

جغرافیا و توسعه شماره ۵۰ بهار ۱۳۹۷

وصول مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۰۷

تأیید نهایی: ۱۳۹۶/۰۳/۱۶

صفحات: ۷۴-۵۵

پهنه‌بندی شدت فرسایش با استفاده از مدل SWAT در حوضه سد قشلاق

دکتر گلاره غفاری^۱

چکیده

فرسایش و رسوب یکی از مشکلات مهم در مدیریت حوضه‌های آبخیز کشور است. به منظور اجرای برنامه‌های حفاظت، کنترل فرسایش خاک و کاهش رسوب لازم است که حجم کل بار رسوبی و شدت فرسایش پذیری در یک حوضه آبخیز برآورد و مناطق حساس و عوامل مؤثر بر فرسایش حوضه شناسایی شوند. در این تحقیق با هدف مدل‌سازی و تخمین میزان فرسایش در حوضه سد قشلاق، از ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT^۲) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS^۳) استفاده شد. بعد از تهیه و معرفی داده‌های هیدرولوژیک و نقشه‌های مورد نیاز حوضه، مدل برای سال‌های ۱۹۸۷ الی ۲۰۰۷ اجرا شد. برای واسنجی و اعتبارسنجی نتایج به دست آمده، از برنامه SWAT-CUP و الگوریتم SUFI2 استفاده و داده‌های دبی و رسوب مربوط به دو ایستگاه هیدرومتری چهل‌گزی و خلیفه‌ترخان به کار گرفته شد. در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی رواناب و رسوب، ضرایب R^2 ، NS، p-factor و r-factor در خروجی دو رودخانه اصلی نتایج مناسبی ارائه دادند. براساس نتایج، مدل SWAT از قابلیت مناسب برای شناسایی مناطق بحرانی برخوردار است. براساس نقشه شدت فرسایش به دست آمده، سطح حوضه به پنج کلاس فرسایشی با شدت خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم تقسیم شد و به طور کلی نتایج نشان داد که از ۱۰۲٪ زیر حوضه منطقه مورد مطالعه، ۵۵٪ درصد از کل بار رسوب حوضه، تنها مربوط به پانزده زیرحوضه حساس به فرسایش است. این مناطق بحرانی بیشتر در بخش‌های شمال و شمال شرق حوضه قرار دارند و دارای کاربری زراعت دیم و مرتع‌داری بر روی اراضی شیب‌دار هستند. واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، رسوب، واسنجی، اعتبارسنجی، SWAT.

Ghaffarig@iausdj.ac.ir

۱- استادیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سنندج، ایران

2- Soil and Water Assistant Tools

3- Geographic Information System

مقدمه

فرسایش و رسوب یکی از مشکلات مهم در مدیریت حوضه‌های آبخیز کشور است. برنامه محیط‌زیست سازمان ملل (UNEP^۱)، فرسایش خاک در ایران را در سال ۱۹۹۹ نزدیک به ۲۰ تن در هکتار تخمین زده است که نسبت به ۱۰ سال گذشته ۱۰ تن در هکتار افزایش یافته است که نتیجه آن شسته شدن خاک حاصلخیز اراضی کشاورزی، از بین رفتن هزاران هکتار زمین و در نتیجه کاهش تولید محصول است (ضیایی، ۱۳۸۷: ۴۸). شکی نیست که فرسایش خاک در مناطق کوهستانی به دلیل شیب زیاد زمین چند برابر میانگین کشور است و به دلیل کم عمق بودن خاک در این زمین‌ها، جبران ناپذیری این فاجعه جدی‌تر است؛ از این رو به منظور اجرای برنامه‌های حفاظت و کنترل فرسایش خاک و کاهش رسوب ضرورت دارد که حجم کل بار رسوبی و شدت فرسایش‌پذیری در یک حوضه آبخیز برآورد شود و مناطق حساس‌تر و عوامل مؤثر در فرسایش حوضه شناسایی شوند. شناسایی این مناطق و یا به عبارت دیگر پهنه‌بندی شدت فرسایش حوضه آبخیز، مدیران منطقه را در انتخاب راهکارهای مناسب در جهت کنترل فرسایش و حفظ منابع طبیعی یاری می‌کند.

در دهه‌های اخیر، مدل‌های هیدرولوژی تجربی، مفهومی و فیزیکی زیادی به منظور شبیه‌سازی بارش-رواناب و کمی کردن فرایندهای حمل و رسوب‌گذاری ابداع و ارائه شده‌اند (Chekol, 2006: 24). مدل SWAT^۲ یک مدل ریاضی نیمه‌توزیعی و پیوسته است که استفاده از محیط Arc GIS در جهت شبیه‌سازی رواناب، رسوب و کیفیت آب، در مقیاس حوضه آبخیز سبب ارتقاء قابلیت‌های مدل و برقراری

ارتباط راحت‌تر توسط کاربر شده است (Arnold, 1998: 73). به‌طور کلی از جمله تحقیقات صورت‌گرفته در این زمینه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

یانگ و همکاران (۲۰۰۸)، روش‌های مختلف عدم قطعیت را به منظور واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT بررسی کردند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که استفاده از الگوریتم SUFI2 برای واسنجی مدل در مقایسه با سایر روش‌ها نیاز به تعداد اجراهای کمتری به منظور رسیدن به نتایج مشابه و پیش‌بینی بهتر عدم قطعیت دارد.

رستمیان و همکاران (۲۰۰۸)، از مدل SWAT در جهت تخمین رواناب و رسوب در حوضه بهشت‌آباد در کارون شمالی استفاده کردند. نتایج مدل برای متوسط رواناب ماهانه در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی بسیار رضایت‌بخش بود و مدل در شبیه‌سازی رواناب، خیلی بهتر از رسوب عمل کرد.

فرامرزی و همکاران (۲۰۰۹)، برای شبیه‌سازی تمام فرایندهای رواناب، کیفیت آب، رسوب و چرخه عناصر غذایی از مدل SWAT استفاده کردند و نتایج نشان داد که مدل در شبیه‌سازی رواناب و نیترات بسیار خوب و در شبیه‌سازی رسوب و کل فسفر سبباً خوب بوده است.

ایجم و تراونه (۲۰۱۲)، با استفاده از مدل SWAT ضمن شبیه‌سازی و کالیبره کردن بار رسوب حوضه سد والا در اردن، نقشه پهنه‌بندی بار رسوب حوضه را نیز تهیه و بیان کردند که مناطق غربی و شمالی حوضه مورد مطالعه، حساس‌ترین مناطق نسبت به فرسایش بوده و لازم است که در اولویت طرح‌های مدیریت و کنترل رسوب قرار گیرند. در نهایت نیز راهکارهایی حفاظتی برای کاهش رسوب ارائه کردند.

(CH_COV)، روندیابی رسوب در کانال (PRF) و فاکتور (SPEX) حساس‌ترین پارامترها در کالیبراسیون مدل برای غلظت رسوب است. همچنین پس از کالیبره کردن و انجام آنالیز عدم قطعیت، نتایج حاصل از مدل تطابق خوبی با آمار مشاهده شده غلظت رسوب داشتند و ۷۲ درصد از مقادیر مشاهده شده غلظت رسوب در داخل باندهای اطمینان در سطح ۹۵ درصد قرار گرفتند.

شفیعی و همکاران (۱۳۹۲) در تحقیق خود از مدل مفهومی و نیمه‌توزیعی SWAT در حوضه نیمه‌خشک نیشابور برای شبیه‌سازی جریان استفاده کردند. در این تحقیق برای واسنجی و تحلیل عدم قطعیت نیز از روش SUFI2 استفاده شده است. بررسی نتایج نشان داد که واسنجی و اعتبارسنجی مدل در این حوضه نسبتاً متوسط بوده است که به سبب وجود عدم قطعیت در مدل مفهومی حوضه مانند احداث مخازن تغذیه مصنوعی، وقوع پدیده نشست زمین و شکاف در حوضه است.

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق در حوضه کوهستانی سد قشلاق واقع شده است. قبل از ورود رودخانه قشلاق به شهر سنندج، سد قشلاق روی آن احداث شده که منبع تأمین آب شرب شهروندان سنندجی و همچنین منبع آب بخش‌های کشاورزی، صنعت و خدمات منطقه است. یکی از مشکلات موجود در مخزن این سد، ورود بار آلی به همراه رسوبات بالادست از طریق جریان‌های سطحی به این مخزن است. این مسئله که در اثر راه‌سازی، کشت دیم بر روی دامنه‌های پرشیب، کاربری غیراصولی اراضی بالادست و استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی رخ می‌دهد، غیر از کاهش ظرفیت مخزن سد و بالابردن هزینه‌های رسوب‌زدایی مخزن، می‌تواند موجب بروز عوارض دیگری از جمله شکوفایی جلبک در آب مخزن و به دنبال آن بدبو و بدطعم شدن آب شود؛ از این رو هدف از این تحقیق در مرحله اول مدل‌سازی و تخمین میزان فرسایش سالانه خاک

تیاجی و همکاران (۲۰۱۴)، کاربرد مدل SWAT را در شبیه‌سازی دبی و رسوب حمل‌شده در دو حوضه در هند مورد بررسی قرار دادند و پس از کالیبره و اعتبارسنجی، نتایج نشان داد که مدل توانایی بسیار خوبی در شبیه‌سازی رواناب و رسوب حوضه دارد و می‌توان با استفاده از این مدل سناریوهای مدیریتی مختلف را در حوضه مورد آزمون قرار داد.

