

بررسی دقت و کاربرد مدل USLE در تخمین فرسایش خاک مناطق کوهستانی مرتفع (مطالعه موردی فلات تبت)

آرتمیس معتمدی^{۱*} و مجید گلوئی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۲۲)

چکیده

برای تخمین میزان فرسایش سالانه خاک در نقاط مختلف دنیا از روش‌های تجربی و عددی گوناگونی استفاده می‌شود که دقت هر یک به پارامترهای مورد استفاده در آنها بستگی دارد. یکی از پرکاربردترین این روش‌ها، روش USLE است که استفاده فراوانی در تخمین میزان رسوب متوسط سالانه ورقه‌ای و شیاری حوضه دارد. در این معادله اکثر پارامترهای مؤثر در فرسایش شامل پوشش گیاهی، شیب حوضه، بارش، جنس خاک و عامل حفاظت خاک لحاظ شده اما در این تحقیق نشان داده شده است که این معادله در مناطق کوهستانی پوشیده شده از سنگ و برف دارای دقت پایینی است. بدین منظور قسمتی از فلات تبت در کشور چین که نتایج مشاهده‌ای آن در دسترس بوده، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است و نقشه‌های توپوگرافی، NDVI، خاکشناسی، متوسط بارندگی ماهانه و سالانه ۳۰ سال اخیر منطقه جمع‌آوری و در نهایت تحلیل شد. به منظور افزایش دقت مدل‌سازی، ضریب پوشش گیاهی با روش‌های مختلف تفسیر نقشه‌های NDVI با دقت بالا استخراج شدند و کلیه متغیرها و عوامل دخیل در فرسایش و هدررفت خاک با توجه به معادله USLE در بستر ArcGIS محاسبه شد. نتایج نهایی مدل‌سازی نشان داد که روش USLE مقدار برآورد فرسایش خاک منطقه را بیشتر از نتایج سایر پژوهشگران چینی که بازدید میدانی از منطقه داشته‌اند، نشان می‌دهد که علت این خطا، وجود مناطق وسیع پوشیده شده از برف و گل‌سنگ در منطقه است که اگرچه فرسایش ناچیزی دارند ولی نقشه‌های NDVI قادر به تحلیل آن نیست. نتایج تحلیل نقشه‌های NDVI نشان می‌دهد که معادلات فو و پتیل - شرما مناسب برآورد رسوب در مناطق کوهستانی نیستند و سایر معادلات مانند لین، ژو و دوریگون، چنانچه قرار است در مناطق با ارتفاع بیش از ۵۵۰۰ متر مورد استفاده قرار گیرند بایستی با اعمال ضریب ۰/۲ در پارامتر C تعدیل شوند تا نتایج مدل‌سازی، مشابهت بیشتری با واقعیت داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: فرسایش خاک، مدل USLE، فلات تبت، NDVI، پوشش برفی

۱. گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوبین زهرا

۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) - قزوین

* مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Artemis.mot@bzte.ac.ir

مقدمه

فرسایش خاک یکی از پدیده‌های معمولی زمین‌شناسی است که در کشورهای در حال توسعه از جمله ایران مشکلات اساسی زیست‌محیطی ایجاد کرده و می‌تواند آثار مخربی بر اکوسیستم داشته باشد. در فرسایش آبی، کوه‌ها به تدریج فرسوده شده و دشت‌ها، دره‌ها، بستر رودخانه‌ها و دلتاها، تشکیل می‌شوند. چنانچه این فرسایش به‌کندی صورت گیرد، فرسایش از نوع طبیعی بوده و چنانچه با سرعت خیلی بیشتری انجام شود، از نوع تخریبی است. در پدیده فرسایش عوامل متعددی در جدا شدن ذرات خاک مؤثر هستند. ضربات باران و همچنین پوشش گیاهانی که قسمتی از خاک را برهنه می‌گذارند، در جدا کردن خاک و تغییر مکان آنها بسیار مؤثر هستند (۱۰ و ۴۱). معمولاً با وقوع هر بارندگی، مقادیر بسیار زیادی خاک از سطح حوزه‌های آبخیز شسته شده و رسوبات از محلی به محل دیگر منتقل می‌شود. تحقیقات متعددی در زمینه روابط برآورد فرسایش سالانه خاک به‌طور گسترده در سرتاسر جهان صورت گرفته است. در این راستا دامنه وسیعی از مدل‌ها وجود دارد که بر اساس درجه پیچیدگی، فرایندهای قابل شبیه‌سازی و ماهیت دارای تنوع هستند و هرچه تعداد متغیرهای ورودی آنها کمتر باشد کار با مدل آسان‌تر و سریع‌تر خواهد بود (۱) روابط متعددی همچون، (USLE) Universal Soil Loss Equation (USLE) (ماسگریو)، معادله اصلاح شده جهانی با عنوان MUSLE، (ویلیامز) و یا RUSLE (رنارد و همکاران)، معمولاً برای تخمین فرسایش سطحی توسعه یافته‌اند. معمولاً مدل USLE در سطوح کوچک برای انواع کاربری‌ها قابل کاربرد است (۷). معادله‌های متنوعی از تخمین فرسایش در سال ۱۹۶۵ در کتابچه راهنمای کشاورزی USDA 282 و در ۱۹۷۸ در دفترچه شماره ۵۳۷، بر اساس میزان بارندگی و نوع خاک منتشر شده‌اند و در حوزه‌های بزرگ، به‌منظور بهتر و دقیق‌تر شدن نتایج خروجی‌ها، حوزه‌ها به چندین زیرحوضه تقسیم می‌شوند تا توزیع باران، یکنواخت‌تر و توزیع خاک، همگن‌تر در نظر گرفته شود (۱، ۳، ۳۲ و ۳۴).

مطالعات متعددی در داخل و خارج کشور در زمینه بهره‌گیری از مدل‌های جهانی پیش‌بینی فرسایش خاک انجام شده است. هر یک از این مطالعات به بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر در فرسایش خاک می‌پردازند چنانچه پوسن و همکاران (۳۴) اظهار داشتند که تغییرات کاربری اراضی تأثیر زیادی بر فرسایش خاک دارد. در ایران نیز، به‌کارگیری مدل RUSLE در بررسی فرسایش حوضه‌های مختلف چهارمحال بختیاری (۲۰) و حوضه سد زاینده‌رود علیا (۱۱ و ۲۰) نشان می‌دهد که کاربری اراضی، عامل مهمی در تولید رسوب است. چنانچه مراتع با پوشش گیاهی خوب کمترین میزان فرسایش و دیمزارهای رها شده، بیشترین مقدار فرسایش را برآورد کرده‌اند. همچنین بررسی نقشه‌های کیفی فرسایش‌پذیری خاک در مطالعات حاجی و همکاران (۲۰) در منطقه آذربایجان غربی، نتایج مشابهی را نشان می‌دهد، چنانچه کاربری اراضی و میزان پوشش گیاهی در تخمین فرسایش خاک بسیار مؤثر حاصل شده است. زیرا مقدار فرسایش تخمینی در تحقیقات ایشان در مراتع متراکم از مراتع با پوشش متوسط بسیار کمتر برآورد شده است (۱۱). مقصودی و همکاران (۲۹) با بررسی پارامتر پوشش گیاهی در حوضه آبریز رزین در شمال کرمانشاه، تأثیر کلیدی عامل پوشش گیاهی در تخمین رسوب را تأیید کرده‌اند. فتحی‌زاد و همکاران (۶) با به‌کارگیری تکنیک‌های GIS و سنجش از دور در مدل USLE، میزان فرسایش خاک در حوضه آبریز دویرج استان ایلام، ارزیابی کردند.

در سایر نقاط جهان نیز بنا به اهمیت موضوع، یکی از مدل‌های جهانی تخمین رسوب مورد ارزیابی قرار گرفته است. تاکنون تحقیقات بسیار زیادی روی ضرایب مؤثر در مدل‌های تخمین رسوب صورت گرفته است. به‌صورت تفکیک شده می‌توان بنیان‌گذار تحقیقات انجام شده روی عامل فرسایش‌پذیری باران را مربوط به ویشمایر و اسمیت دانست که به‌دنبال آن روابط متعدد دیگری در کشورهای مختلف بر اساس بارش ماهانه، سالیانه و شدت بارش توسعه یافتند (۴۷). تحقیقات توسعه یافته لی و هیو (۲۲) با پیگیری تحقیقات یانگ و

همکاران و لو و همکاران (۲۸) نشان داد، که معادلات ساده بارندگی سالیانه می‌تواند برای تخمین رسوب بلندمدت مناسب باشد ولی در زمان‌های مختلف و نقاط جغرافیایی متفاوت بایستی محتاطانه به کار گرفته شوند (۲۲ و ۲۸).

مطالعات میدانی انجام شده با اندازه‌گیری مستقیم فرسایش خاک در حوضه‌های کوچک در مطالعات ون و هوانگ (۴۵) و لین و چانگ (۲۵) عامل اصلی فرسایش را پارامتر فرسایش پذیری و مقاومت خاک معرفی کردند. در مقابل، مطالعات دیگری که روی طول و شیب حوضه توسط مور و همکاران (۳۱) و هان و همکاران (۱۰) روی نقشه‌های DEM با کیفیت بالا انجام شد، عامل اصلی فرسایش، ضریب شیب حوضه آبریز در نظر گرفته شد و نتایج نشان داد که در مناطق پر شیب، فرسایش بیشتر است. شی و همکاران نیز با به‌کارگیری GIS و مدل RUSLE در اراضی شیبدار حوضه آبریز رودخانه Hanging، میزان فرسایش را در اراضی شیبدار محاسبه کردند (۱۱). گرچه در تحقیقات ژانگ و همکاران (۵۰) به این موضوع اشاره شده است که استخراج پارامترهای ضریب شیب و ضریب طولی حوضه آبریز در مدل برآورد رسوب، بسیار دشوار است (۱۲ و ۳۱). پژوهش‌های متعددی در استفاده از مدل‌های فرسایش خاک برای تعیین مناطق حساس به فرسایش موجود است. در تحقیقات پراساناکومار و همکاران (۳۵)، تهیه نقشه‌های مناطق فرسایش‌پذیر، برای برنامه‌ریزی مدیریت زمین به خصوص در مناطق کوهستانی و پرشیب هند توصیه شده است (۱۱).

