



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی

سال هجدهم، شماره‌ی ۶۱
بهار ۱۳۹۷، صفحات ۱۰۵-۱۲۳

*آزاده مه‌ری^۱
عبدالرسول سلمان ماهینی^۲
علیرضا میکاییلی تبریزی^۳
سید حامد میرکریمی^۴
امیر سعدالدین^۵

اولویت‌بندی لکه‌های احیای سرزمین بر اساس فرسایش محتمل خاک توسط آب (مطالعه موردی: حوضه آبخیز قره‌سو)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۲۱

چکیده

فرسایش آبی خاک یک پدیده طبیعی است که امروزه تحت تاثیر فعالیتهای انسانی، همانند تبدیل غیرمنطقی زمین و تخریب پوشش گیاهی، به یکی از مهم‌ترین تهدیدات محیط‌زیستی در جهان تبدیل شده است. هدف پژوهش حاضر مدل‌سازی توزیع مکانی فرسایش آبی خاک در حوضه آبخیز قره‌سو و بررسی اثر کاربری سرزمین و شیب بر میزان فرسایش و اولویت‌بندی لکه‌های احیای سرزمین بوده است. برای اولویت‌بندی نیز مهم‌ترین لکه‌ها از لحاظ حساسیت به فرسایش و تاثیر معیارهای سرزمین بر آن شناسایی شدند. مدل‌سازی فرسایش توسط معادله جهانی هدر رفت خاک اصلاح شده (RUSLE) و به کمک فنون GIS صورت گرفت. نتایج نشان داد میانگین فرسایش در حوضه آبخیز حدود ۱۹ تن در هکتار در سال است. مناطق با فرسایش کم، متوسط و شدید به ترتیب ۶۲، ۲۶ و ۱۲ درصد منطقه را تشکیل

E-mail: az.mehri@yahoo.com

*۱- دانشجوی دکتری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان (نویسنده مسئول).

۲- گروه محیط‌زیست دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

۳- گروه محیط‌زیست دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

۴- گروه محیط‌زیست دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

۵- گروه آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

می‌دهند. بررسی اثر کاربری سرزمین و شیب اهمیت اثر متقابل این دو عامل در افزایش میزان فرسایش خاک به خصوص در زمین‌های کشاورزی با شیب‌های زیاد را نشان می‌دهد. برای اولویت‌بندی از روش تناسب ناحیه‌ای سرزمین استفاده شد و ۱۵ لکه دارای بیش‌ترین حساسیت به فرسایش شناسایی گردید. نتایج این پژوهش مکان و اولویت انجام اقدامات جبرانی از قبیل تراس‌بندی، بانکت، احیاء و استقرار پوشش گیاهی و انجام طرح‌های آمایش سرزمین جهت کاهش فرسایش و جلوگیری از اثرات سوء آن بر محیط‌زیست و اقتصاد منطقه را نشان می‌دهد.

کلید واژه‌ها: فرسایش خاک، مدل RUSLE، کاربری سرزمین، شیب، حوضه آبخیز قره‌سو.

مقدمه

امروزه، یکی از عمده‌ترین مسائل در جهان افزایش سریع تقاضا برای غذا به علت رشد سریع جمعیت است که خود باعث افزایش روند تبدیل زمین به کشاورزی شده است. افزایش کشاورزی بدون توجه به اقدامات جبرانی، توسعه شهری کنترل نشده و تخریب جنگل‌ها از عوامل اساسی فرسایش خاک هستند (Ustun, 2008: 1681). فرسایش خاک یکی از تهدیدات مهم محیط‌زیستی در محیط‌های خشکی است. در طی ۴۰ سال گذشته نزدیک به یک سوم زمین‌های قابل کشت جهان به علت فرسایش از بین رفته است و این فرآیند با نرخ حدود ۱۰ میلیون هکتار در سال ادامه دارد. فرسایش خاک به‌طور مستقیم در ارتباط با کاهش بازدهی تولید محصولات کشاورزی و آلودگی است و می‌تواند باعث کاهش توانایی خاک در کاستن از اثرات گلخانه‌ای شود (Sun et al, 2014: 152). فرسایش خاک به‌طور طبیعی هنگامی اتفاق می‌افتد که نیروی باد، قطرات باران یا رواناب بر روی سطح خاک بیش‌تر از نیروی نگهدارنده ذرات خاک شود. به‌طور کلی، پوشش گیاهی خاک را در برابر این نیروها محافظت می‌کند (May and Place, 2005: 49)؛ اما فعالیت‌های مدیریتی نامناسب و تبدیل غیرمنطقی زمین نیز باعث از بین رفتن پوشش گیاهی و در نتیجه افزایش فرسایش می‌شود. عوامل خاک و پستی و بلندی تاثیر زیادی بر میزان فرسایش دارند، اما نسبتاً ثابت و پایدار هستند. در نتیجه، پژوهشگران بارندگی‌های شدید و استفاده نادرست از زمین را عوامل اصلی افزایش فرسایش خاک برشمرده‌اند (Mohammad an Adam, 2010: 98; Sun et al, 2014: 152). روابط میان بارندگی، پوشش گیاهی و فرسایش به دلیل اثر متقابل میان آن‌ها غیرقطعی و پیچیده است. اثرات تاج پوشش و ریشه پوشش گیاهی بر کاهش فرسایش خاک، خود تحت تاثیر ترکیب، ساختار و الگوی رشد جوامع گیاهی است و فرساینده‌گی باران به‌شدت تحت تاثیر وضعیت پوشش و کاربری سرزمین قرار می‌گیرد (Sun et al, 2014: 152).

فرسایش آبی خاک یکی از مهم‌ترین انواع فرسایش است که به دلیل اثرات مخرب مانند خوراکوری^۱، آلودگی غیر نقطه‌ای و در نهایت تخریب زمین توجه زیادی را در تحقیقات فرسایش خاک به خود جلب کرده است (Sun et al,

152: 2014). مدل های مختلفی جهت پیش بینی و برآورد فرسایش آبی خاک توسعه داده شده اند که از میان آنها می توان به معادله جهانی هدررفت خاک (USLE^v) (Wischmeier and Smith, 1978: 4)، معادله جهانی هدررفت خاک اصلاح شده (RUSLE^a) (Renard et al, 1997: 14)، پروژه پیش بینی فرسایش آبی (WEPP⁹)، مدل تخمین هدررفت خاک برای آفریقا (SLEMSA¹⁰)، ANSWERS، روش پتانسیل فرسایشی (EPM¹¹)، فرسایش مواد شیمیایی و خاک از زمین های کشاورزی (CREAMS¹²) و ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT¹³) اشاره کرد. مدل های موجود طیفی از روش های ساده ریاضی و مفهومی تا مدل های پیچیده در برگیرنده جزئیات جهان واقعی را شامل می شود (May and Place, 2005: 50). مدل های فرسایش نسبتا ساده، مانند USLE، در مقیاس حوضه آبخیز نتایج بهتری را نسبت به مدل های پیچیده ارائه می دهند. مدل های پیچیده به دلیل نیاز به مقادیر زیادی از داده ها و متغیرهای ورودی منابع زیادی خطا و عدم قطعیت را وارد شبیه سازی می کنند (May and Place, 2005: 52).

USLE احتمالا پرکاربردترین مدل جهت تخمین میزان هدررفت خاک بر اثر فرسایش آبی است (May and Place, 2005: 50). این مدل نخست توسط Wischmeier and Smith برای تخمین میزان هدررفت سالانه خاک در اثر فرسایش آبی توسعه داده شد (Sun et al, 2014: 153). مدل USLE یک رابطه آماری میان میزان فرسایش خاک و عوامل موثر بر آن برقرار می کند. این عوامل شامل شدت بارندگی، فرسایش پذیری خاک، طول و تندی شیب، پوشش زمین و اقدامات مدیریتی سرزمین است (Sun et al, 2014: 153; May and Place, 2005: 50). مدل USLE، توسط (Renard et al, 1997) با ارائه مفاهیم و برآوردهای دقیق تری از محاسبه عوامل فرسایش خاک اصلاح و تحت عنوان مدل معرفی گردید (Sun et al, 2014: 153). RUSLE یک روش پذیرفته شده جهانی است که می تواند به عنوان یک مدل مناسب جهت پیش بینی و برآورد فرسایش خاک در مناطق گسترده و با پوشش و کاربری سرزمین مختلف مانند اراضی زراعی، جنگل و مرتع مورد استفاده قرار گیرد (Sun et al, 2014: 151; Rezaei et al, 2014: 98). RUSLE میزان هدررفت خاک حاصل از فرسایش آبی را به عنوان تابعی از قابلیت فرسایشی باران، پستی و بلندی، قابلیت فرسایش خاک، کاربری و پوشش زمین و مدیریت پیش بینی می کند (Sun et al, 2014: 152; Renard et al, 1997: 14). هنگامی که این مدل با داده های رستری حاصل از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) ترکیب می شود قدرت پیش بینی آن افزایش می یابد (May and Place, 2005: 51). به کمک فنون سنجش از دور و سامانه های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، مدل RUSLE به عنوان یک مدل توزیعی برآورد هدررفت خاک نه تنها در مناطقی با شیب نسبتا کم، بلکه در مناطقی با ساختار پستی و بلندی پیچیده تر نیز مورد استفاده قرار گرفته است (Sun et al, 2014: 152; Desmet and Govers, 1996: 427).

7- Universal Soil Loss Equation

8- Revised Universal Soil Loss Equation

9- Water Erosion Prediction Project

10- Soil Loss Estimation Model for Southern Africa

11- Erosion Potential Method

12- Chemicals Runoff and Erosion From Agricultural Management Systems

13- Soil and Water Assessment Tool

داده‌های مکانی محاسبه می‌شوند، فنون موجود در GIS ابزارهای مفیدی جهت تولید، اصلاح و نقشه‌سازی آن‌ها هستند. این فنون امکان مطالعه فرسایش در حوضه‌های وسیع‌تر و با جزئیات بیش‌تر و نمایش خروجی‌ها به صورت لایه‌های مکانی را فراهم می‌کند (Karimi, 2011: 50).

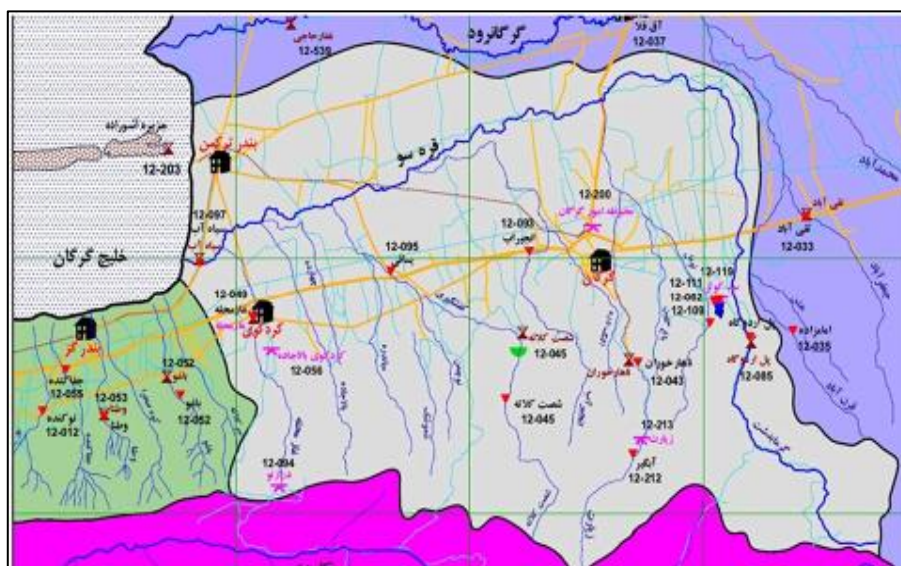
مدل RUSLE در مطالعات مختلف در ایران و جهان مورد استفاده قرار گرفته است. (Rezaei et al (2014) از مدل RUSLE در ترکیب با فنون سنجش از دور و GIS به منظور برآورد فرسایش خاک و تعیین مؤثرترین عامل فرسایش در حوضه آبخیز گابریک استان هرمزگان استفاده کردند. بر این اساس میزان فرسایش سالانه خاک از ۰/۳۳۰۰ تا ۳۲۶۹۹ تن در هکتار در سال برآورد شد. نتایج این تحقیق همچنین نشان داد، عامل پستی و بلندی بیش‌ترین تأثیر را در برآورد فرسایش سالانه خاک داشته است. (Arekhi and Niazi (2010) از این روش برای تخمین فرسایش خاک و نسبت تحویل رسوب در حوضه بالادست سد ایلام استفاده کردند. در این مطالعه میانگین بار رسوب سالانه ۱۴/۷۵ تن در هکتار در سال برآورد شد که عامل پستی و بلندی بیش‌ترین تأثیر را در این برآورد داشته است. Kamangar et al, (2015) به واسنجی روش RUSLE با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور در حوضه آبخیز سیخوران هرمزگان پرداختند. تطبیق نتایج این پژوهش با یک ایستگاه رسوب سنجی همبستگی ۸۲/۷ را نشان داد که موثر بودن استفاده از فنون RS و GIS را جهت تخمین کمی مقدار فرسایش اثبات می‌کند. Pour Abdullah and Tajrishi (2012) از مدل‌های RUSLE و SWAT برای مدل‌سازی احتمال فرسایش و رسوب در حوضه آبخیز سد لتیان و مقایسه نتایج آن‌ها با مقادیر واقعی استفاده کردند. نتایج نشان داد مدل RUSLE به دلیل ناسازگاری با مناطق کوهستانی و عدم در نظر گرفتن فرسایش ناشی از ذوب برف نتایج ضعیف‌تری نسبت به SWAT ارائه کرده است. (Karam et al (2010) پهنه‌بندی فرسایش خاک در حوضه آبخیز ماملو را با استفاده از RUSLE و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی انجام دادند. نتایج اجرای RUSLE نشان داد، میانگین فرسایش ۱۰/۷ تن در هکتار در سال است. همچنین، نتایج حاصل از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی نتایجی تقریباً مشابه با RUSLE ارائه نمود. (Prasannakumar (2012) از مدل RUSLE برای تخمین احتمال فرسایش خاک در یک حوضه آبخیز کوهستانی در هند استفاده کردند. ترکیب مدل با فنون GIS نتایج مناسبی را جهت استفاده در مدیریت و برنامه‌ریزی سرزمین در مناطق کوهستانی با حساسیت محیط‌زیستی فراهم نمود. (Sun et al (2014) اثر انواع کاربری‌های سرزمین، پستی و بلندی و درجه شیب را بر روی فرسایش خاک توسط مدل RUSLE مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد، شیب‌های میانه و دره‌ها مؤثرترین عامل پستی و بلندی در افزایش فرسایش هستند. (Meshesha et al (2012) با استفاده از مدل RUSLE مهم‌ترین لکه‌ها از لحاظ خطر فرسایش خاک را شناسایی کردند. سپس برای لکه‌های حساس به فرسایش اقدامات مدیریتی و کنترلی مناسب را ارائه نمودند و اثر آن را بر میزان فرسایش توسط مدل RUSLE پیش‌بینی کردند. نتایج نشان داد، احیای مناطق تخریب شده توسط کاشت پوشش گیاهی و قرق و نصب سازه‌های سنگی کنترل فرسایش، میزان هدررفت خاک را به ترتیب تا حدود ۱۲/۶ و ۶۳/۸ درصد کاهش می‌دهند. همچنین، استفاده همزمان این دو روش باعث کاهش

هدر رفت خاک تا ۸/۸۷ درصد می شود. در مجموع و با توجه به مطالعات صورت گرفته، مدل سازی فرسایش خاک و به دنبال آن ارائه اقدامات کنترلی جهت کاهش فرسایش امری ضروری است.

هدف پژوهش حاضر بررسی توزیع مکانی میزان هدررفت خاک در اثر فرسایش آبی با استفاده از مدل RUSLE و ترکیب آن با فنون GIS در حوضه آبخیز قره سو است. هم زمان، تاثیر کاربری سرزمین و شیب بر میزان فرسایش بررسی شده است. سپس، نشان داده شده است چگونه می توان از روش تناسب ناحیه ای سرزمین جهت اولویت بندی لکه های احیای سرزمین و شناسایی مهم ترین لکه ها از لحاظ حساسیت به فرسایش و تاثیر معیارهای سرزمین بر آن استفاده کرد.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر حوضه آبخیز قره سو در استان گلستان است (شکل ۱). این حوضه با ۱۶۱۰ کیلومترمربع وسعت، ۸ درصد مساحت استان گلستان را تشکیل می دهد. حوضه آبخیز قره سو از شمال و شرق به حوضه آبخیز گرگان رود، از جنوب به حوضه آبخیز نکارود و از غرب به حوضه آبخیز خلیج گرگان و نیز دریاچه بزرگ خزر محدود می شود و در روستای قره سو به این دریاچه تخلیه می گردد. سطح عمده حوضه آبخیز قره سو در جنوب توسط جنگل پوشیده شده و در شمال حوضه دشت آبرفتی با کاربری زراعی و مسکونی سطح حوضه را تشکیل می دهد. (GUASNR, 2013: 28). مساحت زیادی از شهرستان های گرگان، کردکوی و بندر ترکمن در این حوضه واقع شده اند.



شکل ۱: موقعیت حوضه آبخیز قره سو (GUASNR, 2013: 28)

مواد و روش ها

در این پژوهش برای تعیین میزان فرسایش آبی در حوضه آبخیز قره سو از مدل RUSLE استفاده شد. میزان هدررفت خاک توسط مدل RUSLE به صورت رابطه (۱) محاسبه می شود (Sun et al, 2014: 153).

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

در این رابطه A میانگین سالانه هدررفت خاک (تن در هکتار در سال)، R عامل فرساینده گی باران ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1}$)، K عامل فرسایش پذیری خاک ($\text{t ha h ha}^{-1} \text{MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$)، L عامل طول شیب، S ضریب تندی شیب، C عامل پوشش و کاربری سرزمین و P عامل عملیات اصلاحی در جهت کاهش فرسایش است. مقادیر عوامل S، L، C و P بدون بعد هستند. در ادامه نحوه محاسبه هر یک از عوامل ارائه شده است.

عامل فرساینده گی باران (R): در مدل اصلی RUSLE (Wischmeier and Smith, 1978: 5) عامل R به عنوان حاصل ضرب انرژی باران (Mj m^{-2}) و حداکثر شدت بارش ۳۰ دقیقه‌ای (mm hr^{-1}) محاسبه شده است. در مناطقی که داده‌های کافی در ارتباط با انرژی باران موجود نیست، باید از روش‌های جایگزین و شاخص‌های موجود استفاده کرد (Meshesha et al, 2012: 87). در پژوهش حاضر به دلیل این که داده‌های انرژی باران موجود نبود، از شاخص اصلاح شده فورنیه که امکان محاسبه آن با داده‌های موجود ایستگاه‌های هواشناسی مقدور و در عین حال دارای مقبولیت در سایر پژوهش‌های داخل و خارج کشور بوده است، استفاده گردید (Arekhi and Niazi, 2010: 7; Rezaei et al, 2014: 101; Alexakis et al, 2013: 112). این شاخص به خوبی با قدرت فرساینده گی باران همبستگی دارد (Kouli et al, 2009: 250) و یک تخمین موثر برای R در نظر گرفته می‌شود، زیرا توزیع بارش فصلی را شامل می‌شود (Alexakis et al, 2013:112). شاخص اصلاح شده فورنیه به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Renard and Freimund, 1994: 296).

$$\text{MFI} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{12} \frac{P_{ij}^2}{P_j} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه، P_{ij} متوسط بارندگی ماهانه (میلی‌متر) در ماه i و سال j ، P_j متوسط بارندگی سالانه (میلی‌متر) در سال j ، و N تعداد سال‌های مورد بررسی است. در مرحله بعد با جایگذاری شاخص اصلاح شده فورنیه در رابطه (۳) که توسط Renard and Freimund در سال (۱۹۹۴) برای مناطق فاقد داده‌های تفضیلی رگبار (شدت بارندگی) پیشنهاد شده است، عامل R محاسبه شد.

$$R = (0.07397\text{MFI}^{1.847})/17.02 \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$R = (95.77 - 6.081\text{MFI} + 0.477\text{MFI}^2)/17.02 \quad \text{MFI} \geq 55$$

در این پژوهش از داده‌های متوسط بارندگی ماهانه و سالانه ۱۹ ایستگاه بارندگی طی ۱۰ سال (۱۳۸۴-۱۳۹۳) استفاده شد. به منظور افزایش دقت روند درونیابی برای تهیه لایه نهایی، از داده‌های تعدادی از ایستگاه‌های خارج از منطقه مورد مطالعه و در نزدیکی آن نیز استفاده شد. داده‌های بارندگی در محیط برنامه اکسل آماده‌سازی شدند و شاخص اصلاح شده فورنیه برای هر ایستگاه محاسبه گردید. سپس، بر اساس میزان شاخص اصلاح شده فورنیه عامل R برای ایستگاه‌ها محاسبه شد. در نهایت داده‌ها بر اساس مختصات جغرافیایی وارد GIS شدند و یک لایه نقطه‌ای از عامل R

تهیه گردید. در نهایت با استفاده از روش درونیابی فاصله وزنی معکوس (IDW^{14}) لایه رستری عامل R برای کل منطقه تولید گردید.

عامل فرسایش پذیری خاک (K): عامل K نمایانگر حساسیت ذاتی خاک به فرسایش و سهولت جدا شدن ذرات خاک توسط انرژی باران و انتقال آنها توسط رواناب است. عامل K تحت تاثیر عواملی مانند بافت خاک، مواد آلی، نفوذپذیری و ساختمان خاک قرار دارد. روش های متفاوتی برای اندازه گیری عامل K در مطالعات مختلف استفاده شده است (Rezaei et al, 2014: 102; Arekhi and Niazi, 2010: 8; Wischmeier and Smith, 1978: 8; Sun et al, 2014: 154). در مطالعه حاضر، با توجه به داده های موجود از رابطه (۴) که توسط Williams et al (1984) ارائه شده است استفاده گردید (Sun et al, به نقل از Williams et al, 1984).

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 \text{SAN} \left(\frac{1 - \text{SIL}}{100} \right) \right] \right\} \left(\frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right)^{0.3} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\times \left(1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right) \left(1.0 - \frac{0.7\text{SNI}}{\text{SNI} + \exp(-5.51 + 22.9\text{SNI})} \right)$$

در این رابطه، SAN درصد شن، SIL درصد لای، CLA درصد رس، C درصد کربن آلی خاک و SNI برابر با 1-SAN/100 است. داده های مورد نیاز از مطالعات تهیه اطلس آلودگی خاک در استان گلستان (Atlas of soil contaminants of Golestan Province, 2010) تهیه گردید. این اطلاعات شامل ۷۴ نقطه نمونه برداری در حوضه آبخیز قره سو است. ابتدا عامل K برای هریک از نقاط محاسبه گردید. سپس، با استفاده از روش درونیابی IDW لایه رستری عامل K برای کل منطقه تولید شد.

عامل پستی و بلندی (LS): عامل پستی و بلندی به طور مستقیم بر فرسایش خاک اثر می گذارد و بیانگر اثر طول شیب و ضریب تندی شیب بر فرسایش است. هر دو عامل طول شیب و ضریب تندی شیب فرسایش ورقه ای و شیاری پیش بینی شده توسط RUSLE را تحت تاثیر قرار می دهند. مطالعات مختلفی که جهت اندازه گیری این عوامل صورت گرفته منجر به ارائه روش های متفاوت اندازه گیری شده است (Rezaei et al, 2014: 103; Arekhi and Niazi, 2010: 8; Wischmeier and Smith, 1978: 12; Sun et al, 2014: 155). در پژوهش حاضر از روش ارائه شده توسط Renard et al (1997) استفاده شده است.

عامل L فاصله افقی از مبدا جریان خاک تا منطقه ای است که شیب به اندازه کافی برای شروع رسوب گذاری کاهش می یابد یا تا منطقه ای که رواناب در یک کانال تعریف شده تجمع می یابد. در این روش عامل L از طریق رابطه (۵) محاسبه می شود (Renard et al, 1997: 101).

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad \text{رابطه (۵)}$$

λ طول جریان آب در عرض یک سلول به متر است و می توان آن را توسط دستور flow در نرم افزار ایدریسی محاسبه کرد. m عامل شیب است که از طریق رابطه (۶) محاسبه می شود.

$$m = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\beta = \frac{\sin \theta / 0.0896}{3.0(\sin \theta)^{0.8} + 0.56}$$

θ زاویه شیب به درجه است. با افزایش ضریب تندى شیب (S) مقدار هدررفت خاک با سرعت بیش تری نسبت به افزایش طول شیب، افزایش می یابد. عامل S از طریق رابطه (۷) محاسبه می شود:

$$S = 10.8 \sin \theta + 0.03 \quad s < 9\% \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$S = 16.8 \sin \theta - 0.50 \quad s \geq 9\%$$

در پژوهش حاضر برای محاسبه عامل L و S از نقشه رقومی ارتفاع dem با بزرگنمایی ۳۰ متر استفاده شده است. عامل پوشش و کاربری سرزمین (C): عامل C بیانگر اثر فعالیت های مخرب خاک، کاربری سرزمین، پوشش گیاهان، سطح تولید محصولات و پوشش خاک بر فرسایش خاک است (Alexakis et al, 2013: 118). یکی از روش های تعیین عامل C استفاده از نقشه طبقات کاربری و پوشش زمین است. مقادیر C برای هر نوع کاربری و پوشش زمین به صورت تجربی تعیین می شود (Karimi, 2011: 50). در این پژوهش، برای کاربری سرزمین از نقشه تهیه شده در طرح آمایش استان گلستان (GUASNR, 2013) استفاده شد. مقادیر عامل C برای نقشه کاربری مطابق (جدول ۱) تعیین شد.

جدول ۱- عامل C برای طبقات کاربری سرزمین (Karimi, 2011)

نوع کاربری و پوشش زمین	عامل C
جنگل	۰/۰۰۳
بدون پوشش	۰/۳۶
کشاورزی	۰/۲۶
مراتع	۰/۰۱۳
مراکز توسعه یافته	۰/۰۰۳
آب	۰

عامل عملیات اصلاحی جهت کاهش فرسایش (P): عامل P به عنوان نسبت هدررفت خاک بعد از یک عملیات اصلاحی ویژه نظیر کاشت در جهت عمود بر شیب، ترانس بندی و کشت نواری است. متداول ترین روش تعیین مقادیر این عامل

ارزیابی فعالیت های کشاورزی موجود توسط کارشناسان با مشاهدات میدانی یا عکس های هوایی است Alexakis et (117: 2013, al). چنانچه عملیات اصلاحی خاصی انجام نشده باشد، مقدار این عامل برابر یک در نظر گرفته می شود. در پژوهش حاضر مقدار این عامل در تمام منطقه یک در نظر گرفته شد.

- بررسی اثر متقابل شیب و کاربری سرزمین بر فرسایش خاک

به منظور کاهش فرسایش خاک، کاربری هایی که بیش تر در معرض مقادیر بالای فرسایش خاک هستند باید شناسایی شوند. این اطلاعات برای انتخاب و اجرای اقدامات حفاظتی ضروری هستند. علاوه بر این، شیب یکی از عوامل اصلی تعیین کننده میزان فرسایش است (Meshesha et al, 2012: 88) و در ترکیب با کاربری سرزمین می تواند باعث افزایش میزان هدررفت خاک شود. در پژوهش حاضر، اهمیت شیب و کاربری سرزمین بر توزیع فرسایش در منطقه با استفاده از فنون روی هم گذاری GIS مورد بررسی قرار گرفت.

- اولویت بندی لکه های احیای سرزمین

یکی از مراحل مهم و اولیه برای برنامه های کاهش فرسایش خاک، تعیین لکه هایی است که بیش ترین حساسیت را نسبت به فرسایش دارند (Meshesha et al, 2012: 88). تعیین این لکه ها به معرفی اقدامات جبرانی برای کاهش اثرات فرسایش کمک می نماید. در پژوهش حاضر، مهم ترین لکه های حساس به فرسایش بر اساس نقشه فرسایش خاک حاصل از RUSLE و تاثیر معیارهای سرزمین بر آن با استفاده از روش تناسب ناحیه ای سرزمین شناسایی شدند. این روش با در نظر گرفتن حداقل مساحت برای لکه ها، پیوسته ترین لکه ها با حداکثر حساسیت به فرسایش را شناسایی می کند.

یافته ها و بحث

عامل فرسایش باران (R) توسط روابط (۲ و ۳) محاسبه گردید که نقشه آن در (شکل ۲) ارائه شده است. مقدار این عامل از ۱۱ تا حدود ۱۸۶ $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{yr}^{-1}$ متغیر است و میانگین آن در کل حوضه ۱۳۱ $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{yr}^{-1}$ است. این مقادیر نشان دهنده تغییرات زیاد این عامل در حوضه است. بیش ترین مقدار آن از مرکز حوضه به سمت غرب در نزدیکی دریای خزر و کم ترین مقدار آن نیز در شمال غربی نزدیک به شهر آق قلا و همچنین در بخش جنوب غربی حوضه دیده می شود.

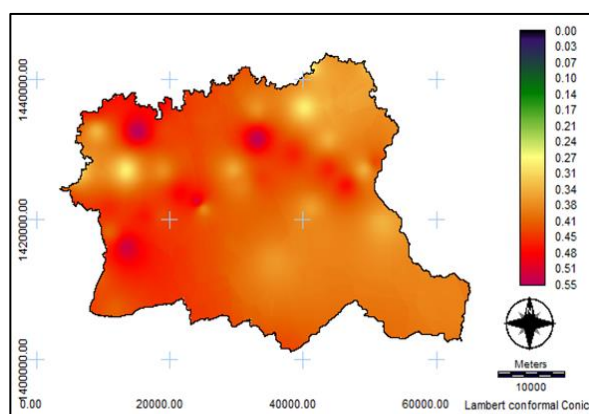
عامل فرسایش پذیری خاک (K) توسط رابطه (۴) محاسبه شد و نقشه آن در (شکل ۳) ارائه شده است. مقدار این عامل در دامنه ۰/۱ تا ۰/۵۵ $\text{ha h ha}^{-1} \text{MJ}^{-1} \text{mm}^{-1} \text{t}$ قرار دارد و میانگین آن در کل حوضه ۰/۴ $\text{ha h ha}^{-1} \text{MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$ است. خاک در بخش های شمال غربی و جنوب غربی بیش ترین فرسایش پذیری را دارد. خاک های این مناطق بیش تر سیلتی-رسی، سیلتی-لومی و رسی-لومی است.

عامل طول شیب (L) توسط روابط (۵ و ۶) محاسبه شد و نقشه آن در (شکل ۴) ارائه شده است. مقدار این عامل از ۱ تا ۱/۶۳ متغیر است و میانگین آن در کل حوضه ۱/۲۷ است. بیشترین مقادیر این عامل مربوط به بخش‌های جنوبی حوضه است که در مناطق پرشیب و مرتفع قرار گرفته است.

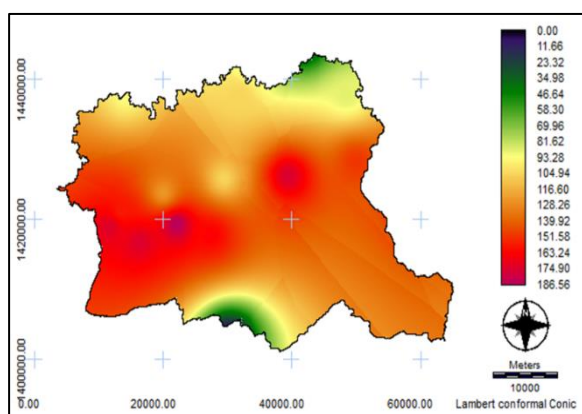
ضریب تندى شیب (S) توسط رابطه (۷) محاسبه شد و نقشه آن در (شکل ۵) ارائه شده است. مقدار این عامل از ۰/۲ تا ۱۶/۷۵ متغیر است و میانگین آن در کل حوضه ۵/۴۳ است. بیشترین مقدار این عامل مربوط به بخش‌های جنوبی حوضه است که در مناطق پرشیب و مرتفع قرار گرفته است.

عامل پوشش و کاربری سرزمین (C) توسط نقشه کاربری سرزمین و ارزش‌های ارائه شده در (جدول ۱) تهیه شد (شکل ۶). مقادیر این عامل از صفر تا ۰/۲۶ است و میانگین آن در کل حوضه ۰/۱۳ است.

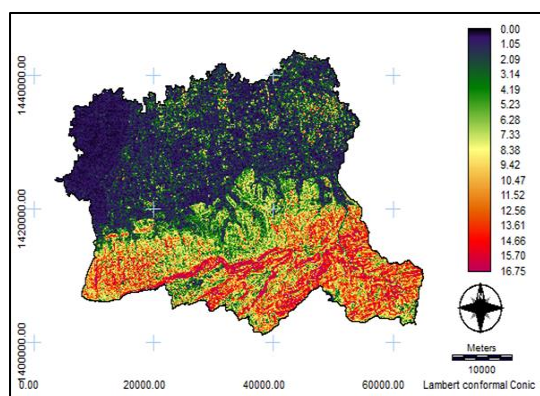
پس از تهیه نقشه عوامل مورد نیاز، نقشه هدررفت خاک در کل حوضه با استفاده از رابطه (۱) تهیه شد. نقشه نهایی حاصل از مدل RUSLE در (شکل ۷) ارائه شده است. میانگین و انحراف از معیار فرسایش در منطقه به ترتیب برابر ۳۳/۸۸ و ۱۸/۶۵ تن در هکتار در سال است (جدول ۲).



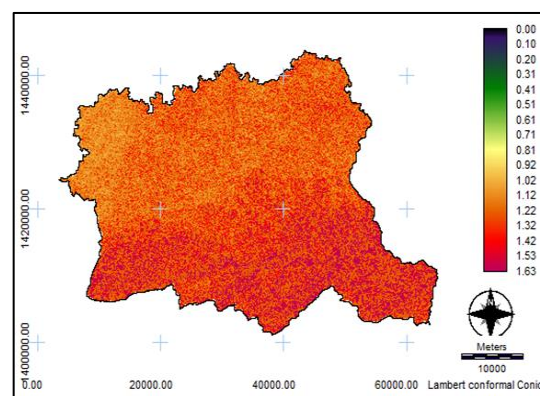
شکل ۳: نقشه عامل فرسایش پذیری خاک (K) ($ha h ha^{-1} MJ^{-1} mm^{-1}$)



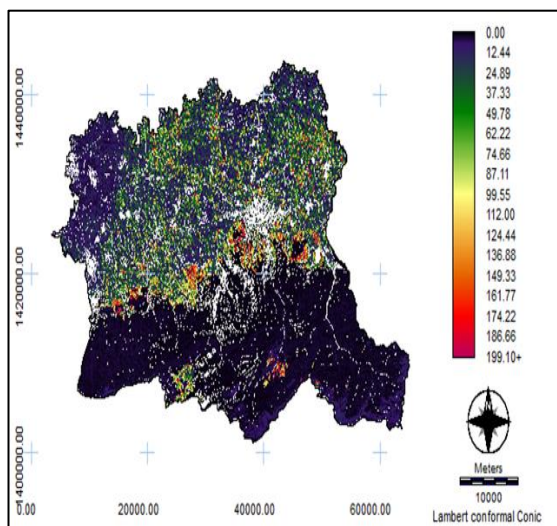
شکل ۴: نقشه عامل فرساینده‌گی باران (R) ($MJ mm ha^{-1} h^{-1} yr^{-1}$)



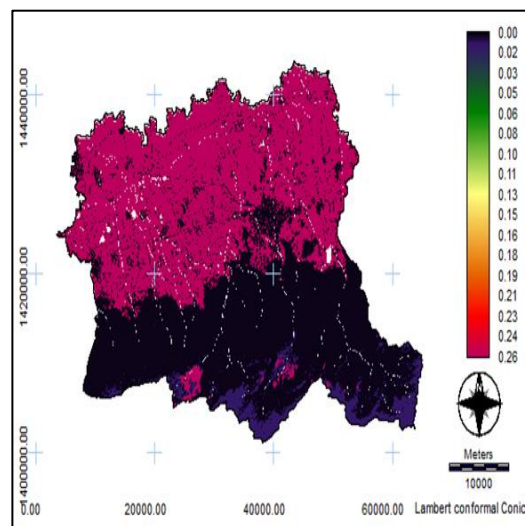
شکل ۵: نقشه ضریب تندى شیب (S)



شکل ۶: نقشه عامل طول شیب (L)



شکل ۷: نقشه فرسایش خاک (تن در هکتار در سال)



شکل ۶: نقشه عامل پوشش و کاربری سرزمین (C)

جدول ۲- میانگین فرسایش در طبقات کاربری سرزمین

شماره طبقه	کاربری سرزمین	میانگین فرسایش (تن در هکتار در سال)
۱	مناطق مسکونی و صنعتی	۰/۴۰
۲	جنگل	۲/۲۱
۳	مرتع	۶/۹۰
۴	کشاورزی	۳۶/۱۵
۵	منابع آب	۰

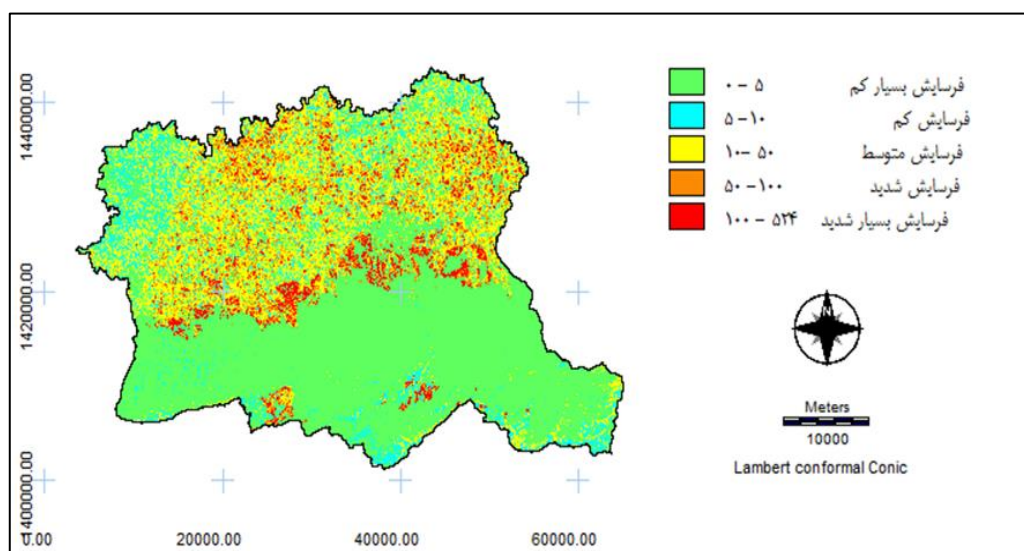
همان گونه که مشخص است، بیشترین میزان فرسایش به ترتیب برای کاربری های کشاورزی، مرتع و جنگل به دست آمده است. برای بررسی توزیع فرسایش در منطقه، نقشه حاصل از فرسایش بر اساس نمودار فراوانی مقادیر فرسایش و نحوه توزیع مقادیر در پیکسل های کل منطقه، طبقه بندی شد (جدول ۳). حدود ۵۲ درصد حوضه دارای فرسایش صفر تا ۵ تن در هکتار در سال است. مناطقی با فرسایش ۵ تا ۱۰ تن در هکتار حدود ۱۱ درصد منطقه را تشکیل می دهند. فرسایش بیش تر از ۵۰ تن در هکتار در سال نیز حدود ۱۲ درصد سطح حوضه را شامل می شود. بر این اساس، نقشه فرسایش به ۵ طبقه فرسایش بسیار کم، کم، متوسط، شدید و بسیار شدید طبقه بندی گردید (جدول ۴ و شکل ۸). همان گونه که از جدول مشخص است، حدود ۶۲ درصد حوضه را مناطقی با فرسایش بسیار کم و کم، ۲۶ درصد آن را مناطقی با فرسایش متوسط و ۱۲ درصد آن را مناطقی با فرسایش شدید و بسیار شدید تشکیل می دهند.

جدول ۳- مشخصات طبقات فرسایش خاک

شماره طبقه	میانگین فرسایش (تن در هکتار در سال)	مساحت (هکتار)	مساحت (درصد)	مساحت تجمعی (درصد)
۱	۰ - ۵	۸۴۱۳۵	۵۲/۰۹	۵۲/۰۹
۲	۵ - ۱۰	۱۶۹۵۰	۱۰/۴۹	۶۲/۵۸
۳	۱۰ - ۲۰	۲۲۹۶۶	۱۴/۲۲	۷۶/۸۰
۴	۲۰ - ۳۰	۱۰۹۹۵	۶/۸۱	۸۳/۶۰
۵	۳۰ - ۴۰	۴۲۰۶	۲/۶۰	۸۶/۲۱
۶	۴۰ - ۵۰	۳۳۴۵	۲/۰۷	۸۸/۲۸
۷	۵۰ - ۱۰۰	۱۲۵۴۸	۷/۷۷	۹۶/۰۵
۸	۱۰۰ - ۲۰۰	۵۵۹۵	۳/۴۶	۹۹/۵۱
۹	۲۰۰ - ۵۲۴	۷۸۹	۰/۴۹	۱۰۰/۰۰

جدول ۴- مشخصات طبقات شدت فرسایش خاک (Rezaei et al, 2014: 98)

شماره طبقه	شدت فرسایش	میانگین فرسایش (تن در هکتار در سال)	مساحت (هکتار)	مساحت (درصد)	مساحت تجمعی (درصد)
۱	خیلی کم	۰ - ۵	۸۴۱۳۵	۵۲/۰۹	۵۲/۰۹
۲	کم	۵ - ۱۰	۱۶۹۵۰	۱۰/۴۹	۶۲/۵۸
۳	متوسط	۱۰ - ۵۰	۴۱۵۱۱	۲۵/۷۰	۸۸/۲۸
۴	شدید	۵۰ - ۱۰۰	۱۲۵۴۸	۷/۷۷	۹۶/۰۵
۵	بسیار شدید	۱۰۰ - ۵۲۴	۶۳۸۵	۳/۹۵	۱۰۰/۰۰



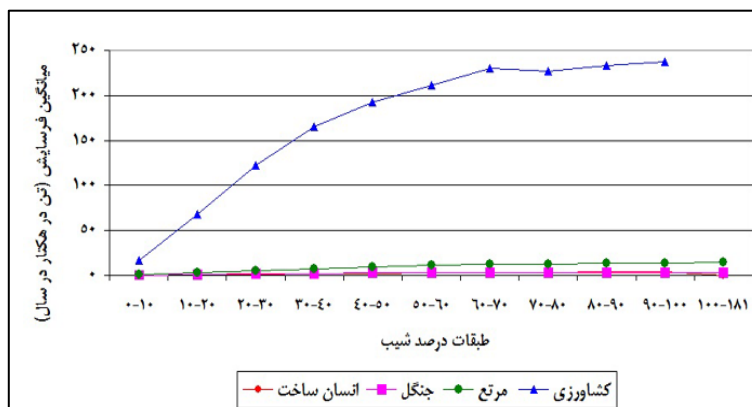
شکل ۸: نقشه طبقه‌بندی فرسایش خاک (تن در هکتار در سال)

- بررسی اثر متقابل شیب و کاربری سرزمین بر فرسایش خاک

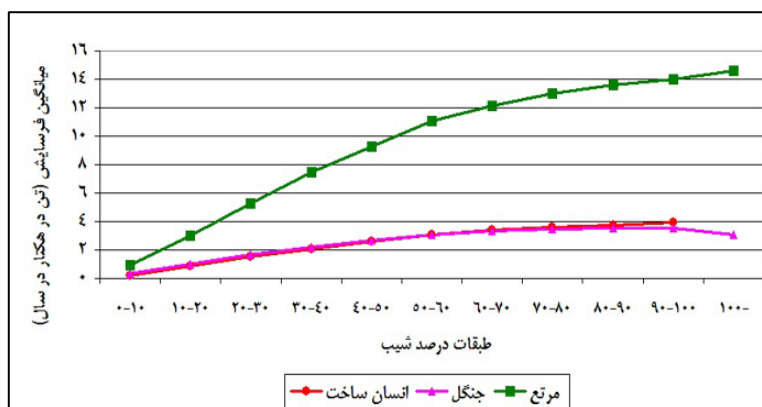
شیب و کاربری سرزمین دو عامل اصلی در تعیین میزان هدررفت خاک حاصل از فرسایش هستند. نتایج روی هم گذاری نقشه های طبقات شیب، کاربری سرزمین و فرسایش خاک در (جدول ۵) ارائه شده است. در طبقات شیب مشابه، بیشترین میزان فرسایش مربوط به کاربری کشاورزی است. همچنین در تمام طبقات کاربری، با افزایش شیب میزان فرسایش افزایش می یابد. بیشترین میزان فرسایش مربوط به کاربری کشاورزی است که در بیشترین شیب قرار دارند. همچنین، مقایسه دامنه تغییرات مقدار فرسایش خاک با افزایش شیب در کاربری های مختلف مشخص می کند اثر افزایش شیب در کاربری کشاورزی بیش تر از سایر کاربری ها است. همچنین، اثر افزایش شیب در کاربری مرتع بیش تر از جنگل است. این موضوع در (شکل های ۹ و ۱۰) توسط شیب نمودار قابل تشخیص است. در نمودار ۱۲ برای مقایسه بهتر کاربری مرتع و جنگل، کاربری کشاورزی حذف شده است. نتایج نشان دهنده تاثیر متقابل شیب و کاربری در افزایش فرسایش خاک است. برای بررسی بیشتر، مناطقی که کاربری کشاورزی در شیب ها بالاتر از ۱۲ درصد قرار دارند انتخاب شدند و با فرض این که در آن ها فعالیت هایی مانند درختکاری و احیای پوشش جنگلی اجرا شود برای اصلاح عامل پوشش و کاربری سرزمین (C) استفاده شدند. به این مناطق در نقشه کاربری مقدار ۰/۰۰۸ داده شد و فرمول RUSLE مجدد با عامل اصلاح شده C اجرا شد. بر طبق نتایج، میانگین فرسایش خاک تا حدود ۹ تن در هکتار در سال کاهش یافت. مسئله دیگری که مورد بررسی قرار گرفت میانگین فرسایش خاک در طبقات تبدیل کاربری سرزمین از سال (۱۳۹۴) تا (۲۰۱۳) است. برای این کار از نقشه های کاربری موجود استفاده شد، GUASNR (2013) که نتایج آن در (جدول ۶) ارائه شده است. بیشترین میزان فرسایش در مناطقی است که کاربری های جنگل و مرتع به کشاورزی تبدیل شده است. مساحت طبقه تبدیل جنگل به کشاورزی قابل توجه است، اما طبقه تبدیل مرتع به کشاورزی مساحت بسیار کمی را به خود اختصاص داده است. تبدیل جنگل به مرتع نیز مساحت زیادی را به خود اختصاص داده، اما میزان فرسایش در آن کم است.

جدول ۵- میانگین فرسایش خاک (تن در هکتار در سال) در طبقات مختلف شیب و کاربری سرزمین

بیش تر از	۹۰-۱۰۰	۸۰-۹۰	۷۰-۸۰	۶۰-۷۰	۵۰-۶۰	۴۰-۵۰	۳۰-۴۰	۳۰-۲۰	۱۰-۲۰	۰-۱۰	درصد شیب نام کاربری
۱۰۰	۳/۹۳	۳/۷۳	۳/۶۲	۳/۴۰	۳/۰۸	۲/۶۱	۲/۰۹	۱/۵۵	۰/۸۶	۰/۲۰	انسان ساخت
۳/۰۸	۳/۵۳	۳/۵۴	۳/۴۸	۳/۳۳	۳/۰۶	۲/۶۹	۲/۲۲	۱/۶۵	۱/۰۲	۰/۳۳	جنگل
۱۴/۵۸	۱۳/۹۹	۱۳/۶۳	۱۳/۰۰	۱۲/۱۵	۱۱/۰۶	۹/۲۵	۷/۴۴	۵/۲۸	۰/۰۳	۰/۹۴	مرتع
۰/۰۰	۲۳۷/۵۱	۲۳۳/۲۶	۲۲۷/۴۱	۲۳۰/۶۰	۲۱۱/۵۹	۱۹۲/۶۲	۱۶۴/۷۶	۱۲۲/۰۸	۶۸/۱۱	۱۶/۴۰	کشاورزی



شکل ۹: نمودار میانگین فرسایش خاک (تن در هکتار در سال) در طبقات مختلف شیب و کاربری سرزمین



شکل ۱۰: نمودار میانگین فرسایش خاک (تن در هکتار در سال) در طبقات مختلف شیب و کاربری سرزمین

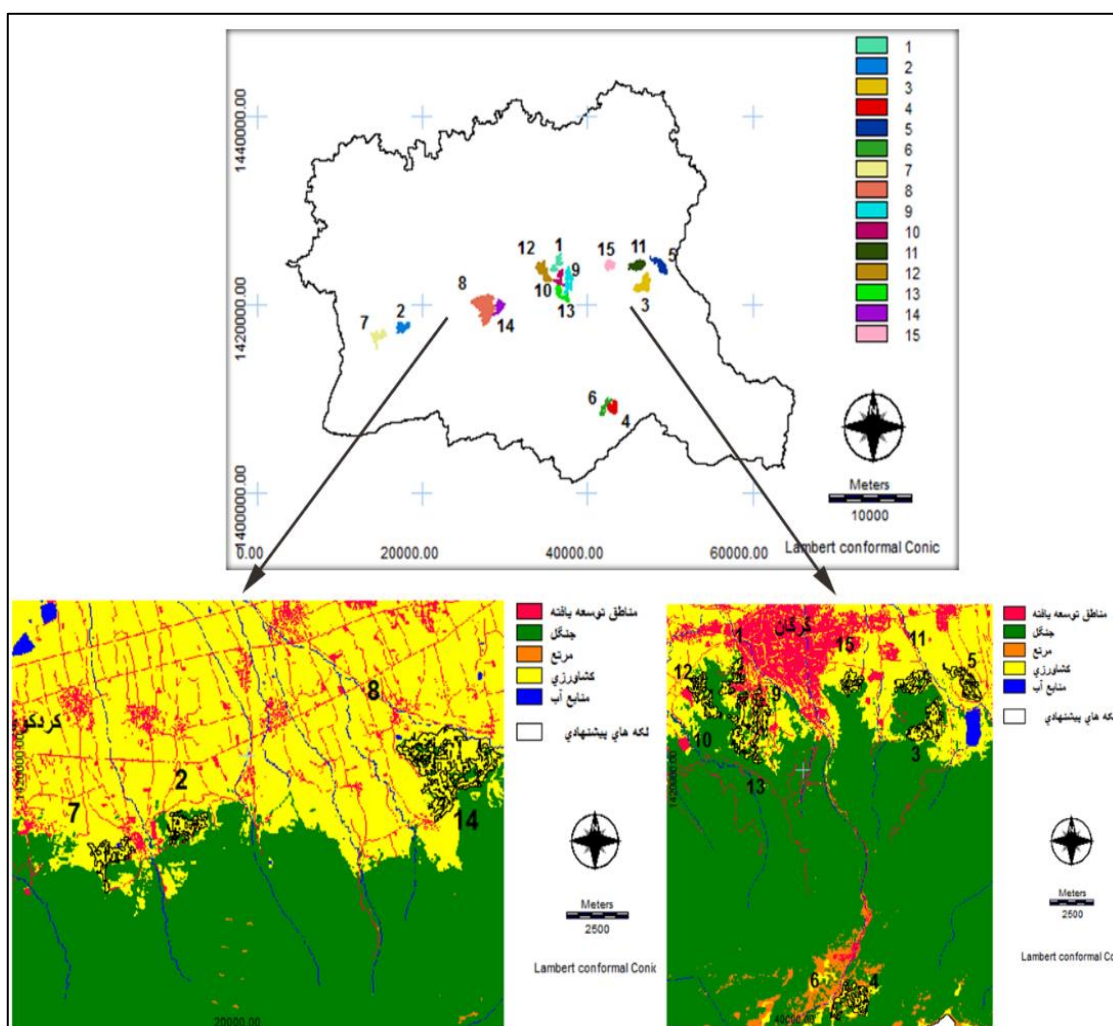
جدول ۶- میانگین فرسایش خاک (تن در هکتار در سال) در طبقات تبدیل کاربری سرزمین

کاربری سال ۱۹۸۴	کاربری سال ۲۰۱۳	میانگین فرسایش خاک (تن در هکتار در سال)	مساحت (هکتار)	نسبت مساحت به کل حوضه آبخیز (درصد)
جنگل	کشاورزی	۸۰/۸۴	۴۵۲۳	۲/۸۰
مرتع	کشاورزی	۷۲/۷۳	۴۱	۰/۰۳
جنگل	مرتع	۷/۰۸	۴۲۶۸	۲/۶۴
مرتع	مسکونی و صنعتی	۱/۲۳	۲۵	۰/۰۲
جنگل	مسکونی و صنعتی	۱/۱۰	۷۳۴	۰/۴۵
کشاورزی	مسکونی و صنعتی	۰/۳۵	۷۵۹۵	۴/۷۰

- اولویت‌بندی لکه‌های احیای سرزمین

برای تعیین مهم‌ترین لکه‌های حساس به فرسایش از روش تناسب ناحیه‌ای سرزمین به صورت یک دستور ماکرو آماده انتخاب مکان در نرم‌افزار ایدرسی استفاده شد. توسط این ماکرو می‌توان پیوسته‌ترین لکه‌ها را که دارای یک

حداقل ارزش و حداقل مساحت در نقشه ورودی هستند شناسایی کرد. برای این کار با استفاده از دستور ماکرو و نقشه فرسایش خاک حاصل از مدل RUSLE لکه‌هایی که دارای فرسایش بیش‌تر از ۱۰۰ تن در هکتار در سال و حداقل مساحت ۵۰ هکتار هستند شناسایی شدند. بر این اساس، تعداد ۱۵ لکه انتخاب گردید. (شکل ۱۱) نقشه لکه‌های منتخب را نشان می‌دهد. در این نقشه لکه شماره ۱ بیش‌ترین میزان فرسایش را دارد و با افزایش آن تا لکه شماره ۱۵ فرسایش کاهش می‌یابد. مشخصات این لکه‌ها در (جدول ۷) ارائه شده است. تمامی لکه‌ها در کاربری کشاورزی قرار گرفته‌اند. مطابق نتایج مراحل قبل، این نتایج نیز نشان داد کاربری کشاورزی در حوضه آبخیز قره‌سو دارای بیش‌ترین حساسیت نسبت به فرسایش است. لکه‌ها در شیب‌های ۱۹ تا ۳۵ درصد قرار گرفته‌اند. علت انتخاب نشدن لکه‌ها در شیب‌های بالاتر به این دلیل است که شرط برقراری مساحت ۵۰ هکتار را برآورده نمی‌کردند و به‌صورت لکه‌های پراکنده در سطح منطقه پخش هستند. نتایج این مرحله می‌تواند به انتخاب لکه‌هایی که دارای بیش‌ترین اولویت جهت اجرای اقدامات جبرانی و کاهش فرسایش هستند کمک نماید.



شکل ۱۱: نقشه مهم‌ترین لکه‌های حساس به فرسایش خاک

جدول ۷- مشخصات مهم ترین لکه های حساس به فرسایش خاک

شماره لکه	مساحت (هکتار)	فرسایش خاک (تن در هکتار در سال)			کاربری سال ۱۹۸۴	کاربری سال ۲۰۱۳
		میانگین	حداکثر	حداقل		
۱	۷۱	۱۷۲/۲۴	۲۵۵/۸۹	۱۰۰/۱۱	کشاورزی-جنگل	کشاورزی
۲	۷۴	۱۶۵/۶۰	۲۵۵/۵۶	۱۰۰/۰۳	کشاورزی-جنگل	کشاورزی
۳	۱۵۷	۱۶۳/۲۰	۲۵۵/۴۶	۱۰۰/۰۷	کشاورزی-جنگل	کشاورزی
۴	۶۹	۱۶۲/۴۳	۲۵۵/۷۰	۱۰۰/۰۳	جنگل	کشاورزی
۵	۹۷	۱۶۲/۳۲	۲۵۵/۶۶	۱۰۰/۱۲	کشاورزی	کشاورزی
۶	۵۲	۱۶۱/۰۷	۲۵۲/۴۰	۱۰۰/۲۷	جنگل	کشاورزی
۷	۸۸	۱۵۷/۶۹	۲۵۵/۲۷	۱۰۰/۱۲	کشاورزی-جنگل	کشاورزی
۸	۳۲۹	۱۵۵/۷۵	۲۵۵/۸۹	۱۰۰/۰۵	کشاورزی-جنگل	کشاورزی
۹	۱۰۲	۱۵۳/۴۹	۲۵۳/۷۰	۱۰۰/۰۶	کشاورزی	کشاورزی
۱۰	۵۴	۱۴۹/۱۵	۲۵۵/۶۹	۱۰۰/۵۵	کشاورزی-جنگل	کشاورزی
۱۱	۸۶	۱۴۶/۵۳	۲۵۳/۴۸	۱۰۰/۰۶	کشاورزی-جنگل	کشاورزی
۱۲	۱۰۸	۱۴۵/۹۷	۲۵۴/۹۶	۱۰۰/۰۷	کشاورزی-جنگل	کشاورزی
۱۳	۷۰	۱۴۴/۵۳	۲۵۳/۷۶	۱۰۰/۲۳	کشاورزی-جنگل	کشاورزی
۱۴	۶۶	۱۴۳/۶۹	۲۵۵/۶۵	۱۰۰/۱۲	کشاورزی-جنگل	کشاورزی
۱۵	۶۱	۱۴۱/۶۷	۲۵۳/۲۷	۱۰۰/۰۲	کشاورزی-جنگل	کشاورزی

نتیجه گیری

در این پژوهش میزان فرسایش خاک در حوضه آبخیز قره سو با استفاده از مدل RUSLE و به کمک فنون GIS مدل سازی شد. میانگین فرسایش در کل حوضه آبخیز حدود ۱۹ تن در هکتار در سال است. حدود ۵۲ درصد منطقه دارای فرسایش بسیار کم، ۱۰ درصد دارای فرسایش کم و ۲۶ درصد دارای فرسایش متوسط، ۸ درصد دارای فرسایش شدید و ۴ درصد دارای فرسایش بسیار شدید است. بیش تر مناطق دارای فرسایش زیاد و بسیار زیاد در کاربری کشاورزی و پرشیب قرار گرفته اند. بررسی تاثیر طبقات کاربری سرزمین و درصد شیب بر میزان فرسایش و هدررفت خاک، اهمیت این دو عامل در منطقه را تاکید می کند. اثر متقابل این دو عامل سبب افزایش بیش از حد فرسایش در منطقه شده است. این مساله به خصوص در مناطقی که فعالیت کشاورزی در شیب های زیاد در حال انجام است به چشم می خورد. انجام عملیات حفاظتی و اقدامات جبرانی جهت کاهش فرسایش خاک در این مناطق امری ضروری است. بررسی تغییر کاربری سرزمین از سال (۱۹۸۴) نشان داد در مناطقی که جنگل ها نابود شده و تبدیل به کاربری

کشاورزی شده‌اند فرسایش شدید بسیار محتمل است. این مناطق می‌توانند مبنایی برای اجرای عملیات بازسازی و احیای پوشش جنگلی باشند. پس از بررسی توان بوم‌شناختی و اقتصادی-اجتماعی می‌توان برخی از این مناطق را برای درختکاری و احداث جنگل‌های دست کاشت با اهداف حفاظتی پیشنهاد کرد. در مرحله نهایی این پژوهش، در گام اولویت‌بندی لکه‌های احیای سرزمین تعداد ۱۵ لکه که دارای بیش‌ترین حساسیت به فرسایش خاک هستند و بیش‌ترین میزان هدر رفت خاک را داشته‌اند شناسایی گردید. مقایسه این لکه‌ها با نقشه کاربری سرزمین نشان داد تمامی این لکه‌ها در کاربری کشاورزی و اغلب در حاشیه جنگل قرار گرفته‌اند. متوسط شیب این لکه‌ها ۱۹ تا ۳۵ درصد است. این در حالی است که مطابق مدل‌های بوم‌شناختی کشاورزی (Makhdoum, 2007: 193)، حداکثر شیب مجاز برای کشاورزی ۸ درصد و برای کشت دیم ۱۲ درصد است. همان‌گونه که مشخص است بیش‌ترین فرسایش در مناطقی است که کاربری‌ها بدون توجه به توان بوم‌شناختی منطقه صورت گرفته‌اند. با فرض اجرای فعالیت‌های درختکاری و احیای پوشش جنگلی در مناطق کشاورزی با شیب بیش‌تر از ۱۲ درصد، میانگین فرسایش تا حدود ۹ تن در هکتار در سال کاهش می‌یابد. با توجه به میانگین فرسایش در شرایط موجود (۱۹ تن در هکتار در سال) و مساحت منطقه، میزان فرسایش در کل حوضه آبخیز حدود ۳ میلیون تن در هکتار در سال برآورد شد. با در نظر گرفتن این موضوع که تشکیل یک سانتی‌متر مکعب خاک به‌طور متوسط حدود ۱۰۰ تا ۷۰۰ سال زمان نیاز دارد، جبران این میزان هدررفت خاک در اثر فرسایش میلیاردها سال طول خواهد کشید. وزارت کشاورزی امریکا در سال (۲۰۱۱) بیان کرد به ازای هر تن فرسایش خاک ۲۸ دلار خسارت به آمریکا وارد می‌شود. با توجه به این موضوع، میزان فرسایش خاک در حوضه آبخیز قره‌سو حدود ۸۴ میلیون دلار به استان خسارت وارد می‌کند. به‌طور کلی از بررسی نتایج این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت توجه به حوضه آبخیز قره‌سو جهت پیشگیری و کنترل فرسایش و جلوگیری از اثرات سوء آن بر محیط‌زیست و اقتصاد منطقه امری ضروری است. ارائه اقدامات جبرانی از قبیل تراس‌بندی، بانکت، احیاء و استقرار پوشش گیاهی می‌تواند به کاهش فرسایش و جلوگیری از اثرات سوء آن کمک نماید. مطابق نتایج پژوهش حاضر و مطالعات صورت گرفته از جمله (Makhdoum (2007) تبدیل کاربری سرزمین و استفاده غیرمنطقی از زمین توسط انسان عامل اصلی فرسایش است. این عامل میزان فرسایش را بر روی کره زمین ۱۰۰۰ برابر کرده است. در نتیجه انجام طرح‌های آمایش سرزمین جهت کاهش فرسایش در منطقه امری ضروری است. در مطالعات آینده می‌توان با بررسی ویژگی‌های هر یک از ۱۵ لکه معرفی شده و اثر متقابل معیارهای منجر به فرسایش خاک و هزینه اقدامات اصلاحی و احیایی به انتخاب مجموعه‌ای کوچک‌تر و یا روش‌های موثرتر با هزینه کم‌تر برای مقابله با فرسایش پرداخت. به‌عنوان مثال، می‌توان اقدامات جبرانی مناسب شرایط منطقه را ارائه نمود و اثر آن بر عوامل موثر بر میزان فرسایش، مانند عامل پوشش و کاربری سرزمین (C) و عامل عملیات اصلاحی (P)، در مدل RUSLE را مدل‌سازی کرد. سپس، با اجرای مجدد RUSLE و مقایسه نتایج حاصل با نتایج قبل می‌توان میزان تاثیر اجرای اقدامات جبرانی را بر منطقه پیش‌بینی کرد.

References

- Alexakis, D. D., Hadjimitsis, D. G., Agapiou, A., (2013), "Integrated use of remote sensing, GIS and precipitation data for the assessment of soil erosion rate in the catchment area of "Yialias" in Cyprus", *Atmospheric Research*, 131: 108-124.
- Arekhi, S., Niazi, Y., (2010), " Investigating application of GIS and RS to estimate Soil erosion and Sediment Yield Using RUSLE (Case study: Upper part of Ilam Dam Watershed, Iran)", *J. of Water and Soil Conservation*, 17 (2): 2010- 2023. [In Persian].
- Atlas of soil contaminants of Golestan Province, (2010), *Published by Department of the Environment IRAN*. Water and Soil Pollution Investigation Bureau. Volume 3. 162 pp. [In Persian].
- Desmet, P., Govers, G., (1996), "A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units", *J. Soil Water Cons*, 51 (5): 427-433.
- GUASNR, (2013), "Golestan province land use planning report", Tehran: Gorgan University of Agriculture and Natural Resources publisher. [In Persian].
- Kamangar, M., Farajzade, M., Bedaghi, M., Karami, P., (2015), "Universal soil loss equation (RUSLE) calibration using GIS and remote sensing (Case Study: Sykhoran of Watershed Hormozgan):", *Geographical Space*, 15: 191-207. [In Persian].
- Karam, A., Safarian, A., Hajefroshnia, Sh., (2010), "Estimation and zonation of soil erosion in Mamlou Watershed (Eastern Tehran)", *Research in earth Science*, 1 (2): 73-86. [In Persian].
- Karimi, S., (2011), "Mapping of goods and services for forest and rangeland ecosystems in Golestan Province (Case study: Gorgan and Aliabad Basin)", M.Sc. thesis, environmental sciences, Tehran University, Iran. [In Persian].
- Kouli, M., Soupios, P., Vallianatos, F., (2009), "Soil erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece. *Environ*", *Geol*, 57: 483-497.
- Makhdoum, M. F., (2007), "Fundamental of land use planning", 7th ed. *Published by University of Tehran*. 351 pp. [In Persian].
- May, L. Place, C., (2005), "A GIS-based model of soil erosion and transport", *Freshwater forum*, 23: 48-61.
- Meshesha, D. T., Tsunekawa, A., Tsubo, M., Haregeweyn, N., (2012), "Dynamics and hotspots of soil erosion and management scenarios of the Central Rift Valley of Ethiopia", *International Journal of Sediment Research*, 27: 84-99.
- Mohammad, A. G., Adam, M. A., (2010), "The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses", *Catena*, 81: 97-103.
- Pour Abdullah, M., Tajrishi, M., (2012), "Modeling of erosion with the help of swat and rusle models- Case Study Emame watershed", *International Congress of Civil Engineering*, University of Tehran, May 7, 2006. [In Persian].
- Prasannakumar, V., Vijith, H., Abinod, S., Geetha, N., (2012), "Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology", *Geoscience Frontiers*, 3 (2): 209-215.
- Renard, K. G., Freimund, J. R., (1994), "Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE", *Journal of Hydrology*, 157: 287-306.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., Yoder, D. C., (1997), "*Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*", published in U.S. Department of Agriculture. USDA Agriculture Handbook N., 703., (Washington).

- Rezaei, P., Faridi, P., Ghorbani, M., Kazemi, M., (2014), "Soil erosion estimation using RUSLE model in Hormozgan Province", *Journal of Quantitative Geomorphological Researches*, 1: 91-113. [In Persian].
- Sun, W., Shao, Q., Liu, J., Zhai, J., (2014), "Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China", *Catena*, 121: 151-163.
- Ustun, B., (2008), "Soil erosion modelling by using GIS and remote sensing: A case study, Ganos Mountain", The international archives of the photogrammetry, *remote sensing and spatial information science*, 37: 1681-1684.
- Williams, J. R., Jones, C. A., Dyke, P. T., (1984), "A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity", *Trans. ASAE*, 27: 129-144. (Abstract).
- Wischmeier, W. H., Smith, D. D., (1978), "Predicting rainfall erosion losses", Agriculture handbook No. 537, *USDA-Science and Education Administration*, United States Department of Agriculture in cooperation with Purdue Agricultural Experiment Station 58 pp.