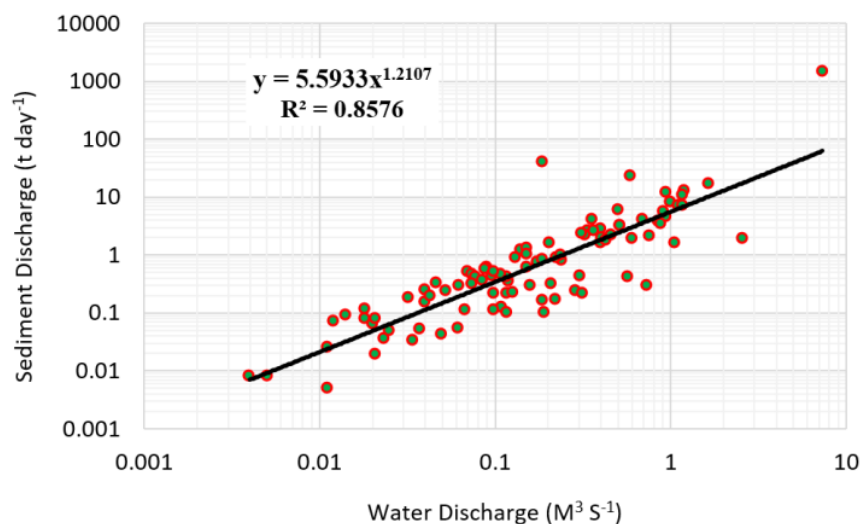
نتایج داده‌های مشاهده‌ای رسوب معلق

در این پژوهش به‌منظور ارزیابی کارایی مدل‌های G2 و IntErO از آمار رسوب معلق اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه ولیک‌بن در ۲۰ سال گذشته استفاده شد. در این راستا، ابتدا منحنی سنج‌ی رسوب بر اساس ۱۰۰ داده متناظر آب‌دهی و رسوب در دوره‌ی آماری ۱۳۸۵-۱۴۰۰ رسم شد. ضریب تبیین این منحنی ۰/۸۵ بود. منحنی سنج‌ی رسوب ایستگاه ولیک‌بن در

جدول ۴- نتایج خروجی مدل IntErO در آبخیز معرف کسلیان.

Table 4- Output results of the IntErO Model in Kasilian representative watershed.

Output	Symbol	Value	Output	Symbol	Value
Coefficient of the river basin form	A	0.51	Coefficient of the region's permeability	S ₁	0.55
Coefficient of the watershed development	m	0.59	Coefficient of the vegetation cover	S ₂	0.7
Average river basin width (km)	B	5.01	Analytical presentation of the water retention in inflow (m)	W	0.8511
symmetry of the river basin	a	0.39	Energetic potential of water flow during torrent rains (m km s ⁻¹)	2Gdf ^{1/2}	843.32
Density of the river network of the basin	G	2.68	Maximal outflow from the river basin (m ³ s ⁻¹)	Q _{max}	137.81
Coefficient of the river basin tortuousness	K	2.43	Temperature coefficient of the region	T	1.02
Average river basin altitude (m)	Hsr	1618.27	Coefficient of the river basin erosion	Z	0.165
Average elevation difference of the river basin (m)	D	527.27	Production of erosion material in the river basin (m ³ yr ⁻¹)	Wgod	10787.07
Average river basin decline (%)	Isr	33.89	Coefficient of the deposit retention	Ru	0.358
The height of the local erosion base of the river basin (m)	Hleb	2159	Real soil losses (m ³ yr ⁻¹)	Ggod	3858.64
Coefficient of the erosion energy of the river basin's relief	Er	238.67	Real soil losses per km ² (m ³ km ² yr ⁻¹)	Ggod/km ²	56.13



شکل ۵- منحنی سنج‌های رسوب ایستگاه آب‌سنجی ولیک‌بن.

Figure 5- Sediment rating curve of the Valikbon hydrometric station.