چپی (۱۳۷۷)، با تحقیق در رابطه با نقش نوع استفاده از اراضی در تغییر مقدار فرسایش و تولید رسوب در حوضه آبخیز چهل‌گری سد قشلاق سنندج به این نتیجه رسیده است که دیم‌زارهای واقع بر روی دامنه‌های پرشیب، با تولید ۷۶۸ مترمکعب در کیلومتر مربع در سال، از نظر میزان تولید رسوب نسبت به اراضی مرتعی با وضعیت مرتع متوسط تا خوب، با تولید رسوب ۲۶۵/۸۵ مترمکعب در کیلومتر مربع در سال، دارای مقدار بیشتری از فرسایش و تولید رسوب هستند.

غلامی (۱۳۸۲) از مدل SWAT برای شبیه‌سازی دبی و رسوب متوسط ماهانه حوضه آبخیز امامه از زیرحوضه‌های رودخانه جاجرود استفاده کرد. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل نسبت به پارامترهای زبری سطح (n) و ضریب حساسیت فرسایش‌پذیری خاک (k) حساسیت بیشتری در مقایسه با بقیه پارامترهای حوضه آبخیز دارد. همچنین ضریب تبیین برای شبیه‌سازی رسوب روزانه در سطح اعتماد ۹۵ درصد معادل ۰/۷۴ به دست آمد.

علوی‌نیا و نصیری صالح (۱۳۸۸)، در تحقیق خود با عنوان «شبیه‌سازی آورد رسوب با استفاده از مدل SWAT» با تهیه اطلاعات مورد نیاز، رسوب خروجی از حوضه آبریز رودخانه ابرو در بالادست سد اکباتان همدان را با مدل SWAT شبیه‌سازی کردند و نتیجه گرفتند که پارامترهای شماره منحنی (CN) فرسایش‌پذیری کانال (CE_EROD)، پوشش کانال

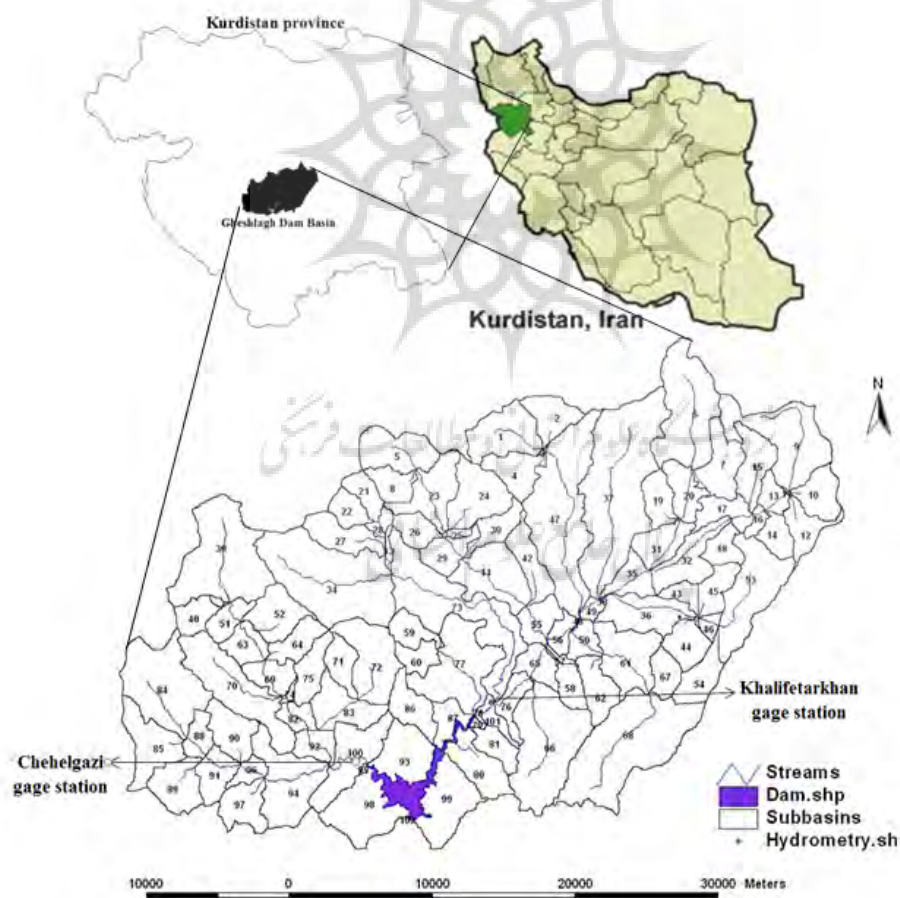
غربی ایران و در فاصله ۱۲ کیلومتری شمال شهر سنندج واقع شده است. این حوضه بین مختصات جغرافیایی ۴۶ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۲۴ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. مساحت حوضه آبخیز سد قشلاق منتهی به خروجی سد، ۱۰۶۲/۱۲ کیلومترمربع و محیط و طول آن به ترتیب حدود ۱۸۰/۵۹ و ۳۷/۶۴ کیلومتر است (شکل ۱).

در حوضه سد قشلاق با استفاده از مدل SWAT و سیستم اطلاعات جغرافیایی، واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل با استفاده از برنامه SUFI-2 در جهت بررسی کارایی مدل و سپس تهیه نقشه شدت فرسایش و شناسایی نقاط حساس به فرسایش در سطح حوضه در جهت کنترل فرسایش و رسوب در زیرحوضه‌های حساس است.

مواد و روش‌ها

خصوصیات منطقه مورد مطالعه

محل انجام تحقیق در این پژوهش حوضه آبخیز سد قشلاق در استان کردستان است که در شمال



شکل ۱: موقعیت مکانی محدوده مورد مطالعه، سد، ایستگاه‌های هیدرومتری و شبکه آبراه‌های

تهیه و ترسیم: نگارنده ۱۳۹۴

روش انجام تحقیق

در انجام این پژوهش با توجه به موضوع و ماهیت تحقیق از بررسی کتابخانه‌ای گزارش‌های تفصیلی مختلف مربوط به حوضه آبخیز قشلاق، نقشه‌های خاک، پوشش گیاهی و کاربری اراضی مربوط به سازمان‌های مختلف و بازدید از حوضه مورد مطالعه و انجام مطالعات میدانی جهت تکمیل و اصلاح اطلاعات و اشراف بر عرصه تحقیق استفاده شد. از سوی دیگر به تهیه آمار هواشناسی و هیدرومتری اقدام و سپس همگنی و رفع نواقص داده‌ها بررسی شد. همچنین همه اطلاعات رقومی در محیط ArcGIS مورد پردازش قرار گرفته و در جهت معرفی به نرم‌افزار آماده شد. برای شبیه‌سازی رواناب حوضه از ورژن جدید مدل SWAT استفاده شد. در این مدل رابطه اصلی در محاسبه همه پارامترهای هیدرولوژی در حوضه، رابطه موازنه (بیلان) آب حوضه است (Arnold et al, 2011: 76). برای محاسبه حجم رواناب سطحی و پیک آن، SWAT از میزان بارش روزانه و ذوب برف و برای شبیه‌سازی رواناب سطحی از روش شماره منحنی SCS استفاده شد که در آن، شماره منحنی و مقدار نفوذ آب در خاک نقش اساسی را در محاسبه ارتفاع رواناب دارند. برای شبیه‌سازی مقدار رسوب در این مدل از روش MUSLE استفاده شد (رابطه ۱).

رابطه ۱:

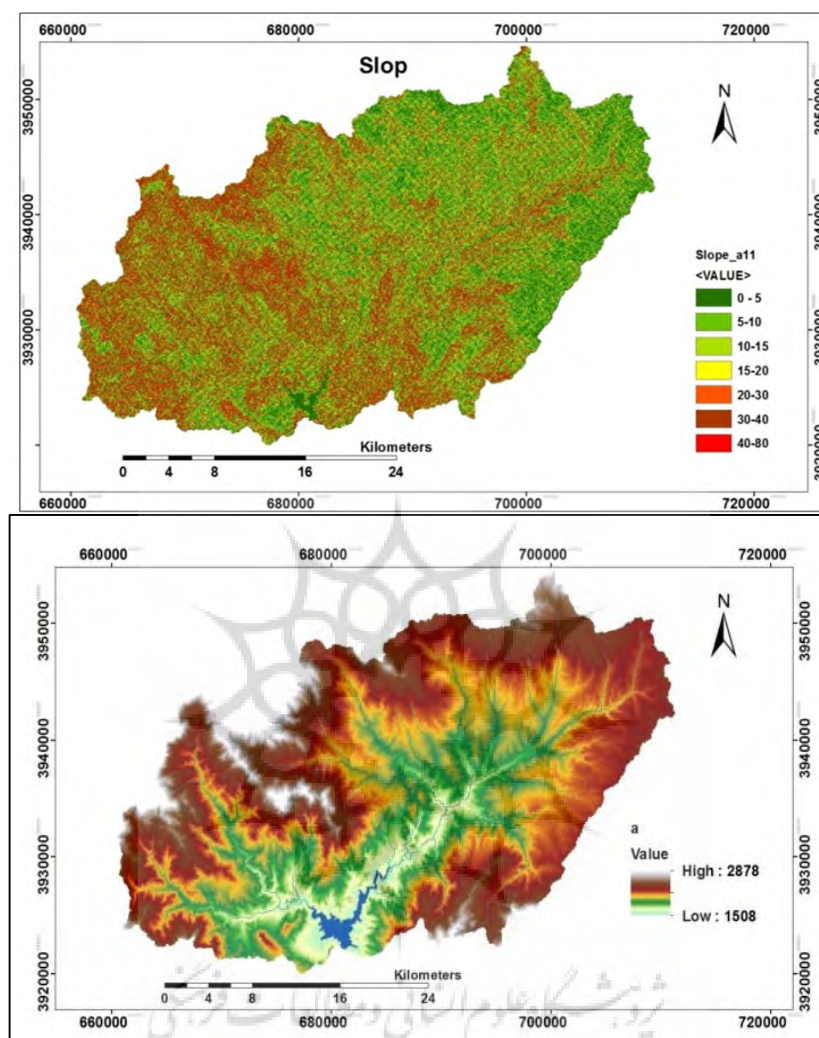
$$Y=11.8 (Q \times \text{Area} \times P_r)^{0.56} K \times C \times P \times LS \times R$$

که در آن: Y = مقدار رسوب (تن بر متر مربع)، Q = حجم رواناب (مترمکعب)، دبی اوج رواناب (متر مکعب بر ثانیه)، K = فاکتور USLE فرسایش‌پذیری خاک، C = فاکتور پوشش گیاهی، P_r = فاکتور عملیات حفاظتی خاک، LS = عامل توپوگرافی (مقدار درجهت شیب) و R فاکتور شدت بارندگی است (Neitsch et al, 2011: 135).

