

## برآورد نرخ سالانه فرسایش خاک در حوضه آبریز الشتر استان لرستان

امیرکرم\* - دانشیار ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی تهران، تهران، ایران.  
پرویز ضیائی‌ان فیروزآبادی - دانشیار گروه سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی تهران، ایران.  
علی احمدآبادی - دانشیار ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی تهران، ایران.  
علی داودی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی تهران، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۱۱      تأیید نهایی: ۱۴۰۳/۰۸/۱۷

### چکیده

فرسایش خاک یکی از مشکلات زیستمحیطی بسیاری از کشورها به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک مانند ایران است که سالانه خسارات قابل توجهی در کشور به بار می‌آورد، لذا شناسایی مناطق با فرسایش زیاد در جهت حفاظت خاک و کنترل فرسایش از مسائل مهم برنامه ریزی و مدیریتی کشور است. در این پژوهش هدف برآورد نرخ سالانه فرسایش خاک در حوضه آبریز الشتر در استان لرستان است که برای این منظور از مدل LAMPT استفاده شد. این مدل اساساً مبتنی بر معادله جهانی فرسایش خاک است. پارامترهای محیطی مدل شامل داده‌های اقلیمی، پوشش زمین و ژئومورفولوژی از ادارات هواشناسی، منابع طبیعی و تصاویر ماهواره‌ای سنجنده Sentinel-2 سال ۲۰۲۳ به دست آمدند. برای تکمیل داده‌ها، بررسی‌های میدانی انجام شد و برای تهیه نقشه کاربری زمین نمونه داده‌های آموزشی نیز انتخاب شدند. نتایج ارزیابی فرسایش خاک نشان داد که میانگین فرسایش ویژه سالانه در سطح حوضه ۹/۴۲ تن در هکتار در سال است که در مقایسه با میانگین رسوبدهی حوضه در ایستگاه سراب سید علی (خروجی حوضه)، مدل دقت مناسبی دارد. همچنین طبقه‌بندی نقشه فرسایش خاک نشان داد که ۳۵ درصد حوضه فرسایش سالانه ای بیش از ۱۰ تن در هکتار دارد. ارزیابی میزان فرسایش خاک در کاربرهای اراضی نشان داد که نرخ فرسایش خاک در مراتع با پوشش تاج ضعیف، متوسط و متراکم به ترتیب ۱۷/۷، ۱۱/۳ و ۹/۱ تن در هکتار در سال است. با توجه به میزان وسعت مراتع در حوضه، نرخ فرسایش بالای خاک در آن‌ها به‌خصوص در مراتع با پوشش تاج ضعیف، برنامه‌ریزی کاربری اراضی و استفاده بهینه از مراتع به منظور کاهش نرخ فرسایش خاک در حوضه، ضروری است. انجام عملیات حفاظت خاک و آبخیزداری در زیرحوضه‌های شمالی و شمال شرقی و نیز در مراتع با پوشش تاج ضعیف از جمله اقدامات اساسی اولویت دار است.

واژگان کلیدی: فرسایش خاک، مدل LAMPT حوضه آبریز الشتر، مدیریت منابع خاک، کاربری اراضی.

## مقدمه

فرسایش خاک مسئله‌ای بسیار مهم در اغلب کشورها، به‌ویژه کشورهای درحال توسعه و با اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک است (کرم و همکاران، ۱۳۸۸). این مساله یک پدیده متغیر زمانی- مکانی است که به‌طور بالقوه تحت تأثیر فرآیندهای غیرثابت قرار می‌گیرد (Nearing, 2000: Quinton, 2004) بنابراین اندازه‌گیری‌های کمی فرسایش نیاز به مشاهدات متعدد در زمان و مکان دارد. این اندازه‌گیری‌ها همیشه سطحی از عدم قطعیت دارند و هزینه‌بر و زمان‌بر هستند (Stroosnijder, 2005). امروزه با گسترش فناوری‌های فضایی سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، روش‌های درون‌یابی، دامنه روزافزون داده‌های محیطی و سنجش از دور، مدل‌های فرسایش خاک نقش مهمی در طراحی و اجرای مدیریت و استراتژی حفاظت خاک دارند (Panagos et al, 2015) و دامنه کاربرد این مدل‌ها در حال افزایش است (Auerswald et al, 2014).

از مهم‌ترین مدل‌های تجربی برآورد تلفات سالانه فرسایش خاک می‌توان به معادله جهانی فرسایش خاک<sup>۱</sup> USEL<sup>۱</sup> و سپس مدل اصلاح‌شده آن یعنی<sup>۲</sup> RUSEL اشاره کرد که توسط سازمان ملل ارائه شده و به‌طور گسترده در اغلب نقاط دنیا به منظور برآورد فرسایش خاک استفاده شده است. این مدل با نظر گرفتن ۶ عامل شامل، فرساینده‌گی قطرات باران (R)، فرسایش‌پذیری خاک (K)، طول و درجه شیب (LS)، مدیریت پوشش (C) و عملیات حفاظتی (P) اقدام به برآورد فرسایش خاک می‌کند که اغلب این پارامترها با استفاده از داده‌های سنجش از دور با کیفیت نسبتاً بالا امروزه در کوتاه‌ترین زمان قابل تهیه هستند (آرخی و نیازی، ۱۳۸۹). این مدل از رایج‌ترین مدل‌های ارزیابی میزان فرسایش خاک است که در سال‌های اخیر نیز پژوهش‌های متعددی با استفاده از آن به منظور برآورد میزان فرسایش خاک صورت گرفته. به‌طور مثال Nesru (۲۰۲۴) با استفاده از مدل RUSEL متوسط نرخ فرسایش سالانه خاک در حوضه وایبو کشور اتیوپی را ۱۹/۵۸ تن در هکتار برآورد کرده و بر اساس این مدل نشان داده که تقریباً نیمی از حوضه دارای نرخ فرسایش بحرانی است. وجود خاک‌های قهوه‌ای و قرمز در غرب و شرق حوضه آنرا به شدت فرسایش پذیر کرده است. Dash و Maity (۲۰۲۳) اثر تغییر اقلیم بر تغییرات بارش، کاربری اراضی و متعاقباً فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSEL در بالادست حوضه رودخانه ماهاندی در ناحیه شمال شرقی فلات دکن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که در دوره زمانی دوم (۲۰۱۹-۲۰۰۱) نسبت به دوره اول (۱۹۸۱-۲۰۰۰) متوسط نرخ فرسایش خاک ۱۳/۵۸ درصد کاهش یافته که مهم‌ترین علت آن کاهش میزان فرسایش در اثر کاهش بارندگی بوده است. Allafta و Opp (۲۰۲۲) برای محاسبه فرسایش خاک در حوضه بزرگ اروندرود از مدل RUSEL استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که ۲۰ درصد حوضه دارای نرخ فرسایش زیاد و خیلی زیاد است که منطبق بر مناطق دارای بارندگی شدید، خاک لومی، اراضی مرتفع با شیب تند و کشاورزی فشرده است.

در ایران نیز مقدار فرسایش سالانه خاک در برخی نقاط زیاد و بسیار زیاد است. مطالعات نور و عرب خدری (۱۴۰۲) به منظور برآورد فرسایش خاک با مدل RUSEL در سه حوضه کوچک به همراه کرت‌های فرسایشی در پایگاه تحقیقات حفاظت خاک سنگانه نشان داده که برآوردهای مدل RUSLE از وضعیت فرسایش و رسوب با نتایج داده‌های کرت‌های فرسایشی پس از اعمال ضریب اصلاحی، تطابق داشته و این مدل توانسته میزان متوسط فرسایش کل دوره را با خطای بین ۲ الی ۱۷ درصد درست برآورد نماید. نتایج کار معتمدی راد و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از مدل RUSEL و مدل پسیاک در حوضه کال اسماعیل نشان داد که میزان فرسایش رسوب در این حوضه ۱۷/۲ تن در هکتار در سال بوده است. در استان فارس نیز مقیم و همکاران (۱۴۰۱) به منظور انجام عملیات حفاظتی از مدل‌های MPSIAC و RUSEL استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد براساس مدل‌های RUSEL و MPSIAC میزان رسوب

1- Universal Soil Loss Equation

2- Revised Universal Soil Loss Equation

ویژه به ترتیب ۱/۵۸ و ۳/۱۷ تن در هکتار در سال است که در مقایسه با میزان رسوب ویژه اندازه گیری شده در ایستگاه گوزون (۳/۵ تن در هکتار) مدل RUSEL از دقت بیشتری برخوردار است.

بررسی پیشینه پژوهش در سال‌های اخیر نشان می‌دهد که این مدل همچنان یکی از مدل‌های پر استفاده در برآورد فرسایش خاک با اهداف گوناگون است. این مدل در واقع میزان پتانسیل فرسایش خاک را نشان می‌دهد، Diwediga و همکاران (۲۰۱۸) بر اساس مدل RUSEL، مدل LAMPT را به منظور محاسبه نرخ سالانه فرسایش ویژه خاک (مقدار فرسایش خالص) در مرکز توگو توسعه دادند و با استفاده از آن میزان فرسایش ویژه خاک را طی سال‌های خشکسالی، نرمال و پربارش برآورد کردند. نتایج ارزیابی دقت در مقایسه با داده ایستگاه‌های رسوب سنجی نشان داد که این مدل دقت بالایی در برآورد فرسایش ویژه خاک دارد.

