

برآورد میزان فرسایش و تولید رسوب با کمک معادله جهانی فرسایش خاک اصلاح شده (RUSLE) در حوضه آبریز حبله رود

علی احمدآبادی*

استادیار ژئومورفولوژی دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

زهرا صدیقی فر

کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۹/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۸/۲۸

چکیده

افزایش هدررفت منابع خاک در حوضه‌های آبخیز، چالشی مداوم است که با افزایش جمعیت و فشار وارده بر منابع طبیعی و کشت و کارهای ناپایدار در خاک‌ها و اراضی شیب دار، موجب کاهش تولید در اراضی می‌گردد. در این پژوهش با تحلیل پارامترهای مؤثر در بحث فرسایش، وضعیت فرسایش و تولید رسوب در حوزه آبخیز حبله رود بررسی شده است. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل نقشه DEM30 متر، خاک، تصویر ماهواره‌ای لندست برای سال ۲۰۱۳ و آمارهای مربوط به ایستگاه‌های باران سنجی می‌باشد. برآورد میزان فرسایش با کمک معادله جهانی اصلاح شده فرسایش خاک (RUSLE) در محیط نرم افزار Arc GIS 10.2 انجام گرفت. نتایج کلی حاکی از آن است که مدل RUSLE در تلفیق با GIS و RS پرکاربردترین مدل در برآورد فرسایش و تولید رسوب به صورت اطلاعات مکانی می‌باشد. همچنین بخش‌های مرکزی حوزه بدلیل نزدیک بودن به آبراهه‌ها و رودخانه اصلی و تشکیل رسوب های آبرفتی تحت تأثیر عامل فرساینده‌گی باران بیشتر در معرض فرسایش قرار می‌گیرد که این میزان برابر ۴۵۹ مگاژول/میلی‌متر/هکتار/ساعت در سال است که نیازمند انجام طرح‌های کنترل فرسایش خاک می‌باشد.

واژگان کلیدی: فرسایش، فرساینده‌گی باران، مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح شده، حبله رود.

مقدمه

فرسایش خاک و تولید بار رسوب در حوضه‌های آبخیز، امروزه به یکی از معضلات مهم زیست-محیطی تبدیل شده است و بنابراین، جلوگیری از بروز آن‌ها از مهمترین عوامل برای حفاظت منابع طبیعی به شمار می‌رود (Morgan, 1998). افزایش هدر رفت منابع خاک در حوضه‌های آبخیز، چالشی مداوم است که با افزایش جمعیت و فشار وارد بر

منابع طبیعی و کشت و کارهای ناپایدار در خاک‌ها و اراضی شیبدار موجب کاهش تولید در اراضی و همچنین، کاهش روز به روز نسبت اراضی به جمعیت ساکن، باعث فشار بیشتر بر اراضی و منابع طبیعی شده است (Gerigerson, et al. 1988). خاک طی فرآیندهای پیچیده‌ای که تحت تأثیر پنج عامل اصلی اقلیم، توپوگرافی، سنگ مادر، پوشش گیاهی و زمان است تشکیل می‌شود (جعفری و همکاران، ۱۳۸۲، ۷۸۸). در صورت مساعد بودن چهار عامل اولی، زمان طولانی برای تشکیل خاک نیاز است. با توجه به اینکه آب و خاک مهمترین عوامل در تأمین مایحتاج بشری می‌باشند، کوچک‌ترین کم توجهی در حفظ و نگهداری این دو خسارات جبران ناپذیری را وارد خواهد کرد. عمده‌ترین دلیل تخریب منابع آب و خاک بر هم خوردن تعادل طبیعی در یک منطقه است که علت اصلی آن دست کاری و دخالت انسان در آن است. پیش بینی فرسایش خاک، همواره یکی از متداول‌ترین روش‌ها در مدیریت منابع طبیعی به جهت کنترل بهره‌وری خاک در داخل حوضه و تخمین میزان رسوب و کیفیت آب در خارج از حوضه است (Morgan & Nearing, 2011). لذا تحلیل و برآورد میزان فرسایش و رسوب و تهیه نقشه‌های شدت فرسایش، بررسی عوامل ایجاد فرسایش و ارائه راهکارهای مدیریتی، با توجه به روند فزاینده فرسایش خاک و مساحت وسیع اراضی و گاهی حتی صعب العبور بودن یا عدم دسترسی به منطقه، استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی^۱ را امری ضروری می‌نماید (Sherastha, 2001).

مدل‌های زیادی جهت برآورد فرسایش خاک و توسعه طرح‌های مدیریتی فرسایش خاک ارائه شده که از مهم‌ترین این مدل‌ها می‌توان به معادله جهانی فرسایش خاک (Wishmeier, et al. 58, 1987)، پروژه پیش بینی فرسایش خاک (فلنگان^۲ و نیرینگ، ۱۹۹۵)، ابزار ارزیابی آب و خاک (آرنولد^۳ و همکاران، ۱۹۹۸) و مدل اروپایی فرسایش خاک (Morgan, et al. 1988) اشاره نمود. در طی ۴۰ سال اخیر، مدل USLE به سبب داشتن محاسبات ساده، پرکاربردترین روش تخمین پتانسیل فرسایش خاک و برآورد تاثیرات عملیات‌های مدیریتی مختلف بر آن بوده است و به دنبال آن نسخه جدید مدل USLE به نام معادله تجدید نظر شده جهانی هدر رفت خاک (RUSLE) توسعه یافته که برآوردهای دقیق‌تری از فاکتورهای R,C,K,P فرسایش خاک انجام می‌دهد. به سبب اینکه سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS)، امکان تجزیه و تحلیل داده‌های مکانی را فراهم می‌آورند، مدل‌های USLE, RUSLE با سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور، تلفیق شده‌اند (آرخی و همکاران، ۱۳۸۹، ۳۴).

در رابطه با مدل RUSLE پژوهش‌های فراوانی در ایران و جهان صورت گرفته که به شرح زیر می‌باشد: (رضایی و همکاران، ۱۳۹۳) با کمک مدل RUSLE به برآورد فرسایش خاک در حوضه آبخیز گابریک- جنوب خاوری استان هرمزگان پرداختند. نتایج حاکی از آن است که فاکتور توپوگرافی با بالاترین مقدار ضریب تعیین ۰/۸۷، بیش‌ترین تأثیر را در برآورد فرسایش سالانه خاک توسط مدل RUSLE داشته است. (رخبین و همکاران، ۱۳۹۳) با استفاده از مدل

¹ RS & GIS

² - Ghalangan & NEIRING

³ - Arnold & et el

RUSLE و سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، میزان فرسایش و تولید رسوب را در حوضه آبخیز لاورفین استان هرمزگان برآورد کردند. بررسی نقشه خطر فرسایش خاک نشان می‌دهد که میزان خطر فرسایش خاک در سطح حوضه از صفر تا ۷۱۱۵ بر حسب تن در هکتار در سال متغیر است. مناطق با خطر فرسایش خیلی زیاد، شامل مناطقی در قسمت‌های میانی حوضه است که دارای شیب تند و فرسایش گالی هستند. (علیپور و همکاران، ۱۳۹۳) به روش سزیم ۱۳۷ و مدل RUSLE به اندازه گیری میزان جابجایی ذرات خاک و برآورد فرسایش و رسوب در حوضه آبخیز آق امام انجام شد. در نهایت میزان متوسط فرسایش از روش سزیم ۱۳۷ در حوضه آبخیز آق امام، ۱۰،۷۸ تن در هکتار در سال بدست آمد، در حالی که با استفاده از مدل RUSLE-3D میزان متوسط فرسایش منطقه ۲،۶۱ تن در هکتار در سال بوده است. (عرفانیان و همکاران، ۱۳۹۳) با استفاده از مدل فازی (AERI) و RUSLE به ارزیابی خطر فرسایش در منطقه قرقناوه گلستان پرداختند. نتایج پژوهش مورد نظر نشان داده است که نقشه AERI در مقایسه با نقشه خطر مبتنی بر مدل RUSLE در شناسایی نواحی بحرانی از کارایی به نسبت بالایی برخوردار می‌باشد. (زندى و همکاران، ۱۳۹۲) از مدل اصلاح شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE) همراه با سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS) برای برآورد تلفات خاک و شناسایی نواحی حساس به فرسایش حوضه آبخیز وازرود استفاده کرده‌اند. نتایج نشان داده است که بخش اعظم طبقات فرسایشی زیاد و خیلی زیاد در شیب‌های ۲۵ تا ۴۵ درجه، ارتفاع ۱۱۸۰ تا ۲۱۸۰ متر از سطح دریا و در اراضی بدون پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه قرار گرفته است. (Karamesouti et al, 2015) با استفاده از مدل RUSLE و مدل PESERA میزان فرسایش را در منطقه مدیترانه در دو مقطع قبل و بعد از آتش سوزی برآورد کردند. منطقه مورد مطالعه در کشور یونان است که در تابستان ۲۰۰۷ آتش سوزی در آن اتفاق افتاد. (Kim, 2014) با استفاده از مدل RUSLE و GIS به برآورد میزان فرسایش خاک در حوضه San Marcos پرداخت که با استفاده از این مدل می‌توان مناطقی که در برابر فرسایش آسیب پذیر هستند تشخیص داد و با اجرای طرح‌های آبخیزداری در منطقه، کاهش فرسایش خاک را به دنبال داشت. (Alexakis et al, 2013) سرعت فرسایش خاک در حوضه آبخیز یالیاس در جزیره قبرس را با استفاده از RS و GIS و مدل RUSLE بدست آوردند. (Ashiagbor et al, 2013) با استفاده از مدل RUSLE و GIS توزیع مناسبی از خطرات فرسایش خاک در رودخانه Den Su در غنا را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مدل نشان داده است که ۸۰ درصد از حوضه جزء خطرات کم فرسایش و ۶ درصد دارای فرسایش متوسط و ۳ درصد دارای خطر بیش‌تر فرسایش و ۳ درصد دارای خطر شدید می‌باشند. (DEMIRCI ET AL, 2012) هدر رفت خاک در آبخیز دریاچه بویوچکمس در شمال غرب ترکیه را با استفاده از مدل RUSLE بدست آوردند. (Huey Teh, 2011) میانگین فرسایش خاک را با استفاده از مدل RUSLE در کوهستان‌های کامرون برای سالهای ۱۹۹۷ و ۲۰۰۶ بدست آورد. نتایج نشان داد که میانگین سالانه فرسایش خاک در سال ۱۹۹۷ برابر ۲۸۲۴۶۵/۵ متر مکعب در سال و ۳۳۴۸۵۳/۵ متر مکعب در سال برای سال ۲۰۰۶ برآورد شد.

