

## ارزیابی تأثیر تغییرات کاربری اراضی و بارش بر فرسایش و رسوب با استفاده از سنجش از دور و GIS (مطالعه موردی: حوضه پایین دست سد ایلام)

صالح آرخی\* - استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه گلستان، گرگان.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۰      تأیید نهایی: ۱۴۰۰/۰۶/۱۴

### چکیده

فرسایش خاک و تولید رسوب امروزه به یکی از معضلات مهم زیست محیطی بشر تبدیل شده است. بنابراین مدیریت خاک به منظور بهره برداری مطلوب و کاهش تخریب آن ضروری می‌باشد. در این پژوهش اثر تلفیقی کاربری اراضی و بارش با استفاده از معادله تجدید نظر شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE) و با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای ETM+ سال ۱۳۸۳ و OLI سال ۱۳۹۸ فرسایش و رسوب حوضه پایین دست سد ایلام برای سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۹۸ تهیه و با یکدیگر مقایسه شد. نتایج پژوهش نشان داد که میانگین فرسایش در سال ۱۳۸۳، ۴۹/۸۹ تن در هکتار در سال بوده است که در سال ۱۳۹۸ مقدار آن به ۶۲/۸۰ تن در هکتار در سال رسیده است که افزایش قابل توجهی را در طول ۱۵ سال مطالعه نشان می‌دهد. مضافاً، مقدار رسوب از ۰ تا ۸۱۱۰۱ تن در سال ۱۳۸۳ به ۰ تا ۱۰۲۰۴۱ تن در سال ۱۳۹۸ رسیده است و افزایشی به میزان ۲۰۴۹۰ تن تجربه نموده که افزایش رسوبی معادل ۴/۷۷ تن در هکتار در طول دوره مطالعه شاهد بودیم که رقم قابل ملاحظه‌ای خواهد بود. بر اساس نتایج، افزایش جزئی بارندگی نه تنها باعث افزایش پوشش گیاهی نشده بلکه به دلیل تخریب آن در طول دوره مطالعه باعث افزایش قدرت فرساینده‌گی باران و در مجموع باعث افزایش فرسایش و رسوب گردیده است. نتایج این پژوهش اتخاذ استراتژی‌های مدیریتی مناسب را برای تصمیم‌گیران در اولویت‌بندی نواحی برای کاهش فرسایش خاک و رسوب در حوضه آبخیز مورد مطالعه امکان‌پذیر می‌سازد.

واژگان کلیدی: تغییرات فرسایش و رسوب، مدل RUSLE، تصاویر ماهواره‌ای OLI-ETM+، حوضه آبخیز پایین دست سد ایلام.

## مقدمه

انسان برای ادامه حیات خود به مواد غذایی نیاز دارد که در اثر وجود آب و خاک بدست می‌آید. نابودی و تخریب خاک بر اثر بارش و عمل آبهای روان یکی از جدی‌ترین مشکلات زیست محیطی عصر حاضر است. فرسایش آبی از مهم‌ترین انواع تخریب سرزمین در بیشتر نقاط ایران است که سبب از بین بردن خاک‌های حاصل‌خیز و زمین‌های کشاورزی می‌شود (میرکر و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۷). گزارش‌ها نشان می‌دهد حدود ۳۵ میلیون مترمربع از اراضی کشور ایران تحت تاثیر فرسایش آبی قرار دارد (ذاکرنژاد و میرکر<sup>۲</sup>، ۲۰۱۵). به طور متوسط، فرسایش خاک در ایران سه برابر بیشتر از سایر کشورهای آسیایی و ۲۰ برابر میانگین جهانی است. فرسایش خاک در ایران هزینه زیادی دارد و تقریباً ۵۶ تا ۱۱۲ میلیارد دلار در سال است و بسته به میزان فرسایش خاک در هر سال این مقدار تغییر می‌کند. عوامل زیادی در نوع و میزان فرسایش خاک در یک حوضه آبخیز مؤثرند (صادقی، ۱۳۹۴). یکی از این عوامل نوع استفاده از اراضی است که به ویژه در دهه‌های اخیر با تغییرات گسترده‌ای که در نتیجه پیشرفت‌های فناوری در طبیعت انجام شده، نقش زیادی در افزایش مقدار فرسایش داشته است (گارسپارویز و همکاران<sup>۳</sup>، ۱۹۹۶). واکش رواناب و رسوب خروجی حوضه آبخیز به ویژگی‌های فیزیوگرافی، الگوی پراکنش کاربری اراضی، نوع خاک، شدت و مدت وقوع بارندگی و دخالت‌های انسانی بستگی دارد که در میان آنها نقش کاربری اراضی دارای اهمیت بیشتری است (طالبی‌خیای، ۱۳۹۶). تاکنون مدل‌های زیادی جهت برآورد فرسایش خاک و توسعه طرح‌های مدیریتی فرسایش خاک ارائه شده است که از مهمترین این مدل‌ها، می‌توان به معادله‌های جهانی فرسایش خاک<sup>۴</sup> (ویشمایر و اسمیت<sup>۵</sup>، ۱۹۷۸)، پروژه پیش‌بینی فرسایش آبی<sup>۶</sup> (فلینگان و نیرینگ، ۱۹۹۵)، ابزار ارزیابی خاک و آب<sup>۷</sup> (آرنولد و همکاران<sup>۸</sup>، ۱۹۹۸) و مدل اروپایی فرسایش خاک<sup>۹</sup> (مورگان و همکاران<sup>۱۰</sup>، ۱۹۹۸) اشاره نمود. طی ۴۵ سال اخیر، مدل USLE به سبب داشتن محاسبات ساده، پرکاربردترین روش تخمین فرسایش خاک و برآورد تأثیرات عملیات‌های مدیریتی مختلف بر آن بوده است (کنیل<sup>۱۱</sup>، ۲۰۰۰). رابطه جهانی تجدید شده فرسایش خاک که روش مورد استفاده در پژوهش حاضر میباشد، به عنوان مدل توسعه یافته USLE برای پیش‌بینی فرسایش و رسوب خاک سالانه از یک سطح معین به شمار می‌آید (رنارد و فریموند<sup>۱۲</sup>، ۱۹۹۴).

تاکنون مطالعات گسترده‌ای در ارتباط با ارزیابی تغییرات بارش و کاربری اراضی روی فرسایش و رسوب صورت گرفته است که برخی از آنها به شرح زیر می‌باشند: لی و گائو<sup>۱۳</sup> (۲۰۱۵) تغییرات تولید رسوب و رواناب در پاسخ به تغییرات بارش را در حوضه آبخیز خیچوان در چین مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد با افزایش بارش، مقدار رواناب و رسوب زیاد شده و رواناب حساسیت بیشتری از رسوب نسبت به تغییرات بارش دارد. دو و همکاران<sup>۱۴</sup> (۲۰۱۳) اثرات بارش و پوشش گیاهی روی رواناب و تولید رسوب را در حوضه رودخانه جین‌شا مورد بررسی قرار دادند. تحلیل همبستگی‌ها نشان داد که تولید رواناب و رسوب ارتباط مثبتی با شاخص بارش دارند در حالی که با شاخص پوشش گیاهی رابطه منفی دارند. نتایج به

<sup>1</sup> -Maerker et al

<sup>2</sup> -Zakerinejad and Maerker

<sup>3</sup> -Garcia-Ruiz et al

<sup>4</sup> - Universal Soil Loss Equation (USLE)

<sup>5</sup> - Wischmeier and Smith.

<sup>6</sup> - Water Erosion Prediction Project (WEPP)

<sup>7</sup> - Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

<sup>8</sup> - Arnold et al

<sup>9</sup> - European Soil Erosion Model (EUROSEM)

<sup>10</sup> -Morgan et al

<sup>11</sup> - Kinnell

<sup>12</sup> - Renard and Freimund

<sup>13</sup> -Li and Gao

<sup>14</sup> -Du et al

دست آمده از پژوهش رومیایی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۷) از طریق مدل‌سازی پویا در جمهوری چک طی دهه نود دلالت بر کاهش حدود ۷۵ درصد رسوب ناشی از افزایش ۱۵۰ درصد وسعت اراضی مرتعی داشته است. چاکراپانی و سابرامانیا<sup>۲</sup> (۱۹۹۰) در بررسی فاکتورهای کنترل کننده دبی رسوب در رودخانه ماهانادی هندوستان دریافتند که دبی، بارندگی و زمین‌شناسی منطقه مهم‌ترین عوامل کنترل کننده دبی رسوب می‌باشند. علاوه بر آن بیش از ۹۵٪ حمل رسوبات مربوط به فصول بارانی سال می‌باشند. غفاری و مهدوی (۲۰۱۴) اثر دوره‌های خشکسالی و ترسالی بر میزان رسوب ویژه را در حوضه آبخیز کرخه مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه میزان بار رسوب در دوره‌های خشک کاهش و در دوره‌های تر افزایش قابل توجهی داشته است. به این صورت که در سال‌های مرطوب، به طور متوسط میزان رسوب ویژه ۱/۵۷ برابر سال‌های خشک است. نظری سامانی و همکاران (۲۰۱۳) تاثیر تغییر کاربری اراضی و تغییرات بارش بر تولید رسوب در حوضه آبخیز طالقان را مورد بررسی قرار دادند و با در نظر گرفتن دوره‌های ترسالی و خشکسالی، به این نتیجه رسیدند که علت کاهش رسوب افزایش اراضی رها شده کشاورزی می‌باشد.