جدول ۵- مقایسه‌ی نتایج اندازه‌ی فرسایش و رسوب برآوردی با روش‌های گوناگون در آبخیز معرف کسلیان.
 Table 5- Comparing the results of estimated erosion and sediment yield using different methods in Kasilian representative watershed.

No.	Reference	Method	Erosion (ton ha ⁻¹ y ⁻¹)	Sediment (ton ha ⁻¹ y ⁻¹)	
1	Ahmadian et al (2014)	Erosion plot	Agriculture	0.75	-
			Rangeland	0.29	
			Forest	0.11	
2	Esmaili Gholzem et al (2021)	ICONA	Agriculture	Moderate	-
			Rangeland	Very high	
			Forest	Low	
3	Mohseni and Razzagian (2014)	MPSIAC	25.42	6.35	
4	current study	G2	Agriculture	1.31	0.44
			Rangeland	8.9	
			Forest	0.57	
5	current study	IntErO	2.35	0.84	
6	current study	Sediment observation data	-	0.16	

به‌عنوان منابع مهم تفاوت برآورد فرسایش خاک کاربری جنگل در مدل G2 در مقایسه با کرت‌های فرسایش بود. در این راستا، اسمعیلی‌قلزم و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی با استفاده از مدل ICONA خطر فرسایش در کاربری‌های کشاورزی را با اندازه‌ی متوسط، مرتع را با اندازه‌ی خیلی زیاد و جنگل را با اندازه‌ی کم برآورد کردند. تفاوت نتایج هر سه روش (کرت‌های فرسایش، مدل G2 و مدل ICONA) کم بود و این یافته نشان‌دهنده‌ی فرسایش بیشتر در کاربری مرتع در مقایسه با دیگر کاربری‌ها در آبخیز معرف کسلیان بود. همچنین، اندازه‌های به‌دست آمده از مدل G2 به اندازه‌های کرت‌های فرسایشی نزدیک‌تر بود.

در این پژوهش با در نظر گرفتن نتایج اندازه‌گیری‌شده‌ی فرسایش خاک در کاربری‌های گوناگون در کرت‌های فرسایشی و با در نظر گرفتن نسبت بسیار کم تحویل رسوب، اندازه‌ی رسوب خروجی آبخیز مطالعه‌شده بیش‌تر از اندازه‌های بود که داده‌های مشاهده‌ای نشان دادند. در خروجی آبخیز معرف کسلیان، فاصله‌های زمانی برداشت داده‌های آب‌دهی، روزانه بود، در شرایطی که مساحت و شرایط فیزیکی به‌ویژه شیب زمین در این آبخیز نشان داد که سرعت تخلیه‌ی کامل رواناب و یا آبنگار به‌دست آمده از بارندگی می‌تواند کمتر از یک روز باشد. به عبارت دیگر آب‌دهی‌های اوج در بسیاری از آبنگارها میان دو زمان برداشت آب‌دهی اتفاق افتاد و حجم قابل توجهی از رواناب و قاعدتاً رسوب بدون آنکه اندازه‌گیری شود در فاصله‌ی زمانی دو برداشت آب‌دهی از آبخیز خارج شد. از این رو، داده‌های مشاهده‌ای رسوب کم‌تر از واقعیت بود. بنابراین، نتایج برآورد فرسایش و رسوب در مدل‌های تجربی بر اساس داده‌های مشاهده‌ای رسوب قابل صحت‌سنجی نیست و باید بر اساس