هدف از پژوهش حاضر، مدلسازی مکانی میزان هدررفت خاک در حوضه آبخیز حبله رود با استفاده از مدل جهانی اصلاح شده فرسایش خاک (RUSLE) و سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS به صورت داده‌های رستری و شبکه‌ای در محیط نرم افزاری ARC GIS 10.3 می‌باشد.

داده‌ها و روش‌ها:

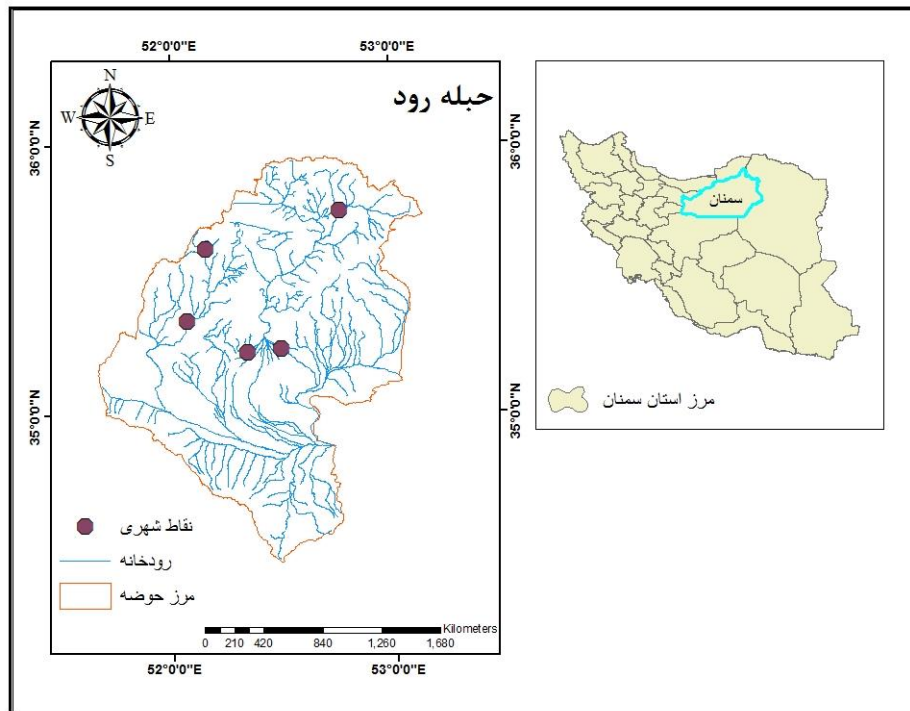
منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز حبله رود از نظر تقسیمات سیاسی جزو استان تهران و سمنان می‌باشد و شهرستان فیروزکوه و قسمتی از شهرستان دماوند را در استان تهران و قسمت‌هایی از شهرستان گرمسار و ایوانکی در استان سمنان را پوشش می‌دهد. از نظر موقعیت جغرافیایی حوضه در طول جغرافیایی ۵۶۰۴۶۷ غربی تا ۶۹۴۱۷۰ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۸۹۴۱۱ شمالی تا ۳۹۵۷۱۸۴ جنوبی قرار گرفته است. همچنین از نظر تقسیمات زمین‌شناسی بخش شمالی حوضه مورد مطالعه در واحد ساختمانی البرز مرکزی و جنوب آن در زون ایران مرکزی جای می‌گیرد و دارای سنگ‌شناسی متنوعی بوده است و ۱۱۷ نوع واحد سنگی از نظر لیتولوژی و دوره‌های زمانی مختلف در آن تشخیص داده شده است. رودخانه اصلی حوضه آبریز، رودخانه حبله رود می‌باشد. بخش عمده جریان رودخانه در دشت گرمسار توسط سد انحرافی و شبکه آبیاری مربوطه به مصرف کشاورزی این دشت رسیده و پساب آن در جنوب این دشت با رودخانه‌های گلو و آب دولاتی تلاقی می‌نماید و سپس به سمت جنوب شرقی چرخش می‌نماید و سپس از تلاقی با چند رودخانه دیگر به دشت کویر وارد می‌شود. حوضه آبخیز حبله رود به ۳ زیر حوضه اصلی حبله رود شرقی، غربی، مرکزی و داخل حوضه‌ای حبله رود تقسیم شده است و مساحت کل آن ۱,۲۶۶,۱۵۳ هکتار است. (طرح مدیریت پایدار آب‌و خاک حبله رود، ۱۳۹۰).

جدول ۱: مشخصات فیزیوگرافی حوضه مورد مطالعه

ارتفاع متوسط	ارتفاع حداکثر	ارتفاع حداقل	تراکم زهکشی کل حوضه	مجموع طول آبراهه‌ها	محیط (کیلومتر مربع)	مساحت (کیلومتر مربع)
۳۳,۱	۳۸۷۸	۷۲۳	۲۰۲۶	۲۸۶۶۶	۶۲۴۰۲	۱۲۶۶۱۵۳

مأخذ: نویسندگان



مأخذ: نویسندگان

شکل ۱: نقشه منطقه مورد مطالعه

داده‌های پژوهش

- مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با اندازه پیکسل ۳۰ متر؛
- تصویر ماهواره‌ای سنجده ETM⁺ ماهواره لندست سال ۲۰۱۳؛
- داده‌های ایستگاه باران‌سنجی و سینوپتیک به صورت ماهانه و سالانه؛
- لایه‌های رقومی شده خاک و لیتولوژی.

مدل RUSLE یک مدل برآورد فرسایش در واحد سطح است که با شش عامل R, K, L, S, C, P رابطه دارد (WISCHEMIER & SMITH, 1987). با استفاده از مدل RUSLE، فرسایش سطحی و شیاری به دست آمده از باران و روان آب، در سطوح تحت روان آب سطحی پیش‌بینی می‌شود. سطوح تحت روان آب محدوده‌ای هستند که جریان‌های سطحی از ابتدای آن سرچشمه می‌گیرند و در انتهای آن تمرکز یافته یا به محدوده رسوب‌گذاری وارد می‌شوند. هدر رفت خاک، متوسط سرعت فرسایش در این محدوده است (جونز و همکاران، ۲۰۰۸، ۵۴). فرساینده‌ی باران، فرسایش‌پذیری خاک، طول و درجه شیب، مدیریت پوشش گیاهی و عملیات حفاظتی. در مدل RUSLE، میزان هدر رفت خاک با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

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

رابطه شماره (1)

که در آن:

A = میانگین هدر رفت خاک در واحد سطح (تن / هکتار / سال)؛

R - فاکتور فرساینده گی باران (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ year⁻¹)؛

K - فاکتور فرسایش پذیری خاک (t h mj⁻¹ ha⁻¹ mm⁻¹)؛

L - طول شیب S - درجه شیب C - عامل پوشش گیاهی P - عملیات حفاظتی؛

فاکتورهای L, S, C, P بدون بعد هستند (زندی و همکاران، ۱۳۹۲).

عامل فرساینده گی باران (R):

مفهوم عبارت فرساینده گی باران توسط ویشمایر و اسمیت در سال ۱۹۵۸ به منظور لحاظ تأثیر تغییر اقلیم بر فرسایش خاک ارائه شد. در این پژوهش تصمیم گرفته شد که از یک شاخص نسبتاً ساده که امکان محاسبه آن با اطلاعات ایستگاه‌های باران‌سنجی مقدور بوده و از طرف دیگر مقبولیت بیشتری داشته باشند استفاده شود. از میان این‌گونه شاخص‌ها، دو شاخص فرساینده گی فورنیه و فورنیه اصلاح‌شده بیش از شاخص‌های دیگر در تعیین فرساینده گی باران و تهیه نقشه فرساینده گی به‌خصوص برای مناطق فاقد آمار شدت بارندگی مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته‌اند.

برای مناطقی که جزییات داده‌های اقلیمی وجود ندارد، R را می‌توان با استفاده از شاخص اصلاح‌شده فورنیه تخمین زد:

$$F = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{p} \quad \text{رابطه شماره (۲)}$$

در اینجا p_i متوسط بارندگی ماهانه (میلی‌متر) و p متوسط بارندگی سالانه (میلی‌متر) است. با استفاده از فرمول زیر،

ضریب فرساینده گی باران، برای حوضه مورد مطالعه به دست آمد:

$$F = (0.07397 \times F^{1.847}) / 17.2 \quad F < 55 \quad \text{رابطه شماره (3)}$$

$$F \geq 55 \quad F = (95.77 - 6.081 \times F + 0.4770 \times F^2) / 17.2$$

عامل فرسایش پذیری خاک (K):

به‌منظور اندازه‌گیری عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) از نسبت مقدار هدر رفت خاک A (تن در هکتار در سال) از کرت استاندارد در واحد عامل فرساینده گی R (مگاژول میلی‌متر در هکتار ساعت در سال) مطابق رابطه زیر استفاده شد (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸).

$$k = \frac{A}{R} \quad L = S = C = P = 1 \quad \text{رابطه شماره (4)}$$

مورگان برای ضریب فرسایش‌پذیری (K) خاک‌های مختلف اعدادی را پیشنهاد کرده است که در جدول (۲) نشان داده شده است (احمدی، ۵۰۷، ۱۳۸۸).

جدول ۲: ضریب فرسایش پذیری برای انواع خاک

K	وضعیت خاک	K	وضعیت خاک
۰,۱	اراضی مقاوم به فرسایش	۰,۵	خاک‌های سطحی با پوشش سنگریزه‌ای
۰,۴۲	خاک‌های ماسه‌ای نرم	۰,۱۶	خاک‌های ماسه‌ای
۰,۴۲	خاک‌های لومی با ماسه بسیار ریز	۰,۱۲	خاک‌های لومی شنی
۰,۳۷	خاک‌های لومی	۰,۴۸	خاک‌های سیلت لومی
۰,۳۷	خاک‌های لومی رسی	۰,۲۵	خاک‌های سیلتی رسی

مأخذ: احمدی، ۱۳۸۸: ص ۵۰۷

عامل طول و درجه شیب (LS):

یکی از عامل‌های مؤثر در معادله جهانی تجدید نظر شده خاک طول و تندی شیب است. اثر طول و تندی شیب (LS) به‌عنوان عامل توپوگرافی، اثر میزان، سرعت و پتانسیل فرسایش‌دهی رواناب را نمایش می‌دهد. طول شیب عبارت است از فاصله افقی از مبدأ جریان بالادست دامنه تا جایی که تندی شیب به مقدار قابل ملاحظه‌ای تغییر یافته، به‌طوری که عمل رسوب‌گذاری آغاز می‌شود.

مقدار طول و درجه شیب بر مبنای روابط فیزیکی از معادله‌ای که توسط مور و ویلسون^۵ پیشنهاد شده است استفاده

گردید:

$$Ls = \left(\frac{As}{22.13} \right)^m \times \left(\frac{\sin\beta}{0.0896} \right)^n \quad \text{رابطه شماره (5)}$$

$$m = 0.4 - 0.6 \quad n = 1.2 - 1.3$$

AS معادل مساحت سلول‌هایی است که آب آن‌ها به داخل سلول مورد نظر جاری می‌گردد. برای حوضه مورد مطالعه با

توجه به اینکه DEM ۳۰ متر استفاده شده است به‌صورت زیر به دست آمد:

$$AS = \text{Flow accumulation} \times 30 \times 30 / 30 \quad \text{رابطه شماره (6)}$$

عامل ضریب پوشش گیاهی (C):

این فاکتور، بیانگر نسبت مقدار خاک از بین رفته از زمین زیر کشت، به خاک فرسوده شده از همان قطعه زمین در طی آیش مداوم و عاری از پوشش و بقایای گیاهی است (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸). پرکاربردترین معیار رویش گیاهی، شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده است که با استفاده از فناوری سنجش از دور به دست می‌آید. از آنجا که شاخص NDVI ضریبی از انعکاس در باند مادون قرمز نزدیک (باند ۴ لندست) و باند قرمز (باند ۳ لندست) بخشی از طیف الکترومغناطیس می‌باشد (تا کر^۶، ۱۹۷۹).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{VIS}}{\rho_{NIR} + \rho_{VIS}} \quad \text{رابطه شماره (7)}$$

1 MOOR & VILSON

6 Taker

که در آن ρ_{NIR} بازتاب در باند مادون قرمز نزدیک (باند ۴ سنجنده ETM+) و ρ_{VIS} بازتاب در باند مرئی (باند ۳ سنجنده ETM+) است. شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده توسط توکر در سال ۱۹۷۹ بر اساس رفتار گیاه در بازتاب طیف الکترومغناطیس محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک، به عنوان شاخص سلامت و تراکم پوشش گیاهی پیشنهاد شد.

سپس با ابزار محاسباتی ARC GIS و با استفاده از فرمول زیر فاکتور پوشش گیاهی استخراج می‌گردد (رضایی و همکاران، ۱۳۹۳، ۱۱۳).

$$C = ((1 - NDVI)/2) \quad \text{رابطه شماره (8)}$$

در نتیجه با استفاده از روابط بالا مقدار C در هر سلول می‌تواند مورد محاسبه قرار گیرد. از آنجایی که مقادیر فاکتور C، بین صفر و یک است مقدار صفر به پیکسل‌هایی با مقادیر منفی و عدد یک به پیکسل‌هایی با مقدار بیش‌تر از یک اختصاص خواهد یافت. بین مقادیر NDVI و فاکتور C به‌طور کامل رابطه معکوس وجود دارد (بابایی و همکاران، ۱۳۹۳).

عامل عملیات حفاظتی (P):

ویشمایر و اسمیت^۱ عامل کارهای حفاظتی را به عنوان مقدار خاک از بین رفته در واحد سطح زمین حفاظت شده، به زمینی که لخت باشد و در جهت تندترین شیب، شخم‌خورده باشد تعریف نمودند. به‌طور عمده منظور از کارهای حفاظتی، کشت روی خطوط تراز، کشت نواری، ترانس‌بندی است. هر چه مقدار این عامل کمتر باشد، کارهای حفاظتی مؤثر و هدر رفت خاک کمتر است. چنانچه هیچ کار حفاظتی صورت نگرفته باشد مقدار آن یک در نظر گرفته می‌شود (رضایی و همکاران، ۱۳۹۳).

جدول ۳: مقدار P برای عملیات حفاظتی

ارزش عددی P				شیب درصد
بدون اقدامات حفاظتی	ترانس‌بندی	کشت نواری	کشت روی خطوط تراز	
۱	-	-	۰,۸	۱-۰
۱	-	۰,۳	۰,۶	۱-۲
۱	۰,۱	۰,۲۵	۰,۵	۲-۷
۱	۰,۱۲	۰,۳	۰,۶	۷-۱۲
۱	۰,۱۶	۰,۴	۰,۸	۱۲-۱۸
۱۸-۲۴	۰,۹	۰,۴۵	۰,۱۶	۱

مأخذ: آرخی و نیازی، ۱۳۸۹، ص ۱۲

¹ Vishmayer & smith

رگرسیون خطی:

رگرسیون یکی از مدل‌های ریاضی و آماری است که توصیف همبستگی بین دو متغیر را بیان می‌نماید. یکی از کاربردهای رگرسیون برآورد است که با استفاده از ارزش یک متغیر معلوم، می‌توان ارزش یک متغیر دیگری را که با متغیر قبلی دارای همبستگی است تعیین نمود (مهدوی و طاهر خانی، ۱۳۹۱، ۱۷۸).

تحلیل رگرسیون این امکان را فراهم می‌آورد تا تغییرات متغیر وابسته را از طریق متغیرهای مستقل پیش‌بینی و سهم هریک از متغیرهای مستقل را در تبیین متغیر وابسته تعیین می‌کند (میر موسوی و همکاران، ۱۳۹۱، ۶۸).

معیارهای ارزیابی دقت مدل:

ارزیابی در این قسمت، با استفاده از معیارهای خطا گیری MAE^9 و MBE^10 و همچنین $RMSE^{11}$ صورت گرفته است که با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n |\hat{Z}(X_i) - Z(X_i)| \quad \text{رابطه ۹}$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n (\hat{Z}(X_i) - Z(X_i)) \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - p_i)^2} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

که در آن $\hat{Z}(X_i)$ مقدار برآورد شده در نقطه (X_i) ، $Z(X_i)$ مقدار مشاهده شده در نقطه X_i و n تعداد نقاط است. MAE معرف خطا است که هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، دقت روش مورد نظر مناسب‌تر است و مقدار MBE بیانگر میانگین انحراف است که می‌تواند مثبت یا منفی باشد. به بیان دیگر مشخص می‌کند که مدل، متغیر مورد نظر را کم یا زیاد برآورد می‌کند. از نظر تئوری هرگاه این دو مقدار برابر با صفر شوند، نمایانگر این مطلب است که دقت روش صد درصد بوده و مقدار برآورد شده یک کمیت، دقیقاً برابر با مقدار واقعی آن است (شهبازی و همکاران، ۱۳۸۸، ۲۰). همچنین روش ریشه میانگین مربعات خطا، در صورتی که نزدیک به صفر باشد نشان‌دهنده دقت مدل است که در آن P_i مقدار برآورد شده و O_i مقدار مشاهده شده می‌باشد (شهبازی و همکاران، ۱۳۹۳، ۴۲۵).

یافته‌های پژوهش:

در این پژوهش به منظور برآورد فرسایش خاک و بار رسوب در حوضه آبریز حبله رود از مدل اصلاح شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE) به دلیل کاربرد گسترده آن در مطالعات فرسایش و رسوب و با کمک سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) انجام شد. همه نقشه‌های R, C, LS, P, K در محیط GIS تهیه و سپس باهم تلفیق شدند.

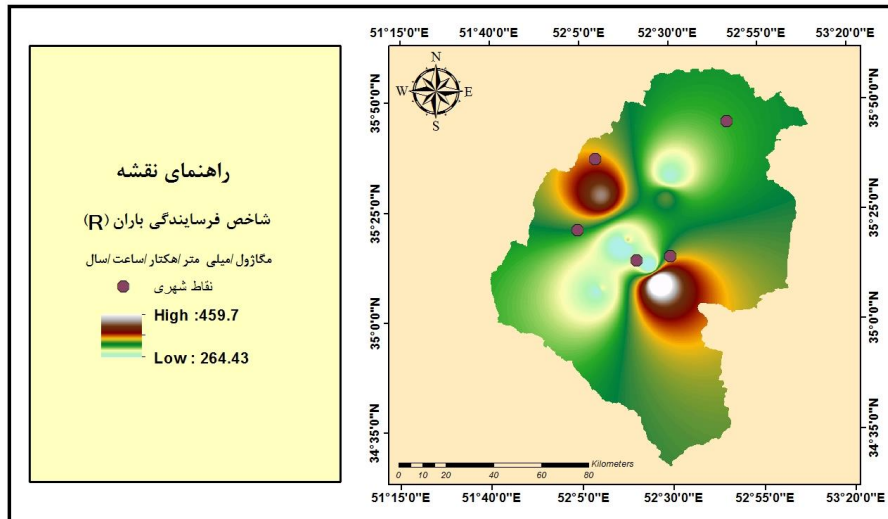
¹ Mean Absolute Error

² Mean Bias Error

³ Root Mean Square Standard Error

عامل فرساینده‌گی باران (R):

مقادیر فرساینده‌گی باران با استفاده از شاخص فورنیه و روابط شماره ۲ و ۳ برای ۱۰ ایستگاه اطراف حوضه و طی دوره آماری ۱۸ ساله محاسبه شد. جهت تهیه نقشه عامل فرساینده‌گی باران، از روش مربع معکوس وزنی فاصله (IDW) در بخش آنالیزهای سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده شده است که در شکل ۲ ارائه شده است.



مأخذ: نویسندگان

شکل ۲: نقشه شاخص فرساینده‌گی باران (R)

جدول ۴: مقادیر شاخص فورنیه به تفکیک هر ایستگاه

ردیف	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	شاخص اصلاح شده فورنیه (F)
۱	نجفدر	۵۲,۱۸	۳۵,۴۸	۳۲۸,۱۷
۲	فیروزکوه	۵۲,۴۸	۳۵,۴۷	۲۴۴,۹۹
۳	ایوانکی	۵۲,۴	۳۵,۲۱	۱۳۰,۵۴
۴	سیمین دشت	۵۲,۳	۳۵,۳۱	۲۱۳,۶۸
۵	ایچ	۵۲,۲۸	۳۵,۲۹	۱۰۳,۲۰
۶	گرمسار	۵۲,۱۸	۳۵,۱۳	۲۰۴,۳۴
۷	ده نمک	۵۲,۴۴	۳۵,۱۵	۴۰۷,۱۹
۸	فیروزکوه	۵۲,۵	۳۵,۵۵	۱۷۲,۶۹
۹	گرمسار	۵۲,۱۶	۳۵,۱۲	۱۶۶,۴۵

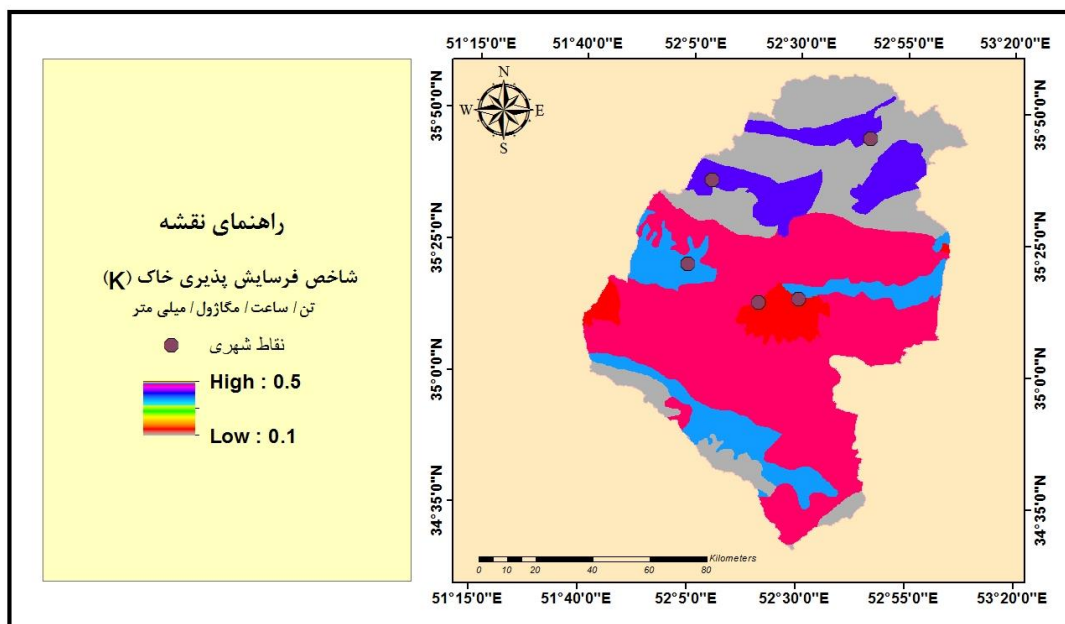
مأخذ: نویسندگان

همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود مقدار فرسایندهای باران از ۲۶۴,۴۳ کمترین آن تا به بیشترین میزان ۴۵۹,۷ مگاژول / میلی متر / هکتار / ساعت در سال متغیر است. متوسط بارندگی در این حوضه برای ۹ ایستگاه ۲۷۸,۵۱ است. بیشترین میزان بارندگی برای ایستگاه نجفدر و کمترین میزان برای ایستگاه گرمسار می باشد. طبق بررسی های صورت گرفته بارش منطقه مورد مطالعه، بیشتر به صورت رگبار است؛ بنابراین تأثیر زیادی را در فرسایش و جابجایی ذرات خاک دارد. همان طور که مشاهده می شود بیشترین میزان فرسایندهای در بخش مرکزی حوضه واقع شده است؛ و ایستگاه های نجفدر و سیمین دشت و فیروزکوه که در مرکز این حوضه واقع شده است و دارای بیشترین میزان و عدد متوسط بارندگی در منطقه می باشند.

عامل فرسایش پذیری خاک (K):

مقادیر فرسایش خاک با توجه به جدول شماره ۲ در محیط GIS مورد اندازه گیری قرار گرفت؛ و در نهایت نقشه رستری آن مطابق شکل ۳ استخراج گردید.

همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود مقادیر فرسایش پذیری خاک در حوضه حبله رود از ۰,۱ به ۰,۵ تن / ساعت / مگاژول در میلی متر متغیر است. بیشترین میزان فرسایش مربوط به بخش مرکزی حوضه می باشد. این بخش در اطراف رودخانه اصلی واقع شده و بیشترین میزان رسوب های آبرفتی در این منطقه واقع شده است و بنابراین حساسیت بیشتری نسبت به فرسایش دارد؛ اما بخش های جنوبی و غربی حوضه به دلیل وجود رخنمون های سنگی و زمین های سخت مقاومت بیشتری در برابر فرسایش از خود نشان می دهند و کمتر در معرض فرسایش قرار می گیرند.

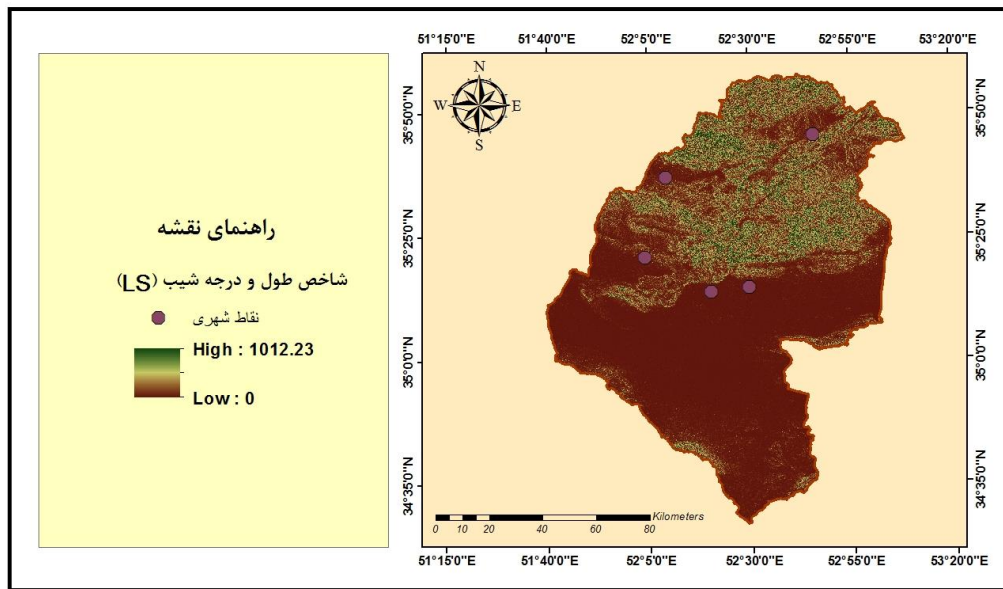


مأخذ: نویسندگان

شکل ۳: نقشه شاخص فرسایش پذیری خاک

عامل طول و درجه شیب (LS):

از نقشه توپوگرافی برای ایجاد نقشه طول و درجه شیب (LS) استفاده شده است. این عامل با استفاده از رابطه شماره ۵ و همچنین استفاده از نقشه طبقات ارتفاعی (DEM) حوزه مورد نظر، نقشه جهت جریان (FLOW DIRECTION) و پس از آن نقشه جریان تجمعی (FLOW ACCUMULATION) در محیط ARC GIS 10.2 تهیه شد. همان طور که از شکل ۴ پیداست مقدار LS بین ۰ تا ۱۰۱۲٫۲۳ متغیر است. بیشترین میزان شیب برای مناطق بالادست حوزه مناطق با شیب‌های تند و بالای ۲۰ درصد دامنه‌های کوهستانی را در بر می‌گیرد. این عامل نشان‌دهنده تأثیر توپوگرافی و پستی و بلندی در میزان فرسایش است اگر شیب افزایش یابد، انرژی جنبشی رواناب نیز افزایش می‌یابد و در انتقال ذرات خاک بیشتر تأثیر می‌گذارد.

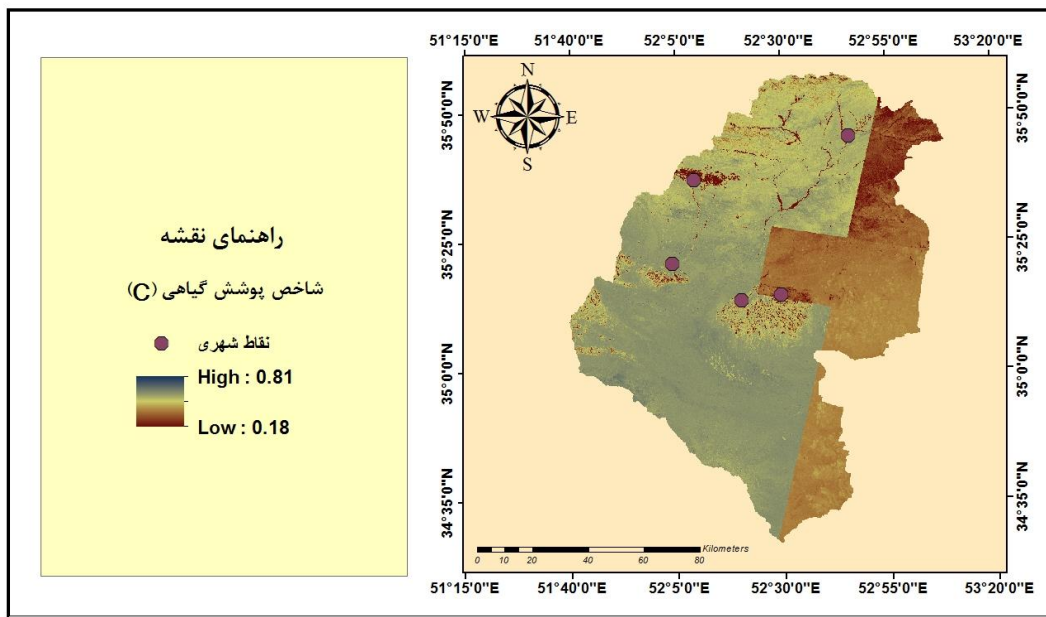


مأخذ: نویسندگان

شکل ۴: نقشه شاخص طول و درجه شیب

عامل پوشش گیاهی (C):

نقشه فاکتور C، بر اساس شاخص گیاهی تفاضل نرمال شده (NDVI) با استفاده از تصویر ماهواره‌ای ETM+ سال ۲۰۱۳ در محیط نرم‌افزاری ARC GIS برای حوزه مورد نظر به دست آمد. سپس با استفاده از دستور Raster Calculator در بخش آنالیزهای سیستم جغرافیایی، مقدار پوشش گیاهی از رابطه شماره (۸) استخراج گردید. همان طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود مقادیر این عامل، بین ۰/۱۸ تا ۰/۸۱ متغیر است. قسمت شرقی حوزه ضریب C دارای مقدار کمتری است. فاکتور پوشش گیاهی نشان می‌دهد که بیشترین مقدار این پارامتر در مناطق بدون پوشش گیاهی و کمترین مقدار آن در مناطقی است که دارای پوشش گیاهی یعنی در بخش‌های جنوبی و مرکزی می‌باشد. در واقع فاکتور پوشش گیاهی با NDVI رابطه معکوس دارد.



مآخذ: نویسندگان

شکل ۵: نقشه شاخص پوشش گیاهی

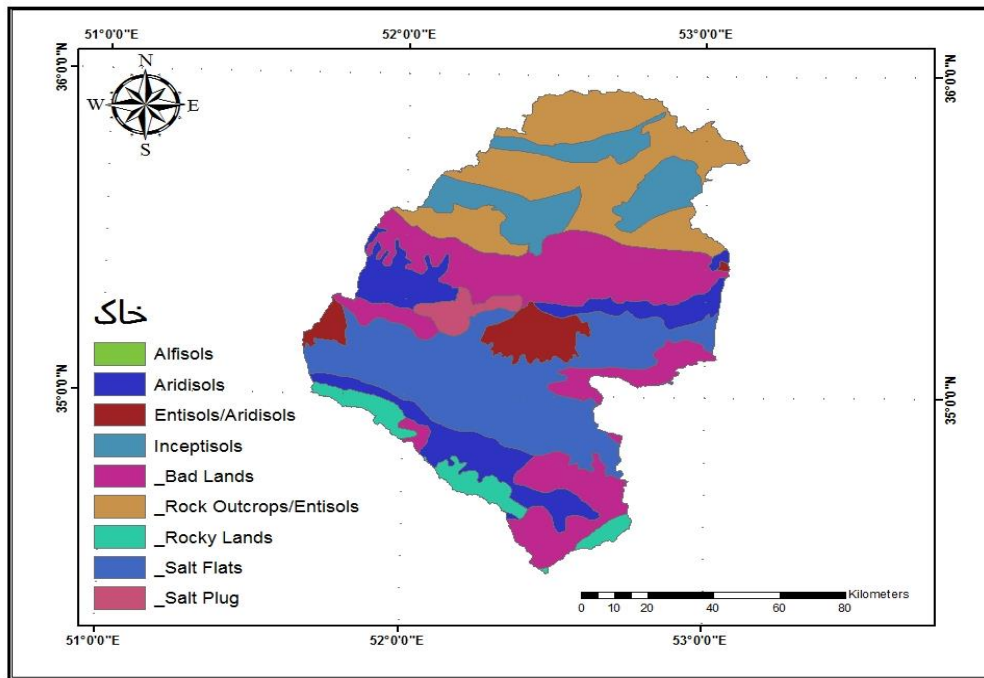
عملیات حفاظت خاک (P):

بر اساس گزارش‌های تفصیلی حوزه حبله رود عملیات حفاظتی (تراس‌بندی، کشت بر روی خطوط تراز و کشت نواری) برای کل حوزه صورت نگرفته و این عملیات تنها در دو زیر حوزه کوچک در قسمت بالادست حوضه مورد مطالعه اجرا شده است که نمی‌توان آن را به کل حوضه تعمیم داد؛ بنابراین مقدار عامل P برای حوزه عدد یک در نظر گرفته شده است.

ویژگی‌های خاک منطقه:

تعیین مشخصات خاک‌ها و بررسی محدودیت‌های موجود در آنها از اصلی‌ترین عوامل مؤثر در تعیین تناسب اراضی است. از این مشخصات در تناسب اراضی برای انواع کاربری‌های مختلف استفاده می‌شود. فاکتورهای مؤثر و مورد مطالعه در بحث خاک، شامل؛ عمق خاک، بافت، ساختمان، وضعیت نفوذپذیری خاک، بررسی وجود سنگریزه سطحی و عمقی خاک، لایه محدود کننده، شوری و قلیائی و... می‌باشد. برای تعیین مشخصات و طبقه‌بندی خاک‌ها، بعد از حفر پروفیل در محدوده هر یک از اجزاء واحد اراضی اقدام به بررسی مشخصات ظاهری و مورفولوژیکی خاک‌ها شد. در مطالعه هر یک از پروفیل‌ها اقدام به تعیین مشخصات عمق، رنگ، بافت، ساختمان، وضع نفوذ ریشه، وضع مقاومت و چسبندگی خاک‌ها، درصد آهک، گچ و سنگریزه شد. با توجه به فاکتورهای بررسی شده در فاز یک از مرحله مطالعاتی در پروفیل‌های موجود در اجزاء واحد اراضی و بررسی اولویت‌های مربوط به این فاکتورها، اقدام به طبقه‌بندی خاک‌های

موجود در منطقه شد (دفتر طرح و برنامه‌ریزی، سازمان جنگل‌ها، ۱۳۹۰) به‌طور عمده، از بین رده‌های موجود در طبقه‌بندی آمریکایی، تعداد ۳ رده در خاک‌های منطقه مشاهده شد که شامل خاک‌های رده Entisols، Inceptions، Aridisols می‌باشند. لازم به ذکر است که با توجه به مشخصات آب و هوایی حاکم بر منطقه، خاک‌های مناطق شمالی که دارای اقلیم نیمه مرطوب و نیمه‌خشک سرد هستند، دارای رژیم رطوبتی Xeric و مناطق جنوبی‌تر که دارای آب‌وهوای خشک می‌باشند، دارای رژیم رطوبتی Aridic یا Torric هستند.

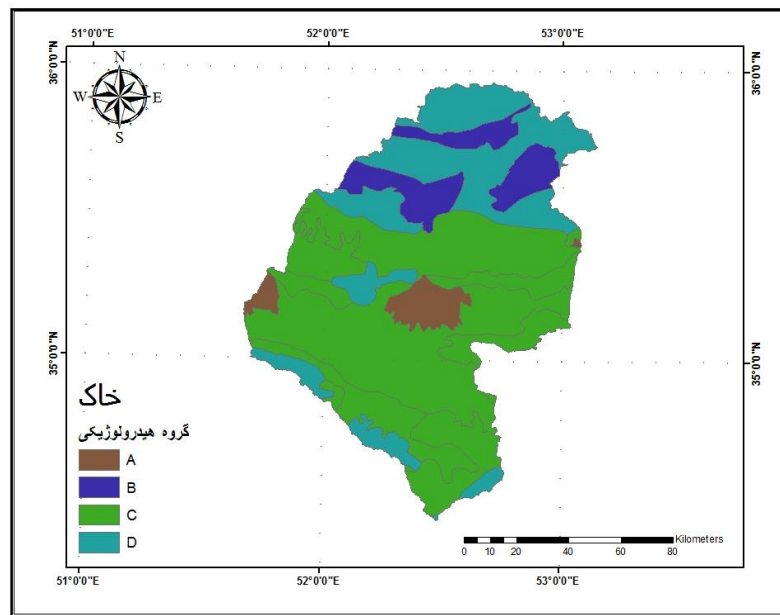


مأخذ: نویسندگان

شکل ۶: نقشه طبقه‌بندی خاک منطقه مورد مطالعه

گروه هیدرولوژیکی خاک:

لایه گروه‌های هیدرولوژیکی خاک که در شکل ۷ نشان داده شده است، شامل A، B، C، D است که به ترتیب از A به D میزان نفوذپذیری کمتر و رواناب بیشتر می‌شود. پس می‌توان استدلال نمود که به‌طور معمول خاک‌های گروه A مرطوب‌تر از بعدی هستند و به همین ترتیب تا D میزان رطوبت خاک کمتر می‌شود. در واقع درصد رطوبت پذیری خاک می‌تواند دارای همبستگی معنی‌دار مثبتی با میزان فرسایش پذیری خاک باشد.

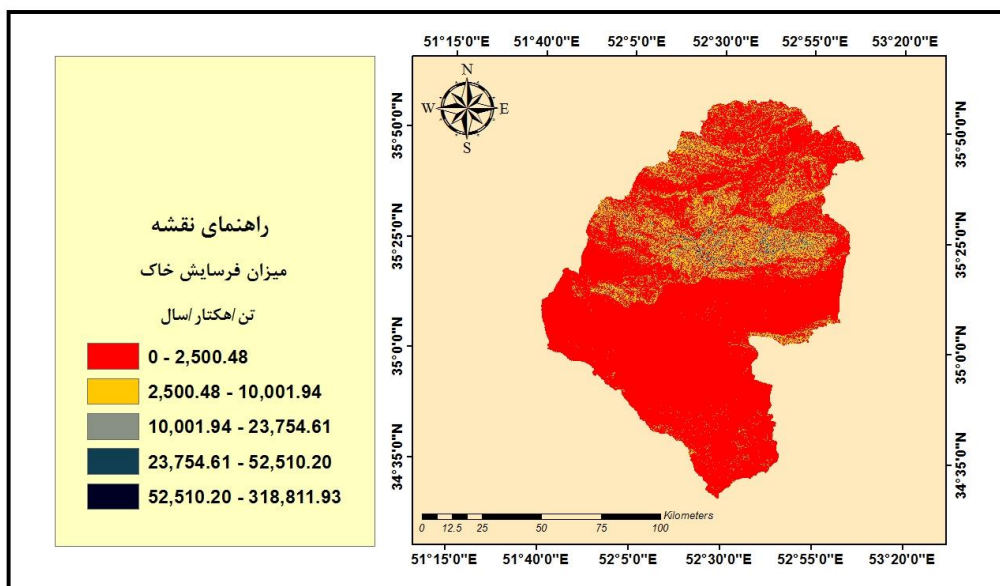


مأخذ: نویسندگان

شکل ۷: نقشه گروه‌های هیدرولوژیکی خاک

فرسایش سالانه خاک:

فرسایش متوسط سالیانه خاک از طریق حاصل ضرب فاکتورهای فرسایشی باران (R)، فرسایش‌پذیری خاک (K)، طول و درجه شیب (LS)، پوشش گیاهی (C)، عملیات حفاظتی (P) با استفاده از آنالیزهای سیستم اطلاعات جغرافیایی (ARC GIS) محاسبه شد که در شکل ۸ نشان داده شده است.