سریکاور و هوفیرکا<sup>۳</sup> (۲۰۰۷) با مطالعه تاثیر تغییر کاربری در اسلواکی (۱۹۹۰-۲۰۰۰) به این نتیجه رسید که تغییرات پوشش زمین و کشت نوبتی تاثیرات آشکاری بر روی الگوی فرسایش خاک در قسمت دره‌ها و نواحی کوهستانی داشته است. این تغییرات عمدتاً به دلیل تغییر مداوم مالکیت اراضی، تغییر نوع محصولات، جنگل‌زدایی و جنگل‌کاری است. شارما و کملش<sup>۴</sup> (۲۰۱۰) با مطالعه اثر تغییر کاربری اراضی بر روی فرسایش با استفاده از معادله جهانی فرسایش خاک در حوضه آبخیز مایتون در هند در طی سالهای ۱۹۸۹ تا ۲۰۰۴ به این نتیجه رسیدند که تغییر کاربریها باعث فرسایش قابل توجهی در حوضه شده است که در سال ۱۹۸۹ مقدار فرسایش از ۱۲/۱۱ تن در هکتار در سال به ۱۳/۲۱ تن در هکتار در سال ۲۰۰۴ رسیده است. مارتینز-مورولو و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۱) به مدل‌سازی اثرات تغییرات کاربری زمین بر روی رواناب و فرسایش خاک در جنوب کشور اسپانیا پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزایش کشت دیم و تبدیل پوشش گیاهی به مناطق مسکونی و راه‌های ارتباطی به طور محسوسی باعث فرسایش خاک شده است. نالینا و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۴) به مطالعه تغییرات کاربری اراضی منطقه نیلجیس کشور هندوستان پرداختند. نتایج نشان داد که فعالیت کشاورزی در اراضی شیب‌دار کوهستانی طی این دوره به سرعت افزایش یافته است. داسیلوا و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۱۶) به مطالعه تأثیر تغییرات کاربری زمین بر عملکرد فرسایش خاک در رودخانه سانفرانسیسکو در ایالات متحده آمریکا پرداختند و معتقدند که تغییرات کاربری اراضی باعث تغییر در دسترسی به منابع آب شده است و همین عامل باعث ایجاد کشت دیم و افزایش فرسایش در منطقه شده است. سانتوس و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۱۷) به بررسی تغییرات کاربری اراضی و نقش آن بر فرسایش خاک در کشور برزیل پرداختند و نتایج به دست آمده نشان داد که سطح زمین‌های کشاورزی و مراتع کاهش یافته و میزان فرسایش در این مناطق ۱۰ برابر افزایش داشته است. سینگ و همکاران<sup>۹</sup> (۲۰۲۰) به بررسی تغییرات کاربری اراضی بر روی تالاب هارایک در ایالت پنجاب کشور هندوستان پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که در طی بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۸ تأثیرات منفی عوامل انسانی همچون کشت بیرویه و عدم اختصاص حق آبه مورد نیاز تالاب سبب کاهش وسعت پهنه آبی و نیز فرسایش خاک شده است.

<sup>1</sup>- Rompaey et al

<sup>2</sup>- Chakrapani and Subramania

<sup>3</sup>- Cebecauer and Hofierka

<sup>4</sup>- Sharma and Kamlesh

<sup>5</sup>- Martínez-Murillo et al

<sup>6</sup>- Nalina et al

<sup>7</sup>- Da Silva et al

<sup>8</sup>- Santos et al

<sup>9</sup>-Singh et al

در ایران، برآورد فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE در حوضه زیارت از زیرحوضه‌های قره‌سو در گرگان نشان داد که میانگین مقدار فرسایش خاک برابر ۷/۵ تن در هکتار در سال است (رضائی و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۷). اسفندیاری و همکاران (۲۰۱۴) در مطالعه‌ای در حوضه رود ارس، به بررسی تأثیر کاربری اراضی بر فرسایش پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که کاربری زراعی از بیشترین پتانسیل برای فرسایش برخوردار است و مراتع از کمترین پتانسیل. مرادی و همکاران (۲۰۱۶) به ارزیابی تغییر کاربری اراضی مرتعی به دیمزار در دو شهرستان رابر و ارزوئیه پرداختند. نتایج نشان داد که گسترش فعالیت‌های زراعی سبب می‌شود مراتع به زمینهای کم بازده تبدیل شود. فیضی زاده (۲۰۱۷)، تغییرات کاربری اراضی و نقش آن در فرسایش حوضه علویان را بررسی کردند. آنها دریافتند که تبدیل اراضی مرتعی پر تراکم به مراتع کم تراکم و زراعت دیم، مهمترین عامل در فرسایش منطقه است. محمدی و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از مدل RUSLE میانگین فرسایش در مقیاس کشور ایران را ۲۴ تن در هکتار در سال برآورد نمودند و نقش عامل توپوگرافی را بیش از سایر عوامل مشخص نمودند. محمدنژاد و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۹) به بررسی روند تغییرات کاربری اراضی شهرستان نیر واقع در استان اردبیل و تأثیر آن بر فرسایش خاک (بین سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۱۶) با استفاده از تکنیک سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی پرداختند. نتایج نشان داد که به طور عمده مناطق با طبقه بسیار پرخطر و پرخطر در هر دو دوره زمانی در کاربریهای زراعت دیم و زراعت آبی - باغات قرار دارند.

در خصوص مطالعات و تحقیقات انجام شده در حوضه سد ایلام میتوان به پایان نامه کارشناسی ارشد اعظمی (۲۰۰۱) تحت عنوان تعیین روش مناسب برآورد بار معلق رسوبی در حوضه سد ایلام، تخمین فرسایش و رسوب با استفاده از روشهای کیفی ژئومورفولوژیکی (واحد های کاری) و EPM و مقایسه آن با آمار خروجی رسوب در حوضه سد ایلام توسط شهپازی (۱۹۹۹)، و مقاله عسگری و جعفری (۲۰۰۸) تحت عنوان برآورد فرسایش و رسوب حوضه سد ایلام با استفاده از مدل MPSIAC اشاره کرد.

نتایج پژوهش‌ها نشان داده که، کل فرسایش خاک در یک منطقه با مقدار بار رسوب در همان منطقه یکسان نمی‌باشد. به منظور تشریح امکان رسوب مواد فرسایش یافته و حرکت آنها در شبکه کانال و در نهایت در خروجی حوضه، پراکنش مکانی نسبت تحویل رسوب محاسبه می‌گردد. در این مطالعه، سه روش بر اساس مساحت (USDA، ۱۹۷۵؛ بویس<sup>۳</sup>، ۱۹۷۵؛ ونونی<sup>۴</sup>، ۱۹۷۵) به منظور محاسبه نقشه نسبت تحویل رسوب، مورد استفاده قرار گرفتند. حوضه آبخیز پایین دست سد ایلام (بخشی از حوضه سد ایلام) نیز یکی از مناطقی است که متحمل فرسایش فزاینده خاک می‌باشد و بررسی فرسایش و بار رسوب در آن بعنوان یکی از منابع تامین آب شرب شهر ایلام از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین، با توجه به مسأله فوق، هدف اصلی این پژوهش ارزیابی روند تغییرات مکانی - زمانی میزان فرسایش خاک و بار رسوب حوضه طی دوره ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۸ از طریق تلفیق مدل RUSLE، سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS) و همچنین شناسایی مناطق حساس به فرسایش جهت اجرای عملیات حفاظتی آب و خاک می‌باشد.

## روش تحقیق

### ویژگی‌های حوضه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، یک حوضه کوهستانی به نام حوضه پایین دست (بخشی از حوضه سد ایلام)، واقع در جنوب شرقی استان ایلام است. مساحت این حوضه ۴۳۹۴ هکتار می‌باشد که از لحاظ موقعیت جغرافیایی، بین طول‌های شمالی ۳۳°۲۳'۲۹" تا ۳۳°۲۹'۳۶" و عرض‌های شرقی ۴۶° ۲۲' ۵۵" تا ۴۶° ۳۲' ۲۷" واقع شده است (شکل ۱). نقاط

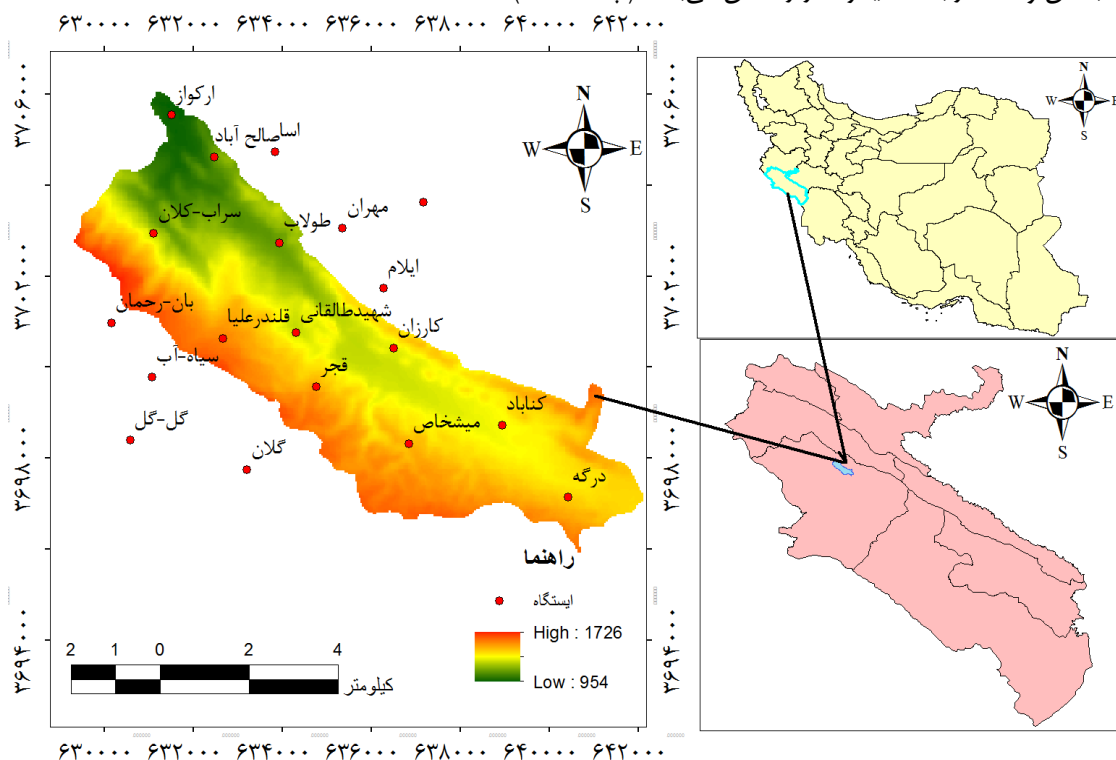
1- Razezi et al

2- Mohammadnejad et al

3- Boyce

4- Vanoni

ارتفاعی منطقه حداکثر ۱۷۸۰ متر و حداقل ۹۰۰ متر بالاتر از سطح دریا می‌باشد. از لحاظ شرایط اقلیمی، این منطقه جزو مناطق نیمه خشک (اقلیم مدیترانه‌ای) با متوسط بارندگی ۵۹۲/۷۸ میلیمتر در سال و میانگین دمای ۲۱/۷ درجه سانتیگراد در تابستان و ۴/۷ درجه سانتیگراد در زمستان می‌باشد (نپتا، ۲۰۰۱).



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه

### مواد و روش‌ها

داده‌ها و ابزارهای مورد استفاده در این پژوهش شامل: لایه رقومی توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ سازمان نقشه برداری کشور، داده‌های سازمان هواشناسی کشور (بارندگی روزانه، ماهانه، سالانه)، تصویر ماهواره‌ای ETM<sup>+</sup> به تاریخ ۱۳۸۳/۲/۱۰ و OLI به تاریخ ۱۳۹۸/۲/۲۵ از سایت [www.gilovis.usgs.com](http://www.gilovis.usgs.com)، لایه رقومی نقشه خاکشناسی و قابلیت اراضی ۱:۸۰۰۰۰ حوضه مورد مطالعه از سازمان جنگلها و مراتع کشور، بررسی گزارش مطالعه تفصیلی حوضه آبخیز پایین دست سد ایلام و نرم‌افزارهای ArcGIS ۱۰,۳ و Envi۵,۳ می‌باشد. در این پژوهش از نرم‌افزار ArcGIS ۱۰,۳ جهت ترسیم نقشه‌ها و تحلیل‌های مرتبط به آن و ENVI۵,۳ جهت استخراج و پردازش تصاویر ماهواره‌ای بهره‌گیری شده است.