داده‌های اصلی موردنیاز مدل شامل نقشه مدل رقومی ارتفاع حوضه، نقشه‌های خاک‌شناسی، نقشه‌های کاربری اراضی یا پوشش گیاهی منطقه و داده‌های هواشناسی است که در ادامه نحوه تهیه این ورودی‌ها توضیح داده شده است.

الف- مدل رقومی ارتفاع (DEM)

برای تهیه نقشه DEM حوضه، از نقشه‌های توپوگرافی رقومی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور با قدرت تفکیک ۱۰ متر استفاده شد. در مدل SWAT از مدل رقومی ارتفاع درجهت محاسبات طول، عرض و عمق کانال اصلی جریان آب، شبکه آبراهه‌های حوضه و خصوصیات مورفومتری حوضه آبخیز مانند مساحت، محیط، طول و... استفاده می‌شود. در شکل ۲ نقشه مدل رقومی ارتفاع و شیب حوضه استخراج شده از آن نشان داده شده است.



شکل ۲: نقشه مدل رقومی ارتفاعی و شیب حوضه سد قشلاق

تهیه و ترسیم: نگارنده ۱۳۹۴

ب- نقشه خاک

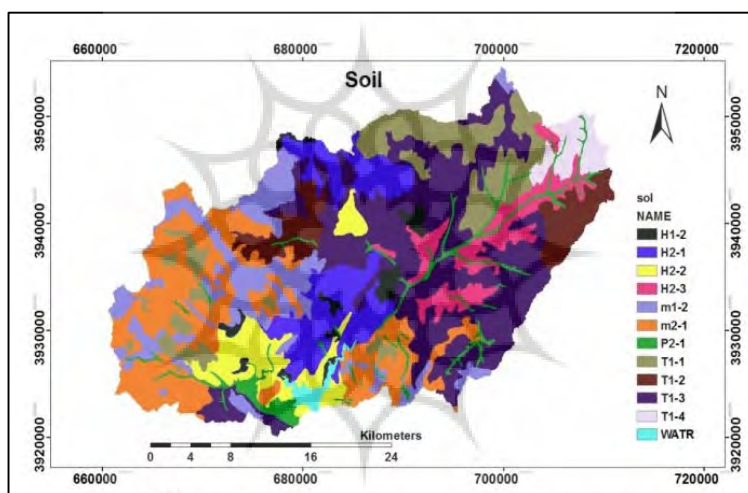
اطلاعات مورد استفاده درباره خاکشناسی این محدوده از نقشه‌های رقومی خاکشناسی مربوط به مرکز تحقیقات خاک و آب‌خیزداری کشور، نقشه‌ها و گزارش‌های خاکشناسی سازمان تحقیقات خاک و آب کشور (مهاجی‌شجعی، ۱۳۶۳: ۵۶)، تشریح پروفیل‌های شاهد و نتایج آزمایش‌های خاکشناسی حوضه قشلاق اخذ شده است که این اطلاعات در

محیط GIS با نقشه‌های خاکشناسی موجود ارتباط داده شده تا در مدل SWAT قابل استفاده شوند. همچنین در جهت دقیق کردن اطلاعات به دست آمده، پس از تجزیه و تحلیل حساسیت پارامترها، مهم‌ترین پارامترهای خاکشناسی که بیشترین تأثیر را بر نتایج تحقیق دارند، مشخص و در مرحله واسنجی مدل مقدار بهینه این پارامترها تعیین شدند.

ج- نقشه کاربری اراضی

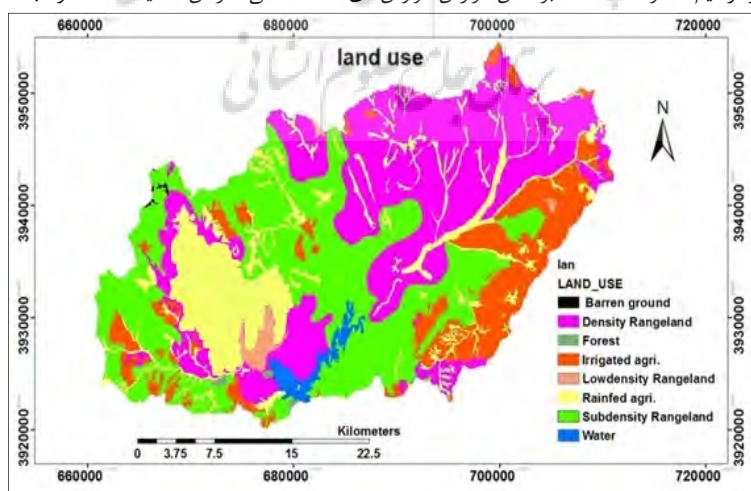
برای تهیه نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه از نقشه کاربری اراضی رقومی مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، که براساس تفسیر تصاویر ماهواره‌ای ETM⁺ سال ۲۰۰۴ تهیه شده است، به‌عنوان مبنا استفاده شد و سپس با استفاده از پوشش گیاهی و اراضی کشاورزی تهیه‌شده توسط سازمان‌های مختلف، بازدیدهای صحرایی و تصاویر IRS سال ۲۰۰۷ نقشه کاربری اراضی منطقه (با توجه به دوره واسنجی) تهیه شد.

به‌طورکلی کاربری‌های اراضی در منطقه تحقیق به ۸ گروه شامل مراتع نیمه‌متراکم، مراتع فقیر، مراتع متراکم، جنگل دست‌کاشت، کشاورزی دیم، زراعت آبی و باغات، رودخانه‌ها و دریاچه سد و اراضی بدون پوشش، مناطق مسکونی و تأسیسات تقسیم شدند. در شکل ۳ الی ۵ به‌ترتیب نقشه کاربری اراضی، اجزاء واحد اراضی خاک و زمین‌شناسی منطقه تحقیق و در جدول ۱ خصوصیات اجزاء واحد اراضی نمایش داده شده است.



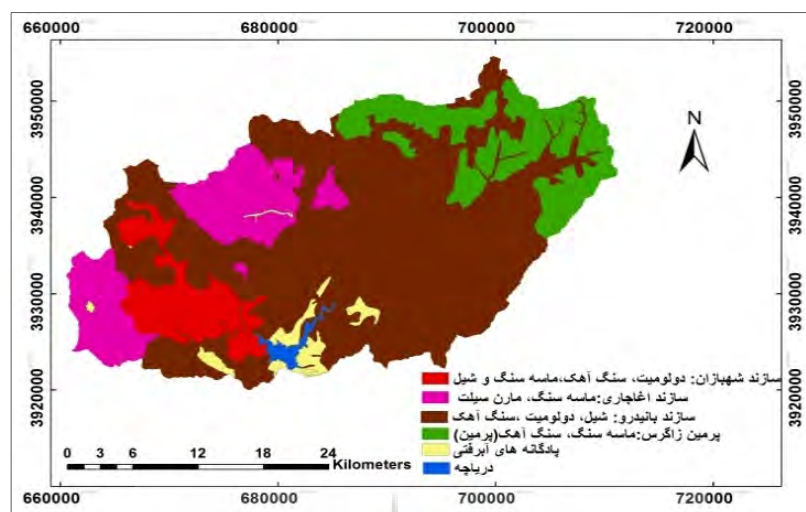
شکل ۳: نقشه اجزاء واحدهای اراضی خاک در حوضه

تهیه و ترسیم: نگارنده، ۱۳۹۴ (براساس گزارش گزارش‌های خاک‌شناسی سازمان تحقیقات خاک و آب کشور)



شکل ۴: نقشه کاربری اراضی حوضه سد قشلاق

تهیه و ترسیم: نگارنده، ۱۳۹۴ (براساس مطالعات مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور)



شکل ۵: نقشه زمین‌شناسی حوضه سد قشلاق

تهیه و ترسیم: نگارنده، ۱۳۹۴ (بر اساس مطالعات زمین‌شناسی حوضه)

جدول ۱: مشخصات عمومی تیپ‌های اصلی اراضی و اجزاء واحد اراضی

اجزاء واحدهای اراضی	تیپ اصلی فیزیوگرافی	شیب عمومی	اختلاف از سطح زمین	وضع کلی در حوضه سد قشلاق
M1-2 M2-1	کوه‌ها	بیش از ۲۵٪	۱۵۰۰ - ۵۰۰ متر	اغلب تیره‌رنگ و منشأ آذرین دارد. بخش وسیعی با قلال مدور و شامل اراضی مرتعی است.
H1-2 H2-1 H2-2 H2-3	تپه‌ها	۲۵ - ۸٪	۵۰۰ - ۵۰ متر	اغلب تیره‌رنگ و منشأ آذرین دارند. مساحت قابل توجهی دارای قلال مدور و پوشش مرتعی است.
T1-1 T1-3 T1-2 T1-4 T.2.2	فلات‌ها و تراس‌های فوقانی	تا ۸٪	کمتر از ۵۰ متر	اغلب گودی و پشته. خاک‌هایی با بافت سنگین که محل زراعت غلات دیم می‌باشند.
P2. 1	دشت دامنه‌ای	۵ - ۱٪	کمتر از ۵ متر	دارای خاک‌های عمیق با بافت سنگین تا خیلی سنگین، بخش وسیعی از این واحد در طرفین رودخانه تشکیل شده است.