احمدیان و همکاران (۲۰۱۴) در آبخیز معرف کسلیان با استفاده از کرت‌های فرسایش، اندازه‌ی فرسایش را در کاربری‌های گوناگون در ۵ سال محاسبه کردند و گزارش کردند که اندازه‌ی فرسایش در کاربری‌های دیم، دیم‌زارهای رهاشده، مرتع و جنگل به ترتیب ۰/۷۵، ۰/۴۷، ۰/۲۹ و ۰/۱۱ تن بر هکتار در سال بود. در حالی که در این پژوهش با استفاده از مدل G2 اندازه‌ی فرسایش کاربری‌های کشاورزی، مرتع و جنگل به ترتیب ۱/۳۱، ۸/۹ و ۰/۵۷ تن بر هکتار در سال برآورد شد (جدول ۵). به‌دلیل رخداد هم‌زمان شرایط اوج جامعه^۲ در زمین‌های دیم و دیم‌زارهای رهاشده و انعکاس طیفی نزدیک به هم در تصویر، امکان جداسازی کاربری‌های مزبور از یکدیگر در تهیه‌ی نقشه‌ی کاربری زمین برای اجرا مدل G2، وجود نداشت و فقط به‌شکل کاربری کشاورزی و مرتع تفکیک شدند (کمری‌یکدنگی و همکاران ۲۰۲۳). اندازه فرسایش خاک برآوردشده‌ی کاربری مرتع در مدل G2 بسیار بیشتر از اندازه فرسایش خاک اندازه‌گیری‌شده در کرت‌های فرسایش بود. بسیاری از این تفاوت‌ها ناشی از جانمایی خاص کرت‌ها در مکان‌های خاصی از مرتع در مقایسه با کل محدوده‌ی کاربری مرتع بود، که در مدل لحاظ شده بود. می‌توان گفت مدل می‌تواند اندازه‌ی میانگین فرسایش در کل کاربری مرتع را برآورد کند در حالی که کرت در نقطه‌ی خاصی از مرتع با شرایط پوشش گیاهی و شیب همان نقطه احداث و آماربرداری شده باشد. دلیل دیگر تأثیر تفاوت شرایط محیطی (به‌ویژه بارندگی و پوشش گیاهی) در سال‌های آماربرداری کرت‌ها و سال اجرای مدل G2 (۲۰۲۱) بود.

تفاوت مقیاس مکانی و محل قرارگیری کرت‌های فرسایش در مقایسه با کل محدوده‌ی کاربری و تفاوت شرایط بارندگی و پوشش گیاهی در زمان‌های گوناگون

همچنین زمین‌های رهاشده به دلیل استفاده نادرست و در نظر نگرفتن استعداد زمین، نوع پستی‌بلندی و اندازه‌ی بارندگی و دیدگاه کارشناسان اندازه‌ی فرسایش و تولید رسوب برآوردی قابل قبول و منطقی بود. اما، نمی‌توان آن را کاملاً قطعی و بدون هرگونه خطایی دانست. زیرا، گروهی از عامل‌های ناشناخته و پیش‌بینی‌نشده از جمله ضریب برف نیز ممکن است در مدل لحاظ نشده باشد.

در سال ۲۰۲۱ با استفاده از منحنی سنجی رسوب و آب‌دهی روزانه در ایستگاه آب‌سنجی ولیک‌بن (خروجی آبخیز)، رسوب مشاهده‌ای آبخیز ۱۱۱۸/۵۴ تن برابر با ۰/۱۶ تن بر هکتار در سال برآورد شد که بسیار کم‌برآورد بود. اما نتایج برآورد رسوب مشاهده‌ای همانند نتایج مدل‌های تجربی نشان داد که حجم رسوب برآوردی در این آبخیز کم بود. در آبخیزهای کوچک فاصله‌ی زمانی نمونه‌برداری آب‌دهی و رسوب نباید زیاد باشد. زیرا، ممکن است آب‌دهی اوج در یک ساعت خاص رخ دهد و تخلیه شود، اما در آن ساعت زمان نمونه‌برداری نباشد. به این دلیل در روزهای سیلابی و آب‌دهی اوج، داده‌های مهم و تأثیرگذار که نشان‌دهنده‌ی بخش مهمی از رسوب خروجی از آبخیز در همان ساعات رخداد هستند، از دست خواهد رفت و این امر باعث می‌شود داده‌های مشاهده‌ای بسیار کم برآورد باشد و در بیشتر اوقات منطبق بر واقعیت نیستند.

