

## بررسی کاربرد GIS برای تخمین فرسایش خاک و بار رسوب با استفاده از مدل RUSLE (مطالعه موردی: حوضه قلعه‌چای)

احمد انصاری لاری (استادیار ژئومورفولوژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لارستان، لارستان، ایران)

ansari\_ul@yahoo.com

مریم انصاری (دانشجوی دکتری مخاطرات ژئومورفولوژیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، نویسنده مسئول)

ansarimaryam149@gmail.com

صص ۱۷۳ - ۱۵۵

### چکیده

**اهداف:** در این پژوهش به بررسی میزان فرسایش خاک و بار رسوب حوضه آبریز قلعه‌چای با استفاده از مدل تجربی RUSLE در محیط GIS پرداخته شده است. **روش:** برای دست یافتن به هدف تحقیق، از مدل تجربی RUSLE در محیط GIS که شامل عامل فرساینده باران، عامل فرسایش‌پذیری خاک، عامل توپوگرافی و پوشش گیاهی است، استفاده شد و اسناد و مدارک مختلفی، از جمله نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، خاک‌شناسی، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، آمارهای مختلف مربوط به ایستگاه‌های باران‌سنجی و مدل ارتفاعی رقومی به‌عنوان ابزار تحقیق مورد استفاده قرار گرفت.

**یافته‌ها/ نتایج:** نتایج و رسوب کل برآورد شده در روش USDA، قابلیت تلفیق مدل RUSLE و GIS را در برآورد میزان فرسایش و بار رسوب نشان می‌دهد. **نتیجه‌گیری:** بررسی نقشه خطر فرسایش خاک نشان می‌دهد که میزان خطر فرسایش خاک در سطح دشت، از صفر تا ۲/۲۲۵ برحسب تن در هکتار در سال متغیر است و منطقه مورد مطالعه، جزو طبقه فرسایشی خیلی کم تا کم قرار داشت و حداکثر بار رسوب ۰/۶۴ تن در هکتار در سال برآورد شد.

**کلیدواژه‌ها:** فرسایش خاک، مدل RUSLE، حوضه آبریز قلعه‌چای، سیستم

اطلاعات جغرافیایی

## ۱. مقدمه

امروزه کمتر منطقه‌ای را در سطح زمین می‌توان یافت که در معرض تخریب و فرسایش قرار نگرفته باشد و البته عامل اصلی آن، افزایش جمعیت و استفاده بیش از حد از زمین است (احمدی، ۱۳۸۸، ص. ۱۹۵). شدت فرسایش و وسعت آن در زمان‌ها و مکان‌های مختلف یکسان نبوده است و به شرایط طبیعی پستی و بلندی، خصوصیات خاک‌ها و چگونگی کاربری زمین مربوط می‌شود (شکوری، ۱۳۷۴، ص. ۵۶). پدیده فرسایش خاک و تولید رسوب برای جامعه بشری مشکلات زیادی را به وجود آورده؛ به طوری که امروز فرسایش خاک یکی از جدی‌ترین مشکلات کشورهای در حال توسعه و بسیاری از کشورهای توسعه یافته است. برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی فرسایش ناشی از اعمال مدیریت نادرست در استفاده از اراضی، نیاز به اتخاذ تدابیری در مقیاس‌های مزرعه و حوضه آبخیز است. اگرچه متوقف کردن فرسایش زمین‌شناسی امکان‌پذیر نیست، ولی پیشگیری و مهار فرسایش خاک در گستره حوضه‌های آبخیز و در چهارچوب طرح‌های بهره‌برداری از آب و خاک و آبخیزداری یک نیاز اساسی است. بهینه‌سازی مدیریت خاک و بهره‌برداری از این منبع در گستره حوضه‌ها یکی از راه‌های مناسب در تحقق حفاظت از خاک است (خیام، غنمی جابر، و صمدزاده، ۱۳۹۲، ص. ۲). حوضه آبریز قلعه‌چای به دلیل پوشیده شدن با آبرفت‌های رودخانه قلعه‌چای، خاک مناسب و آب نسبتاً کافی و شرایط زیست‌محیطی مناسب باعث جایگزینی مراکز انسانی متعدد گردیده که بررسی وضعیت فرسایش را در این منطقه، اجتناب‌ناپذیر ساخته است و تهیه نقشه شدت فرسایش امری ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین هدف این پژوهش، مدل‌سازی میزان فرسایش خاک و بار رسوب حوضه آبریز قلعه‌چای از طریق مدل RUSLE با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی<sup>۱</sup> و همچنین شناسایی مناطق حساس به فرسایش جهت اجرای عملیات حفاظتی آب و خاک است.

## ۲. پیشینه تحقیق

به دلیل اینکه سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنسج از دور<sup>۲</sup> امکان تجزیه و تحلیل داده‌های مکانی را فراهم می‌آورد (آرخی و نیازی، ۱۳۸۹، ص. ۳)، مطالعات گسترده‌ای در جهان و ایران

1. Geographic Information System (GIS)

2. Remote Sensing (RS)

در خصوص مدل RUSLE در محیط GIS صورت گرفته است. به عنوان مثال، می توان به پژوهش های: تیواری ریس و نیرینگ<sup>۱</sup> (۲۰۰۰) در ۲۰ نقطه در ایالات متحده آمریکا، وانگ آندرسون<sup>۲</sup> (۲۰۰۳) در یک حوضه استوایی از رشته کوه های آند در کلمبیا، مارکر<sup>۳</sup> (۲۰۰۶) جنوب توسکانی در ایتالیا، بونیا، ریس، و مگری<sup>۴</sup> (۲۰۱۰) در شیلی مرکزی، فرهان، دلال، و فرهان<sup>۵</sup> (۲۰۱۳) در حوضه کوفرانجا در شمال اردن، کاروالیو، دوریگن، آنتونز، آلمیدیا، و اولیویرا<sup>۶</sup> (۲۰۱۴) در حوضه ای در جنوب برزیل، آرخی و نیازی (۱۳۸۹) در حوضه بالادست سد ایلام، واعظی، بهرامی، صادقی، و مهدیان (۱۳۸۹) شمال شهرستان هشتگرد در استان آذربایجان شرقی، زندی، سلیمانی، حبیب نژاد، و روشن (۱۳۹۲) حوضه وازرود در استان مازندران، رحیمی و مزبانی (۱۳۹۲) حوضه آبریز سیوند، رضائی، فریدی، قربانی، و کاظمی (۱۳۹۳) حوضه آبریز گابریک در جنوب خاوری استان هرمزگان، رخبین، نوحه گر، کمالی، و حبیب اللهیان (۱۳۹۳) حوضه لاورفین استان هرمزگان و... اشاره کرد.

