

مقاله علمی-پژوهشی

برآورد و پهنه‌بندی مکانی فرسایش و رسوب‌گذاری خاک در حوضه آبریز شلمان‌رود با استفاده از مدل‌های WATEM/SEDEM و SAMANه گوگل ارث انجین

سید اسماعیل میرعبداللهی حسناتی^۱، ابراهیم امیری^{۲*}، علی هوشمند آیینی^۳، مجید عاشوری^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۶

چکیده

در این پژوهش، با هدف برآورد توزیع مکانی فرسایش سطحی و رسوب در حوضه آبریز شلمان‌رود در شرق استان گیلان، از ترکیب مدل تجربی WATEM/SEDEM و قابلیت‌های پردازشی سامانه Google Earth Engine (GEE) استفاده شد. برای محاسبه عامل فرسایش‌پذیری بارش (R)، داده‌های بارش ماهانه ایستگاه‌های مجاور حوضه در دوره ۲۰ ساله و شاخص فورنییه اصلاح‌شده به‌کار گرفته شد؛ عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) بر اساس بافت و ماده آلی خاک و معادله تجربی Wischmeier برآورد گردید و عامل طول و شیب دامنه (LS) با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی با تفکیک ۳۰ متر و الگوریتم Desmet & Govers محاسبه شد. عامل پوشش و مدیریت کاربری زمین (C) از شاخص NDVI استخراج‌شده از تصاویر Landsat 8 در محیط GEE و با در نظر گرفتن نبود اقدامات حفاظتی مؤثر، مقدار عامل مدیریتی (P) برای کل حوضه برابر ۱ فرض شد. با هم‌پوشانی این عوامل در چارچوب WATEM/SEDEM، نقشه سالانه فرسایش سطحی تولید و به‌عنوان ورودی مدل WATEM/SEDEM برای شبیه‌سازی زنجیره تولید، انتقال و رسوب‌گذاری رسوب در سطح حوضه استفاده گردید. نتایج WATEM/SEDEM نشان داد که مقدار فرسایش سالانه در حوضه شلمان‌رود از مقادیر بسیار نزدیک به صفر تا حدود ۱۵/۴۴ تن در هکتار در سال متغیر است و در عین حال، حدود ۷۲ درصد مساحت حوضه در کلاس «خیلی کم» (۰-۵ تن در هکتار در سال) و کمتر از یک درصد در کلاس «خیلی زیاد» قرار دارد. مدل WATEM/SEDEM نشان داد که کل تولید سالانه رسوب در حوضه برابر با ۷۳/۸۲۹ تن در سال (معادل حدود ۴۶/۱ تن در هکتار در سال) و حجم رسوب‌گذاری داخلی حدود ۶۰۳/۸۴۰ تن در سال است؛ بنابراین، شلمان‌رود در بازه شبیه‌سازی شده بیش از آن که یک حوضه صادرکننده رسوب باشد، به‌مثابه یک حوضه گیرنده و ذخیره‌کننده رسوب عمل می‌کند و بخش قابل توجهی از مواد رسوبی در داخل حوضه انباشته می‌شود. نتایج پژوهش، چارچوبی عملی برای شناسایی کانون‌های بحرانی تولید رسوب و اولویت‌بندی اقدامات حفاظت خاک و آبخیزداری در حوضه‌های مشابه شمال ایران فراهم می‌آورد.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی مکانی، رسوب‌گذاری، سامانه گوگل ارث انجین (GEE)، فرسایش خاک، مدل WATEM/SEDEM، رسوب و فرسایش و رسوب مدل

مقدمه

(2020)، حدود ۴۰ درصد از کل بالایای طبیعی ثبت‌شده در چند دهه اخیر به سیلاب اختصاص داشته و این پدیده سالانه میلیون‌ها نفر را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. تغییرات اقلیمی، افزایش بارش‌های حدی، و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع طبیعی موجب تشدید خطر سیلاب در بسیاری از مناطق جهان شده است (IPCC, 2021). در کنار خسارات مستقیم، فرسایش و جابجایی خاک یکی از پیامدهای مهم رخداد سیلاب است که منجر به کاهش حاصلخیزی اراضی کشاورزی، رسوب‌گذاری در مخازن سدها و تغییرات مورفولوژیکی رودخانه‌ها می‌شود (Pimentel and Burgess, 2013). فرسایش خاک به فرآیندی اطلاق می‌شود که در آن ذرات خاک از محل اولیه خود جدا شده و تحت تأثیر عوامل انتقال‌دهنده، به‌ویژه آب و باد، منتقل می‌گردند (Morgan, 2005). فرسایش خاک توسط آب یکی از

سیلاب یکی از رایج‌ترین و مخرب‌ترین مخاطرات طبیعی است که هر ساله خسارات جانی و اقتصادی قابل‌توجهی در سطح جهان برجای می‌گذارد. بر اساس گزارش سازمان ملل متحد (UNDRR،

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم مهندسی آب، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی آب، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

۳- استادیار، گروه عمران، واحد رودبار، دانشگاه آزاد اسلامی، گیلان، ایران

۴- دانشیار، گروه کشاورزی، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

(*)-نویسنده مسئول: eamiri57@iau.ac.ir

DOI: [10.22034/ijid.2026.568951.2655](https://doi.org/10.22034/ijid.2026.568951.2655)

دلایل اصلی تخریب زمین در سراسر جهان است (Borrelli et al., 2020). فرسایش خاک موجب از بین رفتن لایه سطحی حاصلخیز می‌شود؛ لایه‌ای که بخش عمده‌ای از مواد آلی و عناصر غذایی قابل دسترس برای گیاهان را در خود جای داده است (Lal, 2001). خطرات فرسایش خاک به‌خصوص از نظر امنیت غذایی در کشورهای در حال توسعه آسیا و آفریقا مورد توجه می‌باشد، که این موضوع به علت اقدامات نامناسب کشاورزی به‌وسیله کشاورزان و ظرفیت سازگاری کم جهت احیای خاک تخریب‌شده می‌باشد هرچند که افزایش جمعیت نیز حائز اهمیت است (Haregeweyn et al., 2017). بر اساس پروژه UNEP ارزیابی جهانی تخریب زمین (GLADA) حدود ۱/۱ میلیارد هکتار از زمین‌های جهانی در اثر فرسایش خاک تخریب شده است که ۴۸ درصد آن در آسیا، ۲۱ درصد در آفریقا، ۱۵ درصد در آمریکای لاتین و کارائیب، ۱۰ درصد در اروپا، ۸ درصد در اقیانوسیه و ۵ درصد در آمریکای شمالی می‌باشد (Bai et al., 2008). رسوب متشکل از موادی نسبتاً منفصل چون قلوه‌سنگ‌ها، کانی‌ها و غیره می‌باشد. مواد رسوبی از عمل فرسایش ایجاد می‌گردد (Blatt et al., 1980). مقدار کل رسوب حاصل از فرسایش در حوضه آبخیز، دامنه‌ها و کرت‌های فرسایش که در زمان مشخصی از خروجی مورد نظر عبور می‌کند را رسوب‌دهی یا تولید رسوب گویند (Walling, 1983). ایران به دلیل شرایط خاص اقلیمی و ژئومورفولوژیکی، از جمله قرار گرفتن در منطقه خشک و نیمه‌خشک، شیب‌های تند در بسیاری از حوضه‌های کوهستانی و بارش‌های کوتاه‌مدت و شدید، همواره در معرض خطر وقوع سیلاب قرار دارد. بر اساس آمارهای سازمان مدیریت بحران کشور، سیلاب پس از زلزله، دومین بالای طبیعی پرخسارت در ایران به شمار می‌رود و بخش قابل‌توجهی از خسارات مالی و جانی بلایای طبیعی را به خود اختصاص داده است. وقوع سیلاب‌های بزرگ در سال‌های اخیر از جمله سیلاب ۱۳۹۸ در استان‌های گلستان، لرستان و خوزستان، نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالای بسیاری از حوضه‌های آبریز کشور است. از پیامدهای مهم رخداد سیلاب در ایران، تلفات خاک است. در اثر بارش‌های شدید و رواناب‌های سطحی، ذرات خاک از اراضی کشاورزی و مراتع شسته شده و همراه جریان‌های سیلابی جابجا می‌شوند. این فرآیند سبب کاهش حاصلخیزی خاک، از بین رفتن لایه‌های سطحی حاصلخیز و در نتیجه افت تولید محصولات کشاورزی می‌شود. از سوی دیگر، جابجایی گسترده رسوبات ناشی از سیلاب در بستر رودخانه‌ها و مخازن سدها، مشکلات متعددی همچون کاهش عمر مفید سدها، افزایش هزینه‌های لایروبی، تغییر مسیر جریان و تشدید خطرات آبی را به همراه دارد. برآوردها نشان می‌دهد که میانگین فرسایش سالانه خاک در ایران بیش از ۱۵ تن در هکتار است که چندین برابر میانگین جهانی برآورد شده است (Hajabbasi et al., 1997). بخش قابل‌توجهی از این فرسایش به

رخدادهای سیلابی وابسته است که در زمان کوتاه، حجم عظیمی از خاک را جابجا می‌کند. با توجه به شرایط حساس منابع خاک و آب کشور، شناسایی مناطق مستعد سیل و تحلیل الگوی مکانی تلفات خاک اهمیت زیادی دارد. بهره‌گیری از ابزارهای نوین سنجش از دور و سامانه‌هایی مانند Google Earth Engine می‌تواند رویکردی کارآمد در این زمینه فراهم آورد. پهنه‌بندی مناطق مستعد سیل به‌عنوان ابزاری کلیدی در مدیریت ریسک و کاهش خسارات، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روش‌های سنتی پهنه‌بندی عمدتاً بر پایه مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی توسعه یافته‌اند (Merz et al., 2010). این روش‌ها اگرچه دقت بالایی دارند، اما به داده‌های فراوان، هزینه‌بر و زمان‌بر نیاز داشته و اجرای آن‌ها در مقیاس‌های وسیع محدودیت‌های جدی به همراه دارد. با گسترش فناوری سنجش از دور و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، امکان تحلیل‌های مکانی و زمانی گسترده‌تر فراهم شده و ابزارهای نوینی برای مطالعه مخاطرات طبیعی ارائه گردیده است (Samanta et al., 2018). در این میان، سامانه Google Earth Engine (GEE) به‌عنوان یک بستر پردازش ابری پیشرفته، تحولی اساسی در تحلیل داده‌های سنجش از دور ایجاد کرده است. این سامانه با دسترسی آزاد به آرشیوی عظیم از داده‌های ماهواره‌ای و قابلیت پردازش سریع و مقیاس‌پذیر، بستری مناسب برای مطالعات بزرگ‌مقیاس در زمینه پایش سیلاب و برآورد اثرات آن فراهم می‌سازد (Gorelick et al., 2017). استفاده از GEE می‌تواند محدودیت‌های محاسباتی و داده‌ای روش‌های سنتی را برطرف کرده و نتایج کارآمدتری برای مدیریت منابع آب و خاک ارائه نماید. بر این اساس، هدف پژوهش حاضر پهنه‌بندی سیل و برآورد توزیع مکانی تلفات خاک در حوضه آبریز شلمان‌رود با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین است. نتایج این تحقیق می‌تواند ضمن ارتقای درک از الگوی مکانی خطر سیلاب و پیامدهای ناشی از آن، به تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی‌های کلان در حوزه مدیریت منابع آب و خاک کمک کند. فرسایش آبی خاک یکی از مهم‌ترین فرایندهای تخریب سرزمین است که با جدا شدن و جابجایی ذرات خاک، منجر به کاهش عمق مؤثر خاک، افت حاصلخیزی، کاهش عملکرد محصولات کشاورزی و رسوب‌گذاری در مخازن و مجاری رودخانه‌ای می‌شود. گزارش «وضعیت جهانی منابع خاک» سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد نشان می‌دهد که فرسایش آبی، مهم‌ترین تهدید برای کارکردهای خاک در قرن بیست و یکم است (Montanarella et al., 2016). برآوردهای مدل جهانی بورلی و همکاران مبتنی بر معادله RUSLE نشان می‌دهد که تغییر کاربری اراضی در قرن بیست و یکم موجب افزایش معنی‌دار پتانسیل فرسایش در بسیاری از مناطق شده است (Borrelli et al., 2017). پاناگوس و همکاران نیز با ارزیابی فرسایش آبی در سطح اتحادیه اروپا، نرخ متوسط فرسایش را حدود

می‌تواند ارتباط‌پذیری رسوب را به‌طور قابل‌توجهی تغییر داده و در نتیجه بر بار رسوبی خروجی اثر بگذارد. این بدنه مطالعاتی تأکید می‌کند که تحلیل فرسایش موضعی باید در کنار بررسی الگوی اتصال رسوبی انجام شود (López-Vicente et al., 2013).

