

برآورد فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE و شناسایی مؤثرترین عامل آن در حوضه آبخیز

گابریک - جنوب خاوری استان هرمزگان

پیمان رضائی* - استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه هرمزگان
پروانه فریدی - کارشناس ارشد رسوب‌شناسی و سنگ‌شناسی رسوبی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه هرمزگان
منصور قربانی - استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه هرمزگان
محمد کاظمی - دانشجوی دکتری مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه هرمزگان

پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۶/۲۰ تأیید نهایی: ۱۳۹۳/۰۳/۱۱

چکیده

خاک یکی از مهم‌ترین عوامل تولید است که در زندگی اقتصادی و اجتماعی انسان تأثیر بسیار دارد. سطح زمین عموماً به وسیله خاک و دیگر نهشته‌های سطحی پوشیده شده است. فرسایش خاک یکی از مهمترین مسائل و مشکلاتی است که امروزه با آن مواجه هستیم. بهره‌برداری‌های روز افزون و عدم مدیریت صحیح انسان بر محیط طبیعی تأثیر زیادی بر تشدید روند تخریب و فرسایش خاک دارد. در این تحقیق با تحلیل پارامترهای مؤثر، وضعیت فرسایش و تولید رسوب در حوضه‌ی آبخیز گابریک با مساحت ۴۲۹۰/۳۵ کیلومتر مربع واقع در جنوب خاوری استان هرمزگان با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور (RS) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق ضمن بررسی‌های میدانی، اسناد و مدارک مختلف از جمله نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی، آمارهای مختلف مربوط به ایستگاه‌های باران‌سنجی و همچنین تصاویر ماهواره‌ای به عنوان ابزار تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. برآورد میزان فرسایش در محدوده مطالعاتی از مدل تجدید نظر شده‌ی جهانی فرسایش خاک (RUSLE) در محیط نرم‌افزار ESRI@ArcMap™10.0 انجام گردید. با بررسی عوامل مؤثر در این مدل، که شامل فاکتور فرسایش باران، فاکتور فرسایش‌پذیری خاک، فاکتور توپوگرافی و پوشش گیاهی می‌باشد، میزان فرسایش حوضه برآورد شده است. بر این اساس میزان فرسایش سالانه خاک در کل محدوده مطالعاتی از ۰/۰۳۳ تا ۳۲۶۹۹ تن در هکتار در سال برآورد شده است. نتایج این تحقیق همچنین نشان داد، فاکتور توپوگرافی با بالاترین مقدار ضریب تبیین (۰/۸۷) بیشترین تأثیر را در برآورد فرسایش سالانه خاک توسط مدل RUSLE داشته است. این تحقیق، مؤثر بودن فناوری‌های نوین سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور را برای تخمین کمی مقادیر فرسایش خاک تأیید می‌کند.

واژگان کلیدی: برآورد، حوضه‌ی آبخیز گابریک، فرسایش خاک، RUSLE.

مقدمه

فرسایش خاک یکی از مشکلات محیطی است که تهدیدی برای منابع طبیعی، کشاورزی و محیط زیست به شمار می‌رود (رحمان و همکاران، ۲۰۰۹: ۱۷۲۴). اطلاعات زمانی و مکانی از فرسایش خاک در اقدامات مدیریتی، کنترل فرسایش و مدیریت حوضه‌های آبخیز نقش مؤثری دارد (پراساناکومار^۱ و همکاران، ۲۰۱۱: ۲۱۰). معادله جهانی تلفات خاک، برای پیش‌بینی متوسط سالانه تلفات خاک حاصل از فرسایش ورقه‌ای و شیاری در یک قطعه زمین یا دامنه طراحی شد. این مدل توسط ویشمایر و اسمیت، با جمع‌آوری اطلاعات فرسایش خاک از ۳۶ ایستگاه تحقیقاتی در ۲۶ ایالت آمریکا دست آمد. مدل USLE، فرسایش خاک را به صورت ترکیبی از شش فاکتور که نشان‌دهنده نیروی فرساینده باران، فرسایش‌پذیری خاک، طول و درجه شیب، سیستم کشت و عملیات مدیریتی است، تخمین زده و جهت پیش‌بینی تلفات خاک در اراضی کشاورزی به کار می‌رود (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸: ۱۲). تحقیقات و مطالعات انجام شده در سال‌های بعد منجر به توسعه معادله جهانی تلفات خاک اصلاح شده^۲ گردید (رنارد و همکاران، ۱۹۹۷: ۱۵). مدل RUSLE شش فاکتور مشابه USLE داشته، اما برآوردهای دقیق‌تری از فاکتورهای فرساینده باران، فرسایش‌پذیری خاک، پوشش گیاهی و عملیات حفاظتی دارد (لافلن و همکاران، ۱۹۹۱: ۳۴) و جهت پیش‌بینی تلفات خاک در مناطق گسترده‌تر (چاکرون و همکاران، ۱۹۹۳: ۲۶۲) و در شرایط مختلف پوشش مانند اراضی زراعی، جنگل، مرتع و جنگل‌های آسیب‌دیده توسعه یافته است.

سیستم اطلاعات جغرافیایی، تجزیه و تحلیل داده‌های مکانی را با سرعت بیشتر و به سادگی امکان‌پذیر ساخته و ترکیب اطلاعات گسترده در زمینه‌های مختلف و از منابع مختلف را ممکن و مدیریت اطلاعات را ساده می‌سازد (شی، ۲۰۰۴: ۳۵). سنجش از دور به عنوان منبع تامین بسیاری از داده‌های مورد نیاز و GIS به عنوان سامانه‌ای که مدیریت و تحلیل را بر عهده دارد، ارتباط تنگاتنگی دارند. ماهیت رقومی داده‌های سنجش از دور و اطلاعات حاصله از آنها که قابلیت ورود مستقیم به سامانه اطلاعات جغرافیایی را میسر ساخته است، این ارتباط را تسهیل نموده است (مخدوم و همکاران، ۱۳۸۰: ۹۷). مدل RUSLE دارای مزیت‌هایی است که نیازمند داده‌های پیچیده نبوده و این داده‌ها به آسانی در دسترس می‌باشند، به راحتی قابل تلفیق با GIS بوده و درک نتایج حاصله از آن نیز به آسانی صورت می‌گیرد (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸: ۲۳). در خصوص مدل RUSLE مطالعات گسترده‌ای در جهان و ایران صورت گرفته است که به مواردی از آنها اشاره می‌شود:

احمد (۲۰۰۰: ۹۷) با به کارگیری مدل RUSLE و رویکرد عضویت فازی، به مطالعه فرسایش خاک پرداخت. بارتش و همکاران (۲۰۰۲: ۲۹) از تکنیک‌های GIS برای درون‌یابی پارامترهای RUSLE و تهیه نقشه خطر فرسایش در کمپ ویلیامز ایالت یوتا استفاده کردند. وانگ و همکاران (۲۰۰۳: ۸۸۹)، از داده‌های زمینی، تصاویر لندست (TM) و مدل رقومی ارتفاع^۳ جهت پیش‌بینی فرسایش خاک از طریق روش‌های زمین آماری اقدام کردند. این محققان نشان دادند، روش‌هایی از این نوع به طور قابل ملاحظه‌ای نتایج بهتری نسبت به روش‌های سنتی دارند. آنگیما (۲۰۰۳: ۲۹۵) با روش RUSLE فرسایش خاک در مناطق مرتفع مرکزی کنیا را برآورد کرد. شی (۲۰۰۴: ۳۳) در حوضه‌های آبخیز کوچک روش RUSLE را به کار گرفت و فرسایش خاک در سه ناحیه از چین را مورد بررسی قرار داد. لو و همکاران (۲۰۰۴: ۴۹۹) نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش در روندونییای برازیلای آمازون را با استفاده از RUSLE و RS و GIS به دست آوردند. مارکر (۲۰۰۶: ۱۲۰) حساسیت زمین به فرسایش در ایتالیا را با روش RUSLE برآورد کرد. فو (۲۰۰۶: ۳۸)

¹ - Prasannakumar

² - Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)

³ - Digital Elevation Model (DEM)

در آمریکا میزان فرسایش و رسوب‌زدایی را با روش RUSLE مدل‌سازی کرد. دمیرسی و کارابرون^۱ (۲۰۱۲: ۹۰۳) هدر رفت خاک در آبخیز دریاچه بویوچک‌مس^۲ در شمال غرب ترکیه را با استفاده از مدل RUSLE برآورد نمودند. آلكساكيس^۳ و همکاران (۲۰۱۳: ۱) سرعت فرسایش خاک در حوضه آبخیز یالیاس^۴ در جزیره قبرس را با استفاده از RS، GIS و مدل RUSLE به دست آوردند.

