

## بررسی تاثیر تغییرات پوشش و کاربری زمین در قابلیت فرسایش خاک

### حوضه قره‌سو گرگانرود

امیر صفاری، دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

عباسعلی نوری<sup>۱</sup>، دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

جلال کرمی، استادیار سنجش از دور، گروه سنجش از دور، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۳ پذیرش نهایی: ۱۳۹۶/۱۲/۰۸

#### چکیده

فرسایش خاک یکی از ریسک‌های اصلی تهدیدکننده منابع آب و خاک در ایران است که رابطه‌ای قوی با نوع پوشش و کاربری زمین دارد. در این پژوهش بوسیله مدل RUSLE با بهره‌گیری از تصاویر سنجنده‌های TM، ETM و OLI ماهواره لندست در یک بازه ۳۰ ساله برای سه سال ۱۹۸۵، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۵ تاثیر تغییرات پوشش زمین بر پتانسیل فرسایش خاک در حوضه آبخیز قره‌سو مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تغییرات پوشش زمین نشان‌دهنده کاهش پوشش‌های جنگل متراکم، جنگل با تراکم کم و باغ و مرتع در برابر افزایش سطوح کشاورزی، زمین‌های بدون پوشش و سکونتگاه‌های انسانی در طی بازه سی ساله است. همچنین نتایج مدل RUSLE سیر افزایشی پتانسیل فرسایش خاک در حوضه آبخیز قره‌سو را نشان می‌دهد، هرچند که در نواحی جلگه‌ای با کاربری کشاورزی روندی معکوس با روند کلی در نتیجه اصلاح و تغییر الگوی کشت و رشد کشاورزی آبی دیده می‌شود. میانگین پتانسیل فرسایش خاک برآورد شده در حوضه قره‌سو برای ۱۹۸۵، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۵ به ترتیب ۱۰۲، ۱۱۰ و ۱۰۳، ۷۶ تن در هکتار در سال است. همچنین در کلاس‌های بیش از ۱۰۰ (تن در سال در هکتار) یا طبقات با پتانسیل خیلی زیاد و بحرانی این مقدار از ۴۳، ۸ درصد به ۴۵، ۵ درصد از مساحت حوضه در سال ۲۰۱۵ افزایش یافته است. این روند افزایشی در سطح زیر حوضه‌ها نیز مورد آزمون قرار گرفت و در اکثر آنها پتانسیل فرسایش خاک بر اساس روند تغییرات کاربری زمین رو به افزایش است.

واژگان کلیدی: مدل RUSLE، فرسایش خاک، قره‌سو، سنجش از دور، پوشش زمی

## مقدمه

تغییر پوشش و کاربری زمین بر بسیاری از فرآیندهای طبیعی نظیر فرسایش خاک و تولید رسوب، سیلاب و خصوصیات فیزیکی شیمیایی خاک اثر می‌گذارد. یکی از تاثیرات اساسی نوع پوشش زمین بر فرآیندهای موجود در حوضه‌های آبخیز، نقش آن بر میزان فرسایش خاک است. فرسایش خاک یکی از مشکلات محیطی است که تهدیدی برای منابع طبیعی، کشاورزی و محیط زیست به شمار می‌رود. بررسی‌ها نشان می‌دهد، حدود ۵۸ درصد از تخریب اراضی در جهان به علت فرسایش خاک بوده که بیش تر این تخریب، از زمان جنگ جهانی دوم به بعد رخ داده است و باعث کاهش ۱۷ درصدی تولید محصول و آسیب زیست محیطی شده است (Bruce et al, 1995). اثرات فرسایش خاک و ته نشست رسوبات هم درون منطقه ای و هم برون منطقه ای است. اثرات درون منطقه‌ای، به خصوص در اراضی کشاورزی منجر به اتلاف خاک مزرعه، تجزیه ساختمان خاک و کاهش مواد آلی و مغذی می‌شود که خود باعث کاهش عمق خاک قابل کشت و کاهش حاصلخیزی خاک می‌گردد و در ادامه ممکن است منجر به متروکه شدن اراضی شود (Pimental et al, 1995). تاثیرات برون منطقه‌ای در نتیجه رسوب‌گذاری در پایین دست می‌باشد که ظرفیت حمل رودخانه و ظرفیت نگهداری مخازن را کاهش می‌دهد و خطر سیلاب و جریان گلی را افزایش داده و باعث کوتاه شدن عمر مفید مخازن می‌گردد (Boardman et al, 1994; Clark, 1980). این حقیقت که فرسایش خاک در نتیجه فقر و استفاده نادرست از زمین است و بر آن نمی‌توان غلبه کرد مگر با اصلاح استفاده و مدیریت زمین به خوبی مورد توجه قرار نگرفته است (Sanders, 1992). میزان فرسایش خاک همبستگی قوی با پوشش و کاربری زمین دارد (Garcia-Ruiz, 2010; Pacheco et al., 2014). تغییرات کاربری زمین یا درصد پوشش گیاهی اثرات بسیاری در میزان هدر رفت خاک دارد (Wijitkosum, 2012; Alkharabshes et al., 2013). از اینرو شناسایی روند تغییرات فرسایش خاک به‌مراه بررسی اثر تغییرات پوشش زمین در حوضه‌های آبخیز در اقدامات مدیریتی کنترل فرسایش و مدیریت حوضه‌های آبخیز و منابع آب و خاک نقش مؤثری دارا است. برای این منظور مدل‌های ریاضی فرسایش خاک (اعم از انواع کمی و کیفی) از جمله مواردی هستند که در نقاط مختلف ایران و جهان به منظور مطالعات فرسایش و رسوب حوضه‌های مختلف بکار می‌رود. مدل‌هایی مثل مدل جهانی فرسایش خاک (USLE)<sup>۱</sup> (Wischmeier and Smith 1965, 1978)، مدل جهانی اصلاح شده فرسایش خاک (MUSLE)<sup>۲</sup> (Williams, 1975) یا مدل جهانی تجدید نظر شده فرسایش خاک (RUSLE)<sup>۳</sup> (Renard et al, 1991) به صورت مکرر برای تخمین فرسایش خاک حوضه آبخیز در دنیا مورد استفاده قرار گرفته است (Ahmed, 2009; Bartsch et al, 2002; Bahadur, 2000). در ایران آرخ و نیازی (۱۳۸۹) در حوضه بالادست سد ایلام با استفاده از مدل RUSLE فرسایش خاک و بار رسوب را مورد ارزیابی قرار دادند و موثر بودن سنجش از دور و GIS در تخمین کمی مقادیر فرسایش خاک، بار رسوب و همچنین مدیریت فرسایش اثبات نمود. رضائی و همکاران (۱۳۹۳) فرسایش و تولید رسوب در حوضه ی آبخیز گابریک در استان هرمزگان بوسیله مدل RUSLE مورد مطالعه قرار دادند و فاکتور توپوگرافی با بالاترین مقدار ضریب تبیین در این حوضه معرفی شد. کرم و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از مدل RUSLE و فرایند تحلیل سلسله مراتبی به برآورد و پهنه بندی فرسایش خاک در حوضه آبخیز ماملو در شرق تهران پرداختند و به این نتیجه رسیدند که این دو روش ابزارهای قدرتمندی برای برآورد، نمایش و پهنه بندی میزان فرسایش خاک هستند. مدل USLE فرسایش خاک را به صورت ترکیبی از شش فاکتور که نشان دهنده‌ی نیروی فرساینده‌ی باران، فرسایش‌پذیری خاک، طول و درجه شیب، سیستم کشت و عملیات مدیریتی است، تخمین زده و جهت پیش بینی تلفات خاک در اراضی کشاورزی به کار می‌رود (Wischmeier and Smith, 1965, 1978). مدل RUSLE شش فاکتور مشابه USLE داشته، اما