برای حل این مشکل پیشنهاد می‌شود در آبخیزهای کوچک نمونه‌برداری رسوب در فاصله‌های زمانی کوتاه‌تر از روز (چندین بار در روز و یا حتی به شکل ساعتی) انجام شود، تا داده‌های اصلی و مهم که نشان‌دهنده رخداد آب‌دهی اوج در مدت زمان کم و سپس تخلیه‌ی آن است، برداشت شود. بنابراین، این داده‌ها نمایان‌گر نتایج نزدیک به واقعیت خواهند بود، که می‌توان از آنها برای اعتبارسنجی استفاده کرد.

داده‌های اندازه‌گیری فرسایش در کرت‌ها تحلیل شود. در این میان اندازه‌ی رسوب برآوردی مدل G2 در مقایسه با دیگر مدل‌ها به واقعیت نزدیک‌تر بود و در برآورد رسوب عملکرد بهتری داشت.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این پژوهش به دلیل ضرورت برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب در مدیریت آبخیزها و اولویت‌بندی شرایط بحرانی، با هدف ارزیابی و مقایسه‌ی برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب با دو روش تجربی و یک روش مشاهده‌ای در آبخیز معرف کسلیان انجام شد.

بر پایه‌ی نتایج این پژوهش با استفاده از مدل G2 با توجه به پوشش جنگلی و حفاظت‌شده‌ی منطقه، بخش بزرگی از آبخیز در طبقه‌های فرسایش‌پذیری کم بودند. میانگین فرسایش و رسوب ویژه‌ی سالانه به ترتیب ۱/۳۰ و ۰/۴۴ تن بر هکتار در سال برآورد شد. بیشتر فرسایش‌های منطقه به دلیل پستی‌بلندی خشن و عامل نگهداشت پوشش گیاهی ضعیف در بلندی‌های آبخیز (بالادست آبخیز) رخ داد. در این بخش‌ها به دلیل نوع نزولات تأثیر عامل فرسایش‌دگی باران کم بود و عامل نگهداشت پوشش گیاهی و پستی‌بلندی تأثیر بیشتری داشتند.

نتایج مدل IntEro نشان داد که اندازه‌ی فرسایش سالانه با در نظر گرفتن جرم مخصوص ظاهری ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب برابر با ۲/۳۵ تن بر هکتار در سال بود و رسوب ویژه‌ی سالانه ۰/۸۴ تن بر هکتار در سال بود. ضریب فرسایش حوزه آبخیز (عامل Z) نشان داد که اندازه فرسایش کم و فرسایش غالب منطقه از نوع فرسایش سطحی بود. تفاوت نسبی مدل‌های تجربی G2 و IntEro با یکدیگر در برآورد میانگین فرسایش و تولید رسوب سالانه و نسبت تحویل رسوب آبخیز به ترتیب ۰/۴۴، ۰/۴۷ و ۰/۰۵٪ بود.