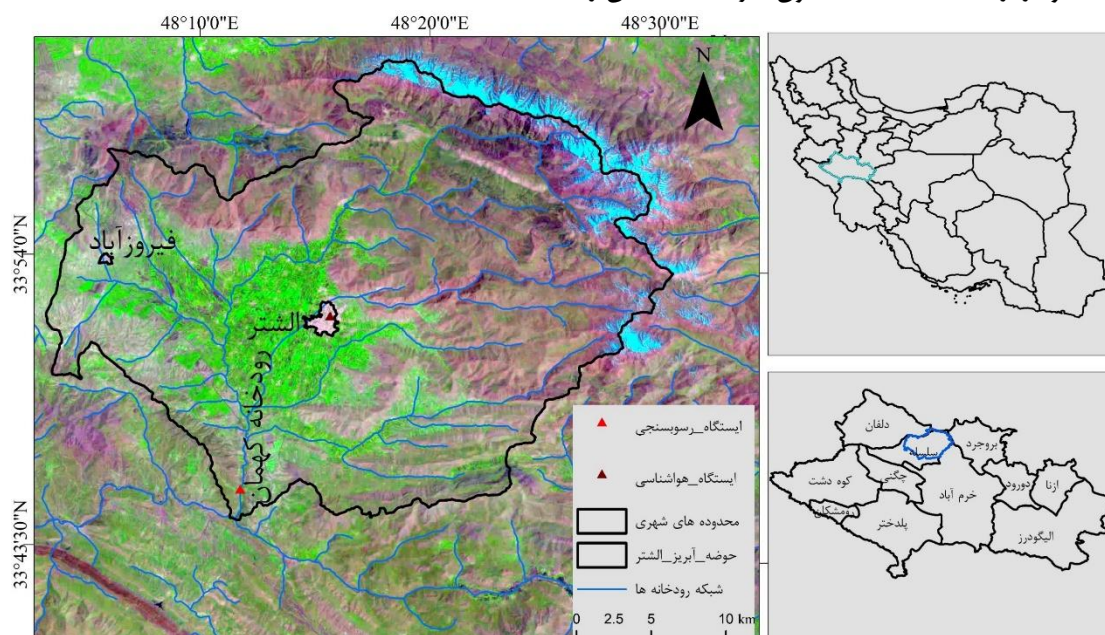
فرسایش خاک باعث طیفی از مسائل مرتبط با کاهش حاصلخیزی خاک، رسوب در نهرها و سدها و کاهش کارایی آنها و مسائل اجتماعی و اقتصادی می‌شود. حدود ۶۰ درصد مساحت کشور در اقلیم نیمه‌خشک و خشک قرار دارد. تقریباً ۱۰۰ میلیون هکتار از این مناطق در برابر بیابان‌زایی آسیب‌پذیر هستند. تخریب زمین و فرسایش خاک در ایران عمدتاً ناشی از عواملی مانند پوشش گیاهی ضعیف، بارندگی اندک، چرای بیش از حد و فعالیت‌های کشاورزی فشرده رخ می‌دهد (Samani et al. 2009). متوسط فرسایش ویژه خاک کشور بین ۱۶ تا ۲۵ تن است که ۵ برابر متوسط جهانی است (مصفايي و طالبی، ۱۳۹۳) و در برخی مناطق تا ۲۰ برابر متوسط جهانی نیز می‌رسد (Allafta & Opp, 2022). سالانه به طور میانگین ۱۵۰۰ تن خاک از هر کیلومترمربع زمین در اثر فرسایش آبی شسته می‌شود و این مقدار برابر با کاهش یک میلی‌متری ضخامت خاک کشور طی یک سال است (سپهر و هنرمند نژاد، ۱۳۹۱) افزون بر این، مناطق تخریب شده در اثر فرسایش خاک اغلب کمتر قادر به حفظ آب هستند و ممکن است برخی مخاطرات دیگر از جمله سیل را تشدید کنند (Allafta & Opp, 2022).

بررسی توزیع نرخ فرسایش سالانه خاک توسط مصفايي و طالبی (۱۳۹۳) با استفاده از مدل EPM نشان می‌دهد که مناطق زاگرس میانی و لرستان از مناطقی هستند که تلفات سالانه خاک آن‌ها بالاتر از ۹ تن در هکتار و عمدتاً بیشتر از ۱۸ تن در هکتار است (مصفايي و طالبی، ۱۳۹۳). اغلب مساحت استان لرستان جزو حوضه آبریز رودخانه‌های دز و کرخه محسوب می‌شود لذا از منظر تولید رسوب و انتقال آن به پشت سدهای قرار گرفته بر روی این رودخانه‌ها، استان لرستان اهمیت و جایگاه ویژه‌ای دارد. حوضه آبریز الشتر در این استان به عنوان بالاترین بخش حوضه آبریز کرخه بزرگ به دلیل داشتن دیم زارهای وسیع در تپه ماهورهای خود، جمعیت کوچ رو عشایری و بارش بیشتر از میانگین کشوری، نسبت به مسئله فرسایش و اشکال ناشی از آن حساسیت بالایی دارد و می‌تواند به عنوان یکی از منابع تولید رسوب در سرآب حوضه آبریز به‌طور بالقوه حجم زیادی از رسوب را به سرشاخه‌های کرخه و متعاقباً این رودخانه وارد کند. در بخش‌های وسیعی از این حوضه به خصوص مراتع، تپه ماهورها و دیم زارهای این حوضه اغلب فرم‌های فرسایش آبی همچون فرسایش آبکندی (شکل ۲) قابل مشاهده اند، این شکل نمایانگر فرسایش‌پذیری بالای حوضه آبریز و نرخ بالای تولید رسوب در آن است. از آنجا که نخستین گام در راستای کنترل فرسایش خاک شناسایی مناطق مستعد فرسایش و مناطق با نرخ تولید رسوب بالا است و برآورد نقطه ای و پهنه ای میزان فرسایش و رسوب خاک از طریق ایستگاه‌های رسوب سنجی میسر نیست بنابراین ضروری است تا با استفاده از مدل‌های تجربی مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی، از توزیع فضایی و زمانی نرخ فرسایش خاک آگاه شد و این مناطق برای عملیات کنترل فرسایش خاک اولویت بندی شوند (Li et al, 2023). هدف از این پژوهش بررسی و برآورد نرخ سالانه فرسایش ویژه خاک با استفاده از مدل LAMPT و ارزیابی میزان دقت آن در حوضه کوهستانی الشتر است. نتایج این تحقیق می‌تواند پیشنهادات و راهبردهای اولیه جهت مقابله و کنترل فرسایش خاک را ارائه دهد و راهنمایی برای سازمان‌های ذیربط در این زمینه باشد.

## مواد و روش‌ها

## محدوده مطالعاتی

حوضه آبریز الشتر، با وسعتی برابر ۸۰۳ کیلومتر مربع در قسمت شمالی استان لرستان و شهرستان سلسله قرار دارد (شکل-۱). از لحاظ موقعیت ژئومورفولوژی این حوضه در واحد زاگرس مرتفع یا روئانده قرار دارد و دارای گسل‌های راندگی و شکستگی‌های زیاد در اثر گسلش است (بهاروند و همکاران، ۱۳۹۲). حداقل ارتفاع حوضه ۱۵۰۰ متر، حداکثر ارتفاع آن ۳۶۰۰ متر و میانگین ارتفاع حوضه ۲۱۰۰ متر است. بر اساس روش دومارتن این حوضه اقلیمی مدیترانه‌ای با میانگین بارندگی سالانه ۵۰۶ میلی‌متر دارد (حاصلی و جلالیان، ۱۳۹۳). این محدوده دارای زمستان‌های نسبتاً سرد با تابستان‌های مرطوب و معتدل است (لشنی و نند و همکاران، ۱۳۹۰). منبع بارش حوضه عمدتاً امواج بارشی مدیترانه‌ای است و به تبعیت از ویژگی‌های بارشی محدوده زاگرس در فصل سرد (پاییز) شروع شده و تا معمولاً اواخر تابستان به طول می‌انجامد، در فصل زمستان شکل بارش عمدتاً از نوع برف است (Alijani, 2008). در این حوضه میزان بارندگی مفید در سطح دشت ۴۴/۵۴ و در ارتفاعات ۲۵۹/۶۹ میلیون مترمکعب تخمین زده شده است.



شکل ۱: موقعیت حوضه آبریز الشتر در استان لرستان و شهرستان سلسله

همچنین سهم رواناب در دشت و در ارتفاعات به ترتیب در حدود ۱۶/۹۱ و ۸۶/۸۰ میلیون مترمکعب برآورد شده است که در نتیجه، نفوذ از بارندگی مفید در دشت ۲۷/۶۳ و در ارتفاعات ۱۷۲/۸۹ میلیون مترمکعب تخمین زده می‌شود. سفره آب موجود در محدوده دشتی مورد مطالعه از نوع آزاد می‌باشد و کلیه چاه‌های موجود در منطقه در سفره آزاد و آبرفتی واقع شده‌اند (اداره آب منطقه‌ای استان لرستان، ۱۳۸۲). رود کهمان مهم‌ترین رودخانه حوضه است که پس از سرچشمه گرفتن از جنوب ارتفاعات گرین و مشروب کردن دشت الشتر به رودخانه سیمره و سپس رود کرخه می‌پیوندد (اصغری سراسکانرود و همکاران، ۱۳۹۳).



شکل ۲: توسعه اشکال فرسایش آبکندی در مراتع و دیم‌زارهای حوضه آبریز الشتر در اثر فرسایش آبی

حوضه آبریز الشتر اغلب سیمایی کوهستانی دارد به طوری که تپ و واحدهای اراضی کوه ها ۷۳/۴ درصد، تپه ها ۱/۶ درصد، فلات ها و تراس های فوقانی ۴/۶ درصد، دشت های دامنه ای ۱۸/۶ درصد، واریزه های بادبزی شکل ۱/۴ درصد، اراضی مسکونی ۰/۴ درصد حوضه را شامل می شوند (پالوج و حاصلی، ۱۳۹۵). بخش های تپه ماهوری حوضه عمدتاً دارای دیم‌زارها و مراتعی است که پس از برداشت محصولات عرصه فعالیت دامداران محسوب می شود. برآورد شده که ۶۰ درصد این حوضه دارای کاربری مرتع است که عدم توازن بین دام و توان مرتعی باعث افزایش شدت فرسایش در بخش های مرتعی آن شده است (صدوق و همکاران، ۱۳۹۴) مراتع به لحاظ فرسایش پذیری و فرم های فرسایشی همچون آبکندها بسیار آسیب پذیر است و در چشم انداز این محدوده ها، این فرم های فرسایشی را می توان مشاهده کرد (شکل-۲). از نظر خاکشناسی نیز خاک های الشتر جزء گروه خاک های قهوه ای با افق تمرکز رس است. خاکی است خیلی عمیق به رنگ قهوه ای تیره تا قهوه ای مایل به قرمز و بافت سنگین که در لایه های سطحی آن ۳ تا ۱۵ درصد سنگریزه درشت و در لایه زیرین مقادیر نسبتاً زیاد آهک به صورت سخت دانه در آن مشاهده می گردد (سازمان تحقیقات کشاورزی، ۱۳۷۰). از نظر شرایط پوشش خاک به علت پراکندگی خاک های قهوه ای در سطح حوضه و حساسیت نسبتاً بالای این نوع از خاک ها به فرسایش (Nesru, 2024) این حوضه شرایط مستعدی برای فرسایش خاک داراست. با توجه به کوهستانی بودن حوضه آبریز الشتر و بارش نسبتاً بالای آن نسبت به میانگین کشوری، گستره کاربری مراتع در آن و شرایط خاک، این حوضه پتانسیل فرسایش نسبتاً بالایی برای فرسایش خاک دارد اما تاکنون پژوهشی به منظور برآورد فرسایش ویژه خاک، توزیع فضایی و کاربری های مولد آن در سطح حوضه انجام نشده است.