<sup>۱</sup> . universal soil loss equation

<sup>۲</sup> -The modified universal soil loss equation

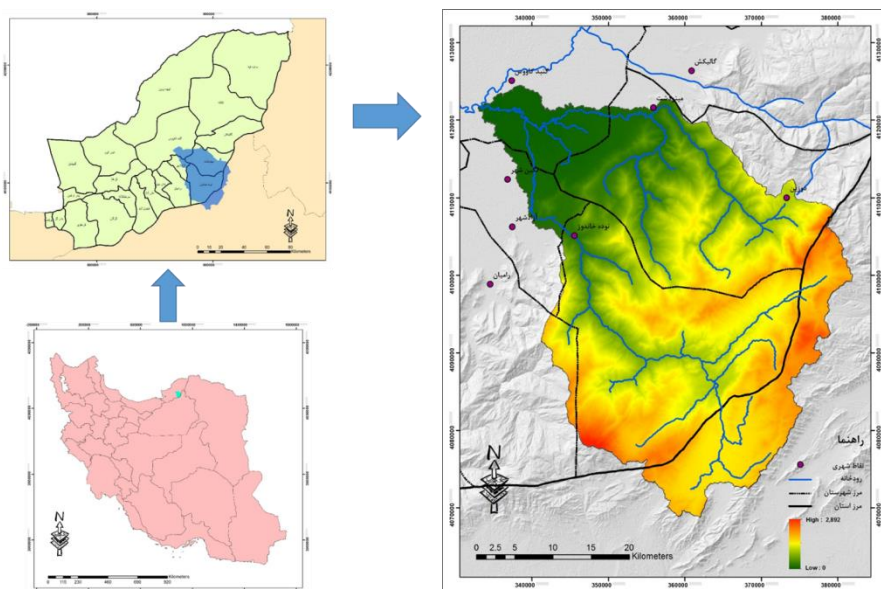
<sup>۳</sup> -The revised universal soil loss equation

برآوردهای دقیق‌تری از فاکتورهای فرساینده‌ی باران، فرسای پذیری خاک، پوشش گیاهی و عملیات حفاظتی دارد (Lafren, et al., 1991) و جهت پیش بینی تلفات خاک در مناطق گسترده‌تر و در شرایط مختلف پوشش مانند اراضی زراعی، جنگل، مرتع و جنگل‌های آسیب دیده توسعه یافته است (Chakroun, et al., 1993).  
حوضه آبخیز قره‌سو یکی از زیر حوضه‌های گرگانرود در طی سالیان گذشته متحمل فرسایش شدید در بعضی مناطق است. این فرسایش به دلایل متفاوتی رخ داده که یکی از آنها تغییرات در کاربری زمین و ضعف مدیریت منابع آب و خاک است. هدف از این مطالعه برآورد تغییرات حاصل شده در پتانسیل فرسایش حوضه آبخیز قره‌سو در یک بازه ۳۰ ساله و بررسی نقش تغییرات کاربری و پوشش زمین در میزان تولید رسوب با استفاده از مدل RUSLE است. برای سنجش تغییرات کاربری زمین از مقایسه تغییرات طبقه‌بندی تصاویر لندست برای سال‌های ۱۹۸۵، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۵ استفاده شد.

## داده‌ها و روش کار

### الف) قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه

حوضه آبخیز قره‌سو با مساحتی بالغ بر ۱۵۵۶ کیلومتر مربع در طول جغرافیایی (۲۳°:۵۵' الی ۳۸°:۵۵') عرض جغرافیایی (۱۵°:۳۶' الی ۱۳°:۳۷') واقع شده است. حوضه رودخانه قره‌سو بخشی از زیر حوضه رودخانه گرگانرود در استان گلستان و سمنان در حوضه آبریز دریای خزر مابین دریای خزر و دامنه‌های شمالی ارتفاعات البرز شرقی در شمال ایران قرار دارد. از نظر ناهمواری‌ها، حوضه آبخیز قره‌سو به دو قسمت جلگه‌ای در شمال و کوهستانی در جنوب تقسیم شده است. رودخانه‌های چهل‌چای و نرماب که در جنوب غربی و جنوب شرقی شهر مینودشت قرار دارند، به فاصله ۲۰۰ متری پل جاده ارتباطی مینودشت به هم پیوسته و پس از الحاق رودخانه خرمالو در سمبه مختم رودخانه قره‌سو را تشکیل داده که از غرب روستای آرازکوسه گذشته و به گرگانرود می‌پیوندد. این حوضه با مساحت بالغ بر ۱۵۵۲ کیلومتر مربع، دارای ارتفاع متوسط ۱۱۴۰ متر، حداکثر ارتفاع ۲۸۹۲ متر، حداقل ارتفاع ۰ و شیب متوسط معادل ۱۶ درجه برآورد شده است. این منطقه دارای اقلیم معتدل مدیترانه‌ای می‌باشد که گویای بارندگی زیادتر از بارندگی متوسط در کشور است و در بعضی از نقاط حوضه متوسط بارندگی بیش از ۸۰۰ میلی‌متر در سال است.



شکل ۱: موقعیت محدوده مورد مطالعه در سطح ایران و نقشه راقومی ارتفاع

**ب) روش کار**

تحقیق مورد نظر از نوع تحقیقات کاربردی می باشد و نتیجه آن تحلیل پتانسیل فرسایش خاک در حوضه قره‌سو یکی از زیر شاخه گرگانرود استان گلستان در نتیجه تغییرات پوشش و کاربری زمین است. این پژوهش مبتنی بر استفاده از روش‌های سنجش از دور برای رسیدن به تغییرات کاربری در مدت ۳۰ ساله مورد مطالعه و استفاده از روش‌های کمی و مدل RUSLE در محیط GIS برای مدل کردن تاثیر این تغییرات بر خصوصیات هیدرژئومورفولوژیکی حوضه قره‌سو است. برای انجام این مطالعه از داده‌های بارندگی ۱۰ ایستگاه هواشناسی موجود در منطقه، مدل رقومی ارتفاع با دقت ۳۰ متر و اطلاعات آزمایش خاک برای ۳۰ نقطه استفاده شد، همچنین برای بررسی تغییرات کاربری زمین از تصاویر سنجنده‌های TM، ETM و OLI ماهواره لندست منطقه مورد مطالعه برای سال‌های ۱۹۸۵، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۵ که تصحیح هندسی روی آنها انجام شده است استفاده شد. این تصاویر مربوط به گذر ۱۶۲ و ردیف ۳۴ می باشد. از نقشه توپوگرافی منطقه برای کنترل دقت تصحیح هندسی استفاده شد. بررسی‌ها نشان دهنده دقت مناسب در تصاویر مورد نظر می باشد. برای تصحیح جوی تصاویر از آنجایی که مدل بومی شده‌ای سازگار با شرایط جوی داخل وجود ندارد، از نرم افزار ATCOR-2 استفاده شد. سپس تصاویر مورد نظر به روش طبقه‌بندی نظارت شده بیشترین احتمال طبقه‌بندی شد و از نتایج بدست آمده در مدل فرسایش خاک استفاده شد.