مأخذ: مهاجری‌شجعی، ۱۳۶۳

د- داده‌های اقلیمی

در این تحقیق از ایستگاه‌های سازمان هواشناسی و شرکت مطالعات آب پایه در جهت تخمین دما، بارش، رطوبت نسبی، اشعه تابشی، سرعت باد، جریان در حوضه به‌عنوان ورودی برای مدل‌ها، استفاده شده است. ایستگاه‌های سازمان هواشناسی شامل ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی و باران‌سنج بوده که از داده‌های دمای حداقل و حداکثر، دمای متوسط روزانه و ماهانه، بارش، فشار هوا، میانگین رطوبت نسبی، رطوبت نسبی ماکزیمم و مینیمم،

سرعت و جهت باد، نقطه شبنم، ساعات آفتابی و ابری، رگبارهای ۱۰ دقیقه‌ای، تعداد روزهای غبارآلود آن‌ها در جهت تهیه فایل آب و هوای موردنیاز مدل استفاده شد. مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک، باران‌سنجی و هیدرومتری که در این تحقیق با توجه به قرارگرفتن در داخل و یا نزدیکی حوضه و با توجه به دارا بودن طول دوره آماری مشترک از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۷ مورد استفاده قرار گرفتند، به‌ترتیب در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک، باران‌سنجی و هیدرومتری مورد استفاده در تحقیق

نوع ایستگاه	نام ایستگاه	طول شمالی (درجه - دقیقه)	عرض شرقی (درجه - دقیقه)	ارتفاع از سطح دریا (m)	دوره آماری
سینوپتیک	سندج	۴۷-۰	۳۵-۲۰	۱۳۷۳/۴	۱۹۶۱-۲۰۱۲
	سقز	۴۶-۱۶	۳۶-۱۵	۱۵۲۲/۸	۱۹۶۱-۲۰۱۲
	بیجار	۴۷-۳۷	۳۵-۵۳	۱۸۸۳/۴	۱۹۸۷-۲۰۱۲
	مریوان	۴۶-۱۲	۳۵-۳۱	۱۲۸۶/۸	۱۹۸۷-۲۰۱۲
	زرینه	۴۶-۵۵	۳۶-۰۴	۲۱۴۲/۶	۱۹۸۷-۲۰۱۲
باران‌سنجی	چهلگری	۴۶-۵۷	۳۵-۲۷	۱۵۶۷	۱۳۶۱-۱۳۹۲
	خلیفه‌ترخان	۴۷-۰۴	۳۵-۲۹	۱۶۰۰	۱۳۵۲-۱۳۹۲
هیدرومتری و رسوب‌سنجی	چهلگری	۴۶-۵۷	۳۵-۲۷	۱۵۶۷	۱۳۶۱-۱۳۹۲
	خلیفه‌ترخان	۴۷-۰۴	۳۵-۲۹	۱۶۰۰	۱۳۵۲-۱۳۹۲

مأخذ: سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۴

استفاده شد. در نهایت برای به دست آوردن بهترین واسنجی و محدود کردن جواب‌ها به یک جواب واحد از دو تابع هدف، R^2 و ضریب NS^2 استفاده شد. در روابط (۲ و ۳) R^2 و ضریب NS ارائه شده است. رابطه ۲:

$$R^2 = \frac{\sum_i^n Q_{obs} \cdot Q_{sim}}{\sqrt{\sum_i^n Q_{obs}^2 \cdot \sum_i^n Q_{sim}^2}}$$

رابطه ۳:

$$NS = 1 - \left[\frac{\sum_i^n (Q_{sim_i} - Q_{obs_i})^2}{\sum_i^n (Q_{obs_i} - Q_{avg})^2} \right]$$

که در آن‌ها: n = تعداد داده‌ها، Q_{sim_i} = دبی شبیه‌سازی شده، Q_{obs_i} = دبی مشاهده‌ای و Q_{avg} = متوسط دبی مشاهده‌ای در مدت زمان شبیه‌سازی است. در مدل SUFI-2 برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، علاوه بر مقدار بهینه پارامترها، محدوده ۰٫۵٪ و ۹۷٫۵٪ پارامترها نیز به عنوان محدوده جواب و یا محدوده اطمینان ۹۵٪ (95PPU) در نظر گرفته می‌شود. از معیارهای مورد استفاده در این مدل برای بررسی عدم قطعیت می‌توان به عامل p^1 که درصد قرارگیری

در مرحله شبیه‌سازی حوضه با وارد کردن مدل رقومی ارتفاع به مدل SWAT ابتدا کل منطقه به ۱۰۲ زیرحوضه تقسیم و سپس با وارد کردن لایه‌های اطلاعاتی مدل رقومی ارتفاع، کاربری اراضی و خاک و فایل‌های روزانه و ماهانه بارندگی، دما و اطلاعات هواشناسی، کل حوضه به ۸۶۹ واحد پاسخ هیدرولوژی تقسیم و مدل برای داده‌های سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۷ اجرا شد.

واسنجی مدل

در این تحقیق برای بالابردن دقت در انجام تجزیه و تحلیل حساسیت مدل از توانایی‌های نسخه SWAT و مدل SUFI-2¹ استفاده شد که در کنار انجام مرحله واسنجی و آزمون عدم قطعیت این مرحله را نیز انجام می‌دهد (Abbaspour et al, 2015: 9) در بخش واسنجی مدل، آمار شبیه‌سازی شده سال‌های ۱۹۹۳ الی ۲۰۰۳ با آمار مشاهده‌ای ایستگاه‌های هیدرومتری خلیفه‌ترخان و چهل‌گری (در همین سال‌ها) واسنجی شد. پس از اجرا و واسنجی مدل نیز، از داده‌های مشاهداتی سال‌های ۲۰۰۴ الی ۲۰۰۷ ایستگاه‌های چهل‌گری و خلیفه‌ترخان برای اعتبارسنجی مدل

نتایج و بحث

نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل

نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل حساسیت و واسنجی با استفاده از مدل SUFI-2 نشان می‌دهد که مدل نسبت به ۲۱ پارامتر حساسیت بیشتری دارند که ۱۷ پارامتر آن مربوط به رواناب و ۴ پارامتر دیگر مربوط به رسوب است. در نتیجه برای واسنجی رواناب و رسوب مدل تنها از این پارامترها استفاده شد که در جدول ۲ نشان داده شده است.

داده‌های اندازه‌گیری شده در محدوده 95PPU را نشان می‌دهد و همچنین عامل d^2 اشاره کرد. واسنجی ایده‌آل زمانی حاصل می‌شود که عامل P به سمت ۱۰۰٪ و عامل d به سمت ۱ میل کند (Abbaspour et al, 2015: 424). پس از کالیبره کردن مدل و استخراج نقشه‌های شدت فرسایش حوضه، زیر حوضه‌های حساس به فرسایش تعیین و سپس راهکارها مناسب در جهت کاهش فرسایش در این مناطق در نظر گرفته شد.

جدول ۲: مقادیر حد بالا و پایین و بهینه محدود پارامترها در مرحله شبیه‌سازی رواناب و رسوب^۱