مدل WaTEM/SEDEM (Water and Tillage Erosion Model / Sediment Delivery Model) به‌عنوان یک مدل رستری نیمه‌توزیعی، با هدف بازنمایی هم‌زمان فرسایش آبی سطحی، انتقال رسوب در دامنه و رسوب‌گذاری در شبکه آبراهه‌ای توسعه یافته است. در این مدل، ابتدا فرسایش ناخالص سطحی با استفاده از RUSLE محاسبه و سپس با به‌کارگیری یک معادله ظرفیت حمل رسوب، نسبت انتقال و ته‌نشست در هر سلول تعیین می‌شود (Van Oost et al., 2000).

ون رومپی و همکاران کاربرد WaTEM/SEDEM را در چند حوضه اروپایی برای ارزیابی سناریوهای مدیریت اراضی و اقدامات حفاظت خاک (نظیر ترانس‌بندی، تغییر الگوی کشت و نوارکشت) نشان داده‌اند و نتیجه گرفته‌اند که این مدل، ابزار مناسبی برای تحلیل تأثیر سناریوهای مدیریتی بر صادرات رسوب است (Van Rompaey et al., 2005). ورستران و همکاران در مقایسه WaTEM/SEDEM با مدل‌های فیزیکی پیچیده‌تر نشان دادند که این مدل با وجود سادگی نسبی و نیاز داده‌ای کمتر، قادر است الگوی مکانی فرسایش و رسوب‌گذاری و حجم رسوب را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند (Verstraeten et al., 2002). هارگوین و همکاران نیز با به‌کارگیری WaTEM/SEDEM در حوضه‌های کوهستانی ایتالیایی، توانایی آن را در بازتولید بار رسوبی خروجی حوضه پس از کالیبراسیون مناسب پارامترهای ظرفیت حمل تأیید کرده‌اند (Haregeweyn et al., 2013). در سطح منطقه‌ای، مرکز مشترک تحقیقات کمیسیون اروپا (JRC) با استفاده از WaTEM/SEDEM نقشه‌های فرسایش و رسوب‌گذاری را در مقیاس اتحادیه اروپا تولید کرده و نشان داده است که ترکیب RUSLE با مازول مسیریابی رسوب می‌تواند مبنای مناسبی برای سیاست‌گذاری حفاظت خاک باشد. در ایران نیز چند مطالعه، کارایی WaTEM/SEDEM را در تفکیک نواحی غالب فرسایش و رسوب‌گذاری تأیید کرده‌اند، هرچند در برآورد مطلق بار رسوبی، به‌ویژه در سال‌های با رخدادهای حدی، احتمال بیش‌برآورد وجود دارد.

پیشرفت‌های اخیر در حوزه سنجش‌ازدور و پردازش ابری، امکان پیاده‌سازی مدل‌های فرسایش و رسوب را بر بستر پلتفرم‌هایی مانند Google Earth Engine (GEE) فراهم کرده است. پاپایوردانیس و همکاران چارچوبی برای پیاده‌سازی RUSLE در محیط GEE ارائه کردند که در آن عامل R از داده‌های بارش CHIRPS، عامل K از پایگاه‌های جهانی خاک، عامل LS از DEM و عامل C از شاخص‌های پوشش گیاهی استخراج می‌شود (Papaiordanidis et al., 2013).

۲۰۵ تن در هکتار در سال گزارش کرده و نشان داده‌اند که اجرای سیاست‌های حفاظت خاک، توانسته است بخشی از این روند را مهار کند (Panagos et al., 2015b). گارسیا روز و همکاران در یک فراتحلیل جهانی نتیجه گرفته‌اند که در بسیاری از حوضه‌ها، مقادیر اندازه‌گیری‌شده فرسایش، چندین برابر آستانه‌های قابل‌قبول برای پایداری خاک است (García-Ruiz et al., 2015). آلول و همکاران نیز با مرور انتقادی، فرسایش را نه تنها تهدیدی برای بهره‌وری کشاورزی، بلکه عاملی مؤثر بر چرخه کربن، کیفیت آب و تاب‌آوری اکوسیستم‌ها معرفی کرده‌اند (Alewell et al., 2019). در میان مدل‌های تجربی، معادله جهانی فرسایش خاک (USLE) و نسخه‌ی اصلاح‌شده آن (RUSLE) پرکاربردترین ابزار برای برآورد فرسایش ورقه‌ای و شیاری کم‌عمق در مقیاس پلات تا حوضه‌های آبخیز به شمار می‌روند (Renard., 1997). بناویدز و همکاران در یک مرور جامع نشان داده‌اند که RUSLE رایج‌ترین مدل فرسایش در ادبیات است و در طیف وسیعی از شرایط اقلیمی، از مناطق نیمه‌خشک تا مناطق مرطوب، به کار گرفته شده است (Benavidez et al., 2018). پاناگوس و همکاران با توسعه نسخه‌ی RUSLE2015 برای کل اتحادیه اروپا نشان دادند که می‌توان عوامل R، K، LS، C و P را با استفاده از داده‌های اقلیمی، DEM و شاخص‌های پوشش گیاهی مبتنی بر سنجش‌ازدور در مقیاس قاره‌ای برآورد کرد (Panagos et al., 2015a). با این حال، محدودیت‌های این مدل از جمله ماهیت سالانه و میانگین‌محور آن سبب می‌شود که فرایندهای متمرکز نظیر فرسایش گالی و فرسایش داخل کانال به‌صورت صریح در چارچوب مدل بازنمایی نشوند. آلول و همکاران با وجود این محدودیت‌ها، انعطاف‌پذیری RUSLE برای ترکیب با داده‌های بارش، DEM‌های با قدرت تفکیک بالا و شاخص‌های پوشش گیاهی (مانند NDVI) باعث شده است این معادله همچنان هسته‌ی بسیاری از مدل‌های پیشرفته‌تر فرسایش و انتقال رسوب باشد (Alewell et al., 2019). یکی از پیشرفت‌های مهم مفهومی در دهه‌های اخیر، طرح مفهوم ارتباط‌پذیری رسوب (Sediment Connectivity) است. بورسلی و همکاران با معرفی شاخص ارتباط‌پذیری (IC) نشان دادند که سازمان‌یافتگی توپوگرافی و شبکه زهکشی نقش تعیین‌کننده‌ای در انتقال رسوب از مناطق تولید به مجاری اصلی دارد و تولید بالای رسوب الزاماً به معنای تحویل بالای رسوب در خروجی حوضه نیست (Borselli et al., 2008). کوالی و همکاران این شاخص را با استفاده از DEM و پارامترهایی مانند شیب، طول مسیر جریان و موقعیت نسبی سلول نسبت به شبکه آبراهه‌ای توسعه دادند و نشان دادند که IC قادر است مناطق داغ رسوبی و مسیرهای غالب انتقال را در حوضه‌های کوهستانی شناسایی کند (Cavalli et al., 2013). لویز ویسنت و همکاران نیز با کاربرد IC در حوضه‌های کشاورزی اسپانیا نشان داده‌اند که تغییر کاربری اراضی و اقدامات حفاظتی

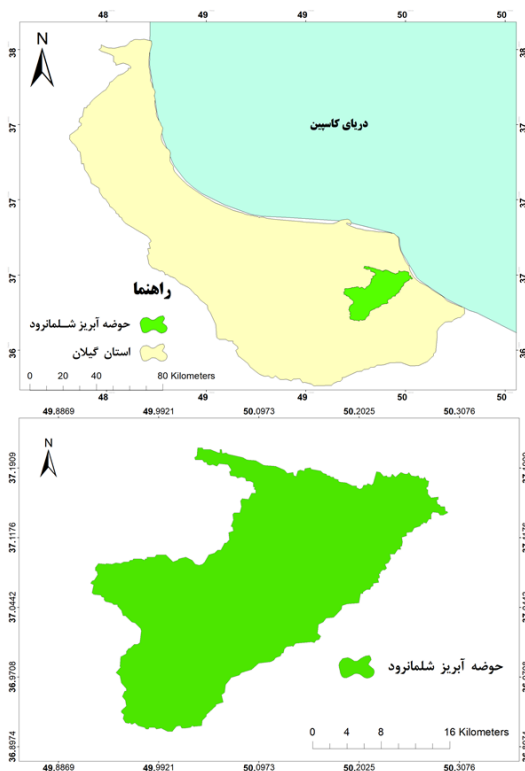
RUSLE برای برآورد تلفات مکانی خاک، WaTEM/SEDEM برای شبیه‌سازی انتقال و رسوب‌گذاری و GEE برای استخراج و پردازش داده‌های ورودی، تلاشی در جهت پر کردن این خلأ در مقیاس حوضه آبخیز شلمان رود به‌شمار می‌آید.

مواد و روش

حوضه آبخیز شلمان رود در بخش مرکزی-شرقی استان گیلان و در محدوده شهرستان‌های لنگرود و رودسر واقع شده است. این حوضه، بخشی از دامنه‌های شمالی البرز مرکزی را در بر می‌گیرد و پس از عبور از نواحی کوهستانی و جلگه‌ای، آب خود را در محدوده چمخاله به دریای خزر تخلیه می‌کند. مساحت حوضه حدود ۳۹۲ کیلومتر مربع و ارتفاع آن از حدود ۵۷- متر در نواحی ساحلی تا حدود ۲۴۱۸ متر در ارتفاعات جنوبی متغیر است؛ بدین ترتیب، تضاد روشنی بین دامنه‌های پرشیب و دره‌های عمیق جنوب با دشت‌های آبرفتی کم‌شیب شمال حوضه دیده می‌شود. کاربری اراضی حوضه شامل جنگل و مرتع در نواحی بالادست و اراضی کشاورزی (به‌ویژه شالیزار و باغات) و سکونت‌گاه‌های شهری و روستایی در پایین‌دست است که ترکیب آن‌ها حساسیت حوضه را نسبت به فرسایش و رسوب افزایش می‌دهد (شکل ۱).

(al., 2019). جودهانی و همکاران نیز با ترکیب RUSLE، GEE و GIS، فرسایش را در یک حوضه هند برآورد کرده و نشان داده‌اند که استفاده از GEE، فرایند به‌روزرسانی نقشه‌های فرسایش را تسهیل می‌کند (Jodhani et al., 2023). Bassairate و باسیریت همکاران با توسعه سامانه SWC Observatory، RUSLE و نسبت تحویل رسوب (SDR) را در GEE پیاده‌سازی کرده و قابلیت پایش خودکار فرسایش و رسوب را در چندین حوضه به‌طور هم‌زمان نشان داده‌اند. این روند، جهت‌گیری جهانی به سمت چارچوب‌های یکپارچه و مبتنی بر پردازش ابری برای پایش فرسایش و رسوب را برجسته می‌کند (Bassairate et al., 2025).