مأخذ: نویسندگان

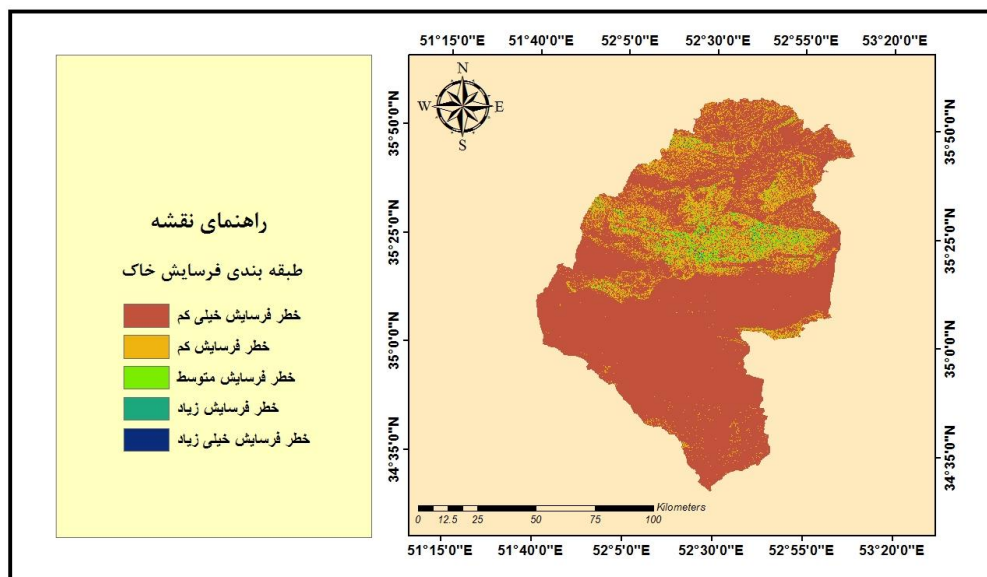
شکل ۸: نقشه مقدار فرسایش متوسط سالیانه خاک

شکل ۹ طبقه‌بندی فرسایش خاک در حوزه آبریز حبله رود را نشان می‌دهد؛ که در ۵ کلاس با خطر فرسایش خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، طبقه فرسایشی با خطر فرسایش خیلی کم بیشترین سطح حوضه را در برمی‌گیرد؛ و طبقه فرسایش خیلی زیاد در قسمت‌های بالادست حوضه کمترین سطح حوضه را به خود اختصاص داده است.

جدول ۵: مساحت و درصد کلاس‌های فرسایش خاک

کلاس	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد
خیلی کم	۱۰۳,۱۶۷,۲۰۷	۸۱,۵
کم	۱۸۴,۷۲	۱۴,۵
متوسط	۴,۲	۳,۳۱
زیاد	۶۴۸,۵۸۵	۰,۵۱
خیلی زیاد	۸۲,۲۳۳	۰,۰۶

مآخذ: نویسندگان



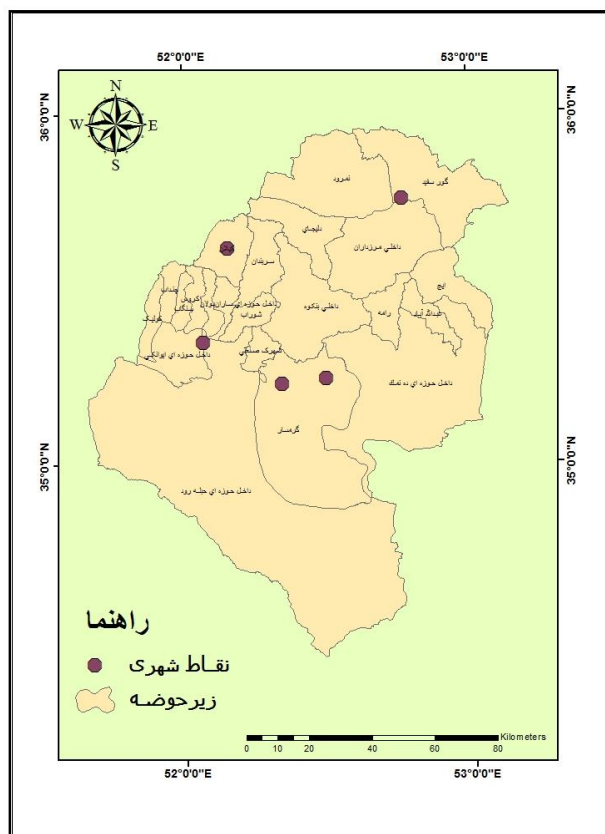
مآخذ: نویسندگان

شکل ۹: نقشه کلاس‌بندی فرسایش سالانه خاک

جدول ۶: میزان فرسایش مشاهده‌ای و فرسایش برآوردی در زیر حوضه‌های منطقه مطالعاتی

میزان فرسایش مشاهده‌ای (TON/HA/YEAR)	میزان فرسایش برآوردی (TON/HA/YEAR)	مساحت (KM ²)	زیر حوضه	
۴,۱	۵,۲۳	۱۳۵۴,۰۳	گرمسار	A
۴,۴	۹,۱۸	۴۱۱۱,۰۲۶	حبله رود	B
۱۲,۴	۱۵,۷	۱۰۴,۷۵	شهرک صنعتی	C
۱۰,۶	۸,۵	۲۸۲,۶۹	ایوانکی	D
۷,۲	۵,۰۶	۱۶۸۹,۷۴	ده نمک	E
۶,۳	۲,۴۳	۱۳۵,۳۹	شوراب	F
۱۰	۷,۴۲	۱۴۱,۹۷	عبدالله‌آباد	G
۵,۷	۳,۷	۹۷,۲۵	ساران	H
۷,۲	۶,۴	۱۰۶,۹۰	کولیک	I
۴,۹	۷,۳	۱۷۹,۴۱	رامه	J
۱۴,۲	۱۲,۹	۷۳,۹۶	سنگاب	K
۶,۸	۴,۵	۸۷,۱۱	بولان	L
۹,۷	۸,۳	۱۰۱,۳۳	کروس	M
۶,۵	۵,۱	۹۶,۶۴	چنداب	N
۱۱,۴	۹,۶	۳۱۴,۶	ایج	O
۱۲,۴	۱۳,۳	۶۷۸,۷۳	داخلی بنکوه	P
۱۰,۹	۷,۴	۲۶۱,۰۲	سربندان	Q
۸,۵	۷,۲	۲۵۴,۲۲	گیلان	R
۹,۲	۵,۷	۷۴۵,۳۹	مرزداران	S
۱۱,۱	۱۰,۶	۳۳۹,۶	دلیجای	T
۱۲,۱	۱۳,۳	۷۶۱,۹۱	نمرود	U
۱۱,۳	۱۲,۴	۷۴۳,۹۹	گور سفید	V

مأخذ: نویسندگان



مأخذ: نویسندگان

شکل ۱۰: نقشه موقعیت زیر حوضه منطقه مطالعاتی

جدول ۷: ارزیابی دقت روش RUSLE

RMSE	MAE	MBE	
۴,۸۹	۳,۵۲	-۰,۱۲	روش RUSLE

مأخذ: نویسندگان

نتیجه گیری

خاک به عنوان یک سامانه حیات بخش و تاثیرگذار بر روی بقاء و تداوم فعالیت تمامی موجودهای زنده و به ویژه انسان حائز اهمیت فراوان است. این اهمیت به اندازه ای است که هرگاه بین خاک و میزان بهره برداری عدم تعادلی ایجاد شود و استفاده از اراضی بدون در نظر گرفتن استعداد بالقوه آن انجام گیرد موجبات فرسایش تشدید شونده و نابودی تدریجی بستر حیاتی انسان و به مخاطره افتادن حیات نسل های آینده می شود. در پژوهش حاضر، با توجه به کارایی روش تجربی RUSLE و سیستم اطلاعات جغرافیایی جهت نمایش اطلاعات مکانی، میزان هدر رفت خاک برای حوضه آبریز حبله

