شبیه‌سازی رسوب با کمک ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT) در یک حوضه چند مخزنه

احمد خزائی‌پول*: *پژوهشگر مدیریت منابع آب، گروه مهندسی عمران، دانشکده و پژوهشکدهٔ فنی و مهندسی پدافند غیرعامل، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران*

فاطمه زارع‌زاده: *دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، دانشکدهٔ عمران آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران*

علی مریدی: *استادیار مدیریت منابع آب، دانشکدهٔ عمران آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران*

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۳/۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۱۱)

20.1001.1.22517812.1401.12.1.4.9

چکیده

آگاهی از میزان فرسایش هر منطقه و میزان تولید بار رسوبی آن به خصوص در نزدیکی سدها اهمیت بالایی دارد و این امر سبب می‌شود، شناسایی عوامل تأثیرگذار در هر منطقه و ایجاد راهکارهایی برای کنترل یا کاهش بار رسوبات به مخازن سدها به امری ضروری تبدیل شود؛ در همین راستا سعی شد این مسأله با شبیه-سازی رواناب و رسوب در حوضهٔ کارون توسط مدل SWAT مطالعه شود. اطلاعات درجه حرارت و بارش روزانه برای دورهٔ زمانی ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۰ شمسی به مدل وارد شد. اجرای فرایند کالیبراسیون نیز با استفاده از الگوریتم SUFI2 در نرم‌افزار SWAT-CUP و به کمک داده‌های دبی و رسوب ماهانه صورت گرفت. در نهایت، میزان رسوب تولید شده از زیرحوضه‌ها و واحدهای هیدرولوژیکی به دست آمد و با کمک این اطلاعات، نقشه‌های تولید رسوب تهیه و مناطق دارای حساسیت بیشتر در برابر فرسایش شناسایی شد. بر اساس محاسبات انجام شده توسط مدل، بیشترین میزان فرسایش در زیر حوضهٔ شمارهٔ ۴۳ با مقدار ۲۲۵۰ تن بر کیلومتر مربع بر سال است و کمترین میزان فرسایش، در زیر حوضهٔ شمارهٔ ۳۷ با مقدار ۲۰۵ تن بر کیلومتر مربع بر سال. پس از شناسایی مناطق بحرانی فرسایش و در جهت کاهش فرسایش و بار رسوبی کل حوضه، از فیلتر گیاهی به عنوان راهکاری مدیریتی و حفاظتی در مدل SWAT استفاده شد. ارزیابی نتایج در این بخش نشان داد که اجرای فیلتر گیاهی در برخی از زیر حوضه‌ها می‌تواند بار رسوبی را در برخی زیرحوضه‌ها تا ۲۸ درصد کاهش دهد. این عدد در واحدهای هیدرولوژیکی به طور متوسط برابر با ده درصد است.

واژگان کلیدی: برآورد بار رسوب، حوضه آبریز کارون، راهکارهای مدیریتی و حفاظتی، مدل SWAT.

* نویسنده مسئول: **akhazaie@ihu.ac.ir**

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.4.9]

۱ـ مقدمه

سالیانه ده میلیون هکتار از اراضی کشاورزی جهان، به سبب فقدان باروری ناشی از فرسایش بیش از حد رها می‌شود (Pimentel, 2006). در کشور ایران نیز سالانه حدود صد میلیون هکتار از اراضی، در معرض فرسایش خاک یا سایر اشکال تخریب شیمیایی و فیزیکی قرار دارد که به انباشته شدن تقریبی سیصد میلیون مترمکعب رسوب در مخازن کشور منجر می‌شود (Kheyrodin, 2016). متوسط فرسایش در کشور نسبت به کشورهای آسیایی همجوار، حدود سه و نسبت به متوسط جهانی، بیست برابر بیشتر است (Sadeghi, 2017). این مسأله، به خصوص در حوضه‌هایی اهمیت به‌سزایی دارد که به منظور توسعهٔ کشاورزی یا تولید انرژی برقابی به ساخت و بهره‌برداری از مخازن پرداخته‌اند؛ از این رو، ضرورت دارد بار رسوبی کل حوضه و میزان فرسایش‌پذیری آن شناسایی و مناطق با حساسیت بالاتر لکه‌گذاری شود. همچنین لازم است در راستای کاهش و تقلیل رسوب، از راهکارهای حفاظتی استفاده و میزان اثرگذاری هر روش بر کاهش رسوب بررسی شود.

تاکنون مدل‌های فیزیکی، مفهومی و هیدرولوژی زیادی برای شبیه‌سازی بارش ـ رواناب و به تبع آن، حمل و رسوب‌گذاری توسعه یافته و کارایی آنها ارزیابی شده‌است (Chekol, 2006). یکی از مدل هایی که بدین منظور از آن به صورت گسترده استفاده می‌شود، ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT) است که مدلی نیمه توزیعی و پیوسته است و با کمک آن می‌توان به شبیه‌سازی رواناب، رسوب، تولید محصولات کشاورزی و کیفیت آب پرداخت (Arnold, 1998). در این راستا می‌توان در ادامه به مطالعاتی از این قبیل اشاره کرد. Kim و همکاران (۲۰۰۹) برای بهبود در تخمین رسوب به دست آمده از حوضه‌های آبخیز با شیب تند، به توسعهٔ مدل SWAT پرداختند. آنها بیان کردند که نتایج شبیه‌سازی با مدل ارتفاعی رقومی پنجاه متر، در مقایسه با مدل ارتفاعی رقومی صد متر بهتر بوده‌است. Setegn و همکاران (۲۰۱۰)، از مدل SWAT برای پیش‌بینی رسوب در حوضه‌ای از اتیوپی استفاده کردند تا به بررسی کارامدی این مدل در پیش‌بینی میزان رسوبات و فرسایش خاک با پیدا کردن حساس‌ترین پارامتر بپردازند. Singh و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی عدم قطعیت مدل بار رسوب با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و مدل SWAT در حوضه آبخیز دشت کشاورزی Nagwa در Jharkhand هند پرداختند که در آن، مدل SWAT عملکرد مناسبی از خود ارائه کرد. Xu و همکاران (۲۰۰۹) نیز با استفاده از مدل SWAT ، به ارزیابی رواناب و رسوب تولید شده در حوضه آبخیز Miyun پرداختند. این مطالعه، توانمندی مدل را برای شبیه‌سازی رسوب در یک منطقهٔ خشک و نیمه خشک در شمال چین، برای یک دورهٔ شش ساله ارزیابی کرد. Ricci و همکارانش (۲۰۱۸) به ارزیابی نتایج حاصل از مدل SWAT در شبیه‌سازی جریان و رسوبات و شناسایی مناطق منبع رسوب در حوضه آبریز Carapelle در ایتالیا پرداختند که حوضه‌ای با آب و هوای مدیترانه‌ای بود و در آن تغییرات زیاد بارندگی و رژیم هیدرولوژیکی مشاهده می‌شد. Farokhzadeh و همکاران (2015) نیز با استفاده از مدل SWAT ، اثر تغییر کاربری اراضی را بر بار معلق حوضه آبخیز یلفان ارزیابی کردند و نتایج نشان داد که این اثر در منطقهٔ مورد مطالعه قابل‌توجه (یازده درصد) بوده‌است. Ghaffari (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای، به پهنه‌بندی شدت فرسایش با استفاده از مدل SWAT در حوضهٔ سد قشلاق پرداخت. نتایج مطالعهٔ او نشان داد که مناطق بحرانی با بیشترین فرسایش، کاربری زراعت دیم بر اراضی شیب‌دار است. Khaleghi و همکاران (۲۰۲۰) نیز با استفاده از مدلSWAT ، به برآورد فرسایش خاک و انتقال رسوب در