در حوضه آبریز قلعه چای، روستایی، رسولی، و احمدزاده (۱۳۸۹) با استفاده از مدل تجربی MPSIAC تکنیک های سنجش از دور و GIS در بالادست سد قلعه چای با مساحتی در حدود ۲۴۹/۵ کیلومتر مربع فرسایش و رسوب حوضه آبریز را محاسبه کردند که نتایج نشان می دهد سالانه در حدود ۱۳۳۰۱۶ تن در سال، از خاک حوضه فرسایش می یابد.

### ۳. روش شناسی تحقیق

#### ۳.۱. روش تحقیق

در این روش پژوهش، از نقشه های توپوگرافی ۱/۵۰۰۰۰ هرگلان برگ شماره III ۵۲۶۵، شیرامین برگ شماره II ۵۱۶۵، مراغه برگ شماره IV ۵۲۶۴ و عجب شیر برگ شماره I ۵۱۶۴ جهت انجام تحلیل های توپوگرافی، بررسی شیب دامنه ها و شبکه هیدروگرافی، سطوح ارتفاعی و تحلیل های کمی و از نقشه های ۱/۱۰۰۰۰۰ برگ های آذرشهر، اسکو، عجب شیر و مراغه برای چینه شناسی، لیتولوژی، ماهیت مواد، ساختمان زمین شناسی، مراحل تکوین و نیز از

1. Tiwari, Riss, Nearing
2. Wang, Gertner, Fang, & Anderson
3. Marker
4. Bonilla, Reyes, Magri
5. Farhan, Dalal, Farhan
6. Carvalho, Durigon, Antunes, Almeida, Oliveira

آمار ۱۱ سال بارندگی ایستگاه‌های هواشناسی اطراف محدوده حوضه، تصاویر ماهواره‌ای و نرم‌افزار ARC GIS 10.2 و مدل فرسایش خاک RUSLE برای برآورد میزان هدررفت خاک استفاده شد.

مدل RUSLE یک مدل برآورد فرسایش آبی است که با شش عامل زیر رابطه دارد (ویشمایر و اسمیت<sup>۱</sup>، ۱۹۷۸، ص. ۴):

$$A = R.K.L.S.C.P \quad \text{رابطه ۱}$$

A: میانگین فرسایش خاک در واحد سطح (تن در هکتار)، R: عامل فرساینده‌گی باران ( $MJ \text{ mm ha}^{-1}$ )  
 K: عامل فرسایش‌پذیری خاک ( $h^{-1} y^{-1}$ )، L: عامل طول شیب؛ S: عامل درجه شیب، C: عامل پوشش گیاهی و P: عامل اقدامات حفاظتی است. مقادیر S، C، L و P بدون واحد هستند.

### ۳.۱.۱. عامل فرساینده‌گی باران (R)

این عامل بیانگر فاکتور فرسایش‌دهندگی باران یا معیار فرسایش برای مدت بارندگی مورد نظر است و قدرت فرسایش یک باران مشخص را تعیین می‌کند که این شاخص (EI<sub>30</sub>) از ترکیب انرژی جنبشی باران (E) و بیشترین شدت بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای منطقه (I<sub>30</sub>) به دست می‌آید (صالحی، اسفندیارپور بروجنی، مهاجر، و باقری بداع‌آبادی، ۱۳۹۴، ص. ۶۶). برای مناطقی که جزئیات داده‌های اقلیمی وجود ندارد، R را می‌توان با استفاده از اصلاح‌شده شاخص فورنیر تخمین زد (هوی، یولینگ، یانگ، و ساگونگ<sup>۲</sup>، ۲۰۱۰، ص. ۹۴۴). رابطه شاخص فورنیر F به صورت زیر (رابطه ۲) است.

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

در اینجا P<sub>i</sub> متوسط بارندگی ماهانه (میلی‌متر) و P متوسط بارندگی سالانه (میلی‌متر) است. سپس با جای‌گذاری شاخص فورنیر در روابط زیر (رابطه ۳ و ۴) که توسط رنارد و فریموند (۱۹۹۴) برای مناطق فاقد داده‌های تفصیلی رگبار (شدت بارندگی) پیشنهاد شده است، مقدار فاکتور R برای ایستگاه‌ها برآورد می‌شود.

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

$$R\text{-Factor} = (95.77 - 6.081 \times F + 0.4770 \times F^2) / 17.2 \quad F \geq 55 \text{ mm} \quad \text{رابطه ۴}$$

1. Wischmeier, Smith  
 2. Hui, Xiaoling, Kyoung, Sagong

### ۳.۱.۲. عامل حفاظت خاک (P)

عامل مربوط به عملیات حفاظت خاک که در آن، میزان خاک فرسایش یافته از منطقه با کشت نواری و بر روی خطوط تراز یا تراس بندی شده به خاک ازدست رفته با کشت خطی در جهت شیب (از بالا با پایین) است (صالحی، ۱۳۸۸، ص. ۵۰۹). چنانچه هیچ کار حفاظتی صورت نگرفته باشد، مقدار آن یک در نظر گرفته می شود. در بعضی مواقع در صورت نبود اطلاعات کافی در مورد نحوه مدیریت اراضی، از معادله حذف می شود.

### ۳.۱.۳. عامل فرسایش پذیری خاک (K)

عامل فرسایش پذیری در مدل **RUSLE** را می توان از طریق منحنی های مربوطه تعیین کرد. مورگان برای ضریب فرسایش پذیری (K) خاک های مختلف اعدادی را پیشنهاد کرده است که در جدول (۱) نشان داده شده است (احمدی، ۱۳۸۸، ص. ۵۰۷).

#### جدول ۱- فرسایش پذیری خاک (K)

مأخذ: احمدی، ۱۳۸۸، ص. ۵۰۷

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

### ۳.۱.۴. عامل طول شیب (L) و درجه شیب (S)

فاکتورهای **L** و **S** در مدل **RUSLE** بیانگر تأثیر توپوگرافی بر روی فرسایش خاک است. ثابت شده است که افزایش در طول شیب و درجه شیب می تواند سرعت جریان آب را در سطح زمین افزایش دهد و باعث تشدید فرسایش خاک شود (هان، بارفیلد، هایس، ۱۹۹۴، ص. ۲۴۶). به طور کلی می توان هر یک از عوامل طول شیب و درجه شیب را با هم در نظر گرفت که آن را با علامت **LS** نشان می دهند (رحیمی و مزبانی، ۱۳۹۲، ص. ۸). برای به دست آوردن ضریب **LS** از فرمول زیر در محیط **Raster Calculator** استفاده می نمایم. در این فرمول، **S** درصد شیب زمین است که عامل درجه

شیب (S) از طریق فرمول زیر محاسبه می‌شود (صالحی، اسفندیارپور بروجنی، مهاجر، و باقری بداغ آبادی، ۱۳۹۴، ص. ۵۸).

$$LS = \frac{\sqrt{L}}{22.13} (0.065 + 0.045 * S + 0.0065 * S^2) \quad (\text{رابطه ۵})$$

که L طول شیب بر حسب متر و S درجه شیب زمین است (احمدی، ۱۳۸۸، ص. ۵۱۰).