در این تحقیق، منطقه فلات تبت، به دلیل ویژگی‌های مختلف توپوگرافی، وجود گیاهان بومی در برخی از ارتفاعات، نوع کاربری اراضی متفاوت، وجود بافت سنگی متعدد و وجود یخبندان در اغلب ماه‌های سال مورد مطالعه قرار گرفت. این منطقه به علت اینکه سرچشمه اغلب رودخانه‌های مهم و پر آب آسیا هست و بر اکوسیستم و اقتصاد جهان تأثیر بسیاری دارد، در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته و از نظر بررسی منابع آبی و خاکی به‌طور گسترده، منطقه مطلوب مطالعاتی بسیاری از پژوهشگران چینی در پروژه‌های مشترک مانند پروژه راه ابریشم (مشترک بین ایران و چین) بوده است. بررسی منطقه فلات تبت به دو دلیل بسیار حائز اهمیت است: ۱- افزایش فرسایش خاک در منطقه، سبب کاهش عمر مفید سدهای پایین‌دست خواهد شد و ۲- تخریب پوشش گیاهی سبب کاهش پدیده نفوذ و در نهایت کاهش سطح آب‌های زیرزمینی می‌شود، لذا ارزیابی این موارد برای دسترسی به مدیریت جامع و یکپارچه منابع آب در چین بسیار حیاتی است.

هدف از این پژوهش، بررسی کاربرد روش USLE در مناطق کوهستانی و همچنین ارزیابی فاکتورهای کلیدی در تخمین فرسایش خاک است. این تحقیق، حاصل مطالعات پژوهشگران ایرانی و چینی است که در مدت انجام این پروژه

طی دهه‌های گذشته در چین، فرسایش خاک با اهمیت بیشتری مورد توجه قرار گرفته است زیرا هدررفت خاک قابل کشاورزی تأثیر بسیار زیادی در روند رشد اقتصادی چین و متعاقباً اقتصاد جهان دارد. در کشور چین سالانه ۶۶۶۶۷ هکتار از اراضی زراعی چین ناپدید می‌شود و این مقدار معادل از بین رفتن سالانه یک سانتی متر خاک است. در این کشور وزارت نیرو، از بین رفتن ۱۵۳۰ میلیون تن خاک تا سال ۲۰۳۰ را برآورد کرده است (۳۴).

حداقل و حداکثر مقدار بارندگی‌ها (۲۰۱۷) در منطقه مورد مطالعه طبق آمار ایستگاه‌های باران‌سنجی به ترتیب برابر با ۳۱۶ و ۸۳۸ میلی‌متر گزارش شده است. همچنین طبق آمار ایستگاه‌های باران‌سنجی و داده‌های بارندگی روزانه و ماهیانه و آمار بلندمدت ۳۰ ساله از ۱۹ ایستگاه باران‌سنجی در منطقه، همواره بیشترین مقدار بارندگی در ماه جولای (معادل تیرماه) و کمترین آن در ماه دسامبر (معادل دی‌ماه) رخ می‌دهد که با رویدادهای غالب بارندگی کشور ما بسیار متفاوت است. این منطقه اغلب به‌خاطر ارتفاع زیاد سرد بوده و متوسط دمای آن حدود ۵/۵ درجه است، گرچه در ماه‌های آگوست و جولای (خرداد و تیر)، حداکثر دما به ۲۲ درجه نیز می‌رسد.

لازم به ذکر است، این تحقیق قسمتی از پژوهش مشترک منابع آبی بین دو کشور ایران و چین است و انتخاب این حوزه، صرف‌نظر از اهمیت اقتصادی که برای کشور چین و جهان دارد، منطقه مناسبی برای بررسی و ارزیابی ضرایب مؤثر در فرسایش خاک در مناطق کوهستانی است. در این مطالعه حوزه آبریز با مساحتی حدود ۱۰۰ هزار کیلومتر مربع (تقریباً برابر با مساحت استان اصفهان) با موقعیت مکانی نمایش داده شده در شکل (۱)، انتخاب شده است.

معرفی مراحل محاسباتی

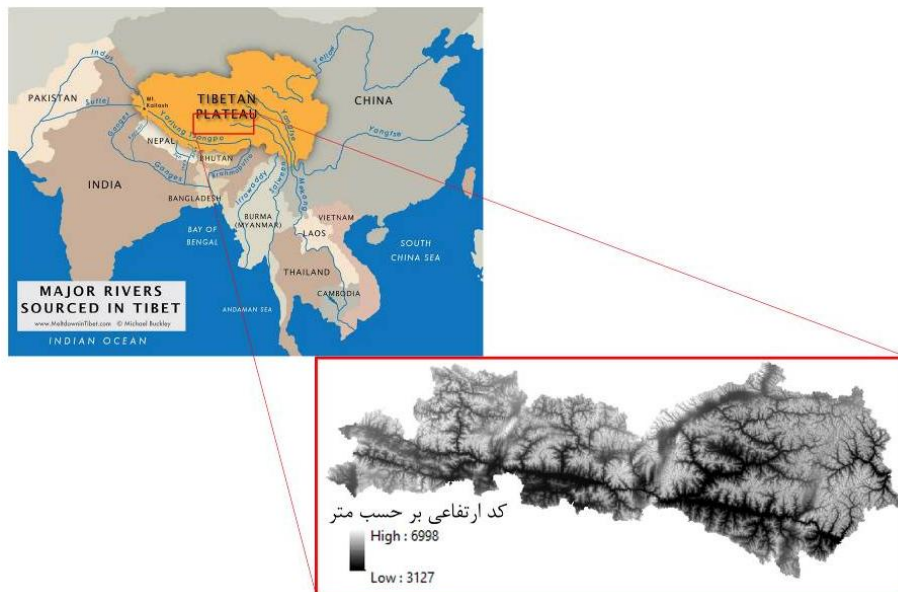
در این تحقیق به‌منظور محاسبه میزان فرسایش خاک، از مدل USLE استفاده شده است. این مدل کاربرد وسیعی در اغلب مناطق با کاربری‌های متنوع دارد. در این مدل می‌توان ورودی‌های مورد نظر را با نرم‌افزار ArcGIS پردازش کرد و خروجی را به‌صورت گرافیکی ارائه کرد. کاربرد این مدل از قدیم مرسوم بوده است و به‌کارگیری آن در این تحقیق به‌منظور بررسی محدودیت‌های احتمالی آن در مناطق کوهستانی است. پیشنهاد کاربرد مدل USLE مربوط به بیش از ۴۰ سال پیش است که ویشمایر و اسمیت (۴۷)، با بررسی ۴۰ هزار رگبار با ماکزیمم مدت ۳۰ دقیقه و دوره برگشت ۲ سال، فرسایش‌پذیری خاک را بر اساس طول و شیب‌ها و پوشش‌های متنوع

در مناطق کوهستانی فلات تبت مشغول به انجام پروژه راه ایریشم (مورد حمایت وزارت علوم و معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری ایران) بوده‌اند. در این پژوهش، سعی بر آن است که با بررسی معادله USLE و مقایسه آن با داده‌های اندازه‌گیری شده واقعی، نقشه توزیع فرسایش خاک در قسمتی از فلات تبت، تهیه شود و محدودیت‌های معادله USLE در مناطق کوهستانی، مورد بحث و ارزیابی قرار بگیرد. در این پژوهش، با تحلیل‌های متفاوت تصاویر ماهواره‌ای از پوشش گیاهی، توزیع پوشش گیاهی و نوع آن مورد توجه بیشتر قرار گرفته و در نهایت تعیین فاکتور کلیدی فرسایش از جمله اهداف تحقیق حاضر به‌شمار می‌رود. نتایج حاصل از این مطالعات قابل تعمیم به مناطق کوهستانی ایران نیز است.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق، قسمتی از فلات تبت، با ارتفاع میانگین ۴۹۰۰ متر از سطح دریا مورد مطالعه قرار گرفته است (۱۵). تبت منطقه‌ای خودگردان در کشور چین است و سرچشمه رودخانه‌های سرشناسی همچون ایندوس، یانگتسه، زرد و یانگ پو است (۱۶). این منطقه در جنوب غربی چین واقع شده و از سمت غرب با هند، از جنوب غربی با نپال و از سمت جنوب شرق با برمه و بوتان مرز مشترک دارد. فلات تبت مرتفع‌ترین فلات در دنیاست و رشته کوه هیمالیا در این منطقه قرار دارد. کوه‌هایی مثل اورست (۸۸۵۰ متر)، ماکالو (۸۴۸۱ متر) و بسیاری از کوه‌های مرتفع در این سرزمین قرار دارند. این منطقه به‌خاطر ارتفاع زیاد اغلب سرد و لم یزرع است و پوشش آن در بسیاری از مناطق یخچال و بوته‌زارهای کوتاه بومی است. ارتفاع متوسط آن را (۴۹۰۰ متر) می‌توان با ارتفاع قله دماوند (۵۶۴۰ متر از سطح دریا) مقایسه کرد. در این تحقیق قسمتی از مناطق شیب دار فلات تبت (در بعضی مناطق با شیب بیش از ۴۰ درجه) و عرض شمالی ۲۸/۳۷ تا ۳۱/۱۰، طول شرقی ۸۶/۷۸ تا ۹۳/۵۲ و مساحت ۱۰۲ هزار کیلومتر مربع مورد مطالعه قرار گرفته است.



شکل ۱. منطقه مطالعاتی در فلات تبت چین (متوسط ارتفاع ۴۹۰۰ متر)

ادامه مبحث تعریف و تفسیر شده‌اند و در نهایت این لایه‌ها پس از پردازش با ArcGIS با هم تلفیق شده و نقشه نهایی فرسایش خاک، حاصل می‌شود.

روش برآورد عامل فرساینده باران (R)

پارامتر (R)، قدرت فرسایش یک باران مشخص را تعیین می‌کند. در اغلب معادلات برآورد عامل فرساینده باران، از شاخص اصلاح شده فورنیه (F) استفاده می‌شود و در بسیاری از روابط شدت بارندگی ۹۰ دقیقه‌ای ملاک سنجش است. از پارامتر R در بسیاری از مطالعات هیدرولوژیکی مانند برآورد سیل، لغزش زمین و مدیریت زمین‌های کشاورزی استفاده می‌شود. روش‌های ساده‌ای همچون دواتا، که ضریب (R) را معادل نیمی از میانگین بارندگی سالیانه برآورد کرده است، در سال‌های پرباران، ضریب مخرب‌تری را برآورد می‌کند. سایر روابط محاسبه ضریب فرساینده باران، در جدول (۱) خلاصه شده است.