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.4.9]

بالادست حوضه آبخیز بادآور لرستان پرداختند. نتایج مطالعهٔ آنها نشان داد که نقش کاربری اراضی در رسوب‌زایی منطقهٔ مورد مطالعه از سایر عوامل بیشتر است. نتایج مطالعات مذکور، حاکی از توانمندی بالای مدل در برآورد میزان رسوب و شناسایی مناطق بحرانی است.

علاوه بر این موارد، یکی از مهم‌ترین قابلیت‌های مدل SWAT که آن را به مدلی محبوب نزد کاربران تبدیل کرده‌است، قابلیت شبیه‌سازی راهکارهای حفاظتی مختلف در حوضهٔ مورد مطالعه است (Gassman et al, 2007). گروهی از محققان در یک گام رو به جلو، به شبیه‌سازی راهکارهای مدیریتی BMP[1] و حفاظتی پرداختند که در ادامه، به برخی از این مطالعات و ارائه نتایج رضایت‌بخش آنها پرداخته می‌شود. Parajuli و همکاران (۲۰۰۸) به منظور ارزیابی اثر اقدامات مدیریتی، از مدل SWAT در حوضه‌ای به مساحت ۹۵۰ کیلومتر مربع در کانزاس آمریکا استفاده کردند. آنها بر اساس رسوب خروجی از هر زیرحوضه، اثر طول نوارهای فیلتر گیاهی[2] احداث شده در حاشیهٔ مزارع را بر کاهش بار آلاینده‌ها و رسوب تعیین کردند. Mtibaa و همکاران (۲۰۱۸)، از مدل SWAT برای شناسایی مناطق بحرانی مستعد تولید رسوب و بررسی اثربخشی BMPهای مختلف در کاهش رسوب در حوضهٔ جومونـد، حوضه آبخیز کشاورزی واقع در شمال تونس، استفاده کردند. حدود ۳۴ درصد از حوضه آبریز، شامل مناطق بحرانی بود که تحت‌تأثیر فرسایش خاک بالا و بسیار زیاد قرار داشت. به دلیل کاهش رسوبات، خطوط کانتور به عنوان مؤثرترین BMP شناخته شد که کاهش ۵۹٪ رسوبات را به همراه داشت. همچنین نتایج مطالعهٔ آنها نشان داد که استفادهٔ ترکیبی از BMPها نسبت به استفادهٔ تنهایی از خطوط کانتور، عملکرد بسیار بهتری دارد. Ni و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT) برای ارزیابی بهترین روش مدیریت (BMP)ها برای یک حوضه آبخیز کشاورزی، از یک روش محافظتی برای جلوگیری از آلودگی منابع غیرنقطه‌ای و از دست دادن خاک و آب استفاده کردند. Uniyal و همکاران (۲۰۲۰) از مدل SWAT برای مدیریت پایدار حوضه آبخیز، شناسایی مناطق بحرانی مستعد فرسایش و انتخاب بهترین شیوه‌های مدیریتی حوضه‌های آبریز برای کنترل تخریب آنها با کاهش بازده رسوب با ارزیابی کارایی هشت روش مدیریت ساختاری کشاورزی و ترکیبات سه سناریو برای کنترل بازده رسوب در سطوح حوضه پرداخته‌اند. Naseri و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از مدل SWAT، به ارزیابی راهکارهای حفاظتی سازه‌ای در کنترل رسوب حوضهٔ سد فریمان پرداختند. نتایج آنها در یکی از حالت‌ها نشان داد که این راهکارهای حفاظتی می‌تواند حدود ۲۲ درصد از رسوب را کاهش دهد.

در این مطالعه با استفاده از ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT)، ابتدا میزان فرسایش‌پذیری نقاط مختلف حوضهٔ کارون ارزیابی و نقاط مختلف با بیشترین حساسیت شناسایی شد. سپس از یکی از راهکارهای مدیریت سازه‌ای یعنی نوار پوشش گیاهی استفاده شد تا میزان تأثیرگذاری آن بر کاهش رسوب بررسی شود. این مطالعه برای برنامه‌ریزان مدیریت منابع آب به‌خصوص در بخش‌هایی مفید است که با استفاده از مخازن به تأمین برق یا آب مورد نیاز کشاورزی می‌پردازند.

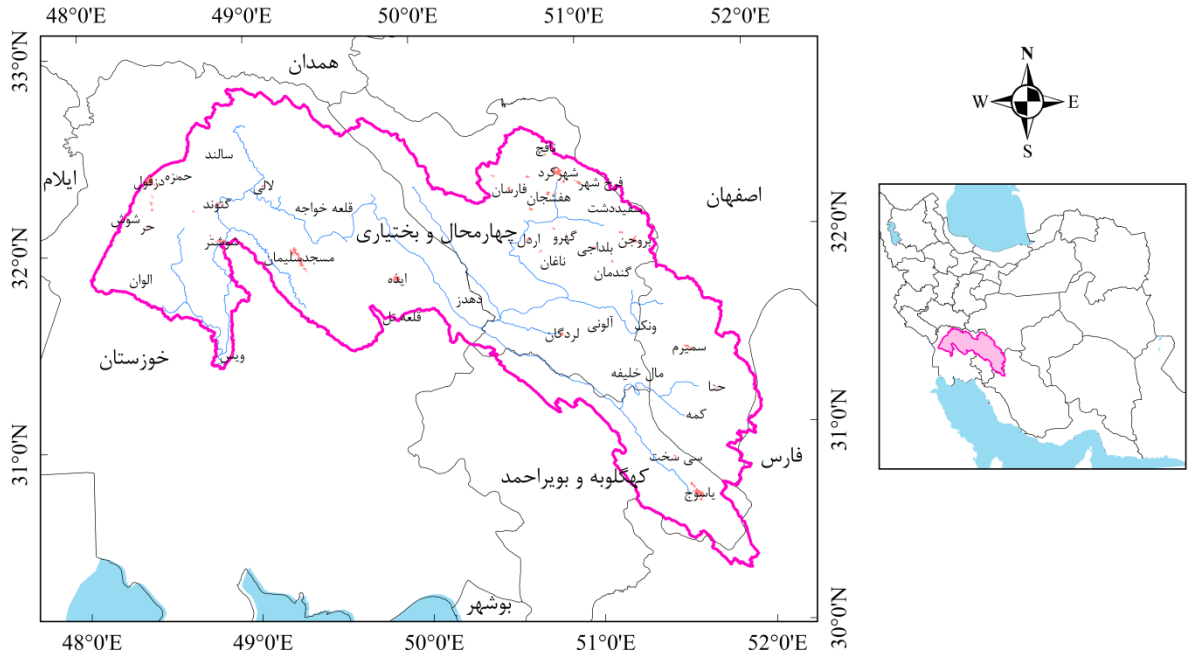
۲ـ منطقهٔ مورد مطالعه

[1] Best Management Practices
[2] Vegetative Filter Strip

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.4.9]

منطقهٔ مطالعاتی با مساحتی در حدود ۳۸۰۰۰ کیلومتر مربع، در جنوب غربی ایران واقع شده‌است. محدودهٔ مطالعاتی (حوضه آبریز) بر اساس آخرین تقسیمات سیاسی و اداری، در محدودهٔ استان‌های چهارمحال و بختیاری، فارس، اصفهان، کهگیلویه و بویراحمد و خوزستان قرار دارد و بر اساس تقسیم‌بندی هشتگانهٔ جاماب، در محدودهٔ غرب (محدودهٔ ۳) به نام حوضهٔ کارون واقع است (شکل ۱). محدودهٔ حوضه آبریز کارون، از ′۴۵ ۴۸° تا ′۴۵ ۵۱° طول شرقی و ′۱۵ ۳۰° تا ′۴۵ ۳۲° عرض شمالی است.

کاربری این منطقه با بیش از ۴۶ درصد، به بیشه‌زارها و تاکستان اختصاص دارد و بعد از آن، مراتع با مساحتی در حدود ۳۱ درصد، کل حوضهٔ غالب کاربری منطقه را در برگرفته‌است. دام معادل منطقه، ۱۱/۲۹ گوسفند در نظر گرفته شده‌است. کشت غالب منطقه، گندم و جو به صورت آبی و دیم است و اغلب مساحت این منطقه، مناطقی با شیب بیش از بیست درصد است که بیش از ۴۵ درصد منطقه را فراگرفته‌است. مخازن بزرگی از جمله سد عباسپور، مسجد سلیمان، لردگان، کارون ۳ و گتوند، بر روی رودخانهٔ کارون و سرشاخه‌های آن قرار گرفته‌اند (شکل ۳).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقهٔ مورد مطالعه

۳ـ مواد و روش

مدل SWAT ، مدلی فیزیکی و نیمه توزیعی است که از آن برای پیش‌بینی اثر تغییر کاربری، تغییر اقلیم و مدیریت‌ها در حوضه‌های آبخیز بزرگ و پیچیده استفاده می‌شود و Arnold و همکاران در سال ۱۹۹۸ آن را توسعه داده‌اند. در این مدل به جای استفاده از روابط رگرسیونی در برقراری ارتباط بین ورودی و خروجی، فرایندهای فیزیکی مربوط به حرکت آب، رسوب، رشد گیاه، سیکل مواد غذایی در خاک و غیره، با استفاده از ورودی‌هایی مانند داده‌های اقلیمی، خصوصیات خاک، توپوگرافی و نوع پوشش اراضی شبیه‌سازی می‌شود. در این مدل، هر قسمت از حوضه که نوع خاک، کاربری اراضی و شیب یکسانی دارند، به نام یک واحد هیدرولوژیکی (HRU) شناخته

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.4.9]

می‌شود. اجزای هیدرولوژیکی در نظر گرفته شده در مدل نیز به صورت شماتیک نشان داده شده‌است (Swat theory-2009).

یکی از روابط اصلی در شبیه‌سازی که از آن در مدل SWAT استفاده شده‌است، معادلهٔ بیلان است که به صورت رابطهٔ زیر تعریف می‌شود:

$$S_{Wt} = S_{W0} + \sum_{i=0}^{t} (R_{day} - Q_{surf} - Ea - W_{seep} - Q_{gw})_i$$ رابطهٔ ۱

در این معادله، SW مقدار نهایی آب در خاک برحسب میلی‌متر در روز t بر حسب روز، SW0 مقدار اولیهٔ آب در خاک برحسب میلی‌متر در روز t بر حسب روز، Rday میزان بارندگی در روز i برحسب میلی‌متر، Wseep مقدار آبی که در روز i از منطقهٔ ریشه خارج می‌شود برحسب میلی‌متر، Qgw مقدار جریان برگشتی در روز i برحسب میلی‌متر و Qsurf رواناب سطحی تجمعی در روز i برحسب میلی‌متر است.

در این مدل فیزیک حرکت آب و رسوب، رشد گیاه، چرخهٔ عناصر مغذی و ... برای شبیه‌سازی به صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شود (Swat theory-2009). مزیت این مدل، افزودن اثر ذوب برف در شبیه‌سازی فرسایش و هدف اصلی آن، شبیه‌سازی اثر شیوه‌های مختلف مدیریتی زمین (مکانی ـ زمانی) بر کمیت و کیفیت آب و رسوب در حوضه‌های مختلف با توجه به شرایط مختلف اقلیمی، کاربری اراضی و نوع خاک است. پیش‌بینی مقدار فرسایش خاک ناشی از باران و رواناب در مدل SWAT، بر اساس معادلهٔ جهانی فرسایش خاک (MUSLE) است. در این روش، از رواناب سطحی به عنوان عامل فرسایش استفاده می‌شود. معادلهٔ جهانی فرسایش به صورت زیر است:

$$SED = 11.8\ (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{HRU})\ 0.56K.C.P.LS.\ CFRG$$ رابطهٔ ۲

Sed بار رسوب در روز معین (تن)، Qsurf حجم رواناب سطحی (میلی‌متر در هکتار)، qpeak میزان رواناب اوج (متر مکعب بر ثانیه)، AreaHRU مساحت واحد پاسخ هیدرولوژیک (هکتار)، K شاخص فرسایش‌پذیری خاک، C شاخص مدیریت و پوشش، P شاخص عملیات حفاظتی، LS شاخص توپوگرافی و CFRG شاخص قطعات درشت است.