### روش تحقیق

در این مطالعه، مدل فرسایش خاک RUSLE و سیستم SATEEC مورد استفاده قرار گرفتند. معادله جهانی فرسایش خاک (USLE) و نسخه تجدید نظر شده آن، جهت پیش‌بینی فرسایش خاک و طراحی برنامه‌های حفاظتی مورد استفاده قرار می‌گیرد (رنارد<sup>۲</sup> و همکاران، ۱۹۹۱؛ صادقی و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۰۴). مدل RUSLE، یک مدل برآورد فرسایش آبی است که با شش فاکتور فرسایشی زیر رابطه دارد (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸) (۱):

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

<sup>۱</sup>- Nepta

<sup>۲</sup>-Renard et al

<sup>۳</sup>-Sadeghi et al

در این رابطه،  $A$  میانگین فرسایش خاک در واحد سطح (تن در هکتار در سال)،  $R$  عامل فرساینده باران  $MJmmh^{-1}h$ ،  $K$  عامل فرسایش پذیری خاک  $Mghahha^{-1}MJ^{-1}mm^{-1}$ ،  $L$  عامل طول شیب،  $S$  عامل درجه شیب،  $C$  عامل عملیات مدیریتی و پوشش و نهایتاً  $P$  عامل عملیات حفاظتی می‌باشد. مقادیر  $L$ ،  $S$ ،  $C$  و  $P$  بدون واحد می‌باشند. پاراگراف‌های بعدی نیز درباره نحوه برآورد فاکتورهای  $R$ ،  $C$ ،  $K$ ،  $P$  و  $LS$  که به ترتیب از داده‌های بارش، نقشه‌های خاک، پردازش تصاویر ماهواره‌ای (فاکتورهای  $C$  و  $P$ ) و مدل رقومی ارتفاعی به دست می‌آیند، توضیح می‌دهد.

### عامل فرساینده باران (R)

فرساینده باران به صورت قدرت تراکمی باران در بروز فرسایش تعریف می‌شود (لال<sup>۱</sup>، ۱۹۹۰). معمول‌ترین شاخص فرساینده باران، فاکتور  $R$  مربوط به مدل‌های  $USLE$  و  $RUSLE$  می‌باشد. بررسی مقالات علمی نشان می‌دهد، در بسیاری از نقاط دنیا، عامل  $R$  همبستگی بالایی با فرسایش خاک دارد (فرو و همکاران، ۱۹۹۱؛ رنارد و فریموند، ۱۹۹۴؛ ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸). عامل  $R$  برای دوره‌های مختلف، از حاصلضرب انرژی جنبشی باران ( $E$ ) در حداکثر شدت بارش ۳۰ دقیقه‌ای ( $I_{30}$ ) بدست می‌آید. از آنجائی که نمودار بارندگی و داده‌های تفصیلی رگبار (شدت بارندگی) به ندرت در ایستگاه‌های هواشناسی موجود می‌باشند، غالباً از مقادیر متوسط بارندگی ماهیانه و سالیانه، جهت برآورد عامل  $R$  در مدل‌های  $USLE$  و  $RUSLE$  استفاده می‌شود (رنارد و فریموند، ۱۹۹۴؛ فرو و همکاران، ۱۹۹۱). برای محاسبه عامل  $R$ ، بعد از تعیین ایستگاه‌های شاخص در منطقه مورد مطالعه، بارندگی ماهیانه و سالیانه در این ایستگاه‌ها و در دوره زمانی مورد مطالعه بازسازی گردید (بر اساس اطلاعات ایستگاه ایلام که کاملترین و بیشترین آمار را داشته است). لازم به ذکر است که ایستگاه ایلام در داخل حوضه مطالعاتی واقع شده است. در مرحله بعد با استفاده از معادله ذیل، شاخص فورنیر و عامل  $R$  برای تمام ایستگاه‌ها بدست آمد. رابطه شاخص فورنیر،  $F$ ، بصورت ذیل است (رنارد و فریموند، ۱۹۹۴) (معادله ۲):

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

در این معادله،  $Pi$  متوسط بارندگی (میلیمتر) در ماه  $i$  و  $P$  متوسط بارندگی سالیانه (میلیمتر) است. در این مطالعه، با استفاده از معادله (۲)، شاخص فورنیر برای تمامی ایستگاه‌ها، محاسبه گردید و سپس با جایگذاری شاخص فورنیر (رابطه ۲) در روابط زیر که توسط رنارد و فریموند (۱۹۹۴) برای مناطق فاقد داده‌های تفصیلی رگبار (شدت بارندگی) پیشنهاد شده، مقدار عامل  $R$  برای ایستگاه‌های شاخص برآورد شد.

$$R - factor = (0.07397 \times F^{1.847} / 17.2) \quad (3)$$

اگر  $F < 55$  mm

$$R - factor = (95.77 - 6.081 \times F + 0.4770 \times F^2 / 17.2) \quad (4)$$

اگر  $F \geq 55$  mm

### عامل فرسایش پذیری خاک (K)

عامل فرسایش پذیری خاک ( $K$ )، سرعت فرسایش‌پذیری خاک به ازای واحد شاخص فرسایش باران است که در پلات استاندارد اندازه گیری می‌شود و اغلب با استفاده از خصوصیات خاک تعیین می‌شود (پاریسو و همکاران، ۲۰۰۳). اگرچه عامل  $K$  با بافت، میزان ماده آلی، نفوذپذیری و ساختمان خاک رابطه دارد، اما با نوع تیپ خاک همبستگی بالایی

دارد (ویشمایر<sup>۱</sup>، ۱۹۷۱). عامل فرسایش پذیری خاک در مدل RUSLE از طریق نمودار تعیین می‌شود (ویشمایر<sup>۲</sup>، ۱۹۷۱). به شرح زیر (ویشمایر و واسمیت، ۱۹۷۸):

$$K = 2.73 \times 10^{-6} m^{1.14} (12 - a) + 3.25 \times 10^{-2} (b - 2) + 2.5 \times 10^{-2} (c - 3) \quad (5)$$

در این معادله، M قطر ذره (درصد سیلت + درصد شن خیلی ریز) × (درصد رس - ۱۰۰)، a درصد ماده آلی، b کد ساختمان خاک و c کلاس نفوذپذیری پروفیل خاک می‌باشند. در این مطالعه، تمام عوامل اشاره شده در بالا از گزارش تفصیلی حوضه آبخیز پایین دست سد ایلام استخراج و نقشه عامل K در محیط GIS تهیه شد.

### عامل توپوگرافی (LS)

نظر به اهمیت عوامل طول و تندی شیب بر فرسایش خاک از طریق تغییر در سرعت جریان آب در سطح زمین، تنش و تغییر - پذیری آن‌ها در حوضه مطالعاتی مد نظر قرار گرفت (هن و همکاران<sup>۳</sup>، ۱۹۹۴). برای محاسبه فاکتورهای L و S از فرمول‌های زیر استفاده می‌شود (مور و ویلسون<sup>۴</sup>، ۱۹۹۳):

$$L = 1.4 \left[ \frac{As}{22.13} \right]^{0.4} \quad (6)$$

$$S = \left[ \frac{\sin \beta}{0.0896} \right]^{1.3} \quad (7)$$

در این معادله As مساحت دامنه بالادست در واحد عرض خطوط توپوگرافی ( $m^2/m$ ) و  $\beta$  زاویه شیب برحسب درجه است. در این مطالعه، نقشه فاکتور LS از نقشه DEM و با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS استخراج شد.

### عامل مدیریت پوشش (C)

عامل مدیریت پوشش گیاهی (C) به عنوان عامل نشان دهنده تأثیر فعالیت‌های زراعی و مدیریت کشاورزی و اثر پوشش درختی، درختچه‌ای، علفی و زمینی روی کاهش فرسایش خاک می‌باشد (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸). این عامل بر اساس معیار بررسی وضعیت و سلامت پوشش گیاهی کنترل کننده فرسایش و تحت عنوان شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) و با استفاده از فناوری سنجش از دور بدست می‌آید (فاطمی و رضائی، ۲۰۱۰). از آنجایی که شاخص (NDVI) برای محاسبه داده‌های طیفی زمینی استفاده شده و همبستگی بالایی با زیست توده سطح زمین دارد، لذا رابطه (۸) برای تخمین عامل مدیریت پوشش گیاهی استفاده شده است (لین<sup>۵</sup>، ۱۹۹۷).

$$C = (1 - NDVI) / 2 \quad (8)$$

در نتیجه مقدار C در هر سلول می‌تواند مورد محاسبه قرار گیرد. از آنجایی که مقادیر فاکتور C، بین صفر و یک میباشد، مقدار صفر به پیکسل‌های با مقادیر منفی و عدد یک به پیکسل‌هایی با مقدار بیشتر از یک اختصاص خواهد یافت.

### عامل عملیات حفاظتی (P)

در این مطالعه نیز نقش انواع عملیات حفاظتی شامل کشت روی خطوط تراز، سیستم تراس‌بندی، آبراهه‌های پوشش‌دار و سایر اثرات حفاظتی در مقایسه با شرایط استاندارد حاکم بر کرت‌های مطالعاتی فرسایش خاک (رنارد و فریموند، ۱۹۹۴)، مورد

1- Wischmeier

2- Wischmeier

3- Haan et al

4 Moore and Wilson

5- Lin

نظر قرار می‌گیرد. برای تخمین عامل مدیریت اراضی از جدول استاندارد موجود و بر اساس مقادیر پیشنهادی تهیه شده است. در این مطالعه، مقادیر فاکتور P از طریق طبقه‌بندی مجدد هر تیپ پوشش زمین و بر اساس مقادیر داده شده در جدول ۱ (دور، ۲۰۰۶) تعیین شدند. با توجه به اینکه در حوضه تحت بررسی هیچگونه عملیات اصلاحی و مدیریتی صورت نگرفته است، ارزش P تنها بر اساس کاربری و پوشش اراضی مختلف تعیین شده است.