در دنیای واقعی فاکتورهای موثر بر فرسایش خاک به صورت خیلی گوناگون در نواحی گوناگون ظاهر می شوند. بنابراین نیاز است که حوضه آبخیز قبل از محاسبات فرسایش خاک به واحدهای همگن تقسیم شود. گسسته‌سازی به روش شبکه‌ای بهترین روش برای مدل‌سازی فرسایش خاک در فضای GIS است. در این تحقیق حوضه آبخیز قره‌سو بر مبنای داده‌های شبکه‌ای رستری با ابعاد ۳۰ متر مورد تحلیل قرار گرفته است زیرا از طرفی به اندازه کافی کوچک است تا بتوان ناهمگنی موجود در حوضه را نمایش داد و از طرف دیگر با ابعاد پیکسل‌های تصاویر ماهواره لندست نیز منطبق می باشد.

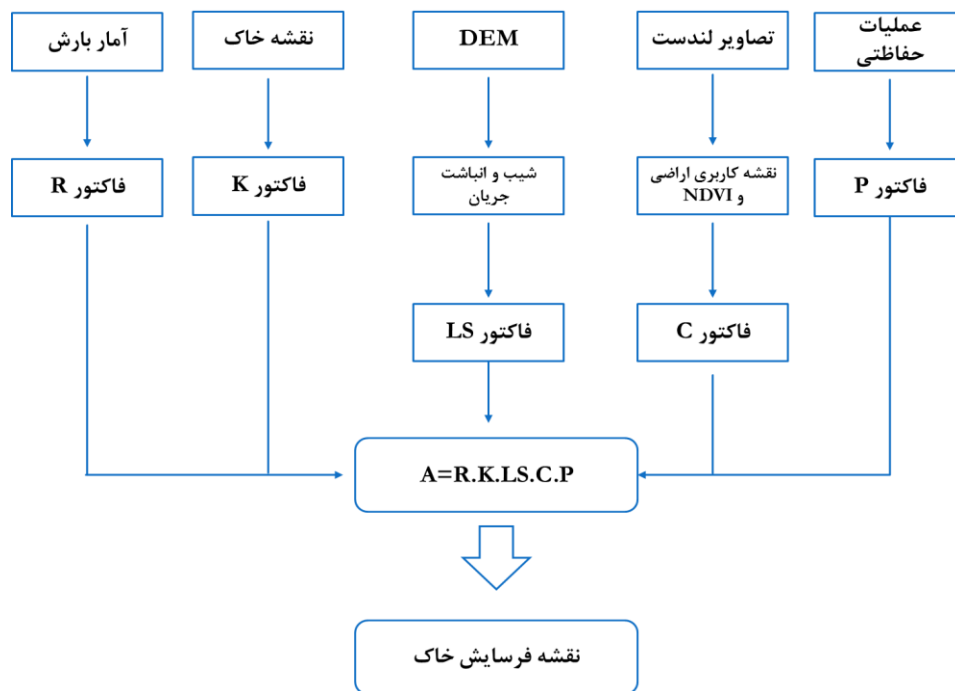
مدل RUSLE، یک مدل برآورد فرسایش خاک است که با ۶ فاکتور فرسایشی زیر رابطه دارد (Wischmeier and Smith, 1965, 1978).

(رابطه ۱)

$$A=R \times K \times L \times S \times C \times P$$

در این رابطه A: میانگین فرسایش خاک در واحد سطح تن در هکتار در سال، R: فاکتور فرسایشی بارش (MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>), K: فاکتور فرسایش پذیری خاک (t h MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>), L: فاکتور طول شیب، S: فاکتور درجه شیب، C: فاکتور عملیات مدیریتی و پوشش و در نهایت فاکتور P: عملیات حفاظتی می باشد.

برای اجرای مدل RUSLE در فضای GIS ابتدا لایه رستری بارش، واحد‌های خاک، شیب و مدل رقومی ارتفاع و همچنین لایه محدوده‌های اجرای عملیات حفاظتی خاک ایجاد شد. هریک از فاکتورهای مورد نظر در واحدهایی مجزا در سطح حوضه مورد محاسبه قرار گرفت.



شکل ۲: نمودار روند انجام تحقیق

فاکتور فرساینده‌گی باران (R): فاکتور فرساینده‌گی باران، عامل مهمی در مدل RUSLE است و عهده دار اصلی مقدار فرسایش خاک به عنوان تابعی از خصوصیات فیزیکی بارش می باشد. می توان فرض کرد که در نبود بارش مقدار تخریب و فرسایش خاک خیلی کمتر از مقدار موجود باشد و عامل مهم بعدی دخیل در فرسایش باد است. همچنین لندفرم و جهت بارش عاملی تاثیرگذار در تغییرات استعداد تخریب خاک می باشد. با توجه به اینکه آبخیز مورد مطالعه از نظر مساحت کوچک می باشد، بنابراین الگوی بارندگی با استفاده از ایستگاه های موجود در محدوده حوضه مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، برای محاسبه فاکتور سالانه R از داده‌های ماهانه بارندگی ۱۰ ایستگاه استفاده شد که شکل ۳ موقعیت و پراکنش آنها مشخص است. به دلیل نبود آمار مربوط به اطلاعات جنبشی باران (E) و حداکثر شدت بارش ۳۰ دقیقه‌ای در ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه، از روش رنارد و فریموند (۱۹۹۴) که مبتنی بر مقادیر متوسط بارندگی ماهانه و سالانه می باشند، برای تخمین مقدار سالانه فاکتور فرساینده‌گی باران (R) در هر ایستگاه استفاده شد. در این روش، فاکتور R در هر ایستگاه از طریق روابط زیر و با محاسبه شاخص اصلاح شده فورنیه (F) برآورد می شود.

$$R = MF = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{P_i^2}{P} \right) \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$A = 0.7397F^{1.847} \quad (\text{رابطه ۳}), F < 55 \text{ mm}$$

$$A > 55 \text{ mm} \quad (\text{رابطه ۴}), FA = 95.77 - 6.081F + 0.477F^2$$

در این رابطه  $P_i$ : متوسط بارندگی (میلی متر) در ماه  $i$  و  $P$  متوسط بارندگی سالیانه (میلی متر) است. در این مطالعه، با استفاده از معادله (۳)، شاخص فورنیه برای تمامی ایستگاه ها، محاسبه گردید و سپس با جای گذاری شاخص فورنیه در روابط مربوطه که توسط رنارد و فریموند (۱۹۹۴) برای مناطق فاقد داده های تفصیلی رگبار (شدت بارندگی) پیشنهاد شده، مقدار فاکتور R برای ایستگاه های شاخص برآورد شد. نتایج فاکتور R در سطح حوضه محاسبه شد. بر اساس شکل ۴ مقدار این فاکتور در نیمه شمالی بیشتر از نیمه جنوبی حوضه است. در این محدوده میزان چهار ایستگاه موجود بیش

از ۸۰۰ میلیمتر در سال است. مقادیر فاکتور R در سطح حوضه از ۸۵ تا ۳۹۶ متغیر است و میانگین آن برای حوضه قره‌سو ۲۰۷,۶ است.

فاکتورهای طول شیب (L) و درجه شیب (S): فاکتورهای L و S در مدل RUSLE بیانگر تأثیر توپوگرافی بر روی فرسایش خاک می باشد. ثابت شده 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 (Haan et al., 1994). براساس مطالعات، فرسایش خالص خاک نسبت به تغییرات در درجه شیب در مقابل طول شیب حساس تر است (McCool et al., 1987).

