

ارزیابی خطر فرسایش آبی با استفاده از ترکیب مدل تجدید نظر شده‌ی جهانی فرسایش خاک (RUSLE) و نقشه تراکم خندقی در حوضه آبخیز علامرودشت استان فارس

رضا ذاکری نژاد* - استادیار گروه جغرافیا طبیعی دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان.
سلمان فلاح - دانشجوی سابق کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، دانشگاه اصفهان.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۱۸ تأیید نهایی: ۱۴۰۱/۱۱/۱۹

چکیده

فرسایش خاک و تولید رسوب یک محدودیت عمده در استفاده از منابع آب و خاک است، بنابراین فرآیندهای حاکم بر رفتار آنها برای درک بهتر سیستم‌های آبخیزداری و تبیین شیوه‌های مدیریت مناسب ضروری است. در این مطالعه به بررسی پتانسیل فرسایش آبی با استفاده از مدل تجدید نظر شده‌ی جهانی فرسایش خاک (RUSLE) در حوضه آبخیز علامرودشت در جنوب استان فارس که یکی از حوضه‌های تحت تاثیر شدید انواع فرسایش‌های آبی (ورقه‌ای، شیاری و خندقی) پرداخته است. لایه‌های ورودی این مدل عبارتند از عامل فرساینده‌ی بارش (R)، عامل فرسایش پذیری خاک (K)، شاخص توپوگرافی (LS) عامل پوشش (C) و عامل عملیات مدیریتی (P) تهیه گردید، که در محیط نرم افزار ArcGIS 10.8 اقدام به ضرب لایه‌ها و تهیه نقشه نهایی گردید. نتایج نشان داد، که ۵۴،۴۴ درصد حوضه مورد مطالعه، در طبقه فرسایش خیلی زیاد (بیش از ۷۵ تن در هکتار در سال) قرار دارد که بیشتر در نواحی شمال شرق، شرق و بخش‌هایی از نواحی مرکزی حوضه را در برمی‌گیرد، در حالی که ۳۲،۲۲ درصد از کل مساحت حوضه در کلاس فرسایش کمتر از ۲۰ تن در هکتار در سال می‌باشد، که این مناطق بیشتر در نواحی کم شیب و مرکزی حوضه مورد مطالعه واقع شده‌اند. در انتها با توجه به ضعف این مدل در تخمین کم میزان فرسایش در مناطق دارای فرسایش خندقی، اقدام به تهیه نقشه تراکم خندقی با استفاده از تابع تراکم کرنل (Kernel Density) در محیط GIS گردید. در نهایت این نقشه با نقشه پهنه بندی پتانسیل فرسایش آبی تلفیق گردید، که مناطق با تراکم بالای فرسایش خندقی در کلاس شدید فرسایشی طبقه بندی گردید. با توجه به نتایج این تحقیق انجام کارهای حفاظتی خاک و آبخیزداری در نواحی بحرانی و حساس به فرسایش بسیار ضروری می‌باشد.

واژگان کلیدی: فرسایش آبی، RUSLE سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، علامرودشت.

مقدمه

فرسایش خاک و تولید رسوب یک محدودیت عمده در استفاده از منابع آب و خاک است. این نوع هدر رفت از خاک که یک نوع فرایند طبیعی بوده ولی توسط مداخلات انسانی تشدید می شود، یک مشکل جدی در بسیاری از اقلیم های خشک، نیمه خشک و نیمه مرطوب خشک خصوصا در عرض های پایین و متوسط محسوب می شود (لال^۱، ۲۰۰۱؛ لی^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). فرسایش خاک، نه تنها سبب فقیر شدن خاک و متروک شدن مزارع میگردد و از این راه، خسارت های جبران ناپذیری بر جای می گذارد، بلکه با رسوب گذاری در آبراهه ها، مخازن سدها و بنادر و کاهش ظرفیت آبیگری آن ها و همچنین موجب کاهش کیفیت آب می شود (کفی^۳ و همکاران، ۲۰۰۱؛ تنگستان^۴، ۲۰۰۶؛ عبیات و همکاران، ۱۴۰۰). فرسایش خندقی به عنوان یکی از اشکال فرسایشی خندقی بوده که با وجود اینکه درصد کمی از حوضه های آبخیز را شامل می شود ولی بیشتر درصد رسوبات را ناشی می شود. این نوع هدر رفت خاک به عنوان یکی از عوامل اصلی تخریب زمین و بیابان زایی در نواحی بسیاری از ایران می باشد (ذاکری نژاد^۵ و مرکز، ۲۰۱۴؛ ذاکری نژاد، ۱۳۹۹). مطالعات زیادی در مورد بررسی گسترش فرسایش خندقی و همچنین تخمین میزان رسوب زایی آن صورت گرفته است (پوزن، ۲۰۰۳؛ گرلیا^۶ و همکاران، ۲۰۱۲؛ انگلری^۷ و همکاران، ۲۰۱۶). در بسیاری از مطالعات نیز به ارزیابی فرسایش خندقی با استفاده از میزان تراکم آن پرداخته اند (هاگیس^۸ و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین در سال های اخیر نیز به پهنه بندی مناطق مستعد خندقی با استفاده از الگوریتم های مختلف داده کاوی صورت گرفته است (خایر و همکاران، ۲۰۰۷؛ ذاکری نژاد^۹ و مرکز، ۲۰۱۴؛ عرب امیری و همکاران، ۲۰۲۱). مدل های زیادی جهت برآورد فرسایش خاک خصوصا فرسایش آبی و توسعه طرح های مدیریتی فرسایش خاک ارائه شده اند که بسیاری از این مدل ها نیز در نواحی مختلف ایران مورد تحقیق قرار گرفته است. از جمله مدل های پر کاربرد در ارزیابی فرسایش خاک می توان به مدل EPM^{۱۰} (فلانگان و نیرینگ^{۱۱}، ۱۹۹۵) مدل پسیاک^{۱۲} (۱۹۶۸) و پسیاک اصلاح شده (MPSIAC) و مدل پر کاربرد معادله جهانی فرسایش خاک (USLE) ویشمایر و اسمیت^{۱۳} (۱۹۷۸) و اصلاح شده معادله جهانی فرسایش خاک (RUSLE) (رنارد^{۱۴} و همکاران، ۱۹۹۷) اشاره نمود.

مدل USLE به دلیل داشتن محاسبات ساده، پرکاربردترین روش تخمین پتانسیل فرسایش خاک و برآورد تاثیرات عملیات مدیریتی مختلف بوده است و به دنبال آن، نسخه جدید مدل USLE با نام جهانی معادله جهانی تجدید نظر شده هدررفت خاک (RUSLE) توسعه یافته که برآوردهای دقیق تری از عوامل R, K, C, P, S و L و فرسایش خاک انجام می دهد (احمد آبادی و صدیقی فر، ۱۳۹۶) به دلیل این که سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS) امکان تجزیه و تحلیل داده های مکانی را فراهم می آورد (ارخی و نیازی، ۱۳۸۹) مطالعات گسترده ای در جهان و ایران در خصوص مدل RUSLE صورت گرفته است.

1. Lal

2. Lee

3. Kefi

4. Tangestani

5. Zakerinejad & Maerker

6. Grellier

7. Angileri

8. Hughes

9. Zakerinejad & Maerker

10. Erosion Potential Method

11. Flanagan & Nearing

12. Pacific Southwest Interagency Committee

13. Wischmeier and Smith

14. Renard et al.

گاناسری و رامش^۱ (۲۰۱۵)، فرسایش خاک حوضه نرراوازی هند را با استفاده از مدل RUSLE بدست آورده اند نتایج حاصل از این پژوهش نشان داده است که مقدار فرسایش سالانه خاک ۳۳۹/۴۷۳ تن در سال برآورد شد که به مقدار رسوب اندازگیری شده (۸۷۰ تن در سال) نزدیک می باشد. فرهان و ناویس^۲ (۲۰۱۵) میزان برآورد فرسایش خاک در حوضه آبخیز کیو فرانگا در منطقه شمالی اردن را با استفاده از الگوی جهانی فرسایش خاک و جی آی اس پرداختند. نتایج تحقیق آنها حاکی از آن است که معادله جهانی فرسایش خاک بر اساس سنجش از دور و GIS عملکرد بهتری در مقایسه با نتایج سایر مدل ها برای برآورد فرسایش دارد. ذاکری نژاد و مرکز^۳ (۲۰۱۵) با استفاده از تلفیق شاخص قدرت فرسایش آبراهه (SPI) و مدل USPED به ارزیابی میزان شدت فرسایش آبی در حوضه آبخیز مزایجان در استان فارس پرداخته شد، که نتایج آن ها بیانگر آن بود که مدل مذکور به تنهایی قادر به شناسایی مناطق فرسایش خندقی نمی باشد و ترکیب آن با شاخص قدرت فرسایش آبراهه می تواند نتایج مناسب تری داشته باشد. چی و همکاران^۴ (۲۰۱۹)، اثرات تغییر کاربری اراضی بر فرسایش خاک توسط باد در چین را بررسی نمودند. و به این نتیجه رسیدند که متوسط میزان فرسایش و خوردگی خاک از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۵ به میزان ۵۰ درصد کاهش پیدا کرده است. در این کشور بین عامل سایش خاک، انواع کاربری بخش های مختلف اراضی و پوشش گیاهی و زمین تفاوت معناداری وجود دارد.

سینگ و همکاران^۵ (۲۰۲۰) تغییر کاربری زمین را در باتلاق های هاریک در ایالت پنجاب هند بررسی کردند. نتایج نشان داد که در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۸ اثرات منفی عوامل انسانی از جمله کشاورزی بی رویه و عدم رعایت حق آبه مورد نیاز تالاب ها باعث کاهش سطح فرسایش خاک با آب شده است.

بابر و همکاران^۶ (۲۰۲۱) خواص فیزیکی و شیمیایی خاک های تحت واکنش خاک را در پنجاب، هند مطالعه کردند. و در این تحقیق با استفاده از GIS و نرم افزار سنجش از دور اذعان داشتند که خاک های مرتعی به دلیل داشتن مقدار رس زیاد نسبت به مناطق ساحلی فرسایش کمتری دارند و در برابر فرسایش مقاومت بیشتری را از خود نشان می دهند.