رود برآورد شد. نتایج حاصل از مطالعات انجام شده حاکی از آن است بیشترین مساحت حوزه در خطر فرسایش کم قرار دارد؛ اما حدود ۶ درصد از مساحت منطقه یعنی در بخش حبله رود شمالی در خطر فرسایش زیاد و خیلی زیاد واقع شده است؛ که این مسئله را باید مدیریت کرد. عامل فرساینده باران در بخش‌های مرکزی حوزه به دلیل نزدیک بودن به آبراهه‌ها و رودخانه اصلی و تشکیل رسوب‌های آبرفتی بیشتر در معرض فرسایش قرار می‌گیرد؛ که این میزان برابر ۴۵۹ مگاژول/میلی‌متر/هکتار/ساعت در سال است. طبق بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی نهشته‌های آبرفتی در این محدوده به شدت وجود دارد. این تشکیلات رسوب‌های آبرفتی بستر و تراس‌های حاشیه رودخانه مخروط افکنه‌ها، نهشته‌های آبرفتی جوان و قدیم و انواع رسوب‌های پهنه دشت شامل رس، سیلت، پهنه‌های گلی و نمکی و حتی رسوب‌های که تا حدی توسط عامل باد نیز جابجا شده‌اند در این دسته جای‌داده شده‌اند. در این نهشته‌ها با کاهش اندازه دانه‌ها میزان نفوذپذیری مؤثر کاهش و بر میزان حساسیت به فرسایش افزوده می‌شود. در قسمت بالادست حوزه آبریز حبله رود با توجه به افزایش ارتفاع و تراکم توپوگرافی که دارا است عامل طول و درجه شیب در بین عوامل مدل RUSLE بیش‌ترین تأثیر را در میزان فرسایش خاک دارد. بخشی از سطوح منطقه که دارای شیب تند و بیش از ۶۰ درصد می‌باشند و غالباً دارای خاک کم‌عمق و پوشش گیاهی ضعیف هستند و همچنین بخش‌هایی که دارای سازندهای بسیار حساس به فرسایش می‌باشند و درصد تاج پوشش ضعیف دارند در مجموع به‌عنوان مناطق بحرانی محسوب می‌شوند. فرسایش آبراهه‌ای در حوزه حبله رود به‌شدت و گستردگی فرسایش سطحی و شیاری نیست وجود مناطق پرشیب با خاک کم‌عمق در نیمه فوقانی حوزه باعث کاهش شدت فرسایش آبراهه‌ای در آن شده است. در این مناطق وجود بیرون زدگی‌های سنگی در بستر آبراهه‌ها باعث تثبیت نسبی آن‌ها شده است و غالباً آبراهه‌های اصلی که در مناطق کم شیب و خاک‌های نسبتاً عمیق جریان دارند در بخش‌هایی از طول مسیر خود از نظر فرسایشی فعالند.

منابع

- ۱- آرخی، صالح. نیازی، یعقوب. (۱۳۸۹): بررسی کاربرد GIS و RS برای تخمین فرسایش خاک و بار رسوب با استفاده از مدل RUSLE (مطالعه موردی: حوضه بالادست سد ایلام)، مجله پژوهش‌های حفاظت آب‌و خاک، جلد هفدهم، شماره دوم.
- ۲- احمدی، حسن. (۱۳۹۱): ژئومورفولوژی کاربردی، جلد اول (فرسایش آبی)، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ هشتم.
- ۳- بابایی، مهناز. حسینی، سید زین‌العابدین. نظری سامانی، علی‌اکبر. المدرسی، سید علی. (۱۳۹۳): تعیین نقش کاربری ارضی بر فرسایش آبی با استفاده از مدل RUSLE3D (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کن- سولقان)، نخستین همایش ملی کاربرد مدل‌های پیشرفته تحلیل فضایی (سنجش‌ازدور و GIS در آمایش سرزمین)، اسفندماه ۱۳۹۳، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد.
- ۴- جعفری، محمد. فریدون، سرمدیان. (۱۳۸۲): مبانی خاک‌شناسی و رده‌بندی خاک، انتشارات دانشگاه تهران، ص ۷۸۸.

- ۵- رضایی، پیمان. فریدی، پروانه. قربانی، منصور. کاظمی، محمد. (۱۳۹۳): برآورد فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE و شناسایی مؤثرترین عامل آن در حوضه آبخیز گابریک- جنوب خاوری استان هرمزگان، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال سوم، شماره یک، تابستان ۱۳۹۳، صص ۹۷-۱۱۳.
- ۶- رخبین، معصومه. نوحه‌گر، احمد. کمالی، علیرضا. حبیب‌الهیان، محمود. (۱۳۹۳): برآورد میزان فرسایش و تولید رسوب در حوضه آبخیز لاورفین (استان هرمزگان) با استفاده از سنجش‌ازدور (RS) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و مدل تجربی (RUSLE)، فصلنامه پژوهشات جغرافیایی، سال بیست و نهم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۳، شماره پیاپی ۱۱۴، صص ۸۹-۱۰۴.
- ۷- زندی، جلال. حبیب‌نژاد روشن، محمود. سلیمانی، کریم. (۱۳۹۲): ارزیابی نقشه خطر فرسایش خاک و ارتباط آن با برخی عوامل محیطی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز و از رود مازندران)، نشریه مرائع و آبخیزداری، دوره شصت‌وشش، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۲، صص ۴۰۱-۴۱۵.
- ۸- شهبازی، علی. خلیقی سیگارودی، شهرام. ملکیان، آرش. سلاجقه، علی. (۱۳۹۳): انتخاب بهترین فرمول تجربی برای برآورد زمان تمرکز در حوضه‌های آبخیز شهری (مطالعه موردی، شهر ماهدشت)، مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران، دوره ۶۷، شماره ۳.
- ۹- علیپور، حسین. فیض‌نیا، سادات. احمدی، حسن. زارع، محمدرضا. حسینعلی زاده، محسن. (۱۳۹۳): مقایسه فرسایش خاک به روش سزیم ۱۳۷ و مدل RUSLE-3D در نهشته‌های لسی شمال غرب ایران، مطالعه موردی (حوزه آبخیز آق امام). نشریه حفاظت آب‌و خاک. شماره پنجم، ص ۲۱.
- ۱۰- عرفانیان، مهدی. قهرمانی ساعتلو، پریسا. سعادت، حسین. (۱۳۹۳): ارزیابی خطر فرسایش خاک با استفاده از یک مدل فازی در آبخیز قرناوه گلستان، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب‌و خاک، جلد بیست و یکم، شماره ششم.
- ۱۱- مهدوی، مسعود. طاهر خانی، مهدی (۱۳۹۱): کاربرد آمار در جغرافیا، چاپ چهارم، نشر قومس، تهران.
- ۱۲- مظفری، غلامعلی. میر موسوی، سید حسین. خسروی، یونس (تابستان ۱۳۹۱): ارزیابی روش‌های زمین‌آمار و رگرسیون خطی در تعیین توزیع مکانی استان بوشهر، جغرافیا و توسعه، شماره ۲۷، صص ۶۳-۷۶.
- 13- Alexakis, D.D. Hadjimit sis, 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, pp-1-17.
- 14- Ashiagbor. G, forkuo. E.K. Laari. P. Aabeyir. R, Modeling soil Erosion using RUSLE and GIS Tools, International Journal of Remote Sensing & Geo Science (IJRSG), Vol. 2, Issue 4, Pp: 6-17.
- 15- Demirci, A. Kraburan, A. (2012): Estimation of Soil Erosion Using RUSLE in A GIS Framework: A Case Study in The Bayukcekmece Lake Watershed, Northwest Turkey, Environ Earth Sci, Vol. 66, Pp. 903- 913
- 16- Gregersen, Hans. M, Fayvt, Peter and Kenneth Brooks, Translation: A. Nohegar, Ilyas Hussein Parvaresh and Rearing. (1388): Comprehensive watershed management. Hormozgan University Press. Page 378
- 17- Huey Teh. S. Soil Erosion Modeling Using RUSLE and GIS on Cameron Highlands, Malaysia for Hydro Power Development, (2011): Supervisors: Dr. Lariyah Mohd Sidek & Dr. Pierr y. Julien. The Scull for Renewable Energy Science.
- 18- Jones, D. S, Kowalski, D. G. & Report, B. S. (2008): CALCULATING Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) Estimates on Department of Defense Lands Center for Ecological Management of Military Lands Department of Forest Science, Colorado State University fort Collins, Co 80523.p-54
- 19- Kim. Y. Soil Erosion Assessment Using GIS and Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), CE 394K GIS in Natter Resources, (2014).
- 20- Karamesouti. M. P, Petropoulos. G. D, Papanikolaou. L. Kairis. O. Kosmas. K. Erosion Rate Predications from PESERA and RUSLE at A Mediterranean Site Before and After A Wildfire I Comparison and Implications, Geodema 261, 2015, Pp: 44-58.

- 21- Morgan & Nearing et al, The Feature Role of Information Technology In Rrosion Modeling – Hand Book of Erosion Modeling (2001), P-23.
- 22- Morgan, R. P. C. Quinton, J. N, Smith, R. E. Govers, G. Poesen, J. W. A. Auerswald, K. Chisci, G. Torri, d. Styczen, M. E, (1988): The European Soil, Erosion Model a Dynamic Approach for Predicting Sediment Transport From Fields and Small Catchment. Earth Surface Processes and Landforms 23, 527-544
- 23- Shrestha D. (2001): Soil Erosion Modeling Using Remote Sensing and GIS: A Case Study of Jhikhu khola Watershed, Nepal.
- 24- Sustainable Management of Soil and Water Resources Plan (Hablehrood) Office of Planning and Coordination Department of Forest and Rangeland Watershed Management (1390).
- 25- Tucker. C, j, (1979): Red and Photographic Infrared Linear Combination for Monitoring Vegetation Remote Sensing of Environment, Vol. 8, Pp: 127-150.
- 26- Wisheier, W. H. and Smith, D.D. (1987): PREDICTING RAINFALL Erosion. Losses: A Guide to Conservation Planning. Agriculture, Washington, DC. Vol: 537. P 58.