با در نظر گرفتن تغییرات کاربری مراتع به کشاورزی و

- Abedini M, Abolfathi D, Raeesi M. 2022. The ranking of Razan basin erosion by using the fuzzy logic, EPM and BLM Model in GIS environment. *Journal of Geography and Development*, 20(68):62-86. (In Persian).
- Ahmadian SH, Safai M, Jafari B. 2014. Comparison of soil erosion in dryland, abandoned dryland, pasture and forest areas of Kesilian-Mazandaran Watershed. *National Erosion and Sedimentation Conference*, Iran, 1-4. (In Persian).
- Albaradeyia I, Hani A, Shahrour I. 2011. WEPP and ANN Models for simulating soil loss and runoff in a semi-arid Mediterranean region. *Environmental Monitoring and Assessment*, 180(1-4):537-556. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-010-1804-x>
- Ansarilari A, Ansari M. 2017. Examining the usage of GIS in estimating soil erosion and sediment yield using RUSLE Model (Case study: Ghale Chay Basin, Iran). *Journal of Geography and Regional Development*, 14(2):155-173. (In Persian).
- Arabkhedri M. 2014. A review on major water erosion factors in Iran. *Land Management*, 2(1):17-26. (In Persian).
- Armin M, Velayatinejad SAS, Ghorbannia Khyberi V, Taatpour F, Behzadfar M. 2021. Estimation of runoff and sediment yield using IntErO Model in two watersheds in Kohgiluyeh and Boyerahmad Province. *Journal of Range and Watershed Management*, 74(2):287-301. (In Persian).
- Balouei F. 2021. Simulation of soil erosion in Ilam province using G2 Model. *Third International Conference on Biology and Earth Sciences*, pp. 1-9. (In Persian).
- Barford CC, Wofsy SC, Goulden ML, Mungler JW, Pyle EH, Urbanski SP, 2001. Factors controlling long- and short-term sequestration of atmospheric CO₂ in a mid-latitude forest. *Science*, 294(5547):1688-1691. <https://doi.org/10.1126/science.1062962>
- Billi P, Spalevic V. 2022. Suspended sediment yield in Italian rivers. *Catena*, 212:106-119. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106119>
- Chalise D, Kumar L, Spalevic V, Skataric G. 2019. Estimation of sediment yield and maximum outflow using the IntErO Model in the Sarada River Basin of Nepal. *Water*. 11(5):1-15. <https://doi.org/10.3390/w11050952>
- Derakhshan Sh. 2011. Studying the flood potential of the Kasilian Watershed using geographic information system. *Applied Research Journal of Geographical Sciences*, 13(16):51-63. (In Persian).
- Draganic J, Drobnjak B, Campar J, Bulajic B, Zajovic V, Behzadfar M, Spalevic V. 2016. Calculation of sediment yield using the IntErO Model in the S1-3 watershed of the Shirindareh River Basin, Iran. *Radovi Sumarskog Fakulteta Univerziteta u Sarajevu*, 21(1):243-254.
- Esmaili Gholzam H, Ahmadi H, Moini A, Motademoziri B. 2021. Erosion risk assessment of Kesilian Watershed with ICona Model and RS and GIS technologie. *Earth Science Research*, 12(3):144-163.
- Fethullahzadeh T, Servati MR. 2012. Study and qualitative estimation of erosion in geomorphological outcrops using FAO method in Navroud watershed. *Quarterly Geographical Journal*, 9(34):65-74. (In Persian).
- Helming K, Diehl T, Kuhlman T, Jansson PH, Verburg M, Bakker M, PerezSoba L. 2011. Ex ante impact assessment of poli-