جدول ۱: ارزش P برای کاربری و پوشش اراضی مختلف (دور، ۲۰۰۶)

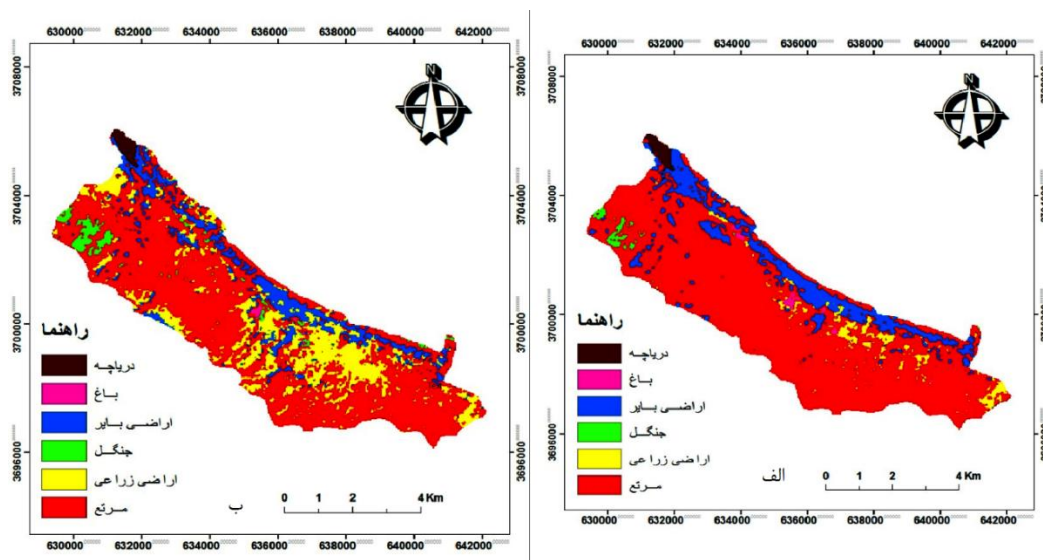
ارزش عددی P	کلاس کاربری/پوشش اراضی
۱	اراضی بایر
۰/۱۲	نیشکر
۰/۱	گندم
۰/۸	جنگل تنک
۱	اراضی آیش
۰/۸	جنگل با تراکم متوسط
۰/۸	جنگل باز
۱	بستر رودخانه

لازم به یادآوری است که در این مطالعه تنها تاثیر عوامل فرساینده باران (R) و مدیریت پوشش گیاهی (C) بررسی شده است (بدلیل تغییر قابل ملاحظه دو فاکتور فوق در طول دوره ۱۵ ساله مطالعه). بعلاوه تاثیر سایر عوامل به دلیل عدم تغییر قابل ملاحظه ثابت و بدون تغییر در نظر گرفته شد (بدلیل عدم تغییر ذاتی فاکتور خاک در کوتاه مدت برای تهیه فاکتور K، عدم تغییر ذاتی طول و درجه شیب برای تهیه فاکتور LS و نهایتاً، عدم تغییر عامل عملیات حفاظتی برای تهیه فاکتور P در حوضه در طول دوره ۱۵ ساله مطالعه).

### تهیه نقشه کاربری اراضی منطقه

به منظور بررسی تغییرات کاربری اراضی در حوضه مورد مطالعه، تصاویر ماهواره ای برای دو دوره ۱۳۸۳ و ۱۳۹۸ تهیه گردید. جهت طبقه بندی تصاویر از روش طبقه بندی ماشین بردار پشتیبان استفاده شده است. روش ماشین بردار پشتیبان به دلیل ماهیت غیرپارامتریک بهتر از روشهای پارامتریک می باشد. لذا در این مقاله روش طبقه بندی نظارت شده ماشین بردار پشتیبان استفاده شد و نقشه‌ها تهیه گردید. برای این منظور، کلاس‌های کاربری اراضی در سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۹۸ در شش کلاس شامل دریاچه، باغ، اراضی بایر، جنگل، اراضی زراعی و مرتع تعیین و سپس نمونه‌های آموزشی از سطح منطقه با استفاده از ترکیب رنگی کاذب، تفسیر چشمی تصاویر ماهواره‌ای، نرم‌افزار گوگل ارث و بازدید میدانی جمع‌آوری و طبقه بندی شد (شکل ۲ الف و ب). در جدول ۲ دقت کل و ضریب کاپا نقشه‌های دو دوره طبقه بندی را مشاهده می‌فرمایید که دقت بالای طبقه بندی را نشان می‌دهد.





شکل ۲: الف) نقشه کاربری اراضی سال ۱۳۸۳ ب) نقشه کاربری اراضی سال ۱۳۹۸

جدول ۲- ارزیابی دقت طبقه‌بندی برای نقشه‌های کاربری استخراج‌شده از تصاویر لندست سالهای ۱۳۸۳ و ۱۳۹۸

ضریب کاپا	دقت کل	نقشه کاربری بدست‌آمده از تصویر
۰/۹۴	۹۵/۸۷	ETM <sup>+</sup> (۱۳۸۳)
۰/۹۳	۹۴/۲۳	OLI (۱۳۹۸)

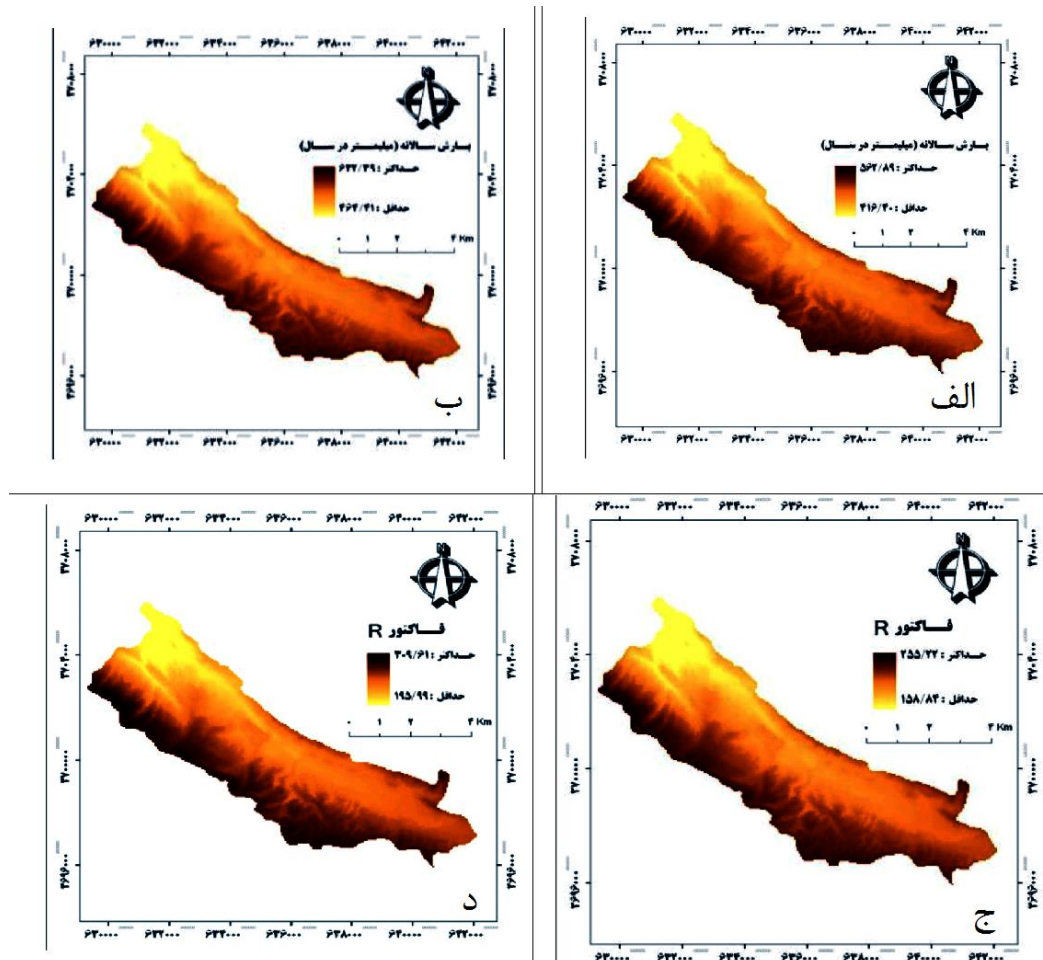
پس از تهیه نقشه کاربری اراضی دو تاریخ، مساحت شش کلاس پوشش اراضی به دست آمد. جدول ۲ سطح هر کدام از کاربری‌ها را در این دو تاریخ نشان می‌دهد. با توجه به جدول شماره ۳ کاربری‌ها در طی ۱۵ سال تغییرات قابل توجهی داشته‌اند. در بین کاربری‌ها بیشترین تغییر مثبت را کاربری زراعی داشته است که با ۱۵/۱۴ درصد تغییرات دارای رده اول در تغییرات است. این کاربری در سال ۱۳۸۳ از ۱۷۳/۴۸ هکتار به ۸۳۸/۳۹ هکتار در سال ۱۳۹۸ افزایش پیدا کرده است. در بین کاربری‌ها بیشترین درصد تغییرات منفی نسبت به مساحت کاربری مربوط به اراضی مرتعی است که با ۱۴/۹۰ درصد سطح حوضه تغییرات دارای روند کاهشی منفی بوده است که از ۳۵۲۲/۲۴ هکتار در سال ۱۳۸۳ به ۲۸۶۷/۷۲ هکتار در سال ۱۳۹۸ کاهش پیدا کرده است. اراضی مرتعی در سال ۱۳۸۳ به طور میانگین ۸۰/۱۶ درصد مساحت حوضه را به خود اختصاص داده اند که در سال ۱۳۹۸ این مقدار به ۶۵/۲۶ درصد رسیده است. از میان کل کاربریها، مساحت های باغ، دریاچه، اراضی بایر و مرتع کاهش و مساحت کاربری‌های جنگل و اراضی زراعی افزایش یافته است.

جدول ۳: مساحت کلاس‌های پوشش اراضی در سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۹۸ (بر حسب هکتار و درصد)

کلاس	سال ۱۳۸۳		سال ۱۳۹۸	
	هکتار	درصد	هکتار	درصد
دریاچه	۵۲/۵۵	۱/۱۹	۴۶/۷۰	۱/۰۶
باغ	۲۷/۹۴	۰/۶۳	۲۲/۱۰	۰/۵
اراضی بایر	۵۷۵/۸۸	۱۳/۱۰	۵۱۲/۹۳	۱۱/۶۷
جنگل	۴۱/۹۱	۰/۹۵	۱۰۶/۱۶	۲/۴۱
اراضی زراعی	۱۷۳/۴۸	۳/۹۴	۸۳۸/۳۹	۱۹/۰۸
مرتع	۳۵۲۲/۲۴	۸۰/۱۶	۲۸۶۷/۷۲	۶۵/۲۶

## بحث و یافته‌ها

شاخص‌های فورنیر و مقادیر فرساینده‌ی باران با استفاده از معادلات (۲)، (۳) و (۴) برای ۱۸ ایستگاه محاسبه شد. ابتدا بر اساس رابطه بین ارتفاع و بارش (شکل ۳ الف و ب) و سپس بر اساس رابطه بارش و فاکتور R، نقشه فاکتور R حوزه مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار ArcGIS10.3 برای هر دو دوره ۱۳۸۳ و ۱۳۹۸ به دست آمد. همانطور که در نقشه باران حوزه مورد مطالعه ملاحظه می‌فرمایید، ما شاهد افزایش باران به میزان ۶۰ میلی‌متر (به طور میانگین) هستیم که تاثیر آن روی مقدار فاکتور R قابل مشاهده است. بر این اساس مقدار فاکتور R از ۱۵۸/۸۴ تا ۲۵۵/۲۲ ( $MJ\ mmha^{-1}h^{-1}y^{-1}$ ) (برای دوره اول) و از ۱۹۵/۹۹ تا ۶۱ ( $MJ\ mmha^{-1}h^{-1}y^{-1}$ ) (برای دوره دوم) متغیر بوده و مقدار متوسط و انحراف آن نیز به ترتیب ۲۱۵/۱۸ و ۶۷ ( $MJ\ mmha^{-1}h^{-1}y^{-1}$ ) (برای دوره اول) و از ۲۵۹/۲۷ و ۱۹ ( $MJ\ mmha^{-1}h^{-1}y^{-1}$ ) (برای دوره دوم) می‌باشد (شکل ۳ ج و د) که تغییر محسوسی می‌باشد. فرساینده‌ی باران به غیر از شمال حوزه مورد مطالعه در سایر قسمت‌ها که ارتفاع بالاتری داشتند، بیشتر بود که با رنگ تیره‌تر نشان داده شده است. به عبارت دیگر، کاهش فاکتور R، رابطه نزدیکی با کاهش ارتفاع در حوزه داشت.



شکل ۳: الف) نقشه بارش سال ۱۳۸۳ (ب) نقشه بارش سال ۱۳۹۸ (ج) نقشه فاکتور R سال ۱۳۸۳ (د) نقشه فاکتور R سال ۱۳۹۸

مقادیر عامل K برای انواع مختلف خاک و واحدهای قابلیت اراضی در جدول ۴ آمده است. متوسط مقدار k در منطقه مورد مطالعه برای هر دو دوره از ۰/۱۲ تا ۰/۴۲ متغیر بوده و مقدار متوسط و انحراف معیار آن نیز به ترتیب ۰/۱۸ و ۰/۰۶  $\text{Mg ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  می‌باشد. شکل ۴ الف توزیع مکانی فرسایش‌پذیری خاک را نشان می‌دهد.

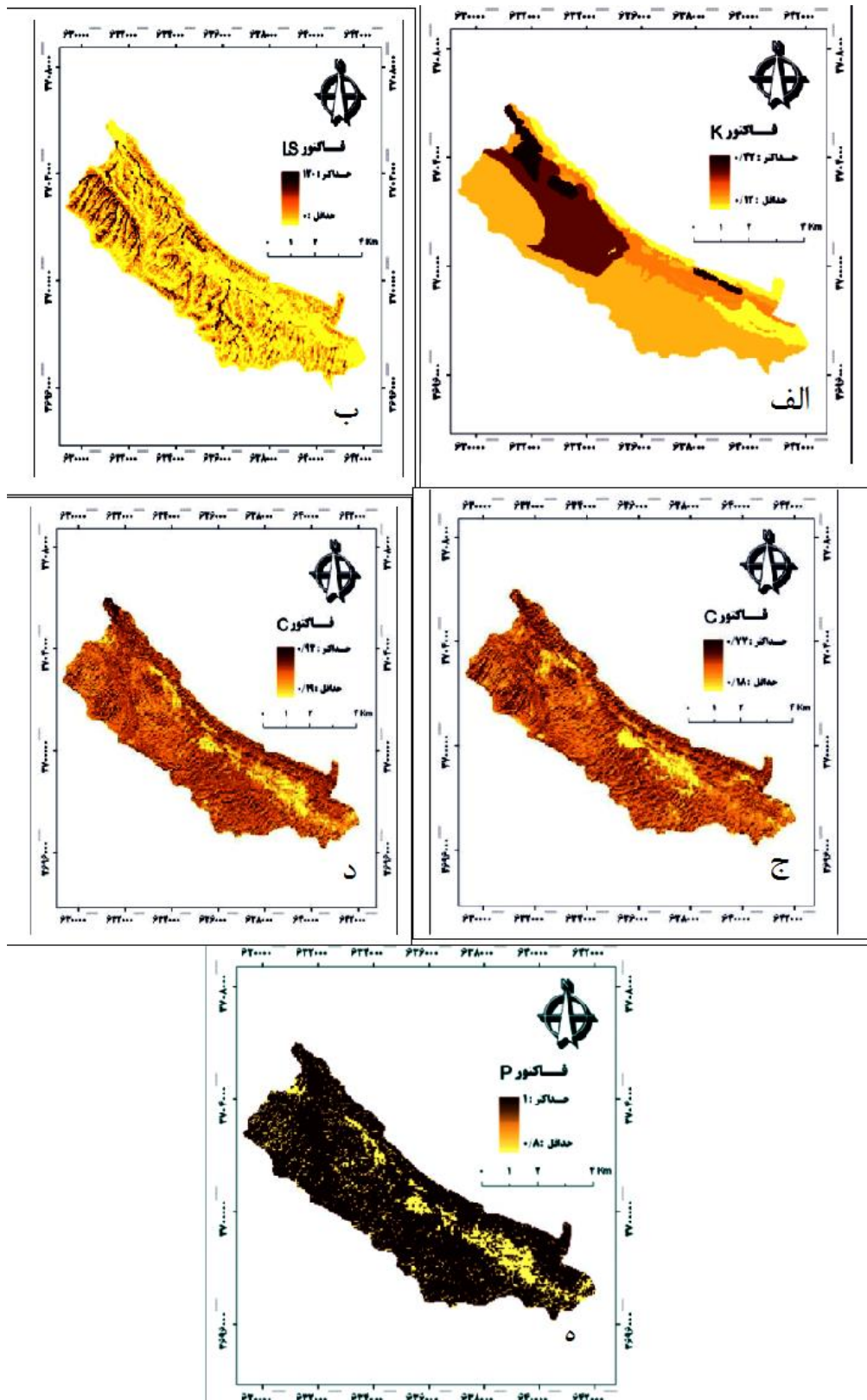
جدول ۴: ارزش فاکتور K برای انواع مختلف خاک و واحدهای قابلیت اراضی حوضه مورد مطالعه

واحد خاک	نوع خاک	واحد قابلیت اراضی	ارزش K ( $\text{Mg ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ )
		۱.۱.۱	۰/۱۹
		۲.۱.۱	۰/۲۱
		۳.۱.۱	۰/۴۳
۱	Fragmental, mixed, mesic Lithic, Torriorthents	۲.۲.۱	۰/۳۶
		۳.۲.۱	۰/۲۲
		۱.۳.۱	۰/۱۹
		۲.۳.۱	۰/۴۹
		۱.۱.۲	۰/۴۱
		۲.۱.۲	۰/۲۳
		۱.۲.۱	۰/۲۳
۲	Fragmental, mixed, mesic Typic Torriorthents	۳.۳.۱	۰/۱۵
		۲.۲.۲	۰/۲۴
۳	Loamy-Skeletal, mixed, mesic Typic Torriorthents	۱.۲.۲	۰/۱۷
۴	Loamy, carbonatic, mesic Typic Torrifluvents	۱.۱.۵	۰/۲۵
۵	Loamy-Skeletal, carbonatic, mesic Typic Haplocambids	۳.۱.۲	۰/۳۰
		۱.۳.۲	۰/۲۵
۶	Loamy-Skeletal, mixed, mesic Typic Haplocalcids	۳.۲.۲	۰/۱۹
۷	Loamy-Skeletal, carbonatic, mesic Typic Haplocalcids	۴.۱.۲	۰/۲۶
۸	Loamy, mixed, mesic Typic Haplocalcids	۱.۱.۳	۰/۲۶
		۵.۱.۲	۰/۳۵
۹	Fine-Loamy, carbonatic, mesic Typic Haplocalcids	۴.۲.۲	۰/۳۰
		۲.۱.۳	۰/۲۶

نقشه توپوگرافی منطقه مورد مطالعه به منظور ایجاد نقشه طول شیب و درجه شیب (LS) مورد استفاده قرار گرفت. فاکتور LS بوسیله معادلات ۶ و ۷ و با استفاده از نقشه DEM حوضه و با در نظر گرفتن کنش متقابل بین توپوگرافی و تجمع جریان آب محاسبه شد (شکل ۴ ب). همانطور که از شکل ۱۰ بر می‌آید مقدار فاکتور LS در منطقه مورد مطالعه از صفر تا ۱۳۰ در سطح پیکسل متغیر بوده و مقدار متوسط آن ۲/۱۱ می‌باشد. در بعضی مناطق با شیب‌های تند، از قبیل امتداد رودخانه‌ها مقادیر LS بیشتر است.

نقشه فاکتور C براساس NDVI تهیه گردید (شکل ۴ ج و د). در حقیقت این فاکتور به طور کامل، رابطه معکوس با NDVI دارد. مقدار فاکتور C از ۰/۱۸ تا ۰/۷۷ (برای دوره اول) و ۰/۱۹ تا ۰/۹۳ (برای دوره دوم) متغیر بوده و متوسط آن نیز به ترتیب ۰/۵۱ (برای دوره اول) و ۰/۵۲ (برای دوره دوم) می‌باشد. نقشه فاکتور C نشان می‌دهد که بیشترین مقدار این پارامتر در مناطق فاقد پوشش گیاهی و کمترین مقدار آن در مناطقی با پوشش متراکم وجود دارد که با رنگ روشن‌تر مشخص است.

شکل ۴ ه نقشه فاکتور P را نشان می‌دهد که از طریق طبقه‌بندی مجدد هر تیپ پوشش زمین / کاربری زمین و با استفاده از مقادیر داده شده در جدول مربوطه ایجاد شده است. مقادیر فاکتور P بین ۰/۸ تا ۱ بوده و مقدار متوسط آن ۰/۹ می‌باشد. آمار مربوط به فاکتورهای R, K, LS, C, P، برای هر دو دوره، در جداول ۵ و ۶ ارائه شده است.