### داده های پژوهش

داده های پژوهش شامل دو بخش داده های کمی-فضایی و داده های کمی نقطه ای مطابق جدول ۱- است که از منابع سازمانی و پیمایش میدانی به دست آمدند.

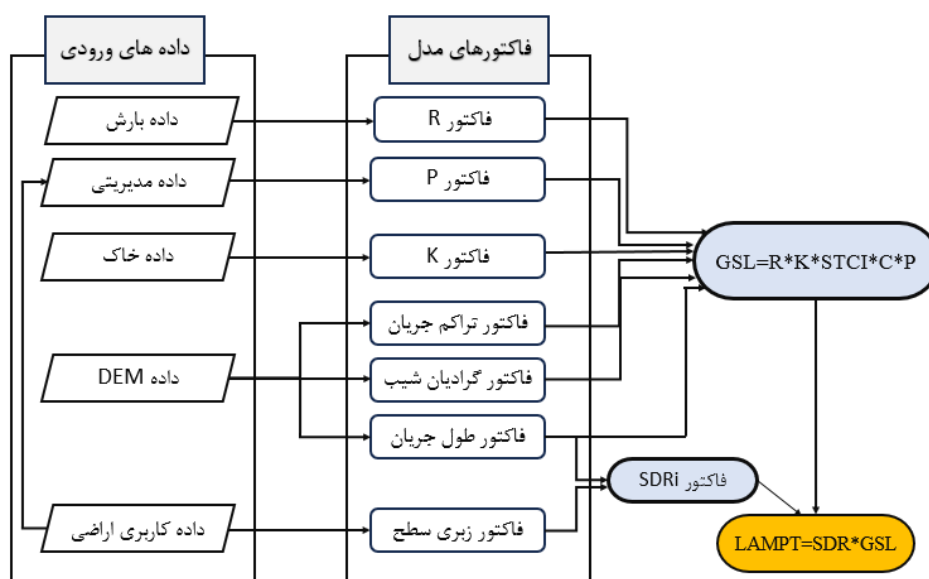
جدول ۱: مشخصات داده‌های مورد استفاده در پژوهش

منبع دسترسی	قدرت تفکیک مکانی	کاربرد	داده
اداره منابع طبیعی استان لرستان	۲۵,۰۰۰ مقیاس	محاسبه عامل K	لایه وکتوری بافت خاک حوضه
سازمان هواشناسی کشور	نقطه‌ای	محاسبه عامل R	آمار ماهانه بارندگی
سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا earthexplorer.usgs.gov	۳۰ متر	محاسبه عامل STCI	لایه رقومی ارتفاعی (DEM)
اداره آب منطقه‌ای استان لرستان	نقطه‌ای	صحت سنجی مدل	آمار ایستگاه‌های رسوب سنجی
اژانس فضایی اتحادیه اروپا dataspace.copernicus.eu	۱۰ و ۲۰ متر	استخراج کاربری اراضی حوضه (عوامل P, Vi و SDRi)	تصویر ماهواره‌ای سنجنده Sentinel-2
پیمایش زمینی	نقطه‌ای		نمونه‌های آموزشی کاربری اراضی

## روش: برآورد فرسایش ویژه خاک حوضه الشتر با استفاده از مدل LAMPT

اساس مدل LAMPT مدل RUSLE است، در این مدل از شاخص نسبت تحویل رسوب<sup>۱</sup> (SDR) برای نشان دادن الگوهای فضایی توزیع و عملکرد رسوبات خالص خاک در سطح حوضه استفاده می‌شود. این مدل ویژگی‌های عمومی چشم‌انداز حوضه (کلاس‌های کاربری اراضی، پارامترهای شکل زمین، انواع خاک، پوشش و مدیریت زمین) و مقادیر بارش را برای شبیه‌سازی نرخ ناخالص فرسایش خاک، SDR و عملکرد رسوب خالص در سطح حوضه تلفیق می‌کند (Diwediga et al, 2018). روند و چهارچوب کلی اجرای مدل LAMPT و محاسبه فرسایش ویژه خاک حوضه آبریز الشتر مطابق شکل ۳- است.

<sup>۱</sup>- Sediment Delivery Ratio



شکل-۳: روند نمای چهارچوب و مراحل اجرای مدل LAMPT (Diwediga et al, 2018).

مدل LAMPT دارای فاکتورهای زیر است:

### شاخص GSL

شاخص GSL همان معادله جهانی فرسایش خاک است که به منظور پیش‌بینی نرخ ناخالص فرسایش خاک و شناسایی مناطق با بیشترین پتانسیل فرسایش خاک با توجه به سه عامل ژئومورفولوژی، آب و هوا و دخالت‌های انسانی استفاده می‌شود (Diwediga et al, 2018)، این شاخص از طریق رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$GSL = STCI(KCPR) \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه؛  $GSL$ : میزان فرسایش ناخالص خاک در واحد تن در هکتار در سال است،  $R$ : عامل فرساینده بارش در واحد  $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ y^{-1}$ ،  $K$ : فاکتور فرسایش‌پذیری خاک در واحد  $Mg\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$ ،  $L$ : فاکتور طول شیب،  $S$ : فاکتور درجه شیب،  $C$ : فاکتور پوشش زمین و  $P$ : فاکتور عملیات حفاظتی می‌باشد (Diwediga et al, 2017) که در ادامه روش محاسبه هر یک از پارامترهای این شاخص توضیح داده می‌شوند.

**عامل R:** عامل فرساینده باران به قدرت تراکمی باران در ایجاد فرسایش گفته می‌شود (Nyssen et al, 2004: Wischmeier & Toy et al, 2002). این عامل با میزان فرسایش خاک همبستگی بالا و مستقیمی دارد (Smith, 1978). این عامل برای در دوره‌های زمانی مختلف، از حاصل ضرب انرژی جنبشی قطرات باران در حداکثر شدت بارش ۳۰ دقیقه‌ای ( $I30$ ) محاسبه می‌شود (Renard & Freimund, 1994: Ciesiolka et al, 2006). به دلیل در دسترس نبودن آمار شدت بارندگی در اغلب ایستگاه‌های هواشناسی و سینوپتیک، از روش اصلاح‌شده فورنیه و رنارد و فریموند (۱۹۹۴) و داده‌های میانگین بارش ماهانه و سالانه در ایستگاه‌های هواشناسی استفاده می‌شود (غلامی و همکاران، ۱۳۹۴). به منظور محاسبه این پارامتر از ایستگاه‌های هواشناسی که در نزدیکی حوضه آبریز الشتر قرار دارند و دارای آمار ثبت میزان بارش طی سال هدف (۲۰۲۳) بودند (جدول ۲) استفاده شده است. برای برآورد این شاخص ابتدا میانگین بارش ماهانه و سالانه ایستگاه‌های موجود در جدول ۲ محاسبه گردید. پس از محاسبه میانگین بارش ماهانه و

سالانه مقادیر شاخص فورنیه مطابق رابطه ۲. برای هر ایستگاه محاسبه می‌شود (جدول ۲- ) (Renard & Freimund, 1994).

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{\sum_{i=1}^{12} P} \quad \text{رابطه ۲.}$$

در این رابطه  $F$ : شاخص اصلاح شده فورنیه،  $P_i$  متوسط بارندگی ماهانه و  $P$  متوسط بارندگی سالانه برحسب میلی‌متر می‌باشد. پس از محاسبه مقادیر شاخص فورنیه، با جای گذاری این مقادیر در روابط ۳ و ۴ که برای مناطق فاقد داده‌های تفصیلی رگبار (شدت بارندگی) پیشنهاد شده است، مقدار فاکتور  $R$  برای ایستگاه‌ها برآورد می‌شود (Renard & Freimund, 1994).

$$R - \text{Factor} = (0.07397 \times F^{1.847}) / 17.2 \quad (3) \quad F < 55 \text{mm} \quad \text{رابطه ۳.}$$

$$R - \text{Factor} = (95.77 - 6.81 * F + 0.4770 * F^2) / 17.2 \quad F \geq 55 \text{mm} \quad \text{رابطه ۴.}$$

پس از استخراج داده‌های ماهانه، با استفاده از شاخص فورنیه و رابطه رینارد و فریموند، فاکتور  $R$  مطابق جدول ۲- در هر ایستگاه محاسبه گردید، پس از آن با روش درون‌یابی کریجینگ، توزیع فضایی عامل فرساینده مطابق شکل ۵- محاسبه گردید که بر اساس آن دامنه مقادیر فرساینده از ۲۸۶ در شرق حوضه تا ۳۳۴  $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ y}^{-1}$  در غرب حوضه متغیر است.