برای شبیه‌سازی مخزن توسط مدل SWAT ، از معادلهٔ بیلان آب به صورت زیر استفاده شد:

$$V = V_{stored} + V_{flowin} - V_{flowout} + V_{pcp} - V_{evap} + V_{seep}$$ رابطهٔ ۳

در این رابطه، V حجم آب موجود در مخزن در انتهای روز (m^3)، V_{stored} حجم آب ذخیره شده در مخزن در ابتدای روز (m^3)، V_{flowin} حجم جریان ورودی به مخزن در طی روز (m^3)، $V_{flowout}$ حجم جریان خروجی از مخزن در طی روز (m^3)، V_{pcp} حجم کل بارش بر روی مخزن در طول روز (m^3)، V_{evap} حجم آب تبخیر شده از مخزن در طول روز(m^3) و V_{seep} نیز حجم آب نشت شده از بستر مخزن (m^3) است (Swat theory-2009).

به منظور تجزیه و تحلیل فقدان قطعیت یک مدل یا یک فرمول، مشخصات آماری خروجی‌های آن مدل (فرمول) به عنوان تابعی از فقدان قطعیت پارامترهای ورودی تعیین شد.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.4.9]

Giglioli و همکاران (۲۰۰۳)، فقدان قطعیت موجود در مطالعات را به دو بخش کلی تقسیم‌بندی کردند که شامل فقدان قطعیت‌های مربوط به پارامترهای مدل و فقدان قطعیت در داده‌های موجود است. روش‌های مختلفی برای تحلیل فقدان قطعیت مدل‌های هیدرولوژیکی از جمله روش مونت کارلو یا روش‌های مربوط به ترکیب شبیه‌سازی‌های مختلف مانند میانگین‌گیری مدل بیزی وجود دارد. برای تحلیل فقدان قطعیت پارامترهای موجود در مدل، از نرم‌افزار SWAT-CUP استفاده شد. این نرم‌افزار دارای قابلیت تحلیل و بررسی فقدان قطعیت موجود در مدل به چهار روش است که شامل SUFI-2, GLUE, MCMC و ParaSol می‌باشد و در این مطالعه از روش SUFI-2 استفاده شده‌است. در ادامه، به مبانی عملکرد این روش پرداخته می‌شود.

ـ روش تعیین فقدان قطعیت SUFI-2

این روش ــ که در سال ۱۹۹۷ توسط دکتر عباسپور و همکارانش ارائه شد ــ حالت توسعه‌یافته از روش SUFI است که تمامی منابع فقدان قطعیت شامل فقدان قطعیت موجود پارامترهای مدل، مدل مفهومی و داده‌های ورودی را در نظر می‌گیرد (Abbaspour, 2007). در این روش، پارامترهای مؤثر انتخاب می‌شوند و برای هر یک از آنها بازهٔ تغییراتی در نظر گرفته می‌شود. در این روش، طی هر مرحله برای هر پارامتر عددی در بازهٔ مربوطه در نظر گرفته و نتیجه با تابع هدف سنجیده می‌شود. با تکرار این مراحل، طی هر مرحله دامنهٔ بازهٔ اولیه کمتر می‌شود تا هر یک از شاخص‌های P-factor و r-factor به مقادیر مناسب برسد. همچنین از دو شاخص Nash-sutcliffe و R2 نیز برای بررسی و بهبود عملکرد شبیه‌سازی استفاده می‌شود. در ادامه، این شاخص‌ها توضیح داده می‌شود.

P-factor: این شاخص برابر با درصدی از داده‌های مشاهداتی است که در بازهٔ احتمالاتی ۹۵ درصد شبیه‌سازی‌ها (95PPU) قرار می‌گیرد. حداکثر مقدار P-factor برابر با صد درصد است و زمانی رخ می‌دهد که تمام داده‌های مشاهداتی در درون بازهٔ اطمینان ۹۵ درصد قرار گرفته باشند.

r-factor: این شاخص برابر با میانگین اختلاف فاصله بین باند بالایی و باند پایینی بازه‌های فقدان قطعیت، تقسیم بر انحراف معیار داده‌های مشاهداتی است. بهترین حالت برای این شاخص زمانی است که این مقدار برابر با صفر باشد که بهترین نتیجه برای شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

ضریب تعیین (R2):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(p_i - \hat{p}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(p_i - \bar{P})^2}$$

رابطهٔ ۴

که n تعداد مشاهدات، p_i مقادیرمتناظر پیش‌بینی‌شده، $\hat{p}_i$ برآورد مدل و $\bar{P}$ نیز میانگین ریاضی مقادیر پیش‌بینی‌شده است. ضریب تعیین نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده تا چه میزان به حداکثر مقدار هماهنگی بین این دو سری مقدار نزدیک است و بازهٔ تغییراتی آن بین صفر تا یک می‌باشد و بهترین حالت، زمانی است که این شاخص به عدد یک نزدیک شود.

ضریب نش ــ ساتکلیف (NS): این شاخص بیان می‌کند که خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده تا چه مقدار به خط رگرسیون با شیب یک (خط با شیب ۱:۱) هماهنگی دارد و رابطهٔ آن به صورت زیر است (McCuen et al, 2006):

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.4.9]

رابطهٔ ۵

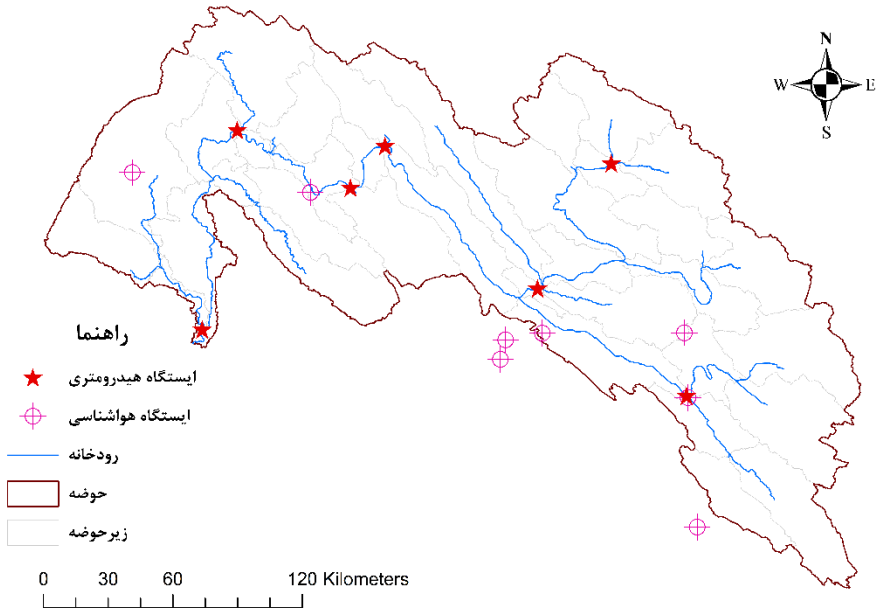
$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_i - \bar{Q})^2}$$