شکل ۴: الف) نقشه فاکتور K (ب) نقشه فاکتور LS (ج) نقشه فاکتور C سال ۱۳۸۳ (د) نقشه فاکتور C سال ۱۳۹۸ (ه) نقشه فاکتور P

جدول ۵: آمار مربوط به فاکتورهای معادله RUSLE در سال ۱۳۸۳

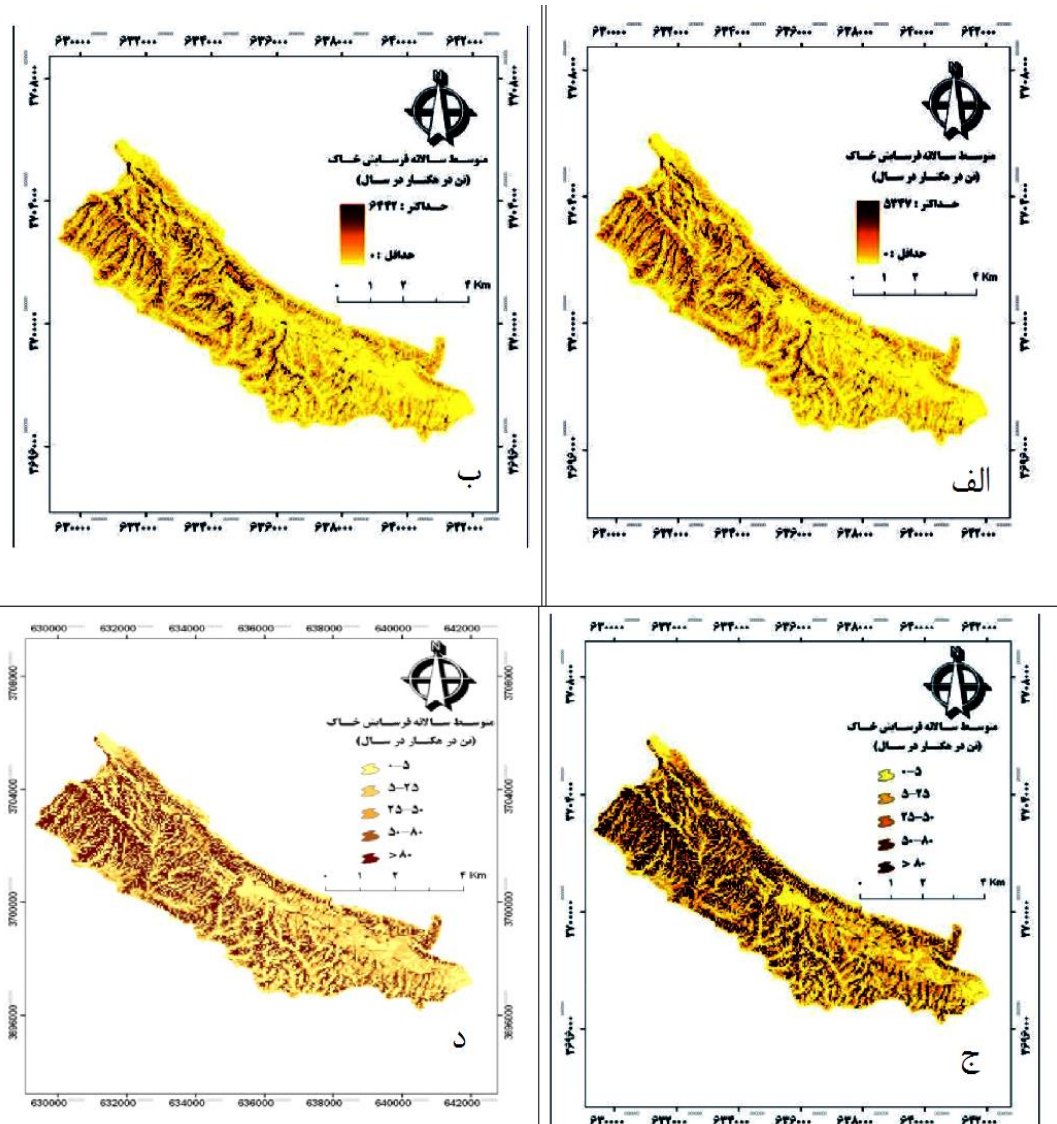
سال ۱۳۸۳	فاکتور R	فاکتور K	فاکتور LS	فاکتور C	فاکتور P
حداقل	۱۵۸/۸۴	۰/۱۲	۰	۰/۱۸	۰/۸
حداکثر	۲۵۵/۲۲	۰/۴۲	۱۳۰	۰/۷۷	۱
میانگین	۲۱۵/۱۸	۰/۱۸	۲/۱۱	۰/۵۱	۰/۹
انحراف معیار	۱۸/۶۷	۰/۰۶	۴/۷۷	۰/۰۵	۰/۳۰

جدول ۶: آمار مربوط به فاکتورهای معادله RUSLE در سال ۱۳۹۸

سال ۱۳۹۸	فاکتور R	فاکتور K	فاکتور LS	فاکتور C	فاکتور P
حداقل	۱۹۵/۹۹	۰/۱۲	۰	۰/۱۹	۰/۸
حداکثر	۳۰۹/۶۱	۰/۴۲	۱۳۰	۰/۹۳	۱
میانگین	۲۵۹/۲۷	۰/۱۸	۲/۱۱	۰/۵۲	۰/۱۳
انحراف معیار	۲۲/۱۹	۰/۰۶	۴/۷۷	۰/۰۶	۰/۲۷

### فرسایش سالیانه خاک

فرسایش متوسط سالیانه خاک برای هر دو دوره از طریق حاصلضرب فاکتورهای فرسایش‌پذیری (R)، فاکتور فرسایش‌پذیری (K)، فاکتور توپوگرافی (LS)، فاکتور مدیریت پوشش گیاهی (C) و فاکتور عملیات حفاظتی (P) و با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS محاسبه شد. نقشه به دست آمده از این مدل، در شکل ۵ الف و ب نشان داده شده است. مقادیر فرسایش خاک در منطقه مورد مطالعه برای دوره اول بین ۰ تا ۵۳۴۷ و برای دوره دوم بین صفر تا ۶۴۴۲ تن در هکتار در سال در سطح پیکسل متغیر می‌باشد. متوسط و انحراف معیار آن نیز به ترتیب برابر با ۴۹/۸۹ و ۱۲۰/۰۷ (برای دوره اول) و برابر با ۶۲/۸۰ و ۱۴۵/۵۵ (برای دوره دوم) تن در هکتار در سال تعیین شد. در مرحله بعد نقشه فرسایش سالانه خاک به ۵ کلاس خطر طبقه‌بندی شده است (شکل ۵ ج و د). فراوانی هر یک از کلاس‌های خطر برای هر دو دوره در جدول ۶ نشان داده شده است. بیشترین قسمت حوضه مورد مطالعه، جز ۶ طبقه فرسایشی خیلی کم تا کم (به ترتیب ۵۹ و ۵۵ درصد برای دوره اول و دوم) قرار داشت که عمدتاً این کلاس‌ها در شمال و جنوب شرقی حوضه واقع شده بودند. حدود ۲۸ و ۳۱ درصد حوضه نیز به ترتیب برای دوره اول و دوم تحت خطر فرسایش بالا تا شدید قرار داشت که از این بین، بیشترین مناطق تحت خطر فرسایش بالا تا شدید، در مناطق شمال‌غربی، غرب و جنوب غربی حوضه قرار داشتند. بر این اساس، نتایج بدست آمده در بازه‌ی زمانی ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۸، نشان می‌دهد که از مقدار خطر فرسایش مربوط به کلاس‌های خطر کم و متوسط حدود ۴ درصد، کاسته شده و در مقابل حدود ۳ درصد بر وسعت مناطقی که دارای خطر فرسایش زیاد می‌باشد، افزوده شده است (جدول ۷). در ضمن، نتایج این پژوهش همچنین نشان داد، فاکتور LS به ترتیب با ضریب همبستگی ۰/۸۱ و ۰/۸۴ برای دوره اول و دوم بیشترین تأثیر را در برآورد فرسایش سالانه خاک توسط مدل RUSLE داشته است (جدول ۸). این در حالی است که همبستگی بسیار پایینی بین سایر فاکتورها و فرسایش سالیانه خاک وجود داشت.



شکل ۵: الف) نقشه متوسط سالانه فرسایش خاک (ان در هکتار در سال) سال ۱۳۸۳؛ ب) نقشه کلاس‌های فرسایش خاک برای سال ۱۳۹۸؛ ج) نقشه کلاس‌های فرسایش خاک برای سال ۱۳۸۳؛ د) نقشه کلاس‌های فرسایش خاک برای سال ۱۳۹۸

جدول ۷: فراوانی کلاس‌های خطر فرسایش

کلاس‌های فرسایش	مساحت به درصد (۱۳۸۳)	مساحت به درصد (۱۳۹۸)
خیلی کم (۰-۵)	۴۵/۷۶	۴۴/۱۸
کم (۵-۲۵)	۱۳/۲۲	۱۱/۳۴
متوسط (۲۵-۵۰)	۱۲/۸۵	۱۳/۹۵
زیاد (۵۰-۸۰)	۱۰/۶۶	۱۱/۴۷
خیلی زیاد (>۸۰)	۱۷/۴۹	۱۹/۰۴



جدول ۸: همبستگی و روابط رگرسیونی بین هدر رفت سالانه خاک و پارامترهای RUSLE برای دو دوره مورد مطالعه

فاکتورهای RUSLE	هدر رفت سالانه خاک (۱۳۸۳)	هدر رفت سالانه خاک (۱۳۹۸)
R	$R^2 = 0.191, y = -1/249x + 352/87$	$R^2 = 0.192, y = -1/257x + 430/04$
K	$R^2 = 0.212, y = 514/99x + 93/064$	$R^2 = 0.205, y = 568/45x + 114/2$
LS	$R^2 = 0.8449, y = 25/759x + 23/833$	$R^2 = 0.815, y = 30/072x + 9/2573$
C	$R^2 = 0.242, y = 525/93x - 122/9$	$R^2 = 0.172, y = 451/93x - 72/631$
P	$R^2 = 0.551, y = 1141/9x - 746/13$	$R^2 = 0.044, y = 1245/92x - 80/16$

### بار رسوب

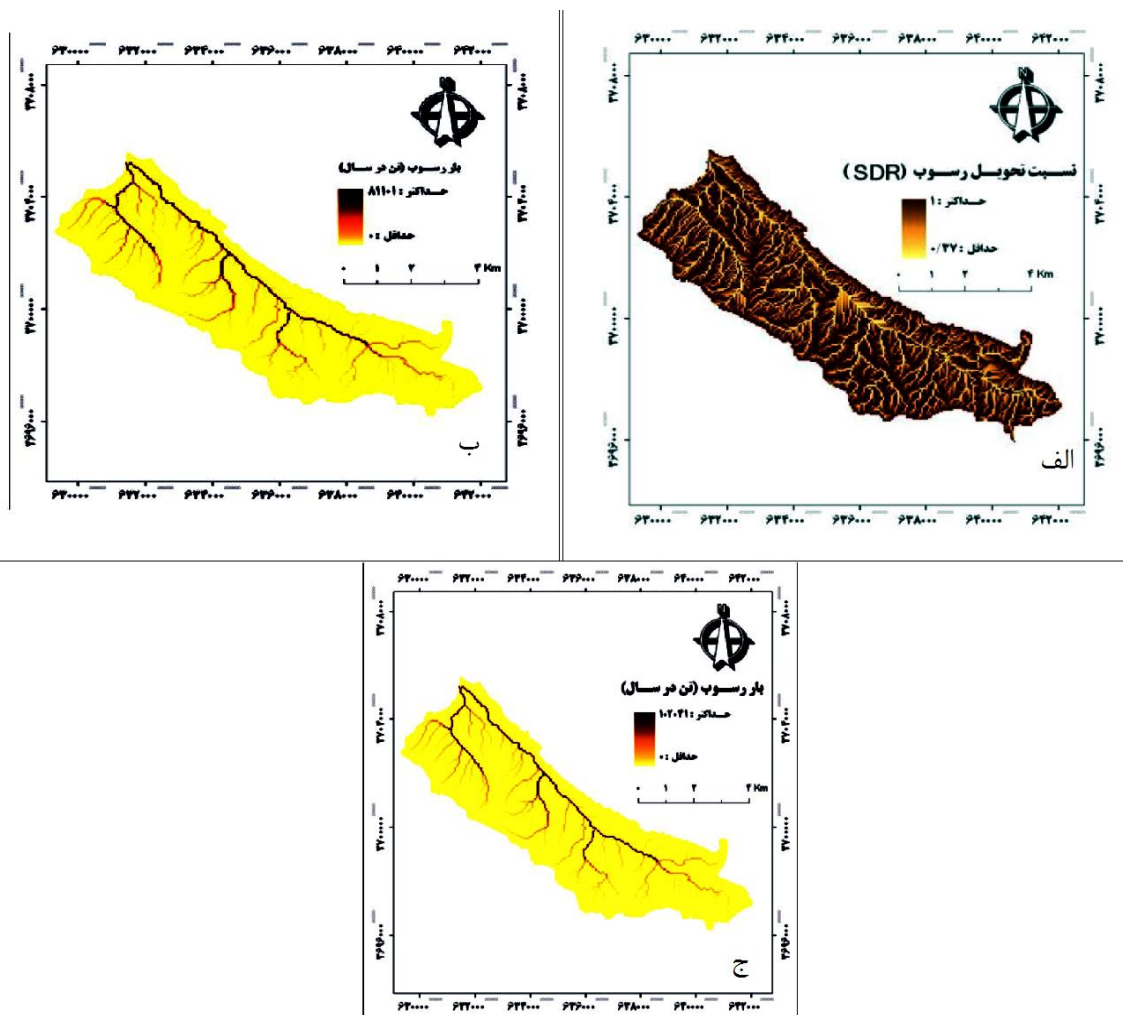
در این مطالعه، متوسط مقادیر نسبت تحویل رسوب برای هر دو دوره بین ۰/۱۵ تا ۰/۳۷ و متوسط بار رسوب در خروجی حوضه برای دوره اول بین ۷/۴۸ تا ۱۸/۴۶ و برای دوره دوم بین ۹/۴۲ تا ۲۳/۲۴ تن در هکتار در سال متغیر بود (جدول ۹ و شکل ۱۸).

میزان رسوب مشاهده و محاسبه شده بر اساس ۱۶ سال آمار ایستگاه هیدرومتری با استفاده از منحنی‌های سنج‌ه (حد وسط دسته‌ها) بطور متوسط معادل ۱۶/۵۸ تن در هکتار در سال (اعظمی، ۲۰۰۱) بوده و مقدار رسوب برآورد شده (متوسط رسوب برآورد شده) برای سال ۱۸/۴۶ و برای دوره دوم معادل ۱۸/۸۴ تن در هکتار در سال (با روش وانونی) می‌باشد. در ضمن مقدار بار رسوبی برآورد شده در این حوضه توسط شهبازی (۱۹۹۹) با استفاده از روش EPM برابر ۱۸/۹ تن در هکتار در سال (آمار مشاهده‌ای معادل ۱۶ تن در هکتار در سال) و عسگری و جعفری (۲۰۰۸) با استفاده از مدل MPSIAC برابر ۱۴/۹۸ تن در هکتار در سال می‌باشد (آمار مشاهده‌ای ۱۶/۵۸ تن در هکتار در سال) (اعظمی، ۲۰۰۱). بنابراین اختلاف بین مقدار رسوب مشاهده شده با مقدار برآورد شده توسط مدل RUSLE در این مطالعه برای دوره اول معادل ۱/۸۸ و برای دوره دوم معادل ۲/۲۶ تن در هکتار در سال است. به عبارت دیگر مقدار رسوب برآورد شده به ترتیب برای دوره اول حدود ۱۱ درصد و برای دوره دوم حدود ۱۳ درصد بیشتر از مقدار رسوب اندازه‌گیری شده (مشاهده شده) (براساس محاسبه خطای نسبی) می‌باشد. بنابراین اختلاف معنی‌داری بین نتایج این کار و سایر محققین مشاهده نمی‌شود.

بنابراین، از آنجائی که مقدار بار رسوب برآوردی با استفاده از روش USDA (برای دوره اول) و روش ونونی (برای دوره دوم) تقریباً نزدیک به مقدار بار رسوب ثبت‌شده در ایستگاه رسوب‌سنجی حوضه دست پایین دست سد ایلام (۱۶/۵۸ تن در هکتار در سال) بود (اعظمی، ۲۰۰۱). از اینرو، این دو روش به عنوان بهترین روش‌ها برای محاسبه نسبت تحویل رسوب انتخاب گردید و براساس آن، نقشه نسبت تحویل رسوب و بار رسوب برای هر دو دوره تهیه شد (شکل‌های ۱۹ و ۲۰). همانطور در اشکال ۱۹ و ۲۰ مشاهده می‌فرمایید، مقدار رسوب از ۰ تا ۸۱۱۰۱ تن در سال ۱۳۸۳ به ۰ تا ۱۰۲۰۴۱ تن در سال ۱۳۹۸ رسیده است و افزایشی به میزان ۲۰۴۹۰ تن در طول دوره مورد مطالعه را نشان می‌دهد. اگر این مقدار رسوب را بر سطح حوضه (۴۳۹۴ هکتار) تقسیم نماییم، افزایش رسوبی معادل ۴/۷۷ تن در هکتار در طول دوره مطالعه شاهد خواهیم بود که رقم قابل ملاحظه‌ای خواهد بود.

جدول ۹: روشهای نسبت تحویل رسوب، مقادیر نسبت تحویل و بار رسوب در حوضه مورد مطالعه

روشهای نسبت تحویل رسوب	میزان نسبت تحویل	بار رسوب سال ۱۳۸۳ (تن در هکتار در سال)	بار رسوب سال ۱۳۹۸ (تن در هکتار در سال)
وانونی	۰/۳۰	۱۴/۹۷	۱۸/۸۴
بویس	۰/۱۵	۷/۴۸	۹/۴۲
USDA	۰/۳۷	۱۸/۴۶	۲۳/۲۴



شکل ۶: الف) نقشه نسبت تحویل رسوب (ب) نقشه بار رسوب سال ۱۳۸۳ (ج) نقشه بار رسوب سال ۱۳۹۸

### نتیجه گیری

خاک به عنوان یکی از مهم ترین منابع طبیعی نقش بسیار عمده ای در زندگی انسان را دارا می باشد. فرسایش خاک، یک مشکل جهانی است که به طور جدی منابع آب و خاک را تهدید می کند و تغییرات بارش و کاربری اراضی دو تا از عامل های مهم در فرسایش خاک و رسوب زایی می باشد. بر اساس نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر، در محدوده زمانی بین سالهای ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۸، مساحت های باغ، دریاچه، اراضی بایر و مرتع کاهش یافته و به مساحت کاربری های جنگل و اراضی زراعی افزوده شده است. نتیجه تغییر این مساحت ها، کاهش پوشش طبیعی خاک و افزایش درصد فرسایش



در منطقه گردیده است. این موضوع با نتایج مطالعه مارتینز-مورولو و همکاران (۲۰۱۱) که افزایش کشت دیم و تبدیل پوشش گیاهی به زراعت را عامل فرسایش معرفی کرده‌اند، و مطالعه فیضی زاده (۲۰۱۷) که تبدیل اراضی مرتعی به زراعت دیم را مهم‌ترین عامل در فرسایش منطقه بیان نموده است، تطابق دارد. هرچه تراکم پوشش گیاهی بیشتر و شامل گیاهان با ریشه بلند و چندساله باشد، به عنوان یک عامل کاهش دهنده سرعت فرسایش عمل می‌کند. در طول دوره زمانی مورد مطالعه چرای مفرط و بیرویه دام به شدت از مقاومت خاک در برابر فرسایش کاسته است. از طرفی کاهش مساحت پهنه‌های آبی، نقش مستقیمی بر تخریب پوشش گیاهی و کاهش سطح آن داشته است. همچنین در دوره زمانی مورد مطالعه تبدیل اراضی مرتعی به کشاورزی، فعالیت کشاورزی در اراضی شیبدار و شخم در جهت شیب موجب افزایش هدر رفت خاک گردیده است که این موضوع با نتایج مطالعه نالینا و همکاران (۲۰۱۴) همخوانی دارد. بدین دلیل که جمعیت شهرها در حال افزایش است، توسعه فعالیت‌های کشاورزی برای رفع نیازهای مردم نیز ضروری می‌باشد. با توجه به اینکه رکن اساسی کشاورزی در اراضی زراعی، وجود خاک و آب مناسب است، معمولاً اراضی مرتعی، قابل دسترس‌ترین اراضی برای تبدیل شدن به اراضی زراعی هستند. لذا در سطح حوضه مطالعاتی نیز کاربری مرتع در طی سالهای ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۸ به میزان ۶۵۵/۴۳ هکتار کاهش یافته و به زمین زراعی تبدیل شده است. باید توجه داشت که تغییر کاربری اراضی مرتعی در زمین‌های کشاورزی به ویژه در مناطق پرشیب، علاوه بر فرسایش خاک به جاری شدن سیل نیز منجر خواهد شد و کیفیت خاک را نیز تحت تأثیر قرار خواهد داد. عامل دیگری که باعث تغییر فرسایش و رسوب شده، فاکتور فرساینده‌گی باران (R) می‌باشد. با مقایسه بارندگی‌ها در طی دوره مورد مطالعه متوجه می‌شویم که بارندگی حوضه در طی این مدت، تغییر محسوسی (افزایش حدود ۶۰ میلیمتری) داشته است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش تغییرات فرسایش، ناشی از این عامل نیز بوده است که باعث شده تا ضریب فرسایش‌پذیری باران را افزایش دهد و باعث تولید فرسایش بیشتری در حوضه شود (فاکتور R). این موضوع با نتایج مطالعه لی و گائو (۲۰۱۵) و غفاری و مهدوی (۲۰۱۴) تطابق دارد. بر اساس نقشه‌های فرسایش به دست آمده، مناطق با خطر فرسایش بالاتر عمدتاً در بخش‌های ناهموار منطقه قرار گرفته‌اند. بر اساس نتایج مدل RUSLE گرایش در حوضه آبخیز به سمت افزایش پتانسیل فرسایش خاک و رسوبزایی در نتیجه روند تغییرات پوشش و کاربری زمین است. این رسوب با رشد میانگین ۴/۷۷ تن در هکتار در طول ۱۵ سال پتانسیل رسوبزایی و رشد محدوده‌های با ریسک بالا برای فرسایش در کل محدوده حوضه قابل بررسی است. براساس بررسی نتایج، محدوده‌های کوهستانی حوضه پایین دست سد ایلام به دلیل تجمع فاکتورهای دخیل در افزایش پتانسیل هدر رفت خاک دارای بیشترین آسیب بوده و ضرورت انجام برنامه‌های آبخیزداری به شکلی واضح دیده می‌شود، زیرا بیشترین تغییرات کاربری در این نواحی با حذف پوشش مرتعی به عنوان محافظی موثر برای خاک و جایگزینی زمین‌های کشاورزی ایجاد شده است. مقایسه رسوب کل برآورد شده در روش USDA با مقدار به دست آمده از پژوهش اعظمی (۲۰۰۱)، قابلیت تلفیق مدل RUSLE و GIS را جهت برآورد میزان فرسایش خاک و بار رسوب را نشان می‌دهد. بنابراین در این مطالعه اثر تلفیقی بارندگی (فاکتور R) و کاربری اراضی با هم بررسی شده است که باعث تشدید مضاعف فرسایش و رسوب گردیده است. نتایج این پژوهش قابلیت بالای سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور را برای ایجاد داده‌های مورد نیاز جهت ایجاد فاکتورهای مدل RUSLE نشان داد که نتیجه آن به دست آمدن اطلاعات خروجی با کیفیت و قابلیت بروزرسانی بالا بود. به نظر می‌رسد لازم است تا جهت حفظ عرصه‌های طبیعی، تثبیت و قانونی کردن کاربری اراضی، کنترل فرسایش و اقداماتی برای حفاظت خاک و آب در مناطق با پتانسیل فرسایشی بالا، در چارچوب طرح‌های حفاظتی در دستور کار متخصصین و مدیران اراضی قرار گیرد. از طرف دیگر نهادهای مدنی و سازمانهای دولتی و غیردولتی در منطقه می‌توانند در امر نظارت بر تغییرات کاربری اراضی، اعمال مدیریت نمایند.

## منابع

- Aazami, A., (2001). Determination the suitable method for estimate suspended sediment load In Ilam dam watershed. MS.c thesis, Agriculture and Natural resources Sciences University, 83p.
- Askari, S., & Jafari, M.R., (2008). Estimating soil erosion and sediment Yield in Ilam Dam watershed using MPSIAC. *Geographic Research Journal*, No.64, 29-35.
- Boyce, R.C., (1975). *Sediment routing with sediment delivery ratios. Present and Prospective Technology for ARS. USDA, Washington, D.C.*
- Cebecauer, T., & Hofierka, J., (2007). The consequences of land- cover changes on soil erosion distribution in Slovakia. *Geomorphology*, volume 98, page 187-198.
- Chakrapani, G. J., & Subramania, V., (1990). Factors controlling sediment transport in the Mahandi river basin, India. *Journal of Hydrology*. 117: 169-185.
- Clark, R.D., (1980). *Erosion condition classification system. Bureau of Land Management, Denver Service Center, Denver CO. Tech Note 346.*
- Da Silva, V.P.R., Silva, M.T., & De Souza, E.P., (2016). Influence of land use change on sediment yield: A case study of the submiddle of the Sao Francisco River Basin. *Soil and Water Engineering*. 36 (6): 1005-1015.
- 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.*
- Du, J., Shi, C.H.X., & Zhang, CH.D., (2013). Modeling and analysis of effects of precipitation and vegetation coverage on runoff and sediment yield in Jinsha River Basin. *Water Science and Engineering*. 6(1): 44-58.
- Esfandiari, M., Moeini, A., & Moqadasi, R., (2014). Effect of land use and vegetation on erosion forms and sediment production (Case Study: Watershed Vers Qazvin province), *Territory (Sarzamin)*, 11 (42), 51-62. (In Persian)
- Fathimi, S., & Razei, Y., (2010). *Principles of Remote Sensing, Second edition., Tehran, Azedeh Publication., pp.257.*
- Feizizadeh, B., (2017). Modeling the Trends of the Land Use Cover Change and Its Impacts on the Erosion System of the Allavian Dam Based on the Remote Sensing and GIS Techniques, *Hydrogeomorphology*, 3 (11), 21-38. (In Persian).
- Ferro, V., Giordano, G., & Lovino, M., (1991). Isoerosivity and erosion risk map for Sicily. *Hydrol Sci J* 36(6):549-564.
- Flanagan, D.C., Nearing, M.A., (1995). *USDA water erosion prediction project: hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Report No. 10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN 47907-1194.*
- Ghaffari, G., & Mahdavi, M., (2014). Effect of wet and dry periods on the amount of specific sediment (Case Study: Kharkkeh Watershed). *Iran-Watershed Management Science and Engineering*, 9(30): 49-54. (In Persian).
- Haan, CT., Barfield, BJ., & Hayes, J.C., (1994). *Design hydrology and sedimentology for small catchments. Academic Press, San Diego, 588pp.*
- Lal, R., (1990). *Soil Erosion in the Tropics. Principles and Management. McGraw-Hill, New York. 580 pp.*
- Li, T., & Gao, Y., (2015). Runoff and Sediment Yield Variations in Response to Precipitation Changes: A Case Study of Xichuan Watershed in the Loess Plateau, China. *Advance Water Science*. 7: 5638-5656.
- Lin, C.Y., (1997). A study on the width and placement of vegetated buffer strips in a mudstone-distributed watershed. *J.china. Soil water conserve*.29 (3), 250-266(in Chinese with English abstract).

- Martínez-Murillo, M.J.F., Lopez Vicente MPoesen, J., & Ruiz Sinoga, J.D., (2011). Modelling the effects of land use changes on runoff and soil Eerosion in two Mediterranean catchments with active gullies (South of Spain). *Landform Analysis*. 17(1): 99-104.
- Mohammadi, S., Karimzadeh, H.R., & Habashi, K., (2018). Assessment Soil Erosion and Deposition in the Menderjan Watershed Using USPED and RUSLE Models in the Environment of Geographical Information System (GIS). *Desert Ecosystem Engineering Journal*. 6(17): 43-56. (In Persian)
- Mohammadnejad, V., Asghari, S., & Emam, H., (2019). Investigation Land use change with Use of a Pixel-based method and Object-Oriented Method and Analysis of the Effect of Land Use Change on Soil Erosion (case Study of Maragheh County). *Quantitative Geomorphological research*. 8(1): 160-178. (In Persian)
- Moore, I.D., & Wilson, J.P., (1993). Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation. *Journal of Soil and Water Conservation* 47:423-428.
- Moradi, A., Jafari, M., Arzani, H., & Ebrahimi, M., (2016). Assessment of land use changes into dry land using satellite images and Geographical information system (GIS), *Journal of Rs and GIS for Natural Resources*, 7 (11), 89-100. (In Persian).
- Nalina, P., Meenambal, T., Sathyanarayan, S.R., (2014) .Land use land coer dynamics of nilgiris district, India infered from satelliti imageries *American Journal of Applied Sciences*. 3(11): 455-461.
- Nazari Samani, A., Heravi, H., Panahi, M., & JafariShalamzari, M., (2013). The effect of change on land use and precipitation on the sediment in Taleghan basin. *Journal of range and watershed management*. 66, 157-165. (In Persian).
- Nepta Advisory Coopeation., (2001). Detail project of Ilam Dam watershed, *Jahad and Agriculture Organization of Ilam province.*, 135 p.
- Parysow, P., Wang, G.X., Gertner, G., & Anderson A.B., (2003). Spatial uncertainty analysis for mapping soil erodibility based on joint sequential simulation. *Catena* 53:65-78.
- Razehi, M., Gharah Chai, G.R., & Ayoubi, S., (2007). Estimating soil erosion in Zeyarit watershed using RUSLE model. 10<sup>th</sup> conference of Soil science of Iran. Karaj Natural Resources and Agriculture College , Tehran University, 4- 6 Agust, 1161-1163.
- 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.
- 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 (1), 30- 33.
- Sadeghi, S.H.R., Singh, J.K., & Das, G., (2004). Efficacy of annual soil erosion models for storm-wise sediment prediction: a case study. *Int Agric Eng J* 13:1-14.
- Santos, J.C.N., Andrade, E.M., Medeiros, P.H.A., & Joao, M., (2017). Land use impact on soil erosion at different scales in the Brazilian semi-arid. *Revista Ciencia Agronomica*. 48(2): 251-260.
- Shahbazi, K., (1999). Estimation of erosion and sediment by qualitative geomorphology (homogenous units) and EPM methods and comparing them with outlet sediment data in Ilam dam basin. MS.C Thesis. School of Natural Resources, Tarbiat Modarres University. 131p.
- Sharma, A., & Kamlesh, N., (2010). Effec of land use land cover change on soil erosion potential in a agricultural watershed. *Environ Monit Assess*. 173: 789-801.
- Singh, S., Bhardwaj, A., & Verma, V., (2020). Remote sensing and GIS based analysis of temporal land use/land cover and water quality changes in Harike wetland ecosystem, Punjab, India. *Journal of Environmental Management*. 262: 11035.

- Talebi Khiawi, H., Zabihi, M., & Mustafa Zadeh, R., (2017). *The effect of different land use management scenarios on soil erosion using USLE and GIS models in the watershed of Yamchi Dam in Ardabil. Water and soil sciences, agricultural technologies and natural resources* 21 (2): 221-234.
- USDA., (1975). *Sediment Sources, Yields, and Delivery Ratios. National Engineering Handbook, Section 3 Sedimentation.*
- Vanoni, V.A., (1975). *Sedimentation Engineering, Manual and Report No. 54. American Society of Civil Engineers, New York, N.Y.*
- Wischmeier, W.H., & Smith, D.D., (1978). *Predicting rainfall erosion. losses: a guide to conservation planning. Agriculture Handbook, vol. 537. US Department of Agriculture, Washington, DC, 58 pp.*
- Wischmeier, W.H., (1971). *A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. J Soil and Water Conserv* 26:189 193.