- cies affecting land use, part B: application of the analytical framework. *Ecology and Society*, 16(1):29-38.
- Hizbavi Z, Azizi A, Sharifi Z, Alaei N, Mostafazade R, Behzabfar M, Spalevic V. 2020. Comprehensive estimation of erosion and sedimentation components using IntErO Model in Kozetparaghi Watershed, Ardabil Province. *Journal of Environmental Erosion Research*. 10(1):92-110.
- Janizadeh S, Vafakhah M. 2021. Flood hydrograph modeling using artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system based on rainfall components. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(5):1-14
- Jeanneau A, Herrmann T, Ostendorf B. 2021. Mapping the spatio-temporal variability of hillslope erosion with the G2 Model and GIS: A case-study of the South Australian agricultural zone. *Geoderma*, -402: 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115350>
- Kale GD, Vadsola SN. 2012. Modelling of soil erosion by non-conventional methods World Acad. *Journal of Engineering Science and Technology*, 6(3):139-145.
- Kalehouei M, Zabihi Silabi M, Sadehghi PS, Khaledi Darvishan A, Spalevic V, Sadeghi SHR. 2020. Application of IntErO Model in soil erosion assessment of Shazand Watershed, Markazi Province. 15th National Conference in Watershed Management Science and Engineering, Sari, Iran. pp. 1-16.
- Kamari Yekdangi F, Sarone F, Mosavi V, Aghabeigi amin S, Khaledi Darvishan A. 2023. Assessing the accuracy of the land use map using two methods of remote sensing and visual interpretation (Case study: Kasilian representative watershed). 17th National Conference on Watershed Management Sciences and Engineering of Iran (Watershed Management & Sustainable Food Security), Iran. pp. 1-12.
- Karydas CG, Bouarour O, Zdruli P. 2020. Mapping spatio-temporal soil erosion patterns in the Candelaro river basin, Italy, using the G2 Model with sentinel 2 imagery. *Geosciences*, 10(89):1-22.
- Karydas CG, Panagos P. 2016. Modelling monthly soil losses and sediment yields in Cyprus. *International Journal of Digital Earth*, 9(8):766-787.
- Karydas CG, Panagos P. 2018. The G2 erosion model: An algorithm for month-time step assessments. *Environmental Research*, 161:256-267. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.010>
- Khaledi Darvishan A, Behzadfar M, Spalevic V, Kalonde P, Ouallali A, Sabri E. 2017. Calculation of sediment yield in the S2-1 watershed of the Shirindareh river basin, Iran. *Agriculture and Forestry*, 63(3):23-32.
- Khaledi Darvishan A, Derikvandi M, Aliramae R, Khorsand M, Spalevic V, Gholami L, Vujacic D. 2018. Efficiency of IntErO Model to predict soil erosion intensity and sediment yield in Kham-san representative Watershed (West of Iran). *Agrofor*, 3(2):22-31.
- Khaledi Darvishan A, Mohammadi M, Skataric G, Popović SG, Behzadfar M, Sakuno NRR, Spalevic V. 2019. Assessment of soil erosion, sediment yield and maximum outflow, using IntErO Model (Case study: S8-IntA Shirindarreh Watershed, Iran). *Agriculture and Forestry*, 65(4):203-210.
- Lal R. 2003. Soils and the global carbon budget. *Environment International*, 29(4):437-450.
- Lense GHE, Servidoni LE, Parreiras TC, Santana DB, Bolleli TM, Ayer JEB, Spalevic V, Mincato RL. 2022. Modeling of soil loss by water erosion in the Tietê River hydrographic basin, São Paulo, Brazil. *Semina: Ciênc. Agrár. Londrina*, 43(4):1403-