پورعبدالله (۱۳۸۴: ۱۱) از دو مدل RUSLE و SWAT2000 جهت مدل‌سازی رسوب و مقایسه نتایج آنها با مقادیر واقعی در حوضه آبخیز امامه استفاده کرد و به این نتیجه رسید که مدل RUSLE و SWAT2000 به ترتیب مقدار رسوب سالانه را حدود ۵ برابر و ۱۲۱ درصد مقدار واقعی نشان می‌دهند. راشکی (۱۳۸۵: ۱۱) برآورد توزیعی فرسایش و رسوب سالانه را با مدل‌های RUSLE و SEDD با استفاده از تکنیک‌های زمین آمار و سیستم اطلاعات جغرافیایی در حوضه آبخیز کهنوک خاش انجام داد و به این نتیجه رسید که میزان رسوب برآوردی در مقایسه با مقدار واقعی رسوب هم‌خوانی دارد و می‌توان این مدل‌ها را برای حوضه‌های مشابه بکار برد. آرخی و نیازی (۱۳۸۹: ۱) در حوضه بالادست سد ایلام از تکنیک‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل RUSLE برای تخمین فرسایش خاک و بار رسوب استفاده کردند و در نهایت مؤثر بودن RS و GIS را جهت تخمین کمی مقادیر فرسایش خاک، بار رسوب و همچنین مدیریت فرسایش اثبات نمودند. اسدی و همکاران (۱۳۸۹: ۱) از RS، GIS و مدل RUSLE برای ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرسایش در حوضه آبخیز ناورود استفاده کردند و نتایج آنها نشان داد که میزان فرسایش در حوضه از صفر تا ۸۰۰ تن در هکتار در سال متغیر است. کرم و همکاران (۱۳۸۹: ۷۳) با استفاده از RUSLE و فرایند تحلیل سلسله مراتبی به برآورد و پهنه‌بندی فرسایش خاک در حوضه آبخیز ماملو در شرق تهران پرداختند و به این نتیجه رسیدند که این دو روش ابزارهای قدرتمندی برای برآورد، نمایش و پهنه‌بندی میزان فرسایش خاک هستند. با توجه به یافته‌های پیشین هدف از این تحقیق برآورد فرسایش در حوضه آبخیز گابریک با استفاده از مدل RUSLE و شناسایی مهم‌ترین عامل این مدل در هدر رفت خاک منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

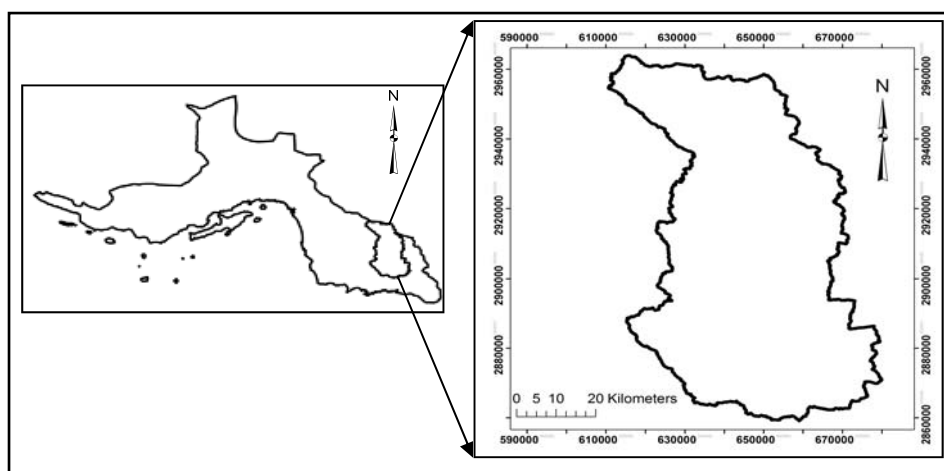
موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز گابریک

حوضه آبخیز گابریک حوضه سد گابریک با مساحت ۴۲۹۰/۳۵ کیلومتر مربع می‌باشد. حوضه مورد مطالعه بر اساس سیستم تصویر UTM در زون N-۴۰ در عرض جغرافیایی ۲۸°۵۰'۲۵ و ۳۸°۴۷'۲۶ شمالی و طول جغرافیایی ۵۳°۶'۵۸ و ۳۸°۴۷'۵۸ شرقی واقع شده است (شکل ۱). این حوضه در جنوب خاوری استان هرمزگان (بندر جاسک) با دامنه ارتفاعی بین ۳۷ متر از سطح دریا در خروجی رودخانه گابریک در محل پرکوه تا ۲۱۹۰ متر از سطح دریا در کوه‌های شمال حوضه در محل روستای درسهران قرار دارد و بخش‌های بشاگرد و مرکزی را در بر می‌گیرد. رودخانه گابریک به عنوان یکی از رودخانه‌های مستقل حوضه آبریز بندر عباس - سدیچ، به دریای عمان وارد می‌شود.

1 - Demirci & Karaburun

2 - Buyukcekmece

3 - Alexakis



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز گابریک در استان هرمزگان

روش تحقیق

مدل RUSLE، یک مدل برآورد فرسایش آبی است که با ۶ فاکتور فرسایشی زیر رابطه دارد (ویشمایر و اسمیت،

۱۹۷۸: ۳۰):

$$A = R.K.L.S.C.P$$

(رابطه ۱)

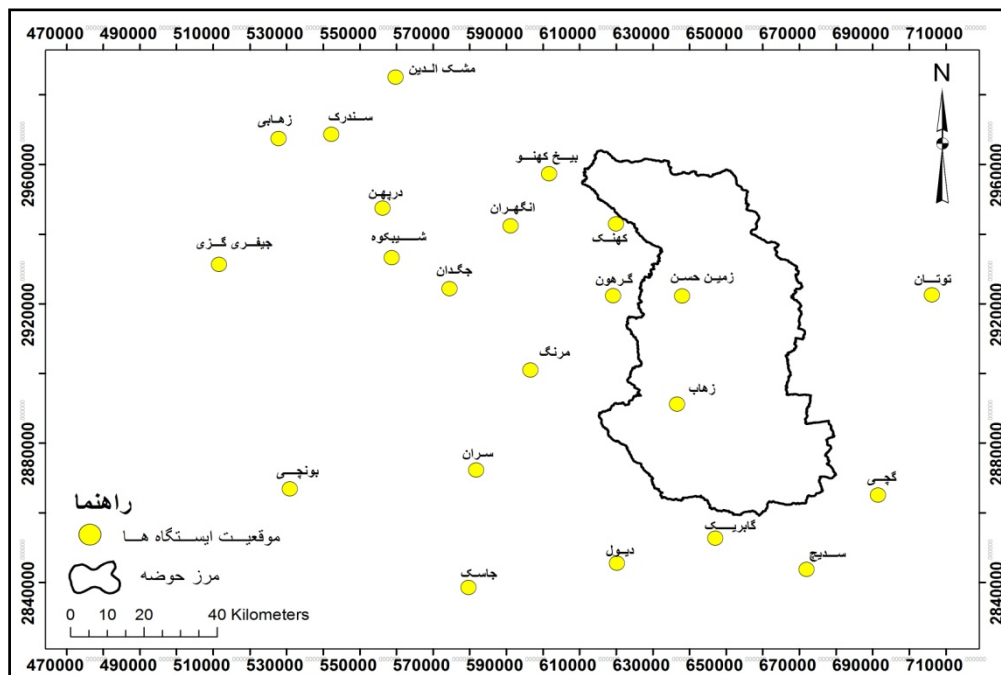
در این رابطه A: میانگین فرسایش خاک در واحد سطح ($tha^{-1}y^{-1}$)، R: فاکتور فرسایشی باران ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ y^{-1}$)، K: فاکتور فرسایش‌پذیری خاک ($tha\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$)، L: فاکتور طول شیب، S: فاکتور درجه شیب، C: فاکتور عملیات مدیریتی و پوشش و در نهایت P: فاکتور عملیات حفاظتی می‌باشد. مقادیر L، S، C و P بدون واحد می‌باشند. پاراگراف‌های بعدی نحوه برآورد این فاکتورها را توضیح می‌دهد.