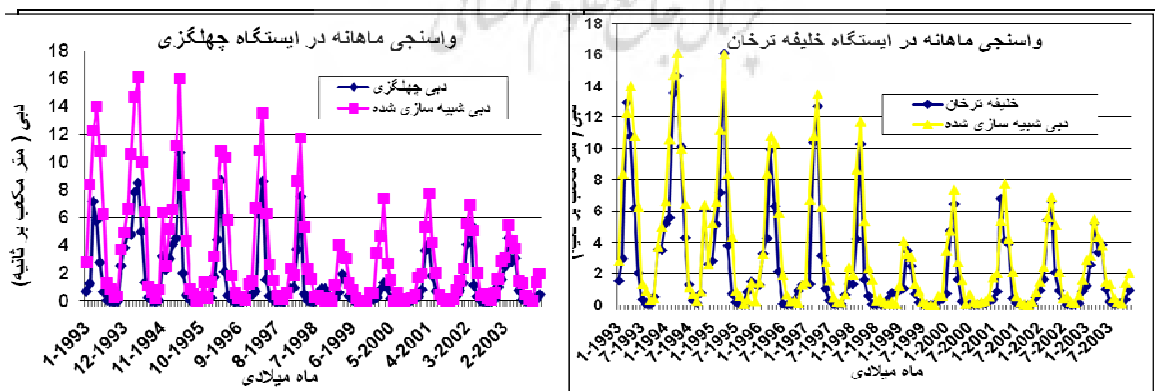
پارامتر	توضیح	حد بالا	حد پایین	مقدار بهینه
GW_REVAP.gw	ضریب REVAP	۰/۱۱۷۷۸۸	۰/۰۶۶۸۱	۰/۰۷۲۵۴۵
RCHRG_DP.gw	ضریب نفوذ لایه عمیق	۰/۱۱۵۵۶	۰/۰۸۹۱۳۸	۰/۰۹۴۰۹۲
CN2.mgt	شماره منحنی SCS برای رطوبتی متوسط	-۰/۰۷۱۶۰۵	-۰/۱۵۵۶۷۵	-۰/۰۶۲۸۴
ALPHA_BF.gw	فاکتور آلفا در بازگشت جریان به آبراهه اصلی	۰/۱۸۳۷۶۴	۰/۱۳۷۵۹۶	۰/۱۳۸۱۷۳
CANMX.hru_MIGS	حداکثر ذخیره توسط تاج پوشش مرتع متوسط	۴/۴۸۲۰۷	۳/۸۲۰۷۸۳	۴/۳۲۵۰۱۴
SMFMX.bsn	فاکتور حداکثر ذوب برف در طول سال	۳/۷۶۰۷۳	۳/۳۹۵۹۲۴	۳/۷۲۸۸۱
SOL_K.sol	هدایت هیدرولیکی اشباع برای هر لایه خاک	-۰/۱۲۹۱۲۳	-۰/۱۴۷۲۵۷	-۰/۱۳۲۵۲۳
EPCO.hru	فاکتور موازنه جذب آب توسط گیاه	۰/۸۴۵۶۳۶	۰/۷۹۱۳۰۶	۰/۸۲۸۶۵۸
SOL_AWC.sol	آب موجود در هر لایه خاک	۰/۴۲۷۷۸۹	۳/۳۵۹۰۱۱	۰/۴۲۰۰۵۱
CANMX.hru_CRIR	حداکثر ذخیره توسط تاج پوشش گیاهان زراعی آبی	۵/۰۳۳۰۶۲	۳/۷۳۷۹۸۸	۳/۷۸۶۵۵۳
CANMX.hru_CRDI	حداکثر ذخیره توسط تاج پوشش گیاهان زراعی دیم	۶/۱۳۳۰۶۲	۳/۹۳۷۹۸۸	۲/۳۸۶۵۵۳
GW_DELAY.gw	زمان تأخیر برای بازگشت آب زیرزمینی	۱۲/۱۳۷۶۰۱	۹/۱۳۳۱۳۴	۱۱/۸۷۴۷۱
CANMX.hru_SAVA	حداکثر ذخیره توسط تاج پوشش مرتعی ضعیف	۴/۰۴۵۷۸۲	۳/۹۶۶۷۸۸	۱/۹۶۵۴۳۲
CH_N2	ضریب مایننگ برای کانال اصلی	۰/۱۴۷۹۶۱	۰/۱۳۹۵۴۳	۰/۱۴۱۹۶۳
SMFMN.bsn	فاکتور حداقل ذوب برف در طول سال	۳/۷۶۰۷۳	۳/۳۹۵۹۲۴	۳/۷۲۸۸۱
ESCO.hru	فاکتور موازنه تبخیر آب از خاک	۰/۸۴۵۶۳۶	۰/۷۹۱۳۰۶	۰/۸۲۸۶۵۸
SMTMP.bsn	دمای آستانه ذوب برف	-۱/۴۱۲۴۴	-۱/۴۴۳۶۷۴	-۱/۴۲۶۸۸۶
USIE_P.mgt	فاکتور ضریب معادله کاربری زمین	۰/۶۱۵۰۳۱	۰/۵۴۶۷۳۵	۰/۵۹۶۷۳
USIE_K.sol	ضریب فرسایش پذیری خاک	۰/۶۱۵۰۳۱	۰/۲۷۷۷۳۵	۰/۳۹۵۰۳
USIE_C.sol	حداقل فاکتور پوشش گیاهی و حفاظت خاک	۰/۴۱۵۰۳۱	۰/۲۷۷۷۳۵	۰/۲۹۴۵۶
ROCK	درصد سنگ در لایه فوقانی	۹/۵۰۰۸۷۸	۷/۴۷۲۳۱۲	۸/۴۸۲۳۱

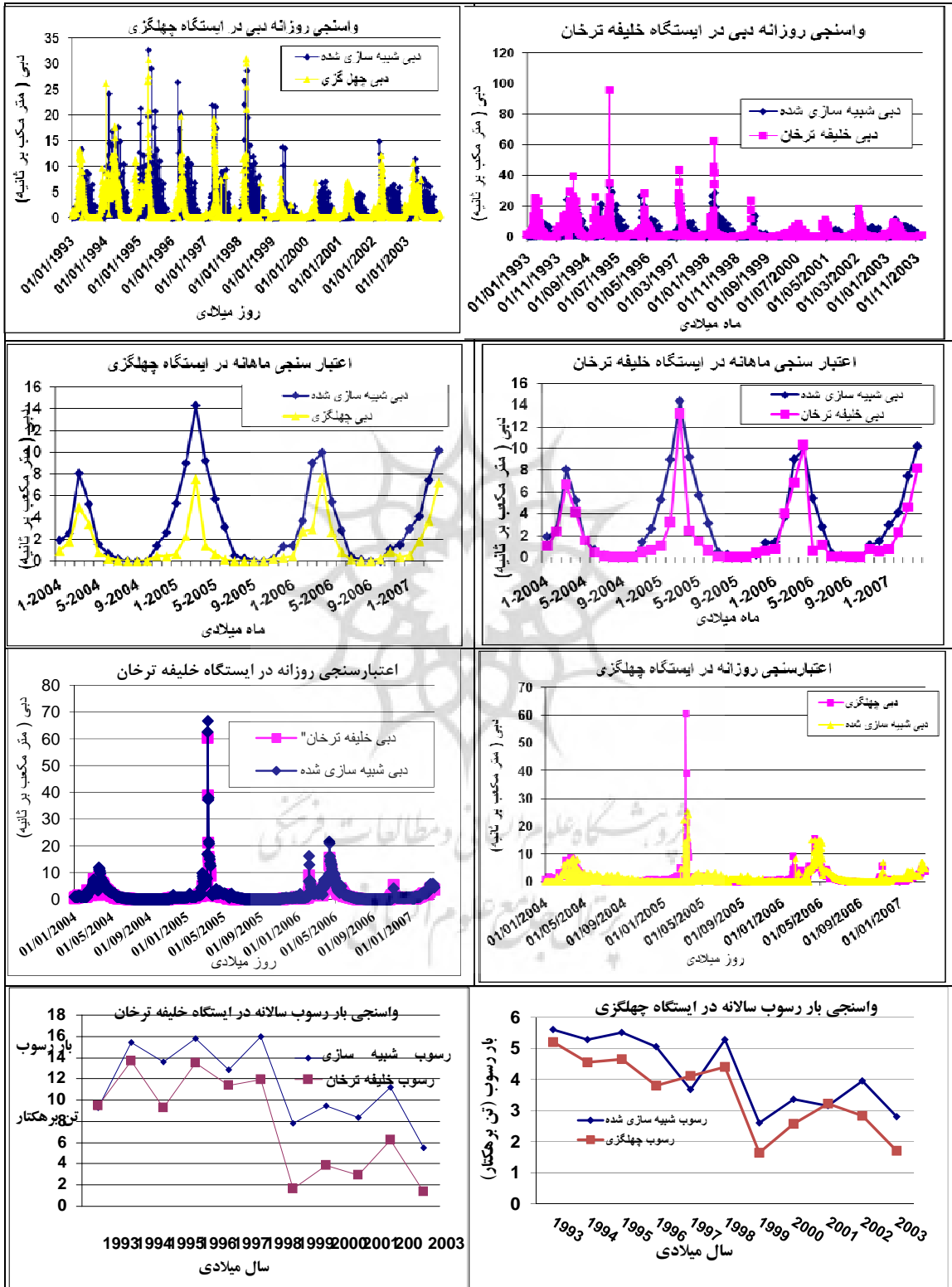
مأخذ: نگارنده، ۱۳۹۴

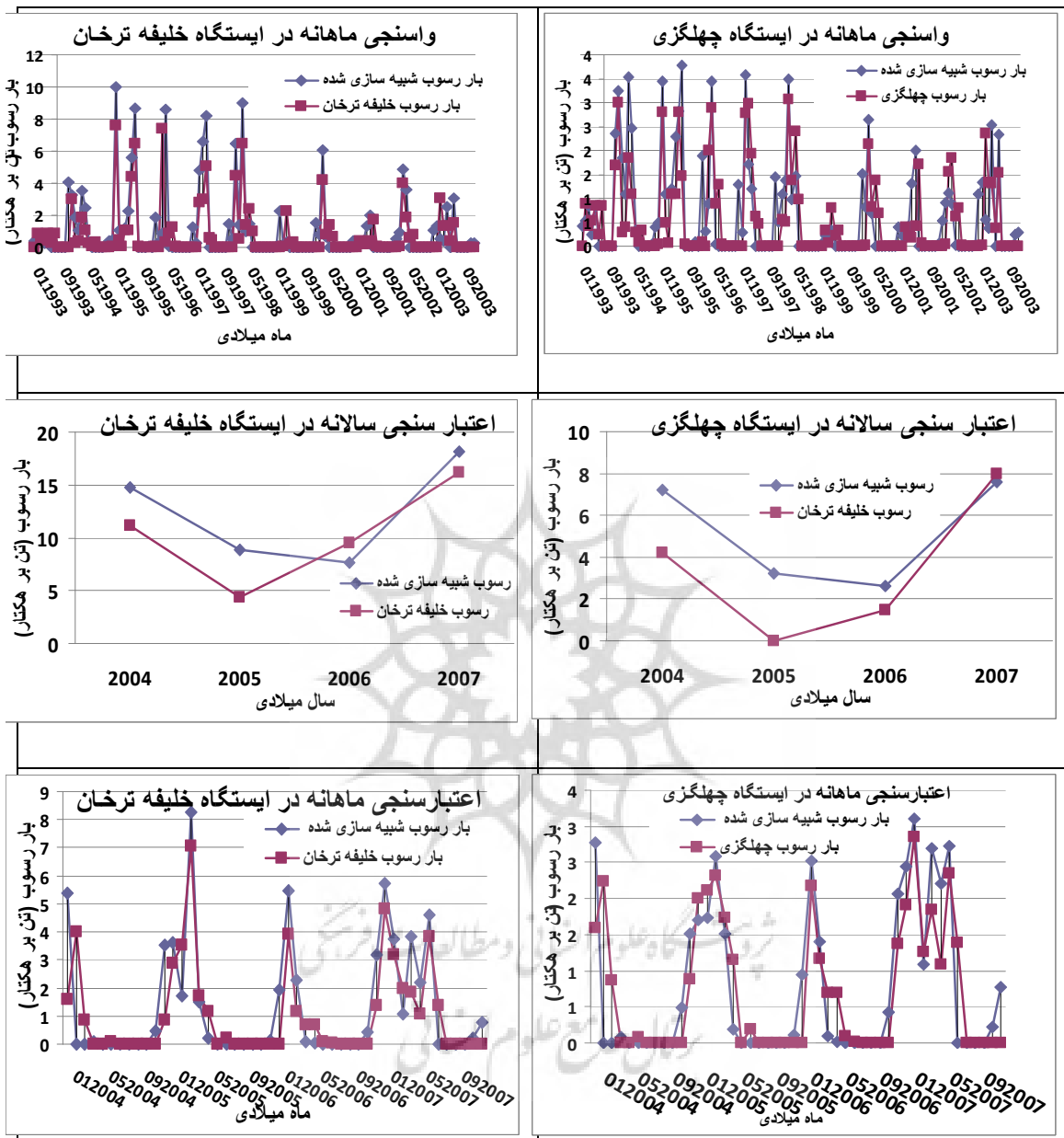
نتایج حاصل از واسنجی، اعتبارسنجی و آزمون عدم قطعیت