### ۳. ۱. ۵. عامل پوشش گیاهی (C)

عامل مربوط به عملیات زراعی و رسوبات تولیدشده در منطقه‌ای با پوشش گیاهی مشخص نسبت به پلات استاندارد است. مورگان ضریب C را منحصر به پوشش گیاهی دانسته و مقدار آن در جدول (۲) بیان شده است (احمدی، ۱۳۸۸، ص. ۵۱۰).

جدول ۲- تعیین ضریب C از روی پوشش گیاهی در معادله جهانی فرسایش خاک

مأخذ: احمدی، ۱۳۸۸، ص. ۵۱۰

وضعیت پوشش گیاهی	میزان	وضعیت پوشش گیاهی	میزان
خیلی خوب	۰/۰۴	فقیر	۰/۲۵
خوب	۰/۰۹	بسیار فقیر	۰/۳۳
نسبتاً خوب	۰/۱۵	فاقد پوشش گیاهی	۰/۴۵
نسبتاً فقیر	۰/۲۰	-	-

از طرفی، باید نسبت تحویل رسوب SDR برای منطقه مورد نظر جهت برآورد میزان رسوب انتقالی به خروجی‌های منطقه محاسبه گردد (لیم، مایونگ، انجل، تانگ، چوی، کیم، ۲۰۰۵، ص. ۶۷). در این مطالعه از سه روش براساس مساحت USDA 1975، بویس ۱۹۷۵ و وانونی ۱۹۷۵ استفاده شده است (رابطه ۶، ۷، ۸).

$$\text{رابطه ۶ (رابطه USDA)} \quad SDR = 0.5656A^{-0.11}$$

$$\text{رابطه ۷ (رابطه بویس)} \quad SDR = 0.4724A^{-0.125}$$

$$\text{رابطه ۸ (رابطه وانونی)} \quad SDR = 0.3750A^{-0.2382}$$

در سه معادله فوق، A مساحت حوضه به کیلومتر مربع است.

## ۳.۲. منطقه مورد مطالعه

حوضه قلعه‌چای یکی از زیرحوضه‌های دریاچه ارومیه است که در شرق این دریاچه واقع شده است. این حوضه از شمال به حوضه گنبرچای (آذرشهرچای)، از شرق و جنوب به حوضه صوفی‌چای (مراغه) و چوان‌چای و از غرب به دریاچه ارومیه محدود می‌شود. این حوضه با مساحتی بالغ بر ۴۷۴ کیلومتر مربع در استان آذربایجان شرقی و در شمال‌غربی شهرستان عجب‌شیر قرار گرفته که از نظر موقعیت جغرافیایی بین "۳۶' ۵۴" الی "۵۹' ۱۹" طول شرقی و "۲۴' ۳۷" الی "۲۸' ۴۲" عرض شمالی واقع شده است. حداکثر ارتفاع حوضه کوه میدان‌داغ با ارتفاع ۳۴۱۲ متر است که سرچشمه حوضه در آن قرار دارد و حداقل ارتفاع آن ۱۲۷۴ متر در کنار روستای خانیان و گل‌تپه است (شکل ۱).

مهم‌ترین رودخانه جاری در سطح منطقه، رودخانه قلعه‌چای است. سرشاخه‌های اصلی این رودخانه شامل قلعه‌چای، ینگجه، مهماندار، چهاربرود و آملو چای هستند که همگی از ارتفاعات سهند سرچشمه گرفته و در دو کیلومتری غرب آبادی صور به هم ملحق شده و رودخانه قلعه‌چای را تشکیل می‌دهند. رودخانه قلعه‌چای در اراضی مخروط‌افکنه‌ای خانیان و گل‌تپه واقع در شمال عجب‌شیر وارد دشت شده و به سه شاخه تبدیل شده و در نهایت به دریاچه ارومیه ملحق می‌گردد. منطقه موردنظر از نظر توپوگرافی، دارای دو واحد کوهستان و دشت است که توسط رودخانه قلعه‌چای زهکشی می‌شود. از نظر زمین‌شناختی، منطقه دارای توالی چینه‌شناسی قابل توجهی است و اغلب واحدهای چینه‌شناسی از قدیم به جدید در منطقه دیده می‌شود. بررسی توزیع جغرافیایی سنگ‌های برونزد یافته در منطقه مشخص می‌کند که ۶۶ درصد آنها عمدتاً مربوط به سنگ‌های مقاوم و آتشفشانی و ۱۴ درصد مربوط به سنگ‌های نیمه‌مقاوم هستند. ارتفاع متوسط محدوده مورد مطالعه، ۲۰۱۷ متر و شیب متوسط آن در حدود ۲۵/۰۵ درصد است. دبی متوسط دوره آماری حوضه، برابر ۲/۱۷ متر مکعب در ثانیه می‌باشد که متأثر از اقلیم نیمه‌خشک کوهستانی محدوده مورد مطالعه است (روستایی، رسولی، و احمدزاده، ۱۳۸۹، ص. ۱۶۰).

در این پژوهش جهت تفکیک واحدهای هیدرولوژی حوضه با استفاده از DEM منطقه و اکستنشن Arc Hydro در محیط GIS، پنج واحد هیدرولوژی<sup>۱</sup> برای حوضه مورد مطالعه