۱- فاکتور فرسایشی باران (R)

مفهوم عبارت فرسایشی باران توسط ویشمایر و اسمیت در سال ۱۹۵۸ (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸: ۱۷) به منظور لحاظ تأثیر اقلیم بر فرسایش خاک ارایه شد. در این تحقیق 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 گردد. از میان این‌گونه شاخص‌ها، دو شاخص فرسایشی فورنیه و فورنیه اصلاح شده بیش از شاخص‌های دیگر در تعیین فرسایشی باران و تهیه نقشه فرسایشی به خصوص برای مناطق فاقد آمار شدت بارندگی مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته‌اند. شاخص فورنیه به علت این که قادر به نشان دادن توزیع بارندگی در ماه‌های مختلف نیست و ممکن است افزایش بارندگی‌های فرسایش‌زا در ماه‌های به غیر از مرطوب‌ترین ماه، اثر کمتری روی آن داشته باشد. از این‌رو آرنولدز^۱ (۱۹۸۰: ۴۲ و ۱۹۷۷: ۱۲۹) آن را اصلاح کرده است که به شاخص فورنیه اصلاح شده یا آرنولدز یا فائو معروف است. ابتدا انتخاب ایستگاه‌های مناسب از نظر طول دوره آماری، انتخاب پایه زمانی مشترک، کنترل کیفی، همگن‌سازی و رفع نواقص قبل از محاسبه شاخص مبتنی بر مقدار بارندگی در ایستگاه‌های باران‌سنجی انجام شد. برای انجام این تحقیق، داده‌های بارش از دوره آماری ۱۱ ساله (۱۳۸۰-۱۳۹۱)، ۲۲ ایستگاه باران‌سنجی موجود در داخل و اطراف حوضه،

^۱ - Arnoldus

کسب شد (شکل ۲). با توجه به کامل بودن داده‌ها در دوره آماری مد نظر بازسازی داده‌ها صورت نگرفت. برای اطمینان از کیفیت داده‌ها و همگن بودن سری داده‌های ثبت شده، آزمون همگنی به روش آزمون ناپارامتریک ران تست در نرم‌افزار آماری IBM*SPSS*Statistics,20 انجام گرفت. آزمون نرمال بودن داده‌ها به روش آزمون بررسی نرمال بودن^۱ تست اندرسون- دارلینگ در نرم‌افزار Minitab16.2 انجام شد.



شکل ۲. موقعیت ایستگاه‌های بارندگی مورد مطالعه در داخل و اطراف حوضه آبخیز گابریک

متأسفانه در اکثر حوضه‌های آبخیز کشور، از جمله حوضه‌های آبخیز استان هرمزگان، تعداد ایستگاه‌های مجهز به باران‌نگار به اندازه کافی نیست. در صورت عدم وجود چنین ایستگاه‌هایی، معمولاً از شاخص‌های مبتنی بر مقادیر بارش‌های سالانه (روزوول، ۱۹۹۶: ۵۶۰؛ رنارد و همکاران، ۱۹۹۱: ۳۱) و ماهانه (فرو و همکاران، ۱۹۹۱: ۵۵۲) در معادله‌های جهانی فرسایش خاک و تجدید نظر شده آن استفاده می‌شود. از رابطه ۲ شاخص اصلاح شده فورنیه (MFI) برای تمامی ایستگاه‌ها، محاسبه، سپس با جای‌گذاری این شاخص در رابطه ۳ که توسط رنارد و فریموند (۱۹۹۴: ۳۰۲) برای مناطق فاقد داده‌های تفصیلی رگبار (شدت بارندگی) پیشنهاد شده است مقدار فاکتور (R) برای ایستگاه‌های شاخص برآورد گردید.

$$MFI = \sum_{i=1}^{12} p_i^2 / P \quad \text{رابطه ۲}$$

در این معادله، p_i متوسط بارندگی (mm) در ماه i ام و P متوسط بارندگی سالانه (mm) است. در این روش برای هر سال یک شاخص حساب شده و سپس از آنها متوسط‌گیری شده است. به این نحو که مجذور بارندگی هر ماه در هر سال محاسبه شده و با تقسیم مجموع آنها به بارندگی همان سال، مقدار شاخص اصلاح شده فورنیه سال یاد شده به دست آمده است. برای به دست آوردن شاخص متوسط ایستگاه از مقادیر شاخص یاد شده در طول دوره آماری میانگین‌گیری شده است.

$$R = (0.07397 \times MFI^{1.847}) \quad MFI < 55$$

$$R = (95.77 - 6.081 \times MFI + 0.477 \times MFI^2) \quad MFI \geq 55$$

(رابطه ۳)

که در آن R فاکتور فرسایش باران ($MJ mm ha^{-1} h^{-1} y^{-1}$) است.

۲- فاکتور فرسایش پذیری خاک (K)

براساس تعریف ویه (۲۰۰۲: ۱۰۲) فرسایش پذیری خاک بیانگر حساسیت ذاتی خاک به فرسایش است و سهولت جدا شدن ذرات خاک بر اثر انرژی جنبشی قطرات باران و انتقال آنها به وسیله نیروی رواناب را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری ویژگی‌های آزمایشگاهی تعداد ۲۱ نقطه به طور تصادفی در محدوده مورد مطالعه تعیین و نمونه برداری خاک از عمق ۱۸-۰ سانتی‌متری انجام گردید. اقدامات آزمایشگاهی شامل تعیین درصد رس ($< 0.002 mm$)، سیلت ($0.002 - 0.05 mm$) به روش هیدرومتری و مقدار شن ($2 - 0.05 mm$) به روش الک صورت گرفت. سپس براساس مقادیر به دست آمده میزان فاکتور فرسایش پذیری خاک با استفاده از رابطه ۴ برآورد گردید (شیرازی و بروسما، ۱۹۸۴: ۱۴۳):

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

(رابطه ۴)

$$D_g = \exp(0.01 \sum f_i \ln m_i)$$

که در آن K: فاکتور فرسایش پذیری خاک ($t ha h ha^{-1} MJ^{-1} mm^{-1}$)، D_g : میانگین هندسی قطر ذرات بر حسب میلی‌متر، f_i : اندازه ذرات به درصد و m_i : میانگین حسابی اندازه ذرات بر حسب میلی‌متر می‌باشد. بافت خاک با محاسبه میانگین هندسی قطر ذرات (D_g) و انحراف از معیار هندسی (σ_g) (رابطه ۵) از مثلث جدید بافت خاک به دست آمد (علیزاده، ۱۳۹۰: ۷۷).

$$\sigma_g = \exp(0.01 \sum f_i \ln^2 m_i) - (0.01 \sum f_i \ln m_i)^2$$

(رابطه ۵)

۳- فاکتور توپوگرافی (LS)

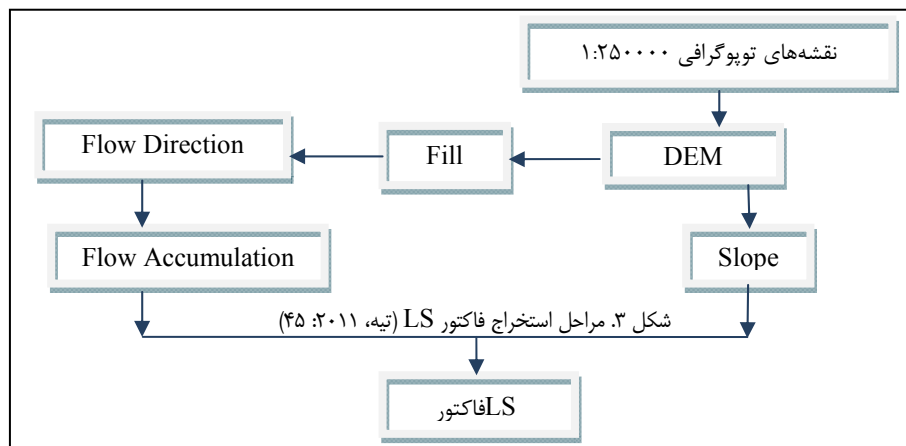
یکی از عامل‌های مؤثر در معادله جهانی تجدید نظر شده خاک طول و تندی شیب می‌باشد. اثر طول و تندی شیب (LS) به عنوان عامل توپوگرافی، اثر میزان، سرعت و پتانسیل فرسایش رواناب را نمایش می‌دهد. طول شیب عبارت است از فاصله افقی از مبدأ جریان بالادست دامنه تا جایی که تندی شیب به مقدار قابل ملاحظه‌ای تغییر یافته، به طوری که عمل رسوب‌گذاری آغاز شود؛ یا جریان‌های روی یک دامنه در یک کانال معین (کانال ترانس، سطوح تمرکز جریان، خندق، چاله، آبراهه و غیره) ادغام و متمرکز گردند (USDA، 2002: 56). با افزایش طول شیب فرسایش افزایش می‌یابد (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸: ۲۵؛ رنارد و همکاران، ۱۹۹۷: ۱۶).