در این تحقیق از داده‌های باران نگارهای ثبت شده در ۱۹ ایستگاه باران‌سنجی در دوره آماری ۳۰ ساله، استفاده شد، موقعیت این ایستگاه‌ها، به صورت ستاره روی شکل ۲ و سایر

طرح‌های آزمایشی بررسی و رابطه زیر را ارائه کردند:

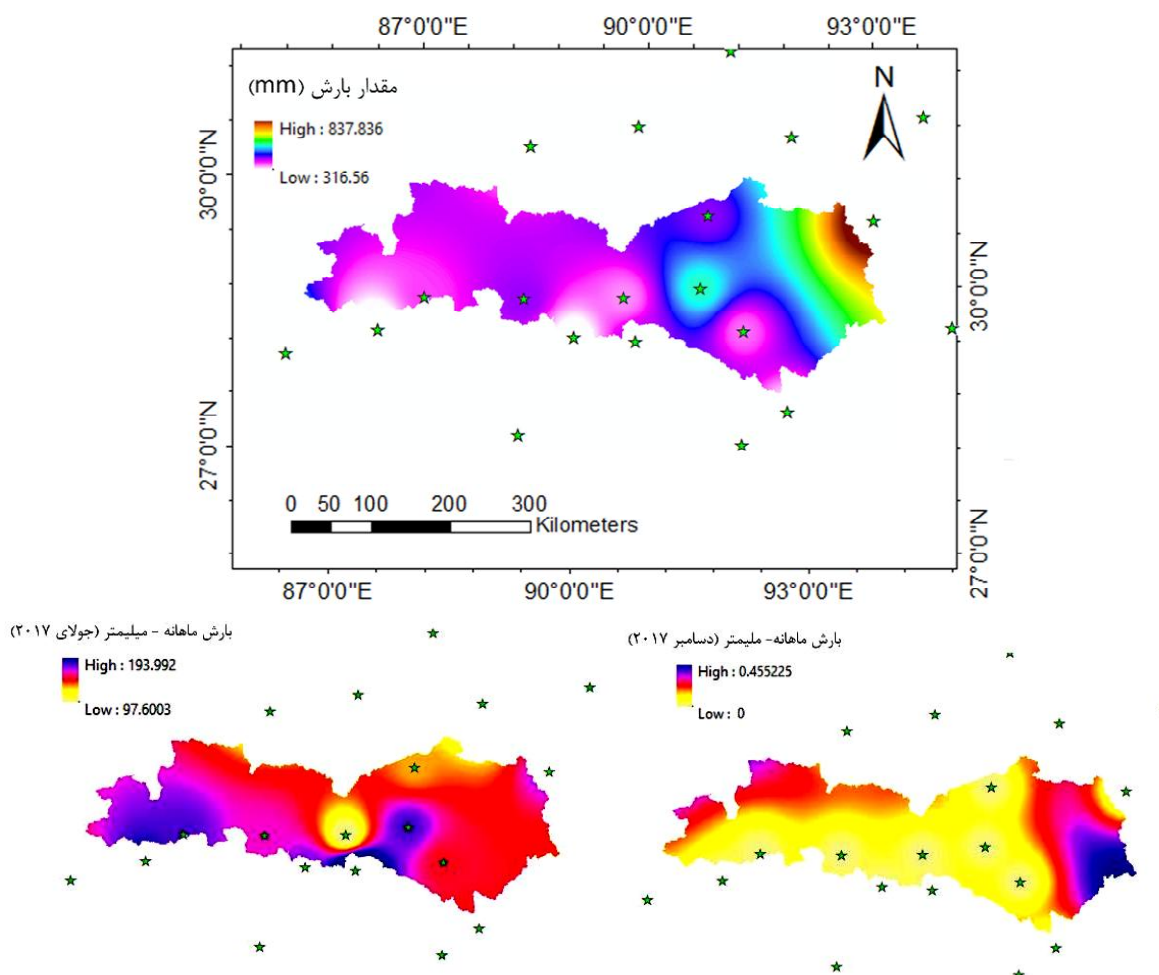
$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

این رابطه که معروف به USLE است از ترکیب شش عامل برای پیش‌بینی تلفات خاک تشکیل شده است. مقدار A معرف تلفات سالیانه خاک در فرسایش ورقه‌ای و شیاری در واحد سطح (تن در هکتار)، عامل فرساینده باران $(MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1})$ ، K عامل فرسایش‌پذیری خاک $(t \text{ ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1})$ ، L عامل طولی شیب، S عامل درجه شیب، C ضریب پوشش گیاهی و P ضریب عملیات مدیریتی و حفاظتی حوضه است. در معادله فوق، C، S، L و P بدون واحد هستند (۲۱، ۴۴). در این مدل برای یک منطقه مشخص حتی در درازمدت پارامترهای مربوط به درجه شیب، طول شیب و فرسایش‌پذیری خاک تغییر چندانی ندارند و فرسایش اغلب تحت تأثیر عوامل اقلیمی مانند بارش و عوامل انسانی دخیل در حفاظت خاک و تغییر پوشش گیاهی است (۱۱). به‌منظور محاسبه پارامتر A و تهیه نقشه‌های کیفی مناطق حساس و فرسایش‌پذیر منطقه مطالعاتی، به‌ترتیب مراحل آماده‌سازی داده‌های ورودی به نرم‌افزار GIS انجام می‌شود. این داده‌ها، شامل ۶ لایه R، C، S، L، K و P بوده که هر یک به‌صورت مجزا در

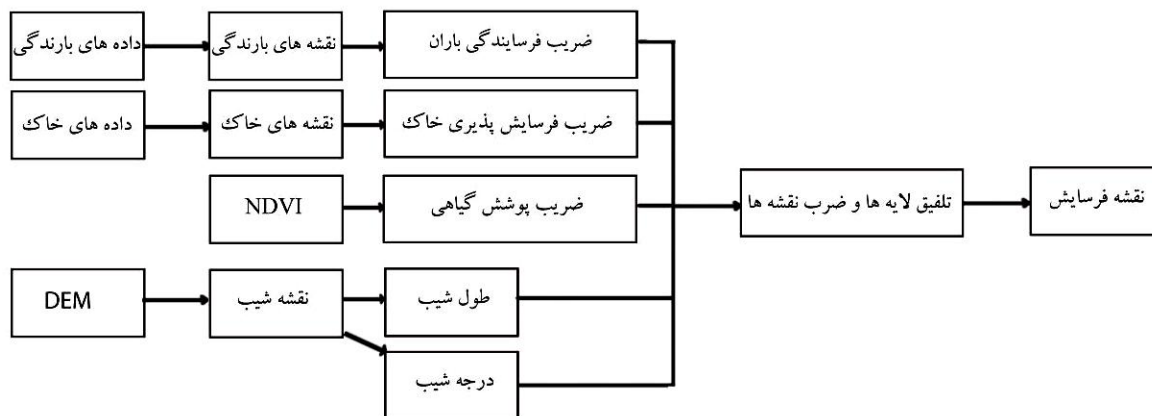
جدول ۱. روش‌های برآورد فاکتور فرسایشی باران با استفاده از عمق متوسط بارش (mm) در بلندمدت (۳، ۵، ۱۸، ۳۰، ۴۳ و ۴۴)

معادله ضریب فرسایشی باران (R) برحسب مقدار متوسط بارش (mm)	منابع
$R = -3172 + 7.562P$	میخالف و همکاران (۳۰)
$R = 0.5 \times \bar{P}$	دواتا (۳)
$R = -944 + 3.08P$	توری و همکاران (۴۳)
$R = 0.04830P^{1.510}$	رنارد- فریموند (۳۷)
$R = 0.0438P^{1.61}$	یو - روزول (۴۹)
$R = \frac{2.5P^2}{100(0.073P + 0.73)}$	بولز (۲) و ته (۴۰)
$R = 5.249 * F^{1.205}$ و $F = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{P_i}{P} \right) \times P_i$ *	دونگ می (۵)

*: در معادله دونگ می P_i معرف عمق بارش ماهانه (mm) است.



شکل ۲. موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی در منطقه و متوسط بارش سالیانه و ماهانه (حداکثر و حداقل) در سال ۲۰۱۷ (ستاره‌ها معرف ایستگاه‌های باران‌سنجی در منطقه مورد مطالعه هستند).



شکل ۳. روندنمای روش انجام تحقیق (از چپ به راست)

شده توسط شارپلی و ویلامز (۳۹) در معادله (۲)، مقدار عامل فرسایش پذیری خاک برحسب $(ha MJ mm)^{-1} * (t ha h)$ به دست آمد. در این معادله، San معرف درصد ماسه، Sil معرف درصد سیلت، Cly معرف درصد رس و C معرف درصد مقدار ارگانیک موجود در خاک است (۲۳ و ۴۴). مقادیر این پارامترها با استفاده از نقشه‌های ارائه شده توسط وزارت نیرو کشور چین در نرم‌افزار ArcGIS استخراج و سپس در محاسبات مربوطه مورد استفاده قرار گرفته است.

$$K_{epic} = \left[0.2 + 0.3 \exp \left(-0.0256 \times \text{San} \frac{1 - \text{Sil}}{100} \right) \right] \times \left(\frac{\text{Sil}}{\text{Cly} + \text{Sil}} \right)^{0.3} \times \left(1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right) \times \left(1 - \frac{0.7\text{SNi}}{\text{SNi} + \exp(-5.51 + 22.9\text{SNi})} \right)$$

$$\text{SNi} = 1 - \frac{\text{San}}{100}$$

$$K = (0.51575K_{epic} - 0.01383) \times 0.1317 \quad (2)$$

روش برآورد عامل طول شیب (L) و درجه شیب (S)

این دو پارامتر، از نقشه‌های رقومی ارتفاعی استخراج می‌شوند و مطابق مطالعات هان - بارفیلد، افزایش طول و شیب سبب افزایش فرسایش خاک می‌شود. در این تحقیق از رابطه رنارد و همکاران برای محاسبه S و L استفاده شده است که در آن تتا، شیب زمین برحسب درجه است (۱۲، ۱۴ و ۴۵). عامل طولی

شکل‌ها نشان داده شده است. با به‌کارگیری معادله دونگ‌می، ابتدا شاخص اصلاح شده فورنیه (F) بر اساس میزان بارش ماهیانه در سال ۲۰۱۷ برآورد شده و سپس مقدار عامل فرساینده گی (R) $(MJ mm ha^{-1} h^{-1})$ ، محاسبه شده است. نقشه نهایی عامل فرساینده گی (R) در قسمت نتایج و در شکل (۳) ارائه شده است. پراکنده گی بارندگی سالانه بلندمدت در طول دوره آماری ۳۰ ساله در منطقه مورد مطالعه در شکل (۲) به صورت نقشه بارندگی منطقه و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی نشان داده شده است. حداکثر بارش ماهانه در سال ۲۰۱۷ نیز مربوط به ماه جولای با مقدار حداکثر ۱۹۴ میلی‌متر و حداقل بارش زیر یک میلی‌متر در ماه دسامبر گزارش شده است.