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق حوضه آبخیز علامرودشت در جنوب استان فارس بوده که تحت تاثیر فرسایش آبی از انواع ورقه ای، شیاری و خندقی می باشد که دارای پوشش گیاهی مرتعی ضعیف خصوصا در نواحی مرکزی حوضه می باشد (ذاکری نژاد و همکاران ۱۴۰۱). فرسایش خندقی در منطقه علامرودشت بسیار شدید بوده که منبع اصلی تولید رسوب و تخریب خاک می باشد. (ابوالوردی و همکاران، ۱۳۹۰). فرسایش خندقی رودخانه علامرودشت در سال های اخیر موجب تخریب منابع طبیعی و تهدید سازه های احداث شده بر روی پادگانه های این رودخانه شده است لذا ارزیابی میزان خطر فرسایش آبی با تاکید بر فرسایش خندقی جهت مدیریت بهتر این منطقه ضروری می باشد (یمانی و همکاران، ۱۳۹۰). لذا در این پژوهش به ارزیابی میزان خطر فرسایش آبی با استفاده از مدل جهانی فرسایش خاک (RUSLE) و همچنین تهیه نقشه تراکم فرسایش خندقی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی پرداخته می شود.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه حوضه آبخیز علامرودشت بوده که از نظر تقسیم بندی سیاسی در محدوده ی شهرستان لامرد بوده که ارتفاع متوسط آن ۶۴۷ متر از سطح دریا می باشد. محدوده مورد مطالعه بر اساس سیستم مختصات جغرافیایی در محدوده طول جغرافیایی ۵۲/۷۹۳ درجه تا ۵۳/۷۷۱ شمالی و عرض ۲۷/۶۹۴ درجه تا ۲۷/۸۲۵ شرقی بوده و مساحت آن

1. Ganasri & Ramesh

2. Farhan & Nawaiseh

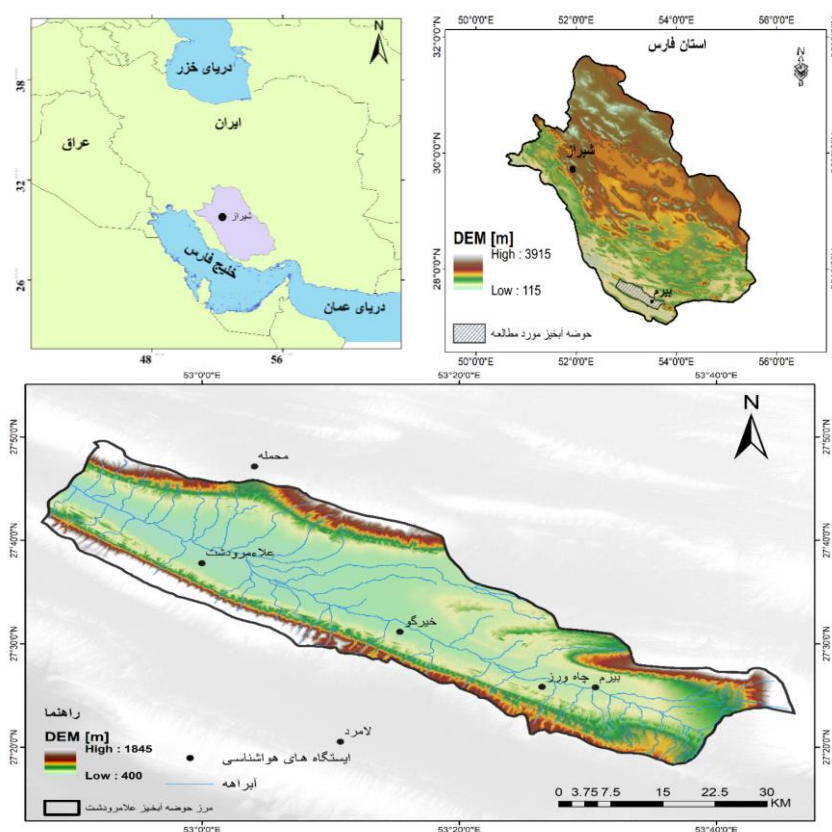
3. Zakerinejad & Maerker

4. Chi

5. Singh

6. Babur

حدود ۱۸۷۴۳۸٫۴۲ هکتار می باشد. (شکل ۱). رودخانه فصلی علامرودشت این حوضه، جزیی از زیر حوضه مُند است که این زیر حوضه نیز بخشی از حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان محسوب می‌شود. این منطقه دارای مناطق مسکونی زیادی شامل ۳۵ آبادی است که همگی تابع بخش علامرودشت که بزرگترین آبادی است. محدوده مورد مطالعه از دو واحد ژئومورفولوژی به نام های کوهستان و دشت سر تشکیل شده است. واحد کوهستان شامل دو تیپ کوه و تپه و واحد دشت سر از ۳ تیپ به نام تیپ های دشت سر فرسایشی، اپانداژ و پوشیده تشکیل شده است (یمانی و همکاران، ۱۳۹۰). حوضه مورد مطالعه در منطقه زاگرس چین خورده و به صورت یک ناودیس در حد فاصل دو تاقدیس قرار دارد و نوعی دشت آبرفتی است. از مهمترین ویژگیهای این زیرپهنه توالی منظم سازندها در تاقدیس ها می باشد. سازندهای بختیاری، آغاچاری، گچساران، میشان، آسماری- جهرم و در نهایت پابده- گورپی را می توان در فاصله یال شمالی تا محور تاقدیس وراوی دید. بر اساس طبقه بندی اقلیمی دمارتن دشت علامرودشت جزء رژیم رطوبتی خشک و رژیم حرارتی گرم طبقه بندی شده است. از ویژگی های اقلیمی این منطقه، بارندگی سالیانه اندک همراه با توزیع و پراکنش نامنظم در طول سال و تفاوت زیاد مقدار باران هر سال نسبت به سال دیگر می باشد. در منطقه علامرودشت حداکثر و حداقل مطلق سالانه درجه حرارت معادل ۴۱ و ۶/۱ درجه سانتی گراد و متوسط درجه حرارت سالانه معادل ۲۴/۷ درجه سانتی گراد و بارندگی متوسط سالانه ۱۶۸ میلی متر ۲۳۵ برآورد گردیده است (طرح مطالعات اجرایی مدیریت مناطق بیابانی علامرودشت لامرد، ۱۳۸۶).



شکل ۱: موقعیت حوضه مورد مطالعه در استان فارس

این حوضه آبخیز به دلیل شرایط توپوگرافی، پوشش گیاهی ضعیف، سازندها و خاک های مستعد فرسایشی و همچنین

شرایط خشک اقلیمی دارای فرسایش شدید آبی خصوصا شیاری، ورقه ای و خندقی می باشد. فرسایش خندقی در حوضه مورد مطالعه به صورت خیلی متراکم در نواحی کم شیب حوضه که تراکم پوشش گیاهی آن نیز کم بوده توسعه یافته اند (شکل ۲).



شکل ۲: نمایی از اشکال شدید فرسایش آبی در منطقه مورد مطالعه

روش تحقیق

در این تحقیق به ارزیابی مدل جهانی فرسایش خاک (RUSLE) برای تعیین میزان فرسایش آبی در حوضه آبخیز علامرودشت در جنوب استان فارس پرداخته می شود. همچنین در ادامه این پژوهش نیز به بررسی و مقایسه میزان فرسایش برآوردی مدل در نواحی دارای فرسایش خندقی صورت خواهد گرفت (شکل ۳). در ذیل به معرفی این مدل که با تاکید بر ارزیابی شدت فرسایش آبی برای مناطق با رخساره های شیاری و ورقه ای می باشد پرداخته خواهد شد.

مدل جهانی فرسایش خاک (RUSLE)

رابطه جهانی اصلاح (تجدید نظر) شده فرسایش خاک (RUSLE) الگوی توسعه یافته (USLE) از یک سطح معین برای پیش بینی فرسایش سالانه خاک استفاده می کند (رنارد و فریموند^۱، ۱۹۹۴). معادله جهانی فرسایش خاک به طور عمده در کل جهان برای پیش بینی فرسایش شیاری و ورقه ای در مقیاس مزرعه تا حوضه با انواع شیوه های گوناگون مدیریتی استفاده گردیده است. چندین پارامتر مانند شیب، طول شیب، پوشش زمین، نقشه های کاربری زمین به دست آمده از مدل دیجیتال ارتفاعی (DEM) و تصاویر ماهواره ای را می توان به راحتی با معادله جهانی فرسایش خاک اصلاح شده ادغام کرد.

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

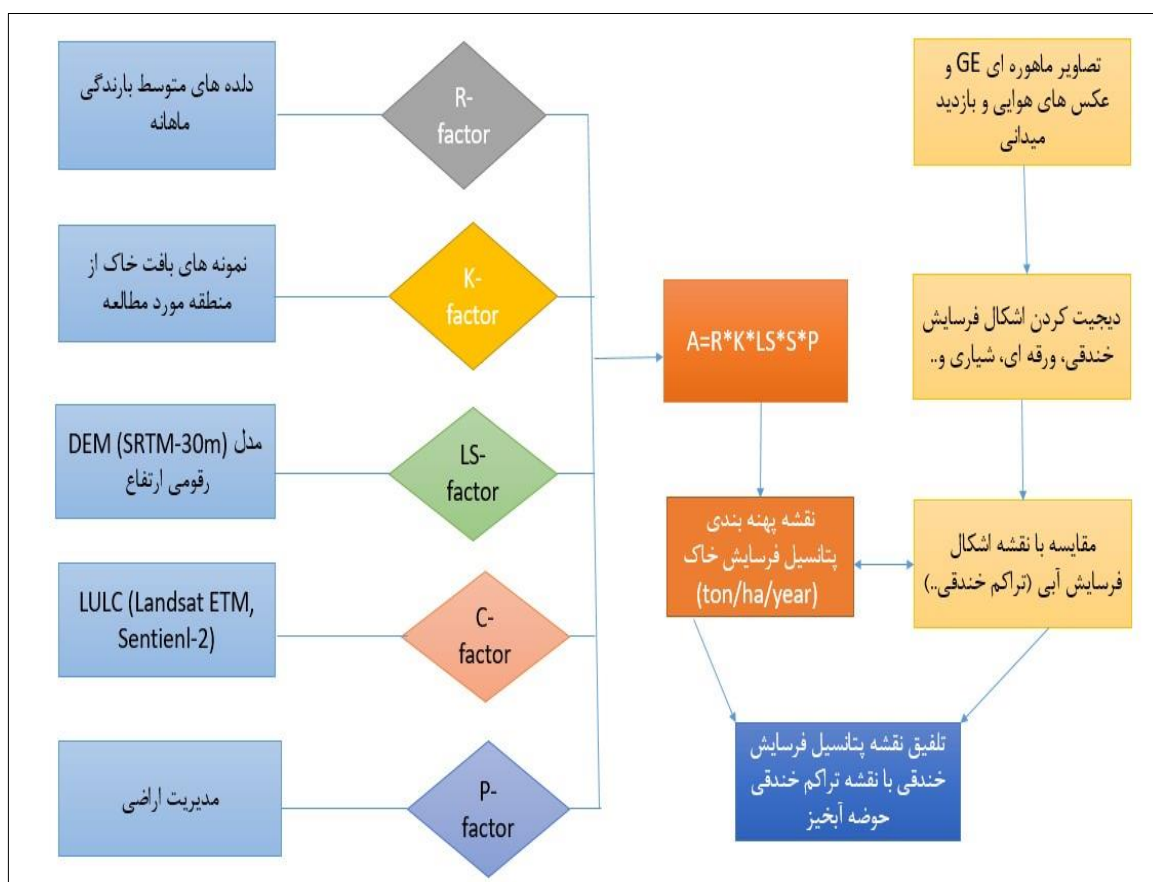
رابطه (۱)

A : میانگین فرسایش خاک در واحد سطح (تن در هکتار)، K : فرسایش پذیری خاک،

R : عامل فرسایش باران، LS : عامل طول شیب

C : عامل پوشش گیاهی P : عامل اقدامات حفاظتی

^۱. Renard & Freimund



شکل ۳: فلوجارت روش تحقیق

عامل فرساینده‌گی بارش (R)

پتانسیل باران در ایجاد فرسایش، فرساینده‌گی باران خوانده می‌شود که تابعی از خصوصیات فیزیکی بارندگی است و با انرژی مستقیم باران، انرژی جنبشی بارندگی و حداکثر شدت بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای در ارتباط است (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸). فاکتور R از حاصل ضرب انرژی جنبشی باران (E) در حداکثر شدت بارش ۳۰ دقیقه‌ای (I30) به دست می‌آید. اغلب از مقادیر متوسط بارندگی ماهیانه و سالیانه، جهت برآورد فاکتور R در مدل‌های USLE و RUSLE استفاده می‌شود (ذاکری نژاد و مرکز ۲۰۱۵). برای مناطقی که داده‌های تفصیلی شدت بارندگی در دسترس نیستند، R را می‌توان با استفاده از شاخص‌های مختلفی که توسط دانشمندان ارائه شده را می‌توان تخمین زد (رنارد و فرایماند^۱ ۱۹۹۴؛ صادقی فرد^۲ و همکاران، ۲۰۰۴؛ فرو^۳ و همکاران ۱۹۹۱).