برای به دست آوردن عامل توپوگرافی ابتدا نقشه‌های توپوگرافی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ در محیط Arcmap از زیر مجموعه‌های GIS رقومی گردید، سپس مدل رقومی ارتفاع ۵۰ متری (هنگل، ۲۰۰۶: ۱۲۸۶) از تابع 3D Analyst اکستنشن Raster Interpolatin و دستور Topo to Raster به دست آمد. تابع Fill بر روی DEM قبل از استفاده جهت استخراج فاکتور LS اجرا گردید. فاکتور LS نیازمند نقشه‌های تجمع جریان و شیب است (فوستر، ۱۹۷۴:

۳۰۷) که هر دو از DEM ۵۰ متری منطقه و با توجه به رابطه ۶ ارائه شده توسط مور و بورچ (۱۹۸۶: ۱۲۹۶) به کمک تابع Spatial Analyst و اکستنشن Hydrotools نرم افزار ArcGIS استخراج شد:

$$LS = (Flow\ Accumulation\ grid * \frac{Cell\ Size}{22.13})^{0.4} (\frac{Sin(slope\ grid) * 0.01745}{0.0896})^{1.3} \quad \text{(رابطه ۶)}$$

که در آن Flow Accumulation تجمع جریان به سمت بالای شیب برای هر سلول، cell size اندازه سلول‌های شبکه (در این مطالعه ۵۰ متر) و slope شیب، به دست آمده از نقشه شیب می‌باشد. از عدد ۰/۰۱۷۴۵ برای تبدیل واحد به رادیان در سیستم GIS استفاده می‌گردد. در شکل ۳ مراحل انجام کار به خوبی نشان داده شده است:



۴- فاکتور پوشش گیاهی (C)

این فاکتور، بیانگر نسبت مقدار خاک از بین رفته از زمین زیر کشت، به خاک فرسوده شده از همان قطعه زمین در طی آیش مداوم و عاری از پوشش یا بقایای گیاهی می‌باشد (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸: ۲۸). پرکاربردترین معیار رویش گیاهی، شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده^۱ 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 (تاگر، ۱۹۷۹: ۱۳۲) از رابطه زیر برای محاسبه آن استفاده می‌شود:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad \text{(رابطه ۷)}$$

در این مطالعه ابتدا مقادیر NDVI حوضه از تصویر ماهواره‌ای ETM+ با شماره ردیف و مسیر ۴۲-۱۵۹ مربوط به ۲۹ دی ۱۳۸۸ در محیط نرم‌افزار ENVI4.8 به دست آمد. سپس با ابزار محاسباتی GIS و با استفاده از فرمول وان‌درنیف^۲ و همکاران (۲۰۰۰: ۱۶) (رابطه ۸) فاکتور C استخراج گردید.

$$C = \exp \left[-\alpha \frac{NDVI}{(\beta - NDVI)} \right] \quad \text{(رابطه ۸)}$$

که در آن، α و β پارامترهای بدون واحد هستند و مقادیر آن به ترتیب برابر ۲ و ۱ است.

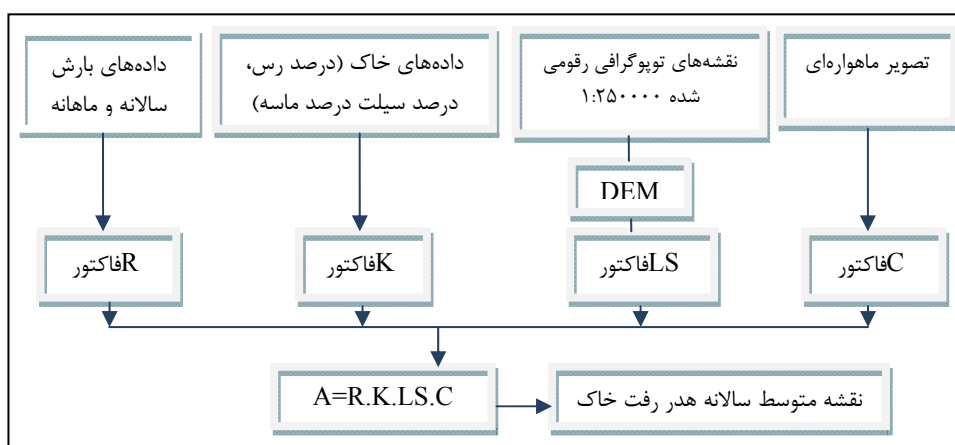
۵- فاکتور کارهای حفاظتی (P)

^۱ - Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

^۲ - Van der Knijff

2- Moraes

ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸: ۳۰) عامل کارهای حفاظتی را به عنوان مقدار خاک از بین رفته در واحد سطح یک زمین حفاظت شده، به زمینی که لخت باشد و در جهت تندترین شیب، شخم خورده باشد، تعریف نمودند. به طور عمده منظور از کارهای حفاظتی، کشت در روی خطوط تراز، کشت نواری و ترانس‌بندی است. هر چه مقدار این عامل کمتر باشد، کارهای حفاظتی مؤثرتر و هدر رفت خاک کمتر است. چنانچه هیچ کار حفاظتی صورت نگرفته باشد مقدار آن یک در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که اقدامات حفاظتی خاصی در منطقه انجام نشده بود مقدار آن یک در نظر گرفته شد. پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز مدل و آماده کردن آنها به صورت نقشه‌های رستری با پیکسل سایز ۵۰ متر با استفاده از اکستنشن Spatial Analyst و گزینه Raster Calculator نقشه مقدار هدر رفت سالانه خاک با توجه به رابطه ۱ در محیط نرم‌افزاری ArcGIS10.0 استخراج گردید. در شکل ۴ مراحل انجام کار به خوبی نشان داده شده است:



شکل ۴. مراحل اجرای مدل RUSLE (مورز^۲ و همکاران، ۲۰۰۰: ۸۹۶)

۶- رگرسیون خطی ساده

در اکثر روش‌های تحلیلی در صورتی که بخواهیم اطلاعات بیشتری از رابطه و شدت بین دو متغیر یا چند متغیر داشته باشیم و نیز بدانیم به ازای تغییرات در متغیرهای مستقل چه مقدار به متغیر وابسته افزوده یا کاسته می‌شود از تحلیل رگرسیون استفاده می‌کنیم (افشانی، ۱۳۸۷: ۴۵). برای انجام رگرسیون در این تحقیق، بعد از تهیه لایه‌های مورد نیاز مدل به صورت رستری، این داده‌ها با فرمت TIF ذخیره گردیدند. سپس در نرم افزار IDRISI 14.01 (Kilimanjaro) با استفاده از منوی GIS Analysis و ماژول Statistics روش REGRESS عمل رگرسیون انجام گردید. در این مدل رگرسیونی هدر رفت سالانه خاک به عنوان متغیر وابسته و فاکتورهای فرساینده‌گی باران، فرسایش‌پذیری خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند.

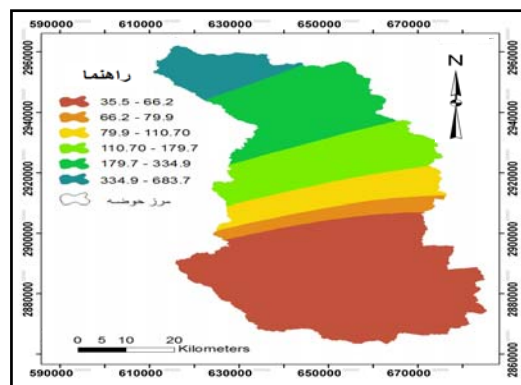
بحث و یافته‌ها

مشخصات ایستگاه‌های بارندگی و نتایج حاصل از محاسبه میزان شاخص فرساینده‌گی باران در ایستگاه‌های مورد مطالعه با استفاده از شاخص اصلاح شده فورنیه (رابطه ۲) و رابطه رنارد و فریموند (۳رابطه) در جدول ۱ ارائه گردیده است.