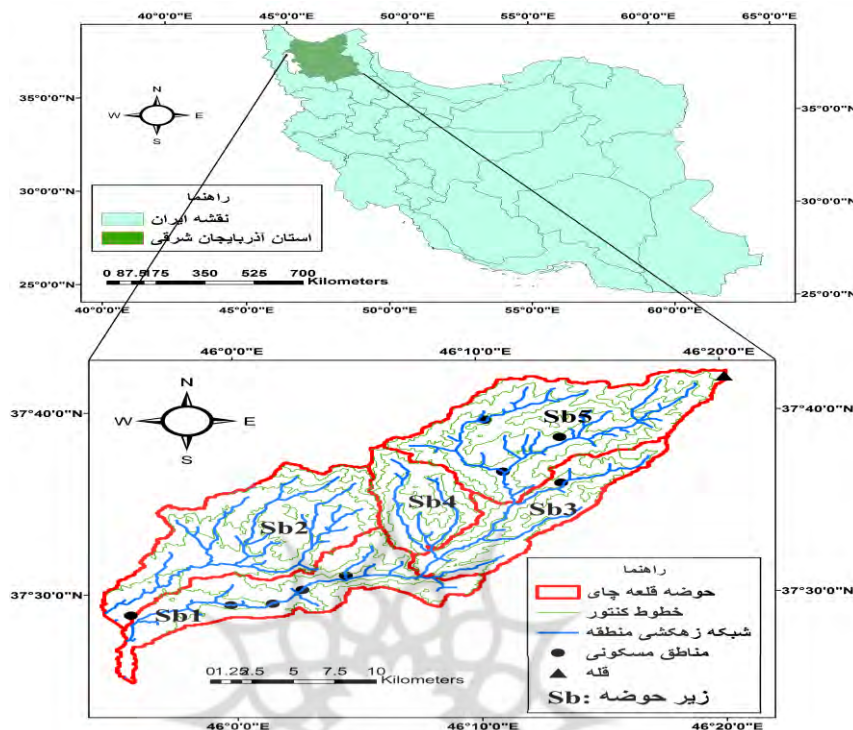
تعیین گردید (بر روی نقشه و در جدول‌ها با علامت اختصاری Sb نشان داده شده است) و هریک از فاکتورهای مدل مورد استفاده برای زیرحوضه‌ها محاسبه شد.

#### ۴. مبانی نظری تحقیق

یکی از مشکلات مطالعات فرسایش و رسوب، کمبود آمار و اطلاعات مورد نیاز است. این مسئله در کشورهای در حال توسعه شدیدتر بوده و کشور ما ایران از جمله کشورهای است که با این معضل روبه‌رو است. بنابراین به دلیل پیچیدگی فرایندها و کمبود آمار مناسب و فقدان ایستگاه‌های اندازه‌گیری و به منظور سهولت کار، اغلب مطالعات فرسایش و رسوب کشور با استفاده از روش‌های تجربی انجام می‌گیرد (قضاوتی، ولی، مقامی، عبدی، و شرفی، ۱۳۹۱، ص. ۱۱۸). بنابراین تحلیل و برآورد میزان فرسایش و رسوب و تهیه نقشه‌های شدت فرسایش، بررسی عوامل ایجاد فرسایش و ارائه راهکارهای مدیریتی، با توجه به روند فزاینده فرسایش خاک و مساحت وسیع اراضی و گاهی حتی صعب‌العبور بودن یا عدم دسترسی به منطقه، استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی را ضروری می‌نماید (شرستا، ۲۰۰۱، ص. ۲). معادله جهانی فرسایش خاک RUSLE در سال ۱۹۴۷ ارائه شد و بعداً به وسیله ویشمایر به کار گرفته شد و تکامل یافت. در این معادله، بر مجموع انرژی بارندگی برای محاسبه شدت فرسایش حاصل از انواع فرسایش سطحی و شیاری تأکید شده است (احمدی، ۱۳۸۸، ص. ۵۰۶).

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی  
پرتال جامع علوم انسانی





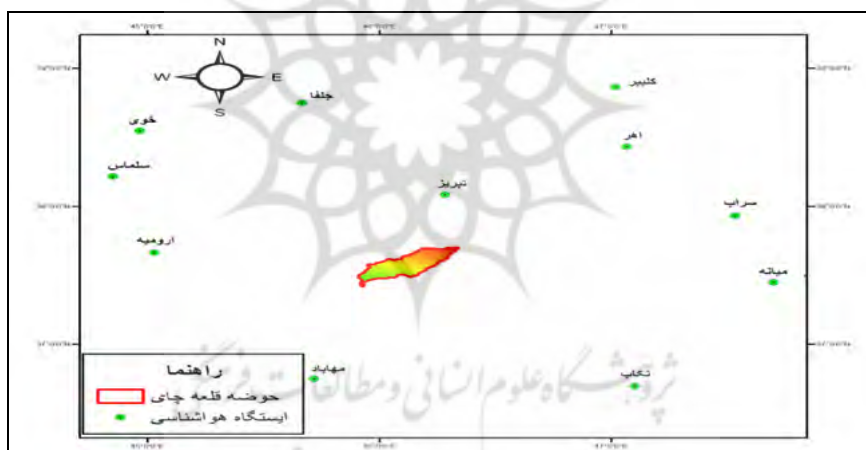
شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز قلعه چای

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

## ۵. بحث و تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای محاسبه فاکتور R (فرساینده‌گی باران) پس از تعیین ایستگاه‌های اطراف منطقه مورد نظر، بارندگی ماهانه و سالیانه در این ایستگاه‌ها بازسازی شد. شکل (۲) موقعیت ۱۱ ایستگاه مورد استفاده واقع شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. در مرحله بعد با استفاده از رابطه (۲)، شاخص فورنیر برای ایستگاه‌ها تخمین زده شد. سپس با جای‌گذاری شاخص فورنیر در رابطه (۳) و (۴)، مقدار فاکتور R برای ایستگاه‌ها برآورد شد. مقادیر محاسبه شده در جدول (۳) نشان داده شده است. نقشه فاکتور R با روش kriging تهیه و در شکل (۴) نشان داده شده است. مطابق نقشه، مقدار این عامل از  $3/0.334$  تا  $3/7.0645$   $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ y^{-1}$  متغیر است و نشان می‌دهد فرساینده‌گی به سمت شمال شرقی منطقه مورد مطالعه روند کاهشی داشته و در قسمت جنوب غربی بیشتر است. جهت محاسبه فاکتور K اطلاعات مورد نیاز از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی (شکل ۳)، لایه خاک‌شناسی منطقه استخراج و پس از آن نقشه

عامل K در GIS آماده‌سازی شد. نتایج حاصل از محاسبه میزان شاخص فرسایش پذیری خاک با استفاده از جدول (۱) ارائه گردیده است. متوسط مقدار K در حوضه مورد مطالعه، بین ۰/۱ تا ۰/۵ متغیر است (شکل ۵). برای تهیه نقشه عامل LS با استفاده از DEM منطقه در محیط Arc GIS، در اکستنشن Arc Hydro تحلیل‌های مربوط به ویژگی‌های فیزیکی از جمله طول شیب حوضه محاسبه شد. همچنین درجه و درصد شیب حوضه از روی DEM منطقه (شکل ۶) در قسمت Spatial Analyst به دست آمد. نقشه توپوگرافی منطقه مورد مطالعه، به منظور ایجاد نقشه طول شیب و درجه آن مورد استفاده قرار گرفت. این عامل با استفاده از رابطه (۵) و همچنین استفاده از نقشه طبقات ارتفاعی<sup>۱</sup> منطقه مورد نظر، نقشه جهت جریان و نقشه جریان تجمعی تهیه شد که مقدار عامل LS بین ۰ تا ۱۰/۳۱۹۴ متغیر است (شکل ۷) و این امر نشان می‌دهد که مقدار عامل در مناطق با شیب تند و ناهموار بیشتر است.



شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

جدول ۳- برآورد F و R برای ایستگاه‌های بارندگی

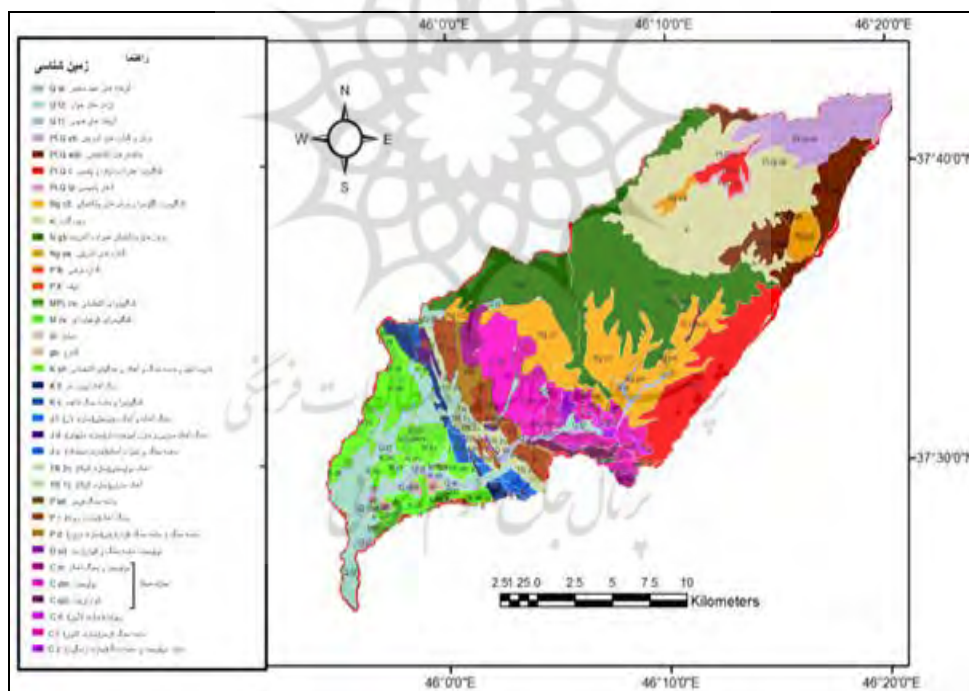
مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع	F (شاخص فورنیر)	R (فرسایش پذیری باران)
سراب	۴۷ ۳۲	۳۷ ۵۶	۴۷۳۲	۲۹/۶	۲/۲۴
میانه	۴۷ ۴۲	۳۷ ۲۷	۱۱۱۰	۳۴/۹	۳/۰۴

## 1. Digital Elevation Mode (DEM)

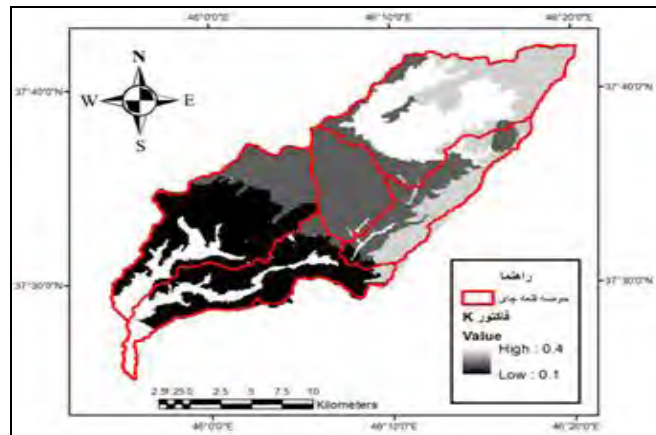
ادامه جدول ۳

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع	F (شاخص فورنیر)	R (فرسایش باران)
تبریز	۴۶ ۱۷	۳۸ ۵	۱۳۶۱	۳۲/۵۴	۲/۶۷
تکاب	۴۷ ۶	۳۶ ۴۲	۱۸۱۷/۲	۳۶/۶۵	۳/۳۲
اهر	۴۷ ۴	۳۸ ۲۶	۱۳۹۰/۵	۳۰/۸۹	۲/۴۳
جلفا	۴۵ ۴۰	۳۸ ۴۵	۷۳۶/۲	۲۷/۴۴	۱/۹
مهاباد	۴۵ ۴۳	۳۶ ۴۵	۱۳۵۱/۸	۴۷/۴۱	۵/۳۵
خوی	۴۴ ۵۸	۳۸ ۳۳	۱۱۰۳	۳۰/۳۹	۲/۳۵
ارومیه	۴۵ ۳	۳۷ ۴۰	۱۳۲۸	۳۴/۰۳	۲/۹
سلماس	۴۴ ۵۱	۳۸ ۱۳	۱۳۳۷	۲۸/۴۹	۲/۰۹
کلبر	۴۷ ۱	۳۸ ۵۲	۱۱۸۰	۴۵/۵۵	۵