با وجود این ادبیات گسترده، بخش عمده مطالعات یا صرفاً بر برآورد فرسایش سطحی با استفاده از RUSLE تمرکز داشته‌اند، یا تنها الگوی انتقال و رسوب‌گذاری را با WaTEM/SEDEM و مدل‌های مشابه بررسی کرده‌اند، بدون آن‌که این دو رویکرد را در چارچوبی مبتنی بر پردازش ابری و داده‌های سنجنش‌ازدور با هم تلفیق کنند. به‌ویژه در حوضه‌های جنگلی-کوهستانی شمال ایران، مطالعاتی که از ترکیب RUSLE، مفاهیم ارتباط‌پذیری رسوب، مدل WaTEM/SEDEM و قابلیت‌های GEE به‌طور هم‌زمان برای تحلیل الگوی مکانی فرسایش و رسوب‌گذاری استفاده کرده باشند، محدود است. در این چارچوب، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

داده‌های مورد استفاده

برای برآورد فرسایش خاک با مدل RUSLE و شبیه‌سازی انتقال رسوب با مدل WATEM/SEDEM، از ترکیبی از داده‌های مکانی و اقلیمی استفاده شد؛ شامل مدل ارتفاعی رقومی (DEM) با تفکیک ۳۰ متر، داده‌های بارش ۲۰ ساله (۱۳۹۱-۱۴۰۱)، نقشه‌های خاک و بافت، نقشه کاربری/پوشش اراضی و تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8. DEM از منابع SRTM/ASTER یا سازمان نقشه‌برداری اخذ و پس از تصحیح، پر کردن فرورفتگی‌ها و هم‌مرجع‌سازی، برای استخراج لایه‌های شیب، جهت جریان، تجمع جریان و شبکه زهکشی به کار رفت. داده‌های بارندگی از سازمان هواشناسی دریافت و برای محاسبه شاخص فورنیه اصلاح‌شده (MFI) و روابط تجربی (۱۹۸۰) Arnoldus و (۱۹۹۴) Renard and Freimund، و عامل فرساینده‌ی بارش (R) استفاده شد. نقشه‌های خاک و داده‌های آزمایشگاهی بافت و ماده‌ی آلی برای محاسبه‌ی عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) به کار گرفته شد (Wischmeier and Smith, 1978). تصاویر Landsat 8 پس از تصحیح هندسی و رادیومتریکی در محیط Google Earth Engine برای استخراج شاخص NDVI و برآورد عامل پوشش و مدیریت (C) استفاده شد (De Asis and Omasa., 2007; Durigon et al., 2014; Van der Knijff et al., 2000). با توجه به نبود اقدامات حفاظتی سیستماتیک، عامل مدیریتی (P) برای کل حوضه برابر ۱ فرض شد (Morgan., 2009; Renard., 1997).

مدل RUSLE و برآورد فرسایش سطحی

در این پژوهش از مدل تجربی RUSLE برای برآورد مکانی نرخ سالانه فرسایش سطحی استفاده شد. فرم کلی معادله به صورت زیر است:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (2)$$

که در آن، A فرسایش سالانه خاک (تن در هکتار در سال)، R عامل فرساینده‌ی بارش، K عامل فرسایش‌پذیری خاک، LS عامل طول و شیب دامنه، C عامل پوشش و مدیریت کاربری زمین و P عامل اقدامات حفاظتی است (Ganasri and Ramesh., 2016; Renard., 1997).

عامل فرساینده‌ی بارش (R)

در حالت ایده‌آل، عامل R بر اساس شاخص EI30 (حاصل ضرب انرژی جنبشی بارش در بیشینه شدت ۳۰ دقیقه‌ای) محاسبه می‌شود (Wischmeier & Smith., 1978)، اما در اغلب ایستگاه‌ها داده‌های رگباری در دسترس نیست. در این پژوهش، با توجه به محدودیت داده، از شاخص فورنیه اصلاح‌شده (Modified Fournier Index –

MFI) استفاده شد. این شاخص برای هر سال به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{P} = MFI \quad (1)$$

که در آن P_i بارش ماهانه (میلی‌متر) و P بارش سالانه (میلی‌متر) است. سپس مقدار سالانه‌ی عامل R با استفاده از روابط تجربی تابعی از MFI محاسبه شد. در نهایت، با توجه به تعداد محدود و پراکندگی نامناسب ایستگاه‌ها نسبت به حوضه، برای شلمان‌رود به جای پهنه‌بندی مکانی R، یک مقدار میانگین نماینده بر اساس میانگین چندساله‌ی ایستگاه‌های مؤثر به کل حوضه تخصیص داده شد تا از عدم قطعیت ناشی از درون‌یابی جلوگیری شود.

عامل فرسایش‌پذیری خاک (K)

عامل K حساسیت ذاتی خاک را نسبت به جدا شدن و جابجایی ذرات در اثر ضربه قطرات باران و نیروی برشی رواناب بیان می‌کند و تابعی از بافت، ساختار، نفوذپذیری و میزان ماده‌ی آلی است (Renard et al., 1997). در این مطالعه برای محاسبه‌ی K از رابطه‌ی تجربی Wischmeier et al. (1971) استفاده شد:

$$K = \frac{[M^{1.14} + 3.25(s-2) + 2.5(p-3)(OM-12)^4 \times 10 \times 2.1]}{100} \quad (3)$$

که در آن:

OM: درصد ماده آلی خاک (%)

M: شاخص بافت خاک برابر با (درصد سیلت + درصد شن خیلی ریز) × (۱۰۰ - درصد رس)

S: امتیاز نوع ساختار خاک (از ۱ تا ۴)

P: امتیاز نفوذپذیری پروفیل خاک (از ۱ تا ۶)

مقادیر s و p بر اساس طبقه‌بندی Wischmeier & Smith (1978) و با استفاده از توصیف‌های خاک‌شناسی واحدهای نقشه تعیین شد؛ سپس مقدار K برای هر واحد خاکی محاسبه و به صورت رستری با تفکیک ۳۰ متر در محیط GIS بازنمونه‌برداری شد.

عامل طول و شیب دامنه (LS)

عامل LS نقش توپوگرافی را در RUSLE نشان می‌دهد و ترکیبی از طول شیب (L) و درجه‌ی شیب (S) است. برای محاسبه‌ی LS از مدل ارتفاعی رقومی ۳۰ متری و الگوریتم (Desmet and Govers, 1996) استفاده شد. در این روش، LS برای هر سلول DEM به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$LS = \left(\frac{\sin \theta}{0.0896} \right)^{1.3} \times \left(\frac{\text{FlowAccum} \times \text{CellSize}}{22.13} \right)^m \quad (4)$$

که در آن:

FlowAccum: مقدار تجمع جریان در هر سلول (تعداد

سلول‌های بالادست)

CellSize: اندازه سلول DEM بر حسب متر

θ : زاویه شیب سلول (بر حسب رادیان)

m: نما (Exponent) طول شیب که معمولاً بین ۲/۰ تا ۵/۰ و بر

اساس شیب انتخاب می‌شود.

نمای m بر اساس درصد شیب دامنه تعیین شد؛ به طوری که برای شیب کمتر از ۱ درصد $m=0.2$ ، برای ۱-۳ درصد $m=0.3$ ، برای ۳-۵ درصد $m=0.4$ و برای شیب‌های بیش از ۵ درصد $m=0.5$ در نظر گرفته شد این فرمول امکان محاسبه‌ی پیوسته‌ی LS را در سطح حوضه فراهم می‌کند و برای محیط‌های کوهستانی-ناهموار دقت بیشتری نسبت به روش‌های کلاسیک مبتنی بر طول شیب ثابت دارد (Mitasova et al., 1996; Moore and Wilson., 1992).

عامل پوشش و مدیریت کاربری زمین (C)

عامل C نسبت فرسایش در شرایط واقعی پوشش و مدیریت به فرسایش در شرایط سطح کاملاً برهنه را نشان می‌دهد و بین ۰ و ۱ متغیر است؛ مقادیر نزدیک به صفر بیان‌گر پوشش متراکم و حفاظتی و مقادیر نزدیک به یک بیان‌گر اراضی بدون پوشش یا با پوشش ضعیف است (Renard et al., 1997). در این پژوهش، برای برآورد مکانی C از شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) استخراج‌شده از تصاویر Landsat8 استفاده شد. NDVI برای دوره‌هایی با پوشش حداکثری گیاه (ماه‌های رشد) در محیط GEE محاسبه و سپس با استفاده از یک رابطه‌ی نمایی تجربی به C تبدیل شد:

$$\exp\left(-\alpha \frac{NDVI}{\beta - NDVI}\right) = C \quad (5)$$

که در آن α و β ضرایب تجربی هستند (به‌طور معمول $\alpha=2$ و $\beta=1$ انتخاب می‌شود) و NDVI در بازه‌ی ۱- تا ۱+ قرار دارد (Van der Knijff et al., 2000; De Asis & Omasa, 2007). این رابطه رابطه‌ای معکوس بین NDVI و C ایجاد می‌کند؛ بدین معنا که با افزایش تراکم پوشش گیاهی (افزایش NDVI)، مقدار C کاهش می‌یابد. به این ترتیب، نقشه‌ای پیوسته از عامل C با تفکیک ۳۰ متر برای حوضه‌ی سلمان‌رود تولید شد.

عامل مدیریتی (P) و تلفیق عوامل

عامل P اثر اقدامات مدیریتی و سازه‌ای حفاظت خاک (مانند ترانس‌بندی، کشت روی خطوط تراز، نوارکشت و...) را بر کاهش فرسایش نشان می‌دهد و بین صفر (حفاظت بسیار قوی) تا ۱ (بدون حفاظت) تغییر می‌کند. بررسی نقشه‌های کاربری، تصاویر ماهواره‌ای و اطلاعات موجود نشان داد که در حوضه‌ی سلمان‌رود، اقدامات حفاظتی مهندسی به صورت سیستماتیک و گسترده اجرا نشده است؛ از این رو، مطابق پیشنهاد مطالعات مشابه، مقدار P در کل حوضه برابر ۱ در نظر گرفته شد (Morgan., 2009; Panagos et al., 2015b).

در گام نهایی، تمام لایه‌های R، K، LS، C و P به تفکیک مکانی ۳۰ متر در محیط ArcGIS و GEE هم‌مرجع شده و با استفاده از معادله‌ی RUSLE تلفیق شدند تا نقشه‌ی فرسایش سالانه‌ی خاک در حوضه‌ی سلمان‌رود به دست آید. این نقشه، الگوی مکانی شدت تلفات خاک را نشان می‌دهد و در ادامه به‌عنوان ورودی مدل WaTEM/SEDEM برای شبیه‌سازی انتقال و رسوب‌گذاری استفاده شد.

مدل WaTEM/SEDEM و شبیه‌سازی انتقال رسوب

برای عبور از برآورد صرف فرسایش سطحی و تحلیل نحوه انتقال و رسوب‌گذاری رسوب در مقیاس حوضه، از مدل نیمه‌توزیعی WaTEM/SEDEM استفاده شد (Van Oost et al., 2000; Van Rompaey et al., 2005). در این مدل، ابتدا فرسایش ناخالص سطحی در هر سلول با استفاده از خروجی RUSLE محاسبه می‌شود:

$$E = R \times K \times LS \times C \times P$$

که در آن E فرسایش بالقوه (Gross Erosion) در هر سلول است. سپس برای هر سلول ظرفیت حمل رسوب (Transport Capacity) به صورت تابعی از انرژی جریان سطحی تعریف می‌شود؛ به طور ساده:

$$PRE \times t_c K = TC \quad (6)$$

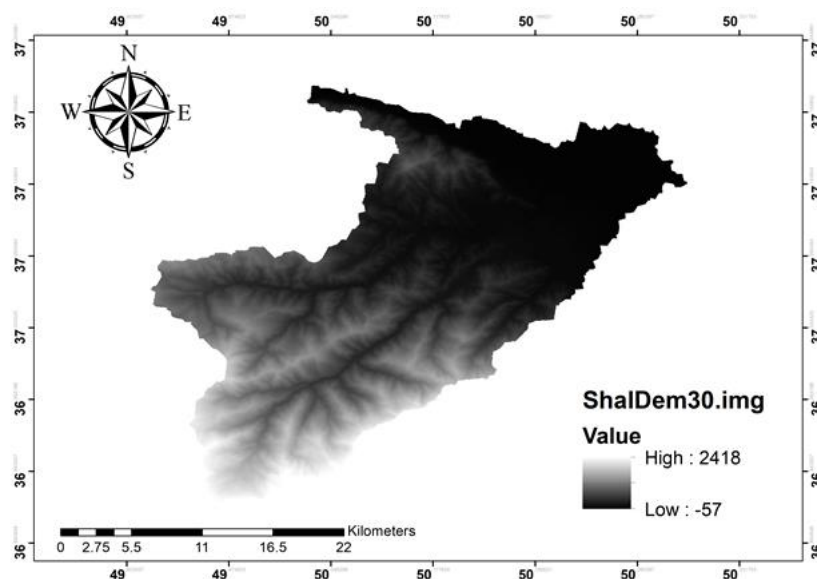
که در آن TC ظرفیت حمل، $t_c K$ ضریب ظرفیت حمل و PRE شاخصی از توان جریان (وابسته به شیب و رواناب) است. مقدار رسوب خروجی از هر سلول (S_{out}) با مقایسه مجموع فرسایش تولیدی و رسوب ورودی از بالادست ($E + S_{in}$) با TC تعیین می‌شود:

اگر $(E + S_{in}) \leq TC$ باشد، کل رسوب تولیدی و ورودی منتقل می‌شود و رسوب‌گذاری محلی رخ نمی‌دهد؛ در این حالت $(E + S_{in}) = S_{out}$.