نتایج واسنجی (سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۳) و اعتبارسنجی (سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۷) ماهانه و روزانه رواناب و رسوب در دو ایستگاه هیدرومتری خلیفه‌ترخان و چهل‌گزی به ترتیب در شکل ۶ ارائه شده است. لازم به ذکر است که داده‌های باررسوب روزانه ایستگاه‌ها فقط در هنگام بارش ثبت شده بود و برای تمام روزهای سال، داده قابل مشاهده‌ای وجود نداشت. برای بازسازی آمار رسوب در رودخانه‌هایی که فقط در برخی از روزهای ماه دارای آمار رسوب است، برآورد رسوب‌دهی غالباً از طریق روش منحنی سنج رسوب انجام می‌گیرد. در این مطالعه نیز به منظور برآورد دقیق‌تر بار رسوب ماهانه رودخانه‌ها، از روشی برپایه توسعه منحنی تداوم تغییرات غلظت رسوب از روی داده‌های غلظت رسوب که در برخی از روزهای ماه موجود است، استفاده شد. در این روش غلظت بار معلق بین دو اندازه‌گیری متوالی، براساس نسبت غلظت رسوب به دبی جریان در این دو اندازه‌گیری، بازسازی می‌شود. در نهایت مدل SWAT برای بازه ماهانه براساس این داده‌ها واسنجی شد.

تحلیل حساسیت نشان داد که پارامتر ضریب REVAP، ضریب نفوذ لایه عمیق، شماره منحنی (CN) و فاکتور الفا در بازگشت جریان پایه به آبراهه به ترتیب حساسیت بیشتری نسبت به سایر پارامترها دارند. یانگ و همکاران (۲۰۰۸)، بعد از انجام عملیات آنالیز حساسیت پارامترهای حساس به رواناب را شماره منحنی (CN)، ضریب مانینگ (n) برای کانال اصلی، هدایت هیدرولیکی خاک اشباع، ضریب فرسایش‌پذیری خاک و فاکتور تنظیم‌کننده میزان اوج رسوب در روندیابی کانال معرفی کردند. نتایج غلامی (۱۳۸۲)، برای شبیه‌سازی دبی و رسوب متوسط ماهانه حوضه آبخیز امامه نشان داد که مدل نسبت به پارامتر ضریب زبری سطح (n) و حساسیت به فرسایش‌پذیری خاک، در مقایسه با بقیه پارامترهای دیگر حوضه حساس‌تر است. همت‌جو و همکاران (۱۳۸۸) بیان کردند که بار رسوب به ضریب زبری مانینگ (n) جریان بالادست و جریان کانال‌های فرعی و همچنین هدایت هیدرولیکی کانال‌های فرعی آبرفتی حساسیت زیادی دارد که بیشتر این پارامترها با پارامترهای حساس به دست آمده در این تحقیق همخوانی دارند.







شکل ۶: نتایج واسنجی (سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۳) و اعتبارسنجی (سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۷) و روزانه رواناب و رسوب در دو ایستگاه هیدرومتری خلیفه ترخان و چهلگزی

تهیه و ترسیم: نگارنده، ۱۳۹۴

در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی روزانه و ماهانه رواناب و رسوب در دو ایستگاه هیدرومتری چهلگزی و خلیفه ترخان ارائه شده است.

به طور کلی در جدول ۳ نتایج نهایی آزمون عدم قطعیت مدل با استفاده از شاخص‌های ضریب همبستگی، شاخص Nash_Sutcliffe و عوامل p و d

جدول ۳: نتایج تست عدم قطعیت در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی در دو ایستگاه هیدرومتری خلیفه ترخان و چهل گزی

اعتبارسنجی			واسنجی			رواناب			شخص			
ایستگاه چهل گزی			خلیفه ترخان			چهل گزی			خلیفه ترخان			
روزانه	ماهانه	سالانه	روزانه	ماهانه	سالانه	روزانه	ماهانه	سالانه	روزانه	ماهانه	سالانه	
۰/۸۸	۰/۸۰	۰/۷۱	۰/۹۰	۰/۸۲	۰/۷۶	۰/۸۸	۰/۸۰	۰/۷۱	۰/۹۰	۰/۸۲	۰/۷۶	ضریب همبستگی (R ²)
۰/۷۵	۰/۷۲	۰/۶۹	۰/۷۶	۰/۷۴	۰/۷۰	۰/۷۵	۰/۷۲	۰/۶۹	۰/۷۶	۰/۷۴	۰/۷۰	ضریب Nash & Sutcliffe
۱/۰۶	۱/۳۸	۱/۶۵	۱/۰۷	۰/۸۰	۱/۵۷	۰/۸۲	۰/۷۸	۱/۰۵	۱/۱۷	۰/۸۰	۱/۵۱	عامل d
۰/۶۰	۰/۵۲	۰/۵۰	۰/۶۲	۰/۵۴	۰/۵۱	۰/۶۳	۰/۵۲	۰/۵۰	۰/۶۲	۰/۵۴	۰/۵۱	عامل p
بار رسوب			بار رسوب			بار رسوب			شخص			
سالانه	ماهانه	سالانه	ماهانه	سالانه	ماهانه	سالانه	ماهانه	سالانه	ماهانه	سالانه	ماهانه	
۰/۷۷	۰/۶۹	۰/۸۰	۰/۷۲	۰/۷۸	۰/۷۱	۰/۸۱	۰/۷۴	۰/۷۷	۰/۶۹	۰/۸۰	۰/۷۲	ضریب همبستگی (R ²)
۰/۷۱	۰/۶۹	۰/۷۱	۰/۶۸	۰/۷۲	۰/۶۹	۰/۷۱	۰/۷۰	۰/۷۱	۰/۶۹	۰/۷۱	۰/۷۰	ضریب Nash & Sutcliffe
۰/۶۰	۰/۵۸	۰/۶۳	۰/۵۹	۰/۶۵	۰/۶۰	۰/۶۷	۰/۶۳	۰/۶۰	۰/۶۷	۰/۶۳	۰/۶۰	عامل d
۰/۶۰	۰/۵۲	۰/۶۱	۰/۵۴	۰/۶۱	۰/۵۵	۰/۶۳	۰/۶۰	۰/۶۰	۰/۶۳	۰/۶۰	۰/۶۰	عامل p

مأخذ: نگارنده، ۱۳۹۴

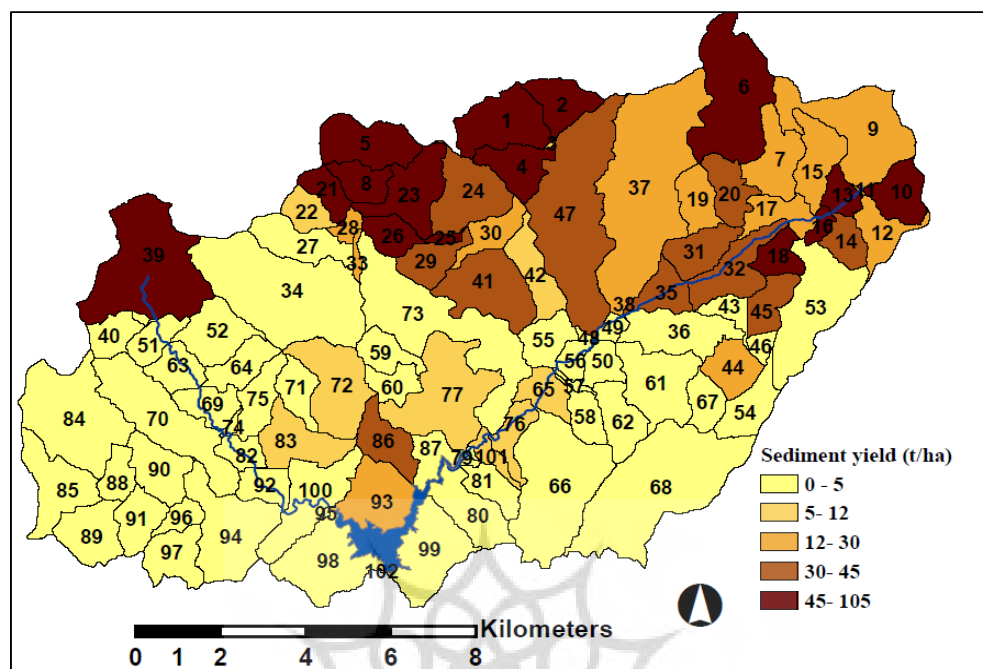
در شبیه‌سازی جریان‌های حداکثر در حوضه مورد مطالعه اعلام کردند.