در این تحقیق با توجه به عدم در دسترس بودن داده‌های شدت بارندگی در ایستگاه‌های باران سنجی محدوده‌ی مورد مطالعه از رابطه ارائه شده توسط رنارد و فرایماند ۱۹۹۴ که در ذیل ارائه شده است به کار برده شده است.

رابطه (۲)

$$R = 0.0483 Pa^{1.61}$$

$$Pa \leq 850 \text{ mm}$$

¹. Renard and Freimund

². Sadeghifard

³. Ferro

رابطه (۳)

$$R = 587.8 - 1.249 Pa + 0.004105 Pa^2$$

$$Pa \geq 850$$

برای تهیه این شاخص ابتدا اقدام به شناسایی ایستگاه های اقلیماتولوژی و یا باران سنجی (نمایش داده شده در شکل ۱) که دارای آمار طولانی مدت (حداقل ۲۰ ساله) گردید. جهت پهنه بندی این شاخص برای کل حوضه مورد مطالعه اقدام با بررسی رابطه رگرسیون بین میزان متوسط بارندگی و ارتفاع گردید، که با استفاده از مدل رقومی ارتفاع این معادله برای کل حوضه بدست آمد و سپس با استفاده از رابطه فوق ذکر به تهیه نقشه پهنه بندی میزان شاخص فرساینده (R) در کل حوضه مورد مطالعه پرداخته شد.

$$K = 7.594 * \left\{ 0.0017 + 0.0494 * \exp\left(-0.5 \left(\frac{\log(Dg) + 1.675}{0.6986} \right)^2 \right) \right\}$$

$$Dg = \exp(0.01 * \sum fiLnmi)$$

ضریب فرسایش خاک (K)

ضریب فرساینده (K)، یعنی مقاومت خاک در برابر جدا شدن و مقاومت ذرات در برابر انتقال (شی، ۲۰۰۴) بوده که بیانگر حساسیت ذاتی خاک به فرسایش بوده و بیانگر اثرات انرژی قطرات باران در جدایش ذرات خاک و انتقال آن ها به وسیله رواناب می باشد (ویه، ۲۰۰۲). به طور کلی خاک های رسی حاوی مقدار کمی K هستند زیرا این خاک در برابر رسوب مقاوم است. خاک های شنی به طور مشابه به دلیل نفوذپذیری بالا و رواناب کم، حاوی مقدار پایینی از K هستند. خاک های سیلتی همچنین حاوی مقادیر متوسط تا زیاد K هستند، زیرا ذرات خاک را می توان به صورت متوسط تا ساده و نفوذپذیری متوسط تا زیاد رسوب کرد و در نتیجه رواناب متوسط تا شدید را به همراه داشت و رسوبات به راحتی قابل انتقال هستند (پاناگاس و همکاران، ۲۰۱۴).

در این تحقیق جهت تهیه این شاخص ابتدا اقدام به نقشه واحدهای کاری که از ترکیب نقشه های زمین شناسی، شیب و ارتفاع می باشد اقدام نموده و سپس در هر واحد یک یا دو نمونه خاک سطحی (از عمق ۰-۲۵ سانتی متری) به صورت تصادفی برداشت گردید، که جمعا ۲۲ نمونه خاک از قسمت های مختلف حوضه مورد مطالعه به آزمایشگاه جهت تعیین درصد ذرات خاک و تعیین بافت خاک اقدام گردید. کار آزمایشگاهی شامل تعیین درصد رس ($< 0.075 \text{ mm}$), سیلیت ($0.075 - 0.25 \text{ mm}$), به روش هیدرومتری و مقدار شن ($0.25 - 2 \text{ mm}$) به روش الک انجام گرفت. در نهایت

با بررسی نتایج بافت خاک و استفاده از رابطه ۴ (شیرازی و بروسما، ۱۹۸۴) مقدار K تعیین گردید و برای کل حوضه نیز با استفاده از روش وزن دهی معکوس فاصله (IDW) و تهیه نقشه رستری فرسایش پذیری خاک برای نقشه رستری تهیه گردید.

رابطه (۴)

$$K = 7.594 * \left\{ 0.0017 + 0.0494 * \exp\left(-0.5 \left(\frac{\log(Dg) + 1.675}{0.6986} \right)^2 \right) \right\}$$

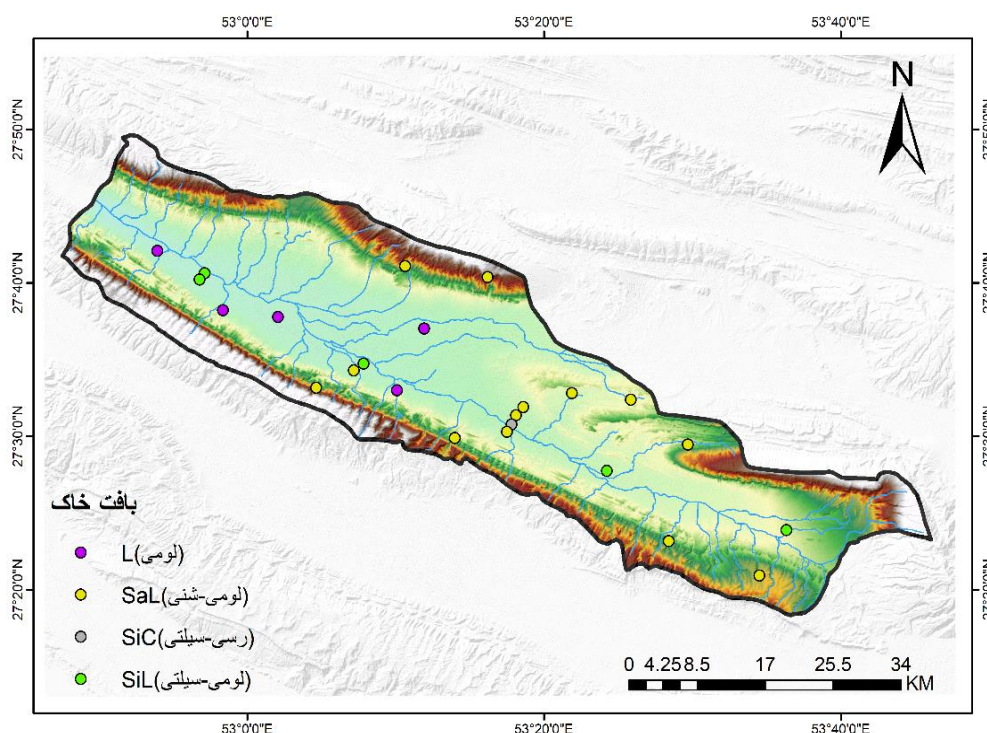
$$Dg = \exp(0.01 * \sum fiLnmi)$$

1. Veihe

2. Panagos

3. Shirazi & Boersma

که در Am K فاکتور فرسایش پذیری خاک ($\text{t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)
 Dg = میانگین هندسی قطر ذرات بر حسب میلی متر
 fi = اندازه ذرات به درصد
 mi = میانگین حسابی اندازه ذرات بر حسب میلیمتر می باشد.



شکل ۳: محل نمونه های برداشت شده و نوع بافت خاک آن ها در منطقه مورد مطالعه

عامل توپوگرافی (LS)

اثر فاکتور توپوگرافی (LS) میزان شیب به عنوان یک عامل توپوگرافی، تأثیر مقدار رواناب، سرعت آن و پتانسیل فرسایش را نشان می دهد. طول شیب فاصله افقی از منبع جریان بالادست تا نقطه ای است که سرعت گرادیان به طور چشمگیری تغییر می کند، به طوری که فرآیند فرورانش آغاز می شود. به طور کلی، هر چه شیب بیشتر باشد، باید بیشتر باشد. شدت فرسایش در حال افزایش است (احمدآبادی و صدیقی فر، ۱۳۹۶). سرعت فرسایش در امتداد شیب نامنظم است و معمولاً در انتها بیشتر بوده بطوریکه افزایش طول شیب و شیب می تواند باعث افزایش سرعت جریان آب بر روی زمین و افزایش فرسایش خاک شود. به طور کلی، هر دو عامل طول شیب و شیب را می توان با هم در نظر گرفت که با علامت LS نشان داده می شود (انصاری لاری و انصاری، ۱۳۹۵). برای به دست آوردن شاخص LS از فرمول زیر (مور و بورج^۱، ۱۹۸۶) محاسبه می شود.

$$LS = \left(\frac{AS}{22.13} \right)^{0.4} \left(\frac{\sin \theta}{0.0896} \right)^{1.3}$$

رابطه (۶)

^۱ . Moore & Burch

که در این رابطه θ : درجه شیب زمین و

AS: برابر است با مساحت سلول هایی که آب از آن به داخل سلول مورد نظر می ریزد. مقادیر AS (مساحت سطح ویژه حوضه) را می توان با ضرب شار تجمعی در ابعاد سلول با استفاده از رابطه (۲-۱۱) محاسبه کرد.

$$AS = FLOW \text{ Accumulation} \times Cell \text{ Size} \quad \text{رابطه (۷)}$$

شایان ذکر هست در این تحقیق برای محاسبه این شاخص برای حوضه آبخیز علامرودشت ابتدا با دانلود مدل رقمی ارتفاع (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر از سایت USGS اقدام به برش بر اساس مرز حوضه مورد مطالعه پرداخته شد. در ادامه با انجام پیش پردازش های لازم در محیط SAGA-GIS اقدام به حذف خطای هیدرولوژیکی (Fill-Sink) و در نهایت با استفاده از این نرم افزار و با فراخوانی لایه رستری این شاخص تهیه گردید. برای تهیه نقشه LS از نرم افزار SAGA7.0 استفاده شد.

عامل پوشش گیاهی (C)

فاکتور C تأثیر پوشش گیاهی، پوشش خاک، هوموس خاک و فعالیت موجودات خاک را بر فرسایش نشان می دهد. برای بدست آوردن این فاکتور، نقشه پوشش گیاهی مورد نیاز است. این شاخص یکی از معروف ترین، ساده ترین و کاربردی ترین شاخص های شناخته شده در زمینه مطالعات پوشش گیاهی است. این شاخص بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات پوشش گیاهی دارد و کمترین حساسیت را به تأثیرات جوی و زمینه ای خاک دارد، مگر در مواردی که پوشش گیاهی کم باشد (شجاعی و آرت، ۱۳۹۳). روش های مختلفی برای تخمین فاکتور C با استفاده از نوع کاربری اراضی و یا با استفاده از شاخص (NDVI) توسعه یافته توسط محققان مختلف برای ارزیابی استفاده شده است. در این پژوهش به تهیه این شاخص با استفاده از مطالعات محققان قبلی که با استفاده از نوع کاربری و پوشش به ارائه ضریب عددی هر نوع پرداخته اند استفاده می شود (جدول ۱). شایان ذکر هست برای تهیه نقشه کاربری اراضی در این تحقیق از تصاویر ماهوره ای لندست و سنتینل-۲ (Sentinel-2) در سال ۲۰۲۰ در محیط نرم افزار ENVI4.8 استفاده گردید.

جدول ۱: تعیین ضریب پوشش گیاهی با استفاده از نوع کاربری اراضی

منبع	C-factor	نوع کاربری و پوشش
فیض نیا و احزان، ۱۳۸۸	۰,۲۵	مراغه دارای تراکم پوشش کم
فیض نیا و احزان، ۱۳۸۸	۰,۳۳	مراغه دارای تراکم پوشش گیاهی خیلی کم
Adediji et al. (2010)	۰,۴۳	اراضی کشاورزی
BCEOM (1998)	۰,۶۰	اراضی بدون پوشش
Adediji et al. (2010)	۰,۰۰۰۰۱	مناطق مسکونی
BCEOM (1998)	۰,۰۱	مرداب ها و مناطق آبی

عامل ضریب حفاظتی (P)

این پارامتر ضریب تلفات خاک را با توجه به روش پشتیبان نشان می دهد و برای محاسبه مقادیر اثرات مثبت روش های حمایتی استفاده می شود. این عامل برای روش های کنترلی که پتانسیل فرسایش رواناب و اثرات آن بر الگوهای زهکشی، مقدار غلظت رواناب، سرعت رواناب و عوامل هیدرولیکی اعمال شده بر رواناب خاک را کاهش می دهد، استفاده می شود. میزان P از صفر تا یک متغیر است. هر چه به صفر نزدیک تر باشد، روش های حفاظت بهتر است و هر چه به یک نزدیکتر باشد، برعکس این امر حاکم می باشد (گناسری و رامش، ۱۳۹۴).

با توجه به این در بسیاری مطالعات در صورتی که هیچگونه عملیات اصلاحی حفاظتی آب و خاک، این شاخص را ۱ در نظر می‌گیرند، در این منطقه مورد مطالعه نیز این شاخص را عدد ثابت یک در نظر گرفته شد. در نهایت بعد از تهیه تمامی نقشه شاخص‌های مدل مذکور در محیط ArcGIS10.8 و با استفاده از ابزار Raster calculator اقدام به ضرب تمامی لایه جهت تهیه نقشه نهایی فرسایش آبی در حوضه مورد مطالعه گردید. شایان ذکر هست تمامی نقشه‌ها با اندازه سلولی ۳۰ متر تهیه شد و لذا تمامی لایه‌ها جهت رویهم گذاری و ضرب همگی دارای با این قدرت تفکیک مکانی تهیه گردیدند.

نقشه تراکم فرسایش خندقی (Kernel Density) حوضه مورد مطالعه

فرسایش خندقی زمانی مطرح می‌شود که فرایندهای ایجابی آن در شدیدترین حالت عمل کرده و به بیان دیگر مساعدترین شرایط برای عملکرد فرایندهای ایجابی مهیا باشد (فرج زاده و همکاران، ۱۳۹۱). این نوع فرسایش آبی موجب بروز آسیب‌های و زیان‌های زیادی می‌گردد به عنوان مثال باعث کاهش تردد ماشین‌های کشاورزی و هزینه‌های اضافی مربوط به این بخش می‌شود. این نوع از اشکال فرسایش خندقی به عنوان یکی از منابع اصلی تولید رسوب در حوضه‌های آبخیز خصوصاً مناطق خشک و نیمه خشک محسوب می‌گردد (ذاکری نژاد و مرکز ۲۰۱۴). همانطور که قبلاً بیان گردید، مدل جهانی فرسایش خاک میزان تولید فرسایش را با در نظر گرفتن اشکال فرسایش ورقه‌ای و شیاری بوده که در این تحقیق جهت بررسی میزان فرسایش خندقی که بیشتر در نواحی داری شیب کمتر از ۵ درصد در حوضه مورد مطالعه واقع شده‌اند. با توجه به بازدیدی‌های میدانی از منطقه نیز مشاهده گردید که فرسایش خندقی بیشتر در مناطق کم شیب حوضه و غالباً در جاهایی که رسوبات آبرفتی دارای املاح که شوری بالایی دارند گسترش پیدا کرده‌اند در واقع اراضی که املاح و EC بالایی دارند قابلیت فرسایش پذیری بالایی نیز دارند (شهریور^۱ و همکاران ۲۰۱۲؛ ولنتاین^۲ ۲۰۰۸). فائو نیز بر اساس دو عامل تعداد خندق در واحد سطح و همچنین تراکم آن به ۵ کلاس از نظر شدت فرسایش خندقی تعیین شده است مشخص کرده است که در جدول شماره ۲ آمده است (احمدی، ۱۳۹۰).

در لذا در این تحقیق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث، عکس‌های هوایی و همچنین بازدیدهای میدانی اقدام به تهیه نقشه پراکنش اشکال فرسایش خندقی گردید و در ادامه با استفاده تابع Kernel Density از منوی Density در نرم افزار ArcGIS10.8 اقدام به تهیه نقشه تراکم فرسایش خندقی شد که به مقایسه این نقشه با نقشه پهنه بندی فرسایش آبی پرداخته خواهد شد. در نهایت نقشه نهایی پهنه بندی فرسایش آبی با استفاده از مدل جهانی فرسایش آبی و نقشه تراکم فرسایش خندقی با هم ادغام گردید و نقشه نهایی میزان فرسایش آبی حوضه آبخیز علامرودشت تهیه گردید.

جدول ۲: طبقه بندی فرسایش خندقی براساس تراکم و تعداد خندق‌ها در واحد سطح

تعداد خندق‌ها در Km^2	تراکم خندق Km/Km^2	درجه فرسایش خندق
<۱	<۰/۱۵	خیلی کم
۱-۴	۰/۱۵ - ۰/۱۶	کم
۰/۹ - ۳/۵	۲/۲	متوسط
۱۷ - ۶۷	۲/۲ - ۹	زیاد
>۶۷	>۹	خیلی زیاد

^۱. Shahrivar

^۲. Valentin

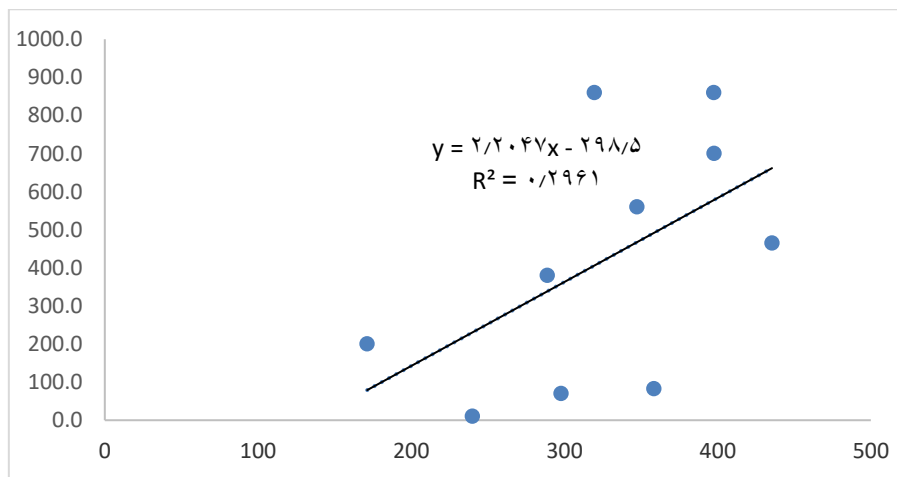
بحث و یافته‌ها

نقشه شاخص های ورودی به مدل RUSLE

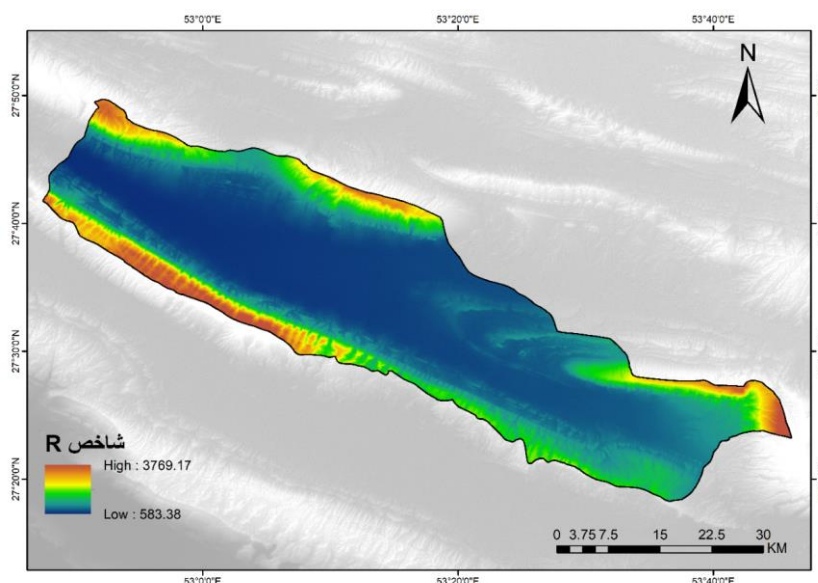
همانطور که در قسمت روش تحقیق به معرفی شاخص های تاثیر ورودی مدل جهانی فرسایش خاک پرداخته شد. شاخص های فرساینده بارش (R)، شاخص فرسایش پذیری خاک (K)، فاکتور LS، شاخص پوشش گیاهی (C) و شاخص مدیریتی (P) شاخص های ورودی جهت تهیه نقشه پهنه بندی فرسایش آبی می باشند که در محیط GIS این شاخص ها تهیه گردید که در ذیل به تشریح هر شاخص پرداخته می شود. در نهایت نقشه پهنه بندی میزان فرسایش آبی برای حوضه مورد مطالعه آورده می شود.

نقشه پهنه بندی شاخص فرساینده بارش (R)

جهت تهیه این شاخص از داده های متوسط بارندگی ماهانه یک دوره ۲۰ ساله از ایستگاه های هواشناسی مجاور منطقه مورد مطالعه استفاده گردید. برای تهیه نقشه پهنه بندی این شاخص ابتدا برای ایستگاه مجاور حوضه مقدار R با استفاده از بارندگی متوسط سالانه محاسبه گردید، و سپس اقدام به تهیه معادله رگرسیون بین متوسط بارندگی و ارتفاع برای کل حوضه مورد مطالعه گردید (شکل ۴) که با تعیین میزان متوسط بارندگی سالانه برای هر پیکسل اقدام به استفاده از رابطه ارائه شده توسط Renard and Freimund (1994) محاسبه شاخص فرساینده بارش برای کل پیکسل های حوضه آبخیز علامرودشت گردید. همانطور که در نقشه پهنه بندی این شاخص مشاهده می شود، مناطقی که دارای ارتفاع بیشتر بوده دارای ارزش عددی بیشتری از لحاظ این شاخص می باشد، در حالی که نواحی مرکزی حوضه مورد مطالعه که ارتفاع کمتری دارد ارزش عددی این شاخص نیز کمتر می باشد (شکل ۵). کم ترین مقدار R در نواحی مرکزی و جنوبی حوضه مورد مطالعه می باشند در حالی که مناطق شمال غربی حوضه از سمت جنوب حوضه به سمت شمال عامل R افزایش می یابد. متوسط این شاخص ۱۱۲۵ کمترین و بیشترین ارزش این لایه نیز به ترتیب ۵۸۳,۳۸ و ۳۷۶۹,۱۷ می باشد.



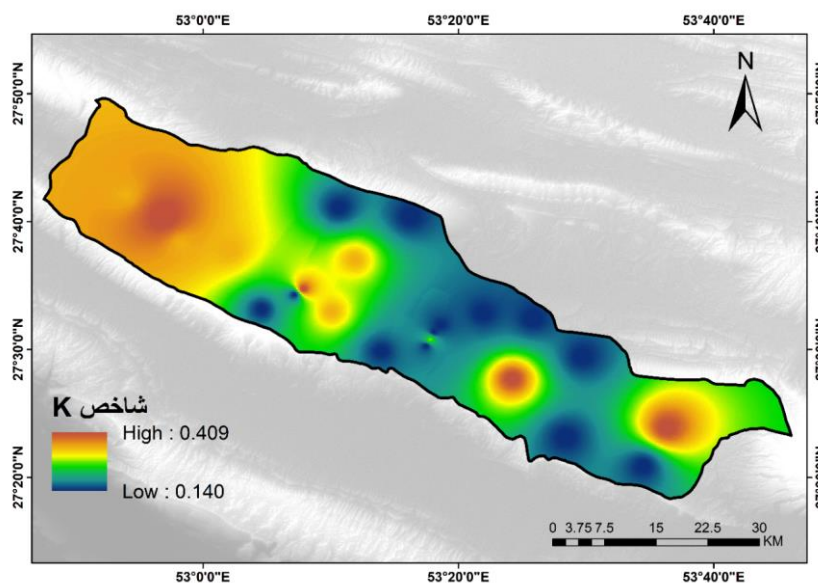
شکل ۴: نمودار رگرسیون ارتفاع و میزان بارندگی متوسط سالانه ایستگاه های مورد مطالعه



شکل ۵: نقشه شاخص فرساینده‌گی بارندگی (R) حوضه آبخیز علامرودشت

عامل فرسایش پذیری خاک (K)

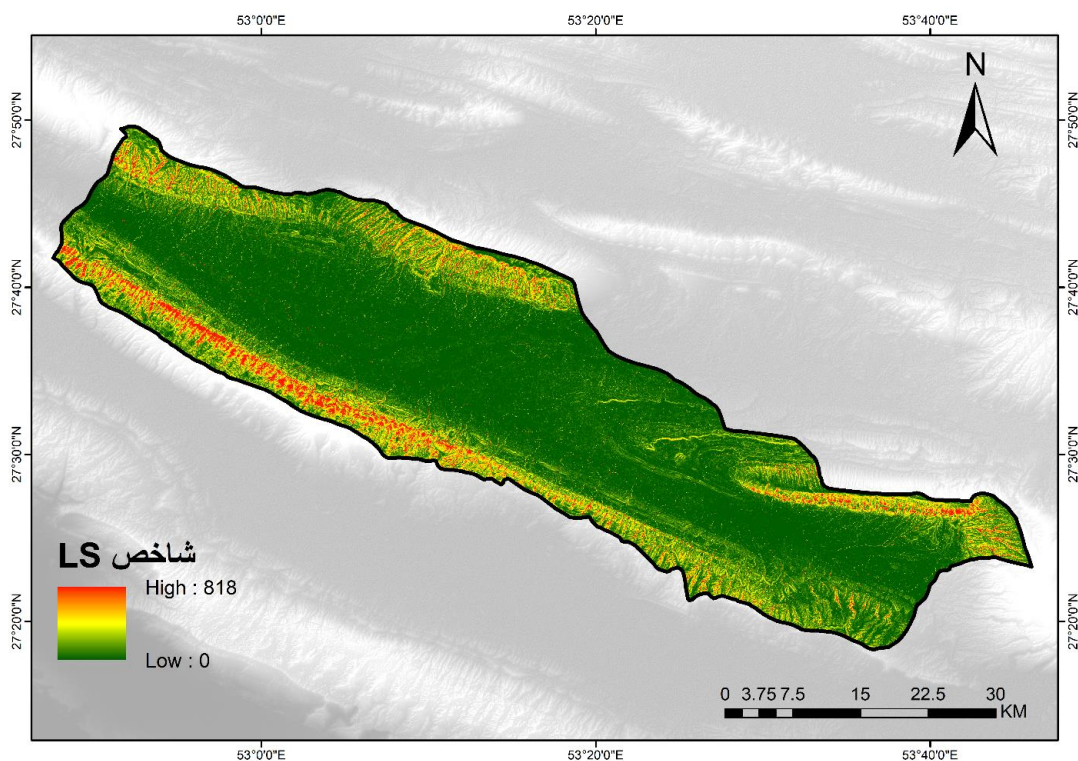
عامل فرسایش پذیری خاک (K) در مدل RUSLE بیان گر مقاومت خاک به تخریب فیزیکی در مقابل تاثیر قطره باران و نیروی برش رواناب است (واعظی و همکاران). این عامل به توصیف کمی توانایی ذرات نسبت به جداشدن میپردازد. درواقع این فاکتور بیان میکند در شرایط یکسان، خاک های مختلف فرسایش پذیری متفاوتی دارند. مقادیر عامل فرسایش پذیری بر حسب تن ساعت بر مگا ژول میلی متر از صفر تا یک متغیر است. همانطور که در شکل شماره ۶ مشاهده می گردد در مناطق شمال غربی حوضه مورد مطالعه دارای بیشترین ارزش عددی (حدوداً ۰/۴۰) بوده که این مناطق دارای بافت غالب با ترکیبات سیلتی می باشد که حساسیت بیشتری به فرسایش دارند. در واقع در این نشه پهنه بندی شاخص فرسایش پذیری خاک مقادیر زیاد برای خاک های دارای سیلت یا شن خیلی ریز زیاد و خاک هایی با مقادیر زیاد رس که خود یک عامل پایداری است، دارای میزان K حدود ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ می باشد. کمترین، متوسط و بیشترین ارزش عددی عاین شاخص به ترتیب ۰/۱۴، ۰/۲۵۷، و ۰/۴۰ می باشد (شکل ۶).



شکل ۶: نقشه شاخص پذیرگی خاک (K) حوضه آبخیز علامرودشت

عامل طول شیب (LS)

عامل طول شیب (LS) در معادله جهانی فرسایش خاک در واقع فاصله افقی از منبع جریان بالادست تا نقطه ای است که سرعت گرادیان به طور چشمگیری تغییر می کند، به طوری که فرآیند فرورانش آغاز می شود. به طور کلی، هر چه شیب بیشتر باشد، مقدار ارزش عددی این شاخص نیز باید بیشتر بوده شدت فرسایش در حال افزایش است (احمدآبادی و صدیقی فر، ۱۳۹۶). با توجه به نقشه پهنه بندی این شاخص در نواحی مرزی حوضه آبخیز مورد مطالعه که دارای شیب و ارتفاع بیشتری می باشند در حالی که مناطق مرکزی حوضه مورد مطالعه دارای کمترین ارزش این شاخص می باشند. ارزش عددی متوسط این شاخص ۱۷/۳۱ و انحراف معیار لایه پهنه بندی نیز ۸/۶۵ می باشد (شکل ۷).

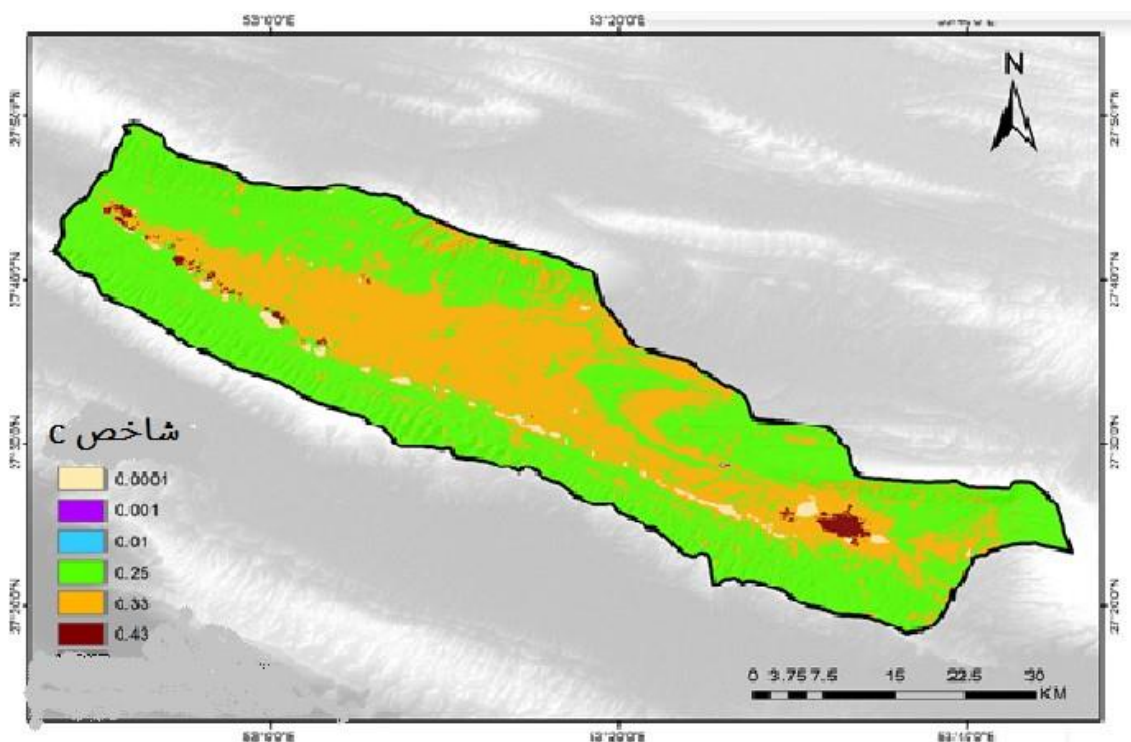


شکل ۷: نقشه فاکتور LS حوضه آبخیز علامرودشت

عامل پوشش گیاهی (C)

فاکتور C در واقع مربوط به عامل کاربری اراضی است و برای دست آوردن این عامل در منطقه مورد مطالعه از تصاویر ماهواره Sentinel-2 سال ۲۰۲۰ تهیه گردید. حوضه مورد مطالعه با توجه به شرایط خشک اقلیمی عموماً دارای پوشش مرتعی بسیار ضعیفی بوده که تنها گونه های مرتعی بومی قادر به تحمل خشکی های مکرر می باشند پوشیده شده هست هر چند گونه های درختی و درختچه ای مانند گز نیز بصورت پراکنده در حوضه مورد مطالعه دیده می شود. لذا برای تهیه این شاخص اقدام به مرور مقالات و تحقیقات پیشین گردید و با تعیین ارزش عددی این شاخص برای هر نوع کاربری در نهایت نقشه این شاخص در محیط GIS بصورت رستری و با قدرت تفکیک ۳۰ متری تهیه گردید. کمترین ارزش عددی این شاخص که نزدیک به صفر بوده مربوط به مناطق آبی و مردابی و باتلاق بوده و بیشترین ارزش عددی ۰/۴۳ مربوط به اراضی کشاورزی که بیشتر شامل کشت گندم و یا پنبه می باشند، در کل می توان گفت که وضعیت منطقه از نظر این نوع