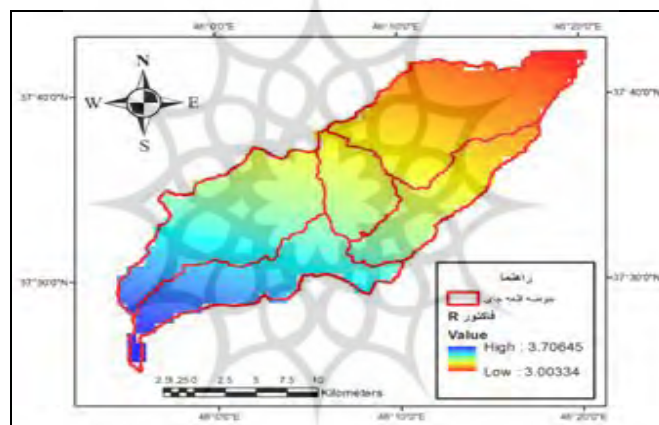
شکل ۳- نقشه زمین شناسی

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴



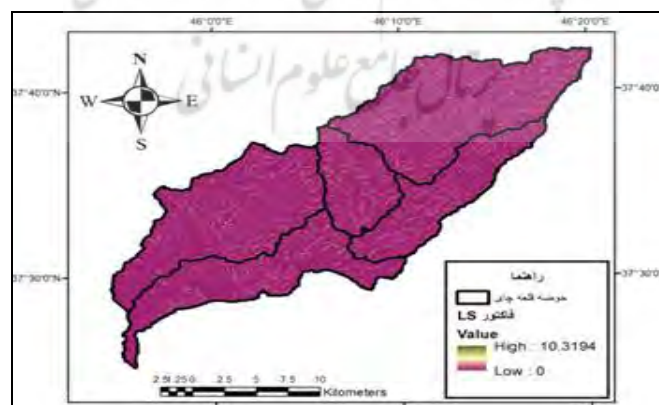
شکل ۴- نقشه عامل R با روش kriging

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴



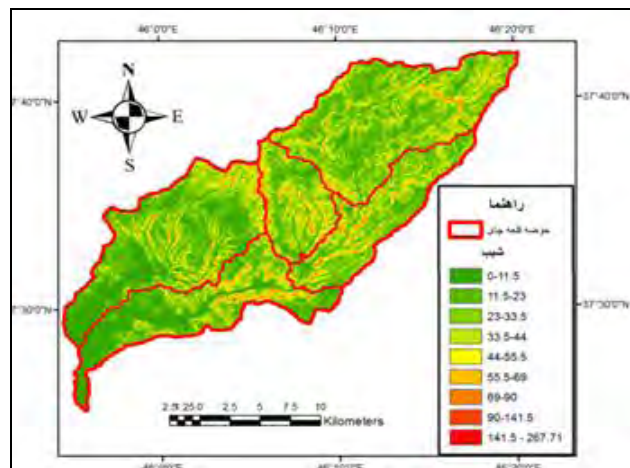
شکل ۵- نقشه عامل K

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴



شکل ۶- نقشه شیب حوضه آبریز قلعه‌چای

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴



شکل ۷- نقشه عامل LS

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

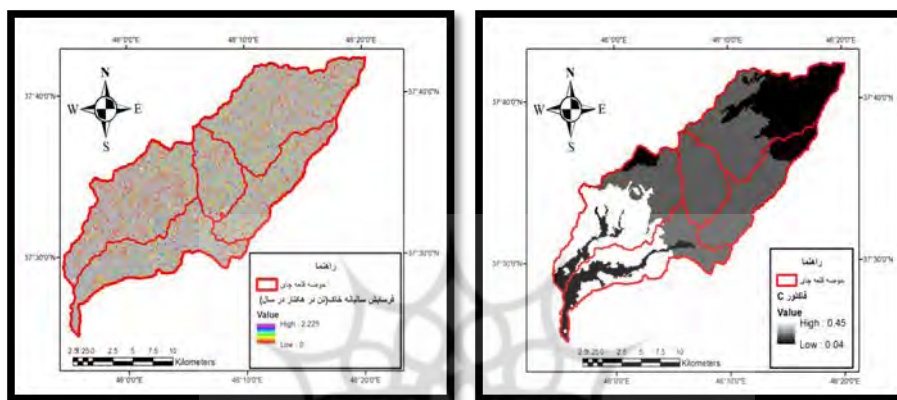
برای تهیه نقشه عامل C، از نقشه کاربری اراضی و پوشش گیاهی منطقه استفاده شد. با استفاده از منابع موجود، طبقه‌بندی کاربری اراضی و پوشش گیاهی انجام پذیرفت که مقدار آن برای حوضه قلعه‌چای بین  $0/04$  تا  $0/45$  متغیر است. نقشه عامل C نشان می‌دهد که بیشترین مقدار این پارامتر، در مناطق بدون پوشش گیاهی است و کمترین مقدار آن، در مناطقی است که پوشش متراکم وجود دارد و در شکل، با رنگ روشن‌تر مشخص شده است (شکل ۸). با توجه به عدم انجام اقدامات حفاظتی مشخص در منطقه، مقدار فاکتور P یک در نظر گرفته شده است.

#### ۶. یافته‌های تحقیق

فرسایش متوسط سالانه خاک از طریق حاصل ضرب عامل فرسایش باران (R)، عامل فرسایش پذیری خاک (K)، عامل طول شیب (L) و درجه شیب (S)، عامل پوشش گیاهی (C) و عامل حفاظت خاک (P) با استفاده از رابطه (۱) در اکستنشن Raster calculator در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.2 محاسبه شد. نقشه به دست آمده از این مدل، در شکل ۹ نشان داده شده است. مقادیر فرسایش خاک در منطقه مورد مطالعه بین صفر تا  $2/225$  تن در هکتار در سال در سطح پیکسل متغیر است. متوسط و انحراف معیار آن به ترتیب  $0/02$  و  $0/06$  تن در

هکتار در سال تعیین شد که نشان می‌دهد حوضه مورد مطالعه، جزو طبقه فرسایشی خیلی کم تا کم است.

مقادیر فاکتورهای مدل استفاده شده در این پژوهش، مربوط به زیرحوضه‌های منطقه مورد مطالعه، به تفکیک در جدول‌های (۴-۹) آورده شده است.



شکل ۹- نقشه فرسایش سالیانه خاک

شکل ۸- نقشه عامل C

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

جدول ۴- فاکتور R زیرحوضه‌های قلعه‌چای

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

کل حوضه	Sb5	Sb4	Sb3	Sb2	Sb1	
۳	۳/۰۱	۳/۲۲	۳/۱۳	۳/۲۶	۳/۳۶	حداقل
۳/۷۱	۳/۲۶	۳/۳۹	۳/۴۲	۳/۶۱	۳/۷۱	حداکثر
۳/۳۱	۳/۱۴	۳/۳۰	۳/۲۹	۳/۴۰	۳/۵۰	میانگین
۰/۱۵	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۸	انحراف معیار

جدول ۵- فاکتور K زیرحوضه‌های قلعه‌چای

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

کل حوضه	Sb5	Sb4	Sb3	Sb2	Sb1	
۰/۱۰	۰/۳۰	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۱۰	۰/۱۰	حداقل
۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۳۷	۰/۴۰	۰/۳۷	۰/۳۷	حداکثر
۰/۳۰	۰/۳۷	۰/۳۰	۰/۳۳	۰/۲۱	۰/۲۹	میانگین
۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۱۱	۰/۰۵	انحراف معیار



## جدول ۶- فاکتور C زیر حوضه های قلعه چای

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

کل حوضه	Sb5	Sb4	Sb3	Sb2	Sb1	
۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۰۴	حداقل
۰/۴۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۴۵	۰/۴۵	حداکثر
۰/۱۵	۰/۱۱	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۱۹	۰/۱۷	میانگین
۰/۰۶	۰/۰۴	۰	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۹	انحراف معیار

## جدول ۷- فاکتور LS زیر حوضه های قلعه چای

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

کل حوضه	Sb5	Sb4	Sb3	Sb2	Sb1	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	حداقل
۱۰/۳۲	۵/۵۲	۹/۹۲	۷/۳۷	۶/۰۶	۱۰/۳۲	حداکثر
۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۷	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۳	میانگین
۰/۴۲	۰/۴۱	۰/۵۱	۰/۴۳	۰/۳۹	۰/۳۹	انحراف معیار