1421. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2022v43n4p1403>
- Mohammadamini H, Khaledi Darvishan A, Katebi Kord A. 2016. Introducing the G2 Model with the ability to provide spatial and temporal soil loss map as the main tool for watershed management. *Journal of Extension and Development of Watershed Management*, 3(11):23-27. (In Persian).
- Mohammadi M, Khaledi Darvishan A, Spalevic V, Dudic B, Billi P. 2021. Analysis of the Impact of Land Use Changes on Soil Erosion Intensity and Sediment Yield Using the IntErO Model in the Talar Watershed of Iran. *Water*, 13(6):1-15. <https://doi.org/10.3390/w13060881>
- Mohammadi S, Balouei F, Haji Kh, Khaledi Darvishan A, Karydas CG. 2021. Country-scale spatio-temporal monitoring of soil erosion in Iran using the G2 Model. *International Journal of Digital Earth*, 14(8):1019-1039.
- Mohseni B, Razzagian H. 2014. Estimation of soil erosion and sediment production in Kasilian Basin using geomorphology method based on MPSIAC Model in GIS environment. *Scientific Journal of Irrigation and Water Engineering of Iran*. 4(2):49-57.
- Mostazo P, Asensio-Amador C, Asensio C. 2023 Soil erosion modeling and monitoring. *Agriculture*, 13(2):1-4. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020447>
- Noor H, Arabkhedri M, Dastranj A. 2023. Evaluation of the effect of range exclosure on soil erosion at plots scale (Case study: Sanganeh soil conservation research site). *Water and Soil Management and Modelling*, 3(2):66-77. (In Persian).
- Noor H, Arabkhedri M. 2020. The influence of hillslope length and direction on runoff and soil loss under natural rainfall in an arid region. *Journal of Watershed Management Research*, 11(22):254-262. (In Persian).
- Panagos P, Karydas CG, Cristiano B, Ioannis G. 2014. Seasonal monitoring of soil erosion at regional scale: An application of the G2 Model in Crete focusing on agricultural land uses. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 27(PARTB):147-155.
- Polovina S, Radić B, Rištić R, Kovačević J, Milčanović V, Živanović N. 2021. Soil erosion assessment and prediction in urban landscapes: A new G2 Model approach. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(9):1-20. <https://doi.org/10.3390/app11094154>
- Saadati H, Gholami S, Sharifi F, Ayubzadeh SA. 2006. An investigation of the effects of land use change on simulating surface runoff using SWAT Mathematical Model (Case study: Kasilian Catchment Area). *Iranian Journal of Natural Resources*, 59(2):301-313. (In Persian).
- Saberi E, Boukdir A, Karaoui I, Skataric G, Nacka M., Khaledi Darvishan A, Spalevic V. 2019. Modelling of soil erosion processes and runoff for sustainable watershed management: Case study Oued el Abid Watershed, Morocco. *Agriculture and Forestry*, 65(4):241-250.
- Sabri E, Spalevic V, Boukdir A, Karaoui I, Ouallali A, Mincato RL, Seštras P. 2022. Estimation of soil losses and reservoir sedimentation: A case study in Tillouguite Subbasin (High Atlas-Morocco). *Agriculture and Forestry*, 68(2):207-220.
- Sadeghi SHR, Mazin M, Moradi HR. 2007. Development of hydrograph using different rainfall components in Kasilian Watershed. *Iranian Journal of Natural Resources*, 60(1):33-43. (In Persian).
- Sadeghi SHR. 2011. Study and measurement of water erosion. Tarbiat Modares University Press. 412 p. (In Persian).
- Saggau P, Kuhwald M, Hamer W, Duttmann R. 2021. Are compacted tramlines underestimated features in soil erosion modelling?

- A catchment scale analysis using a process based soil erosion model. *Land Degradation and Development*, 33(3):452-469.
- Spalević V, Djurović N, Mijović S, Vukelić-Šutoska M, Ćurović M. 2013. Soil erosion intensity and Runoff on the Djuricka river basin (North of Montenegro). *Malaysian Journal of Soil Science*, 17(4):49-68.
- Spalevic V, Dlabac A, Jovovic Z, Rakocevic J, Radunovic M, Spalevic B, Fuštic B. 1999. An area and distance measuring program. *Acta Agriculture Serbica*, 4(8):63-1.
- Spalevic V, Dlabac A, Spalevic B, Fuštic B, Popovic V. 2000. Application of computer-graphic methods in studying the discharge and soil erosion intensity - i programme "Drainage basins". *Agriculture and Forestry*, 46(1-2):19-36.
- Spalevic V. 2011. Impact of land use on runoff and soil erosion in Polimlje. Ph.D. Dissertation, Faculty of Agriculture. University of Belgrade, Serbia, 260 p.
- Spalevic V. 2019. Assessment of soil erosion processes by using the IntErO Model: case study of the Duboki Potok, Montenegro. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 20(2):657-665.
- Strijker D. 2005. Marginal lands in Europe causes of decline. *Basic and Applied Ecology*, 6(2):99-106. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2005.01.001>
- Tanyaş H, Kolat Ç, Süzen ML. 2015. A new approach to estimate cover-management factor of RUSLE and validation of RUSLE Model in the watershed of Kartalkaya Dam. *Journal of Hydrology*, 528:584-598. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.048>
- Tavares AS, Uagoda RES, Spalevic V, Mincato RL. 2021. Analysis of the erosion potential and sediment yield using the IntErO Model in an experimental watershed dominated by karst in Brazil. *Poljoprivreda i Sumarstvo*, 67(2):153-162. <http://dx.doi.org/10.17707/AgricultForest.67.2.11>