طول شیب فاصله بین نقطه بالایی آغاز سراسیمی تا نقطه ای است که شیب به حداقل خود می رسد و در این نقطه رسوبات ته نشین می شوند (Wischmeier and Smith, 1978). برای محاسبه فاکتور LS از لایه رقومی ارتفاع با اندازه پیکسل ۳۰ متر استفاده شد و سپس لایه رستری شیب با اندازه سلول ۳۰ متر تهیه شد. در ادامه فاکتور LS براساس معادله پیشنهادی مور و بر اساس لایه های رستری درجه شیب و انباشت جریان محاسبه شد. لایه انباشت جریان توسط ابزارهای هیدرولوژیکی برای حوضه قره‌سو در محیط GIS استخراج شد (Moore and Burch, 1986).

$$LS = (\text{Flow accumulation} \times \text{cell size}/22.13)^{0.6} * (\sin \text{slope} \times 0.0896)^{1.3} \quad (\text{رابطه ۵})$$

میانگین شیب حوضه ۱۶,۴ درجه است که شیبی تند را برای حوضه نشان می دهد که گویای موقعیت کوهستانی حوضه قره‌سو است. همچنین میانگین مقدار فاکتور LS محاسبه شده بوسیله رابطه ۵ مقدار ۵,۱۹ است. بیشترین مقدار فاکتور LS برای در نواحی کوهستانی و با شیب زیاد برابر با ۵۵,۳ است و در مناطق جلگه‌ای حوضه این مقدار نزدیک به صفر را نشان می دهد. فاکتور 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 میدهد (Veihe, 2002). این فرآیندها با وسیله خصوصیات خاک مانند، اندازه ذرات، ثبات ساختاری، مقدار ماده آلی و ماهیت مواد معدنی تحت تاثیر قرار می گیرد، از اینرو بافت خاک یک عامل مهم است و فرسایش پذیری را تحت تاثیر قرار می دهد. در این مطالعه، اطلاعات بافت خاک با استفاده از نمونه های خاک اخذ شده از سازمان جهاد کشاورزی برای ۳۰ نمونه خاک ایجاد شد. فرسایش پذیری خاک با استفاده از مثلث مقدار K (شکل ۵) بر اساس بافت خاک پیشنهاد شده برآورد شد (Monchareonm., 1982). پس از ورود اطلاعات از روش کریجینگ برای درون یابی اطلاعات و بدست آوردن لایه فاکتور K استفاده شد. مقادیر بدست آمده از ۰,۳ تا ۰,۳۸۵ متغیر است. کمترین مقدار بدست آمده برای خاک های شنی و بیشترین مقدار در نواحی با خاک های سیلتی لومی است. میانگین فاکتور K در سطح حوضه معادل ۰,۲۳ است. فاکتور پوشش گیاهی (C): این فاکتور، 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 میباشد (Wischmeier and Smith, 1978:28). پرکاربردترین معیار رویش گیاهی، شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) است که با استفاده از فناوری سنجنش از دور به دست می آید. این شاخص معرف انعکاس انرژی خورشیدی از سطح زمین است که انواع شرایط پوشش گیاهی را نشان می دهد. مقادیر NDVI بین -۱ و +۱ در نوسان است. رابطه بین C و NDVI می تواند به صورت زیر ایجاد گردد.

$$NDVI = \frac{NIR-IR}{NIR+IR} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$C = \text{EXP} \left[ -\alpha \frac{NDVI}{\beta - NDVI} \right] \quad (\text{رابطه ۷})$$

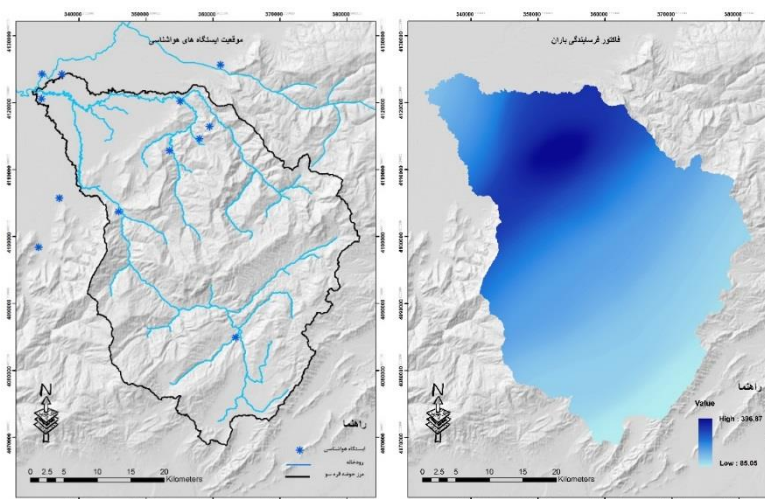
که در آن  $\alpha$ ،  $\beta$  پارامترهای بدون واحد هستند و مقادیر آن به ترتیب برابر ۲ و ۱ است (Van der Knijff, 2000) در نتیجه مقدار C در هر سلول می تواند مورد محاسبه قرار گیرد در این پژوهش، نقشه فاکتور C براساس NDVI تهیه گردید. در حقیقت این فاکتور به طور کامل با NDVI، رابطه معکوس با دارد. از آنجا که تغییرات پوشش زمین می تواند

ناشی از تغییر پوشش گیاهی در منطقه باشد این فاکتور در دوره زمانی ۳۰ ساله توسط سه تصویر ماهواره‌ای لندست استخراج شد. سه تصویر مورد استفاده مربوط به اوایل فصل تابستان می باشد و از این رو پوشش گیاهی در بیشینه فصل رشد خود است. بر این اساس می توان برآوردی مناسب از کیفیت پوشش گیاهی نیز بدست آورد. میانگین مقادیر فاکتور پوشش گیاهی برای سال‌های ۱۹۸۵، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۵ مقدار ۰،۳۹۱۳، ۰،۳۹۹۵ و ۰،۴۰۷۴ است.

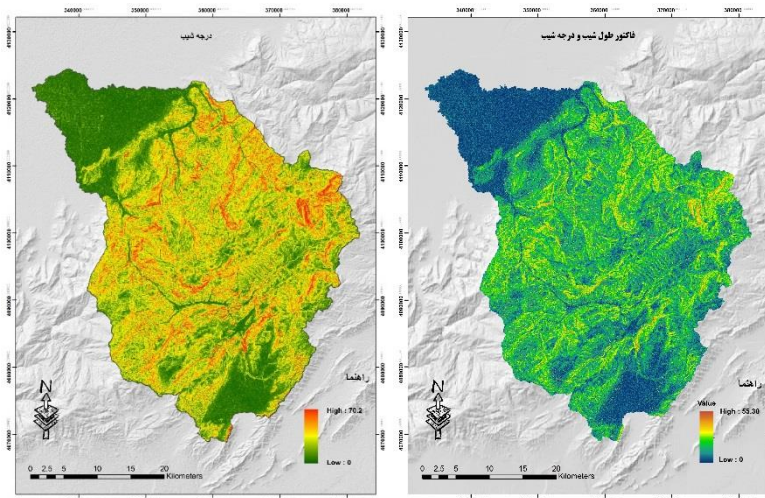
فاکتور عملیات حفاظتی (P): کشت و کار در اراضی شیب دار نیاز به عملیات حفاظتی جهت حفظ آب و خاک دارد. این عملیات باعث کاهش سرعت هرزآب تا زیر حد آستانه بروز فرسایش می شود و به این لحاظ از قدرت فرساینده‌گی آب و ظرفیت حمل آن می کاهد. عملیات حفاظتی شامل کشت کنتوری، سیستم ترانس بندی، آبراهه های پوشش دار و... می باشد. فاکتور P نسبت خاک فرسایش یافته، در شرایط انجام عملیات حفاظتی به فرسایش ایجاد شده در شرایط استاندارد یعنی شخم در جهت شیب است (زنارد و همکاران، ۱۹۹۷). در این مطالعه، مقادیر فاکتور P از طریق طبقه بندی تصاویر ماهواره ای برای سال های ۱۹۸۵ و ۲۰۰۰ و ۲۰۱۵ و براساس مقادیر داده شده در جدول ۱ تعیین شدند.

جدول ۱: ارزش P برای کاربری و پوشش گیاهی متفاوت (Deore,2005)

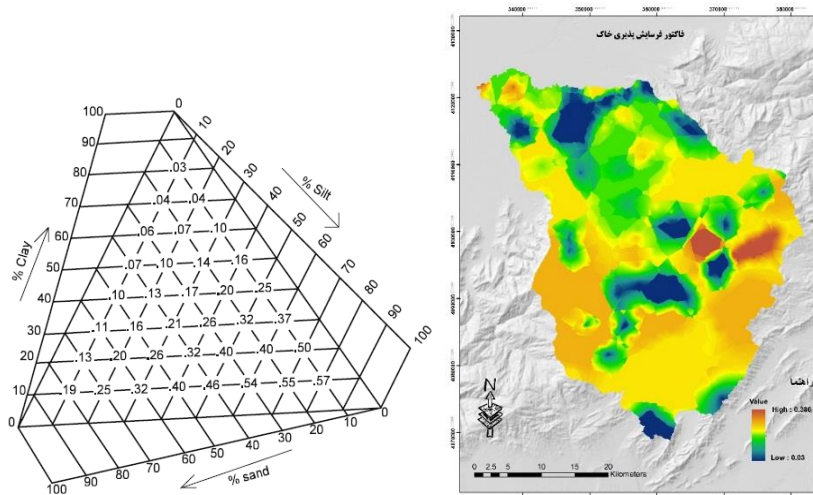
کاربری زمین	ارزش عددی P
اراضی بایر	۱
نیشکر	۰،۱۲
کشت دیم	۰،۱
جنگل تنک	۰،۸
اراضی آیش	۱
مرتع	۰،۸
جنگل با تراکم زیاد	۱
بستر رود	۱



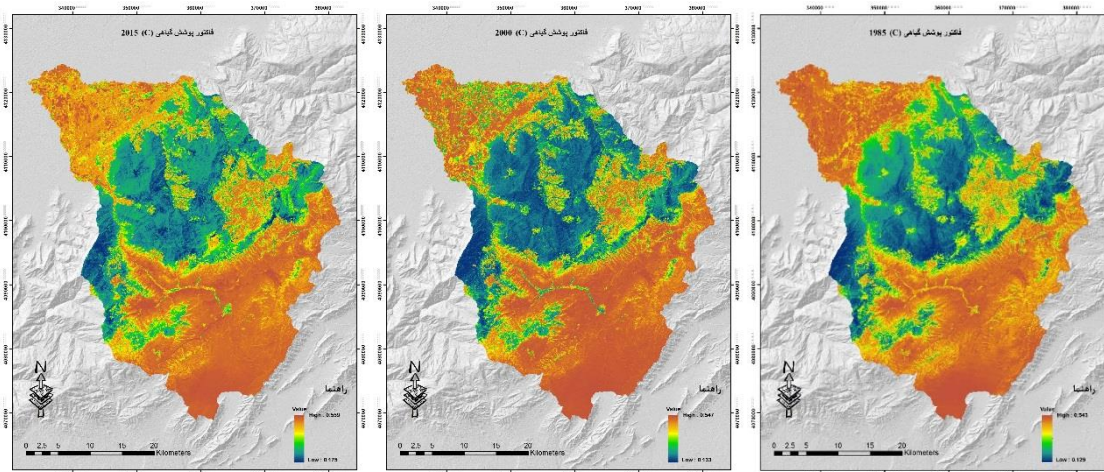
شکل ۳: نقشه موقعیت ایستگاه های هواشناسی و فاکتور فرساینده گی باران (R)



شکل ۴: نقشه فاکتور (LS) و درجه شیب



شکل ۵: نقشه فاکتور فرسایش پذیری خاک (K) و مثلث تخمین فاکتور K (Bahadur,2009)



شکل ۶: فاکتور پوشش گیاهی (C) سال های ۱۹۸۵، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۵



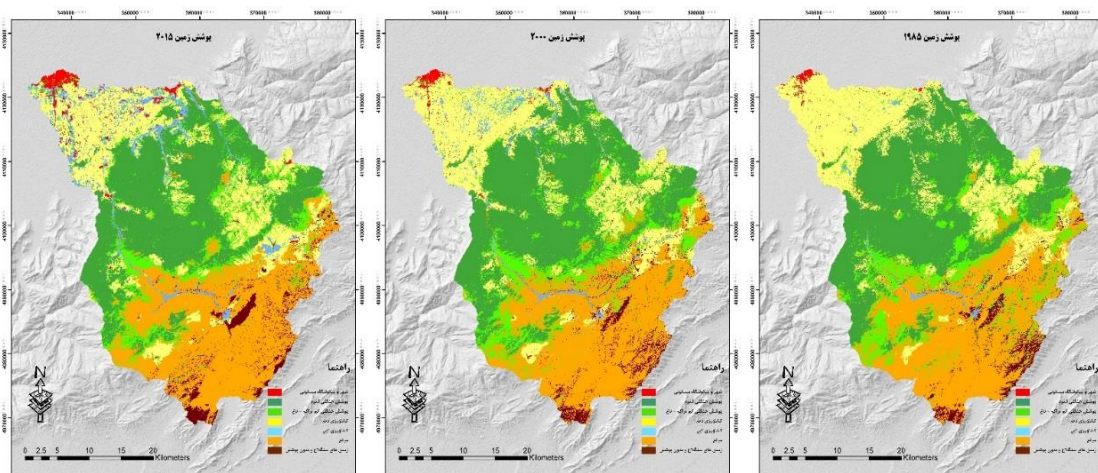
## شرح و تفسیر نتایج

### - تغییرات پوشش زمین

طبقه بندی تصاویر سنجنده های TM، ETM و OLI ماهواره لندست منطقه مورد مطالعه برای سال های ۱۹۸۵، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۵ با استفاده از روش طبقه بندی نظارت شده بیشترین احتمال بدست آمد. جدول ۲ تغییرات پوشش زمین را در بازه زمانی ۳۰ ساله در حوضه آبخیز قره‌سو نشان می‌دهد. از مهم ترین تغییرات در این مدت می توان به افزایش زمین های کشاورزی و تغییرات سطح زیر کشت کشاورزی آبی، کاهش مساحت جنگل های متراکم و افزایش مساحت سکونتگاه های انسانی، زمین های بایر و مراتع در مقابل کاهش پوشش جنگلی اشاره کرد. از طرف دیگر تغییرات کاربری در فاصله ۱۵ ساله دوم بیشتر از ۱۵ سال اول است، به شکلی که در بعضی از کاربری‌ها این تغییرات در ۱۵ سال دوم ۲ برابر است. بیشترین تغییرات مربوط به کشاورزی آبی است که در طی ۳۰ سال رشدی هفت برابر داشته و به نوعی نشان‌دهنده تغییرات الگوی کشت و نوع گیاهان است. همچنین پوشش جنگلی متراکم که در طی این مدت بیش از ۵۰ کیلومتر مربع از مساحت آن کاسته شده است. نکته حائز اهمیت دیگر در مورد کاربری شهر و سکونتگاه مسکونی است که رشدی بیش از سه برابر داشته است که با رشد زمین‌های غیر قابل نفوذ بر فرآیند های حاکم بر حوضه تاثیرگذار است. غالب سکونتگاه‌های موجود در حوضه در محدوده جلگه ای حوضه قرار دارد که شامل بخش هایی از شهرهای مینودشت، گنبدکاووس و روستاها است که در طی ۳۰ سال به وسعت آنها افزوده شده است.

### - پتانسیل فرسایش خاک

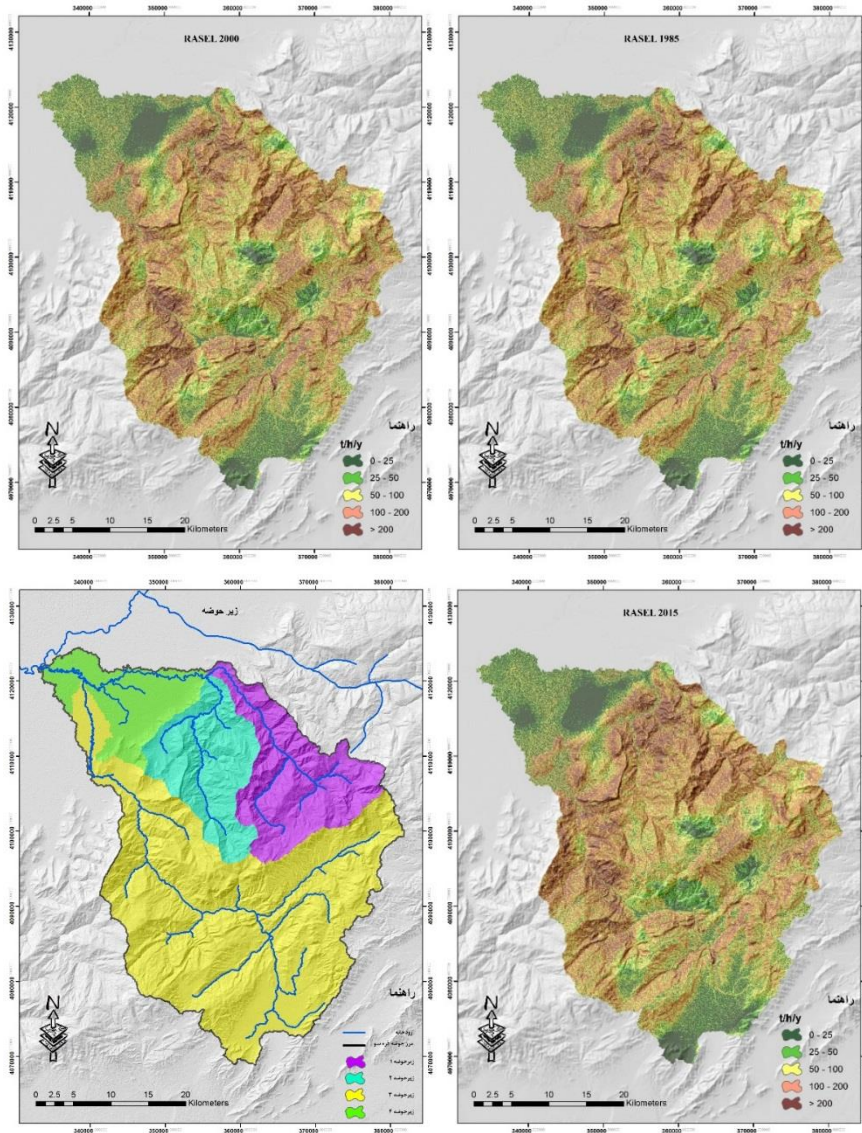
نتایج بدست آمده از مدل RUSLE در حوضه آبخیز به پنج کلاس از نظر مقدار فرسایش خاک در ۳ سال مورد بررسی تقسیم شد که نشان دهنده حساسیت خاک در برابر فرسایش است. بر اساس اطلاعات جدول ۳، تغییرات مساحت کلاس‌ها نشان دهنده گرایشی کلی در حوضه آبخیز به سمت افزایش هدر رفت و فرسایش خاک است، از این جهت حوضه قره‌سو از جمله حوضه‌هایی است که پتانسیل فرسایش خاک در آن رو به افزایش می باشد. در نواحی هموار و جلگه ای حوضه که به طور عمده زیرکشت محصولات کشاورزی می باشد، این مقدار متفاوت با دیگر مناطق است و به سمت کاهش هدر رفت خاک است که برآیند تغییرات الگوی کشت از سنتی به مدرن، افزایش مساحت کشاورزی آبی، انتخاب گیاهان سازگارتر با محیط و همچنین افزایش مساحت شهرها و روستاها از ۷،۱۴ درصد به ۲۹،۰۴ درصد در طی سی سال است. در کلاس های مورد بررسی برای خروجی مدل RUSLE در هر سه سال مورد بررسی بیشترین مساحت مربوط به کلاس ۱۰۰ تا ۲۰۰ تن در سال می باشد که بیشتر در نواحی کوهستانی دیده می‌شود. در این مناطق به غیر از فاکتور پوشش گیاهی، همه فاکتور ها مساعد برای از دست رفتن خاک می باشد. همچنین در طی ۳۰ سال، میزان پوشش گیاهی متراکم از ۳۴،۶۵ به ۳۱،۵۵ درصد کاهش یافته و عملاً تنها فاکتور موثر در نگه داشت خاک در این نواحی مستعد فرسایش جای خود را به پوشش هایی با توانایی کمتر در نگه داشت خاک داده است. از این رو مساحت این مناطق افزایش یافته و حوضه آبخیز قره‌سو را با چالش افزایش هدر رفت خاک در محدوده های جنگلی و کوهستانی روبرو کرده است. از طرفی محدوده های با بیش از ۲۰۰ تن در هکتار که کمترین مقدار را دارا هستند نیز در طی ۳۰ سال مورد بررسی افزایشی محسوس یافته و مقدار آن از ۱۱،۷۴ درصد به ۱۲،۵۰ درصد داشته است. این نواحی غالباً در قسمت‌های کوهستانی و بدون پوشش گیاهی قرار دارند. همچنین براساس جدول ۴ میانگین پتانسیل فرسایش خاک برآورد شده در حوضه قره‌سو برای ۱۹۸۵، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۵ به ترتیب ۱۰۲،۰۲، ۱۰۳،۱۱ و ۱۰۳،۷۶ تن در هکتار در سال است. این مقدار در زیر حوضه‌ها نیز بدست آمد و به غیر از زیرحوضه ۴ که موقعیت آن در نواحی جلگه ای شمال حوضه و با کاربری کشاورزی است، در زیر حوضه های دیگر با روندی افزایشی همراه است.



شکل ۷: نقشه طبقه بندی پوشش زمین در سال های ۱۹۸۵، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۵

جدول ۲: مساحت پوشش زمین در سال های ۱۹۸۵، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۵ (کیلومتر مربع)

تغییرات	درصد	۲۰۱۵	درصد	۲۰۰۰	درصد	۱۹۸۵	کاربری زمین
۲۰۱۵-۱۹۸۵							
-۳,۱	۳۱,۵۵	۴۸۹,۸۴	۳۳,۴۶	۵۱۹,۶	۳۴,۶۵	۵۳۸,۰۴	پوشش جنگلی متراکم
-۱,۵۰	۹,۹۳	۱۵۴,۱۲	۱۰,۸۲	۱۶۸,۰۲	۱۱,۴۳	۱۷۷,۴۲	پوشش جنگلی کم تراکم - باغ
۱,۴۱	۱,۸۷	۲۹,۰۴	۰,۷۹	۱۲,۱۹	۰,۴۶	۷,۱۶	شهر و سکونتگاه مسکونی
-۲,۱۴	۲۰,۲۲	۳۱۳,۹۴	۲۱,۹۳	۳۴۰,۴۳	۲۲,۳۶	۳۴۷,۱۹	کشاورزی دیم
۳,۹۳	۴,۶۸	۷۲,۶۱	۲,۱۹	۳۳,۹۵	۰,۷۵	۱۱,۶۷	کشاورزی آبی
۰,۹۰	۲۸,۴۱	۴۴۱,۱۸	۲۷,۷۹	۴۳۱,۴۸	۲۷,۵۱	۴۲۷,۱۹	مرتع
۰,۵۰	۳,۳۴	۵۱,۹۴	۳,۰۳	۴۷,۰۱	۲,۸۴	۴۴,۰۲	زمین های بدون پوشش
	۱۰۰	۱۵۵۲,۶۸	۱۰۰	۱۵۵۲,۶۸	۱۰۰	۱۵۵۲,۶۸	مجموع



شکل ۸: نقشه پتانسیل فرسایش خاک برای سال‌های ۱۹۸۵، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۵ و زیرحوضه‌های اصلی حوضه قره‌سو

جدول ۳: مساحت کلاس‌های پتانسیل فرسایش خاک برای سه سال مورد مطالعه

میزان تغییرات	۲۰۱۵		۲۰۰۰		۱۹۸۵		تن در هکتار در سال	پتانسیل فرسایش
	درصد	مساحت (m <sup>2</sup> )	درصد	مساحت (m <sup>2</sup> )	درصد	مساحت (m <sup>2</sup> )		
۰،۴۴%	۱۵،۱۷%	۲۴۴،۷۱	۱۵،۴۸%	۵۴۰،۳۶	۱۵،۳۲%	۲۳۷،۸۳	۰-۲۵	کم
-۰،۷۶%	۱۳،۱۱%	۲۰۳،۶۱	۱۳،۳۳%	۲۰۷،۰۱	۱۳،۸۷%	۲۱۵،۴۲	۲۵-۵۰	متوسط
-۱،۴۰%	۲۵،۵۶%	۳۹۶،۹۴	۲۶،۴۴%	۴۱۰،۵۰	۹۶،۹۶%	۴۱۸،۶۸	۵۰-۱۰۰	زیاد
۰،۹۶%	۳۳،۰۶%	۵۱۳،۳۳	۳۲،۶۴%	۵۰۶،۷۴	۳۲،۱۰%	۴۹۸،۴۱	۱۰۰-۲۰۰	خیلی زیاد
۰،۷۶%	۱۲،۵۰%	۱۹۴،۰۸	۱۲،۱۱%	۱۸۸،۰۶	۱۱،۷۴%	۱۸۲،۳۴	۲۰۰<	بحرانی
۰%	۱۰۰%	۱۵۵۲،۶۸	۱۰۰%	۱۵۵۲،۶۸	۱۰۰%	۱۵۵۲،۶۸	جمع کل	

جدول ۴: میانگین پتانسیل فرسایش خاک برای زیرحوضه ها

حوضه	میانگین ۱۳۸۵	میانگین ۲۰۰۰	میانگین ۲۰۱۵
زیرحوضه ۱	۱۱۵,۵۵	۱۱۷,۴۰	۱۲۴,۴۹
زیرحوضه ۲	۱۳۱,۰۸	۱۳۴,۵۶	۱۴۱,۳
زیرحوضه ۳	۱۰۳,۷۴	۱۰۳,۷۵	۱۰۴,۰۹
زیرحوضه ۴	۵۲,۵۴	۴۹,۴۶	۴۵,۸۴
میانگین کل حوضه	۱۰۲,۰۲	۱۰۳,۱۱	۱۰۳,۷۶

### نتیجه گیری

خاک به عنوان یکی از مهمترین منابع طبیعی نقش بسیار عمده ای در زندگی انسان را دارا می باشد. امروزه فرسایش خاک و تولید رسوب، معضلی است که روز به روز روند افزایشی پیدار می کند و باعث از دست رفتن خاک های سطحی و انباشت رسوب حاصل از آنها در مخازن سدها، رسوبگذارب در کانالها و خسارت هنگفت به اقتصاد کشور می شود (نیک پور و همکاران، ۱۳۹۶). آگاهی از میزان فرسایش خاک در آبخیزها، امکان شناسایی نواحی بحرانی و آسیب پذیر را ممکن کرده و امکان اولویت بندی برنامه های مدیریتی و حفاظتی را فراهم می سازد. این پدیده در هر مکانی متأثر از عوامل محیطی و انسانی است. نتایج بدست آمده از مدل RUSLE نشان دهنده رابطه تنگاتنگ پوشش زمین بر میزان هدر رفت خاک در حوضه آبخیز قره سو است. بررسی تغییرات پوشش زمین با استفاده از ابزار سنجش از دور در حوضه قره سو کاهش پوشش های جنگل متراکم، جنگل با تراکم کم و مرتع در برابر افزایش سطوح کشاورزی، زمین های بدون پوشش و سکونتگاه های انسانی در طی بازه سی ساله را نشان می دهد. رشد نواحی غیرقابل نفوذ بوسیله فعالیت های انسانی، رشد مناطق شهری و روستایی، تغییرات الگوی کشت و تخریب پوشش گیاهی و مراتع هر یک به نحوی در این تغییرات موثر هستند. بر اساس نتایج مدل RUSLE گرایش در حوضه آبخیز به سمت افزایش پتانسیل فرسایش خاک در نتیجه روند تغییرات پوشش و کاربری زمین است. این فرسایش با رشد میانگین ۱,۷۴ (تن در هکتار در سال) پتانسیل فرسایش خاک و رشد محدوده های با ریسک بالا برای فرسایش در کل محدوده حوضه قابل بررسی است. براساس بررسی نتایج محدوده های کوهستانی حوضه قره سو به دلیل تجمع فاکتورهای دخیل در افزایش پتانسیل هدر رفت خاک دارای بیشترین آسیب بوده و ضرورت انجام برنامه های آبخیزداری به شکلی واضح دیده می شود، زیرا بیشترین تغییرات کاربری در این نواحی با حذف پوشش جنگلی به عنوان محافظی موثر برای خاک و جایگزینی زمین های کشاورزی و مراتع ایجاد شده است. همچنین اصلاح الگوی کشت و آموزش ملاحظات حفاظت خاک در زمین های کشاورزی موجود در کوهپایه ها و دامنه ها امری الزامی است. بررسی ها در سطح زیر حوضه ها نشان می دهد با تغییرات انجام شده در طی مدت سی ساله در نوع و الگوی کشت و انتخاب گیاهان سازگارتر در سطح زیر حوضه ۴ با کاربری غالب کشاورزی مقدار پتانسیل فرسایش کاهشی محسوس یافته است، که بازگو کننده نقش مهم برنامه ریزی در حفظ منابع خاک است. در نهایت می توان به این نتیجه رسید که افزایش پتانسیل فرسایش خاک در اغلب موارد در نتیجه دخالت عوامل انسانی است و این روند تغییر نخواهد کرد، مگر با تغییر در تعامل انسان با طبیعت و نحوه استفاده از زمین. در این زمینه مهم ترین اصل آموزش انسانی در زمینه های حفاظت از منابع آب و خاک و محیط زیست و انجام مطالعات و برنامه ریزی با نگاه آمایشی، باز طراحی الگوهای آبیاری و استفاده از روش های بهینه و برای بهره گیری مناسب از زمین با کمترین آسیب در محدوده مطالعه است.

## منابع

- آرخی، صالح؛ نیازی، یعقوب. ۱۳۸۹. بررسی کاربرد برای تخمین فرسایش خاک و بار رسوب با استفاده از مدل RUSLE (مطالعه موردی: حوضه بالادست سد ایلام)، مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۱۷: ۱-۲۷.
- رضائی، پیمان؛ فریدی، پروانه؛ قربانی، منصور؛ کاظمی، محمد. ۱۳۹۳. برآورد فرسایش خاک با استفاده از مدل و شناسایی مؤثرترین عامل آن در حوضه آبخیز گابریک - جنوب خاوری استان هرمزگان، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، سال سوم، شماره ۱: ۹۷-۱۱۳.
- کرم، امیر؛ صفریان، آمنه؛ حجه فروش نیا، شیلا. ۱۳۸۹. برآورد و پهنه بندی فرسایش خاک در حوضه ماملو (شرق تهران) با استفاده از روش های معادله اصلاح شده جهانی فرسایش خاک و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، پژوهش های دانش زمین، ۲: ۸۶-۷۳.
- نیک پور، نورالله؛ فتوحی، صمد؛ نگارش، حسین؛ سیستانی، مسعود. ۱۳۹۶. مورفومتری فرسایش آبکندی و عوامل موثر بر ایجاد و گسترش آن (حوضه ی دشت چم فاضل در جنوب غرب استان ایلام)، تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، دوره ۴، ۱، ۹۷-۱۱۲.
- Ahmed, T. 2000. Fuzzy class membership approach to soil modeling, *Agricultural Systems*, 63: 97-110.
- Alkharabsheh, M. M., Alexandeidis, T. K., Bilas, G., Misopolinos, N., & Silleos, N. 2013. The Impact of Land Cover Change on soil erosion hazard in northern Jordan using remote sensing and GIS. *Procedia Environmental Sciences*, 19: 912-921. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.101>
- Bahadur, K. C. Krishna. 2009. Mapping soil erosion susceptibility using remote sensing and GIS: a case of the Upper Nam Wa Watershed, Nan Province, Thailand. *Environ Geol*, 57:695-705. DOI 10.1007/s00254-008-1348-3
- Bartsch, KP. Van Miegroet, H., Boettinger, J., Dobrwolski, JP. 2002. Using empirical erosion models and GIS to determine erosion risk at Camp Williams, *Journal of Soil and Water Conservation*, 57: 29-37.
- Benkobi, L., Trlica, M.J., and Smith, J.L. 1994. Evaluation of a refined surface cover subfactor for use in RUSLE. *J. Range Manage.* 47: 74-78. <https://doi.org/10.2307/4002845>
- Biesemans, J., Meirvenne, M.V., and Gabriels, D. 2000. Extending the RUSLE with the Monte Carlo error propagation technique to predict long-term average off-site sediment accumulation. *J. Soil Water Conservation*, 55: 35-42.
- Boardman J., Ligneau L., De Roo A.P.J., and Vandaele K. 1994. Flooding of property by run off from agricultural land in northwestern Europe. *Geomorph*, 10: 183-196. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-82012-9.50017-7>
- Bruce, R.R., Langdale, G.W., East, L.J., and Miller, W.P. 1995. Surface soil degradation and soil productivity restoration and maintenance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 654-660. doi:10.2136/sssaj1995.03615995005900030003x
- Chakroun, H., Bonn, F., Fortin, J.P., 1993, Combination of single storm erosion and hydrological models into a geographic information system, *Farm Land Erosion: In Temperate Plains Environment and Hills*, 261-270. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-81466-1.50027-7>
- Clark R.D. 1980. Erosion condition classification system. Bureau of Land Management, Denver Service Center, Denver CO.
- 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.
- Fox, A.D., Desholm, M., Kahlert, J., Christensen, T.K., and Petersen, K. 2006. Information needs to support environmental impact assessment of the effects of European marine offshore wind farms on birds. *Special Issue: Wind, Fire and Water: Renewable Energy and Birds*. 148: 129-144. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919x.2006.00510.x>
- Garcia-ruiz, j. m. 2010. The effects of land uses on soil erosion in Spain: A review. *Catena*, 81(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.01.001>
- Haan, C.T., Barfield, B.J., and Hayes, J.C. 1994. Design hydrology and sedimentology for small catchments. Academic Press, San Diego.
- Haen HD. 1991. Environmental consequences of agricultural growth In: Vosti SA, Reardon T, Winfried Von Urff (eds) *Agricultural sustainability, growth and poverty alleviation and policies*, Feldafing.
- Laflen, J.M., Lane, L.J., Foster, G.R. 1991. WEPP: a new generation of erosion prediction technology, *Journal of Soil and Water Conservation*, 46, No. 1, PP. 34-38.
- McCool, D.K., Brown, L.C., and Foster, G.R. 1987. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 30: 1387-1396. <https://doi.org/10.13031/2013.30576>

- Millward, A.A., and Mersey, J.E. 1999. Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed. *Catena*, 3: 109-129. [https://doi.org/10.1016/s0341-8162\(99\)00067-3](https://doi.org/10.1016/s0341-8162(99)00067-3)
- Monchareon L. 1982. Application of soil maps and report for soil and water conservation. Department of land development, Bangkok.
- Moore, I., Burch, G., 1986, Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation, *Soil Science Society of America Journal*, 50: 1294–1298. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000050042x>
- Pacheco F.A.L., Varandas S.G.P., Fernandes L.S., Junior R.V. 2014. Soil losses in rural watersheds with environmental land use conflicts. *Sci. Total Environ.* 485: 110 - 120
- Pimental D., Harvey C., Resosudarmo P., Sinclair K., Kurz D., McNair M., Crist S., Shpritz L., Saffouri R., and Blair R. 1995. Environmental costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 267: 1117-1123.
- Renard, K. G., & Freimund, J.R. 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R factor in the revised USLE, *J. Hydrol*, 157: 287-306. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4)
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A. & Porter, J.P., 1991, RUSLE: revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46: 30-33.
- Van der Knijff, J.M., Jones, R.J.A., Montanarella, L. 2000. Soil Erosion Risk Assessment in Europe, EUR 19044 EN. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Veihe, A. 2002. The spatial variability of erodibility and its relation to soil types: a study from northern Ghana, *Geoderma*, 106: 101-120. [https://doi.org/10.1016/s0016-7061\(01\)00120-3](https://doi.org/10.1016/s0016-7061(01)00120-3)
- Wang, G., Gertner, G., Fang, S., and Anderson, AB. 2003. Mapping multiple variables for predicting soil loss by geostatistical methods with TM images and a slope map. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69: 889-898. <https://doi.org/10.14358/pers.69.8.889>
- Wijitkosum S. 2012, Impacts of land use changes on soil erosion in Pa Deng sub-district, adjacent area of Kaeng Krachan National Park, Thailand. *Soil and Water Research*, 7(1): 10-17.
- Williams JR. 1975. Sediment routing for agricultural watersheds. *Water Resour Bull* 11: 965–974. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1975.tb01817.x>
- Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion. Losses: a guide to conservation planning. *Agriculture Handbook*, Vol. 537. US Department of Agriculture, Washington, DC.