## جدول ۸- شیب زیر حوضه های قلعه چای

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

کل حوضه	Sb5	Sb4	Sb3	Sb2	Sb1	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	حداقل
۲۶۷/۷۱	۱۷۴/۰۴	۲۶۷/۷۱	۱۸۱/۰۶	۱۴۵/۹۳	۲۶۱/۹۱	حداکثر
۲۵/۰۵	۲۶/۹۶	۳۱/۴۳	۲۸/۷۱	۲۱/۶۸	۲۰/۷۶	میانگین
۱۶/۵۳	۱۴/۰۹	۱۸/۱۳	۱۵/۸۰	۱۶/۱۰	۱۸/۰۲	انحراف معیار

## جدول ۹- فرسایش زیر حوضه های قلعه چای

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

کل حوضه	Sb5	Sb4	Sb3	Sb2	Sb1	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	حداقل
۰/۲۲۵	۰/۶۸	۰/۷۸	۰/۵۸	۰/۶۸	۲/۲۲	حداکثر
۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	میانگین
۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۸	انحراف معیار

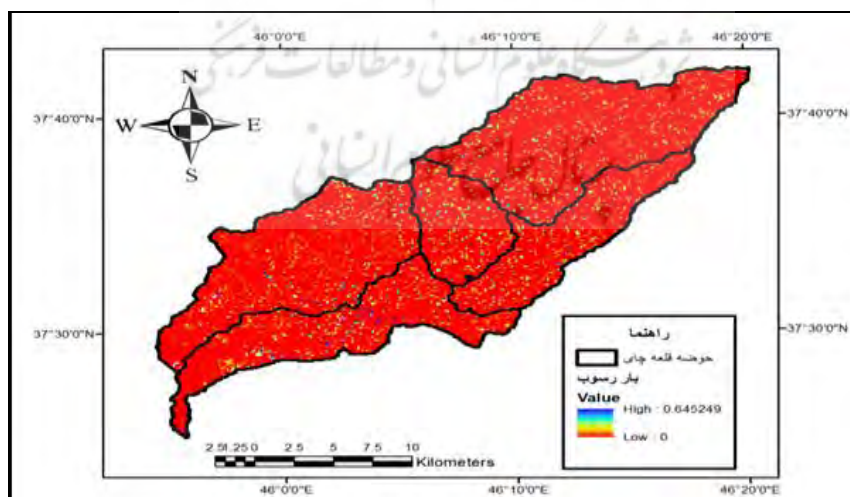
براین اساس واحد هیدرولوژیکی Sb1 دارای حداکثر بار رسوب و واحد هیدرولوژیکی Sb3 دارای حداقل بار رسوب هستند.

در این پژوهش، میزان نسبت تحویل رسوب، بین ۰/۰۸ تا ۰/۲۹ و حداکثر بار رسوب در منطقه مورد مطالعه بین ۰/۱۹ تا ۰/۶۴ و رسوب کل بین ۹۱۰۵۰ تا ۳۰۳۳۶۰ متغیر است (جدول ۱۰). رسوب کل به دست آمده با استفاده از مدل EPM با مساحت ۲۴۹/۵ کیلومتر مربع در حوضه آبریز مورد مطالعه ۱۳۳۰/۱۶ تن در سال است (روستایی، رسولی، و احمدزاده، ۱۳۸۹). از آنجایی که مقدار رسوب کل به دست آمده با استفاده از مدل USDA تقریباً نزدیک به مقدار رسوب کل مدل EPM بود، این روش به عنوان روش بهتر برای محاسبه نسبت تحویل رسوب انتخاب گردید و نقشه بار رسوب از آن تهیه گردید (شکل ۱۰).

#### جدول ۱۰- روش‌های نسبت تحویل رسوب و بار رسوب حوضه قلعه چای

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴

روش‌های نسبت تحویل رسوب	میزان نسبت تحویل رسوب	بار رسوب (تن در هکتار در سال)	رسوب کل (تن در سال)
USDA	۰/۲۹	۰/۶۴	۳۰۳۳۶۰
وانونی	۰/۲۲	۰/۴۹	۲۳۲۲۶۰
بویس	۰/۰۸	۰/۱۹	۹۱۰۵۰



شکل ۱۰- نقشه بار رسوب

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۴



## ۷. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پدیده فرسایش خاک و تولید رسوب برای جامعه بشری مشکلات زیادی را به وجود آورده است؛ به طوری که امروز فرسایش خاک یکی از جدی‌ترین مشکلات کشورهای در حال توسعه و بسیاری از کشورهای توسعه یافته به شمار می‌آید. برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی فرسایش ناشی از اعمال مدیریت نادرست در استفاده از اراضی، نیاز به اتخاذ تدابیری در مقیاس‌های مزرعه و حوضه آبخیز است. در این پژوهش به بررسی فرسایش خاک حوضه آبریز قلعه‌چای با استفاده از مدل RUSLE در محیط GIS پرداخته شده است. حوضه آبریز قلعه‌چای دارای توپوگرافی متغیری است که با گستره صفر تا ۱۰/۳۲ عامل LS مشخص است. بررسی نقشه فاکتور فرساینده باران در سطح حوضه نشان داد مقدار این عامل از ۳ تا  $3/71 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ y}^{-1}$  متغیر است که نشان می‌دهد فرساینده به سمت شمال شرقی منطقه مورد مطالعه روند کاهشی داشته و در قسمت جنوب غربی بیشتر است. برای تهیه نقشه عامل C از نقشه کاربری اراضی و پوشش گیاهی منطقه استفاده شد. مقادیر این فاکتور از ۰/۰۴ تا ۰/۴۵ متغیر است که بیانگر پوشش گیاهی نسبتاً خوب حوضه می‌باشد. جهت محاسبه فاکتور K، اطلاعات مورد نیاز از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی، لایه خاک‌شناسی استفاده شد و متوسط مقدار K در حوضه مورد مطالعه بین ۰/۱ تا ۰/۵ متغیر است.

در نهایت نقشه‌های مورد نظر در محیط GIS تهیه و با هم تلفیق شدند. بررسی نقشه خطر فرسایش خاک نشان می‌دهد که میزان خطر فرسایش خاک در سطح حوضه برحسب تن در هکتار، در سال از صفر تا ۲/۲۲۵ متغیر است. مطابق با این نقشه، حوضه مورد مطالعه، جزو طبقه فرسایشی خیلی کم تا کم قرار دارد. نتایج محاسبات روش‌های نسبت تحویل رسوب نشان می‌دهد میزان نسبت تحویل رسوب بین ۰/۰۸ تا ۰/۲۹ و حداکثر بار رسوب در منطقه مورد مطالعه، بین ۰/۱۹ تا ۰/۶۴ تن در هکتار، در سال متغیر است. مقایسه رسوب کل برآورد شده در روش USDA با مقدار به دست آمده از روش EPM برگرفته از پژوهش روستایی، رسولی، و احمدزاده (۱۳۸۹)، قابلیت تلفیق مدل RUSLE و GIS را در برآورد میزان فرسایش و بار رسوب نشان می‌دهد.

## کتابنامه

- . آرخی، ص؛ نیازی، ی. (۱۳۸۹). بررسی کاربرد GIS و RS برای تخمین فرسایش خاک و بار رسوب با استفاده از مدل RUSLE (مطالعه موردی: حوضه بالادست سد ایلام). مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۷(۲)، ۱-۲۷.
- . احمدی، ح. (۱۳۸۸). ژئومورفولوژی کاربردی. چاپ ششم. انتشارات دانشگاه تهران.
- . خیام، م؛ غنمی جابر، م؛ و صمدزاده، رسول. (۱۳۹۲). مقایسه کارایی مدل های MPSIAC و EPM در برآورد فرسایش و رسوب زایی حوضه آبخیز سقزچی چای نمین. دو فصلنامه ژئومورفولوژی کاربردی ایران، ۱(۱)، ۱-۱۳.
- . رحیمی، خ؛ مزبانی، م. (۱۳۹۲). ارزیابی تغییرات فرسایش حوزه آبخیز سیوند طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۹ با استفاده از مدل RUSLE. فصلنامه پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۳(۹)، ۱-۱۸.
- . رخبین، م؛ نوحه‌گر، ا؛ کمالی، ع؛ و حبیب‌اللهیان، م. (۱۳۹۳). برآورد میزان فرسایش و تولید رسوب در حوضه آبخیز لاورفین (استان هرمزگان) با استفاده از سنجش از دور (RS)، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و مدل تجربی (RUSLE). فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۲۹(۳)، ۸۹-۱۰۴.
- . رضائی، پ؛ فریدی، پ؛ قربانی، م؛ و کاظمی، م. (۱۳۹۳). برآورد فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE و شناسایی مؤثرترین عامل آن در حوضه آبخیز گابریک - جنوب خاوری استان هرمزگان. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۳(۱)، ۹۷-۱۱۳.
- . روستایی، شهرام؛ رسولی، ع. ا؛ و احمدزاده، ح. (۱۳۸۹). مدل‌سازی فرسایش و رسوب حوضه آبریز قلعه‌چای عجب‌شیر با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در محیط GIS. جغرافیا و توسعه. ۱۸(۱)، ۱۵۹-۱۷۸.
- . زندی، ج؛ سلیمانی، ک؛ و حبیب‌نژاد روشن، م. (۱۳۹۲). اولویت‌بندی نواحی کنترل فرسایش خاک با استفاده از تکنیک‌های ارزیابی چندمعیاره و GIS. جغرافیا و توسعه، ۱۱(۳۱)، ۹۳-۱۰۶.
- . شکوری، ب. (۱۳۷۴). فرسایش خاک و پیامدهای آن در اکوسیستم. مجله آب، خاک و ماشین، ۶(۲)، ۵۵-۶۴.
- . صالحی، م؛ اسفندیارپور بروجنی، ع؛ مهاجر، ر؛ و باقری بداغ‌آبادی، م. (۱۳۹۴). حفاظت آب و خاک تکمیلی. چاپ دوم. انتشارات دانشگاه پیام نور.

- قضاوتی، ر.؛ ولی، ع.؛ مقامی، ی.؛ عبدی، ژ.؛ و شرفی، س. (۱۳۹۱). مقایسه مدل‌های PSIAC در برآورد فرسایش و رسوب با استفاده از GIS. *جغرافیا و توسعه*، ۱۰، (۲۷)، ۱۱۷-۱۲۶.
- واعظی، ع.؛ بهرامی، ح.؛ صادقی، ح. ر.؛ و مهدیان، م. ح. (۱۳۸۹). برآورد عامل فرسایش پذیری K با استفاده از مدل RUSLE در بخشی از خاک‌های ناحیه نیمه‌خشک در شمال غربی ایران. *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۱۷(۱۳). ۱۰۵-۱۲۴.
13. Bonilla, C., José, A., Reyes, L., & Magri, A. (2010). Water erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a GIS framework, central Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 70(1), 159-169.
14. Carvalho, D. F. D., Durigon, V. L., Antunes, M. A. H., Almeida, W. S. D., & Oliveira, P. T. S. D. (2014). Predicting soil erosion using Rusle and NDVI time series from TM Landsat 5. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 49(3), 215-224.
15. Farhan, Y., Dalal, Z., & Farhan, I. (2013). Spatial estimation of soil erosion risk using RUSLE approach, RS, and GIS techniques: A case study of Kufranja watershed, northern Jordan. *Journal of Water Resource and Protection*, 5(12), 1247-1261.
16. Haan, C.T., Barfield, B.J., & Hayes, J.C. (1994). *Design hydrology and sedimentology for small catchments*. San Diego: Academic Press.
17. Li, H., Xiaoling, H., Lim, K. J., & Sagong, M. (2010). Assessment of soil erosion and sediment yield in Liao watershed, Jiangxi Province, China, Using USLE, GIS, and RS. *Journal of Earth Science*, 21(6), 941-95.
18. Lim, K. J., Sagong, M., Engel, B. A., Tang, Z., Choi, J., & Kim, K. S. (2005). GIS-based sediment assessment tool. *Catena*, 64(1), 61-80.
19. Marker, M. (2006). Assessment of land degradation susceptibility by scenario analysis: a case study in Southern Tuscany, Italy. *Geomorphology*, 93(1-2), 120-129.
20. Renard, K. G., & Freidmund, J. R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the RUSLE. *Journal of Hydrology*, 157(1-4), 287-306.
21. Shrestha, D. (2001). *Soil erosion modeling using remote sensing and GIS: A case study of Jhikhu Khola watershed, Nepal* (Unpublished master's thesis). Andhra University, Visakhapatnam, Andhra Pradesh, India.
22. Tiwari, A.K., Riss, L.M., & Nearing, M.A. (2000). Evaluation of WEPP and its comparison with USLE and RUSLE. *American Society of Agriculture Engineers*, 43(5), 1129-1135.
23. Wang, G., Gertner, G., Fang, S., & Anderson, A.B. (2003). Mapping multiple variables for predicting soil loss by geostatistical methods with TM images and a slope map. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69(8), 889-898.
24. Wischmeier, W.H., & Smith, D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. Agriculture Handbook. No. 537. Washington DC: US Department of Agriculture.