اگر $(E + S_{in}) > TC$ باشد، تنها مقدار برابر با TC منتقل شده و مازاد به صورت رسوب ته‌نشست‌شده (D) در همان سلول باقی می‌ماند، یعنی $TS = S_{out}$ و $D = TC - (S_{in} + E)$.

برای استخراج جهت جریان و شبکه‌ی زهکشی، از DEM ۳۰ متری و الگوریتم D8 استفاده شد و شبکه‌ی رودخانه‌ها بر اساس روش استرال-هورتون مرتبه‌بندی گردید. سپس با تلفیق مرز حوضه، شبکه‌ی آبراهه‌ها و زیرحوضه‌های فرعی، نقشه‌ی Parcel Map تهیه شد که در آن، هر واحد Parcel یک واحد کاری نسبتاً همگن از نظر موقعیت توپوگرافی و ارتباط با شبکه‌ی زهکشی است. این واحدها در WaTEM/SEDEM به‌عنوان سلول‌های پایه برای محاسبه فرسایش، ظرفیت حمل و رسوب‌گذاری به کار گرفته شدند. پارامترهای انتقال رسوب، به‌ویژه $t_c K$ با استفاده از مقادیر پیشنهادی مطالعات انجام‌شده در حوضه‌های مشابه و رویکرد کالیبراسیون نسبی مکانی تنظیم شد؛ بدین معنا که الگوی مکانی فرسایش و

بررسی‌ها می‌تواند دیدگاهی جامع از وضعیت ارزیابی خطر فرسایش و سیلاب در منطقه مطالعه فراهم آورد و به برنامه‌ریزی مدیریت منابع طبیعی کمک نماید. نقشه‌ی مدل ارتفاعی رقومی حوضه شلمان‌رود الگوی کلی ناهمواری و توزیع ارتفاع را در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهند (شکل ۲). در حوضه شلمان‌رود نیز نقشه DEM نشان‌دهنده تضاد آشکار بین نواحی کوهستانی جنوب و دشت‌های جلگه‌ای شمال است. ارتفاع این حوضه از حدود ۵۷- متر در نواحی نزدیک به ساحل دریای خزر تا حدود ۲۴۱۸ متر در ارتفاعات جنوبی تغییر می‌کند. بخش‌های جنوبی و جنوب‌غربی حوضه با شیب‌های تند و دره‌های باریک مشخص می‌شوند، در حالی که در بخش‌های شمالی و شمال‌شرقی، توپوگرافی به سمت سطوح کم‌شیب و دشت‌های آبرفتی گسترده تغییر می‌یابد. این ساختار توپوگرافی، زمینه شکل‌گیری شبکه زهکشی منشعب و مسیرهای اصلی انتقال رسوب را فراهم کرده و در عین حال، شرایط مناسبی را برای رسوب‌گذاری در دشت‌های پایاب به‌وجود می‌آورد. در شلمان‌رود، نقش نواحی جلگه‌ای و کم‌شیب در پایین‌دست برجسته‌تر است.



شکل ۲- نقشه‌ی مدل ارتفاعی رقومی حوضه شلمان‌رود

رخدادهای همرفتی با انرژی بالا قرار دارد. چنین الگوهایی از نظر هیدرولوژیکی اهمیت ویژه‌ای دارند، زیرا افزایش شدت بارش (I) و افزایش انرژی جنبشی قطرات باران (E) مستقیماً میزان تخریب ساختار خاک و تولید رواناب را افزایش می‌دهد (Renard., 1997; Wischmeier and Smith., 1965). مقدار بالای R در شلمان‌رود نشان‌دهنده‌ی نقش بارش‌های کوتاه‌مدت اما شدید است که ویژگی غالب اقلیم‌های کوهستانی-ساحلی منطقه محسوب می‌شود. قرارگیری بخش‌های وسیعی از حوضه در معرض سامانه‌های بارشی

رسوب‌گذاری مدل، با الگوی حاصل از RUSLE، توپوگرافی و شناخت کیفی از نواحی بحرانی حوضه هم‌خوان گردد (Haregeweyn et al., 2013).

خروجی WaTEM/SEDEM شامل نقشه‌های فرسایش ناخالص، رسوب‌گذاری و رسوب خالص تحویلی به شبکه رودخانه‌ای و همچنین مقادیر تجمیعی مانند کل تولید سالانه رسوب، کل رسوب‌گذاری داخلی و رسوب خروجی از حوضه است که در بخش «نتایج و بحث» تحلیل شده‌اند.

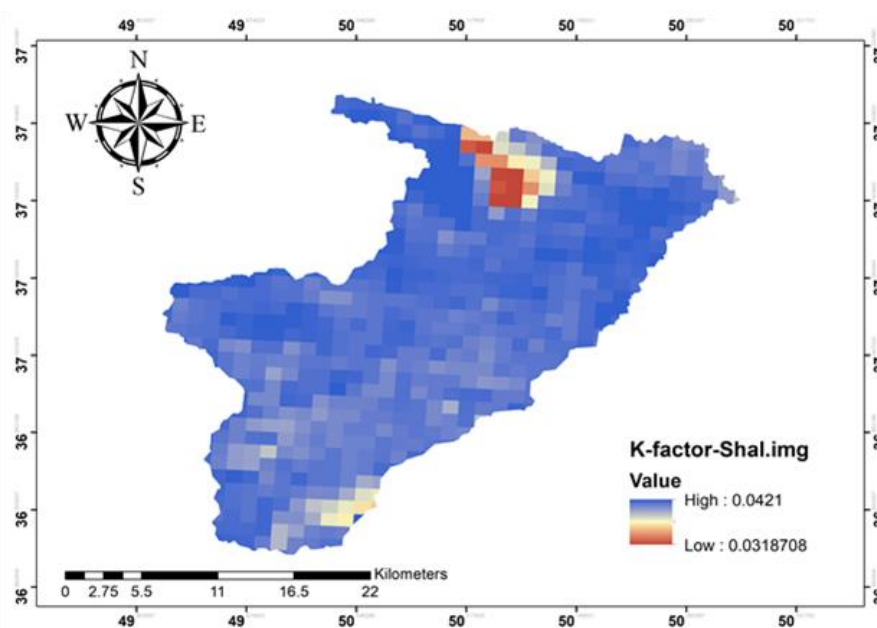
نتایج و بحث

در این بخش به ارائه و تحلیل نتایج به دست آمده از مدل‌های RUSLE و WaTEM/SEDEM پرداخته شده است. همچنین نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب به منظور شناسایی مناطق پرخطر سیلابی تهیه شده‌اند. در ادامه، روابط و همبستگی‌های موجود بین خروجی‌های مدل‌ها مورد بررسی قرار گرفته و تحلیل جامعی درباره کارایی هر یک و نقاط قوت و محدودیت‌های آن‌ها ارائه می‌گردد. این

عامل فرساینده‌ی بارش (R) یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های مدل RUSLE است که شدت انرژی بارش‌های مؤثر بر فرسایش را توصیف می‌کند. مقدار R بر اساس شاخص فورنیه اصلاح‌شده محاسبه شد و نتایج نشان داد که در حوضه شلمان‌رود مورد مطالعه از نظر الگوی بارش و پتانسیل فرسایشی تفاوت قابل توجهی با یکدیگر دارند. بررسی داده‌ها نشان داد که میانگین بلندمدت R در حوضه شلمان‌رود حدود $256 \text{ (MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1})$ است. این عدد نشانگر این است که شلمان‌رود تحت تأثیر بارش‌های رگباری شدید و

جدایش ذرات سیلت هستند. این الگو به طور دقیق با یافته‌های وانچ و همکاران هم‌خوان است که گزارش می‌کنند تغییرات ماده آلی و درصد سیلت اثر مستقیم بر افزایش عدد K دارد (Wunsch et al., 2018). در بخش‌های جنوبی، جنوب‌غربی و مرکزی حوضه، مقادیر K به حداقل مقدار خود یعنی حدود ۰/۰۳۱۹ می‌رسد. این بخش‌ها ساختار خاک رسی‌تر و متراکم‌تر دارند و شیب‌های ملایم‌تری نیز در آن‌ها دیده می‌شود، به طوری که رواناب انرژی کافی برای جدا کردن ذرات ریز را ندارد. در مناطق جنوبی حوضه، عمق خاک بیشتر و ساختار خاک پایدارتر است که موجب کاهش فرسایش‌پذیری می‌شود. این رفتار که کاملاً منطبق بر نقشه است، با نتایج مطالعات داخلی مانند اسفندیاری و همکاران (۱۴۰۰) نیز مطابقت دارد و نشان می‌دهد که خاک‌های رسی‌تر در مناطق رطوبتی شمال ایران حساسیت کمتری نسبت به فرسایش دارند. نکته مهم‌تر این است که الگوی K در شلمان‌رود ارتباط مستقیمی با الگوی پوشش گیاهی نیز دارد. مناطق جنوبی که K پایینی دارند، غالباً دارای پوشش مرتعی متراکم یا اراضی جنگلی نیمه انبوه‌اند. در مقابل، بخش‌های شمالی که بیشترین K را دارند معمولاً تحت تأثیر کاربری‌های انسانی، اراضی باز و کاهش تراکم پوشش گیاهی هستند. این نکته در تحقیق‌های گذشته نیز تأیید شده که تغییر کاربری اراضی در مناطق با بافت سیلتی موجب افزایش K می‌شود (Borrelli et al., 2017).

همرفتی باعث افزایش شاخص فورنیه و در نتیجه افزایش انرژی بارش می‌شود. این الگو با یافته‌های پاناگوس و همکاران در اروپا و نیرینگ و همکاران در آمریکا نیز مطابقت دارد که تأکید می‌کنند مناطق با بارش‌های رگباری دارای R بسیار بالاتر از مناطق با بارش‌های ممتد هستند (Mark Nearing et al., 2017; Panagos et al., 2015b). از منظر ارتباطی، مقدار R بالاتر در شلمان‌رود اثر مضاعفی بر سایر عوامل مؤثر در فرسایش دارد. در نواحی جنوبی و جنوب‌غربی این حوضه که مقدار عوامل LS و K نیز نسبتاً بالا است، افزایش انرژی بارش موجب تشدید چشمگیر فرسایش سطحی می‌شود. چنین رابطه‌ای میان R، توپوگرافی و کاربری زمین در مطالعات دسمت و همکاران و میتاسوا و همکاران و نیز گزارش شده است (Desmet and Govers, 1996; Mitsova et al., 1996). فاکتور K در حوضه شلمان‌رود در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود مقدار فاکتور K در بازه ۰/۰۳۱۹ تا ۰/۰۴۲۱ توزیع شده است. بیشترین مقدار K در این حوضه عمدتاً در شمال، شمال‌شرق و بخش‌هایی از شمال مرکز مشاهده می‌شود که در نقشه با لکه‌های زرد و نارنجی کاملاً مشخص هستند. این بخش‌ها بافت خاک لومی - سیلتی دارند و معمولاً میزان ماده آلی در آن‌ها کمتر است. همچنین، این مناطق در ارتفاعات پایین‌تری قرار گرفته و تحت تأثیر فرایندهای ته‌نشست، خاک‌هایی تشکیل شده که مستعد



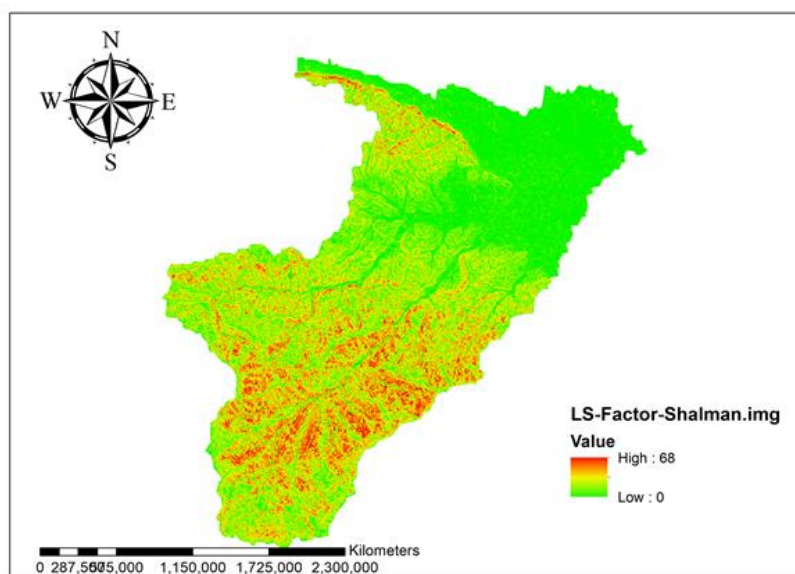
شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی فاکتور K در حوضه شلمان‌رود

مناطق با رنگ‌های نارنجی تا قرمز مشخص شده‌اند و نمایانگر دامنه‌های تند، مسیرهای طولانی جریان و تراکم بالای خطوط آبراهه هستند. نکته مهم این است که شدت LS در شلمان‌رود محدوده

فاکتور LS در حوضه شلمان‌رود در بازه ۰ تا ۶۸ متغیر است (شکل ۴). مقادیر بالای LS (۴۰ تا ۶۸) بیشتر در جنوب، جنوب‌غرب و بخش‌هایی از دامنه‌های جنوبی و جنوب‌شرقی مشاهده می‌شود. این

این الگوی LS بیانگر آن است که حوضه شلمان‌رود دارای تعداد بیشتری از پهنه‌های کم‌شیب و اراضی پایدار است. پژوهش‌های گذشته تأیید می‌کنند که در حوضه‌هایی با مورفولوژی آرام‌تر، دامنه‌هایی با طول کوتاه‌تر نقش مهمی در کاهش پتانسیل فرسایش دارند (Di Stefano et al., 2018; Moore, 2006).