جدول ۲: مقادیر آماره‌های مربوط به بارش ایستگاه‌های مورد استفاده به منظور برآورد فاکتور  $R$

ایستگاه	$pi^2$	P	F	R
خرم‌آباد	۴۶۵۴۲,۳	۴۸۲,۲۵	۹۶,۵	۲۲۵,۶
الشتر	۶۸۷۴۴,۳	۵۹۶,۶	۱۱۵,۲	۳۲۸,۱۳
نورآباد	۷۴۸۱۷,۳	۵۷۴,۳	۱۳۰,۳	۴۲۴,۷
نهادند	۵۱۹۰۹,۶	۵۱۱,۸	۱۰۱,۴	۲۵۰,۷
بروجرد	۵۲۹۶۷,۳	۵۱۵,۹	۱۰۲,۷	۲۵۷,۲

**عامل STCI:** این عامل طول و درجه شیب (LS) در مدل جهانی فرسایش خاک RUSLE است که در واقع نشان‌دهنده اثر توپوگرافی بر فرسایش خاک است. STCI با استفاده از لایه رقمی ارتفاع (DEM) ۳۰ متر سنجنده SRTM در نرم‌افزار Arc GIS بر اساس رابطه ۵. محاسبه شده است.

$$STCI = \left(\frac{10AS}{22.13}\right)^\delta \times (\delta + 1) \left(\frac{\sin Slope}{0.0896}\right)^a \quad \text{رابطه ۵.}$$

در این رابطه؛  $STCI$ : عامل طول و درجه شیب،  $AS$ : مساحت دامنه بالادست در واحد عرض خطوط توپوگرافی،  $\delta$ : ضریب ثابت معادل ۰/۴،  $a$ : ضریب ثابت معادل: ۱/۳ و  $Slope$ : زاویه شیب بر حسب درجه است (Diwediga et al, 2018). عامل  $STCI$  مطابق شکل ۵- بر اساس لایه رقمی ارتفاع محاسبه گردید و دامنه آن بین صفر برای مناطق مسطح حوضه تا ۱۳۲۱ برای مناطق مرتفع و کوهستانی حوضه متغیر است.

**عامل K:** این عامل سرعت فرسایش‌پذیری خاک به ازای واحد شاخص فرسایش باران است و در پلات استاندارد اندازه‌گیری می‌شود. فاکتور  $K$  اغلب با استفاده از خصوصیات خاک تعیین می‌گردد (Parysow et al, 2003). این عامل با خواص خاک از جمله بافت، میزان ماده آلی، نفوذپذیری ساختمان خاک رابطه دارد، اما بیشترین همبستگی آن با تیپ خاک است (Wischmeier et al, 1971: Karthick et al, 2017). عامل  $K$  در مدل RUSLE اغلب از طریق نمودار (Wischmeier et al, 1971)، نسبت مقدار تلفات خاک در کرت استاندارد در واحد عامل فرساینده (Wishmeier and Smith, 1987) و یا جدول مورگان به دست می‌آید (احمدی، ۱۳۹۱). به دلیل نبود آمار دقیقی از قطر ذرات خاک در کل حوضه آبریز الشتر از مقادیر ارزش  $K$  بر اساس بافت خاک مطابق جدول مورگان

(جدول ۳- استفاده شده است. برای محاسبه عامل K ابتدا نقشه رقومی خاک حوضه آبریز الشتر از اداره کل منابع طبیعی استان لرستان در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ دریافت شد سپس بر اساس بافت غالب و نیز نوع خاک هر محدوده بر اساس جدول مورگان ارزش دهی شد (شکل ۵-d). امتیاز دهی لایه K بر اساس بافت خاک نشان می‌دهد که بخش زیادی از مناطق کوهستانی دارای بیشترین مقادیر K و خاک‌های لومی شنی مناطق مسطح دشت الشتر کمترین مقادیر K را دارند.

**عامل C:** عامل مدیریت پوشش نشان‌دهنده نتیجه فعالیت‌های انسانی اثرگذار بر روی خاک است که شامل تغییرات در نوع و میزان پوشش گیاهی، توالی کشت محصول، سطح بهره‌وری، پوشش خاک و مقدار گیاه خاک زیرسطحی در فرسایش خاک می‌باشد (Karthick et al, 2017). این عامل به مقدار خاک فرسایش رفته در یک زمین تحت کشت به زمینی با همان ویژگی در شرایط آیش و یا عاری از پوشش گیاهی تعریف می‌شود (Gayen et al, 2020).

جدول ۳: مقادیر K برای انواع خاک در جدول مورگان (احمدی، ۱۳۹۱)

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

از آنجا که در پوشش گیاهی زمین تغییرات مکانی و زمانی متنوعی وجود دارد به‌طور معمول برای محاسبه این عامل از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های پوشش گیاهی استفاده می‌شود (Karthick et al, 2017). برای محاسبه عامل مدیریت پوشش در حوضه آبریز الشتر از یک فریم تصویر ماهواره‌ای سنجنده Sentinel-2 برای زمان حداکثر رویش پوشش گیاهی در سال ۲۰۲۳ (تاریخ تصویر ۲۰۲۳/۰۶/۲۹) که در واقع سال هدف برآورد فرسایش خاک در حوضه است و داده‌های ایستگاه‌های زمینی رسوب سنجی و هواشناسی در این سال استفاده گردید. برای محاسبه عامل مدیریت پوشش ابتدا با استفاده از شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) مطابق رابطه ۶ مقادیر و توزیع سبزی‌نگی در حوضه آبریز محاسبه شد (Strashok et al, 2022).

$$NDVI = \frac{PNIR - PRed}{PNIR + PRed} \quad \text{رابطه ۶} \quad NDVI \text{ for Sentinel} - 2 = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$$

در این رابطه NDVI: مقادیر شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی برای حوضه آبریز الشتر، PNIR، باند مادون قرمز که برابر با باند شماره ۸ سنجنده Sentinel-2 و PRed برابر با باند شماره ۴ سنجنده Sentinel-2 است (Strashok et al, 2022). پس از محاسبه شاخص NDVI به منظور محاسبه عامل C از رابطه ۷ استفاده می‌شود (Gayen et al, 2020).

$$C = \left( \frac{1 - NDVI}{2} \right) \quad \text{رابطه ۷}$$

محاسبه عامل C حوضه آبریز الشتر با استفاده از تصاویر با تصاویر Sentinel-2 (شکل ۵-e) نشان می‌دهد که بخش‌های مرتع و کوهستانی بیشترین مقدار C و حساسیت به فرسایش و بخش‌های کشاورزی و مرکزی دشت کمترین مقادیر C و حساسیت به فرسایش را دارا هستند.

**عامل P:** عامل عملیات حفاظتی نسبت خاک از دست رفته توسط فرسایش در شرایط عملیات حفاظتی به فرسایش ایجادشده در شرایط شخم در جهت شیب است (Wishmeier and Smith, 1987: Pal & Chakraborty).

(2019). در سطح شیب‌دار به منظور کشاورزی باید عملیات حفاظتی برای حفظ آب و خاک صورت گیرد (Pandey et al, 2007). عملیات حفاظتی باعث کاهش سرعت هرزآب تا زیر حد آستانه بروز فرسایش خاک شده و بدین صورت از قدرت فرساینده‌گی هرزآب‌ها و ظرفیت حمل آن‌ها می‌کاهد. این عملیات طیفی از عملیات آبخیزداری شامل کشت روی خطوط هم‌تراز، سیستم ترانس‌بندی، آبراهه‌های پوشش‌دار و غیره را در برمی‌گیرد (Amellah & Morabiti, 2021). بر اساس پیمایش‌های میدانی و تحقیق از اداره کل منابع طبیعی استان لرستان در حوضه آبریز الشتر عملیات حفاظتی قابل توجهی صورت نگرفته است بنابراین با استفاده از بازدیدهای میدانی به منظور برداشت نقاط آموزشی (شکل-۳) و یک فریم تصویر سنجنده Sentinel-2 در زمان رویش پوشش گیاهی حوضه آبریز، لایه کاربری حوضه به روش طبقه‌بندی نظارت‌شده تهیه و بر اساس جدول ۴- ارزش P برای هر کلاس از کاربری اراضی اختصاص داده شد.

جدول ۴: مقادیر ارزش P برای کلاس‌های مختلف کاربری اراضی (Deore, 2006)

۰/۸	گندم	۰/۸	جنگل با تاج پوشش متراکم
۰/۱۲	نیشکر	۰/۸	جنگل با تاج پوشش متوسط
۱	بستر رودخانه	۰/۸	جنگل با تاج پوشش کم
۱	سطوح صخره‌ای و پرتگاهی	۱	اراضی آیش
		۱	اراضی بایر

#### تهیه لایه کاربری اراضی حوضه آبریز الشتر

برای تهیه لایه کاربری اراضی ابتدا بر اساس شرایط پوششی حوضه و بازدیدهای میدانی، کلاس‌های کاربری تعریف شد سپس با دریافت تصاویر از وبسایت‌های سازمان فضایی اروپا و یا سازمان زمین‌شناسی آمریکا اعمال پیش‌پردازشی شامل تصحیح هندسی، رادیومتریک و انتخاب باندها تصویر آماده پردازش گردید. پس از آماده‌سازی تصاویر در نرم‌افزار پردازش تصویر ENVI 5.6 نمونه‌های تعلیمی هر کاربری (جدول-۵) بر روی تصویر مشخص شده و با استفاده از الگوریتم طبقه‌بندی حداکثر احتمال<sup>۱</sup> اقدام به طبقه‌بندی تصویر شد. پس از انجام فرآیند طبقه‌بندی و اعمال فیلتر اکثریت Majority با کرنل سایز ۳\*۳ لایه کاربری تهیه‌شده و بر اساس ماتریس خطا دقت کاربری تهیه‌شده مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت برداشت نمونه‌های آموزشی برای تولید نقشه کاربری اراضی از ترکیب‌های رنگی کاذب، آرشیو تصاویر مرئی برنامه گوگل ارث و برداشت میدانی (شکل-۴) با استفاده از گیرنده دستی GPS استفاده شد که برای هر کلاس تعداد نمونه‌های آموزشی مطابق جدول-۵ استخراج گردید.

جدول ۵: تعداد نمونه‌های آموزشی برداشت‌شده برای هر کلاس کاربری اراضی

تعداد نمونه‌های آموزشی (پیکسل)	کلاس کاربری
۲۵۰	کاربری‌ها دست‌ساخت انسانی
۳۵۰	زراعت آبی
۲۶۰	دیم‌زارها
۳۰۰	باغات و مجتمع‌های درختی
۲۶۰	اراضی آیش
۲۲۰	مرتج با تراکم ضعیف
۲۲۰	مرتج با تراکم متوسط
۲۴۵	مرتج با تراکم خوب
۲۵۰	جنگل‌ها

<sup>۱</sup> Maximum Likelihood Classification

### طبقه‌بندی تصویر به روش حداکثر احتمال و ارزیابی دقت طبقه‌بندی تصویر

روش حداکثر احتمال از روش‌های آماری و پیکسل پایه طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای است که از واریانس و کوواریانس داده‌ها استفاده می‌کند. در این روش فرض بر این است که آمار برای هر کلاس در هر باند به‌طور نرمال توزیع شده است (نمونه‌های آموزشی از توزیع نرمال برخوردارند) و احتمال تعلق یک پیکسل معین به یک کلاس خاص را محاسبه می‌کند و همه پیکسل‌ها طبقه‌بندی می‌شوند مگر اینکه آستانه احتمالی انتخاب شود. در این روش کلاسی به پیکسل موردنظر تعلق می‌گیرد که بیش‌ترین احتمال تعلق پیکسل به آن کلاس وجود دارد. وجود توزیع نرمال در نمونه‌ها شرط مهمی در دقت و خروجی روش حداکثر احتمال محسوب می‌شود زیرا نمونه‌های کلاس‌های آموزشی باید معرف آن کلاس باشند، بنابراین تا حد امکان باید از تعداد نمونه‌های بیشتری استفاده شود تا تغییرات بسیاری از ویژگی‌های طیفی در این محدوده پیوسته قرار گیرد (فاطمی و رضایی، ۱۳۹۶). پس از اعمال تمامی فرآیندهای پیش و پس پردازشی، لایه کاربری اراضی حوضه آبریز الشتر استخراج گردید. برای ارزیابی دقت طبقه‌بندی از شاخص‌های ارزیابی دقت طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای ماتریس خطا که در نرم‌افزار ENVI قابل محاسبه هستند شامل: دقت کلی، ضریب کاپا، دقت تولیدکننده و دقت کاربر استفاده شده است (جدول-۶). نتایج ارزیابی دقت طبقه‌بندی نشان‌دهنده دقت مطلوب لایه کاربری تولیدشده به روش حداکثر احتمال است بنابراین لایه موردنظر بر اساس جداول ارزش حفاظتی (جدول-۵) ارزش‌دهی می‌شود.

پس از تهیه لایه کاربری اراضی ارزش عملیات حفاظتی هر کاربری مطابق شکل-۵C در دامنه عددی ۰/۱ برای مناطق کشاورزی و ۱ برای مناطق مرتعی و کوهستانی محاسبه گردید. لایه‌های محاسبه شده STCI, R, K, C و P در واقع متغیرهای مدل RUSEL هستند که نرخ ناخالص و یا پتانسیل میزان فرسایش خاک را در سال محاسبه می‌کنند. برای محاسبه میزان فرسایش خالص یا ویژه حوضه در سال مورد نظر ابتدا باید شاخص SDRi و سپس مقادیر NSLi که در واقع همان مدل LAMPT می‌باشد را محاسبه کرد.

جدول ۶: ارزیابی دقت طبقه‌بندی با استفاده از شاخص‌های ماتریس خطا

ضریب کاپا	دقت کلی	دقت کاربر	دقت تولیدکننده	کلاس کاربری
۷۵/۶	۸۴	۸۵/۴	۸۸,۲	زراعت آبی
		۸۴/۳	۸۴	دیم‌زار
		۸۲/۶	۸۲,۶	اراضی آیش
		۷۸/۶	۸۹	باغات
		۹۳/۶	۹۷,۲	محدوده‌های ساخته‌شده
		۷۶	۸۰	مرتج با تاج پوشش کم
		۷۷	۷۷	مرتج با تاج پوشش متوسط
		۷۸/۳	۸۰,۲	مرتج با تاج پوشش متراکم
		۸۲	۸۰	جنگل

### محاسبه شاخص NSLi (فرسایش ویژه سالانه) و اعتبار سنجی مدل LAMPT

جهت برآورد فرسایش ویژه خاک سالانه معادله NSLi طراحی شده است. NSLi در سطح پیکسل از طریق رابطه ۸. محاسبه می‌گردد (Le et al, 2012).

$$NSLi = GSL * SDRi$$

رابطه ۸.

در این رابطه؛  $NSLi$ : نرخ خالص فرسایش در واحد تن در هکتار در سال،  $GSL$ : میزان فرسایش ناخالص خاک در واحد تن در هکتار در سال و عامل  $SDRi$ : مقدار فرسایش در سطح پیکسل برحسب تن در سال است که از رابطه ۹- به دست می‌آید (Kusimi et al, 2015).

$$SDRi = \exp\left(-\beta \frac{L_i}{R_i(S_i)^{1/2}}\right) \quad \text{رابطه ۹.}$$

در این رابطه؛  $SDRi$ : مقادیر فرسایش در پیکسل،  $\beta$ : ضریب ثابت معادل  $0.051$ ،  $L_i$ : طول جریان طی شده از پیکسل فرادست به پیکسل فرودست برحسب متر ( $30$  متر) و  $R_i$ : سرعت جریان آب از سلول فرادست به سلول فرودست برحسب متر بر ثانیه که از جدول ۷ برای انواع کاربری استخراج می‌شود (Jain & Kothyari, 2000: Mutua & Klik, 2006).



شکل ۴: چشم‌انداز برخی کاربری‌های اراضی در حوضه آبریز الشتر در فصل بهار، حداکثر رشد پوشش گیاهی (اردیبهشت-۱۴۰۲)

در این جدول برای کلاس‌های کاربری اراضی حوضه آبریز الشتر که از تصویر ماهواره ای استخراج شده است مقادیر ضریب  $V_i$  با رنگ خاکستری مشخص شده است. بر اساس این عامل اراضی مسکونی و جاده‌ها بیشترین مقدار و جنگل

های باز بلوط به همراه چمنزارها به عنوان کمترین مقدار ارزش دهی شدند (شکل-۵g).  $S_i$ : گرادیان شیب است که از لایه شیب سطحی بر اساس رابطه -۱۰ به دست می‌آید (Diwediga et al, 2018).

$$S_i = \tan(a + 0.01) \quad \text{رابطه ۱۰}$$

جدول ۷: مقدار ضرایب  $V_i$  برای انواع کاربری زمین  
(Jain & Kothyari, 2000; Mutua & Klik, 2006)

مقدار $V_i$	کاربری اراضی
۰/۷۶۰۰	سطوح کامل پوشیده از گیاه
۰/۱۲۵۰	سطوح آبی
۶/۳۳۹۵	اراضی ساخته شده و اراضی بایر
۰/۶۴۰۱	جنگل باز با پوشش درختچه‌ای همراه با پوشش زراعی
۰/۴۲۶۷	جنگل‌های باز ساوانا همراه با پوشش علفزار
۰/۴۵۷۲	گیاهان ساحلی و چمنزار
۰/۳۹۶۲	بوته‌های کشت شده و مزارع طبیعی با پوشش گیاهی موزاییکی

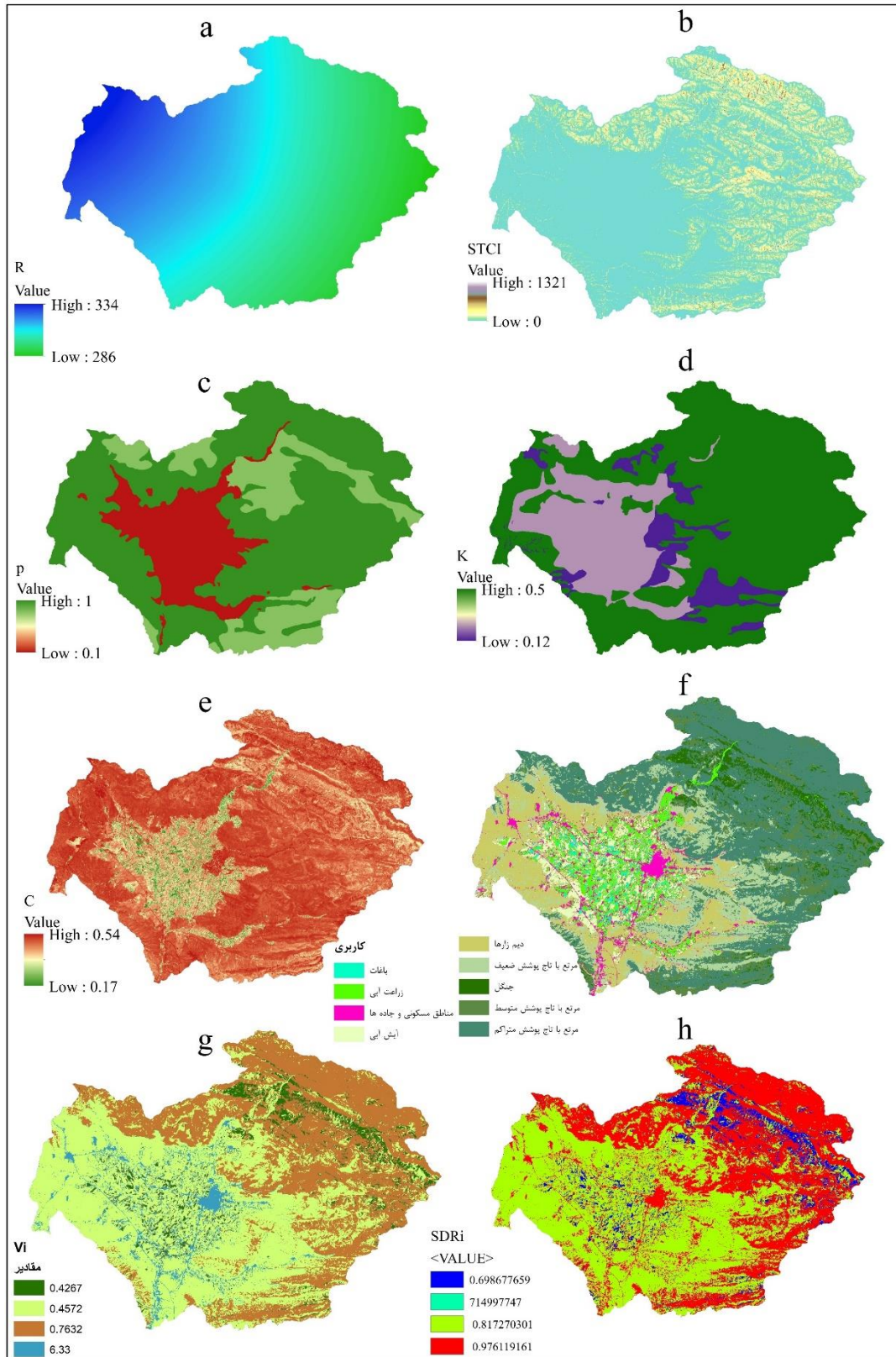
پس از محاسبه عامل  $SDR_i$  که در واقع نسبت تحویل رسوب حوضه محسوب می‌شود مطابق شکل-۵h بر اساس کاربری اراضی و شرایط توپوگرافی حوضه و ضرب این عامل در شاخص  $GSL$  میزان تلفات ویژه خاک سالانه حوضه آبریز الشتر محاسبه می‌گردد.

برای اعتبار سنجی مدل LAMPT از آنجا که نرخ داده شده در خروجی نقشه نرخ خالص (ویژه) فرسایش سالانه خاک است پس از اجرای مدل و محاسبه میانگین فرسایش ویژه خاک در سطح حوضه می‌توان آنرا با میانگین سالانه رسوب حوضه در ایستگاه رسوب سنجی در خروجی حوضه (سراب سیدعلی) در سال مورد پایش (۲۰۲۳) مورد مقایسه و ارزیابی قرار داد (Diwediga et al, 2018).

## یافته‌ها و بحث

بررسی آماره‌های توصیفی لایه‌های نقشه‌ای متغیرهای مدل مطابق جدول ۸- نشان می‌دهد که بیشترین دامنه بین کمینه و بیشینه پارامترها ابتدا بین متغیر  $STCI$  و سپس بین پارامتر  $R$  وجود دارد. اگرچه بین محدوده غربی حوضه نسبت به شرق حوضه بارش و پتانسیل فرسایش پذیری بیشتری وجود دارد اما انحراف معیار عامل فرسایش کمی (۱۱/۶) و اختلاف زیادی از نظر میزان فرسایش در سطح حوضه وجود دارد. در عامل  $STCI$  که نشان دهنده اثر توپوگرافی حوضه بر روی فرسایش خاک است اختلاف شدیدی بین مناطق مسطح و مناطق مرتفع حوضه وجود دارد. در مناطق مسطح میزان  $STCI$  صفر و در مناطق مرتفع تا عدد ۱۳۲۱ نیز می‌رسد.

در پارامتر  $K$  نیز ضریب فرسایش پذیری حوضه بین مقادیر ۰/۱۲ برای خاک‌های لومی شنی غالب در سطح دشت تا مقدار ۰/۵ شامل خاک‌های تکامل نیافته و شنی در مناطق کوهستانی، متغیر است. مقادیر عامل  $C$  یا مدیریت پوشش زمین از حداقل ۰/۱۷ در اراضی کشاورزی سطح دشت و ۰/۵۴ برای مناطق با پوشش گیاهی ضعیف منطبق بر مناطق کوهستانی و مرتفع حوضه، متغیر است، همچنین برای عملیات حفاظتی دامنه عددی این عامل بین ۰/۱ در برگرنده اراضی کشاورزی و مقدار ۱ در اراضی تپه ماهوری و کوهستانی حوضه و فاقد عملیات آبخیزداری و پوشش گیاهی متراکم، در تغییر است. بررسی توزیع فضایی متغیرهای مدل نشان می‌دهد که در مناطق مسطح حوضه این پارامترها در حداقل خود و در مناطق مرتفع و ناهموار حوضه در حداکثر شرایط خود قرار دارند بنابراین انتظار می‌رود که با افزایش ارتفاع و ناهمواری پتانسیل فرسایش خاک در حوضه افزایش پیدا کند.



شکل ۵: پارامترهای استخراج شده مدل LAMPT. a: عامل فرساینده باران، b: طول و درجه شیب، c: عامل حفاظتی، d: عامل فرسایش پذیری خاک، e: عامل مدیریت پوشش، f: کاربری اراضی حوضه، g: متغیر vi و h: عامل SDRi بر اساس کاربری اراضی حوضه

جدول ۸: ویژگی آماری پارامترهای ورودی مدل LAMPT

عامل	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار
R	۲۸۵,۹	۳۳۳,۸	۳۰۶,۵	۱۱,۶
K	۰,۱۲	۰,۵	۰,۲	۰,۱۳
STCI	۰	۱۳۲۱	۱۶,۷	۲۵
C	۰,۱۷	۰,۵۴	۰,۴۳	۰,۵
P	۰,۱	۱	۰,۶۳	۰,۲۱
R <sub>i</sub>	۰,۴۳	۶,۴	۰,۴۶	۰,۳
SDR <sub>i</sub>	۰,۷	۰,۹	۰,۷۶	۰,۰۷

پس از برآورد پارامترهای مدل LAMPT که در واقع بخش حساس و مهمی در نتایج نهایی دقت و صحت مدل است توزیع فضایی میزان فرسایش خاک سالانه بر اساس شکل ۶- محاسبه گردید. محاسبه میانگین فرسایش خاک با استفاده از تابع Zonal در نرم‌افزار ArcGIS نشان می‌دهد که در حوضه آبریز الشتر فرسایش سالانه خاک به ازای هر هکتار ۹/۴۲ تن است که در ۶ طبقه مطابق جدول ۹- طبقه‌بندی گردید. بر اساس خروجی مدل LAMPT طبقه بین ۰-۲ تن در هکتار ۳۹ درصد مساحت حوضه مشتمل بر اراضی مسطح و دشت الشتر را در برمی‌گیرد و پس از آن طبقه ۲-۵ تن در هکتار ۱۴ درصد اراضی را شامل می‌شود. طبقه ۵-۱۰ تن نیز که در واقع می‌توان آن را شروع دامنه بحرانی فرسایش قلمداد کرد (Li et al, 2023 : Wahla et al, 2022) ۱۳ درصد اراضی حوضه را در برمی‌گیرد. طبقات بحرانی ۱۰-۲۰ تن ۱۶ درصد، طبقه ۲۰-۵۰ مقدار ۱۲ درصد و طبقه بالاتر از ۵۰ تن در هکتار مقدار ۷ درصد اراضی حوضه را در برمی‌گیرد که منطبق بر مناطق کوهستانی شمال حوضه است. در واقع مناطق با فرسایش زیاد و بسیار زیاد (۱۰ تن به بالا) ۳۵ درصد مساحت حوضه را شامل می‌شوند. بنابراین می‌توان استنباط کرد که تقریباً یک سوم مساحت حوضه آبریز الشتر در طی سال دارای نرخ زیاد و بسیار زیاد فرسایش ویژه خاک است.

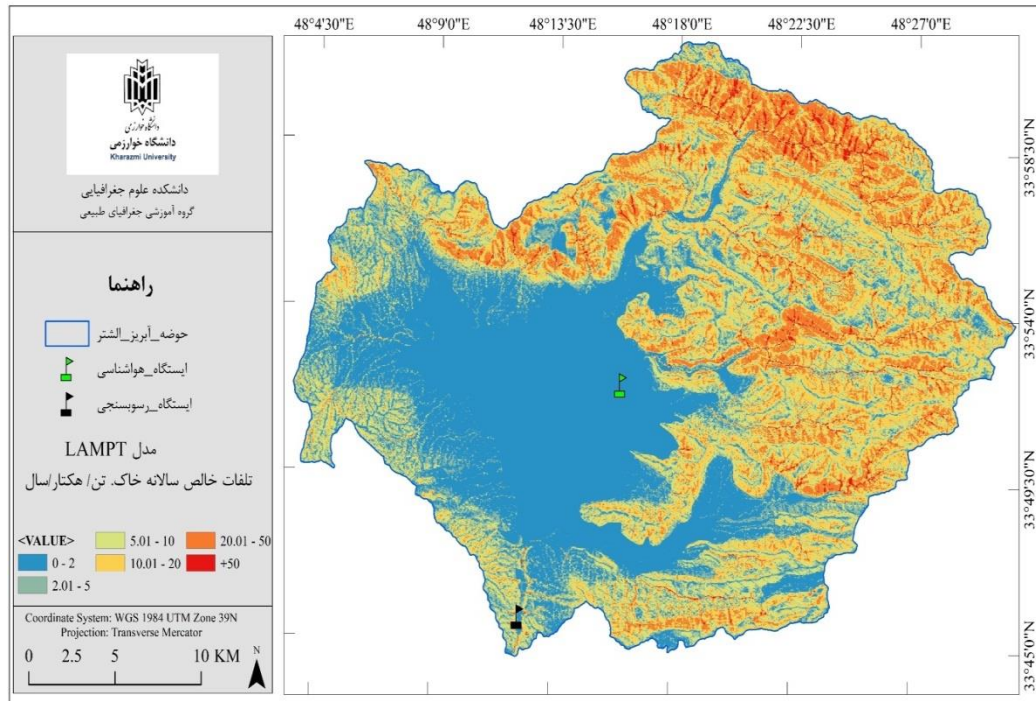
#### ارزیابی توزیع فرسایش خاک در کلاس‌های کاربری اراضی

از آنجا که در سیاست‌گذاری‌های مربوط به عملیات حفاظتی و کاهش فرسایش خاک، شناسایی کاربری‌های مولد رسوب در قدم‌های ابتدایی مورد توجه قرار می‌گیرد بررسی میزان فرسایش خاک در هر کلاس از کاربری اراضی با استفاده از تابع Zonal در نرم‌افزار ArcGIS مطابق جدول ۱۰- محاسبه گردید. بررسی سهم فرسایش ویژه در کاربری‌های حوضه نشان می‌دهد که کاربری‌های مربوط به اراضی مسکونی، زراعت آبی، آیش آبی و باغات

جدول ۹: طبقات فرسایش خاک، مساحت و درصد اراضی تحت پوشش از هر طبقه فرسایش

خاک بر اساس مدل LAMPT

طبقات فرسایش خاک تن در هکتار در سال	NSL (LAMPT)	
	مساحت (هکتار)	درصد مساحت
۰-۲	۲۶۶۳۶,۷	۳۹
۲-۵	۱۱۱۰۳	۱۴
۵-۱۰	۱۴۱۹۲,۴	۱۲
۱۰-۲۰	۱۷۳۳۵,۶	۱۶
۲۰-۵۰	۹۳۳۹,۴	۱۲
+۵۰	۱۰۰۱,۴	۷



شکل ۶: نرخ و توزیع فضایی فرسایش خالص خاک سالانه بر اساس شاخص NSL (LAMPT) در حوضه آبریز الشتر

که در مناطق مسطح و دشت الشتر قرار گرفته اند نرخ کمتری از فرسایش خاک دارند و کاربری های مرتبط با دیم زارها و مراتع دارای نرخ بحرانی تا شدید فرسایش خاک هستند و مناطق جنگلی در مرز بین دامنه مجاز و دامنه بحرانی فرسایش خاک قرار گرفته اند. مطابق این جدول در حوضه آبریز الشتر، مراتع بیشترین میزان نرخ فرسایش خاک را دارند که با کاهش ضعف پوشش مراتع، نرخ فرسایش خاک نیز افزایش پیدا می کند. در این حوضه مراتع ۶۰ درصد اراضی حوضه را شامل می شوند که مراتع با تاج پوشش ضعیف بیشترین مساحت از حوضه به میزان ۳۵/۸ درصد را در برمی گیرند. در مراتع با تاج پوشش ضعیف، میانگین نرخ فرسایش خاک ۱۷/۷ تن در هکتار در سال است، در مراتع با تاج پوشش متوسط این میزان به ۱۱/۳ و در مراتع متراکم به ۹/۱ تن در هکتار در سال کاهش پیدا می کند. از این بررسی آماری می توان نتیجه گرفت که مراتع حوضه آبریز الشتر که بیشترین مساحت حوضه را در برمی گیرند ، بیشترین میزان فرسایش خاک را نیز دارند که نیازمند برنامه ریزی به منظور افزایش توان مرتعی و پوشش گیاهی از طریق عملیات حفاظت خاک و آبخیزداری هستند.

### ارزیابی صحت مدل LAMPT

همان گونه که گفته شد مدل LAMPT تلفات خالص سالانه فرسایش خاک را برآورد می کند و از این نظر به طور مستقیم می توان میانگین نرخ فرسایش سالانه خاک حوضه را با داده های ایستگاه رسوب سنجی مورد مقایسه قرارداد. بر اساس آمار اندازه گیری رسوب در ایستگاه رسوب سنجی سراب سید علی در خروجی حوضه آبریز الشتر میانگین رسوب اندازه گیری شده طی سال ۱۴۰۲ بر اساس منحنی سنج رسوب ۱۰/۱ تن طی سال اندازه گیری شده است. بر اساس مدل LAMPT میانگین نرخ تلفات سالانه خاک ۹/۴۲ تن در هکتار طی سال اندازه گیری شده که از این نظر مدل LAMPT فرسایش خالص در سطح حوضه را با ۸ درصد خطا (۸۰۰ کیلوگرم) نسبت به ایستگاه رسوب سنجی برآورد کرده است. این مقدار خطا در دامنه خطای قابل قبول در مدل سازی فرسایش خاک در نظر گرفته می شود (نور و عرب خدری، ۱۴۰۲) بنابراین مدل LAMPT را می توان جزو مدل های نسبتاً دقیق به منظور دستیابی به نرخ فرسایش ویژه سالانه خاک دانست.

جدول ۱۰: مقادیر مساحت، درصد مساحت و تلفات سالانه فرسایش خاک کاربری‌های اراضی حوضه آبریز الشتر

بر اساس مدل LAMPT

کلاس کاربری اراضی	مساحت. هکتار	درصد مساحت	میانگین تلفات سالانه فرسایش خاک در سال (تن در هکتار در سال)
اراضی ساخته‌شده	۱۱۸۶,۳	۱,۵	۰,۱
زراعت	۵۹۱۰,۴	۷,۴	۰,۶
آبش آبی	۴۱۷۰,۹	۵,۲	۲,۱
باغات	۵۱۵۸	۶,۴	۰,۷
دیم‌زارها	۱۱۸۹۶,۶	۱۴,۹	۷,۵
جنگل	۱۲۷۵۸	۴,۸	۵,۱
مرتع با تاج پوشش متوسط	۳۸۵۸,۵	۱۵,۹	۱۱,۳
مراتع با تاج پوشش متراکم	۶۴۱۷,۷	۸	۹,۱
مراتع با تاج پوشش ضعیف	۲۸۶۴۵,۵	۳۵,۸	۱۷,۷

### نتیجه‌گیری

فرسایش خاک بالاتر از آستانه یکی از چالش‌های محیطی در اغلب نقاط دنیا محسوب می‌شود که طیف وسیعی از مشکلات مرتبط با کاهش حاصلخیزی خاک، خسارت به زیر ساخت‌ها و مشکلات اجتماعی و اقتصادی به دنبال آن دیده می‌شود. کشور در حال توسعه ایران با قرارگیری در یک منطقه خشک و نیمه خشک سالانه با نرخ فرسایش خاک بیش از ۵ برابر متوسط جهانی رو به رو است. مطالعات مقدماتی برآورد نرخ فرسایش خاک در حوضه‌های آبخیز و آگاهی از تغییرات فضایی - زمانی آن به تصمیم‌گیران در شناسایی و اولویت‌گذاری مناطق بحرانی به منظور اجرای عملیات حفاظتی پیشگیری از فرسایش خاک کمک شایانی می‌کند. معادله جهانی فرسایش خاک RUSLE که توسط فائو ارائه شده یکی از مدل‌های رایج محاسبه میزان فرسایش خاک است که با استفاده از داده‌های محیطی مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی نرخ پتانسیل فرسایش خاک و توزیع فضایی آن را در سطح حوضه‌های آبریز محاسبه می‌کند. مدل LAMPT یک مدل تجربی برآورد فرسایش ویژه خاک است که با در نظر گرفتن نسبت تحویل رسوب حوضه، نرخ فرسایش خالص خاک در حوضه‌های آبخیز را محاسبه می‌کند. در این پژوهش به منظور برآورد نرخ خالص سالانه فرسایش خاک و میزان کارایی آن در حوضه آبریز الشتر از مدل LAMPT مبتنی بر داده‌های اقلیمی، پوششی و ژئومورفولوژی استفاده شد. برآورد نرخ خالص فرسایش خاک طی سال ۱۴۰۲ با استفاده از این مدل نشان داد که میانگین تلفات سالانه خاک در سطح حوضه ۹/۴۲ تن در هکتار طی سال است و ۳۵ درصد حوضه دارای تلفات سالانه خاک بیشتر از ۱۰ تن است. از نظر کاربری اراضی نیز مراتع به عنوان مهم‌ترین مناطق فرسایش‌پذیر شناسایی شد و عرصه تحت پوشش این کلاس از کاربری اراضی شامل ۶۰ درصد مساحت است. بررسی تغییرات میزان فرسایش در هر یک از تیپ‌های مراتع نیز نشان داد که به با افزایش پوشش گیاهی و توان مرتعی نرخ فرسایش خاک کاهش می‌یابد به طوری که نرخ فرسایش خاک در مراتع با تاج پوشش ضعیف، متوسط و متراکم به ترتیب برابر با ۱۷/۷، ۱۱/۳ و ۹/۱ تن در هکتار در سال است. در کاربری‌های کشاورزی نیز دیم‌زارها بیشترین میزان نرخ فرسایش خاک را طی سال با مقدار ۷/۵ تن در هکتار دارا هستند زیرا پس از برداشت محصول عمدتاً عرصه چرای دام‌ها می‌باشند. ارزیابی دقت مدل LAMPT در مقایسه با میانگین سالانه نرخ رسوب در ایستگاه رسوب سنجی سراب صید علی (خروجی حوضه) نشان داد که اختلاف بین برآوردهای مدل و داده‌های

زمینی ۸ درصد است و مدل LAMPT میزان فرسایش را اندکی کمتر از حد واقعی نشان داده که این خطا در فرآیند مدل سازی قابل قبول محسوب می شود.

اگرچه مدل LAMPT در سال پایش شده خطای کمی نسبت به ایستگاه های زمینی نشان داده اما به منظور بررسی کارایی این مدل لازم است که در شرایط محیطی مختلف و در سال های ترسالی و خشکسالی عملکرد آن نیز مورد سنجش قرار گیرد. Diwediga و همکاران (۲۰۱۸) نرخ برآورد شده فرسایش ویژه خاک با استفاده از این مدل در سال های ترسالی را نسبت به داده های واقعیت زمینی نزدیک تر دانسته اند. با توجه به وقوع میانگین بارش سالانه ۵۰۰ میلیمتر طی ۱۴۰۳ در ایستگاه الشتر می توان سال پایش شده را یک سال نرمال دانسته و بخشی از خطای کم مدل را به شرایط نرمال بارندگی در این سال مربوط دانست. با توجه به یافته های تحقیق، پیشنهاد می شود که زیرحوضه های شمالی و شمال شرقی حوضه در اولویت اقدامات حفاظتی و آبخیزداری قرار گیرند. علاوه بر این مراتع با پوشش تاج ضعیف نیز به لحاظ کاربری زمین باید مورد توجه ویژه عملیات آبخیزداری و مرتع داری باشند.

## منابع

- احمدی، ح. ژئومورفولوژی کاربردی، جلد اول (فرسایش آبی)، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ هشتم، ۱۳۹۱.
- اصغری سراسکانرود، ص، بلواسی مهدی، زینالی بتول، بلواسی ایمانعلی، داودی علی. بررسی خطرپذیری فرسایش خاک در حوضه آبخیز دوآب لرستان با استفاده از تحلیل شبکه و فن آوری های سنجش از دور و GIS. پژوهش های فرسایش محیطی. ۱۳۹۳؛ ۴ (۲): صص ۷۲-۸۹.
- آرخی، ص و نیازی، ی (۱۳۸۹)؛ بررسی کاربرد GIS و RS برای تخمین فرسایش خاک و بار رسوب با استفاده از مدل RUSLE حوضه بالادست سد ایلام، مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک، جلد هفدهم، شماره دوم، صص ۱-۲۶.
- بهاروند، سی، ابراهیمی، ب، زیودار، م و حقی آبی. ا.ح، (۱۳۹۲)، خلاصه گزارش تعیین میزان تبادل هیدرولیکی رودخانه و سفره آب زیرزمینی دشت الشتر با استفاده از شبکه جریان، سازمان مجری: دانشگاه آزاد واحد خرم آباد.
- حاصلی، م، جلالیان، ح، ارزیابی و پهنه بندی مخاطره ی فرسایش خاک در حوضه ی آبریز الشتر. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. ۱۳۹۳؛ ۱ (۴)، صص ۹۱-۱۰۴
- سازمان تحقیقات کشاورزی وزارت کشاورزی، ۱۳۷۰. مطالعات اجمالی خاکشناسی و طبقه بندی اراضی استان لرستان، مؤسسه تحقیقات خاک و آب
- سپهر، ع و هنرمند، سعیده (۱۳۹۱)؛ تهیه نقشه خطر فرسایش واقعی خاک با استفاده از مدل کرین اصلاح شده حوضه آبخیز جهرم، جغرافیا و مخاطرات محیطی، دوره ۱، شماره ۳، صص ۵۷-۷۲.
- شرکت سهامی آب منطقه ای استان لرستان، ۱۳۸۲. گزارش طرح جامع مدیریت خشکسالی استان لرستان، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
- غلامی، ح، فتحی زاد حسن، صفری عطا، بی نیاز مهدی. برآورد فاکتور فرسایش باران با استفاده از الگوریتم های زمین آمار ( مطالعه ی موردی: استان ایلام). پژوهش های فرسایش محیطی. ۱۳۹۴؛ ۵ (۴) صص ۱-۱۶.
- فاطمی، ب، رضایی، ی (۱۳۹۶)، مبانی سنجش از دور، انتشارات آزاده، چاپ پنجم، تهران.

- مصطفایی، ج و طالبی، ع، ۱۳۹۳، نگاهی آماری به وضعیت فرسایش آبی در ایران، مجله ترویج و توسعه آبخیزداری، دوره دوم، شماره پنجم، صص ۹-۱۶.
- کرم، امیر، ص. آمنه و حجه فروش نیا. شیلا، (۱۳۸۹)، برآورد و پهنه بندی فرسایش خاک در حوضه ماملو (شرق تهران) با استفاده از روش‌های معادله اصلاح شده جهانی فرسایش خاک و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، مجله پژوهش‌های دانش زمین، سال اول، شماره دوم، صص ۷۳-۸۶.
- معتمدی، م. زنگنه اسدی، م. عجم، ح. (۱۴۰۲). بررسی میزان فرسایش خاک با استفاده از مدل *RUSLE* و روش پسیاک اصلاح شده (مطالعه موردی: حوضه آبریز کال اسماعیل دره شهرستان شاهرود استان سمنان). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۱، شماره ۴، بهار ۱۴۰۲، صص ۱۴۷-۱۶۵.
- مقیم، حسن، سلیمان‌پور سید مسعود، و محسنی، مهرسا (۱۴۰۱) برآورد فرسایش خاک با استفاده از مدل‌های *RUSLE*، *MPSIAC* و روش تحلیل منطقه‌ای در حوضه سد چشمه عاشق نیریز استان فارس، نشریه ترویج و توسعه آبخیز داری، سال دهم، شماره ۳۸، صص ۹-۱۷.
- نور، ح. عرب خدری، م. (۱۴۰۲). برآورد فرسایش خاک و نسبت تحویل رسوب با استفاده از مدل *RUSLE* در پایگاه تحقیقات حفاظت خاکسنگانه. مدل سازی و مدیریت آب و خاک. (۱)۳. صص ۴۲-۵۳.
- Allafta, H., & Opp, C. (2022). Soil erosion assessment using the *RUSLE* model, remote sensing, and GIS in the Shatt Al-Arab basin (Iraq-Iran). *Applied Sciences*, 12(15), 7776.
- Alijani, B. (2008). Effect of the Zagros Mountains on the spatial distribution of precipitation. *Journal of mountain science*, 5(3), 218-231.
- Amellah, O., & el Morabiti, K. (2021). Assessment of soil erosion risk severity using GIS, remote sensing and *RUSLE* model in Oued Laou Basin (north Morocco). *Soil science annual*, 72.(۳)
- Auerswald, K., Fiener, P., Martin, W., Elhaus, D., 2014. Use and misuse of the K factor equation in soil erosion modeling: an alternative equation for determining USLE nomograph soil erodibility values. *Catena* 118, 220-225. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.01.008>.
- Ciesiolka, C. A., Yu, B., Rose, C. W., Ghadiri, H., Lang, D., & Rosewell, C. (2006). Improvement in soil loss estimation in USLE type experiments. *Journal of Soil and Water Conservation*, 61(4), 223-229.
- Dash, S. S., & Maity, R. (2023). Effect of climate change on soil erosion indicates a dominance of rainfall over LULC changes. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 47, 101373.
- Diwediga, B., Le, Q. B., Agodzo, S. K., Tamene, L. D., & Wala, K. (2018). Modelling soil erosion response to sustainable landscape management scenarios in the Mo River Basin (Togo, West Africa). *Science of the total environment*, 625, 1309-1320.
- Gayen, A., Saha, S., & Pourghasemi, H. R. (2020). Soil erosion assessment using *RUSLE* model and its validation by FR probability model. *Geocarto International*, 35(15), 1750-1768.
- Hadi Allafta, Christian Opp, (2022). Soil Erosion Assessment Using the *RUSLE* Model, Remote Sensing, and GIS in the Shatt Al-Arab Basin (Iraq-Iran). *Appl. Sci.* 2022, 12, 7776. <https://doi.org/10.3390/app12157776>

- Jain, M. K., & Kothiyari, U. C. (2000). Estimation of soil erosion and sediment yield using GIS. *Hydrological Sciences Journal*, 45(5), 771-786.
- Karthick, P., Lakshumanan, C., & Ramki, P. (2017). Estimation of soil erosion vulnerability in Perambalur Taluk, Tamilnadu using revised universal soil loss equation model (RUSLE) and geo information technology. *International Research Journal of Earth Sciences*, 5(8), 8-14.
- Li, P., Tariq, A., Li, Q., Ghaffar, B., Farhan, M., Jamil, A., ... & Freeshah, M. (2023). Soil erosion assessment by RUSLE model using remote sensing and GIS in an arid zone. *International Journal of Digital Earth*, 16(1), 3105-3124.
- Mutua, B. M., Klik, A., & Loiskandl, W. (2006). Modelling soil erosion and sediment yield at a catchment scale: the case of Masinga catchment, Kenya. *Land degradation & development*, 17(5), 557-570.
- Nearing, M.A., 2000. Evaluating soil erosion models using measured plot data: accounting for variability in the data. *Earth Surf. Process. Landf.* 25, 1035–1043 .
- Nyssen, J., Poesen, J., Moeyersons, J., Deckers, J., Haile, M., & Lang, A. (2004). Human impact on the environment in the Ethiopian and Eritrean highlands—a state of the art. *Earth-science reviews*, 64(3-4), 273-320.
- Pal, S. C., & Chakraborty, R. (2019). Modeling of water induced surface soil erosion and the potential risk zone prediction in a sub-tropical watershed of Eastern India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5, 369-393.
- Panagos, P., Borrelli, P., Robinson, D.A., 2015b. Common agricultural policy: tackling soil loss across Europe. *Nature* 526, 195.
- Pandey, A., Chowdary, V. M., & Mal, B. C. (2007). Identification of critical erosion prone areas in the small agricultural watershed using USLE, GIS and remote sensing. *Water resources management*, 21, 729-746.
- Parysow, P., Wang, G., Gertner, G., & Anderson, A. B. (2003). Spatial uncertainty analysis for mapping soil erodibility based on joint sequential simulation. *Catena*, 53(1), 65-78.
- Quinton, J.N., 2004. Erosion and sediment transport. In: Wainwright, J., Mulligan, M. (Eds.), *Environmental Modelling: Finding Simplicity in Complexity*. John Wiley & Sons Ltd, pp. 187–196..
- Renard, K. G., & Freimund, J. R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of hydrology*, 157(1-4), 287-306.
- Samani, A. N., Ahmadi, H., Jafari, M., Boggs, G., Ghoddousi, J., & Malekian, A. (2009). Geomorphic threshold conditions for gully erosion in Southwestern Iran (Boushehr-Samal watershed). *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(2), 180-189.
- Stroosnijder, L., 2005. Measurement of erosion: is it possible? *Catena* 64, 162–173. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.08.004>.
- Toy, T. J., Foster, G. R., & Renard, K. G. (2002). *Soil erosion: processes, prediction, measurement, and control*. John Wiley & Sons.
- Wahla, S. S., Kazmi, J. H., Sharifi, A., Shirazi, S. A., Tariq, A., & Joyell Smith, H. (2022). Assessing spatio-temporal mapping and monitoring of climatic variability using SPEI and RF machine learning models. *Geocarto International*, 37(27), 14963-14982.

- *Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning (No. 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration.*
- *Wischmeier, W. H., Johnson, C. B., & Cross, B. V. (1971). A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites.*
- *Deore, S.J. 2006. Prioritization of Micro-watersheds of Upper Bhama Basin on the Basis of Soil Erosion Risk Using Remote Sensing and GIS Technology. Ph.D. Thesis. Department of Geography. University of Pune, 147p.*