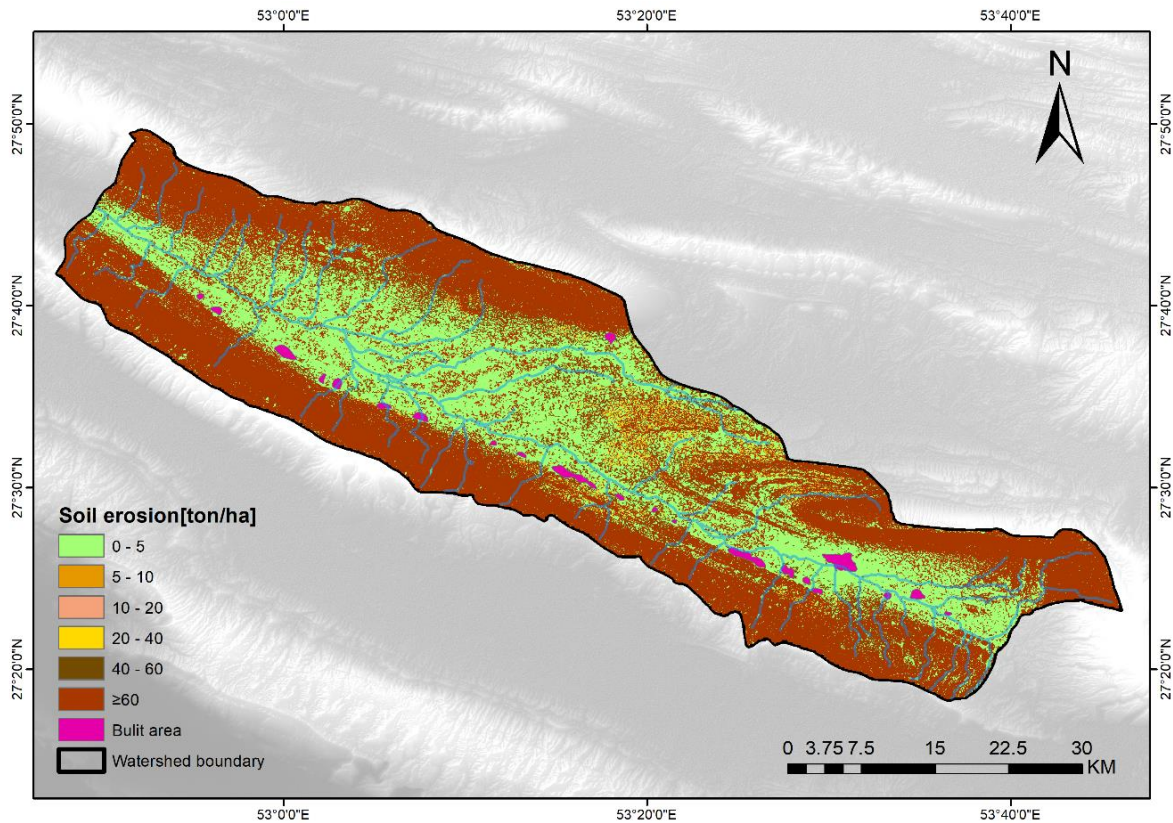
شاخص در بیشتر نواحی خصوصاً مناطق مرکزی حوضه و نواحی با شیب کمتر از ۱۰ درصد دارای وضعیت شدید از لحاظ خطر فرسایش آبی و حساسیت به فرسایش خاک می باشند (شکل ۸).



شکل ۸: نقشه شاخص C حوضه آبخیز علامرودشت

نقشه پهنه بندی فرسایش آبی

برای تهیه نقشه نهایی پتانسیل فرسایش آبی حوضه مورد مطالعه در نهایت با یکسان سازی قدرت تفکیک لایه های ورودی به مدل و با استفاده از ابزار Raster Calculator در محیط نرم افزار ArcGIS 10.8 اقدام به ضرب لایه ها و تهیه نقشه خروجی گردید (شکل ۹). همانطور که در این نقشه نهایی پهنه بندی فرسایش آبی ملاحظه می شود، بیشترین مساحت محدوده که شامل ۵۴,۴۴ درصد مساحت حوضه (۱۰۳۸۷۴,۶۷ هکتار) بوده که در طبقه فرسایش خیلی زیاد (بیش تر از ۶۰ تن در هکتار در سال) قرار دارد که قسمت های زیادی از شمال، شمال شرق، شرق، بخش هایی از مرکز و جنوب شرقی محدوده را در برمی گیرد در واقع این کلاس شدید فرسایش آبی در مناطق مرکزی حوضه که عمدتاً در نواحی مرتفع تر، با پوشش گیاهی اندک (مراتع فقیر) و شیب زیاد دیده می شود که شاخص LS نیز در این مناطق ارزش عددی بالاتری را دارند در حالی که ۳۲/۲۲ درصد از کل مساحت حوضه آبخیز علامرودشت (۶۱۵۳۲,۵۵ هکتار) در کلاس فرسایش کمتر از ۲۰ تن در هکتار در سال می باشد که این مناطق بیشتر در نواحی کم شیب و مرکزی حوضه مورد مطالعه واقع شده اند. ۵۱/۵۱ درصد از حوضه تحت خطر فرسایش کم (۲۵-۵۰) قرار دارد که به طور پراکنده در تمام محدوده قابل مشاهده است. حدود ۱۴/۲۸ مساحت محدوده در طبقه فرسایشی خیلی زیاد قرار دارد که بر قسمت های شمال غرب، غرب، جنوب غرب و بخش هایی از مرکز منطبق است.



شکل ۹: نقشه کلاس بندی پتانسیل فرسایش آبی با مدل RUSLE در حوضه آبخیز علامرودشت

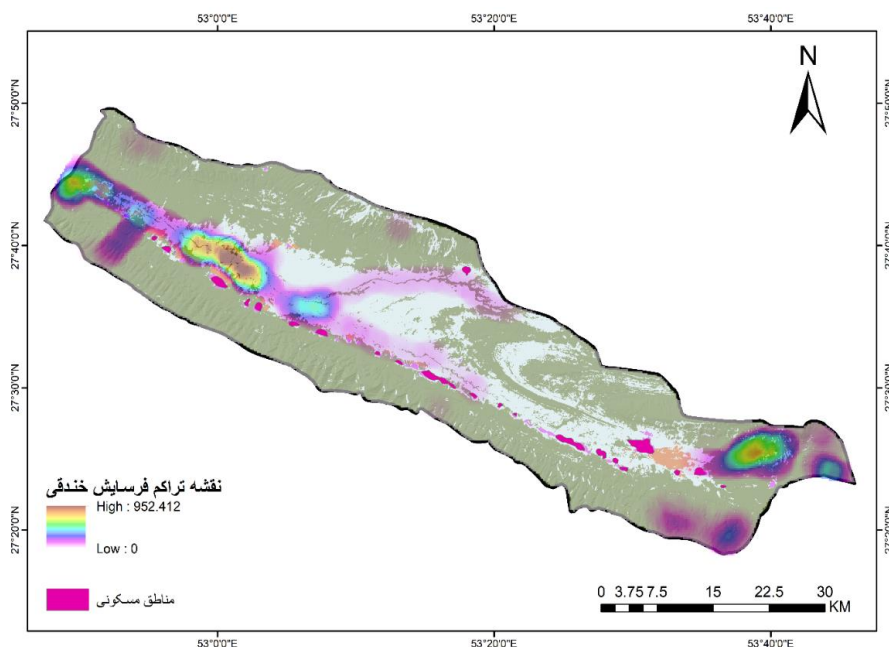
در حالی که کمترین میزان فرسایش در نواحی مرکزی حوضه که دارای شیب و ارتفاع کمتری می باشند ملاحظه می گردد. در نواحی کم شیب حوضه همانطور که قبلا ذکر شد پوشش گیاهی به صورت پوشش مرتعی ضعیفی بوده که خاک مستعدتر در مقابل فرسایش آبی می باشد. متوسط پتانسیل فرسایش آبی در حوضه مورد مطالعه که در واقع از میانگین گیری تمامی میزان فرسایش محاسبه شده با مدل مورد استفاده برای هر پیکسل بوده تعیین می شود، که میزان $93/13$ تن در هکتار در سال می باشد، که با مقایسه به نرخ متوسط جهانی میزان بالایی از فرسایش و از بین رفتن خاک محسوب می شود.

تلفیق نقشه پهنه بندی فرسایش آبی با نقشه تراکم خندقی

مدل جهانی فرسایش خاک با تاکید بر پهنه بندی پتانسیل شدت فرسایش آبی بر اساس تیپ های فرسایشی شیاری و ورقه ای بوده در حالی که همانطور که در نقشه نهایی فرسایش دیده شد مناطق مرکزی و کم شیب حوضه مورد مطالعه اساسا در کلاس فرسایش آبی بسیار کم (کمتر از ۱۰ تن در هکتار در سال) می باشند، در حالی که این مناطق دارای بیشترین شدت فرسایش خندقی (فرسایش توده ای) می باشند، که موجب تولید بیشترین میزان رسوب نیز در حوضه های آبخیز می شود (احمدی، ۱۳۹۰؛ پوزن^۱ و همکاران، ۲۰۰۳؛ ذاکری نژاد و همکاران ۲۰۱۸). لذا در این مطالعه با توجه به مطالعات میدانی، عکس های هوایی و استفاده از تصاویر ماهواره ای گوگل ارت به رقومی سازی خندق های غالب حوضه مورد مطالعه گردید (بصورت پلی گون) بعد از این اقدام با استفاده از تابع تراکم کرنل (KernelDensity) در نرم افزار

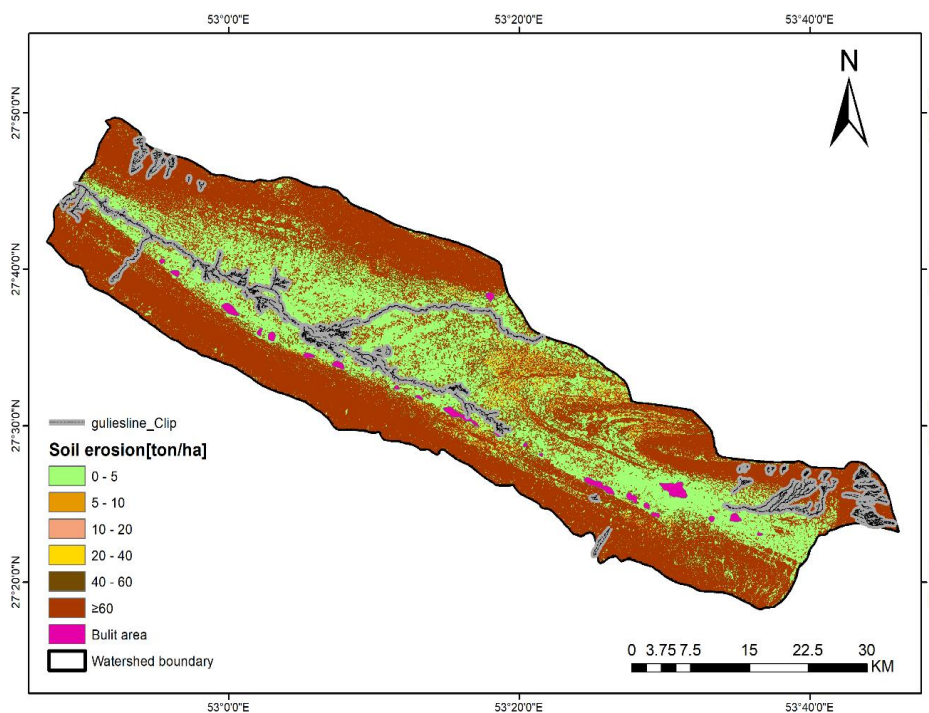
^۱ . Poesen et al.

ArcGIS10.8 نقشه تراکم فرسایش خندقی که اساسا دارای بالاترین کلاس شدت فرسایش آبی می باشد تهیه گردید (شکل ۱۰).