جغرافیایی محدودتری دارد؛ یعنی، در شلمان‌رود تنها در بخش جنوب و دامنه‌های خاصی مشاهده می‌شود. این مسئله نشان‌دهنده توپوگرافی بازتر و متعادل‌تر شمال حوضه است که شیب‌ها در آن ملایم‌تر و طول دامنه کوتاه‌تر است. مناطق شمالی، شمال شرقی و بخش‌هایی از شمال غرب حوضه دارای مقادیر LS بسیار پایین (۰ تا ۲۰) هستند و با رنگ سبز روشن مشخص شده‌اند. از دید فرآیندی،

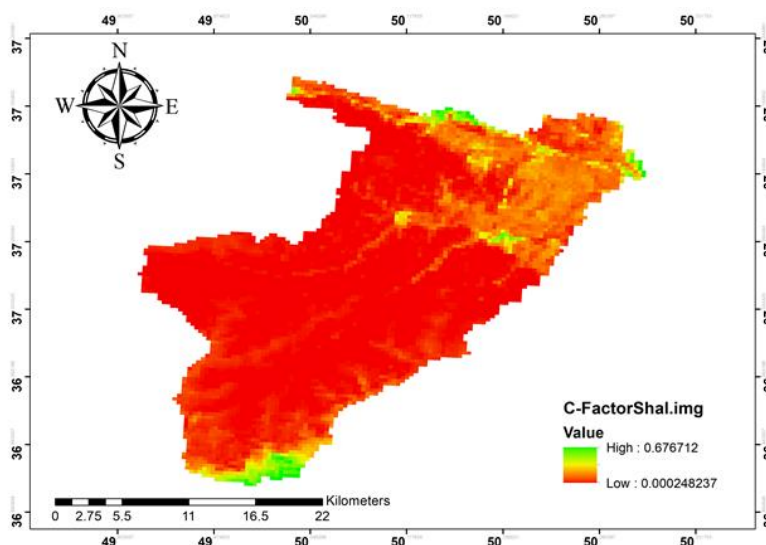


شکل ۴- فاکتور LS در حوضه شلمان‌رود

پایداری بالای زیستی است، اما بخش جنوبی آن نقطه ضعف اصلی از نظر پوشش گیاهی به شمار می‌رود. فاکتور C در شلمان‌رود در بازه ۰/۰۰۰۲۴ تا ۰/۶۷۶۷ قرار دارد (شکل ۵). تحلیل هم‌زمان نقشه NDVI و نقشه فاکتور C نشان می‌دهد که بخش قابل‌توجهی از حوضه دارای مقادیر نسبتاً پایین C است، که بیانگر تراکم متوسط تا مطلوب پوشش گیاهی در اغلب نواحی مرکزی، شمالی و شمال غربی حوضه است. این هم‌پوشانی بین NDVI بالا و C پایین، نشان‌دهنده کارکرد مناسب پوشش گیاهی در کاهش انرژی رواناب و محافظت از خاک در برابر فرسایش است. در مقابل، نوار جنوبی، جنوب غربی و برخی دامنه‌های شرقی حوضه دارای مقادیر بالاتر C هستند که با مقادیر پایین NDVI کاملاً هم‌خوان است. این نواحی، که اغلب شامل اراضی کشت‌پذیر، مراتع فقیر یا اراضی تخریب‌شده هستند، به دلیل کمبود پوشش مؤثر، بیش‌ترین نقش را در افزایش فرسایش بالقوه ایفا می‌کنند. اراضی فاقد پوشش متراکم در مناطق شیب‌دار می‌توانند مقدار C را تا ده‌ها برابر افزایش داده و نقش کلیدی در افزایش نرخ فرسایش داشته باشند (Renard, 1997). این الگو نشان می‌دهد که اگرچه شلمان‌رود دارای مناطق با پوشش مناسب است، اما پراکنش

بررسی نقشه NDVI استخراج‌شده از تصاویر لندست برای حوضه شلمان‌رود نشان می‌دهد که این شاخص در طیف وسیعی از مقادیر تغییر کرده و بیانگر تنوع قابل‌توجه در وضعیت پوشش گیاهی منطقه است. بخش‌های مرکزی و بخش‌هایی از شمال و شمال غرب حوضه دارای مقادیر نسبتاً بالای NDVI هستند که نشان‌دهنده تراکم مناسب پوشش گیاهی، وجود اراضی با پوشش دائمی و یا جنگل‌کاری‌های محدود است. این وضعیت بافتی موجب افزایش زبری سطح، کاهش انرژی ضربه قطرات باران و کاهش فرسایش‌پذیری ذاتی خاک می‌شود (Huete and Liu, 2002). در مقابل، نواحی جنوبی، جنوب غربی و برخی لکه‌های شرقی حوضه دارای مقادیر نسبتاً پایین NDVI هستند. این مناطق اغلب شامل اراضی کشاورزی فصلی، باغات کم‌تراکم، اراضی بایر یا مناطق تحت فشار انسانی هستند که با دوره‌های بدون پوشش مؤثر مواجه‌اند. بر اساس پژوهش تاکر (۱۹۷۹) کاهش NDVI بیانگر کاهش زیست‌توده سبز، کاهش حفاظت طبیعی خاک و افزایش حساسیت نسبت به فرسایش آبی است (Tucker, 1979). توزیع مکانی NDVI در شلمان‌رود به‌وضوح نشان می‌دهد که این حوضه دارای مناطقی با

نامتوازن پوشش گیاهی موجب شده است که بخش جنوبی آن از حساسیت زیاد به فرسایش برخوردار باشد؛ موضوعی که با نتایج خروجی مدل RUSLE نیز به طور کامل هم خوان است.



شکل ۵- نقشه پهنه بندی فاکتور C در شلمان رود

در حوضه شلمان رود، مدل RUSLE مقدار فرسایش سالانه را در بازه‌ای بین مقادیر بسیار نزدیک به صفر تا حدود ۴۴/۱۵۵ تن در هکتار در سال برآورد کرده است. با وجود این دامنه عددی نسبتاً بالا در مقادیر حداکثر، توزیع مکانی شدت فرسایش نشان می‌دهد که بخش غالب حوضه در طبقات خیلی کم و کم قرار دارد و تنها بخش‌های محدودی از حوضه، به‌ویژه در ناحیه جنوبی و جنوب‌غربی، مقادیر فرسایش متوسط تا زیاد را تجربه می‌کنند. این ویژگی باعث می‌شود که شلمان رود، حوضه‌ای با رفتار فرسایشی به‌طور کلی ملایم‌تر به‌شمار آید. بر اساس اصول RUSLE، افزایش مقدار عامل LS در شیب‌های تند و طول دامنه‌های جنوب حوضه، همراه با کاهش پوشش گیاهی در نواحی پایین‌دست، موجب شده است که مقادیر فرسایش در این بخش‌ها به‌شکل معنی‌داری افزایش یابد؛ موضوعی که به‌طور مشابه در مطالعات مشابه نیز گزارش شده است (Bassairate et al., 2025; Van Oost et al., 2000).

برای ارزیابی شدت فرسایش، نقشه خروجی RUSLE بر اساس طبقه‌بندی استاندارد FAO (۱۹۷۹) در پنج کلاس خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد دسته‌بندی گردید (جدول ۱). نتایج نشان داد که حدود ۷۲ درصد از سطح حوضه در کلاس خیلی کم (0-5 t/ha/yr) قرار دارد؛ این نواحی عمدتاً شامل بخش‌های میانی و شمالی حوضه بوده و دارای پوشش جنگلی و مرتعی نسبتاً مناسب، شیب ملایم و نفوذپذیری مناسب خاک هستند. این ویژگی‌ها منجر به کاهش چشم‌گیر نیروی برشی جریان و بهبود پایداری خاک شده

در مدل RUSLE، فاکتور حفاظتی (P) نمایانگر تأثیر عملیات مدیریتی و سازه‌ای بر کاهش فرسایش خاک است. این عامل می‌تواند تغییراتی حاصل از اقداماتی نظیر کشت روی خطوط تراز، ترانس‌بندی، نوارهای کشت متناوب، کنترل زهکشی، بانک‌بندی، مالچ‌پاشی یا اجرای سازه‌های آبخیزداری را در محاسبات وارد کند. با این حال، همان‌گونه که در بخش مواد و روش‌ها تشریح شد، به‌سبب نبود داده‌های معتبر، یکپارچه و مستند درخصوص نوع، گستره و وضعیت نگهداری اقدامات حفاظتی در حوضه شلمان رود، مقدار فاکتور P برابر ۱ در نظر گرفته شد. این انتخاب رویکردی متداول در پژوهش‌هایی است که در آن‌ها داده‌های مدیریتی دقیق موجود نیست (Morgan, 2005; Panagos et al., 2015b; Wischmeier and Smith, 1978).

انتخاب مقدار P برابر یک به این معناست که مدل RUSLE فرسایش را در شرایطی برآورد می‌کند که هیچ نوع اقدام حفاظتی مکانیکی یا مدیریتی مؤثر وجود ندارد. چنین وضعیتی در واقع شبیه‌سازی سناریوی موسوم به بدترین حالت یا Worst-Case Scenario است که در آن پوشش گیاهی و مورفولوژی زمین تنها عوامل کاهش‌دهنده فرسایش محسوب می‌شوند. این رویکرد موجب می‌شود که اثر عوامل طبیعی یعنی R، K، LS و C با دقت بیشتری نمایان شود و نتایج مدل تحت تأثیر تغییرات مدیریتی احتمالی قرار نگیرد. بسیاری از پژوهش‌های کاربردی در حوزه آبخیزداری نیز برای نمایش فرسایش بالقوه در مناطقی فاقد مدیریت مؤثر از مقدار $P = 1$ بهره می‌برند (Durigon et al., 2014; Panagos et al., 2015b).

به افزایش سریع میزان فرسایش شود (Borrelli et al., 2020). در نهایت، حدود ۴ درصد از سطح حوضه در کلاس «زیاد» (20-50 t/ha/yr) و کمتر از ۱ درصد در کلاس خیلی زیاد ($50 < \text{t/ha/yr}$) قرار دارد. این مناطق، که عمدتاً در پایین‌دست و پای‌کوهی‌های جنوبی حوضه قرار گرفته‌اند، به‌عنوان کانون‌های بحرانی تولید رسوب شناخته می‌شوند و بایستی در اولویت اقدامات مدیریتی قرار گیرند. مشابه چنین الگوهای در مطالعات نیرینگ و همکاران و تهرانی و همکاران در مناطق شمالی ایران نیز گزارش شده است (Nearing et al., 2017; Tehrany et al., 2014).