در این رابطه، Q مقدار دبی اندازه‌گیری‌شده و P مقدار دبی شبیه‌سازی‌شده است. این شاخص از منفی بی‌نهایت تا یک، متغیر است و هر چه به یک نزدیک‌تر شود نتایج بهتری از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

آماده‌سازی داده‌ها و ورودی و ساخت مدل

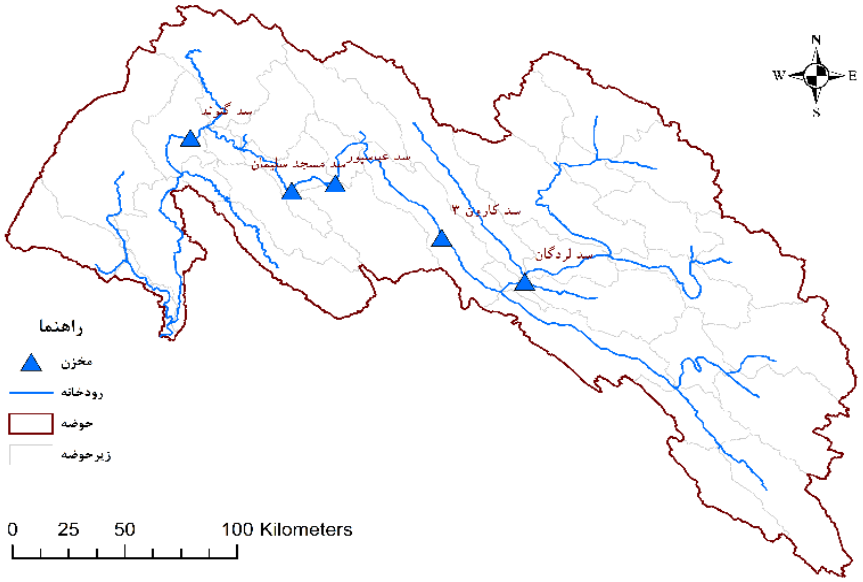
برای ساخت و آماده‌سازی مدل SWAT از ورودی‌هایی از جمله اطلاعات توپوگرافی، هواشناسی، خاک، پوشش گیاهی، مخازن و داده‌های مدیریتی استفاده می‌شود. اطلاعات درجه حرارت و بارش روزانه برای دورهٔ زمانی ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۰ هجری شمسی و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و باران‌سنجی با پسوند dbf یا txt و اطلاعات توپوگرافی به صورت مدل رقومی ارتفاعی با سیستم مختصات UTM و با فرمت Grid و موقعیت ایستگاه‌های آب‌سنجی و چشمه‌ها به صورت جداول با پسوند dbf تهیه و به مدل معرفی شد. نقشهٔ آبراه‌ها و رودخانه‌ها به صورت وکتوری و نقشهٔ کاربری اراضی و خاک نیز که به‌صورت رستری از نرم‌افزار Arc GIS 10.4 به‌دست آمده‌است، به مدل وارد شد.

از جمله پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی حوضه توسط مدل، اطلاعات هواشناسی است. در این مطالعه در حوضه آبریز رودخانهٔ کارون، از آمار بارندگی هشت ایستگاه باران‌سنجی و هفت ایستگاه مشاهداتی هیدرومتری (شکل ۲) ــ که دارای دوره آماری بیش از ۲۶ سال بود ــ استفاده شد. در این تحقیق با استفاده از مدل رقومی ارتفاع DEM، با دقت اندازهٔ سلولی ۹۰×۹۰ متر و با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS به بررسی ویژگی‌های حوضه پرداخته شد. شکل زیر نمایی از منطقهٔ مورد مطالعه را نشان می‌دهد. برای این منظور به کمک نرم‌افزار Arc GIS10.4، خصوصیات فیزیوگرافی حوضه از قبیل مساحت و شیب متوسط حوضه و رودخانه استخراج شد. برای اجرای مطالعات فرسایش، حوضهٔ کارون بر اساس خصوصیات هیدرولوژیکی به ۳۷ زیرحوضه و ۴۲۴ واحد واکنش هیدرولوژیکی تقسیم شد.



شکل۲: نقشهٔ ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی منطقه

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.4.9]