Efficiency Assessment of G2 and IntErO Models for Annual Soil Erosion and Sediment Yield Prediction in the Kasilian Representative Watershed, Mazandaran Province

Faezeh Kamari Yekdangi¹, Abdulvahed Khaledi Darvishan^{2*}, Soheila Aghabeigi Amin³

1- Former MS.C. Student, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

2- Associate Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

3- Assistant Professor, Department of Natural resources, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

In recent years, soil erosion and sediment yield have posed a significant threat to food security. Many countries have conducted extensive research studies to manage and prevent soil erosion and sedimentation. Considering the need to know the rate of erosion and sediment yield, the current research was conducted using empirical models with the aim of estimating the rate of erosion and sediment yield in the Kasilian representative watershed. Also, empirical models were evaluating and comparing with observational data.

Materials and Methods

The Kasilian representative watershed in Mazandaran province had its soil erosion and sediment yield estimated using the G2 and IntErO Models. Then, using the observational data and the sediment rating curve of Valikbon hydrometry station at the outlet of the watershed, the annual specific sediment yield was calculated and the results of the models were evaluated.

Results and Discussion

The results of the G2 and IntErO Models showed the rate of soil erosion at 1.30 and 2.35 t ha⁻¹ yr⁻¹

Article Type: Research Article

*Corresponding Author E-mail: a.khaledi@modares.ac.ir

Citation: Kamari Yekdangi, F., Khaledi Darvishan, A., Aghabeigi Amin, S .2024. Efficiency Assessment of G2 and IntErO Models for Annual Soil Erosion and Sediment Yield Prediction in the Kasilian Representative Watershed, Mazandaran Province. *Watershed Management Research*. 37(2): 55-73.

DOI: 10.22092/wmrj.2023.362025.1539

Received: 10 May 2023, **Received in revised form:** 12 June 2023, **Accepted:** 21 September 2023

Published online: 21 June 2024

Watershed Management Research, VOL. 37, No.2, Ser. No: 143, Summer 2024, pp. 55-73.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center © Author(s)



for this watershed, respectively. Also, the annual specific sediment yield estimated by the G2 and IntErO Models were 0.44 and 0.84 t ha⁻¹ yr⁻¹, respectively, and observational data was obtained as 0.16 t ha⁻¹ yr⁻¹. In this watershed, the G2 Model results revealed that vegetation cover had more significant impact on erosion than rainfall intensity. Due to the type of vegetation cover, most areas in the watershed had low erosion rates. The IntErO Model results showed that the steep slopes of the watershed led to a peak discharge of 137.81 m³ s⁻¹ with 20-year return period. In addition, the surface erosion was the dominant erosion type in this watershed.

Conclusion and Suggestions

The investigated empirical models had similar results. Although, taking into account the changes in land use in the Kasilian representative watershed, the estimated values of annual erosion and sediment yield are acceptable and reasonable, the differences with the observational data were very high and apparently indicated the low efficiency of the models. However, it is necessary to mention that the inappropriateness of the sampling intervals of runoff and sediment in this watershed has been a very important reason for the low intensity of annual sediment yield based on observational data. In other words, the daily measurement intervals for this small watershed have caused the real data of sediment concentration to be collected at the same time as flood hours or peak discharges that have the most sediment transport. To solve this problem, it is suggested to do sampling in small watersheds at shorter time intervals (several times a day or even hourly) so that high concentrations of sediments are collected at the same time as high flows and are included in the calculation of sediment yield.

Keywords: Mazandaran province, Rainfall erosivity, Sediment delivery ratio, Soil erodibility, Soil loss, Specific sediment yield