است، تراکم پوشش گیاهی یکی از مهم‌ترین عوامل کاهش فرسایش سطحی در نواحی رطوبتی است. حدود ۱۵ درصد از سطح حوضه در کلاس کم ($5-10 \text{ t/ha/yr}$) قرار گرفت که بیشتر شامل نواحی پایایی و اراضی با شیب متوسط در جنوب و جنوب‌شرقی حوضه است. در طبقه متوسط ($10-20 \text{ t/ha/yr}$) حدود ۸ درصد از مساحت حوضه قرار دارد. این مناطق غالباً در بخش‌های جنوبی مشاهده می‌شوند و ویژگی‌هایی همچون کاهش نسبی پوشش گیاهی، اراضی کشاورزی، و شیب‌های نسبتاً تند دارند. این الگو با یافته‌های بورلی و همکاران همخوان است که نشان می‌دهد در مناطق با مدیریت نامناسب کاربری اراضی، حتی تغییرات کوچک در پوشش گیاهی می‌تواند منجر

جدول ۱- طبقه‌بندی شدت فرسایش در حوضه شلمان‌رود و درصد سطح هر کلاس بر اساس طبقه‌بندی (FAO 1979).

FAO (1979); Renard et al. (1997); Panagos et al. (2015)

ردیف	کلاس شدت فرسایش	دامنه (تن در هکتار در سال)	درصد سطح حوضه (%)	توصیف
۱	خیلی کم	۰-۵	۷۲	پوشش گیاهی مناسب، شیب ملایم، اراضی پایدار
۲	کم	۵-۱۰	۱۵	اراضی با شیب متوسط و مدیریت مناسب
۳	متوسط	۱۰-۲۰	۸	نواحی میان‌شیب با کاربری باغی و مرتعی
۴	زیاد	۲۰-۵۰	۴	شیب‌های تند، کاهش پوشش گیاهی
۵	خیلی زیاد	> 50	کمتر از ۱	کانون‌های بحرانی تولید رسوب

که وجود پوشش نسبتاً مناسب در بخش‌های وسیعی از حوضه، اثر توپوگرافی و سایر عوامل فرسایشی را تا حد زیادی تعدیل کرده است. در این حوضه نیز، به دلیل در نظر گرفتن مقدار $P = 1$ ، نتایج مدل بیانگر وضعیت حوضه در صورت عدم مداخله حفاظتی است، با این تفاوت که وجود پوشش گیاهی بهتر در سطح وسیع‌تری از حوضه، شدت فرسایش را کاهش داده است.

بررسی تطبیقی الگوی مکانی فرسایش در حوضه شلمان‌رود نشان می‌دهد که، بخش‌های وسیعی از حوضه شلمان‌رود دارای فرسایش بسیار پایین هستند، که این امر به‌طور مستقیم با وجود پوشش گیاهی انبوه‌تر، شیب‌های ملایم‌تر و مدیریت بهتر کاربری اراضی در این حوزه مرتبط است. با این حال، تمرکز فرسایش در نواحی جنوب و جنوب‌شرقی نشان می‌دهد که در این مناطق ترکیب عواملی نظیر شیب‌های تند، فرسایش‌پذیری بیشتر خاک، اراضی کشاورزی و باغی، و کاهش پوشش گیاهی سبب افزایش نرخ فرسایش شده است. این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که مدیریت منطقه‌ای و اقدامات آبخیزداری در بخش‌های جنوبی حوضه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و می‌تواند نقش مهمی در کاهش روند تخریب خاک و کاهش تولید رسوب ایفا کند.

مدل WaTEM/SEDEM با استفاده از نقشه فرسایش سطحی برآوردشده توسط RUSLE، مدل ارتفاعی رقومی، گرید شبکه آبراهه‌ها و واحدهای کاری Parcel برای حوضه شلمان‌رود اجرا

تحلیل مکانی خروجی RUSLE در شلمان‌رود نشان می‌دهد که نواحی با فرسایش کم عمدتاً در بخش‌های مرکزی، شمالی و شمال‌غربی حوضه قرار دارند؛ جایی که مقادیر عامل C به‌دلیل وجود پوشش گیاهی نسبتاً مطلوب، در سطح پایین قرار گرفته و نقشه NDVI نیز مقادیر نسبتاً بالایی را نشان می‌دهد. در این مناطق، عامل LS نیز در محدوده‌های پایین‌تر تا متوسط قرار دارد و ترکیب شیب‌های ملایم‌تر، دامنه‌های کوتاه‌تر و پوشش گیاهی فعال، محیطی را رقم زده که در آن حتی در صورت وقوع بارش، پتانسیل فرسایش به‌طور محسوس محدود می‌شود.

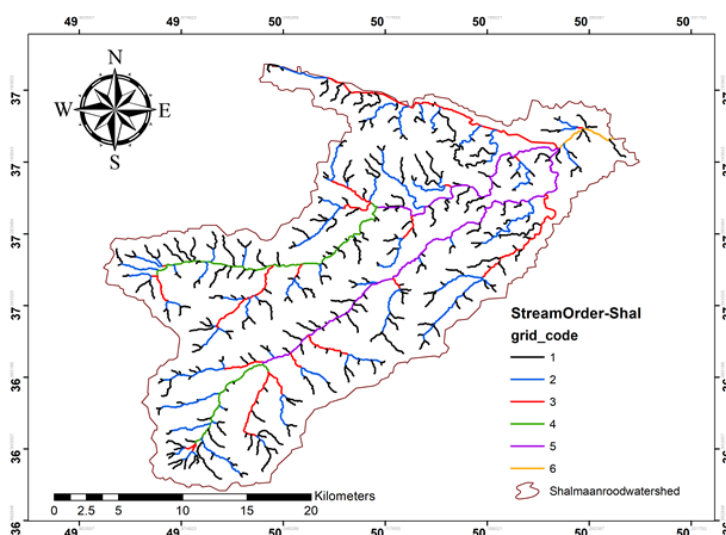
در مقابل، نوار جنوبی و جنوب‌غربی شلمان‌رود به‌عنوان مناطق حساس و بحرانی از نظر فرسایش شناسایی می‌شوند. در این نواحی، مقدار عامل LS افزایش یافته و با حضور سطوح دارای پوشش گیاهی ضعیف‌تر و مقادیر بالاتر C هم‌زمان شده است. این بخش‌ها، که اغلب با کاربری‌های کشاورزی یا اراضی دست‌خورده همراه‌اند، در خروجی RUSLE به‌صورت لکه‌هایی با فرسایش متوسط تا زیاد ظاهر شده‌اند. بنابراین اگرچه سهم این مناطق در مساحت کل حوضه محدود است، اما از نظر تولید رسوب و خطر فرسایش آتی اهمیت قابل توجهی دارند و باید در اولویت برنامه‌ریزی‌های مدیریتی قرار گیرند.

به‌طور کلی، می‌توان گفت که در شلمان‌رود، نقش پوشش گیاهی (C و NDVI) در کنترل فرسایش خیلی تأثیرگذار می‌باشد؛ به‌گونه‌ای

و به عنوان پهنه‌های اصلی تولید رواناب و رسوب عمل می‌کنند، در حالی که آبراهه‌های مراتب ۳ تا ۶، به‌ویژه در بخش‌های مرکزی و شمال شرقی حوضه، ساختار سلسله‌مراتبی نسبتاً منسجم و پیوسته‌ای را تشکیل داده‌اند. این آرایش هیدرولوژیک بیانگر اتصال رسوبی نسبتاً قوی‌تر بسیاری از واحدهای بالادست به محورهای اصلی زهکشی است. نقشه Parcel Map شلمان رود نیز نشان می‌دهد که واحدهای کاری مدل در این حوضه از نظر توپوگرافی و موقعیت نسبت به شبکه آبراهه‌ها تنوع زیادی دارند (شکل ۷). بخش‌های وسیعی از ناحیه مرکزی و شمالی حوضه، به‌ویژه در مجاورت آبراهه‌های مراتب بالاتر، در کلاس‌هایی قرار گرفته‌اند که از نظر ظرفیت انتقال، پتانسیل بالایی برای هدایت رسوب دارند. در مقابل، دشت‌های پای کوهی جنوب حوضه و برخی مناطق کم‌شیب میانی، به عنوان واحدهای گیرنده رسوب و مخازن موقتی عمل می‌کنند. این ناهمگونی فضایی در ظرفیت تولید و انتقال رسوب، زمینه شکل‌گیری الگوهای پیچیده فرسایش و رسوب‌گذاری را در خروجی مدل فراهم کرده است (Mitasova et al., 1996; Van Oost et al., 2000).

گردید. هدف از به‌کارگیری این مدل، فراتر رفتن از برآورد صرف فرسایش سطحی و شبیه‌سازی زنجیره کامل تولید، انتقال و رسوب‌گذاری رسوب در مقیاس حوضه‌ای بود. ابتدا نتایج کمی مدل شامل مقادیر کل فرسایش، رسوب‌گذاری و رسوب خروجی از هر حوضه ارائه می‌شود و سپس الگوی مکانی فرسایش و رسوب‌گذاری در ارتباط با توپوگرافی، شبکه زهکشی، فاکتورهای K و C و ساختار Parcel Mapها تحلیل می‌گردد. به‌ویژه، بر نقش نواحی پرشیب مجاور آبراهه‌های مرتبه پایین به عنوان منابع اصلی تولید رسوب و نیز بر اهمیت واحدهای کم‌شیب میانی و پایین‌دست به عنوان پهنه‌های غالب رسوب‌گذاری تأکید خواهد شد.

برای حوضه شلمان رود نیز مدل WaTEM/SEDEM با استفاده از همان چارچوب مفهومی و ورودی‌های مشابه اجرا شد. نقشه مرتبه‌بندی آبراهه‌ها در این حوضه که در شکل (۶) نشان داده شده است، وجود شبکه‌ای پیچیده‌ای را نشان می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که آبراهه‌ها در شش مرتبه جریان طبقه‌بندی شده‌اند. شاخه‌های مرتبه ۱ و ۲ دامنه‌های شیب‌دار جنوبی و جنوب‌غربی را با تراکم بالا پوشانده‌اند



شکل ۶- مرتبه‌بندی آبراهه‌ها در حوضه شلمان رود

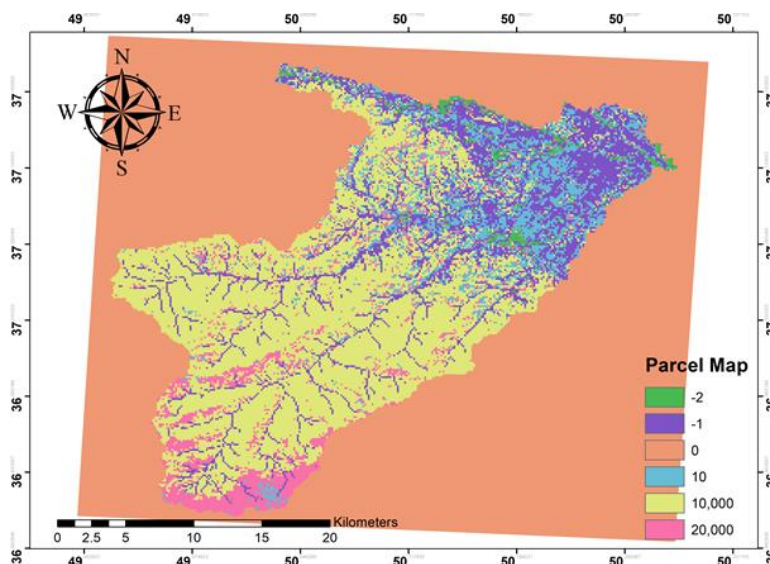
۶۰۳/۸۴۰ تن در سال برآورد شده است. این مقدار چند برابر تولید سالانه رسوب است و مدل، مقادیر Total Sediment Export و Total River Export را با علامت منفی گزارش کرده است. از لحاظ مفهومی، این وضعیت نشان‌دهنده غلبه بسیار شدید رسوب‌گذاری بر انتقال خالص رسوب است؛ به عبارت دیگر، شلمان رود در بازه زمانی شبیه‌سازی شده، بیش از آن که یک حوضه صادرکننده رسوب باشد، به مثابه یک حوضه گیرنده رسوب عمل می‌کند و بخش زیادی از مواد رسوبی تولیدشده در داخل خود حوضه ذخیره می‌شود. این ویژگی را می‌توان نتیجه وجود پهنه‌های وسیع کم‌شیب و

نتایج کمی مدل برای حوضه شلمان رود در شکل (۸) نشان داد که کل تولید سالانه رسوب در این حوضه برابر با ۷۳/۸۲۹ تن در سال و برای منطقه به ازای مساحت ۵۰۳۰۳ هکتار مقدار فرسایش ۱/۴۶ تن بر هکتار در سال برآورد شد. در مجموع می‌توان گفت که علی‌رغم فرساینده‌گی بالای بارش در شلمان رود، ترکیبی از پوشش گیاهی مناسب در بخش‌هایی از حوضه، ویژگی‌های فیزیکی خاک و کاربری‌های کمتر تخریب‌گر، موجب شده است که تولید ناخالص رسوب در مقیاس حوضه کمتر باشد.