شکل ۳: موقعیت مخازن منطقه

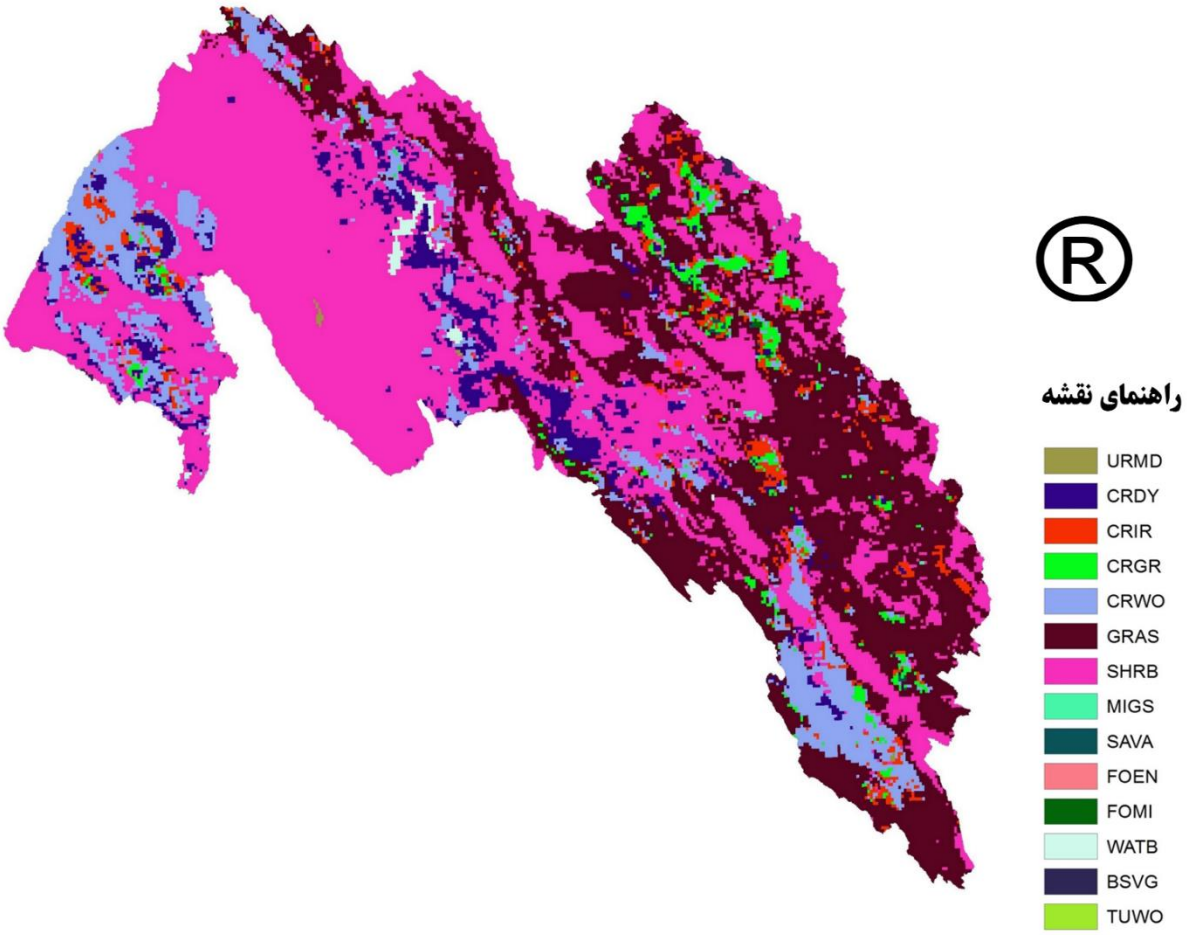
۴ـ یافته‌ها (نتایج)

شکل ۴، لایهٔ کاربری اراضی منطقه را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در نمودار دایره‌ای (شکل ۵) مشخص است، بیشه‌زارها و تاکستان‌ها غالب کاربری این منطقه را با بیش از ۴۶ درصد فراگرفته‌اند و بعد از آن، مراتع با مساحتی در حدود ۳۱ درصد کل حوضه غالب کاربری منطقه را در برگرفته‌است.

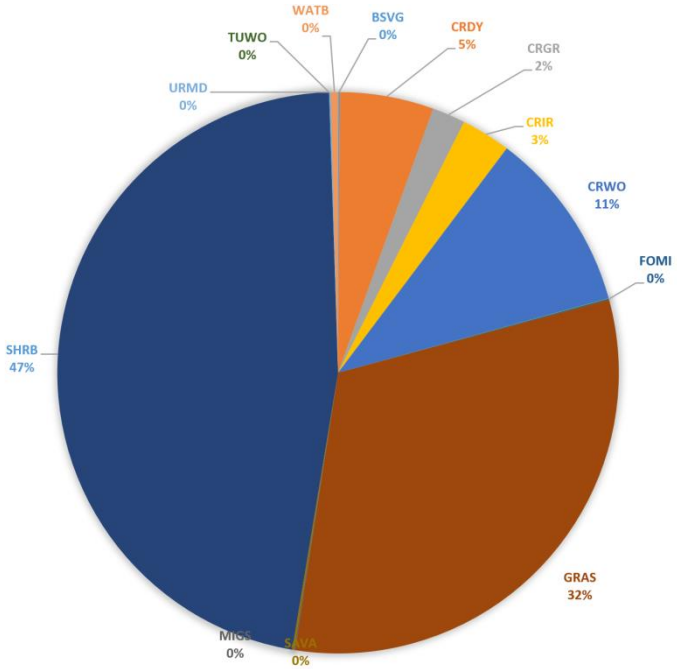
جدول ۱: کاربری اراضی منطقه

نوع کاربری اراضی	علامت اختصاری در مدل SWAT	درصد سطح حوضه
زمین‌های بایر با پوشش گیاهی پراکنده	BSVG	۰.۱
زمین‌های زراعی دیم	CRDY	۵.۴
چمن‌زار	CRGR	۱.۹۱
زمین‌های زراعی فاریاب	CRIR	۲.۸۵
مزارع	CRWO	۱۰.۴۶
جنگل‌های سوزنی	FOEN	۰.۰۳
جنگل‌های مخلوط	FOMI	۰.۰۶
مرتع	GRAS	۳۱.۶۳
درختچه و چمن‌زار	MIGS	۰.۰۷
جنگل‌های ساوانا	SAVA	۰.۱
بیشه‌زار- تاکستان	SHRB	۴۶.۸۷
جنگل‌های تندرا	TUWO	۰
مناطق مسکونی	URMD	۰.۰۹
مناطق آبی	WATB	۰.۴۲

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.4.9]



شکل ۴: نقشهٔ کاربری اراضی منطقه



شکل ۵: درصد کاربری‌های اراضی منطقه

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.4.9]

آنالیز حساسیت و انتخاب پارامترها

با هدف شناسایی پارامترهای با حساسیت بیشتر برای آسان کردن مراحل واسنجی مدل، تعدادی از پارامترهایی که بر فرایند شبیه‌سازی رسوب مؤثرند انتخاب شدند؛ مانند مواردی که مربوط به ویژگی‌های خاک، کاربری اراضی، آبراهه‌ها و وضعیت توپوگرافی است. از آن جا که حدود مشخص شده برای پارامترها در یک حوضه ممکن است برای حوضهٔ دیگر صادق نباشد؛ به این دلیل اجرای آنالیز حساسیت برای واسنجی مدل در حوضه باید به صورت جداگانه انجام شود و نتایج حاصل از آن مورد استفاده قرار گیرد. در جدول زیر، پارامترهای انتخابی مدل SWAT به منظور اجرای آنالیز حساسیت همراه با دامنهٔ تغییرات آنها ارائه شده‌است. این مرحله از محاسبات با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP انجام شد که در آن رتبه‌بندی پارامترهای حساس با توجه به میزان اثر تغییرات آنها در دامنهٔ مجاز، بر نتایج خروجی مدل صورت گرفت (Jirani, 2009).