شکل ۱۰: نقشه تراکم فرسایش خندقی در حوضه آبخیز علامرودشت

با تهیه نقشه فوق بصورت رستری این نقشه با نقشه پهنه بندی فرسایش آبی مدل جهانی فرسایش خاک رویهمگذاری گردید، که با تلفیق این دو نقشه مناطق پرخطر فرسایش خندقی نیز در کلاس شدید فرسایشی قرار گرفت، لذا نقشه نهایی می تواند یک نقشه دقیقتری از نظر شدت فرسایشی برای سه تیپ فرسایشی شیاری، ورقه ای و خندقی محسوب گردد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱: نقشه تراکم فرسایش خندقی در حوضه آبخیز علامرودشت

نتیجه گیری

این مطالعه به پهنه بندی فرسایش خاک حوضه آبخیز علامرودشت در جنوب استان فارس با استفاده از مدل جهانی فرسایش خاک (RUSLE) پرداخته است، که عوامل اصلی این مدل عبارتند از شاخص های R ، K ، LS ، C و P که نمایانگر فرسایندها، باران، فرسایش پذیری خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و عملیات حفاظتی خاک است. در این پژوهش، داده های مربوط به بارش از تعدادی از ایستگاه های منتخب داخل و مناطق مجاور حوضه آبخیز علامرودشت، داده های خاک با استفاده از نمونه برداری و آنالیز، داده های مربوط به توپوگرافی از محصولات ماهوره ای، مدل رقومی ارتفاعی محدوده SRTM-30(DEM) با قدرت تفکیک ۳۰ متر اخذ شده از سایت زمین شناسی آمریکا و داده های پوشش گیاهی از تصاویر ماهوره ای Sentinel-2 و برای سال ۲۰۲۱ تهیه گردید، همچنین بر پایه بررسی و بازدیدها عملیات حفاظتی در منطقه (بجز چندین طرح محدود) صورت نگرفته که به عامل P ، عدد یک اختصاص داده شد. که در نهایت تمامی نقشه به قدرت تفکیک ۳۰ متری کلاس بندی مجدد شده اند. سپس با وارد کردن داده ها در نرم افزار ArcMap10.8، نقشه هر یک از عوامل تهیه شد و در نهایت با ضرب عوامل با استفاده از گزینه Raster Calculator، نقشه نهایی فرسایش بدست آمد. سپس اقدام به تهیه نقشه تراکم فرسایش خندقی با تابع کرنا گردید که با نقشه نهایی همپوشانی گردید. نقشه پهنه بندی فرسایش در محدوده آبخیز علامرودشت، نشان می دهد که میزان فرسایش بین ۰ تا بیش از ۷۰ تن در هکتار در سال متغیر است. بازه زیاد تغییرات، حاصل فیزیوگرافی، شرایط اقلیمی و پوشش گیاهی محدوده است که البته نباید عامل انسانی و تاثیر فعالیت های انسانی در حوضه را نادیده گرفت. همانطور که قبلا بیان شد با مقایسه نتایج پهنه بندی مدل جهانی فرسایش با نقشه پراکنش فرسایش خندقی، این مدل توانایی پیش بینی شدت فرسایش را برای این تیپ فرسایشی ندارد که در ادامه اقدام به تلفیق نقشه تراکم خندقی و نقشه پهنه بندی فرسایش آبی گردید. بررسی نقشه فاکتور فرسایندها باران در سطح حوضه نشان داد که مقادیر این فاکتور با توجه به نقشه R منطقه، متوسط عددی این شاخص ۱۱۲۵ بوده که بین ارزش عددی این لایه بین ۵۸۳ تا ۳۷۶۹ متغیر بوده که در نواحی پرشیب و مناطق مرزی حوضه آبخیز علامرودشت حوضه ارزش بوده در حالی که مناطق کم ارتفاع خصوصا نواحی مرکزی حوضه دارای کمترین ارزش عددی می باشند. مقادیر فرسایندها باران در قسمت های شمال غربی حوضه دارای بیشترین مقدار این شاخص فرسایندها می باشند. به عبارت دیگر، کاهش فاکتور R ، رابطه نزدیکی با کاهش ارتفاع و باران در نواحی مختلف حوضه مورد مطالعه را دارد.

همچنین دیگر این مدل که شاخص فرسایش پذیری (K) خاک بوده که طبق بسیاری از مطالعات ارتباط نزدیکی با نوع بافت خاک و همچنین درصد ماده آلی خاک دارد به طوری که در مناطقی که مقدار ماده آلی کمتر از ۲ درصد دارند ارزش عددی بیشتری از نظر این شاخص وجود دارد. مقدار K در منطقه مورد مطالعه از ۰،۱۴ تا ۰،۴۰ درصد متغیر می باشد، بیشترین میزان حساسیت خاک به فرسایش در قسمت شمال غربی حوضه به میزان ۰،۴۰ درصد بیشترین نرخ حساسیت خاک به فرسایش را نشان می دهد و کمترین میزان در قسمت جنوب شرقی واقع شده است، ارزش متوسط عددی این شاخص نیز در کل حوضه مورد مطالعه ۰،۲۵۷ می باشد. شایان ذکر هست ارزش بالای عددی این شاخص مرتبط با مناطقی که دارای خاک های با درصد بالاتر از سیلت مانند بافت های سیلت لوم یا سیلت رسی لوم بوده که حساسیت بیشتری به فرسایش دارند و مناطقی که دارای بافت های مانند رسی، شنی و یا لومی شنی می باشند دارای مقاومت بیشتری نسبت به فرسایش آبی می باشند.

فاکتور شیب - طول (LS) در مدل مربوطه بیانگر تاثیر توپوگرافی بر روی میزان فرسایش خاک می باشد. در واقع ثابت شده که افزایش طول شیب و درجه شیب میتواند سرعت جریان آب را در سطح زمین افزایش دهد و باعث تشدید فرسایش خاک شود. فرسایش خالص خاک نسبت به تغییرات در درجه شیب در مقابل طول شیب حساستر است. طول شیب فاصله

ی بین نقطه ی بالایی آغاز سرایشی تا نقطه ای است که شیب به حداقل خود می رسد و در این نقطه رسوبات ته نشین میشوند (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸) تأثیر ویژه ی توپوگرافی روی فرسایش خاک توسط فاکتور LS (بدون واحد) بیان میگردد. در حوضه آبخیز مورد مطالعه که دارای اختلاف ارتفاعی زیادی بین مناطق کم شیب و مسطح در نواحی مرکزی تا نواحی پرشیب در مناطق مرزی حوضه خصوصا در شمال غرب و جنوب غرب منطقه وجود دارد. به طوری که هر چقدر به سمت مرکز حوضه و نواحی مرکزی کاهش ارتفاع و شیب داریم این شاخص نیز کاهش می یابد. حداقل و حداکثر این فاکتور در حوضه مورد از صفر تا ۸۱۸ متغیر بوده و ارزش متوسط این لایه نیز ۸۶۵ می باشد که بیشتر از ۵۰ درصد حوضه دارای ارزش عددی کمتر از ۱۰ می باشد که شامل مناطق کم شیب حوضه می باشند.

فاکتور مدیریت پوشش گیاهی (C) نشان دهنده ی تأثیر کاشت در مدیریت کشاورزی و اثر پوششهای درختی، درختچه ای، علفی و زمینی بر کاهش فرسایش خاک میباشد. با افزایش پوشش گیاهی، فرسایش خاک کاهش می یابد. همانطور که قبلا بیان گردید برای محاسبه این شاخص از نقشه کاربری تهیه شده توسط تصاویر ماهوره ای استفاده گردید و با توجه به جدول امتیازدهی نوع کاربری ها اقدام به ارزش دهی به این هر کلاس کاربری گردید، بطوریکه مناطقی که دارای پوشش بسیار ضعیف، شوره زار و یا لخت دارای بیشترین ارزش عددی ۰,۴۳ بوده و در حالی که مناطق دارای پوشش مرتعی متوسط تا ضعیف ارزش عددی ۰,۲۵ را شامل شده اند. البته شایان ذکر هست که مناطق مصنوعی مانند مسکونی و صنعتی در این مطالعه در نقشه نهایی ماسک (کلاس غیرفرسایش) گردید که در نقشه نهایی نیز مشاهده می گردد. مقادیر این فاکتور برای حوضه مورد مطالعه بین ۰,۰۰۰۱ تا ۰,۴۳۰ متغیر می باشند که نشان دهنده پوشش گیاهی ضعیف و بسیار ضعیف منطقه می باشد.

نقشه خطر فرسایش خاک حوضه که از ترکیب چهار لایه که شامل لایه های فرساینده باران، فرسایش پذیری خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی در محیط GIS تولید گردید متوسط فرسایش در محدود مطالعاتی با مدل جهانی فرسایش بدون در نظر گرفتن فرسایش خندقی، نزدیک به ۹۳,۱۳ تن در هکتار در سال در سطح پیکسل بوده و با تلفیق نقشه تراکم فرسایش خندقی با نقشه نهایی پتانسیل مدل جهانی فرسایش خاک این مقدار متوسط را به ۱۱۲,۳۰ تن در هکتار در سال بوده که این رقم بالای فرسایش خاک به تخمین های سایر مطالعات نزدیک می باشد. محمدی و همکاران (۱۳۹۵) میزان هدر رفت خاک ناشی از فرسایش را در حوضه تالر با مدل RUSLE برآورد کردند. نتایج ارزیابی آنها نشان داد میزان فرسایش در منطقه مورد مطالعه از صفر تا ۹۲/۰۱ تن در هکتار در سال می باشد. در مطالعه ای دیگر که در دشت مرودشت استان فارس نیز با استفاده از مدل RUSLE صورت گرفت مقدار بین ۰ تا ۵۰ تن در هکتار در سال را نشان داد که کلاس فرسایش کم و خیلی کم بیشتر در نواحی مرکزی دشت قرار داشتن (انصاری لاری و انصاری، ۱۳۹۵). رضایی و همکاران (۱۳۹۳) میزان هدر رفت خاک ناشی از فرسایش را در حوضه گابریک- جنوب خاوری استان هرمزگان با مدل RUSLE برآورد کردند. نتایج ارزیابی آنها نشان داد میزان فرسایش در کل منطقه مورد مطالعه از صفر تا ۹۲/۰۱ تن در هکتار در سال می باشد. مددی (۱۳۹۱) میزان هدر رفت خاک ناشی از فرسایش را در حوضه آبریز ویلادره استان اردبیل برآورد کرد. نتایج ارزیابی ایشان نشان داد میزان فرسایش در کل منطقه ۱۰,۳ تن در هکتار در سال محاسبه شده است. این میزان فرسایش در سال، ضرورت توجه و اجرای طرح های حفاظت خاک و آبخیزداری در حوضه مورد مطالعه را بیان می نماید. نتایج این تحقیق قابلیت بالای سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور را برای ایجاد داده های مورد نیاز جهت ایجاد فاکتورهای RUSLE نشان داد که نتیجه آن به دست آمدن اطلاعات خروجی با کیفیت و قابلیت به روز رسانی بالا بود.