روش برآورد عامل فرسایش پذیری خاک (K)

عامل فرسایش پذیری خاک به نوع خاک، نفوذپذیری و میزان مواد آلی خاک وابسته است و معادلات متعددی برای برآورد مقاومت آن در برابر جابه‌جایی ارائه شده است (معادلات ویشمایر، کراس، جانسون). چنانچه خاکی در مقابل فرسایش مقاوم‌تر باشد، اعداد کوچک‌تری را به آن نسبت می‌دهند، چنانچه دامنه تغییرات آن برای خاک‌های مقاوم تا بسیار سست حدود ۰/۰۲ تا ۰/۶۹ و یا ۰/۰۱ تا ۰/۷ طبق نشریه خاکشناسی فائو که در مرجع (۱۱) نیز ارائه شده، گزارش شده است. در این پژوهش، بر اساس نقشه بافت خاک و روش معرفی

جدول ۲، روابط برآورد ضریب C بر اساس NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) - (۱۹، ۲۴، ۳۲ و ۴۸)

$C = (-1 \times NDVI) + 0.5$	دوریگون و همکاران (۶)
$C = (-1.21 \times NDVI) + 1.0$	پتیل و شرما (۳۳)
$C = \exp\left(-\alpha \cdot \frac{NDVI}{\beta - NDVI}\right)$	وندر نیف (۴۴) مقادیر آلفا و بتا به ترتیب ۲ و ۱ پیشنهاد شده‌اند
$C = \left(\frac{1 - NDVI}{2}\right)^{1 + NDVI}$	لین (۲۴)
$f = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$	
$f = \begin{cases} 1 & f = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \log(f) & 0 < f \leq 0.783 \\ 0 & f > 0.783 \end{cases}$	فو و همکاران (۱۰)، فنگ و شو (۹)

جدول‌های راهنمای تعیین ضریب C که در سال ۲۰۱۲ توسط رابرت ارائه شده است، معیار مناسبی برای تخمین این پارامتر بر اساس نوع گیاه و روش خاکورزی است. فاکتور پوشش گیاهی معمولاً بر اساس معادلات تجربی متعددی و با به‌کارگیری از روش‌های تلفیقی سنجش از راه دور، برآورد می‌شود که به تعدادی از این معادلات در جدول (۲)، اشاره شده است.

با افزایش سطح پوشش سطح خاک، مقدار فاکتور C به صفر می‌رسد. عامل C در مناطق مختلف، متفاوت است. این مقادیر را می‌توان با استفاده از معادلات تجربی حاوی کلاس‌های پوشش زمین برآورد کرد یا می‌توان آن را با روش سنجش از دور و تکنیک‌های GIS پیش‌بینی کرد (۳۸). داده سنجش از دور برای بازسازی تغییرات زمانی عامل C مفید است. در این پژوهش شاخص پوشش گیاهی طبیعی (NDVI) از تصاویر ماهواره‌ای که برای استخراج پوشش زمین استفاده می‌شود، استخراج شد و از این روش برای محاسبه پوشش و ضریب C استفاده شد. در تفسیر خروجی‌های NDVI، نوع پوشش گیاهی، مرحله رشد گیاه و درصد پوشش گیاهی تأثیر بسیار زیادی در برآورد C دارد (۹، ۲۷، ۳۲ و ۳۳). اگرچه نتایج حاصل از معادلات مندرج در جدول (۱)، در مناطق جغرافیایی مختلف متفاوت است ولی در همه آنها NDVI از منفی یک (-۱) برای مناطق آبگیر تا مثبت یک (+۱) برای مناطقی با پوشش گیاهی

شیب، مسیر جریان آب از ابتدای شروع رواناب تا نقطه خروجی است و برای محاسبه آن به پارامترهای متعددی همچون θ (شیب هر سلول)، D_i (طول هر سلول) و λ (نقشه تجمع‌ی جریان آب) وابسته است. دقت نقشه رقومی ارتفاعی در تخمین دو پارامتر L و S بسیار مؤثر است. در این تحقیق از نقشه DEM ۳۰ متری استفاده شده است که به نسبت وسعت منطقه ۱۱۰ هزار کیلومتر مربعی، مقیاس به نسبت مناسبی است.

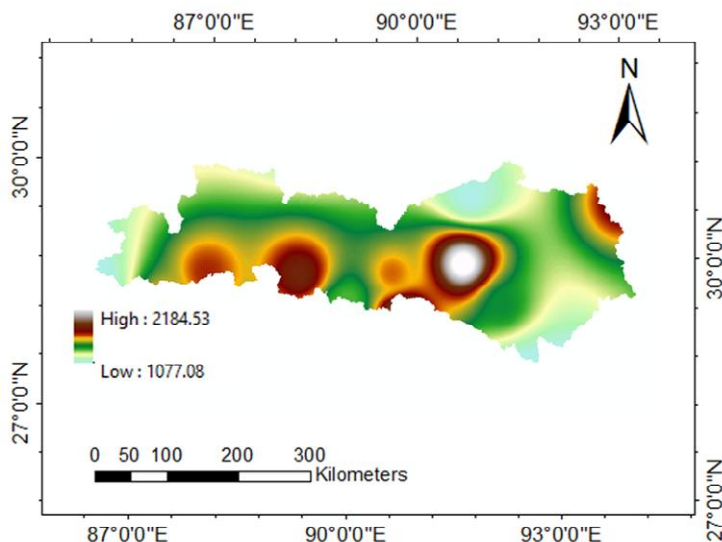
$$S = \begin{cases} 3.85 \sin \theta + 0.011 & \theta < 5 \\ 4.4 \sin \theta + 0.131 & 5 \leq \theta < 10 \\ -0.003\theta^2 + 0.144\theta - 0.274 & 10 \leq \theta < 34.8 \\ 21.91 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 34.8 \end{cases} \quad (۳)$$

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m, \quad \lambda = \frac{D_i}{\cos \theta}, \quad m = \frac{\beta}{1 + \beta}, \quad (۴)$$

$$\beta = \frac{\sin \theta}{0.089 \times [3(\sin \theta)^{0.8} + 0.56]}$$

روش برآورد ضریب پوشش گیاهی (C)

ضریب پوشش گیاهی، عاملی است که در مناطق مختلف با گیاهان متفاوت و در فصول مختلف با دوران رشد متغیر گیاهان، تغییر می‌کند. این ضریب در مقیاس‌های کوچک از جدول استخراج می‌شود. معمولاً برای دریاچه‌ها صفر، برای مناطق جنگلی ۰/۰۰۱ و برای اراضی کشاورزی ۰/۳۴ در نظر گرفته می‌شود. با افزایش تراکم پوشش گیاهی، مقدار C به صفر نزدیک‌تر می‌شود.



شکل ۴. نقشه رستری عامل فرساینده‌گی باران (۱ km در ۱ km) - تبت ۲۰۱۷

تلفیق لایه‌ها و تهیه نقشه فرسایش خاک (A) پس از تهیه لایه‌ها و طبقه‌بندی هر کدام از آنها مطابق روندنمای ارائه شده در شکل (۳)، لایه‌ها با یکدیگر تلفیق شده و در نهایت نقشه فرسایش با رویهم‌گذاری لایه‌های مذکور و ضرب آنها توسط دستورهای GIS تهیه شده و به کلاس‌های مختلف طبقه‌بندی و رنگ‌بندی می‌شوند.

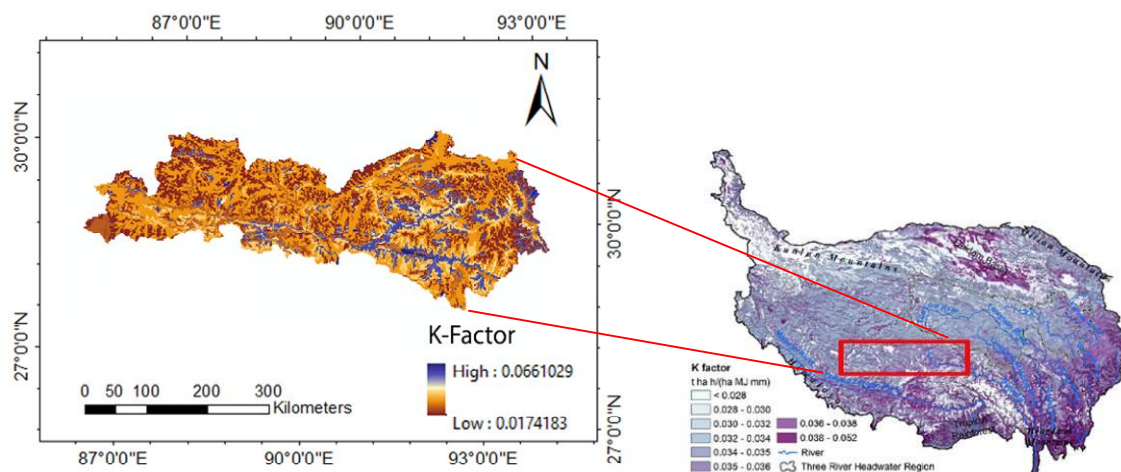
نتایج

بررسی ضرایب مؤثر در برآورد رسوب با استفاده از روش USLE
شاخص اصلاح شده فورنیه و مقادیر فرساینده‌گی باران بر اساس معادله دونگ می‌محاسبه شده است (۵). این شاخص بر اساس داده‌های آماری ۱۹ ایستگاه هواشناسی و بارندگی ماهیانه بلندمدت ۳۰ ساله، استخراج شد و در نهایت داده‌های مربوط به R برای سال ۲۰۱۷، به صورت نقشه‌های GIS در شکل (۴)، نشان داده شده است. در این پژوهش، کلیه ضرایب از نقشه‌های با کیفیت بالای DEM (۳۰ متر)، نقشه خاک (۵۰۰ متر) و پوشش گیاهی (۲۵۰ متر) تهیه شده و نتایج به صورت نقشه‌های ۱ کیلومتری نمایش داده شده است.
مقدار ضریب R، از ۱۰۷۷ تا ۲۱۸۴ ($\text{MJ mm ha}^{-1}\text{h}^{-1}$)

سبز، متغیر است. عدد صفر در NDVI مربوط به زمین‌های لخت و بدون پوشش گیاهی است. در این پژوهش، به منظور بررسی تأثیر کلیدی پوشش‌های گیاهان بومی در منطقه کوهستانی فلات تبت، از همه مدل‌های ارائه شده در جدول (۱) برای برآورد C، استفاده شده است.

روش برآورد عامل حفاظت خاک (P)

کنترل رواناب و جلوگیری از فرسایش خاک، اغلب با ایجاد تغییرات نحوه شخم زدن، خاک‌ورزی، کشت روی خطوط تراز، درختکاری و ترانس‌بندی به نحو مطلوبی مدیریت شده و تمامی این فرایندها به عنوان عملیات حفاظتی خاک معرفی می‌شود. چنانچه منطقه مطالعاتی روند بسیار مشخصی را برای عملیات حفاظتی خاک معرفی نکرده باشد، می‌توان ضریب P را یک در نظر گرفت. در مناطق شیب‌دار برآورد مناسبی از پارامتر P بسیار مهم است ولی در این تحقیق به علت عدم وجود اطلاعات مناسب و عدم مشاهده بارز اقدامات حفاظتی خاک در منطقه، این پارامتر یک در نظر گرفته شده است. با کاهش ضریب P، قدرت فرساینده‌گی آب و ظرفیت حمل رسوبات کمتر شده و مقدار آن را بر اساس طبقه‌بندی جدول‌های مندرج در منابع مختلف می‌توان تخمین زد (۳۶ و ۳۷).



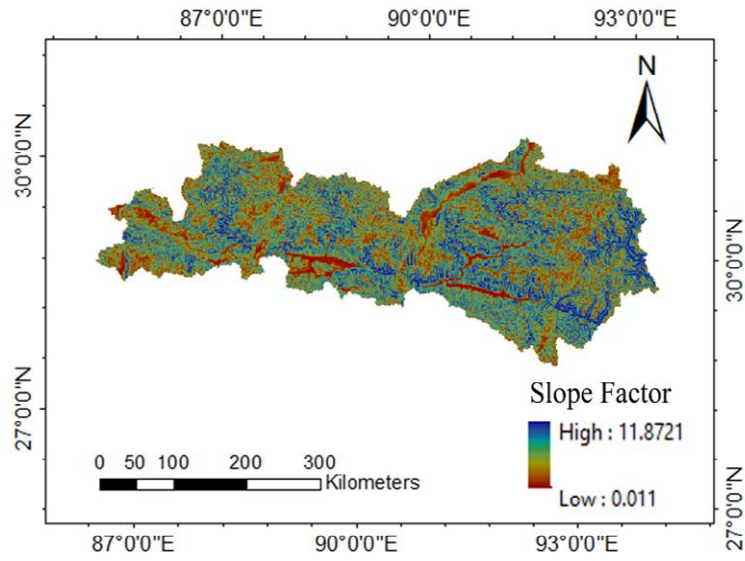
شکل ۵. نقشه رستری عامل فرساینده گی خاک (۱ km در ۱ km) در مقایسه با مطالعات انجام شده در تبت (۲۰۱۷)

نقشه توپوگرافی منطقه مورد مطالعه به منظور ایجاد نقشه طول شیب و درجه شیب، با کیفیت ۳۰ متر در ۳۰ متر مورد تحلیل و آنالیز قرار گرفت. مقدار ضریب شیب در منطقه از ۱۱/۸٪ با ۱۱/۸٪ متغیر است و مقدار بالای این ضریب مربوط به مناطق کوهستانی با شیب بالای ۶۰ درجه است. نقشه رستری عامل درجه شیب در شکل (۶) نشان داده شده است. همچنین در شکل (۷)، عامل طولی شیب از مقدار ۱ برای آبراه‌ها و مناطق پست تا مقدار ۱۸/۳ برای مناطق کوهستانی و مرتفع متغیر است. بررسی ضریب پوشش گیاهی بر اساس روش‌های مختلف برآورد ضریب C با استفاده از شاخص NDVI که بیشتر در جدول (۱)، شرح داده شده بود، نقشه‌های شکل (۸)، ارائه شده است.

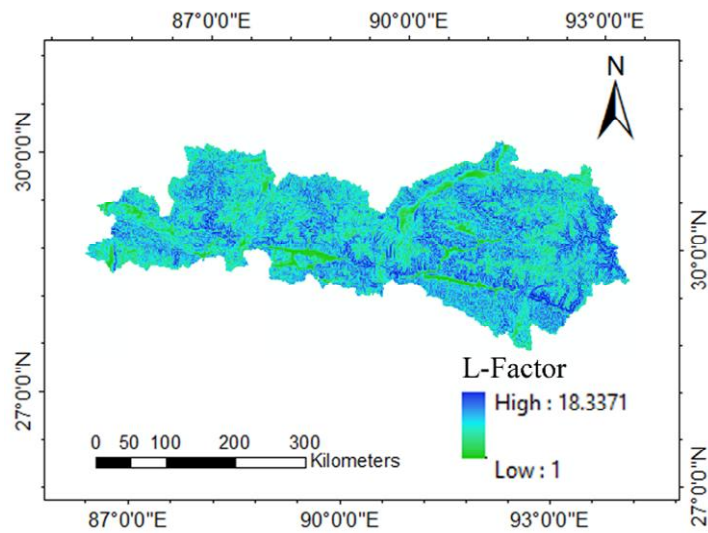
در ضریب C برآورد شده از همه روش‌های تخمین ضریب پوشش گیاهی با بهره‌گیری از تصاویر NDVI، بیشترین مقادیر C، مربوط به مناطق غربی تبت و ناحیه شمالی است. تقریباً در تمام روش‌های لین، ژو، پتیل و شرما، دوریگون و فو، تصاویر برآورد شده C، تا حد زیادی مشابهت داشته و در همین مناطق مطابق آنچه در شکل (۹) نشان داده شده است، بیشترین ضریب پوشش گیاهی مربوط به قسمت‌های بسیار مرتفع با کد ارتفاعی بیش از ۶۰۰۰ متر بالاتر از سطح دریا و نیز مناطق سنگی و کوهستانی است.

متغیر بوده و مقدار متوسط و انحراف معیار آن به ترتیب ۱۴۱۲ و ۱۸۱ است. در قسمت مرکزی حوضه مورد مطالعه ضریب فرساینده گی باران که مقدار بارندگی بیشتری دارد، بزرگ‌تر بوده که با رنگ سفید نشان داده شده است. در محاسبات ضریب R، توسط تنگ و همکاران (۴۱)، روش‌های دیگری برای استخراج این پارامتر استفاده شد که نتایج گرافیکی حاصل از آن دامنه ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ را نشان می‌دهد و با نتایج حاصل بسیار مشابهت دارد (۴۱) و (۴۲).

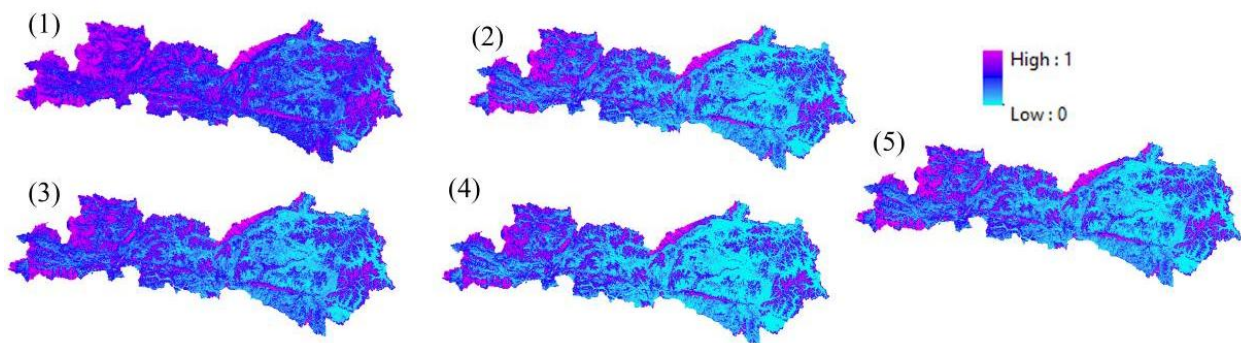
مقدار K در شکل (۵)، نشان داده شده است. میزان فرسایش پذیر خاک، از ۰/۰۱۷ تا ۰/۰۶۶ $(t\ ha\ h\ ha^{-1}MJ^{-1}mm^{-1})$ متغیر بوده و در قسمت‌هایی که مسیر آبراهه را نشان می‌دهد، مقادیر K، حاکی از مقاومت کمتر خاک نسبت به سایر مناطق کوهستانی است. این نتایج مشابه مطالعات لیو و همکاران (۲۳) و تنگ و همکاران (۴۲) است. در این تحقیقات میانگین ضریب K در فلات تبت، ۰/۰۳ ارائه شده است که با مطالعات حاضر با متوسط $0.25\ t\ ha\ h\ ha^{-1}MJ^{-1}mm^{-1}$ (۴۱ و ۴۲) مشابهت دارد (۴۱ و ۴۲). لازم به ذکر است، خاک‌هایی با ارزش $(K > 0.22)$ به عنوان خاک‌های غیرمقاوم در برابر فرسایش گزارش شده که به راحتی با رواناب سطحی جدا می‌شوند.



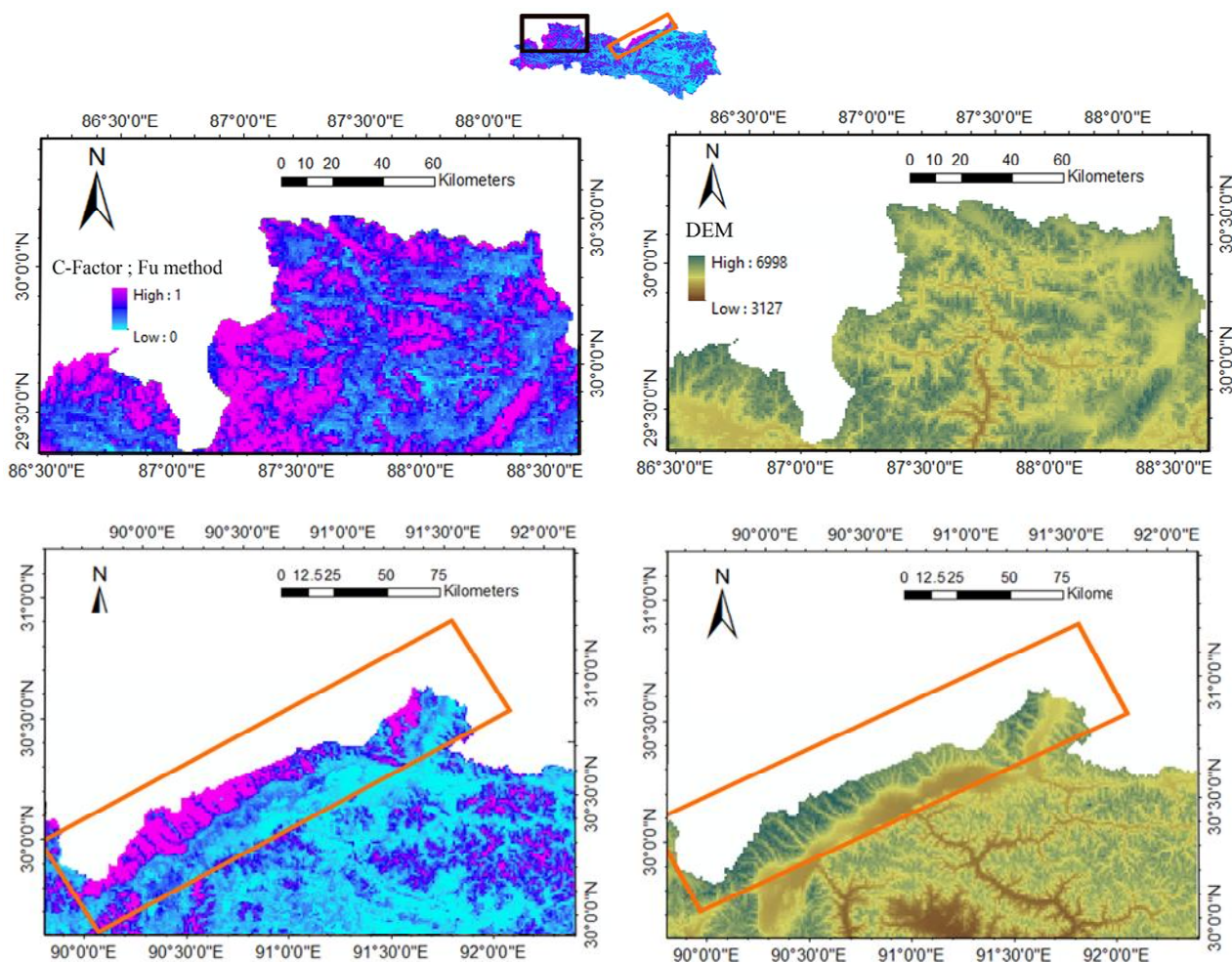
شکل ۶. نقشه رستری عامل درجه شیب - تبت



شکل ۷. نقشه رستری عامل طولی شیب - تبت



شکل ۸. نقشه رستری ضریب پوشش گیاهی برآورد شده به پنج روش مختلف: (۱) دوریگون، (۲) لین، (۳) پتیل، (۴) ژو و (۵) فو



شکل ۹. نقشه رستری حداکثر ضریب پوشش گیاهی برآورد شده در مقایسه با حداکثر کدهای ارتفاعی (در منطقه شمال غربی و شمالی)

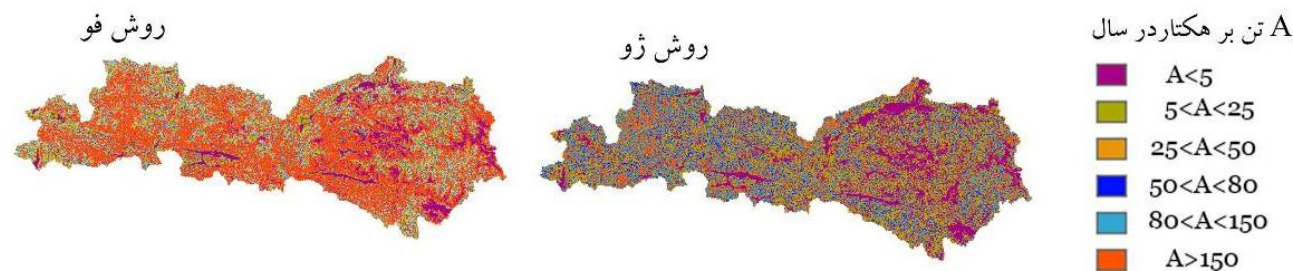
بررسی نقشه‌های مناطق فرسایش‌پذیر

بر اساس استاندارد تعیین شده توسط وزارت نیرو در کشور چین و بر اساس آنچه در مطالعات تنگ و همکاران (۴۱) ارائه شده است، مقدار فرسایش بر اساس تن بر هکتار در سال، به ۶ دسته: (۱) فرسایش جزئی، (۲) فرسایش کم، (۳) فرسایش متوسط، (۴) فرسایش زیاد، (۵) فرسایش بسیار زیاد (Extremely intense) و (۶) فرسایش خطرناک (Severe)، تقسیم‌بندی می‌شود (۳۶). بر اساس روش USLE، می‌توان از روش‌های مختلف NDVI برای تخمین پارامتر C، استفاده کرد. در اغلب روش‌ها، نقشه‌های رستری تولید شده فرسایش خاک (شکل ۱۰) از روش‌های مختلف ژو (۵۱)، دوریگون (۶) و لین (۲۶ و ۲۷) با یکدیگر مشابهت داشته ولی در روش فو (۱۰) و پتیل و شرما (۳۳) درصد بیشتری از منطقه

مطالعاتی، در دامنه فرسایش پرخطر قرار گرفته است.

درصد مساحت اشغال شده از هر کلاسه‌بندی، در جدول (۳)، برای روش‌های مختلف خلاصه شده است. در روش فو و پتیل - شرما، به نظر می‌رسد که ضریب C برآورد شده از نقشه‌های هوایی NDVI، مقادیر بسیار بزرگ‌تری را تخمین می‌زند، و نزدیک به نیمی از مساحت منطقه مطالعاتی را در منطقه پرخطر فرسایشی برآورد می‌کند این در حالی است که درصد مناطق پرخطر در سایر روش‌ها، حدود ۱۲ درصد است.

تعیین بهترین روش برآورد ضریب پوشش گیاهی با توجه به نتایج بسیار متفاوت نقشه‌های برآورد فرسایش خاک، بدون بهره‌گیری از نتایج سایر پژوهشگران که با بازبندی منطقه را مورد مطالعه قرار داده‌اند میسر نیست. در بازبندی‌های



شکل ۱۰. نقشه رستری کلاسه‌بندی فرسایش پذیری خاک بر اساس روش‌های مختلف برآورد C و NDVI

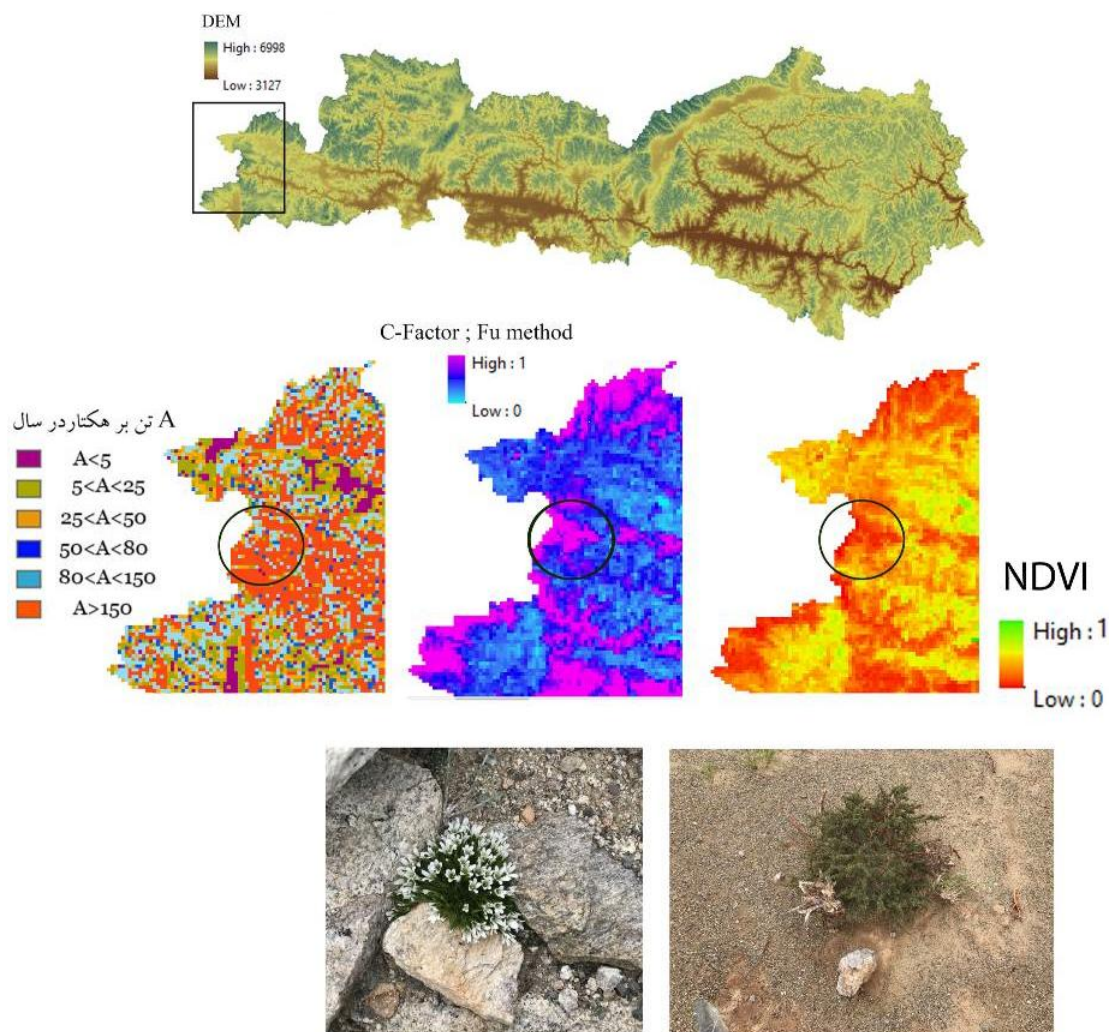
جدول ۳. درصد مساحت اشغال شده در هر کلاسه‌بندی فرسایش بر اساس روش‌های مختلف تخمین C

درصد مساحت اشغال شده در هر کلاسه‌بندی فرسایش						روش برآورد
فرسایش خطرناک	فرسایش بسیار زیاد	فرسایش زیاد	فرسایش متوسط	فرسایش کم	فرسایش جزئی	رسوب
۴۸/۵	۱۶/۲۵	۵/۵	۱۰/۵	۹/۷۵	۹/۵	فو
۵۰	۱۸	۴	۱۱	۸	۹	پتیل - شرما
۱۱	۱۶	۱۲	۱۶	۲۶	۲۰	ژو
۱۲	۱۴	۱۴	۱۵	۲۷	۱۸	دوریگون
۱۳	۱۶	۱۰	۱۶	۲۵	۲۰	لین
۲	۵	۱۶	۲۱	۲۸	۲۸	برآورد تجربی تانگ (۲۰۱۸)

می‌زند که با توجه به گیاهان بومی منطقه و بر اساس مطالعات تنگ در واقعیت فرسایش زیادی ندارند (۴۲).