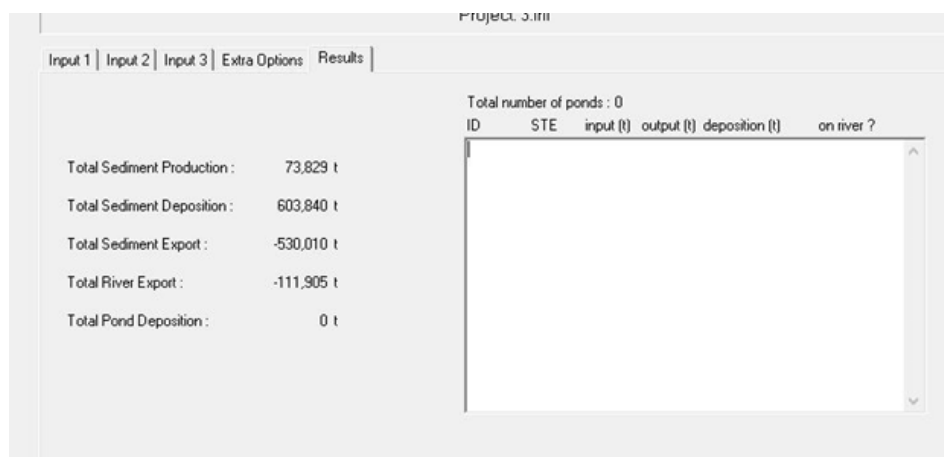
در عین حال، کل رسوب‌گذاری سالانه در حوضه شلمان رود حدود

۱ و ۲ به شبکه اصلی متصل‌اند، اما در مقاطع متعدد پایین‌دست، کاهش شیب، گسترش دشت‌های سیلابی و افزایش عرض بستر، ظرفیت انتقال را کاهش داده و شرایط را برای رسوب‌گذاری گسترده فراهم کرده است. این امر به‌ویژه در نواحی مرکزی و شمالی حوضه که بخش عمده شبکه مراتب بالاتر در آن‌ها قرار دارد مشاهده می‌شود و می‌تواند پیامدهایی نظیر پرشدن بستر رودخانه‌ها، کاهش ظرفیت عبور جریان و افزایش خطر سیلاب‌های آتی را در پی داشته باشد.

دشت‌های سیلابی در میانه و پایین‌دست حوضه، تغییرات کاربری اراضی و احتمالاً کاهش ظرفیت انتقال در برخی مقاطع رودخانه دانست؛ موضوعی که در مطالعات مشابه WaTEM/SEDEM در حوضه‌های کشاورزی اروپا نیز گزارش شده است (Van Rompaey et al., 2005; Verstraeten et al., 2002). مقایسه توزیع مکانی واحدهای Parcel و شبکه آبراهه‌ها در شلمان‌رود نشان می‌دهد که اگرچه واحدهای بالادست تولیدکننده رسوب از طریق شاخه‌های مرتبه



شکل ۷- نقشه Parcel Map شلمان‌رود



شکل ۸- نتایج کمی مدل WaTEM/SEDEM در حوضه شلمان‌رود

مقیاس حوضه شبیه‌سازی نمود. به عبارت دیگر، RUSLE اطلاعات مربوط به «چقدر خاک در هر نقطه جدا می‌شود» را فراهم می‌کند، در حالی که WaTEM/SEDEM مشخص می‌سازد که چه مقدار از این خاک جدا شده واقعاً در پایین‌دست رسوب می‌کند یا از حوضه خارج می‌شود (Govers et al., 1996; Van Oost et al., 2000).

مدل RUSLE در این پژوهش به‌عنوان ابزار پایه برای برآورد فرسایش سطحی بالقوه در سطح پیکسل و تولید نقشه پراکنش مکانی نرخ فرسایش سالانه به‌کار گرفته شد، در حالی که مدل WaTEM/SEDEM با استفاده از همین برآوردهای اولیه فرسایش، به‌عنوان مازول ورودی، فرآیند انتقال و رسوب‌گذاری رسوب را در

است.

نتیجه گیری

نتایج مدل RUSLE نشان داد که رفتار فرسایشی حوضه شلمان رود، علی‌رغم وجود مقادیر نسبتاً بالای فرسایش در برخی دامنه‌های جنوبی و جنوب‌شرقی، در مقیاس حوضه‌ای به‌طور کلی ملایم است. دامنه تغییرات فرسایش سالانه از مقادیر نزدیک به صفر تا حدود ۱۵/۴۴ تن در هکتار در سال متغیر بود، اما بیش از دو سوم مساحت حوضه در طبقات خیلی کم و کم قرار گرفت و تنها کمتر از یک درصد از سطح حوضه در کلاس خیلی زیاد (بیش از ۵۰ تن در هکتار در سال) جای گرفت. این الگو نشان می‌دهد که ترکیب شیب‌های ملایم، پوشش گیاهی نسبتاً مناسب و بافت‌های مقاوم‌تر خاک در بخش‌های وسیعی از حوضه، توانسته است اثر فرساینده‌گری بالای بارش را تعدیل کند؛ در مقابل، نواحی پرشیب جنوبی، با کاربری‌های کشاورزی و کاهش تراکم پوشش گیاهی، به‌عنوان کانون‌های بحرانی تولید رسوب شناسایی می‌شوند و باید در اولویت اقدامات حفاظتی قرار گیرند. مدل WATTEM/SEDEM با افزودن بُعد «انتقال و رسوب‌گذاری» به برآوردهای اولیه RUSLE، تصویر کامل‌تری از رفتار رسوبی حوضه ارائه کرد. خروجی مدل نشان داد که کل تولید سالانه رسوب در حوضه شلمان رود حدود ۷۳،۸۲۹ تن در سال و نرخ ویژه فرسایش ۴۶/۱ تن در هکتار در سال است، در حالی که مقدار رسوب‌گذاری داخلی به حدود ۶۰۳،۸۴۰ تن در سال می‌رسد؛ یعنی چند برابر مقدار تولید سالانه رسوب. این نسبت بیانگر آن است که حوضه از دید رسوبی بیش از آن که صادرکننده باشد، یک «حوضه گیرنده» است و بخش عمده رسوب در دشت‌های پای‌کوهی، پهنه‌های کم‌شیب میانی و مجاری پایین‌دست ته‌نشست می‌شود. تحلیل نقشه Parcel Map و شبکه آبراهه‌ها نیز نشان داد که واحدهای بالادست پرشیب، در مجاورت شاخه‌های مرتبه ۱ و ۲، کانون‌های اصلی تولید رسوب هستند، در حالی که واحدهای کم‌شیب میانی و شمالی به‌عنوان مخازن موقتی رسوب و پهنه‌های غالب رسوب‌گذاری عمل می‌کنند. از منظر مدیریتی، هم‌نشینی نتایج RUSLE و WATTEM/SEDEM نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی حفاظت خاک در حوضه شلمان رود باید دو سطح متفاوت را هم‌زمان هدف‌گذاری کند: نخست، مهار تولید رسوب در دامنه‌های پرشیب جنوبی از طریق بهبود پوشش گیاهی، کاهش تبدیل کاربری اراضی حساس و اجرای عملیات مکانیکی نظیر ترانس‌بندی در نقاط بحرانی؛ دوم، مدیریت رسوب‌گذاری و پایدارسازی مقاطع رودخانه‌ای و دشت‌های پای‌کوهی که در حال حاضر بخش قابل‌توجهی از رسوبات در آن‌ها انباشته می‌شود و می‌تواند در بلندمدت موجب پرشدن مجاری، کاهش ظرفیت عبور جریان و افزایش خطر آب‌گرفتگی و

این ترتیب منطقی استفاده از دو مدل، امکان تحلیل زنجیره‌ای تولید و انتقال رسوب را فراهم کرده و به درک کامل‌تری از رفتار فرسایشی دو حوضه منجر شده است.

در حوضه شلمان رود RUSLE مناطقی با فرسایش بالا، به‌ویژه در دامنه‌های جنوبی و جنوب‌غربی، را مشخص کرد، اما نتایج WATTEM/SEDEM بیانگر آن است که حوضه از نظر انتقال خالص رسوب، رفتاری کاملاً «گیرنده» دارد. تولید سالانه رسوب در شلمان رود حدود ۷۳/۸۲۹ تن برآورد شد، در حالی که حجم رسوب‌گذاری داخلی به بیش از ۶۰۳ هزار تن در سال می‌رسد و رسوب خروجی خالص حوضه بسیار ناچیز است. این پدیده را می‌توان نتیجه وجود واحدهای گسترده‌ی کم‌شیب، دشت‌های سیلابی و مقاطع با ظرفیت انتقال پایین در میانه و پایین‌دست حوضه دانست که در نقشه‌های Parcel Map و گرید آبراهه‌ها نیز به‌وضوح دیده می‌شود. بنابراین، در حالی که RUSLE صرفاً شدت فرسایش سطحی را نشان می‌دهد، WATTEM/SEDEM نشان می‌دهد که چگونه همین فرسایش در یک سیستم هیدروژئومورفیک خاص، می‌تواند عمده‌تاً به رسوب‌گذاری داخلی تبدیل شود و تأثیر آن بر رسوب‌دهی خروجی حوضه محدود بماند؛ نتیجه‌ای که با یافته‌های ورستران و همکاران و ون رامپی همکاران در حوضه‌های کشاورزی اروپا هم‌خوان است (Van Rompaey et al., 2001; Verstraeten et al., 2002).

برهم‌کنش این دو مدل در حوضه مورد مطالعه چند نکته کلیدی مدیریتی را برجسته می‌کند. نخست آن که RUSLE برای شناسایی مناطق بحرانی تولید فرسایش ضروری است، اما به‌تنهایی برای برآورد خطر رسوب‌دهی پایین‌دست کافی نیست؛ زیرا بدون در نظر گرفتن شبکه آبراهه‌ها، واحدهای انتقال و مکان‌های رسوب‌گذاری، نمی‌توان تصمیم گرفت که کدام مناطق واقعاً بیش‌ترین سهم را در رسوب مخزن، رودخانه اصلی یا سازه‌های پایین‌دست دارند. دوم آن که، WATTEM/SEDEM با استفاده از همان اطلاعات فرسایش RUSLE و اضافه کردن ساختار شبکه زهکشی و Parcel Map، قادر است زنجیره‌ی تولید انتقال رسوب‌گذاری را تکمیل کند. سوم آن که، ترکیب نتایج دو مدل کمک می‌کند تا راهبردهای حفاظتی متناسب طراحی شوند؛ به‌گونه‌ای که در شلمان رود علاوه بر کنترل فرسایش، مدیریت رسوب‌گذاری و پایدارسازی مقاطع رودخانه‌ای در دشت‌های پای‌کوهی اهمیت ویژه‌ای می‌یابد.