نتایج تهیه نقشه شدت فرسایش و شناسایی زیرحوضه‌های حساس

با توجه به یکی از اهداف تحقیق که بررسی وضعیت فرسایش و رسوب‌دهی حوضه سد قشلاق، تهیه نقشه شدت فرسایش زیرحوضه‌ها و تعیین مناطق حساس به فرسایش در جهت ارائه راهکارهای مدیریتی است، در شکل ۷ نقشه باررسوب سالانه براساس متوسط شرایط آب و هوایی طی دوره کالیبراسیون در ۱۰۲ زیرحوضه آبخیز سد قشلاق نمایش داده شده است که در واقع مشخص‌کننده زیرحوضه‌های حساس از نظر شدت فرسایش و رسوب است.

در واسنجی رسوب ماهانه ضرایب NS، R²، d-factor و p-factor در ایستگاه چهل‌گزی به ترتیب ۰/۷۱، ۰/۶۹، ۰/۶۰ و ۰/۵۵ و در ایستگاه خلیفه‌ترخان ۰/۷۴، ۰/۷۰، ۰/۶۳ و ۰/۶۰ برآورد شد. این نتایج نشان داد که اگرچه در شبیه‌سازی باررسوب در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی، ضرایب قابل قبول بودند؛ اما مدل به اندازه رواناب قابلیت شبیه‌سازی رسوب را نداشته است. همچنان که رستمیان و همکاران (۲۰۰۸) و شول و همکاران (۲۰۰۶) نیز بر قابلیت مدل در شبیه‌سازی مناسب رواناب و رسوب در حوضه‌های آبخیز تأکید دارند.

رستمیان و همکاران (۲۰۰۸)، دلایل ضعف مدل در شبیه‌سازی ضعیف‌تر رسوب نسبت به رواناب را کمبود داده رسوب، پیچیدگی فرایند تولید رسوب، پیوسته‌نبودن اطلاعات رسوب و همچنین ضعف مدل



شکل ۷: نقشه مقدار متوسط سالانه بار رسوب (شدت فرسایش) در ۱۰۲ زیرحوضه در طی دوره شبیه‌سازی (۱۹۹۷ تا ۲۰۰۵)

تهیه و ترسیم: نگارنده، ۱۳۹۴

فرسایشی کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد است. به‌طور کلی مساحت کمی از حوضه (۱۴/۸۴ درصد)، منبع بیشترین میزان رسوب رسیده به دریاچه سد (۵۵ درصد) است که این مساحت دربرگیرنده زیرحوضه‌های ۳۹، ۲۱، ۱۶، ۸، ۱۸، ۲۶، ۵، ۱، ۶، ۲۵، ۱۰، ۲، ۱۳، ۲۳ و ۴ است. در جدول ۴ میزان بار رسوب، مربوط به پانزده زیرحوضه حساس از نظر تولید رسوب ارائه شده است. با توجه به اینکه میزان رسوب‌زایی در زیرحوضه‌های مختلف در ارتباط نزدیک با خصوصیات فیزیوگرافی، رواناب، نوع مدیریت و استفاده از اراضی است؛ از این‌رو میزان رواناب و خصوصیات فیزیوگرافی و کاربری اراضی غالب مربوط به پانزده زیرحوضه رسوب‌زا نیز مشخص شد.

براساس این نتایج محدوده تغییرات متوسط سالانه بار رسوب در طی دوره شبیه‌سازی (۱۹۹۷ تا ۲۰۰۵) بین صفر تا ۱۰۵ تن بر هکتار در زیرحوضه‌ها متغیر است و مقدار متوسط آن برای کل حوضه برابر با ۱۶٫۲ تن در هکتار در کل سال است. در این حوضه براساس میزان رسوب شبیه‌سازی‌شده، مقدار رسوب زیرحوضه‌ها در پنج گروه خیلی کم (۰-۵ تن در هکتار)، کم (۵-۱۲ تن در هکتار)، متوسط (۱۲-۳۰ تن در هکتار)، زیاد (۳۰-۴۵ تن در هکتار) و خیلی زیاد (بیشتر از ۴۵ تن در هکتار)، طبقه‌بندی شد و نتایج نشان داد که کلاس فرسایش خیلی کم در حوضه ۵۱/۲۶٪ از سطح حوضه را به خود اختصاص داده است؛ در حالی که ۱۲/۱۲، ۸۸/۸، ۰۹/۹۴ و ۱۴/۸۴ درصد از حوضه به ترتیب متعلق به کلاس‌های

جدول ۴: زیرحوضه‌های حساس به فرسایش و خصوصیات فیزیوگرافی، میزان رواناب و نوع کاربری اراضی غالب هر زیرحوضه

شماره زیرحوضه	فرسایش ویژه (تن در هکتار در کل سال)	درصد رسوب‌زایی زیرحوضه نسبت به کل حوضه	مساحت متوسط زیرحوضه (هکتار)	ارتفاع متوسط زیرحوضه (متر)	شیب متوسط زیرحوضه (درصد)	ارتفاع متوسط رواناب (میلی‌متر)	کاربری اراضی غالب (کاربری بولد شده) زیرحوضه
۳۹	۱۰۴/۱	۶	۳۳۳۴	۲۰۰۰	۲۳/۸۳	۶۳/۵۰	RNGB/RNGE/AGRR
۲۱	۹۴	۵/۴	۵۰۶/۷	۲۲۴۹/۳	۲۳/۴۰	۶۳/۷	RNGB/AGRR
۱۶	۶۷/۷۴	۵/۲۷	۱۹۷/۱	۱۹۴۴/۷	۱۱/۲۱	۹۳/۱۹	AGRR/AGRC/RNGE
۸	۶۶/۶۲	۳/۹۳	۶۱۶/۲	۲۱۶۲/۳	۱۷/۸۰	۷۲/۷۶	RNGB/RNGE
۱۸	۶۵/۶۲	۳/۸۵	۵۲۹/۹	۱۹۵۶/۷	۸/۴۴	۱۱۲/۶۹	AGRR/AGRC/RNGB
۲۶	۵۹/۷۸	۳/۸۱	۵۵۸	۱۹۴۱	۹/۹۱	۸۰/۶۶	RNGB/RNGE/AGRC
۵	۵۹/۰۸	۳/۴۷	۱۳۰۷/۴	۱۹۸۶/۶	۱۸/۰۲	۶۶/۵۲	RNGE/AGRC
۱	۵۲/۵۸	۳/۴۳	۱۴۴۵	۲۰۱۹/۲	۸/۸۲	۸۲/۶۴	RNGE/AGRC
۶	۵۲/۳۵	۳/۰۵	۲۷۴۰/۴	۲۱۳۵/۵	۱۱/۱۸	۶۵/۹۴	RNGE/AGRR/RNGB
۲۵	۴۸/۵۲	۳/۰۴	۱۱۳	۱۸۴۰	۹/۵۹	۷۰/۱۱	RNGB/RNGE/AGRC
۱۰	۴۷/۳۰	۲/۸۲	۸۳۸/۹	۲۰۲۰	۶/۲۷	۹۴/۵۳	RNGE/AGRR/AGRC
۸۶	۴۶/۷۶	۲/۷۴	۸۴۶/۷	۱۸۴۴/۳	۱۵/۷۹	۶۷/۰۵	RNGE/RNGB
۲	۴۶/۱۳	۲/۷۱	۸۲۴/۲	۱۹۸۲/۳	۷/۵۴	۸۰/۷۱	RNGE/AGRC
۱۳	۴۵/۷۳	۲/۶۸	۴۱۷/۶	۱۹۸۴/۶	۱۰/۴۰	۷۹/۰۹	RNGE/AGRR/AGRC
۴	۴۵/۴۷	۲/۶۰	۸۶۶/۳	۲۰۷۴/۷	۱۰	۷۳/۰۳	RNGE/AGRC

*مراعات متراکم (RNGE)، مراعات نیمه‌متراکم (RNGB)، مراعات کم‌تراکم (SWRN) کشاورزی آبی (AGRC) و کشاورزی دیم (AGRR).

مأخذ: نگارنده، ۱۳۹۴

تأثیر را بر روی کاهش فرسایش و رسوب در این بخش‌ها داشته باشد.

عمانی و همکاران (۱۳۸۵) با مقایسه نقشه فرسایش و مدل رقومی ارتفاع نشان دادند که زیرحوضه‌های بحرانی در نواحی کوهستانی و تپه‌ای قرار گرفتند. این نتایج با نتایج عارفی و همکاران (۱۳۹۰) در حوضه آبخیز چل‌چای مفتیان و همکاران (۱۳۸۹) در حوضه آبخیز قرناوه و یل‌چشمه و همت‌جو و همکاران (۱۳۸۸) در حوضه آبخیز زاینده‌رود مطابقت دارد. این ارتباط ائورنگ و همکاران (۲۰۰۵) و بیتری و همکاران (۲۰۱۱) نیز با تهیه نقشه شدت فرسایش حوضه بر توانایی مدل SWAT در تهیه این نقشه تأیید دارند.