جدول ۱- محاسبه و برآورد MFI و R برای ایستگاه‌های بارندگی

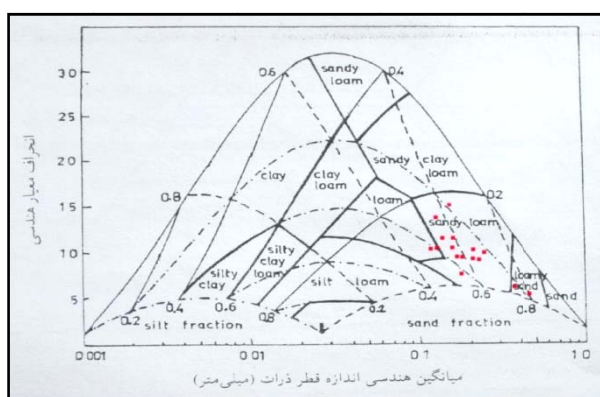
نام ایستگاه	نوع ایستگاه	کد ایستگاه	سال تأسیس	طول جغرافیایی (utm)	عرض جغرافیایی (utm)	ارتفاع (m)	MFI	R ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{y}^{-1}$)
انگهران	تبخیر سنجی	۲۸-۱۰۸	۱۳۶۱	۵۹۱۱۳۱	۲۹۴۲۳۳۶	۹۵۰	۵۶/۲۵	۷۳/۴۵
بونجی	باران سنجی	۲۸-۱۵۲	۱۳۶۶	۵۳۰۹۰۶	۲۸۶۶۷۹۹	۱۰	۴۲/۰۹	۴/۲۹
بیخ کهنو	باران سنجی	۲۸-۱۰۷	۱۳۷۷	۶۰۱۶۳۳	۲۹۵۷۳۶۹	۱۱۱۰	۵۷/۷۵	۷۷/۶۶
توتان	باران سنجی	۲۸-۱۱۷	۱۳۶۵	۷۰۶۱۳۴	۲۹۲۲۵۵۹	۵۰۰	۴۱/۴۰	۴/۱۷
جاسک	باران سنجی	۲۸-۰۰۴	۱۳۶۸	۵۷۹۶۷۸	۲۸۳۸۴۸۶	۵	۳۵/۳۰	۳/۱۰
جگدان	تبخیر سنجی	۲۸-۱۵۸	۱۳۶۱	۵۷۴۵۰۲	۲۹۲۴۳۲۱	۹۱۰	۵۱/۸۴	۶/۳۱
جیفری	آب سنجی	۲۸-۰۰۱۲	۱۳۷۷	۵۱۱۵۴۲	۲۹۳۱۲۷۸	۱۵	۶۰/۷۱	۸۶/۳۴
درپهن	باران سنجی	۲۸-۰۰۷	۱۳۶۲	۵۵۶۲۳۱	۲۹۴۷۴۵۶	۴۷۰	۵۳/۴۹	۶/۶۹
دیول (پنهان)	تبخیر سنجی	۲۸-۰۰۱۷	۱۳۶۹	۶۲۰۱۸۴	۲۸۴۵۴۶۸	۱۸۰	۳۱/۴۵	۲/۵۱
زمین حسن	باران سنجی	۲۸-۱۴۲	۱۳۷۷	۶۳۷۹۶۰	۲۹۲۲۲۳۱	۶۶۰	۴۹/۹۷	۵/۹۰
زهاب	باران سنجی	۲۸-۱۱۵	۱۳۶۹	۶۳۶۶۲۶	۲۸۹۱۱۶۸	۵۰۰	۴۶/۹۹	۵/۲۶
سدیج	باران سنجی	۲۸-۸۱۳	۱۳۷۷	۶۷۱۹۴۱	۲۸۴۳۷۳۱	۱۰	۲۷/۹۶	۲/۰۲
سران	باران سنجی	۲۸-۱۱۹	۱۳۶۹	۵۸۱۷۵۴	۲۸۷۲۲۴۸	۳۴۰	۳۸/۶۲	۳/۶۶
سندرک	باران سنجی	۲۸-۱۲۸	۱۳۶۲	۵۴۲۲۲۶	۲۹۶۸۶۶۲	۲۱۰	۶۳/۰۴	۹۳/۵۰
شیب کوه	باران سنجی	۲۸-۰۰۴	۱۳۷	۵۵۸۷۲۹	۲۹۳۳۱۹۲	۴۵۰	۴۹/۹۳	۵/۸۹
کهنک	باران سنجی	۲۸-۱۴۰	۱۳۷۷	۶۱۹۸۹۴	۲۹۴۲۹۱۲	۹۲۰	۵۴/۲۵	۶/۸۷
گابریک	تبخیر سنجی	۲۸-۰۰۵	۱۳۷۴	۶۴۷۰۲۹	۲۸۵۲۶۶۲	۱۵	۳۳/۹۶	۲/۸۹
گچی	باران سنجی	۲۸-۱۱۶	۱۳۷۰	۶۹۱۴۰۱	۲۸۶۵۰۸۱	۹۵	۲۹/۶۵	۲/۲۵
گرهون	باران سنجی	۲۸-۱۵۰	۱۳۶۶	۶۱۹۱۴۵	۲۹۲۲۳۵۰	۸۵۰	۴۴/۰۹	۴/۶۸
مازایی	تبخیر سنجی	۲۸-۰۰۱۱	۱۳۶۴	۵۲۷۷۶۷	۲۹۶۷۴۵۲	۶۰	۵۹/۵۱	۸۲/۷۶
مرنگ	باران سنجی	۲۸-۱۵۰	۱۳۶۶	۵۹۶۵۵۹	۲۹۰۰۹۶۲	۳۶۰	۳۹/۴۸	۳/۸۲
مشک‌الدین	باران سنجی	۲۸-۱۲۸	۱۳۶۲	۵۵۹۷۵۷	۲۹۸۵۰۳۹	۶۶۰	۶۷/۲۵	۱۰۷/۲۱

نقشه فاکتور R با روش کریجینگ معمولی تهیه و در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق نقشه، مقدار این فاکتور از ۳۵ تا $۶۸۳ \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{y}^{-1}$ متغیر است، که نشان‌دهنده تغییرات زیاد این عامل می‌باشد. همچنین مقادیر فرساینده‌گی به سمت مرکز و جنوب حوضه روند کاهشی داشته و در قسمت شمال غربی حوضه که ارتفاعات بیشتری دارد، فرساینده‌گی باران بیشتر است.



شکل ۵. نقشه فاکتور فرساینده‌گی باران حوضه آبخیز گابریک حاصل از کریجینگ معمولی

نتایج حاصل از محاسبه میزان شاخص فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از رابطه ۴ در جدول ۲ ارائه گردیده است. همچنین نتایج حاصل از محاسبه میانگین هندسی قطر ذرات (رابطه ۴) و انحراف از معیار هندسی (رابطه ۵) در این جدول نشان داده شده است. بعد از ترسیم و قرار دادن نقاط در مثلث جدید بافت خاک در نرم‌افزار **Igpet,2007** مشخص گردید که خاک حوضه دارای سه بافت لومی، لومی ماسه‌ای و ماسه‌ای لومی می‌باشد (شکل ۶). خاک‌های با این بافت قابلیت فرسایش‌پذیری کمتری دارند. نقشه نهایی فاکتور **K** با استفاده از روش کریجینگ ساده به دست آمد (شکل ۷). مطابق نقشه، مقدار این فاکتور از ۰/۰۱۲ تا ۰/۰۱۵ $t ha h ha^{-1} MJ^{-1} mm^{-1}$ متغیر است. اکثر مناطق به علت بافت لومی ماسه‌ای و ماسه‌ای لومی فرسایش‌پذیری کمی داشته و قسمت جنوب‌غربی منطقه به علت بافت لومی نسبت به بقیه مناطق فرسایش‌پذیری بیشتری دارد.

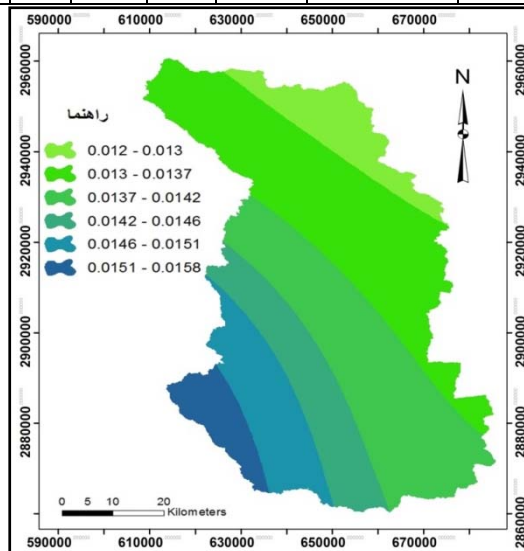


شکل ۶. موقعیت نقاط برداشت شده خاک در مثلث جدید بافت خاک پس از انجام محاسبات (اقتباس از علیزاده، ۱۳۹۰: ۸۰)

جدول ۲. میزان فاکتور فرسایش‌پذیری خاک در نقاط مورد بررسی

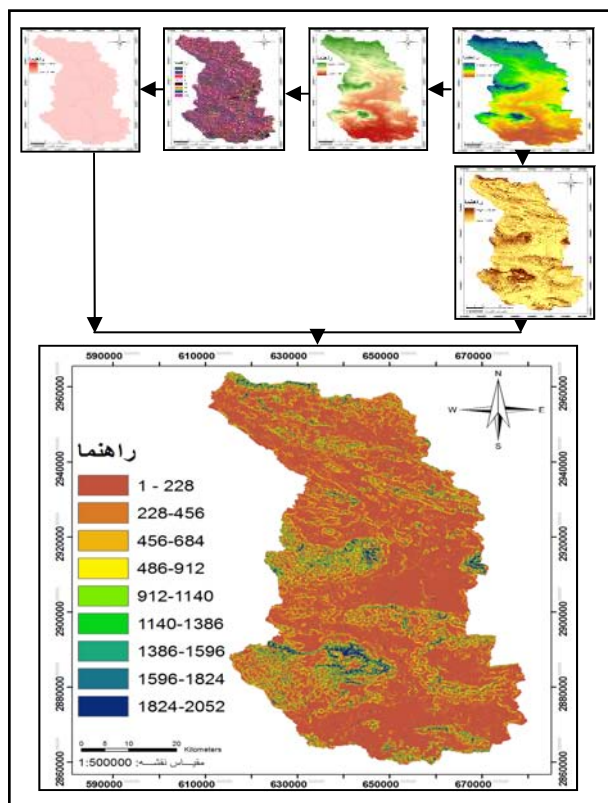
نقطه	طول جغرافیایی (utm)	عرض جغرافیایی (utm)	رس (%)	سیلت (%)	ماسه (%)	انحراف معیار	میانگین هندسی قطر ذرات (mm)	K ($t ha h ha^{-1} MJ^{-1} mm^{-1}$)	بافت خاک
۱	۶۰۹۳۱۷	۲۹۶۶۶۰۳	۱۰	۲۲	۶۸	۱/۴۸۳ ۱۰	۰/۲۲۸	۰/۰۱۳۰	لومی ماسه‌ای
۲	۶۴۱۱۲۴	۲۹۳۶۸۵۲	۴	۱۲	۸۴	۵/۶۹۶	۰/۵۰۰	۰/۰۰۸۵	ماسه‌ای لومی
۳	۶۵۶۶۴۱	۲۸۶۶۶۸۲	۱۰	۱۸	۷۲	۱/۲۱۷ ۱۰	۰/۲۶۴	۰/۰۱۲۰	لومی ماسه‌ای
۴	۶۴۲۳۲۷	۲۹۲۰۷۷۱	۱۸	۱۶	۶۶	۱/۲۹۹ ۱۵	۰/۱۶۳	۰/۰۱۵۹	لومی
۵	۶۳۹۸۲۷	۲۹۰۳۴۱۸	۸	۳۰	۶۲	۹/۶۷۲	۰/۱۹۵	۰/۰۱۴۲	لومی ماسه‌ای
۶	۶۴۰۷۳۲	۲۸۹۶۷۲۰	۸	۳۰	۶۲	۹/۶۷۲	۰/۱۹۵	۰/۰۱۴۲	لومی ماسه‌ای
۷	۶۲۶۴۷۳	۲۹۰۹۸۰۴	۱۰	۳۰	۶۰	۱/۷۳۲ ۱۰	۰/۱۷۰	۰/۰۱۵۳	لومی ماسه‌ای
۸	۶۳۴۹۶۰	۲۸۹۱۱۵۰	۱۲	۳۰	۵۸	۱/۷۶۳ ۱۱	۰/۱۴۸	۰/۰۱۶۴	لومی ماسه‌ای
۹	۶۶۱۳۰۰	۲۹۱۱۷۳۰۲	۱۰	۲۲	۶۸	۱/۴۸۳ ۱۰	۰/۲۲۸	۰/۰۱۳۰	لومی ماسه‌ای
۱۰	۶۲۳۷۱۱	۲۸۹۱۱۳۱	۱۰	۳۶	۵۴	۱/۶۶۴	۰/۱۳۷	۰/۰۱۷۱	لومی