در مجموع، مقایسه و هم‌نشینی نتایج RUSLE و WATTEM/SEDEM در حوضه شلمان رود نشان می‌دهد که استفاده توأم از یک مدل تجربی-آماری فرسایش (RUSLE) و یک مدل فرآیندی انتقال رسوب (WATTEM/SEDEM) می‌تواند تصویری واقع‌بینانه‌تر و سیستم‌محور از رفتار فرسایشی-رسوبی حوضه‌ها ارائه کند؛ تصویری که نه تنها برای فهم علمی فرایندها، بلکه برای طراحی اقدامات عملی حفاظت خاک و مدیریت جامع آبخیز نیز بسیار ارزشمند

- assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*. 8(2013).
- Borrelli, P., Robinson, D.A., Panagos, P., Lugato, E., Yang, J.E., Alewell, C., Wuepper, D., Montanarella, L. and Ballabio, C. 2020. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 117(44): 21994–22001.
- Borselli, L., Cassi, P. and Torri, D. 2008. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *Catena*. 75(3): 268–277.
- Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F. and Marchi, L. 2013. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology*. 188: 31–41.
- De Asis, A.M. and Omasa, K. 2007. Estimation of vegetation parameter for modeling soil erosion using linear Spectral Mixture Analysis of Landsat ETM data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 62(5): 309–324.
- Desmet, P.J.J. and Govers, G. 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*. 51(5): 427–433.
- Di Stefano, C., Ferro, V., Palmeri, V. and Pampalone, V. 2018. Testing slope effect on flow resistance equation for mobile bed rills. *Hydrological Processes*. 32(4): 664–671.
- Durigon, V.L., Carvalho, D.F., Antunes, M.A.H., Oliveira, P.T.S. and Fernandes, M.M. 2014. NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed. *International Journal of Remote Sensing*. 35(13): 441–453.
- Ganasri, B.P. and Ramesh, H. 2016. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS-A case study of Nethravathi Basin. *Geosciences Frontiers*. 7(12): 953–961.
- García-Ruiz, J.M., Beguería, S., Nadal-Romero, E., González-Hidalgo, J.C., Lana-Renault, N. and Sanjuán, Y. 2015. A meta-analysis of soil erosion rates across the world. *Geomorphology*. 239: 160–173.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. and Moore, R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 202: 18–27.
- Govers, G., Quine, T.A., Desmet, P.J.J. and Walling, D.E. 1996. The relative contribution of soil tillage and overland flow erosion to soil redistribution on agricultural land. *Earth Surface Processes and Landforms*. 21(11): 929–946.
- Hajabbasi, M.A., Jalalian, A. and Karimzadeh, H.R. 1997. Deforestation effects on soil physical and chemical properties, Lordegan, Iran. *Plant and Soil*. 190(1): 301–308.
- Haregeweyn, N., Poesen, J., Verstraeten, G., Govers, assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*. 8(2013).
- داد که ترکیب یک مدل تجربی-آماري فرسایش (RUSLE) با یک مدل فرآیندی انتقال رسوب (WATEM/SEDEM) و استفاده از قابلیت‌های سنجش از دور و پردازش ابری GEE برای تولید فاکتورهای R، C و LS، در شرایط محدودیت داده‌های میدانی، امکان تحلیل مکانی نسبتاً دقیق فرسایش و رسوب را در مقیاس حوضه فراهم می‌کند. با این حال، نبود داده‌های اندازه‌گیری‌شده رسوب در خروجی حوضه و فرض $P=1$ (سناریوی بدترین حالت) سبب می‌شود که نتایج بیشتر برای رتبه‌بندی مکانی و شناسایی نواحی بحرانی قابل اتکا باشند تا برای تفسیر مطلق مقادیر حجمی رسوب پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، کالیبراسیون مدل WaTEM/SEDEM با داده‌های رسوب‌سنجی، تحلیل سناریوهای مختلف مدیریتی (تغییر کاربری، عملیات حفاظتی) و به‌کارگیری شاخص‌های «ارتباط‌پذیری رسوب» در کنار این چارچوب مدلی مورد توجه قرار گیرد تا فرآیند تولید و انتقال رسوب در حوضه‌های شمال ایران با دقت بیشتری بازنمایی شود.
- ### منابع
- اسفندیاری، ف. و قراچورلو، م. ۱۳۹۴. بررسی روابط مکانی - زمانی بار رسوب معلق با بارش حوضه (مطالعه موردی: حوضه ی آبریز قره سو). *هیدروژئومورفولوژی*. ۲(۴): ۱۲۵-۱۴۲.
- Alewell, C., Borrelli, P., Meusburger, K. and Panagos, P. 2019. Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International Soil and Water Conservation Research*. 7(2): 203–225.
- Arnoldus, H.M.J. 1980. An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. (Thesis/Report).
- Bai, Z.G., Dent, D.L., Olsson, L. and Schaepman, M.E. 2008. Global assessment of land degradation and improvement 1. Identification by remote sensing. Report 2008.
- Bassairate, O., Chikhaoui, M., Naimi, M. and Achahboun, C. 2025. Scalable and automated soil erosion assessment using Google Earth Engine: integrating RUSLE and SDR for cloud-based modeling. *Arabian Journal of Geosciences*. 18(157).
- Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, D. and Norton, K. 2018. A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation (® USLE): With a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*. 22(16): 6059–6086.
- Blatt, H., Middleton, G.V. and Murray, R.C. 1980. Origin of sedimentary rocks.
- Borrelli, P., Robinson, D.A., Fleischer, L.R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schütt, B. and Ferro, V. 2017. An

- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Alewell, C. and Lugato, E. 2015a. Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land Use Policy*. 48: 38–50.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Van Der Zanden, E.H., Poesen, J., Alewell, C. and Montanarella, L. 2015b. Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale. *Environmental Science & Policy*. 51: 23–34.
- Papaiordanidis, S., Gitas, I.Z. and Katagis, T. 2019. Soil erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in Google Earth Engine (GEE) cloud-based platform. *Bulletin of the Soil Institute*. 36: 53–62.
- Pimentel, D. and Burgess, M. 2013. Soil erosion threatens food production. *Agriculture*. 3(4): 443–463.
- Renard, K.G. 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). US Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- Renard, K.G. and Freimund, J.R. 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*. 157(3-4): 287–306.
- Samanta, R.K., Bhunia, G.S., Shit, P.K. and Pourghasemi, H.R. 2018. Flood susceptibility mapping using geospatial frequency ratio technique: a case study of Subarnarekha River Basin, India. *Modeling Earth Systems and Environment*. 4(4): 395–408.
- Tehrany, M.S., Pradhan, B. and Jebur, M.N. 2014. Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *Journal of Hydrology*. 512: 332–343.
- Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 8(4): 127–150.
- Van der Knijff, J.M., Jones, R.J.A., Montanarella, L. and Poesen, J. 2000. Global soil erosion assessment.
- Van Oost, K., Govers, G., Desmet, P. and Walling, D.E. 2000. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape Ecology*. 15(6): 577–589.
- Van Rompaey, A., Bazzoffi, P., Jones, R.J.A., Montanarella, L. and Poesen, J. 2005. Modelling sediment yields in Italian catchments. *Geomorphology*. 65(1-2): 157–169.
- Van Rompaey, A.J.J., Verstraeten, G., Van Oost, K., Govers, G. and Poesen, J. 2001. Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach. *Earth Surface Processes and Landforms*. 26(12): 1221–1236.
- Verstraeten, G., Van Oost, K., Van Rompaey, A., Poesen, J. and Govers, G. 2002. Evaluating an integrated approach to catchment management to G., De Vente, J., Nyssen, J., Deckers, J. and Moeyersons, J. 2013. Assessing the performance of a spatially distributed soil erosion and sediment delivery model (WATEM/SEDEM) in Northern Ethiopia. *Land Degradation & Development*. 24(2): 188–204.
- Haregeweyn, N., Tsunekawa, A., Poesen, J., Tsubo, M., Meshesha, D.T., Fenta, A.A., Nyssen, J. and Adgo, E. 2017. Comprehensive assessment of soil erosion risk for better land use planning in river basins: Case study of the Upper Blue Nile River. *Science of The Total Environment*. 574: 95–108.
- Huete, A.R. and Liu, H.Q. 2002. An error and sensitivity analysis of the atmospheric-and soil-correcting variants of the NDVI for the MODIS-EOS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 40(4): 897–905.
- Jodhani, K.H., Patel, D., Madhavan, N. and Singh, S.K. 2023. Soil erosion assessment by rusle, google earth engine, and geospatial techniques over rel river watershed, gujarat, india. *Water Conservation Science and Engineering*. 8(1): 49.
- Lal, R. 2001. Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development*. 12(6): 519–539.
- López-Vicente, M., Poesen, J., Navas, A., Gaspar, L. and Sanjuán, Y. 2013. Predicting runoff and sediment connectivity and soil erosion by water for different land use scenarios in the Spanish Pre-Pyrenees. *Catena*. 102: 62–73.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R. and Thieken, A. 2010. Review article “Assessment of economic flood damage”. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 10(5): 1697–1724.
- Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M. and Iverson, L.R. 1996. Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*. 10(6): 629–641.
- Montanarella, L., Pennock, D.J., McKenzie, N., Badraoui, M., Chude, V., Baptista, I., Mamo, T., Yagi, K. and Singh Aulakh, M. 2016. World's soils are under threat. *Soil*. 2(1): 79–82.
- Moore, I.D. and Wilson, J.P. 1992. Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation. *Journal of Soil and Water Conservation*. 47(5): 423–428.
- Moore, W.S. 2006. The role of submarine groundwater discharge in coastal biogeochemistry. *Journal of Geochemical Exploration*. 88(5): 389–393.
- Morgan, R.P.C. 2009. *Soil erosion and conservation*. John Wiley & Sons.
- Morgan, S.L. 2005. *On the edge of commitment: Educational attainment and race in the United States*. Stanford University Press.
- Nearing, M.A., Lane, L.J., Lopes, V.L. and Polyakov, V.O. 2017. Rainfall erosivity: An historical review. *Catena*. 157: 357–362.
- Nearing, M.A., Yin, S., Borrelli, P. and Polyakov, V.O. 2017. Rainfall erosivity: An historical review. *Catena*. 157: 357–362.

- rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- Wunsch, M., Betzler, C., Eberli, G.P., Lindhorst, S., Lüdmann, T. and Reijmer, J.J.G. 2018. Sedimentary dynamics and high-frequency sequence stratigraphy of the southwestern slope of Great Bahama Bank. *Sedimentology*. 363: 96–117.
- reduce soil loss and sediment pollution through modelling. *Soil Use and Management*. 18(4): 386–394.
- Walling, D.E. 1983. The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology*. 65(3-4): 209–237.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide for conservation planning. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. 1965. Predicting

Spatial Modeling of Soil Erosion and Sediment Deposition in the Shalmanrud Watershed Using RUSLE and WaTEM/SEDEM

E. Mirabdolahi¹, E. Amiri^{2*}, A. Hooshmand Aini³, M. Ashouri⁴

Recived: Dec.27, 2025

Accepted: May.27, 2025

Abstract

This study aims to assess the spatial patterns of soil erosion and sediment dynamics in the Shalmanrud watershed, eastern Gilan Province, Iran, using an integrated modeling framework combining the RUSLE and WaTEM/SEDEM models within the Google Earth Engine (GEE) platform. Rainfall erosivity (R) was estimated from 20 years of monthly precipitation records using the Modified Fournier Index, while soil erodibility (K) was derived from soil texture and organic matter content based on the Wischmeier equation. The topographic factor (LS) was calculated from a 30-m resolution digital elevation model using the Desmet and Govers algorithm, and the cover-management factor (C) was obtained from NDVI values derived from Landsat 8 imagery. Owing to the absence of effective soil conservation measures, the support practice factor (P) was assumed to be unity across the watershed. The spatially distributed RUSLE outputs were subsequently used as inputs to the WaTEM/SEDEM model to simulate sediment production, transport, and deposition processes. Results indicate that annual soil erosion rates range from near zero to approximately $44.15 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, with nearly 72% of the watershed classified as very low erosion ($<5 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$). WaTEM/SEDEM simulations estimate total annual sediment production at about $73,829 \text{ t yr}^{-1}$ ($\approx 1.46 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), whereas internal sediment deposition reaches approximately $603,840 \text{ t yr}^{-1}$. These findings suggest that the Shalmanrud watershed predominantly functions as a sediment sink rather than a sediment-exporting system.

Keywords: Soil erosion, sedimentation, model, Google Earth Engine (GEE), spatial zoning.

1- PhD student, Department of Water Engineering, La, C., Islamic Azad University, Lahijan, Iran

2- Professor, Department of Water Engineering, La, C. Islamic Azad University, Lahijan, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, R, C., Islamic Azad University, Roudbar, Iran

4- Assistant Professor, Department of Agriculture, La, C. Islamic Azad University, Lahijan, Iran

(* - Corresponding Author Email: eamiri57@iau.ac.ir)