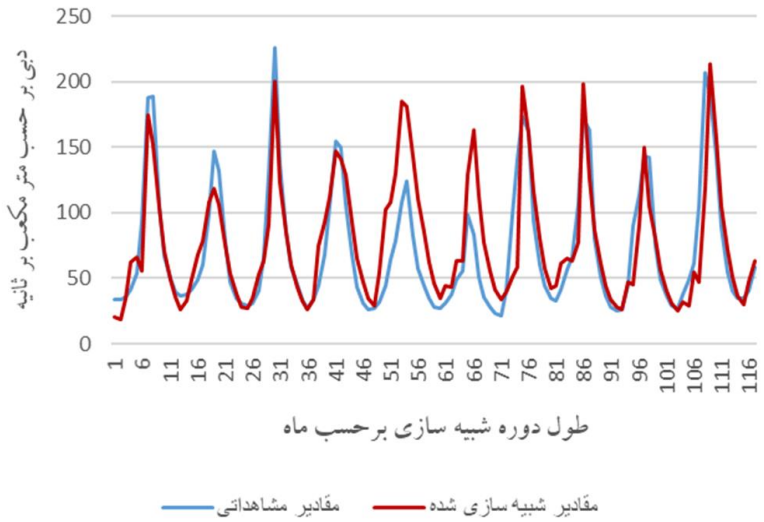
جدول ۲: پارامترهای مورد استفاده برای کالیبراسیون مدل SWAT

پارامترها	توضیحات	حد پایین	حد بالا
ESCO. hru	ضریب جبران تبخیر خاک	۰.۹	۱
SOL_AWC. sol	ظرفیت آب قابل دسترس(mm/mm)	۰.۲	۰
HRU_SLP. hru	متوسط تندی شیب (m/m)	۰.۱	۰.۱۵
OV_N. hru	ضریب زبر برای دامنه	۱۵	۲۵
SLSUBBSN. hru	متوسط طول (شیب)(m)	۱۲۰	۱۳۰
GW_REVAp. gw	ضریب مربوط به تبخیر از لایهٔ بالایی سطح ایستایی	۱	۲
SPCCN_bsn	ضریب خطی برای محاسبهٔ حداکثر مقدار رسوب	۰	۰.۱
SPEXP. bsn	پارامتر توان در برآورد بار رسوب آبراهه	۱.۳۶	۱.۴
ADJ_PKR. bsn	شاخص تصحیح میزان حداکثر برای روندیابی رسوب در آبراه‌های فرعی	۱.۵	۲.۵
CH_S2. hru	شیب آبراههٔ اصلی (m/m)	۰	۱۰
USLE_K. sol	شاخص فرسایش‌پذیری خاک	۱۹۲۶.۸	۲۰۰۰
USLE_P. mgt	شاخص اقدامات حفاظتی	۰.۹	۱
LAT_SED. hru	غلظت رسوب در جریان جانبی و آب‌های زیرزمینی (g/cm^3)	۵۱۱.۲	۵۳۵.۸
SED_CCN. hru	غلظت رسوب در جریان‌های شهری(g/cm^3)	۴۷۰	۵۱۰
POT_NSED. hru	غلظت رسوبات طبیعی در گلدان(g/cm^3)	۳۸۰	۴۱۹.۳
CANMX. hru	حداکثر گیرش باران توسط گیاهان (mm H_2O)	۹۲	۹۸
SMFMN. bsn	حداقل دمای لازم برای ذوب برف (°C)	- ۲.۹	۱.۲۲
GW_DELAY. gw	زمان رسیدن آب از آخرین لایهٔ خاک به سفرهٔ آب زیرزمینی (days)	۱۷	۲۲
CN2. mgt	شمارهٔ منحنی نفوذ در شرایط متوسط رطوبتی	۸۹	۹۸
ALPHA_BF. gw	ضریب پاسخ جریان پایه برای آب زیرزمینی (days)	۰.۹۴	۱
GWQMN. gw	حداقل ارتفاع سطح ایستایی لازم برای خروج آب زیرزمینی (mm)	۸	۱۲.۱
REVAPMN. gw	تبخیر آب زیرزمینی (mm/hr)	۴۰۰	۴۲۰
SNOCOVMX. bsn	مقدار مینیمم آب برف در زمان پوشش صد درصدی برف (mm H_2O)	۰.۲۲۵	۰.۲۲۹
SOL_K. sol	هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در لایه سطحی (mm/hr)	۰.۴	۰.۰۸۴

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.4.9]

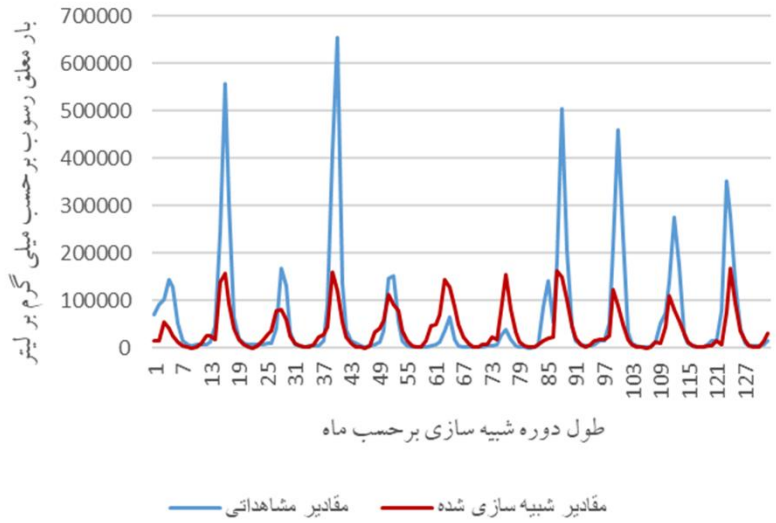
پارامترها	توضیحات	حد پایین	حد بالا
CH_N2. rte	ضریب مانینگ رودخانهٔ اصلی	۰.۰۰۰۰۰۹	۰.۰۰۰۰۲۵
CH_COV. rte	شاخص پوشش آبراهه	۰	۱
CH_K2. rte	هدایت هیدرولیکی مؤثر در رودخانه (mm/hr)	۸۱	۸۹.۷
CH_EROD. rte	شاخص فرسایش‌پذیری آبراهه (cm/hr/pa)	۰	۰.۶
CH_ERODMO. rte	شاخص فرسایش‌پذیری آبراهه	۰.۴	۰.۶۹
CH_N1. sub	ضریب مانینگ آبراهه فرعی	۰.۰۰۱	۰.۰۱

در میان نتایج حاصل از شبیه‌سازی رواناب و رسوب در هفت ایستگاه از زیرحوضه‌های منطقهٔ مورد مطالعه، نتایج ایستگاه شمارهٔ ۲۵ نسبت به سایر ایستگاه‌ها نتایج بهتری داشت که نمودارها و مقادیر شاخص عملکرد آن در ادامه بیان شده‌است (جدول ۳). شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب نمودار میانگین رواناب سطحی و رسوب تولیدی هر کاربری برآورد شده توسط مدل را ارائه می‌دهند.