						۱۰			ماسه‌ای
۱۱	۶۸۱۵۳۲	۲۸۵۵۹۸۴	۱۲	۲۶	۶۲	۱۷۸۰ ۱۱	۰/۱۷۲	۰/۰۱۵۲	لومی ماسه‌ای
۱۲	۶۵۰۲۱۲	۲۸۶۹۱۶۱	۴	۳۸	۵۸	۷/۸۶۲	۰/۱۹۲	۰/۰۱۴۳	لومی ماسه‌ای
۱۳	۶۳۳۶۶۵	۲۸۸۱۹۶۷	۱۰	۲۲	۶۸	۱/۴۸۳ ۱۰	۰/۲۲۸	۰/۰۱۳۰	لومی ماسه‌ای
۱۴	۶۳۰۶۵۱	۲۹۰۵۲۶۱	۴	۳۸	۵۸	۷/۸۶۲	۰/۱۹۲	۰/۰۱۴۳	لومی ماسه‌ای
۱۵	۶۲۸۴۱۳	۲۸۹۸۷۴۶	۸	۳۲	۶۰	۹/۷۱۷	۰/۱۸۲	۰/۰۱۴۷	لومی ماسه‌ای
۱۶	۶۳۸۳۴۲	۲۸۸۶۴۷۸	۸	۲۴	۶۸	۹/۴۰۲	۰/۲۴۴	۰/۰۱۲۶	لومی ماسه‌ای
۱۷	۶۳۷۷۷۸	۲۹۳۹۱۵۴	۸	۲۶	۶۶	۹/۵۱۴	۰/۲۲۶	۰/۰۱۳۱	لومی ماسه‌ای
۱۸	۶۷۹۹۷۰	۲۹۶۷۴۱۳	۴	۱۸	۷۸	۶/۴۴۴	۰/۴۰۱	۰/۰۰۹۶	ماسه‌ای لومی
۱۹	۶۵۲۶۴۲	۲۹۴۵۸۷۹	۱۰	۳۸	۵۲	۱/۵۹۲ ۱۰	۰/۱۲۷	۰/۰۱۷۸	لومی ماسه‌ای
۲۰	۶۵۴۸۹۱	۲۸۹۶۸۸۱	۱۲	۲۶	۶۲	۱۷۸۰ ۱۱	۰/۱۷۲	۰/۰۱۵۲	لومی ماسه‌ای
۲۱	۶۱۰۲۶۵	۲۸۵۵۱۹۶	۱۴	۳۲	۵۴	۱/۹۴۷ ۱۳	۰/۱۳۵	۰/۰۱۸۳	لومی



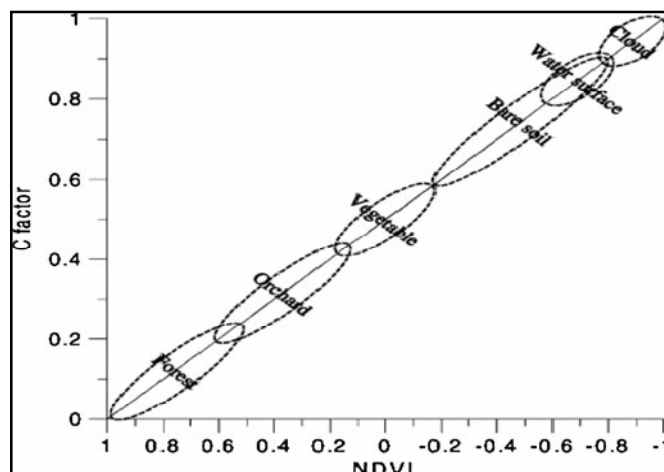
شکل ۷. نقشه فاکتور فرسایش پذیری خاک حوضه آبخیز گابریک حاصل از روش کریجینگ ساده

نقشه فاکتور توپوگرافی (LS) با تهیه لایه‌های لازم و مطابق رابطه ۶ استخراج گردید (شکل ۸). همان‌طور که از شکل ۸ برمی‌آید مقدار این فاکتور از ۱ تا ۲۰۲۵ در سطح پیکسل متغیر می‌باشد که در مناطق با شیب تند و ناهموار مقدار آن بیشتر است.

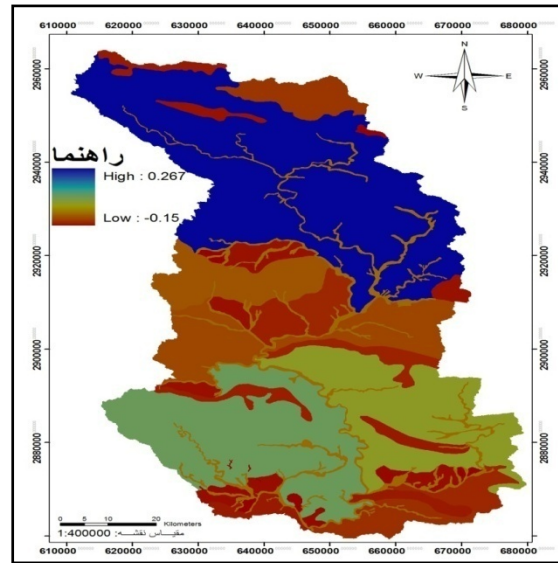


شکل ۸. نقشه فاکتور توپوگرافی حوضه آبخیز گابریک

نقشه فاکتور C براساس شاخص NDVI و رابطه γ تهیه گردید. مقدار C با NDVI رابطه خطی معکوس دارد (شکل ۹)، یعنی وقتی مقدار NDVI به سمت ۱- نزدیک می‌شود منطقه فقیر از پوشش گیاهی و وقتی به سمت ۱ نزدیک می‌شود منطقه دارای پوشش گیاهی می‌باشد (لین و همکاران، ۲۰۰۲: ۱۴۷) مقدار فاکتور C بین ۰/۶۵ تا ۰/۷۸ متغیر می‌باشد که نشان‌دهنده فقیر بودن منطقه از نقطه نظر پوشش گیاهی می‌باشد (شکل ۱۰). با توجه به عدم انجام اقدامات حفاظتی مشخص در منطقه، مقدار فاکتور P یک در نظر گرفته شده است.