مقایسه زیرحوضه‌ها از نظر میزان رسوب تولیدشده نشان می‌دهد که در بخش‌های شمال و شمال‌شرق حوضه تغییرات بیشتری در میزان بار رسوب حوضه رخ داده است و اکثر زیرحوضه‌های رسوب‌زا در این قسمت‌ها قرار دارند که با مراجعه به نقشه کاربری اراضی در این زیرحوضه‌ها می‌توان مشاهده کرد که کاربری اراضی مراعات متوسط (RNGB)، مراعات کشاورزی دیم (AGRR) و مراعات متراکم (RNGE) سه کاربری اراضی هستند که به ترتیب بیشترین مساحت را در این زیرحوضه‌ها به خود اختصاص داده‌اند و دو کاربری دیگر شامل کشاورزی آبی (AGRC) و مراعات کم‌تراکم (SWRN)، مساحت ناچیزی را اشغال کرده‌اند؛ بنابراین مدیریت این کاربری‌ها در محدوده‌های حساس به فرسایش می‌تواند بیشترین

نتیجه

در تحقیق حاضر سعی شد تا با استفاده از مدل SAWT و داده‌های در دسترس، به مدل‌سازی و بررسی وضعیت فرسایش و رسوب در حوضه سد قشلاق استان کردستان پرداخته شود. نتایج حاصل از انجام آزمون تجزیه و تحلیل حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل با استفاده از مدل SUFI-2 نشان داد که با استفاده از این مدل، مدت زمان لازم برای بهینه‌سازی پارامترها و واسنجی مدل از چند ماه به چند هفته کاهش می‌یابد و امکان رسیدن به پارامترهای واسنجی شده با حداکثر قطعیت بیشتر است. همچنان‌که یانگ و همکاران (۲۰۰۸) و عباس‌پور و همکاران (۲۰۰۷) نیز در نتایج خود به این مطلب اشاره دارند. به‌طور کلی نتایج نهایی واسنجی و اعتبارسنجی جریان رودخانه روزانه و ماهانه در هر دو ایستگاه هیدرومتری خوب و قابل قبول بود و هر چهار شاخص ضریب تبیین، نش-ساتکلیف و عوامل d و p و در محدوده قابل قبول قرار داشتند که از جمله دلایل آن علاوه بر تعداد کافی ایستگاه‌های هواشناسی و باران‌سنجی و اقلیم‌سنجی می‌توان به امکان واسنجی مناسب نتایج با وجود دو ایستگاه هیدرومتری خلیفه‌ترخان و چهل‌گزی در انتهای دو رودخانه اصلی حوضه اشاره کرد. نتایج تهیه نقشه شدت رسوب ۱۰۲ زیرحوضه‌ها نیز بر توانایی بالای مدل SWAT در ارائه این نقشه‌ها تأکید دارد. در این ارتباط ائورنگ و همکاران (۲۰۰۵)

و بیتری و همکاران (۲۰۱۱) نیز با تهیه نقشه شدت فرسایش حوضه بر توانایی مدل SWAT در تهیه این نقشه تأیید دارند. مدل وضعیت فرسایش حوضه را با مقدار رسوب ویژه (۱۶/۲ تن در هکتار) ارزیابی کرده و نشان داد که مناطق دارای کاربری زراعی بر روی اراضی شیب‌دار دارای وضعیت بحرانی از نظر فرسایش و رسوب قرار دارند. یکی از نتایج قابل ملاحظه این تحقیق این بود که به‌طور کلی از ۱۰۲ زیرحوضه مورد مطالعه، ۵۵ درصد از کل بار رسوب حوضه، مربوط به پانزده زیرحوضه حساس به فرسایش است و یا ۱۵ زیرحوضه، به ترتیب شامل زیرحوضه‌های شماره ۳۹، ۲۱، ۱۶، ۸، ۱۸، ۲۶، ۵، ۱، ۶، ۲۵، ۱۰، ۲، ۱۳، ۲۳ و ۴ است؛ از این رو مدیریت این ۱۵ زیرحوضه اشاره شده می‌تواند نقش بسزایی در کاهش رسوب وارد شده به سد قشلاق داشته باشد. با انطباق نقشه‌های کاربری و شیب چنین به نظر می‌رسد که فرسایش در حوضه‌های مذکور تحت تأثیر فرسایش‌پذیری خاک به‌علت کاربری زراعی در آنها و شیب این زیرحوضه بوده است. محققانی همچون کیم و همکاران (۲۰۰۹) بر نقش فوق‌العاده شیب تأکید دارند.

در پایان پیشنهاد می‌شود که با ارائه سناریوهای جدید به مدل در قالب روش‌های مختلف خاک‌ورزی، آبیاری و مدیریت مراتع، از نتایج این تحقیق در جهت مدیریت رسوب زیرحوضه‌های حساس به فرسایش حوضه استفاده شود.

منابع

- ضیایی، حجت‌اله (۱۳۸۷). اصول مهندسی آبخیزداری، انتشارات دانشگاه امام رضا. ۳۴۵ صفحه.
- علوی‌نیا، مرتضی؛ فرزین نصیری‌صالح (۱۳۸۸). شبیه‌سازی آورد رسوب با استفاده از مدل SWAT. هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، اهواز، ۱۳۸۸.
- چی، کامران (۱۳۷۷). بررسی نوع و میزان فرسایش در رابطه با مدیریت بهره‌برداری از اراضی و تعیین سهم رسوب‌دهی به‌منظور بهینه‌سازی کاربری اراضی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی. دانشگاه تربیت مدرس. ۱۸۵ صفحه.
- شفیعی، مجتبی؛ حسین انصاری؛ کامران داودی؛ بیژن قهرمان (۱۳۹۲). واسنجی و تحلیل عدم قطعیت یک مدل نیمه‌توزیعی در یک منطقه نیمه‌خشک (مطالعه موردی: حوضه آبریز نیشابور). مجله علوم آب و خاک- علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. شماره ۶۴. صفحه ۱۳۷ الی ۱۴۹.
- عارفی‌اصل، اکرم (۱۳۹۰). ارزیابی کارایی مدل SWAT در برآورد فرسایش حوضه و ارائه سناریوهای حفاظتی مناسب (مطالعه موردی: حوضه آبخیز چهل‌چای استان گلستان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد. گروه مرتع و آبخیز، دانشکده شیلات و محیط‌زیست و مرتع و آبخیزداری. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
- عمانی، نینا (۱۳۸۵). مدل‌سازی تخمین پتانسیل رسوبات ورودی به مخازن سدها به کمک تصاویر ماهواره‌ای و مدل SWAT. پایان‌نامه دانشگاه صنعتی شریف. ۱۳۵ صفحه.
- غلامی، شعبانعلی (۱۳۸۲). مدل شبیه‌سازی رسوب روزانه با استفاده از مدل توزیعی SWAT در حوضه‌های کوهستانی (حوضه امامه) فصلنامه پژوهش و سازندگی ۵۹: ۲۸-۳۳.
- مفتیان، سارا (۱۳۸۹). برآورد رواناب و رسوب حوضه آبخیز تمر با استفاده از مدل SWAT. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاک‌شناسی. گروه علوم خاک. دانشکده مهندسی آب و خاک. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
- مهاجی اشجعی، محمدحامد (۱۳۶۳). وزارت جهاد کشاورزی، معاونت تحقیقات و آموزش کشاورزی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، مبانی ارزیابی اراضی. نشریه ۶۵۵. تهران.
- همت‌جو، م. ح (۱۳۸۸). برنامه‌ریزی استفاده از اراضی زیرحوضه شاخه اصلی زاینده‌رود به کمک مدل SWAT و ارزیابی اراضی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاک‌شناسی. دانشکده کشاورزی. دانشگاه صنعتی اصفهان.
- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., and Srinivasan, R (2007). Modeling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of hydrology*. 333:413-430.
- Abbaspour, KC (2015). User Manual for SWAT-CUP, SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag: Dubendorf, Switzerland.
- Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B & Neitsch, S.L. (2011). SWAT Input/Output File Documentation, Version 2009. Grassland Soil and Water Research Laboratory, Temple, Texas, USA.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S. and Williams, J.R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *J. American Water Resources Association* 34 (1):73-89
- Betrie, G., Griensven, A.V., Mohammed, Y.A., Popescu, I., Mynett, A.E., Hummel, S. (2011). Linking SWAT and SOBEK using open modeling interface (OPENMI) for sediment transport simulation in the blue Nile river basin. *ASABE*. 45(5): 1749-1757.

- Rostamian, R., A. Jaleh, M. Afyuni, S. F. Mousavi, M. Heidarpour, A. Jalalian and K. C. Abbaspour.(2008). Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrol. Sci. J.* 53(5): 977-988.
- Schuol, J., Abbaspour, K.C. Yang, H. Reichert, P. Srinivasan, R. Schar Ch. and Zehnder, A. J. B (2006). Estimation of freshwater availability in the west Africa subcontinent. *J. Hydrol.* 254:58-69.
- Tyagi, J. V., S. P. Rai, N. Qaz, M. P. Singh (2014). Assessment of discharge and sediment transport from different forest cover types in lower Himalaya using Soil and Water Assessment Tool (SWAT). *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering.* 6 (1), PP. 49-66.
- Yang, J., Reichert P., Abbaspour, K.C., Xia, J., & Yang. H (2008). Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. *Journal of Hydrology*, 358 (1-2), 1-23.
- Chekol, AD (2006). Modeling of hydrology and soil erosion of upper Awash river basin, Ethiopia. Pub. PhD Thesis, University Bonn.
- Faramarzi, M., Abbaspour, KC., Yang, H., Schulin, R. (2009). Application of SWAT to quantify internal renewable water resources in Iran. *Hydrological Processes*, 23, 486-501. DOI: 10.1002/hyp.7160.
- Ijam, A.Z & E.R. Tarawneh (2012). Assessment of sediment yield for Wala dam catchment area in Jordan. *European Water.* 38: 43-58.
- Kim, J. G., Park, Y., Yoo, D., Kim, N. W., Engel, B.A, Kim, S.J, Kim, K. S., and lim, K. J (2009). Development of a SWAT patch for better estimation of sediment yield in steep sloping watersheds. *Journal of the American water resources association.* 45(4): 963-972.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., & Williams, J. R (2011). SWAT user manual, version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report. A & M University, Texas, USA.
- Oeurng, C. and Sauvage, Sabine Sanchez-Pérez, José-Miguel (2011). Assessment of hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model. *Journal of Hydrology*, vol. 401 (n°3-4). PP. 145-153.



پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی