

## ارزیابی فرسایش خاک و رسوب حوزه آبخیز مندرجان با استفاده از مدل‌های USPED و RUSLE در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)

شاهین محمدی<sup>۱\*</sup>، حمیدرضا کریمزاده<sup>۲</sup>، خلیل حبشی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۰۵

### چکیده

خاک یکی از مهم‌ترین عوامل تولید است که در زندگی اقتصادی و اجتماعی انسان تأثیر بسیار دارد. در تحقیق حاضر، توزیع مکانی فرسایش خاک و رسوب حوزه آبخیز مندرجان با مساحت ۲۱۱۰۰ هکتار با استفاده از مدل‌های USPED و RUSLE مورد ارزیابی قرار گرفت. داده‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر شامل تصویر ماهواره‌ای سنجنده OLI مربوط به تاریخ ۱۲ تیر ۱۳۹۴، اطلاعات بافت خاک، آمار بارش ماهانه و مدل رقومی ارتفاع (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر است. براساس نتایج حاصل از مدل USPED، کلاس فرسایش کم، متوسط، شدید و خیلی شدید به ترتیب ۱۰/۸، ۴۵، ۸ و ۱۶/۳ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه را شامل می‌شوند. همچنین کلاس‌های رسوب‌گذاری کم، متوسط، شدید و خیلی شدید به ترتیب ۴/۳، ۲/۹، ۲/۵ و ۱۰ درصد از مساحت منطقه را به خود اختصاص می‌دهند. بر اساس نتایج به دست آمده از مدل RUSLE، کلاس فرسایش کم، متوسط، شدید و بسیار شدید به ترتیب ۵۵، ۱۳/۳، ۱۱/۵ و ۲۰ درصد از مساحت منطقه را شامل می‌شوند. نتایج حاصل از تحقیق حاضر نشان داد که اگر دو مدل USPED و RUSLE با هم ترکیب شوند، می‌توان مناطق بحرانی را از لحاظ فرسایش خاک اولویت‌بندی کرد و بر اساس اولویت، اقدام به اجرای عملیات حفاظت خاک نمود.

واژه‌های کلیدی: فرسایش خاک، مدل‌سازی، رسوب‌گذاری، سنجش از دور (RS)، اصفهان.

۱. دانشجوی دکتری سنجش از دور و سیستم اطلاعات مکانی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، نویسنده مسئول

Shahin\_mohammadi70@yahoo.com

۲. استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳. دانش آموخته کارشناسی ارشد بیابان‌زدایی، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه صنعتی اصفهان

## مقدمه

در میان فرایندهای مختلف تخریب اراضی، فرسایش خاک تهدیدی جدی برای حفاظت منابع آب و خاک کشورمان است. فرسایش، نتیجه و حاصل اثر متقابل مجموعه‌ای از عوامل طبیعی و انسانی است که برحسب شرایط خاص منطقه، یک یا چند عامل، به‌عنوان عوامل اصلی و تعیین‌کننده عمل می‌کنند (نوحه‌گر و کاظمی، ۲۰۱۳).

از آنجا که در بسیاری از کشورها فرسایش خاک و تخریب اراضی مشکلات عمده‌ای را ایجاد کرده، تلاش‌های زیادی در توسعه مدل‌های فرسایش خاک صرف شده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به معادله جهانی فرسایش خاک<sup>۱</sup> (ویشمایر و اسمیت<sup>۲</sup>، ۱۹۷۸)، فرسایش رسوب بر اساس نیروی واحد جریان (میتاسوا<sup>۳</sup> و همکاران، ۱۹۹۶)، پروژه پیش‌بینی فرسایش آبی<sup>۴</sup> (فلنگان و نیرینگ<sup>۵</sup>، ۱۹۹۵)، ابزار ارزیابی آب و خاک<sup>۶</sup> (آرنولد<sup>۷</sup> و همکاران، ۱۹۸۸) اشاره کرد. در طی چهل سال گذشته، مدل USLE به سبب داشتن محاسبات ساده، پرکاربردترین روش تخمین پتانسیل فرسایش خاک و برآورد تأثیرات عملیات مدیریتی مختلف بر آن بوده است. به دنبال آن، نسخه جدید مدل USLE با نام معادله تجدیدنظرشده جهانی هدررفت خاک<sup>۸</sup> توسعه یافته که برآوردهای دقیق‌تری از عامل‌های C، P، K و R در فرسایش خاک انجام می‌دهد (رنارد<sup>۹</sup> و همکاران، ۱۹۹۷). معادله جهانی فرسایش خاک در اصل برای پیش‌بینی تلفات خاک در اراضی زراعی با شیب ملایم ارائه شده است (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸)، اما مدل تجدیدنظرشده جهانی فرسایش خاک برای کاربری‌های مختلف گسترش یافته که شامل جنگل، مراتع، زراعی و اراضی بایر است (رنارد و همکاران، ۱۹۹۷). بعد از دو دهه میتاسوا و همکاران (۱۹۹۶)، با ارائه فرمول دقیق‌تری برای برآورد عامل LS، مدل جهانی تلفات خاک تجدیدنظرشده سه‌بعدی را معرفی کردند. مدل

تجدیدنظرشده جهانی فرسایش خاک (RUSLE) به دلیل ظرفیت جدا شدن رسوب محدودیت دارد؛ بدین معنی که فرض می‌کند جریان آب می‌تواند یک مقدار بی‌اندازه‌ای از رسوب را منتقل کند و مقدار خاک ازدست‌رفته فقط با ظرفیت آب برای جدا کردن خاکدانه محدود شده است. بنابراین، این مدل قادر به برآورد رسوب خاک نیست (آیلو<sup>۱۰</sup> و همکاران، ۲۰۱۴؛ میتاسوا و همکاران، ۱۹۹۶). از سوی دیگر، مدل فرسایش و رسوب بر اساس نیروی واحد جریان<sup>۱۱</sup> (USPED) نه تنها میزان فرسایش خاک را برآورد می‌کند، بلکه نحوه توزیع فضایی رسوب در مقیاس حوضه‌ای را برای یک جریان سطحی ثابت در شرایط یکنواخت بارش مشخص می‌کند (میتاسوا و همکاران، ۱۹۹۸؛ میتاسوا و همکاران، ۱۹۹۹). مدل USPED به‌عنوان یک مدل که ظرفیت انتقال آن محدود است، فرض می‌کند که جریان آب می‌تواند یک مقدار معینی از رسوب را توسط جریان آب انتقال دهد. علاوه بر این، این مدل فرض می‌کند که ظرفیت مقدار رسوبات در حال انتقال همیشه پر است (آیلو و همکاران، ۲۰۱۴). کاربرد مدل‌های فرسایش و رسوب برای انجام پروژه‌های مدیریتی و تحقیقاتی در سطوح وسیع مانند حوزه آبخیز، با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور<sup>۱۲</sup> (RS) و سامانه اطلاعات جغرافیایی<sup>۱۳</sup> (GIS) امکان‌پذیر است؛ زیرا در این صورت است که تخمین فرسایش خاک و توزیع مکانی آن با هزینه‌های پایین‌تر و دقت بیشتر انجام می‌پذیرد (میلوارد و مرسی<sup>۱۴</sup>، ۱۹۹۹). در سال‌های اخیر، ترکیب سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی با مدل‌های فرسایش رسوب سبب شده که بتوان مقدار فرسایش خاک را سلول به سلول تخمین زد؛ در این راستا مطالعات متعددی در داخل و خارج کشور انجام گرفته که به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌شود.

رضایی و همکاران (۲۰۱۴) فرسایش خاک حوزه آبخیز گابریک جنوب خاوری استان هرمزگان را با استفاده مدل RUSLE و فناوری‌های GIS و RS برآورد نمودند. نتایج این تحقیق مؤثر بودن فناوری‌های نوین GIS و RS را برای تخمین

1. Universal Soil Loss Equation (USLE)
2. Wischmeier & Smith
3. Mitasova
4. Water Erosion Prediction Project (WEPP)
5. Flanagan & Nearing
6. Soil Water Assessment Tool (SWAT)
7. Arnold
8. Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)
9. Renard

10. Aiello
11. Unit Stream Power-based Erosion/ Deposition
12. Remote Sensing
13. Geographical Information System
14. Millward & Mersey

در اثر رسوبگذاری مواد فرسایش یافته می‌شود. لذا با توجه به موارد ذکرشده، نیاز به جمع‌آوری اطلاعات در زمینه فرسایش خاک بیش از پیش احساس می‌شود. از این‌رو استفاده از این مدل‌ها با کاهش در هزینه و زمان می‌تواند به مدیران و تصمیم‌گیران کمک بسزایی نمایند. تحقیق حاضر با هدف مدل‌سازی میزان فرسایش خاک و بار رسوب با استفاده از مدل USPED و مدل RUSLE به کمک سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS) در حوزه آبخیز مندرجان انجام شد تا مناطقی که تحت تأثیر فرسایش خاک و رسوب‌گذاری هستند شناسایی و بتوان برای اجرای عملیات حفاظتی آب و خاک اقدام نمود.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در تحقیق حاضر، حوزه آبخیز مندرجان از حوزه آبریز زاینده‌رود است. این حوضه بین طول جغرافیایی " ۱۶° ۵۰' ۷۵" تا " ۱۲° ۴۰' ۳۴" شرقی و عرض جغرافیایی " ۳۲° ۴۵' ۵۰" تا " ۳۲° ۵۶' ۴۸" شمالی و در غرب استان اصفهان قرار دارد (شکل ۱). مساحت و ارتفاع متوسط از سطح آب‌های آزاد حوزه آبخیز مندرجان به ترتیب ۲۲۰۰ هکتار و ۲۴۰۰ متر است. در حدود ۶۰ درصد منطقه در ارتفاع ۲۲۰۰ تا ۲۴۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد. شیب متوسط حوزه ۱۳/۳ درصد می‌باشد که به صورت شمالی جنوبی است. مهم‌ترین عامل در فرسایش خاک منطقه، جریان‌های سطحی به دلیل ریزش‌های جوی است. متوسط بارش منطقه ۴۰۰ میلی‌متر است. بارندگی‌های اصلی حوضه مورد مطالعه و نواحی اطراف آن، سیستم باران‌زایی است که تحت تأثیر جریان‌های جوی مدیترانه‌ای است و به مدت ۸ ماه از اول مهر تا اوایل خرداد، حوزه آبخیز را تحت تأثیر قرار می‌دهد. حوزه آبخیز مورد نظر دارای آب‌وهوای نیمه‌خشک با زمستان‌های سرد می‌باشد (محمدی، ۲۰۱۶).

### روش کار

مدل تجدیدنظرشده تلفات خاک جهانی (RUSLE) یک مدل یک‌بعدی است که فرض می‌کند فرسایش عمدتاً به ظرفیت جداسازی قطرات باران بستگی دارد، در حالی که USPED یک

مقادیر کمی فرسایش خاک تأیید می‌کند. بابایی و همکاران (۲۰۱۶) تحقیقی با هدف برآورد فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE در حوزه آبخیز کن انجام دادند. نتایج این تحقیق مقدار متوسط فرسایش خاک را برای منطقه مورد مطالعه ۲۰ تن در هکتار در سال نشان داد. لیو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۷) به منظور برآورد فرسایش خاک و رسوب با استفاده از مدل USPED تحقیقی در حوزه آبخیز فورت بنینگ<sup>۲</sup> آمریکا انجام دادند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که اختلاف بین مقدار رسوب واقعی و مقدار ارزیابی شده توسط این مدل، یک رابطه خطی مناسب ( $R^2=0.72$ ) دارد. پیستوکچی<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۲) به منظور ارزیابی مقدار فرسایش خاک و رسوب برای بهترین شیوه مدیریت زمین با استفاده از مدل USPED در حوضه رودخانه رومانا واقع در ایتالیا به تحقیق پرداختند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که استفاده از این مدل می‌تواند به نحوه مدیریت بهتر زمین کمک کند. آیلو و همکاران (۲۰۱۴) به منظور مدل‌سازی فرسایش با استفاده از داده‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS) به وسیله مدل USPED در بازلیکتا<sup>۴</sup> در جنوب ایتالیا به مطالعه پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که این مدل پیش‌بینی قابل اطمینانی از مقدار فرسایش خاک و تعریف مناطق مستعد فرسایش در حوضه را ارائه می‌کند. اسدی و همکاران (۲۰۱۷) تحقیقی به منظور ارزیابی خطر فرسایش خاک در حوزه آبخیز ناورود در استان گیلان انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار فرسایش خاک در حوزه آبخیز مورد مطالعه بین صفر تا ۱۰۵۶ تن در هکتار در سال متغیر است.

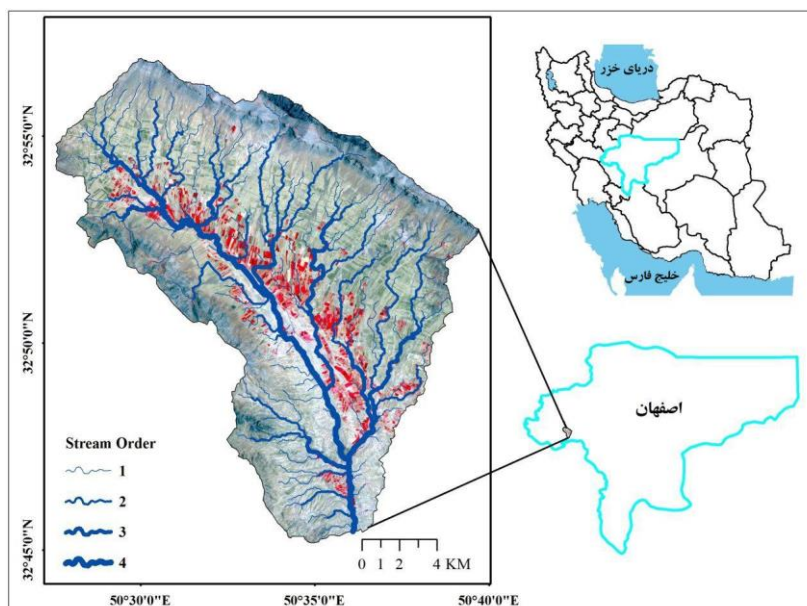
بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که در داخل کشور، برای ارزیابی فرسایش سطحی و شیاری، از مدل USPED استفاده نشده است؛ و با توجه به این مسئله که منطقه مورد مطالعه در تحقیق حاضر از حوضه‌های اصلی سد زاینده‌رود می‌باشد بنابراین فرسایش خاک در این منطقه سبب از دست رفتن خاک حاصلخیز، کاهش کیفیت آب در اثر معلق شدن مواد فرسایش یافته در آب و در نهایت کم شدن ظرفیت مخزن سد

1. Liu
2. Fort Benning
3. Pistocchi
4. Basilicata

در این رابطه،  $T$  ظرفیت انتقال رسوب،  $K_t$  ضریب توانایی حمل که به وسیله نوع خاک و پوشش گیاهی تعیین می‌شود،  $P$  واحد فشار آب در عمق،  $h$  عمق آب،  $b$  نوع شیب زمین و  $n$  یک توان تجربی است. در مدل  $USPED$  فرض می‌شود که جریان آب و انتقال رسوب در سطح زمین به صورت مداوم هستند. همچنین دو بعد آب و رسوب ممکن است تحت تأثیر ویژگی‌های محلی زمین تغییر پیدا کنند. از نظر ریاضی، نرخ تغییر مقدار جریان بر روی سطح را واگرایی یا انشعاب می‌نامند. انشعاب نشان می‌دهد که آیا یک پیکسل که به زمین تعلق گرفته، به عنوان نقطه‌ای گود یا یک منبع شار جریان عمل می‌کند. بنابراین مقدار فرسایش و رسوب‌گذاری خالص طبق رابطه (۲) بیان می‌شود (میتوسوا و همکاران، ۱۹۹۹).

مدل فرسایش خاک دوبعدی است که در آن فرض می‌شود که فرسایش خاک و رسوب عمدتاً به ظرفیت انتقال رسوب به وسیله رواناب سطحی وابسته است. اگر خاکدانه‌ها توسط باران جدا شوند اما رواناب به اندازه کافی برای انتقال ذرات خاک به دلیل شکل زمین یا پوشش گیاهی وجود نداشته باشد، مقدار واقعی فرسایش به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. بر اساس نحوه عملکرد مدل  $USPED$ ، کل جریان آب که به یک پیکسل وارد می‌شود، تحت عنوان ظرفیت انتقال رسوب این پیکسل معرفی می‌شود و بر اساس رابطه (۱) محاسبه می‌شود (میتوسوا و همکاران، ۱۹۹۹).

$$T = K_t \times (p \times h \times \sin b)^n \quad (1)$$



شکل (۱): موقعیت مورد مطالعه در استان اصفهان

Figure (1): The location of the study area in Esfahan province

$$ED = K_t \times q^m \times (\sin b)^n \quad (3)$$

در این رابطه،  $q$  مدت بارش ثابت می‌باشد که جایگزین عمق آب پویا در رابطه (۱) شده است؛  $q$  در واقع کل مقدار رواناب بالادست است که از طریق یک پیکسل در سطح زمین می‌گذرد،  $m$  و  $n$  توان‌های تجربی هستند. در نهایت پارامترهای  $K_t$  و  $K_p$  مشخص می‌کنند که آیا ارزش  $ED$  مثبت (رسوب‌گذاری) یا منفی (فرسایش) شود. پارامترهای  $K_t$  و  $K_p$  با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) محاسبه می‌شود.

$$ED = K_t \{grad(h) S \sin(b) - h(k_p + k_t)\} \quad (2)$$

در این رابطه،  $ED$  مقدار فرسایش و رسوب خالص،  $S$  بردار واحد در جهت شدیدترین شیب،  $K_p$  انحنا ی پروفیل و  $K_t$  انحنا ی مماس است. مقدار  $ED$  مثبت رسوب‌گذاری و مقدار  $ED$  منفی، نشان‌دهنده فرسایش خاک است. محاسبه عمق واقعی آب در رابطه (۱) بسیار پیچیده و نیازمند داده است. در عمل، محاسبه ظرفیت انتقال رسوب در مدل  $USPED$  با استفاده از مقدار جریان رسوب ثابت، به تقریب معادل رابطه (۳) است.

فرسایندهگی فورنیه اصلاح شده بیش از شاخص های دیگر، در تعیین فرسایندهگی باران و تهیه نقشه فرسایندهگی به خصوص برای مناطق فاقد آمار شدت بارندگی مورد توجه محققان مختلف است (محمدی، ۲۰۱۶؛ فتحی زاد و همکاران، ۲۰۱۴). بنابراین با استفاده از آمار ۱۴ ایستگاه در داخل و خارج حوضه، اقدام به برآورد عامل فرسایندهگی گردید. با استفاده از معادله زیر، شاخص فورنیه و عامل R برای تمام ایستگاهها به دست آمد. شاخص فورنیه، F به صورت (رابطه ۹) است.

$$MFI = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{P} \quad (9)$$

در این رابطه،  $p_i$  متوسط بارندگی برحسب (میلی متر) در ماه  $i$  و  $p$  متوسط بارندگی سالانه (میلی متر) است. سپس با جایگذاری شاخص فورنیه (رابطه ۹) در رابطه (۱۰) (برای MFI کمتر از ۵۵ میلی متر) و رابطه (۱۱) (برای MFI برابر یا بیشتر از ۵۵ میلی متر) که رنارد و فریموند<sup>۱</sup> (۱۹۹۴) ارائه کردند، مقدار عامل فرسایندهگی برآورد گردید و با روش درونیابی IDW به دلیل داشتن خطای کمتر، این شاخص برای کل سطح منطقه مورد مطالعه پهنه بندی شد.

$$R = 0.07397 \times MFI^{1/847} \quad (10)$$

$$R = (95.77 - 7.01) \times F + 0.477 \times MFI^2 \quad (11)$$

در این رابطه، R عامل فرسایندهگی باران برحسب  $(MJmm \text{ ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1})$  و F مقدار شاخص فورنیه است.

### عامل فرسایش پذیری خاک (K): فرسایش پذیری

خاک بیانگر حساسیت ذاتی خاک به فرسایش است و سهولت جدا شدن ذرات خاک بر اثر انرژی جنبشی قطرات باران و انتقال آنها به وسیله نیروی رواناب را نشان می دهد (ویه<sup>۲</sup>، ۲۰۰۲). با استفاده از مقادیر درصد های شن، سیلت و رس از طریق رابطه (۱۲) عامل فرسایش پذیری خاک محاسبه شد (شیرازی و بروسما، ۱۹۸۴).

(۱۲)

$$K = 7.594 \left\{ 0.0034 + 0.0405 \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\log Dg + 1.659}{0.7101} \right)^2 \right] \right\} \times 0.1317$$

معادله انشعابات را می توان با استفاده از رابطه (۴) محاسبه کرد (میتاسوا و همکاران، ۲۰۱۳).

$$ED = \frac{d(T \cos a)}{dx} + \frac{d(T \sin a)}{dy} \quad (4)$$

در این رابطه،  $a$  جهت سطح زمین و  $dx=dy$  دقت شبکه است.

در این مدل، ضریب ثابت  $Kt$  می باشد که از پارامترهای  $C$ ،  $K$  و  $P$  مدل RUSLE مشتق شده است. مدل RUSLE، یک مدل برآورد فرسایش آبی است که با ۶ عامل فرسایشی بر اساس رابطه (۵) در ارتباط است (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸).

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (5)$$

در این رابطه،  $A$  میانگین فرسایش خاک در واحد سطح  $(t \text{ ha}^{-1} \text{ y}^{-1})$ : عامل فرسایندهگی باران  $(MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1})$ ،  $K$  عامل فرسایش پذیری خاک  $(t \text{ h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1})$ ،  $LS$  عامل توپوگرافی،  $C$  عامل عملیات مدیریتی و پوشش و  $P$  عامل عملیات حفاظتی است. مقادیر  $C$ ،  $S$ ،  $L$  و  $P$  بدون واحدند.

ارتباط بین USPED و مدل RUSLE در رابطه های (۶) تا (۸) آورده شده است (میتاسوا و همکاران، ۱۹۹۹):

$$Kt = K \times C \times P \quad (6)$$

$$LS = Am \times (\sin b)n \quad (7)$$

در این رابطه،  $A$  نقش منطقه بالادست را نشان می دهد. در نهایت نحوه محاسبه ظرفیت انتقال رسوب برای یک پیکسل در سطح زمین با استفاده از مدل USPED به صورت رابطه (۸) می شود (میتاسوا و همکاران، ۱۹۹۹).

$$T = R \times K \times C \times P \times A^m \times (\sin b)^n \quad (8)$$

### ارزیابی فاکتورها

**عامل فرسایندهگی باران (R):** مفهوم عبارت فرسایندهگی باران را ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) به منظور لحاظ تأثیر اقلیم بر فرسایش خاک ارائه کردند. در تحقیق حاضر، برای ارزیابی عامل فرسایندهگی باران تصمیم گرفته شد که از یک شاخص که امکان محاسبه آن با اطلاعات ایستگاه های باران سنجی مقدور بوده و از طرف دیگر مقبولیت بیشتری داشته باشد، استفاده شود. از میان این گونه شاخص ها، شاخص

جدول (۱): عامل عملیات حفاظتی

Table (1): Support practice factor

عامل P	شیب (درصد)	تیپ کاربری اراضی
۰/۱	۰-۵	کشاورزی
۰/۱۲	۵-۱۰	
۰/۱۴	۱۰-۲۰	
۰/۱۹	۲۰-۳۰	
۰/۲۵	۳۰-۵۰	
۰/۳۳	۵۰-۱۰۰	
۱	همه	کاربری‌های دیگر

### عامل توپوگرافی (LS): طول شیب عبارت است از فاصله

افقی از مبدأ جریان بالادست دامنه تا جایی که تندی شیب به مقدار قابل ملاحظه‌ای تغییر یابد و عمل رسوب‌گذاری آغاز شود؛ یا جریان‌های روی یک دامنه در یک کانال معین (کانال ترانس، سطوح تمرکز جریان، خندق، چاله، آبراهه و...) ادغام و متمرکز گردند. با افزایش طول شیب فرسایش افزایش می‌یابد (رنارد و همکاران، ۱۹۹۷). برای محاسبه عامل LS بر اساس مدل RUSLE از رابطه (۱۵) استفاده می‌شود (مور و بورچ، ۱۹۸۶).

(۱۵)

$$LS = \left\{ \frac{22/13}{\text{اندازه سلول}} \times (\text{جریان تجمعی}) \right\}^{0.4} \times \left\{ \frac{\sin(\text{درجه شیب})}{0.0896} / 0.01745 \right\}^{1.3}$$

برای محاسبه عامل LS در مدل USPED از رابطه (۱۶) استفاده می‌شود (میتاسوا و همکاران، ۱۹۹۹).

(۱۶)

$$LS = m + 1 \left\{ \frac{22/13}{\text{اندازه سلول}} \times (\text{جریان تجمعی}) \right\}^m \times \left\{ \frac{\sin(\text{درجه شیب})}{0.0896} / 0.01745 \right\}^n$$

در این رابطه، مقدار m و n برای فرسایش سطحی ۱ و برای فرسایش شیاری به ترتیب ۱/۶ و ۱/۳ در نظر گرفته می‌شوند (میتاسوا و همکاران، ۲۰۰۳).

### نتایج

مشخصات ایستگاه‌های بارندگی و نتایج حاصل از محاسبه میزان شاخص فرسایش باران در ایستگاه‌های مورد مطالعه با استفاده از شاخص اصلاح‌شده فورنیه (رابطه ۹) و رابطه رنارد و فریموند (رابطه ۱۰) در جدول (۱) و نقشه فاکتور R نیز در شکل (۲ الف) آورده شده است. مطابق این شکل، مقدار فاکتور

در این رابطه، K عامل فرسایش‌پذیری خاک ( $t h MJ^{-1} mm^{-1}$ ) و  $Dg$  میانگین هندسی قطر ذرات برحسب میلی‌متر است. در این مطالعه با نمونه‌برداری ۲۶ نقطه از خاک منطقه در داخل و خارج حوضه و تجزیه و تحلیل آن در محیط آزمایشگاه، بافت خاک و میانگین هندسی آن‌ها تعیین شد. سپس با قرار دادن میانگین هندسی نقاط نمونه‌برداری شده در رابطه (۱۲) مقدار عامل فرسایش‌پذیری برای هر نقطه، مجزا به دست آمد و در نهایت عامل فرسایش‌پذیری برای کل سطح حوضه پهنه‌بندی شد.

### عامل پوشش گیاهی (C): این عامل، بیانگر نسبت مقدار

خاک از بین رفته از زمین زیر کشت به خاک فرسوده شده از همان قطعه زمین در طی آیش مداوم و عاری از پوشش یا بقایای گیاهی است (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸). پرکاربردترین معیار برای برآورد عامل پوشش گیاهی، شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده<sup>۱</sup> (NDVI) است که با استفاده از رابطه (۱۳) به دست می‌آید. در تحقیق حاضر، ابتدا نقشه NDVI حوضه از تصویر ماهواره لندست ۸ سنجنده OLI<sup>۲</sup> با شماره ردیف و گذر به ترتیب ۱۶۴ و ۳۷ مربوط به تاریخ ۱۲ تیر ۱۳۹۴ تهیه شد، سپس با استفاده از رابطه ارائه شده توسط لین<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۲) عامل C برآورد شد (رابطه ۱۴).

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (13)$$

در این رابطه، NDVI شاخص پوشش گیاهی، NIR و RED به ترتیب بانده ۵ و بانده ۴ تصویر سنجنده OLI هستند.

$$C = (-NDVI + 1) / 2 \quad (14)$$

### عامل عملیات حفاظتی (P): عامل کارهای حفاظتی را

به عنوان مقدار خاک از بین رفته در واحد سطح یک زمین حفاظت شده، به زمینی که لخت باشد و در جهت تندترین شیب و شخم خورده باشد، تعریف کرده‌اند (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸). هرچه مقدار این عامل کمتر باشد، کارهای حفاظتی مؤثرتر و هدررفت خاک کمتر است. در تحقیق حاضر، با استفاده از نقشه کاربری اراضی و شیب منطقه، عامل پوشش گیاهی استخراج شد (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸).

1. Normalized Difference Vegetation Index
2. Operational Land Imager
3. Lin



R در منطقه مورد مطالعه از ۸۲ تا ۱۱۸  $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{y}^{-1}$  اساس روابط (۱۲) و (۱۳) تهیه گردید که در شکل (۲ پ) متغیر و نمایانگر تغییرات زیاد این فاکتور در منطقه مورد مطالعه است. نتایج حاصل از محاسبه میزان شاخص فرسایش پذیری برای نمونه‌های خاک با استفاده از رابطه (۱۱) در جدول (۲) ارائه شده است. بر اساس شکل (۲ ب) مقدار شاخص فرسایش پذیری خاک در منطقه مورد مطالعه از ۰/۰۰۳ تا ۰/۰۵  $\text{t MJ}^{-1} \text{mm}^{-1} \text{h}$  نقشه فاکتور پوشش گیاهی (C) بر RUSLE بین ۰/۰۰۳ تا ۱۶۷ به دست آمد (شکل ۲ ث و ج).

جدول (۲): محاسبه و برآورد F و R برای ایستگاه‌های بارندگی

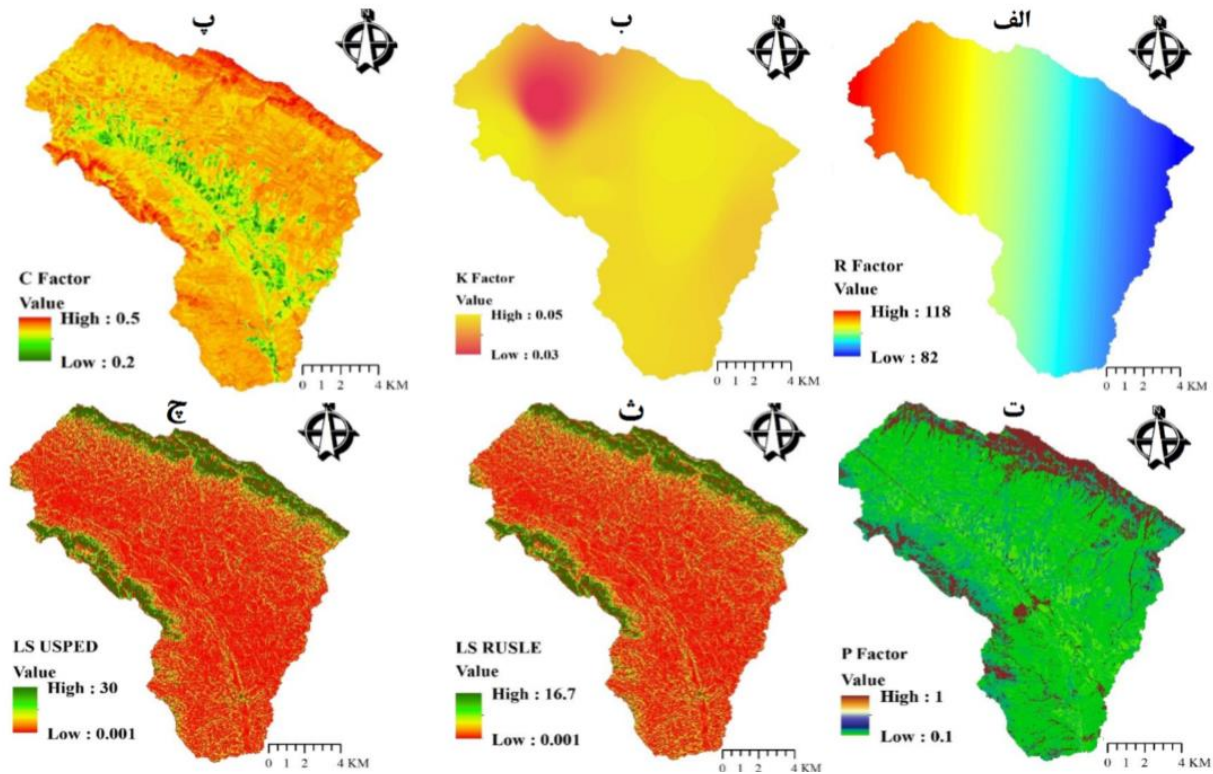
Table (2): Calculate and Estimate F and R for rainfall station

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m)	شاخص اصلاح شده فوریه	فاکتور فرسایش پذیری
حیدری	۵۰/۵۸	۳۲/۶۶	۲۲۰۴	۸۱/۵۲	۱۶۱
یانچشمه	۵۰/۷۲	۳۲/۶۶	۲۲۴۸	۶۶/۸۵	۱۰۵/۹
سد زاینده رود	۵۰/۶۸	۳۲/۷۱	۲۱۰۰	۴۴/۲	۴/۷
قلعه شاهرخ	۵۰/۴۴	۳۲/۶۶	۲۱۸۰	۶۸/۳۹	۱۱۱/۱۲
اسکندری	۵۰/۴۱	۳۲/۸۰	۲۱۳۰	۷۲/۸۵	۱۲۷
پل زمان خان	۵۰/۸۹	۳۲/۴۸	۱۸۱۰	۷۲/۰۹	۲۴/۲۳
سواران	۵۰/۳۸	۳۲/۸۶	۲۱۵۰	۷۴/۲۳	۱۳۲/۱۵
چادگان	۵۰/۶۳	۳۲/۷۶	۲۱۰۰	۶۱/۵۹	۸۹
سینگرد	۵۰/۴۳	۳۲/۷۸	۲۱۰۰	۷۱/۷	۱۲۲/۸۲
بادیجان	۵۰/۱۶	۳۲/۹۱	۲۳۰۰	۹۱/۱۳	۲۰۳/۶۶
فریدون شهر	۵۰/۰۹	۳۲/۹۳	۲۴۹۰	۹۵/۶۲	۲۲۵/۳۶
رزوه چادگان	۵۰/۵۴	۳۲/۸۳	۲۲۰۰	۶۸/۴	۱۱۱/۱۵
داران	۵۰/۴۱	۳۲/۹۸	۲۳۰۰	۵۹/۷۶	۸۳/۵
دامنه	۵۰/۴۸	۳۳/۰۱	۲۳۰۰	۶۷/۳۸	۱۰۷/۶۶

جدول (۳): میزان فاکتور فرسایش پذیری برای نقاط مورد بررسی

Table (3): The amount of erodibility factor for check points

نقاط	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	بافت خاک	میانگین هندسی قطر ذرات (mm)	فرسایش پذیری ( $\text{t h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$ )
۱	۵۰/۵۹	۳۲/۷۸	۳۹	۴۴	۱۷	لومی رسی سیلتی	۰/۰۱۶	۰/۰۵
۲	۵۰/۵۴	۳۲/۸۶	۳۳	۴۸	۱۹	رسی	۰/۰۱۲	۰/۰۵
۳	۵۰/۷۲	۳۲/۸۱	۲۸	۵۴	۱۸	لومی رسی سیلتی	۰/۰۱۹	۰/۰۵
۴	۵۰/۷	۳۲/۷۲	۳۹	۵۴	۷	لومی رسی سیلتی	۰/۰۰۸	۰/۰۳
۵	۵۰/۶۳	۳۲/۸۲	۱۷	۴۰	۴۳	رسی	۰/۰۱۱	۰/۰۴
۶	۵۰/۴۸	۳۲/۸۴	۳۲	۵۰	۱۸	لومی رسی سیلتی	۰/۰۱۸	۰/۰۵
۷	۵۰/۴۱	۳۲/۹۲	۳۰	۳۲	۳۸	لومی رسی	۰/۰۰۳	۰/۰۵
۸	۵۰/۵۴	۳۲/۸۵	۳۹	۴۶	۱۵	لومی رسی سیلتی	۰/۰۱۵	۰/۰۵
۹	۵۰/۷۴	۳۲/۸۴	۴۰	۳۶	۲۴	لومی رسی سیلتی	۰/۰۱۶	۰/۰۵
۱۰	۵۰/۵۴	۳۲/۸۳	۴۳	۳۸	۱۹	رسی / لومی رسی	۰/۰۱۳	۰/۰۵
۱۱	۵۰/۵۱	۳۲/۹	۲۵	۱۸	۵۷	لومی شنی	۰/۱	۰/۰۳
۱۲	۵۰/۵۹	۳۲/۸۴	۳۹	۴۲	۱۹	لومی رسی سیلتی	۰/۰۱۵	۰/۰۵
۱۳	۵۰/۷۴	۳۲/۸	۲۷	۴۳	۳۰	لومی رسی	۰/۰۰۳	۰/۰۵
۱۴	۵۰/۷۱	۳۲/۹۴	۳۶	۴۵	۱۹	لومی رسی سیلتی	۰/۰۱۷	۰/۰۵
۱۵	۵۰/۴۴	۳۲/۷۷	۲۴	۴۸	۲۸	لومی	۰/۰۰۲	۰/۰۵
۱۶	۵۰/۴۵	۳۲/۹۵	۳۴	۴۳	۲۳	لومی رسی	۰/۰۱۹	۰/۰۵
۱۷	۵۰/۴۸	۳۲/۸۱	۳۴	۵۴	۱۲	لومی رسی سیلتی	۰/۰۱۳	۰/۰۵
۱۸	۵۰/۴۸	۳۲/۸۱	۳۶	۴۶	۱۸	لومی رسی سیلتی	۰/۰۱۷	۰/۰۵
۱۹	۵۰/۴۳	۳۲/۹۴	۱۶	۳۷	۴۱	لومی	۰/۰۰۶	۰/۰۴
۲۰	۵۰/۴۳	۳۲/۹۳۷	۲۰	۳۹	۴۱	لومی	۰/۰۰۶	۰/۰۴



شکل (۲): الف. عامل فرساینده‌گی ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{y}^{-1} \text{h}^{-1}$ )، ب. عامل فرسایش‌پذیری ( $\text{t h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$ )، پ. عامل مدیریت پوشش گیاهی،

ت. عامل عملیات حفاظتی، ث. عامل توپوگرافی در مدل RUSLE، و ج. عامل توپوگرافی در مدل USPED

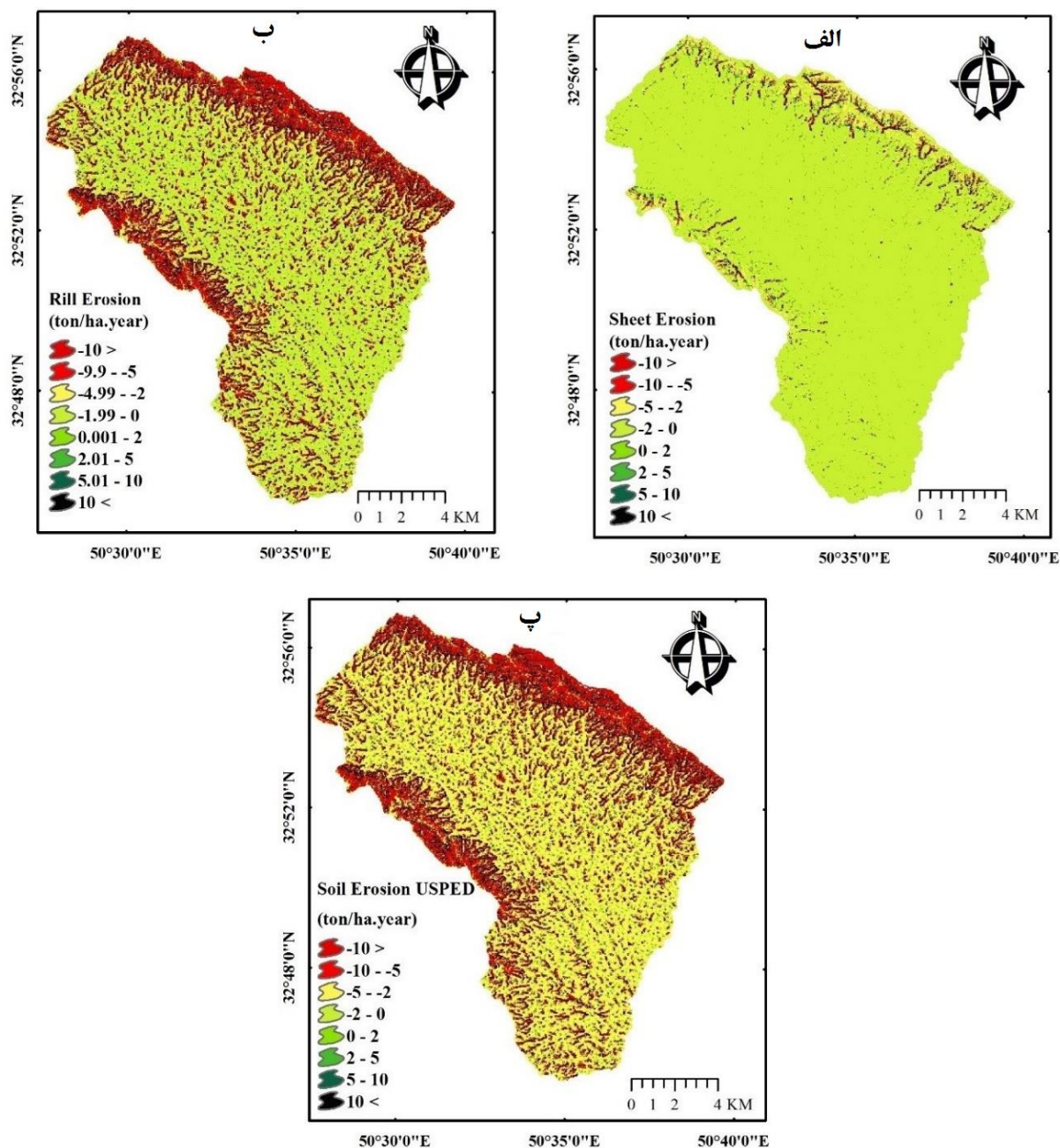
Figure (2): A. Erosivity factor ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{y}^{-1} \text{h}^{-1}$ ), B. Erodibility factor ( $\text{t h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$ ), P. vegetation management factor, T. Support practice factor, S. Topography factor in the RUSLE model, and G. Topography factor in the USPED model

فرسایش و رسوب‌گذاری سالانه برآورد گردید که نتیجه آن در شکل (۳ ج) آورده شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده کلاس فرسایش کم ۱۰/۸ درصد، کلاس فرسایش متوسط ۴۵ درصد، کلاس فرسایش شدید ۸ درصد و کلاس فرسایش خیلی شدید ۱۶/۳ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه را شامل می‌شود. همچنین کلاس رسوب‌گذاری کم ۴/۳ درصد، رسوب‌گذاری متوسط ۲/۹ درصد، رسوب‌گذاری شدید ۲/۵ درصد و رسوب‌گذاری خیلی شدید ۱۰ درصد از مساحت منطقه را به خود اختصاص می‌دهد. نتایج کلی نشان‌دهنده آن است که در ۸۰ درصد از سطح حوزه، فرسایش خاک اتفاق افتاده و در ۲۰ درصد مابقی سطح حوزه رسوب‌گذاری رخ داده است.

### ارزیابی فرسایش و رسوب بر اساس مدل USPED

نتایج حاصل از ارزیابی فرسایش سطحی و فرسایش شیاری بر اساس مدل USPED در شکل‌های (۳ الف، ب و پ) آورده شده است. نتایج حاصل برای منطقه مورد مطالعه در ۸ کلاس طبقه‌بندی و تفسیر گردید که در جدول (۴) آورده شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از ارزیابی فرسایش سطحی مشخص شد که در ۹۴ درصد از سطح حوزه عمل فرسایش سطحی و در ۶ درصد از مساحت، رسوب‌گذاری انجام می‌شود. نتایج حاصل از ارزیابی فرسایش شیاری نشان داد که ۸۰ درصد از سطح حوزه به‌وسیله فرسایش شیاری خاک هدر می‌رود و در ۲۰ درصد از مساحت حوزه به‌وسیله فرسایش شیاری رسوب‌گذاری انجام می‌شود. از ترکیب فرسایش سطحی و فرسایش شیاری در مدل USPED کل





شکل (۳): الف. فرسایش سطحی، ب. فرسایش شیاری، و پ. فرسایش و رسوب گذاری با مدل USPED

Figure (3): A. Sheet erosion, B. Rill erosion, and P. Erosion and Deposition with USPED model

جدول (۴): کلاس و درصد مساحت و فرسایش برحسب تن بر هکتار در سال

Table (4): Class and percentage of area and erosion per ton per hectare per year

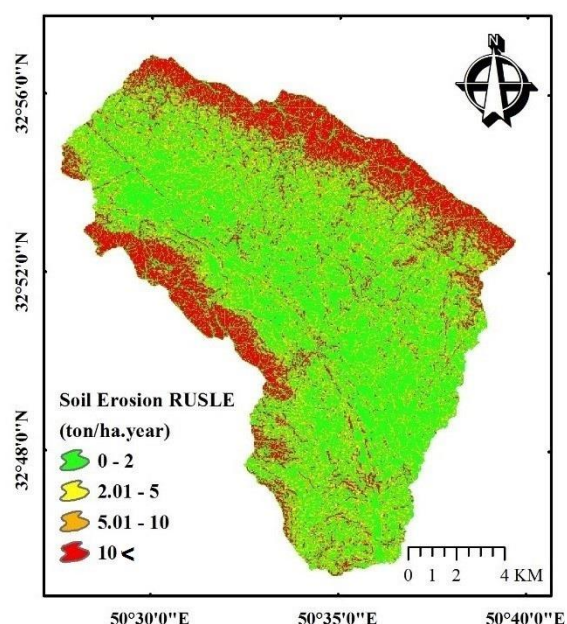
کلاس فرسایش	طبقه فرسایش	درصد مساحت	فرسایش سطحی	درصد مساحت	فرسایش شیاری	درصد مساحت	فرسایش سطحی و شیاری USPED	درصد مساحت
فرسایش خیلی شدید	< -10	0/8	فرسایش سطحی	0/8	فرسایش شیاری	15/55	فرسایش سطحی و شیاری USPED	16/3
فرسایش شدید	-10 تا -5	1/12	فرسایش سطحی	1/12	فرسایش شیاری	6/36	فرسایش سطحی و شیاری USPED	8
فرسایش متوسط	-5 تا -2	5/38	فرسایش سطحی	5/38	فرسایش شیاری	14/66	فرسایش سطحی و شیاری USPED	45
فرسایش کم	0 تا -2	86/71	فرسایش سطحی	86/71	فرسایش شیاری	43/7	فرسایش سطحی و شیاری USPED	10/8
رسوب گذاری کم	0 تا 2	3/3	فرسایش سطحی	3/3	فرسایش شیاری	4/35	فرسایش سطحی و شیاری USPED	4/3
رسوب گذاری متوسط	2 تا 5	1/25	فرسایش سطحی	1/25	فرسایش شیاری	2/91	فرسایش سطحی و شیاری USPED	2/9
رسوب گذاری شدید	5 تا 10	0/65	فرسایش سطحی	0/65	فرسایش شیاری	2/56	فرسایش سطحی و شیاری USPED	2/5
رسوب گذاری خیلی شدید	> 10	0/77	فرسایش سطحی	0/77	فرسایش شیاری	9/88	فرسایش سطحی و شیاری USPED	10

## ارزیابی فرسایش خاک بر اساس مدل RUSLE

## بحث و نتیجه گیری

نتایج حاصل از برآورد فرسایش خاک با مدل RUSLE در حوزه آبخیز مندرجان در شکل (۴) آورده شده است. کلاس و درصد مساحت هر کلاس فرسایش نیز در جدول (۳) آورده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، در ۵۵ درصد از مساحت منطقه، کلاس فرسایش کم (کمتر از ۲ تن بر هکتار در سال)، در ۱۳/۳ درصد از مساحت کلاس فرسایش متوسط (بین ۲ تا ۵ تن بر هکتار در سال) و در ۳۰ درصد از آن، کلاس فرسایش شدید و بسیار شدید (بیشتر از ۵ تن بر هکتار در سال) است.

در سال‌های اخیر، نقش فرسایش آبی در تخریب اراضی مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران افزایش یافته است (احمدی، ۲۰۰۶). تأثیر فرسایش سطحی و شیاری در هدررفت خاک و عناصر غذایی، به‌ویژه در اراضی کشاورزی بسیار قابل توجه است (مایر و بهارالدین، ۱۹۸۷). در منطقه مورد مطالعه، به‌خصوص در اراضی بایر، فرسایش خاک یک موضوع نگران‌کننده است. در تحقیق حاضر دو نوع فرسایش سطحی و فرسایش شیاری با استفاده از مدل USPED مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل (۲) و جدول (۱) ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده از ارزیابی فرسایش سطحی، مشخص شد که در ۹۲ درصد از سطح حوضه، عمل فرسایش سطحی در کلاس کم و متوسط و در ۱/۹۳ درصد از مساحت کلاس فرسایش شدید و خیلی شدید است. همچنین در ۴/۵۵ درصد از سطح منطقه رسوب‌گذاری، در کلاس کم و متوسط و در ۱/۴۲ درصد کلاس رسوب‌گذاری شدید و بسیار شدید است. بر اساس یافته‌های به دست آمده نتیجه‌گیری می‌شود که بیشترین سطح منطقه مورد مطالعه در کلاس‌های فرسایش و رسوب‌گذاری کم و متوسط قرار می‌گیرد (۹۶/۵ درصد از کل سطح منطقه). نتایج حاصل از بررسی فرسایش شیاری نشان می‌دهد که کلاس فرسایش شیاری کم و متوسط حدود ۵۷/۳۶ درصد و کلاس فرسایش شدید و خیلی شدید ۲۲ درصد از کل سطح منطقه را شامل می‌شود؛ همچنین رسوب‌گذاری کلاس‌های کم و متوسط در حدود ۷/۲ درصد و رسوب‌گذاری کلاس‌های شدید و بسیار شدید ۱۲/۴۴ درصد از کل منطقه را شامل می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که میزان فرسایش و رسوب‌گذاری خاک به وسیله فرسایش شیاری و آبراه‌های رخ می‌دهد، و این نوع فرسایش سهم بیشتری در انتقال خاک و رسوب‌گذاری آن نسبت به فرسایش سطحی دارد. تحقیق انجام‌شده توسط میلر و بهارالدین (۱۹۸۷) نشان داد که میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش شیاری، به مراتب بیشتر از فرسایش سطحی است؛ اما فرسایش سطحی



شکل (۴): فرسایش سالانه خاک بر اساس مدل RUSLE

Figure (4): Annual soil erosion based on RUSLE model

جدول (۵): مساحت هر کلاس فرسایش در مدل RUSLE

Table (5): The area of each erosion class based on RUSLE model

کلاس فرسایش	متوسط سالانه هدررفت خاک (تن در هکتار در سال)	درصد مساحت
فرسایش کم	۰ تا ۲	۵۵
فرسایش متوسط	۲ تا ۵	۱۳/۳
فرسایش زیاد	۵- تا ۱۰	۱۱/۵۱
فرسایش خیلی زیاد	بیشتر از ۱۰	۲۰/۱۵

تفاوت که مدل USPED علاوه بر مکان‌های فرسایش، محل‌های رسوب‌گذاری را نیز مشخص می‌کند. هر دو مدل نقاط مرتفع و شیب‌دار با خاک حساس را بحرانی‌ترین مکان‌ها از لحاظ ازدست‌رفتن خاک معرفی کردند که با مطالعات انجام‌گرفته توسط محمدی و همکاران (۲۰۱۶) بر روی منطقه مورد مطالعه در تحقیق حاضر همخوانی دارد. به‌طور کلی، مدل USPED را می‌توان یک ابزار مهم در برآورد پروسه رسوب‌گذاری، به‌ویژه در مقیاس حوضه‌ای عنوان کرد؛ زیرا هم به درک بیشتر روابط متغیرهای پیچیده درگیر و هم به‌دقت برآورد پدیده فرسایش خاک خالص کمک می‌کند. برآورد فرسایش خاک برای حوضه‌های بزرگ یک کار دشوار است. تحقیق حاضر امکان‌پذیر بودن نحوه برآورد و توزیع فضایی هدررفت خاک و همچنین وضعیت فرسایش / رسوب‌گذاری خالص خاک در حوزه آبخیز مندرجان را با استفاده از مدل‌های USPED و RUSLE نشان داد. استفاده از این دو مدل، منجر به درک بهتر پدیده فرسایش خاک شده و همچنین سبب بررسی اطلاعات مفیدی از منطقه مانند وضعیت آب‌وهوایی، توپوگرافی، پوشش و استفاده از زمین می‌شود که در تعامل با هم، سبب تخریب اراضی می‌شوند. در نهایت از طریق خروجی این مدل‌ها می‌توان نقشه‌های حساسیت منطقه به فرسایش خاک را به دست آورد تا از طریق آن‌ها با اولویت‌بندی و شناسایی مناطق حساس به فرسایش اقدام نمود. پس از شناسایی مناطق حساس با انجام عملیات آبخیزداری حفاظت خاک (مدیریتی، بیولوژیکی و مکانیکی) می‌توان مقدار فرسایش و رسوب تولیدی منطقه، و در نهایت هدررفت سالانه خاک را تا حد چشمگیری کاهش داد. این امر سبب کاهش ضررهای وارده به سیستم رودخانه‌ای و جلوگیری از انتقال سموم شیمیایی کشاورزی به سد زاینده‌رود، افزایش عمر مفید سد زاینده با کاهش رسوب ورودی، جلوگیری از کاهش حاصل‌خیزی خاک زمین‌های کشاورزی و در نهایت از وارد آمدن زیان‌های اجتماعی و اقتصادی بر آبخیزنشینان جلوگیری می‌شود.

سهم زیادی در انتقال ذرات ریز خاک به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک با پوشش اندک گیاهی دارد که با نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق حاضر هم‌سو می‌باشد. با ترکیب فرسایش سطحی و فرسایش شیاری در مدل USPED کل فرسایش و رسوب‌گذاری سالانه برآورد شد. بر اساس یافته‌های به‌دست‌آمده نتیجه‌گیری می‌شود که در بیشتر سطح حوضه، فرسایش خاک در حدود ۸۰ درصد از سطح منطقه رخ می‌دهد و رسوب‌گذاری فقط در ۲۰ درصد از سطح اتفاق می‌افتد. بر اساس نتایج بیشترین مقدار فرسایش خاک در شیب‌های شمالی و جنوب غربی رخ می‌دهد. همچنین بیشترین مقدار فرسایش شیاری در مناطق آبرفتی با شیب کم اتفاق می‌افتد. ذاکرنژاد و مارکر (۲۰۱۵)، دامیان و همکاران (۲۰۱۴) و لیه و همکاران (۲۰۱۳) و میتاسوا و همکاران (۱۹۹۶) در مطالعات خود به نتایج مشابه رسیدند و بیان کردند که مقدار سطحی از حوضه که هدررفت خاک در آن رخ می‌دهد، به‌مراتب بیشتر از سطحی است که در آن رسوب‌گذاری صورت می‌گیرد. بررسی نتایج حاصل از ارزیابی وضعیت فرسایش خاک با مدل RUSLE نشان داد که در ۵۵ درصد از مساحت منطقه، کلاس فرسایش کم در ۱۳/۳ درصد از مساحت منطقه کلاس فرسایش متوسط و در ۳۰ درصد از مساحت کلاس فرسایش شدید و بسیار شدید است. محمدی و همکاران (۲۰۱۷b) با استفاده از مدل CORINE، فرسایش خاک منطقه مورد مطالعه در تحقیق حاضر را مورد ارزیابی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که دامنه‌های مرتفع و شمالی حوضه، بیشترین خطر فرسایش خاک را دارند. همچنین در تحقیقی دیگر، محمدی و همکاران (۲۰۱۷a) با استفاده از مدل ICONA، فرسایش خاک را برای حوزه آبخیز مندرجان مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که در مناطق صخره‌ای و مرتفع حوضه، مقدار فرسایش خاک زیاد است و در قسمت‌های کم‌شیب که پوشش گیاهی مناسبی دارند، مقدار فرسایش خاک کاهش می‌یابد که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد. نتایج به‌دست‌آمده از ارزیابی فرسایش خاک با استفاده از دو مدل USPED و RUSLE تقریباً مشابه هم بوده با این

## منابع

1. Ahmadi, H., 2006. Applied Geomorphology: Volume1 water erosion. University of Tehran Press.
2. Aiello, A., Adamo, M., Canora, F., 2014. Modelling Spatially-Distributed Soil Erosion through Remotely-Sensed Data and GIS, International Conference on Computational Science and Its Applications. ICCSA 2014, pp. 372-385.
3. Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., Williams, J. R., 1988. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development1. Wiley Online Library.
4. Asadi, H., Honarmand, M., Vazifedoust, M., Moussavi, A., 2017. Assessment of Changes in Soil Erosion Risk Using RUSLE in Navrood Watershed, Iran. Journal of Agricultural Science and Technology. 19(1): 231-244.
5. Babaei, M., Hosseini, S. Z., Nazari Samani, A., Almodaresi, S. A., 2016. Assessment of soil erosion using RUSLE 3D, case study: Kan-Soleghan Watershed. Watershed Engineering and Management. 8(2): 165-181.
6. Damian, G., Năsu, D., Damian, F., Ciurte, D., 2014. Erosion Assessment Modeling Using the Sateec Gis Model on the Prislop Catchment. Present Environment and Sustainable Development. 8(1): 217-224.
7. Fathizad, H., Karimi, H., Alibakhshi, S. M., 2014. The estimation of erosion and sediment by using the RUSLE model and RS and GIS techniques (Case study: Arid and semi-arid regions of Doviraj, Ilam province, Iran). International Journal of Agriculture and Crop Sciences. 7(6): 304-314.
8. Flanagan, D., Nearing, M., 1995. USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation, NSERL report.
9. Leh, M., Bajwa, S., Chaubey, I., 2013. Impact of land use change on erosion risk: an integrated remote sensing, geographic information system and modeling methodology. Land Degradation & Development. 24(5): 409-421.
10. Lin, C.-Y., Lin, W.-T., Chou, W.C., 2002. Soil erosion prediction and sediment yield estimation: the Taiwan experience. Soil and Tillage Research. 68(2): 143-152.
11. Liu, J., Liu, S., Tieszen, L. L., Chen, M., 2007. Estimating soil erosion using the USPED model and consecutive remotely sensed land cover observations, Proceedings of the 2007 summer computer simulation conference. Society for Computer Simulation International, pp. 16.
12. Miller, W., Baharuddin, M., 1987. Interrill erodibility of highly weathered soils. Communications in Soil Science & Plant Analysis. 18(9): 933-945.
13. Millward, A. A., Mersey, J. E., 1999. Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed. Catena. 38(2): 109-129.
14. Mitsova, H., Barton, M., Ullah, I., Hofierka, J., Harmon, R., 2013. GIS-based soil erosion modeling, Treatise on Geomorphology. Elsevier Inc. (3): 228-258
15. Mitsova, H., Hofierka, J., Zlocha, M., Iverson, L. R., 1996. Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. International Journal of Geographical Information Systems. 10(5): 629-641.
16. Mitsova, H., Mitas, L., Brown, W., Johnston, D., 1998. Multidimensional soil erosion/deposition modeling and visualization using GIS. Final report for USA CERL. University of Illinois, Urbana-Champaign, IL. Available at: <http://www4.ncsu.edu/~hmitaso/gmslab/protected/hohen/hoh4.html> (visited 24 February 2018).
17. Mitsova, H., Mitas, L., Brown, W. M., Johnston, D. M., 1999. Terrain modeling and soil erosion simulations for Fort Hood and Fort Polk test areas. Geographic Modeling and Systems Laboratory, University of Illinois at Urbana-Champaign. Available at: <http://www4.ncsu.edu/~hmitaso/gmslab/reports/CerlErosionTutorial/denix/Advanced/ErosionRep99/cerl99/rep99.html> (visited 24 February 2018).
18. Mitsova, H., Mitas, L., M. Brown, W., M. Johnston, D., 2003. Terrain Modeling and Soil Erosion Simulation Final Report, University of Illinois, Urbana-Champaign, IL.
19. Mohammadi, Sh., 2016. Estimating of erosion and sediment in the Menderjan watershed by RS and GIS. M.Sc. thesis, isfahan university of technology. 107 pp.
20. Mohammadi, S., Karimzadeh, H. R., Habashi, K., 2017. Soil erosion assessment using ICONA model (case study: the Zayandehroud basin, Menderjan sub-basin), The 1st International Conference Of



- SilkGIS, 24-26 May, Isfahan University of Technology, Esfahahan, Iran.
21. Mohammadi, S., Karimzadeh, H. R., Habashi, K., 2017. Soil erosion assessment using CORIN model (case study: the Zayandehroud basin, Menderjan sub-basin), The 1st International Conference Of SilkGIS, 24-26 May, Isfahan University of Technology, Esfahahan, Iran.
  22. Moore, I. D., Burch, G. J., 1986. Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Science Society of America Journal*. 50(5): 1294-1299.<sup>^</sup>
  23. Nohegar, A., Kazemi, M., 2013. Assessment Water Erosion Using ICONA Model (case study: Tang Bostanak Basin). *Journal of Geographical Research*. 28(4): 1-14.
  24. Pistocchi, A., Cassani, G., Zani, O., 2002. Use of the USPED model for mapping soil erosion and managing best land conservation practices. 1st International Congress on Environmental Modelling and Software - Lugano, Switzerland - June 2002.
  25. Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G., Mccool, D., Yoder, D., 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 Washington. USA.
  26. 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): 287-306.
  27. Rezaei, P., Faridi, P., Ghorbani, M., Kazemi, M., 2014. Estimation of Soil Erosion Using the RUSLE Model and Identification of the Most Effective factor in the Gabrice Basin - Hormozgan Province. *Quantitative Geomorphological Researches*. 3(1): 97-113.
  28. Shirazi, M. A., Boersma, L., 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of America Journal*. 48(1), 142-147.
  29. Teng, H., Rossel, R. a. V., Shi, Z., Behrens, T., Chappell, A., Bui, E., 2016. Assimilating satellite imagery and visible-near infrared spectroscopy to model and map soil loss by water erosion in Australia. *Environmental Modelling & Software*. 7(7), 156-167.
  30. Veihe, A., 2002. The spatial variability of erodibility and its relation to soil types: a study from northern Ghana. *Geoderma*. 106(1): 101-120.
  31. Wischmeier, W. H., Smith, D. D., 1978. Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning. Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning. USDA, Hyattsville, Maryland, USA.
  32. Zakerinejad, R., Maerker, M., 2015. An integrated assessment of soil erosion dynamics with special emphasis on gully erosion in the Mazayjan basin, southwestern Iran. *Natural Hazards*. 79(1): 25-50.

## Assessment Soil Erosion and Deposition in the Menderjan Watershed Using USPED and RUSLE Models in the Environment of Geographical Information System (GIS)

Shahin Mohammadi<sup>\*</sup>, Hamidreza Karimzadeh<sup>†</sup>, Khalil Habashi<sup>‡</sup>

Received: 02/12/2017

Accepted: 24/02/2018

### Introduction

Water erosion is one of the most important factors in land degradation in large parts of Iran as it destroys fertile soils and agricultural lands. The impact of soil erosion and related sediments decreases significantly to water quality and reservoir capacity. In semiarid areas like the Menderjan watershed in the west Isfahan province, sheet and rill erosion contributes to the sediment dynamics in a significant way. Particularly, sheet and rill

1. Ph.D. Student, Department of Remote Sensing and Geographical Information System, Faculty of Earth sciences, Shahid chamran University of ahwaz; shahin\_mohammadi70@yahoo.com

2. Assis prof, Department of Range and Watershed managment, Faculty of Natural Resource, Isfahan University of Technology

3. Graduated MSc of Combat to Desertification, Faculty of Natural Resource, Isfahan University of Technology

erosion processes and related morphologies and features are very common in this region. Hence, this study is aimed at identifying and quantifying the major erosion process dynamics. Therefore, we applied an integrated approach combining the USPED and RUSLE models with data mining, remote sensing, and GIS methods.

### Materials and methods

The study area is Menderjan watershed located at east of Isfahan Province of Iran and has an area of about 21,100 hectares. In this study, the USPED and RUSLE were used to evaluate the effects of water erosion. The USPED model is based on the assumption that soil erosion depends on the detachment capacity and the sediment transport capacity of surface runoff. However, the USPED models do not consider the sediment yields from gullies, stream banks, and streambed erosion. In the USPED model, on the other hand, erosion and deposition (ED) are computed as the change in sediment flow in the direction of flow.

$$ED = d \times (T \times \cos a) / dx + d \times (T \times \sin a) / dy$$

where  $a$  is the aspect of the terrain surface,  $dx$ ,  $dy$  is the grid resolution, and  $T$  is the sediment flow at transport capacity. ED can be positive, indicating soil deposition, or negative, indicating soil erosion. Transport capacity ( $A$ ) is expressed as:

$$A = R \times K \times C \times P \times L^{m \times (\sin S)^n}$$

where  $A$  is average yearly soil erosion ( $t \text{ ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ ),  $R$  is annual rainfall erosivity factor ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ year}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ),  $K$  is the soil edibility factor,  $LS$  is slope length and steepness factor,  $C$  is cover management factor,  $P$  is support practice factor,  $S$  is the slope,  $L$  is the upslope contributing area, and  $m$  and  $n$  are constants. For prevailing rill erosion  $m = 1.6$  and  $n = 1.3$ , while for prevailing sheet erosion,  $m = n = 1$ . The USPED and RUSLE model was applied using Arcmap10. In this study, the Landsat satellite images 8 (OLI) and rainfall data, soil properties, and digital elevation model (DEM) were used. Here, GIS plays a major role in preparing thematic layers and estimating soil erosion.

### Result

The range of obtained R factor values range was from 82 to 118 MJ mm/ ha h year. The average values for the Menderjan watershed amount to 265.2 MJ mm/ ha year-1. According to the soil laboratory analysis, soil texture is dominated by silt clay loam and clay loam and thus is highly susceptible to soil erosion. The amount of organic matter in all samples was 2%. Soil organic matter reduces the erodibility of soil. In many arid and semiarid areas soil organic matter is low due to scarce vegetation and, hence, the soil is more susceptible to erosion. The annual average soil erodibility of this basin is 0.04 ( $t \text{ h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ). The amounts of topography for RUSLE, USPED, support practice factor, and C factor vary from 0.001 to 16.7, 0.01 to 30, 0.1 to 1, and 0.2 to 0.5, respectively. According to the obtained results, more than 35% of the area is affected by a high to very high erosion and deposition process intensities. The stable areas, low erosion, and deposition zones cover about 15% of the area. However, some of the mapped and predicted sheet and rill processes are located in the stable and low-intensity soil erosion classes. The extreme values are characterized by steep slopes in ridge positions in the northern and southern parts of the watershed.

### Discussion and Conclusions

During recent years, the role of water erosion as one of the land degradation factors in arid and semi-arid areas of large parts of Iran has increased. In this study, we applied a combined approach using the RUSLE and USPED models rill/inter-rill (sheet) erosion processes and deposition processes. To the best of our knowledge, this study is the first attempt to integrate different erosion processes and deposition dynamics in Iran. In the study area, soil loss is concentrated especially in the abandoned bare land areas. The protection of bare soil to reduce soil loss should be ensured by appropriate cultivations. According to the results, a large part of severe erosion occurs in the steep areas in the north and southwest of the study area. Agricultural cultivations may change the land cover, leading to poorer vegetation cover or bare land, especially after harvest and thus increase erosion processes and land degradation. Therefore, control of soil erosion targeted to the area not only reduces direct costs of soil erosion but also diminishes the implementation costs of control operations for decreasing soil erosion.

**Keywords:** Soil Erosion, Modeling, Deposition, Remote Sensing (RS), Esfahan.