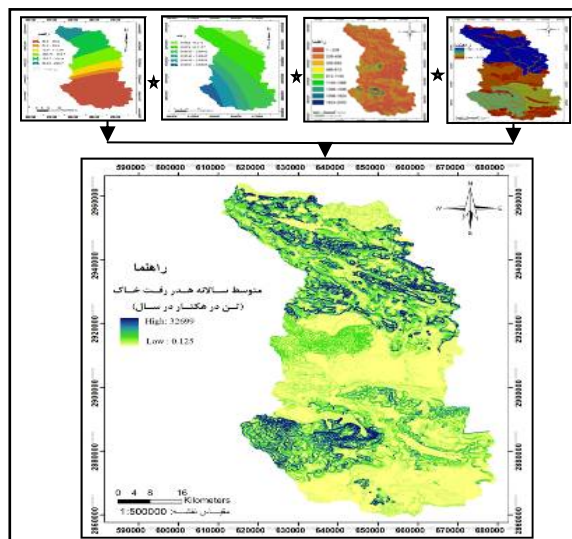


شکل ۹. رابطه NDVI و C (لین و همکاران، ۲۰۰۲: ۱۴۷)



شکل ۱۰. نقشه فاکتور پوشش گیاهی حوضه آبخیز گابریک

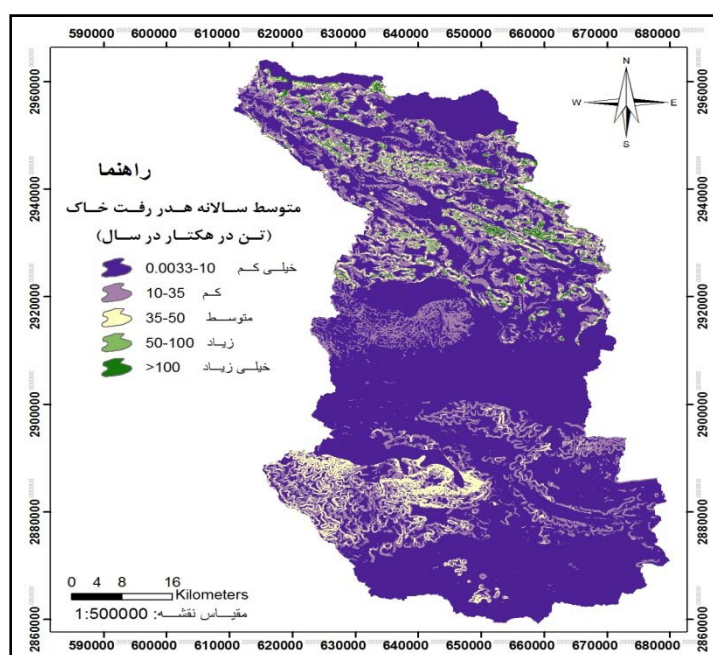
فرسایش متوسط سالانه خاک از طریق حاصل ضرب فاکتورهای فرساینده (R)، فاکتور فرسایش پذیری خاک (K)، فاکتور توپوگرافی (LS)، فاکتور مدیریت پوشش گیاهی (C) و فاکتور عملیات حفاظتی (P)، با استفاده از رابطه ۱ و در محیط نرم افزار ArcGIS10.0 محاسبه شد. نقشه به دست آمده از این مدل، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مقادیر فرسایش خاک در منطقه مورد مطالعه بین ۰/۰۳۳ تا ۳۲۶۹۹ تن در هکتار در سال در سطح پیکسل متغیر می‌باشد. متوسط و انحراف معیار آن نیز به ترتیب برابر با ۳۲۲/۹ و ۱۲۷۸/۸۹ تن در هکتار در سال تعیین شد. در مرحله بعد نقشه فرسایش سالانه خاک به ۵ کلاس خطر طبقه‌بندی شده است (شکل ۱۲). مساحت و درصد هر یک از کلاس‌های خطر در جدول ۳ نشان داده شده است. بیشترین قسمت حوضه مورد مطالعه (بیش از ۸۰ درصد)، جزء طبقه فرسایشی خیلی کم تا کم می‌باشد که به طور عمده این کلاس‌ها قسمت عمده‌ای از حوضه را در بر می‌گیرد. ۳/۲۵ درصد حوضه نیز تحت خطر فرسایش بالا تا شدید قرار دارد که در قسمت‌هایی از نیمه شمالی و جنوبی حوضه واقع شده‌اند.



شکل ۱۱. نقشه فرسایش سالانه خاک حوضه آبخیز گابریک

جدول ۳. درصد و مساحت کلاس‌های طبقه‌بندی شده فرسایش

کلاس	مقدار هدر رفت خاک (تن در هکتار در سال)	مساحت (Km ²)	مساحت (%)
خیلی کم	۰/۰۰۳۳-۱۰	۳۴۳۲/۲۸	۸۰/۰۰
کم	۱۰-۳۵	۳۹۶/۸۵	۹/۲۵
متوسط	۳۵-۵۰	۲۲۱/۷۷	۷/۵
زیاد	۵۰-۱۰۰	۷۵/۰۸	۱/۷۵
خیلی زیاد	>۱۰۰	۶۵/۳۵	۱/۵



شکل ۱۲. نقشه طبقه‌بندی شده فرسایش سالانه خاک حوضه آبخیز گابریک

تحلیل رگرسیون فضایی یکی از ابزارهای مهم آماری است که کاربرد وسیعی در زمینه‌های مختلف پژوهشی دارد و ارتباط بین متغیرها را که هر یک به صورت یک فایل رستری هستند، نشان می‌دهد. در این مدل رگرسیونی میانگین هدر رفت سالانه خاک به عنوان متغیر وابسته، فاکتور فرسایش باران، فاکتور فرسایش پذیری خاک، فاکتور توپوگرافی و فاکتور پوشش گیاهی به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. معادله رگرسیونی ارائه شده در جدول ۴، ضریب هر یک از متغیرهای مستقل و عدد ثابت را نشان می‌دهد. ضریب ثابت نشان‌دهنده ارزش متغیر وابسته در زمانی است که متغیر مستقل ارزش صفر داشته باشد. ضریب رگرسیونی نشان‌دهنده اثر متغیر مستقل بر متغیر وابسته می‌باشد. R^2 میزان تغییرپذیری متغیر وابسته را بر مبنای متغیر مستقل نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج مقدار R^2 دیده می‌شود فاکتور توپوگرافی با بالاترین مقدار یعنی ۰/۸۷، بیش‌ترین تأثیر را در برآورد فرسایش سالانه خاک توسط مدل RUSLE داشته است. فاکتورهای C، R و K به ترتیب در اولویت‌های بعدی قرار می‌گیرند. بدین معنی که ۸۷ درصد هدر رفت سالانه خاک تحت تأثیر فاکتور توپوگرافی می‌باشد.

جدول ۴. روابط رگرسیونی بین هدر رفت خاک و فاکتورهای RUSLE

فاکتورهای RUSLE	رابطه رگرسیونی	R ²
K	$Y = 24.587X + 47$	۰/۱۷
R	$Y = 2.643X + 25.89$	۰/۲۳
LS	$Y = 147.076X + 20.79$	۰/۸۷
C	$Y = 112.34X + 68$	۰/۴۵

نتیجه گیری

فرسایش خاک، مخصوصاً در کشورهای در حال توسعه روند افزایشی دارد. فرسایش تشدید می‌شود باعث از بین رفتن خاک‌های کشاورزی، فقیر شدن ظرفیت تولیدی خاک‌ها و آلودگی آب‌های طبیعی در اثر رسوب‌گذاری می‌شود. در این پژوهش ارزیابی کمی فرسایش در حوضه آبخیز گابریک با استفاده از مدل RUSLE و فناوری‌های نوین GIS و RS صورت گرفت. بررسی نقشه فاکتور فرسایش باران در سطح حوضه نشان داد که مقادیر این فاکتور از ۳۵ تا ۶۸۳ MJmmha-1 h-1 y-1 متغیر است. مقادیر فرسایش از قسمت‌های مرکزی حوضه تا نیمه جنوبی روند کاهشی داشته و در قسمت‌های شمالی که ارتفاعات و بارش بیشتر است، فرسایش افزایش یافته است. میزان فرسایش‌پذیری خاک حوضه از ۰/۱۲ تا ۰/۱۵۸ t ha h ha-1 MJ-1 mm-1 متغیر بوده است. از آنجا که بیشتر خاک‌های منطقه بافت لومی ماسه‌ای دارد، خاک حوضه فرسایش‌پذیری کمی دارد. نتیجه حاصل از بررسی فاکتور پوشش گیاهی نشان داد که مقادیر این فاکتور از ۰/۶۵ تا ۰/۷۵ متغیر است که بیانگر فقیر بودن منطقه از لحاظ پوشش گیاهی است. بررسی نقشه خطر فرسایش خاک که از ترکیب چهار لایه تولید شده شامل لایه‌های فرسایش‌پذیری خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی در محیط GIS تولید گردید، نشان داد که مقادیر خطر فرسایش خاک در سطح حوضه بر حسب تن در هکتار در سال از ۰/۰۳۳ تا ۳۲۶۹۹ متغیر است. مطابق نقشه خطر فرسایش خاک تهیه شده، مناطق با خطر فرسایش متوسط تا زیاد، عمدتاً در قسمت‌های ناهموار منطقه قرار دارند. همچنین می‌توان به اثر فرسایش باران در افزایش فرسایش مناطق شمالی حوضه که خطر فرسایش متوسط تا زیاد دارند، اشاره نمود. همچنین مناطق با خطر فرسایش خیلی زیاد نیز شامل مناطقی است که پوشش اندک (مرتعی) دارند. بررسی روابط رگرسیونی بین فاکتورهای RUSLE و مقدار فرسایش سالانه خاک در منطقه نشان داد که فاکتور توپوگرافی با بالاترین مقدار ضریب تبیین (۰/۸۷) بیشترین اهمیت را در برآورد فرسایش سالانه خاک در مدل RUSLE دارد. فاکتورهای پوشش گیاهی، بارندگی و فرسایش‌پذیری خاک به ترتیب در اولویت‌های دوم تا چهارم قرار می‌گیرند. نتایج این تحقیق قابلیت بالای سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور را برای ایجاد داده‌های 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. بنابراین GIS و RS می‌توانند به صورت مؤثر، در توسعه راهکارهای مدیریتی و فراهم آوردن گزینه‌های انتخابی برای مدیران، جهت حل مسئله فرسایش خاک به کار گرفته شود.

سپاس‌گزاری

از مهندس یکتاپور و مهندس رستمی به ترتیب مسئول و مدیر اجرایی اداره کل منابع طبیعی استان هرمزگان برای انجام همکاری‌های لازم در انجام پژوهش قدردانی می‌شود.

منابع

- آرخی، ص.؛ نیازی، ی. (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 آب و خاک، جلد هفدهم، شماره دوم، صص. ۲۷-۱.
- اسدی، ح.؛ وظیفه دوست، ح.؛ موسوی، س. ع.؛ هنرمند، م. (۱۳۸۹). ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک با استفاده از معادله جهانی تلفات خاک اصلاح شده، سامانه اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور در حوضه آبخیز ناورود، شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان، اسفند ماه ۱۳۸۹، صص. ۱۳-۱.
- افشانی، س. ع. ر. (۱۳۸۷). آموزش کاربردی SPSS در علوم اجتماعی و رفتاری، چاپ اول، انتشارات دانشگاه یزد.
- پورعبدالله، م.، مقایسه مدل‌های SWAT و RUSLE در تخمین فرسایش حوضه‌ای، (۱۳۸۴). پایان نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: دکتر مسعود تجربی، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف، گرایش محیط زیست، ۱۲۲ ص.
- راشکی، ع. ر.، (۱۳۸۵). بررسی کارایی تلفیق مدل‌های RUSLE و SEDD در برآورد توزیعی فرسایش و رسوب سالانه با استفاده از تکنیک زمین آمار و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کههنوک خاش)، پایان نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: دکتر عبدالرسول تلوری و دکتر نادر نورا، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گیلان، دانشکده مرتع و آبخیزداری، ۷۸ ص.
- علیزاده، ا. (۱۳۹۰). رابطه آب و خاک و گیاه، چاپ سیزدهم، انتشارات دانشگاه، امام رضا.
- کرم، ا.؛ صفریان، آ.؛ حجه‌فروش‌نیا، ش. (۱۳۸۹). برآورد و پهنه‌بندی فرسایش خاک در حوضه ماملو (شرق تهران) با استفاده از روش‌های معادله اصلاح شده جهانی فرسایش خاک و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، پژوهش‌های دانش زمین، سال اول، شماره ۲، صص. ۸۶-۷۳.
- مخدوم، م.، درویش صفت، ع. ا.، جعفرزاده، ه. و مخدوم، ع. ر. (۱۳۸۰). ارزیابی و برنامه ریزی محیط زیست با سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، انتشارات دانشگاه تهران.
- Ahmed, T., 2000, **Fuzzy class membership approach to soil modeling**, Agricultural Systems, Vol. 63, PP. 97-110.
- 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, PP. 1-17.
- Angima, S., 2003, **Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions**, Agriculture, Ecosystems and Environment, Vol. 97, PP. 295-308.
- Arnoldus, H.M.J., 1977, **Methodology used to determine the maximum potential average annual soils loss due to sheet and rill erosion in Morocco**, FAO Soils Bulletin, Vol. 34, PP. 39-51.
- Arnoldus, H.M.J., 1980, **An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation**, In: De Boodt, M., Gabriels, D. Eds., Assessment of Erosion, Chichester, New York, PP. 127-132.
- Bartsch, KP., van Miegroet, H., Boettinger, J., Dobrwolski, JP., 2002, **Using empirical erosion models and GIS to determine erosion risk at Camp Williams**, Journal of Soil and Water Conservation, Vol. 57, PP. 29-37.
- Chakroun, H., Bonn, F., Fortin, J.P., 1993, **Combination of single storm erosion and hydrological models into a geographic information system**, Farm Land Erosion: In Temperate Plains Environment and Hills, PP. 261-270.
- Demirci, A., Karaburun, A., 2012, **Estimation of soil erosion using RUSLE in a GIS framework: a case study in the Buyukcekmece Lake watershed, northwest Turkey**, Environ Earth Sci, Vol. 66, PP. 903-913.
- Ferro, V., Giordano, G., & Lovino, M., 1991, **Isoerosivity and erosion risk map for Sicily**, Hydrol. Sci. J., Vol. 36, No. 6, PP. 549-564.
- Foster, G., 1974, **Evaluating irregular slopes for soil loss prediction**, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, No. 17: PP. 305-309.

- Fu, G., 2006, **Modeling the impacts of no-till practice on soil erosion and sediment yield with RUSLE, SEDD and Arc View GIS**, Soil and Tillage Research, Vol.85, PP. 38-49
- Hengl, T., 2006, **Finding the right pixel size**, Computers & Geosciences, Vol. 32, No. 9, PP. 1283-1298.
- Lafren, J.M., Lane, L.J., Foster, G.R., 1991, **WEPP: a new generation of erosion prediction technology**, Journal of Soil and Water Conservation, Vol. 46, No. 1, PP. 34-38.
- Lin, C., Lin, W., Chou, W., 2002, **Soil erosion prediction and sediment yield estimation: the Taiwan experience**, Soil Tillage Res, Vol. 68, PP. 143-152.
- Lu, D., Li, G., Valladares, G.S. & Batistella, M., 2004, **Mapping soil erosion risk in Rondonia, Brazilian Amazonia using RUSLE, remote sensing and GIS**, Land Degrad. Devel. Vol. 15, PP. 499-512.
- Marker, M., 2006, **Assessment of land degradation susceptibility by scenario analysis: a case study in Southern Tuscany, Italy**, Geomorphology, Vol. 93, PP. 120-129.
- Moore, I., Burch, G., 1986, **Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation**, Soil Science Society of America Journal, Vol. 50, PP. 1294-1298.
- Moraes, J.F.L., DONZELI, P.L., LOMBARDI NETO, F., 2000, **Land planning for sustainable development in watersheds using Geographical Information System**. Int Arch Photogramm and R. S., Vol. 33, No. 3, PP. 895-900.
- Prasannakumar, V., Vijith, H., Geetha, N., 2011, **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**, Geosci. Front., Vol. 3, PP. 209-215.
- Rahman, M.R., Shi, Z.H., Chongf, C., 2009, **Soil erosion hazard evaluation: an integrated use of remote sensing, GIS and statistical approaches with biophysical parameters towards management strategies**. Ecol. Modell., Vol. 220, PP. 1724-1734.
- Renard, K. G., & Freimund, J.R., 1994, **Using monthly precipitation data to estimate the R factor in the revised USLE**, J. Hydrol., Vol. 157, PP. 287-306.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A. & Porter, J.P., 1991, **RUSLE: revised universal soil loss equation**, Journal of Soil and Water Conservation, Vol. 46, No. 1, PP. 30-33.
- 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)**, Agriculture Handbook, No. 703, USDA- ARS.
- Rosewell, C., 1996, **A robust estimator of the R factor for the Universal Soil Loss Equation**, Trans Am Soc Agric Eng., Vol. 39, No. 2, PP. 559-561.
- Shi, Z., 2004, **Soil conservation planning at the small watershed level using RUSLE with GIS: a case study in the three Gorge Area of China**, CATENA, Vol. 55, PP. 33-48.
- Shirazi, M.A., Boersma, L., 1984, **A unifying quantitative analysis of soil texture**, Soil Science Society of America Journal, Vol. 48, PP. 142-147.
- Teh, S. H., 2011, **Soil erosion modeling using RUSLE and GIS on CAMERON HIGHLANDS, MALAYSIA for hydropower development**, A 30 ECTS credit units Master's thesis, PP.1- 71.
- Tucker, C.J., 1979, **Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation**, Remote Sensing of Environment, Vol. 8, PP: 127-150.
- USDA, 1972, **Sediment Sources, Yields, and Delivery Ratios**, National Engineering Handbook, Section 3 Sedimentation.
- Van der Knijff, J.M., Jones, R.J.A., Montanarella, L., 2000, **Soil Erosion Risk Assessment in Europe**, EUR 19044 EN. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, PP. 34
- Veihe, A., 2002, **The spatial variability of erodibility and its relation to soil types: a study from northern Ghana**, Geoderma, Vol. 106, PP. 101-120.
- Wang, G., Gertner, G., Fang, S., & Anderson, AB. 2003, **Mapping multiple variables for predicting soil loss by geostatistical methods with TM images and a slope map**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 69, PP. 889-898.
- Wischmeier, W.H., & Smith, D.D., 1978, **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**, Agriculture Handbook, Vol. 537. US Department of Agriculture, Washington, DC, PP. 58