مقدار متوسط فرسایش خاک در منطقه نشان داده شده در شکل (۱۱) با استفاده از روش "فو" حدود ۵۰ تن در هکتار بوده که با روش‌های اندازه‌گیری شده پژوهشگران چینی در سال ۲۰۱۸ که مقدار آن ۲/۷۶ تن بر هکتار ارزیابی شده، بسیار متفاوت است. بهره‌گیری از سایر معادلات مانند ژو، دوریگون و لین نتایج تا حد مقبول‌تری در تحلیل NDVI و برآورد رسوب ارائه می‌کنند. در این پژوهش گرچه هدف اصلی ارائه مقادیر کمی فرسایش خاک نیست ولی مطالعات نشان می‌دهد از بین سایر روش‌ها، روش‌های ژو، دوریگون و لین در تهیه نقشه‌های کمی فرسایش، نتایج بهتری از ضریب پوشش گیاهی ارائه می‌کنند. در منطقه فلات تبت مطالعات متنوعی از پژوهشگران چینی به زبان چینی درج شده است و اطلاعات بسیار اندکی به زبان انگلیسی موجود است. برآوردهای فرسایش این منطقه

میدانی، نوع پوشش گیاهی در منطقه فلات تبت و در ارتفاعات از مدل گیاهان بسیار کوتاه و چسبیده به خاک مانند گل‌سنگ بوده که با وجود ضخامت بسیار ناچیز خاک، روی صخره‌ها می‌روید و در حفاظت خاک این منطقه بسیار مؤثر است. اگرچه این مناطق با وضعیت پوشش گیاهی گفته شده، در نقشه‌های عکس‌های هوایی NDVI به‌عنوان مناطق لخت، در نظر گرفته می‌شوند (شکل ۱۱)، تحلیل‌های میدانی نشان می‌دهد که بر خلاف تصاویر برداشت شده با استفاده از روش فو و پاتیل - شرما، ضریب پوشش گیاهی، یک نیست و مقادیر فرسایش خاک بسیار ناچیز است. با توجه به شکل (۱۱)، در منطقه غربی مطالعاتی، نواحی مشخص شده در دایره، NDVI صفر، یعنی مناطقی بدون پوشش گیاهی را نشان می‌دهد که در تحلیل‌های تصاویر، این مناطق دارای ضریب C یک هستند. با استفاده از روش USLE، قسمت‌هایی از این مناطق نشان داده شده، برآورد حداکثر فرسایش بالغ بر ۱۵۰ تن بر هکتار در سال را تخمین



شکل ۱۱. نقشه رستری NDVI در مقایسه با ضریب پوشش گیاهی و کلاسه‌بندی فرسایش پذیری خاک

(عکس از دانشجوی ارشد مرکز تحقیقات محیط زیست سیچوان)

به‌کارگیری روش‌های متفاوت تخمین R ، K ، C ، L و S و مقایسه آن با نتایج سایر پژوهشگران چینی در منطقه فلات تبت، به بررسی میزان فرسایش خاک و مناطق فرسایش‌پذیر پرداخته شده است. به نظر می‌رسد که انتخاب روش‌های مختلف برآورد پارامترهای (R ، K ، L و S) به اندازه تأثیر پارامتر C در تعیین فرسایش در مناطق کوهستانی، آنچنان مهم و کلیدی نباشد. در اغلب روش‌های تخمین C ، از نقشه‌های هوایی NDVI استفاده می‌شود که فقط با تیره و روشن بودن بعضی از سلول‌ها به درجه کیفیت پوشش گیاهی می‌توان پی برد ولی این درجه از سنجش، برای مناطق کوهستانی که اغلب از برف پوشیده شده‌اند، چندان مناسب نیست. زیرا سفید بودن

کوهستانی و مقایسه آن با سایر مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که مقادیر C در برآورد رسوب بسیار کلیدی عمل کرده و سنگی و صخره‌ای بودن منطقه که باعث کاهش فرسایش خاک می‌شود، در این پارامتر لحاظ نشده است.

جمع‌بندی و بررسی نقاط ضعف روش USLE در برآورد رسوب

روش USLE یکی از پرکاربردترین روش‌های برآورد رسوب در اکثر تحقیقات است. از آنجایی که حفاظت خاک به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم در اقتصاد یک کشور تأثیرگذار است، در این پژوهش با

پیشنهاد می‌شود که تخمین رسوب با استفاده از تصاویر NDVI برای برآورد ضریب پوشش گیاهی با احتیاط مورد استفاده قرار گیرد و برای مناطق کوهستانی و سنگی، زمانی USLE کاربرد خواهد داشت که ضریب دیگری برای مناطق سنگی در معادله اعمال شود. در این تحقیق نشان داده شد که معادلات فو و پتیل -شرما مناسب برآورد رسوب در مناطق کوهستانی نیستند و سایر معادلات مانند لین، ژو و دوریگون، چنانچه قرار است در مناطق با ارتفاع بیش از ۵۵۰۰ متر مورد استفاده قرار گیرند با اعمال ضریب ۰/۲ در پارامتر C تعدیل شوند تا نتایج مدل‌سازی، مشابهت بیشتری با واقعیت داشته باشد. پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آتی، نقشه‌های جنس خاک از نوع صخره‌ای و همچنین نقشه‌های مناطق پوشیده از برف، برای تفسیر مناسب‌تر نقشه‌های NDVI مورد ارزیابی قرار گیرد.

سپاسگزاری

نتایج حاصل از این تحقیق، برگرفته از مشارکت نویسندگان در پژوهش‌های مدیریت منابع آب در کشور چین است که بر اساس توافقنامه فی مابین معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری کشور ایران و وزارت علوم چین بنا نهاده شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند که از حمایت‌های بی دریغ وزارت علوم ایران و معاونت ریاست جمهوری در حمایت‌های مالی و معنوی این پژوهش تقدیر و تشکر نمایند. همچنین لازم است از دانشگاه فنی و مهندسی بوئین زهرا و دانشگاه بین‌المللی امام خمینی که نهایت مساعدت را برای حضور فعال نویسندگان در دوره ۶ ماهه به‌عمل آوردند، تقدیر و سپاسگزاری شود. این پژوهش در مرکز تحقیقات مخاطرات کوهستانی سیچوان و با حمایت‌های علمی پروفیسور فن، انجام شده و پروپوزال‌های متنوع و متعددی برای تکمیل تحقیقات مدیریت منابع آب و حفاظت خاک در فلات تبت در حال انجام است.

بعضی قسمت‌های نقشه، از نظر تحلیلی، معرف خاک لخت بوده و می‌تواند معرف فرسایش زیاد باشد و این در حالی است که سفیدی برخی قسمت‌های نقشه، در مناطق کوهستانی معرف مناطق پوشیده از یخبندان است و برآورد فرسایش آن با آنچه در مدل‌های جهانی است، متفاوت است. در این تحقیق نشان داده شد که روش‌های مختلف برآورد ضریب پوشش گیاهی، در یک منطقه سنگی با پوشش گیاهی بومی از نوع گلسنگ، مقادیر بسیار متفاوتی از فرسایش خاک را پیش‌بینی می‌کند. در بین روش‌های مختلف تخمین ضریب C از روی نقشه‌های NDVI، روش ژو، دوریگون و لین نتایج مقبول‌تری از واقعیت فرسایش رخ داده در منطقه ارائه می‌کند و نقشه‌های کیفی سنجش ریسک فرسایش تا حدی با هم شباهت دارند. این در حالی است که تخمین C از روش‌های فو و پتیل -شرما، حدود ۵۰ درصد از منطقه مطالعاتی را دارای فرسایش بسیار پرخطر نشان می‌دهد درحالی که در واقعیت چنین نیست. برای اطمینان از مناسب‌ترین روش تخمین فرسایش، نقشه‌های NDVI با چندین مدل پیشنهادی مورد بررسی و سنجش قرار گرفتند و خروجی‌ها با نقشه‌های برگرفته از کارهای تحقیقاتی تنگ در سال ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ که پارامتر C را با بازدیدهای میدانی و بر اساس نوع پوشش گیاهی صحت‌سنجی کرده بودند، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روش USLE در برآورد فرسایش مناطق کوهستانی پوشیده از برف، دارای محدودیت‌های بسیاری است. فرسایش برآوردی فقط متعلق به فرسایش سطحی خاک بوده و درصد سنگی بودن، پوشش برف و توزیع گیاهان بومی را در برآورد فرسایش در نظر نمی‌گیرد. همچنین پوشش برف که در اغلب نقاط منطقه مطالعاتی و برای کدهای ارتفاعی بیشتر از ۴۵۰۰ در نظر گرفته شده، در نقشه‌های NDVI به‌عنوان زمین لخت شناخته شده که با وجود لایه یخبندان و ممانعت در برابر فرسایش آبی خاک، از نظر معادلات برآوردی، دارای فرسایش بسیار زیاد برآورد می‌شود. لذا

منابع مورد استفاده

1. Akbari-Mejdar, H. and A. R. Bahremand. 2013. Comparison of erosion and sediment simulation method in SWAT and WetSpa models. *Journal of Conservation and Utilization of Natural Resources* 1(4): 63-77. (In Farsi).
2. Bols, P. 1978. The Iso-erodent map of java and madura. Belgian Technical Assistance project ATA 105. Soil Research Institute, Bogor.

3. Devatha, C. P., V. Deshpande and M. S. Renukaprasad. 2015. Estimation of soil loss using USLE model for Kulhan Watershed, Chattisgarh-A case study. *Aquatic Procedia* 4: 1429-1436.
4. Di Stefano, C. and V. Ferro. 2011. Measurements of rill and gully erosion in Sicily. *Hydrological Processes* 25(14): 2221-2227.
5. Dongmei, S., J. Dong, L. Xiping and J. Guangyi. 2008. Temporal distribution characteristics of rainfall erosivity in Fuling District, Chongqing. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 24(9): 16-21. (In Chinese)
6. Durigon, V. L., D. F. Carvalho, S. M. A. H. Antune, A. P. T. S. Oliveir and M. M. Fernandes. 2014. NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed. *International Journal of Remote Sensing* 35: 441-453.
7. Esmali-Ouri, A. and Kh. Abdollahi. 2011. Watershed and Soil Conservation. University of Mohaghegh Ardabili Press, Second Edition. (In Farsi).
8. Fathizad, H., H. Karimi and S. M. Alibakhshi. 2014. The estimation of erosion and sediment by using the RUSLE model and RS and GIS techniques (Case study: arid and semi-arid regions of Doviraj, Ilam Province, Iran). *International Journal of Agriculture and Crop Sciences* 7(6): 304-314.
9. Feng, Q and W. Zhao. 2014. The study on cover management factor in USLE and RUSLE. *Acta Ecologica Sinca* 34(16): 4461-4472. (In Chinese).
10. Fu, B., Y. Liu, Y. Lü, C. He, Y. Zeng and B. Wu. 2011. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. *Ecological Complexity* 8(4): 284-293.
11. Talebi Khayavi, H., M. Zabihi and R. Mostafazadeh. 2017. Effects of land-use management scenarios on soil erosion rate using GIS and USLE model in Yamchi dam watershed, Ardabil. *Journal of Water and Soil Science; (Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)* 21(2): 221-234. (In Farsi).
12. Haan, C. T., B. J. Barfield and J. C. Hayes. 1994. Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments. Academic Press, San Diego, California, USA.
13. Hengming, Z., W. Qingli, D. Limin, G. Shao1, T. Lina, W. Shunzhong and G. Huiyan. 2006. Quantifying soil erosion with GIS-based RUSLE under different forest management options in Jianchang Forest Farm, Series E. *Technological Sciences* 49: 160-166.
14. Hickey, R. 2000. Slope angle and slope length solutions for GIS. *Cartography* 29(1): 1-8.
15. <https://fa.wikipedia.org/wiki/%D8%AA%D8%A8%D8%AA>.
16. Immerzeel, W. W., L. P. Van Beek and M. F. Bierkens. 2010. Climate change will affect the Asian water towers. *Science* 328(5984): 1382-1385.
17. Jian, S., L. Yu, Z. Tiancai, L. Guohua and W. Jingsheng. 2019. Soil conservation service on the Tibetan Plateau, 1984-2013. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh* 109(3-4): 445-451.
18. Jung, P., M. Ko, J. Im, K. Um and D. Choi. 1983. Rainfall erosion factor for estimating soil loss. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 16(2): 112-118.
19. Kelsey, K. and T. Johnson. 2003. Determining cover management values (C factors) for surface cover best management practices (BMPs). In Proceedings of the International Erosion Control Association's 34th Conference: 319-328.
20. Haji, Kh., A. Esmali-Ouri, R. Mostafazadeh and H. Nazarnejad. 2018. Determining soil erosion rate in different landuses using RUSLE model in the Rozechai Watershed, Urmia, Iran. *Journal of Conservation and Utilization of Natural Resources* 7(1): 173-189. (In Farsi).
21. Lee, S. 2004. Soil erosion assessment and its verification using the universal soil loss equation and geographic information system: A case study at Boun, Korea. *Environmental Geology* 45: 457-465. <http://dx.doi.org/10.1007/s00254-003-0897-8>.
22. Lee, J. H. and J. H. Heo. 2011. Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea. *Journal of Hydrology* 409(1-2): 30-48.
23. Li, S., Z. Shi, S. C. Chen, W. J. Ji, L. Q. Zhou, W. Yu and R. Webster. 2015. In situ measurements of organic carbon in soil profiles using vis-NIR spectroscopy on the Qinghai-Tibet plateau. *Environmental Science and Technology* 49(8): 4980-4987.
24. Lin, C. Y., W. T. Lin and W. C. Chou. 2002. Soil erosion prediction and sediment yield estimation: the Taiwan experience. *Soil and Tillage Research* 68(2): 143-152.
25. Lin, L. L. and S. T. Chang. 2008. Study of soil erodibility factor estimation equations. *Journal of Chinese Soil and Water Conservation* 39: 355-366. (In Chinese)
26. Lin, W. T. 2002. Automated watershed delineation for spatial information extraction and slopeland sediment yield evaluation. Ph.D. dissertation, National Chung Hsing University, Taiwan. (in Chinese with English abstract).
27. Lin, W. T., C. Y. Lin and W. C. Chou. 2006. Assessment of vegetation recovery and soil erosion at landslides caused by a catastrophic earthquake: a case study in Central Taiwan. *Ecological Engineering* 28(1): 79-89.
28. Lo, A., S. A. EI-Swaify, E. W. Dangler and L. Shinshiro. 1985. Effectiveness of EI30 as an erosivity index in Hawaii. PP. 348-392. In: EI-Swaify, S. A., W. C. Moldenhauer and A. Lo (Eds.), Soil Erosion and Conservation. Soil Conservation Society of America. Ankeny, Iowa.

29. Maghsoudi, M., A. Goorabi and S. Darabi Shahmari. 2014. The study of effect of vegetation cover on the water erosion Case study: Razin Basin. *Environmental Erosion Research* 3(4): 43-57. (In Farsi).
30. Mikhailova, E. A., R. B. Bryant, S. J. Schwager and S. D. Smith. 1997. Predicting rainfall erosivity in Honduras. *Soil Science Society of America Journal* 61(1): 273-279.
31. Moore, I. D. and J. P. Wilson. 1992. Length-slope factors for the revised universal soil loss equation: simplified method of estimation. *Journal of Soil & Water Conservation* 47(5): 423-428.
32. Okorafor, O. O., C. O. Akinbile and A. J. Adeyemo. 2017. Determination of cover-crop management factor (C) for selected sites in imo state using Remote Sensing Technique and (GIS). *American Journal of Environmental Science and Engineering* 1(4): 110-116.
33. Patil, R. J. and S. K. Sharma. 2013. Remote Sensing and GIS based modeling of crop/cover management factor (C) of USLE in Shakker river watershed. In International Conference on Chemical, Agricultural and Medical Sciences (CAMS-2013) December 29-30.
34. Poesen, J. W., G. Verstraeten, L. Seynaeve and R. Soenens. 1999. Soil losses caused by chicory root and sugar beet harvesting in Belgium: importance and implications. In Sustaining the Global Farm. Selected Papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting, May: 24-29.
35. Prasannakumar, V., H. Vijith, S. Abinod and N. Geetha. 2011. Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geoinformation technology. *Geosci Frontiers* 3(2): 209-215.
36. Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool and D. C. Yoder .1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Agriculture Handbook No. 703. US department of Agriculture, Agricultural Research Service, Washington, District of Columbia, USA. 404.
37. Renard, K. G., D. K. McCool, K. R. Cooley, G. R. Foster, J. D. Istok and C. K. Mutchler. 1997. Rainfall-runoff erosivity factor (R). Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised soil Loss Equation (RUSLE). Agric. HB No. 703. USDA, Washington, DC, USA.
38. Rodda, H. J., S. Demuth and U. Shankar. 1999. The application of a GIS-based decision support system to predict nitrate leaching to groundwater in southern Germany. *Hydrological Sciences Journal* 44(2): 221-236.
39. Sharply, A. N. and J. R. Williams. 1990. EPIC-erosion/productivity impact calculator I, Model documentation. U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin, No. 1768
40. Teh, S. H. 2011. Soil erosion modeling using RUSLE and GIS on Cameron highlands, Malaysia for hydropower development (Doctoral dissertation).
41. TENG, H. F., H. U. Jie, Z. Yue, L. Q. ZHOU and S. H. I. Zhou. 2019. Modelling and mapping soil erosion potential in China. *Journal of Integrative Agriculture* 18(2): 251-264.
42. Teng, H., Z. Liang, S. Chen, Y. Liu, R. A. V. Rossel, A. Chappell, W. Yu and Z. Shi. 2018. Current and future assessments of soil erosion by water on the Tibetan Plateau based on RUSLE and CMIP5 climate models. *Science of the Total Environment* 635: 673-686.
43. Torri, D., L. Borselli, F. Guzzetti, M. C. Calzolari, P. Bazzoffi, F. Ungaro, D. Bartolini and M. P. Salvador Sanchis. 2006. Italy. PP. 245-261. In: Boardman, J. and J. Poesen, (Eds.), Soil Erosion in Europe. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, United Kingdom.
44. Van der Knijff, J. M., R. J. A. Jones and L. Montanarella. 2000. Soil Erosion Risk Assessment in Europe. Scientific-Technical Reports. European Commission, European Soil Bureau. Directorate General JRC, Joint Research Centre, Space Applications Institute. (June. 5, 2009).
45. Wann, S. S. and J. I. Hwang. 1989. Soil erosion on hillslopes of Taiwan. *Journal of Chinese Soil and Water Conservation* 20: 17-45. (In Chinese).
46. Williams, J. R. 1975. Sediment routing for agricultural watersheds. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 11(5): 965-974.
47. Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses -A Guide for Conservation Planning. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook.
48. Wu, C. G., S. Li, H. D. Ren, X. H. Yao and Z. J. Huang. 2012. Quantitative estimation of vegetation cover and management factor in USLE and RUSLE models by using remote sensing data: a review. *Ying yong sheng tai xue bao. The Journal of Applied Ecology* 23(6): 1728-1732. (In Chinese).
49. Yu, B. and C. J. Rosewell. 1996. Technical notes: A robust estimator of the R-factor for the universal soil loss equation. *Transactions of the ASAE* 39(2): 559-561.
50. Zhang, H., J. Wei, Q. Yang, J. E. Baartman, L. Gai, X. Yang, S. Li, J. Yu, C. J. Ritsema and V. Geissen. 2017. An improved method for calculating slope length (λ) and the LS parameters of the Revised Universal Soil Loss Equation for large watersheds. *Geoderma* 308: 36-45.
51. Zhou, P., O. Luukkanen, T. Tokola and J. Nieminen. 2008. Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. *Catena* 75(3): 319-325.

An Investigation on Accuracy and Applicability of USLE Model in Estimation of Soil Loss in Elevated Mountainous Areas (Case Study: the Tibetan Plateau)

A. Motamedi^{1*} and M. Galoie²

(Received: December 22-2019; Accepted: November 12-2020)

Abstract

The annual soil erosion in different regions of the world has been estimated using various empirical and numerical methods whose accuracy is very dependent on their utilized parameters. One of the most common methods in the evaluation of the mean annual soil erosion especially in sheet and furrow regions is the USLE method. In this relationship, almost all factors that normally affect the soil loss process such as land cover, slope, precipitation, soil type, and support practice parameter of soil have been employed but, in this research, it was shown that the accuracy of this method in mountainous areas covered by rock and snow is somewhat low. To do this, a part of the Tibet plateau in China, where observation soil loss data were available, was selected for investigation. To implement the numerical and analytical analysis, many maps including DEM, NDVI, orientation, soil type, mean monthly and annual precipitation for 30 years were collected. For increasing the accuracy of the model, the cover management parameter was extracted from high accuracy NDVI maps and all USLE parameters were calculated in ArcGIS. The final results were shown that the amount of annual soil loss which was estimated by the USLE method is more than the observed data which were collected by Chinese researchers. This is because the large areas of the study area are covered by lichen and snow where soil loss due to the erosion process is very low but these regions cannot be recognized from NDVI maps. Also, the analysis of the NDVI maps was shown that the relationships of Fu, Patil, and Sharma were not suitable for soil loss estimation in elevated mountainous areas. If the other relationships such as Lin, Zhu, and Durigon are used for the regions with a height of more than 5500 m, a new correction coefficient needs to be used for the C factor which was calculated as 0.2 for the study area.

Keywords: Soil loss, USLE model, Tibetan Plateau, NDVI, Snow cover

1. Civil Engineering Department, Imam Khomeini International University, Buin Zahra Higher Education Center of Engineering and Technology, Iran.

2. Faculty of Engineering and Technology, International University of Imam Khomeini, Qazvin, Iran.
Corresponding author, Email: Artemis.mot@bzte.ac.ir