منابع

- ابوالوردی، ز.، صوفی، م.، و نجابت، م.، ۱۳۹۰، مقایسه نرخ رشد آبکند در منطقه علامرودشت شهرستان لامرد در استان فارس، پنجمین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک کشور، کرمان.
- احمدی، ح.، ۱۳۹۰، ژئومورفولوژی کاربردی (فرسایش آبی)، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ پنجم، ص ۶۸۸.
- احمد آبادی، ع و صدیقی فر، ز.، ۱۳۹۶، برآورد میزان فرسایش و تولید رسوب با کمک معادله جهانی فرسایش خاک اصلاح شده (RUSLE) در حوضه آبریز حبله رود. فصلنامه جغرافیای طبیعی، سال دهم، شماره ۳۷، ص ۸۳-۱۰۳.
- انصاری لاری، ا و انصاری، م.، ۱۳۹۵، برآورد میزان فرسایش خاک در دشت مرودشت استان فارس با استفاده از مدل تجربی RUSLE. پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، سال چهارم، شماره ۴، ص ۱۳۴-۱۴۹.
- آرخی، ص و نیازی، ی.، ۱۳۸۹، بررسی کاربرد GIS و RS برای تخمین فرسایش خاک و بار رسوب با استفاده از مدل RUSLE حوضه بالادست سد ایلام. مجله پژوهشهای حفاظت آب و خاک.
- رضایی مقدم، م.، حجازی، ا.، مزبانی، م.، ۱۴۰۰، برآورد فرسایش- رسوب حوضه آبریز سراب سیکان با استفاده از مدل RUSLE. هیدروژئومورفولوژی. ۳(۲): ۱۴-۲۰.
- شبجاعی، س و ارست، م.، ۱۳۹۳، تعیین روند تغییرات پوشش گیاهی در منطقه تالاب هامون، با استفاده از شاخص NDVI و نرم افزار ENVI. اولین همایش ملی محیط زیست دانشگاه پیام نور، ص ۸-۱.
- ذاکری نژاد، ر.، ۱۳۹۹، ارزیابی مدل های رقومی ارتفاع جهت تهیه نقشه پتانسیل فرسایش خندقی با استفاده از مدل مکسنت و سامانه اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز سمیرم، جنوب استان اصفهان). سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۱(۳)، ۲۴-۲۱.
- ذاکری نژاد، ر.، وثوقی، ش.، انتظاری، م.، ۱۴۰۱، مقایسه دقت انواع روش های طبقه بندی های نظارت شده برای تهیه نقشه کاربری اراضی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز علامرودشت)، پژوهش های فرسایش محیطی، ۱۲(۴۶): ۱۳۸-۱۵۳.
- محمدی، م.، مقدسه، ک.، عطاالله غلامی، ل. و امیدوار، ا.، ۱۳۹۵، کاربرد مدل RUSLE در تعیین توزیع مکانی خطر هدر رفت خاک. آکو هیدرولوژی، دوره ۳، شماره ۴، ص ۶۴۵-۶۵۸.
- مهندسین مشاور حاسب کرجی.، ۱۳۸۶، مطالعات اجرایی طرح مدیریت مناطق بیابانی علامرودشت لامرد، جلد اول، مطالعات پایه، اداره کل منابع طبیعی استان فارس، اداره امور بیابان، ۱۳۴.
- عبیات، م.، عبیات، م.، عبیات، م.، ۱۴۰۰، بررسی تغییرات کاربری اراضی و اثر آن بر روند فرسایش خاک در حوضه باغملک با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و مدل RUSLE محیط شناسی.
- فیض نیا، س.، احزان، ک.، ۱۳۸۸، تعیین فرسایش پذیری نهشته های منفصل با استفاده از معادله جهانی فرسایش آب روش USLE در حوزه آبخیز دماوند. رسوب و سنگ رسوبی، شماره ۴: ۱۳-۲۸.
- یمانی، م.، موغلی، م.، کریمی، هادی.، ۱۳۹۰، فرسایش خندقی و تأثیر آن بر توسعه سکونتگاهی در بخش علامرودشت. فصلنامه جغرافیای طبیعی، سال چهارم، شماره ۱۲.
- Adediji, A., Tukur, AM., Adepoju, KA. (2010). Assessment of Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in Katsina Area, Katsina State of Nigeria using remote sensing (RS) and geographic information system (GIS). *Iran J Energy Environ* 1(3):255-264.
- Angileri, S. E., Conoscenti, C., Hochschild, V., Märker, M., Rotigliano, E., & Agnesi, V. (2016). Water erosion susceptibility mapping by applying Stochastic Gradient Treeboost to the Imera Meridionale River Basin (Sicily, Italy). *Geomorphology*, 262: 61-76.

- Arabameri, A., Chandra, Pal S., Costache, R, Saha, A., Rezaie, F., Seyed Danesh, A., Pradhan, B., Lee S. & Hoang, N. (2021). Prediction of gully erosion susceptibility mapping using novel ensemble machine learning algorithms. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12:1, 469-498.
- Babur, E., Uslu, Ö. S., Battaglia, M. L., Diatta, A., Fahad, S., Datta, R., Fahad, S., Datta, R., Hye, M., Hussain, G.S & Danish, S., (2021). Studying soil erosion by evaluating changes in physico-chemical properties of soils under different land-use types. *Saudi Society of Agricultural Sciences*, 20(3): 190-197.
- BCEOM (1998) *Abay River Basin Integrated Development Master Plan, Main Report*. Ministry of Water Resources, Addis Ababa.
- Farhan, Y., Nawaiseh, S., (2015). Spatial assessment of soil erosion risk using RUSLE and GIS techniques. *Environ Earth Sci*. 74(6), P4649-4669.
- Flanagan, DC., Nearing, MA., (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.
- Farhan, Y., Nawaiseh, S., (2015). Spatial assessment of soil erosion risk using RUSLE and GIS techniques. *Environ Earth Sci*. 74(6), P4649-4669.
- Ferro, V., Giordano G., Iovino, M., (1991). Isoerosivity and erosion risk map for Sicily. *Hydrol Sci J* 36:549-564.
- Sadeghifard D, Jabari E, Ghayasian H (2004). Rainfall erosivity zonation in Iran, the first national conference on civil engineering, Sharif University of Technology, Iran. *CIVILICA online journal: http://www.civilica.com/Paper-NCCE01-226_2417394703.html*, 1-8. (in Persian) (last view 30.01.2015).
- Ganasri, B.P., & Ramesh, H., (2015). Assessment of soil erosion by RUSLE model sensing and GIS- a case study of nethravathi basin. *Geoscience frontiers*, 1-9.
- Ganasri, B.P., & Ramesh, H., (2015). Assessment of soil erosion by RUSLE model sensing and GIS- a case study of nethravathi basin. *Geoscience frontiers*, 1-9.
- Grellier, S., Kemp, J., Janeau, J. L., Florsch, N., Ward, D., Barot, S., & Valentin, C. (2012). The indirect impact of encroaching trees on gully extension: a 64year study in a sub-humid grassland of South Africa. *Catena*, 98, 110-119.
- Hughes, Andrew., Prosser, Ian. (2012). Gully erosion prediction across a large region: Murray-Darling Basin, Australia. *Soil research*, 50:267-277.
- Jahun, B, G., Ibrahim, R., Dlamini, N.S., Musa, S.M., (2015). Review of Soil Erosion Assessment using RUSLE Model and GIS. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, Vol5, No9, P36-47
- Kayet, Na., Pathak, K., Chakrabarty, A., Sahoo, S., (2018). Evaluation of soil loss estimation using the RUSLE model and SCS-CN method in hillslope mining areas. *International Soil and Water Conservation Research*, p 31-42.
- Kefi, M., Yoshino, K., Setiawan, Y., Zayani, K., Boufaroua, M., (2011). Assessment of the effects of vegetation on soil erosion risk by water: a case of study of the Batta watershed in Tunisia. *Environ Earth Sci* 64(3):707-719.
- Kheir R., Wilson J. & Deng Y. (2007). Use of terrain variables for mapping gully erosion susceptibility in Lebanon. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32: 1770-1782.
- Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land Degrad Dev* 12:519-539.
- Lee, S., Chu, M. L., Guzman, J. A., & Botero-Acosta, A., (2021). A comprehensive modeling framework to evaluate soil erosion by water and tillage. *Environmental Management*, 279, 111631.
- Moore, I.D., BuRCH, G.J. (1986), *Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation*. *Soil Science Society of America Journal*, volume 50 (5): 1294-1298.

- Pacific Southwest Interagency Committee., (1968). *Report of the water management subcommittee on factors affecting sediment yield in the pacific southwest area and selection and evaluation of measures for reduction of erosion and sediment yield.* ASCE, 98, Report No. HY12.
- Panagosa, P., Meusburger, K., Ballabio, C., Borrellia, P., Alewell, C. (2014). *Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS.* *Science of The Total Environment*, 479–480: 189-200.
- Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., Valentin, C., (2003). *Gully erosion and environmental change: importance and research needs.* *CATENA*, 50(2): 91-133. doi:[https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1).
- Singh, S., Bhardwaj, A., Verma, V. K., (2020). *Remote sensing and GIS based analysis of temporal land-use/land-cover and water quality changes in Harike wetland ecosystem, Punjab, India.* *Environmental Management*, 262, 110355.
- Shahrivar, A., Tehbconsung, C., Jusop, S., Abdul, Rahim A., Soufi, M., (2012). *Roles of SAR and EC in Gully Erosion Development (A Case Study of Kohgiloye va Boyerahmad Province, Iran).* *J Res Agric Sci* 8(1):1–12.
- Shi, Z.H., (2002). *Assessment of Erosion Risk with the Rusle and Gis in the Middle and Lower Reaches of Hanjiang River.* 12th ISCO Conference Beijing. 73-78.
- Shirazi, M.A., Boersma, L. (1984). *A unifying quantitative analysis of soil texture,* *Soil Science Society of America Journal*, 48: 142-147.
- Valentin, C., Poesen, J., Yong, L., (2005). *Gully erosion: impacts, factors and control.* *Catena* 63:132–153.
- Renard, KG., Freimund, JR., (1994). *Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE.* *J Hydrol.* 157:287–306, European Commission Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability.
- Renard, KG., Foster, G.R., Weesies, GA, McCool DK., Yoder, DC., (1997). *Prediction soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation.* *Agricultural Handbook* 703. US Department of Agriculture p. 404.
- Tangestani, M., (2006). *Comparison of EPM and PSIAC models in GIS for erosion and sediment yield assessment in a semi-arid environment: Afzar Catchment, Fars Province, Iran.* *J Asian Earth Sci* 27:585–597.
- Veihe, A. (2002). *The spatial variability of credibility and its relation to soil types: a study from northern Ghana.* *Geoderma*, 106(1):101-120.
- Zakerinejad, R, Maerker, M., (2014). *Prediction of Gully erosion susceptibilities using detailed terrain analysis and maximum entropy modeling: a case study in the Mazayejan Plain, Southwest Iran.* *Geogr Fis Din Quat* 37(1):67–7.
- Zakerinejad, R., Michael, M., (2015). *An integrated assessment of soil erosion dynamics with special emphasis on gull in the Mazayjan basin, southwestern Iran.* *Natural Hazards*, 79(1): 25-50. doi:[10.1007/s11069-015-1700-3](https://doi.org/10.1007/s11069-015-1700-3). 29.
- Zakerinejad, R, Omran, A, Hochschild, V., Maerker, M., (2018). *Assessment of gully erosion in relation to lithology in the Southwestern Zagros Mountains, Iran using ASTER data, GIS and stochastic modeling.* *Geografia Fisica Edinamica Quaternaria*, 41(2): 95-104. doi:<https://doi.org/10.4461/GFDQ.2018.41.15>. erosion in the Mazayjan basin, southwestern Iran, *Nat Hazards*.