شکل ۶: نتایج حاصل از کالیبراسیون رواناب ایستگاه شمارهٔ ۲۵

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.4.9]



شکل ۷: نتایج حاصل از کالیبراسیون رسوب ایستگاه شمارهٔ ۲۵

مقادیر عددی شاخص Nash-sutcliffe و R^2 برای بررسی و بهبود عملکرد شبیه‌سازی در جدول ۳ آمده‌است.

جدول ۳: مقادیر شاخص عملکرد مدل

	R^2	Nash-sutcliffe
Flow_OUT_25	۰.۷۱	۰.۶۸
Sed_Out_25	۰.۵۱	۰.۳۳

در قسمت خروجی‌های مدل SWAT در پوشهٔ (*.std) متوسط فرسایش ویژهٔ زیرحوضه‌ها (فرسایش هر زیرحوضه در هر هکتار در واحد سالانه) قابل دسترسی است. بر اساس محاسبات انجام شده توسط مدل، بیشترین میزان فرسایش در زیر حوضهٔ شمارهٔ ۴۳ با مقدار ۲۲۵۰ تن بر کیلومتر مربع بر سال اتفاق می‌افتد و کمترین میزان فرسایش، در زیر حوضهٔ شمارهٔ ۳۷ با مقدار ۲۰۵ تن بر کیلومتر مربع بر سال است که با توجه به نوع شیب منطقه، کاربری آنها و وجود اراضی دیم می‌توان اثرگذاری این عوامل را در میزان فرسایش منطقه شناسایی کرد و برای کنترل فرسایش‌های بحرانی منطقه راهکارهای مناسبی ارائه شود.

SDR یا نسبت تحویل رسوب، در عمل به بخشی از فرسایش در حوضه اطلاق می‌شود که در سطح حوضه باقی مانده‌است و از آن خارج نمی‌شود؛ چون در واقع تمام خاک فرسایش‌یافته به رسوب تبدیل نمی‌شود و بخشی از آن پس از جابه‌جایی و حرکت در قسمت دیگری از حوضه تثبیت می‌شود. در واقع، SDR ضریبی است که نشان می‌دهد چه درصدی از فرسایش به رسوب تبدیل می‌شود. چون همیشه تنها بخشی از خاک فرسایش‌یافته به رسوب تبدیل می‌شود؛ بنابراین، همواره مقدار SDR کوچک‌تر از یک است (Walling, 1983).

رابطهٔ ۶

$$\%SDR = \frac{\text{رسوب ویژه}}{\text{فرسایش ویژه}} \times 100$$

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.4.9]

عوامل متعددی در SDR مؤثرند که از آن جمله می‌توان به شیب حوضه، شیب آبراههٔ اصلی، وسعت دشت‌های سیلابی و مناطق مسطح موجود در مسیر جریان، وسعت حوضه، بافت خاک و ... اشاره کرد. در واقع، هر چه میزان دشت‌های موجود در حوضه بیشتر باشد، جریان در مسیرِ حرکت و رسیدن به این مناطق رسوبات بیشتری را بر جا می‌گذارد و بخش‌های دیگر را با خود حمل می‌کند.

میزان SDR، از روی نمودار با توجه به مساحت حوضه یا واحدهای هیدرولوژیک مشخص می‌شود (Waldo, 1987).

$$\text{Log } SDR = 1/7935 - 0/14191 \times \log A$$ رابطهٔ ۷

A: مساحت حوضه یا واحد هیدرولوژیک برحسب کیلومترمربع

پس از تعیین SDR در هر واحد با استفاده از نقشهٔ میزان رسوب‌دهی ($Ton/Km^2.y$) که در مرحلهٔ قبل تهیه شده بود و میزان SDR در هر واحد از تقسیم میزان رسوب ویژه بر میزان SDR آن واحد، میزان فرسایش ویژه ($Ton/Km^2.y$) برای هر واحد تعیین خواهد شد.

نتایج رسوب تولیدی هر زیر حوضه در این گزارش نتایج عملیات هیدروگرافی با بهره‌برداری مخزن سد شهید عباسپور، در سه مقطع زمانی اندازه‌گیری هیدروگرافی انجام شده‌است. مطابق نتایج هیدروگرافی، حجم و وزن رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد شهید عباسپور در بازهٔ زمانی ۲۷ ساله (۱۳۵۶ تا ۱۳۸۴) و با در نظر گرفتن وزن مخصوص (ton/m3) ۱/۳ به ترتیب معادل ۶۸۹ mcm و ۸۹۶ Mton است. با توجه به بازهٔ زمانی ۲۷ ساله، حجم و وزن سالیانهٔ رسوبات در محل سد شهید عباسپور به ترتیب معادل ۲۵/۵ MCM و ۳۳/۲ Mton برآورد می‌شود. چنانچه مقدار تله‌اندازی سد شهید عباسپور برابر با ۰/۹۵ در نظر گرفته شود، وزن رسوبات سالانهٔ ورودی به مخزن سد شهید عباسپور معادل ۳۵ Mton برآورد می‌شود. با در نظر گرفتن مساحت حوضه آبریز کارون در بالادست این سد، دبی ویژهٔ رسوبات ورودی به مخزن سد مذکور، معادل ($ton/km^2.year$) ۱۳۰۲ محاسبه شده‌است.

به منظور مقایسهٔ نتایج رسوبی در محل ایستگاه بالادست (پل شالو) و با استفاده از روش ایستگاهی و کنترل آن با نتایج هیدروگرافی، لازم است میزان رسوبات ورودی به مخزن سد شهید عباسپور با توجه به اندازه‌گیری‌های هیدروگرافی به محل ایستگاه بالادست تعمیم داده و نتایج هر دو روش در محل ایستگاه بالادست (نتایج ایستگاهی و نتایج هیدروگرافی) با یکدیگر مقایسه شود. به این منظور، وزن رسوبات سالانهٔ حوضهٔ میانی (حد واسط ایستگاه پل شالو و سد شهید عباسپور) از وزن رسوبات سالانهٔ ورودی به سد، کسر و وزن رسوبات سالانه در محل ایستگاه هیدرومتری پل شالو برآورد خواهد شد.

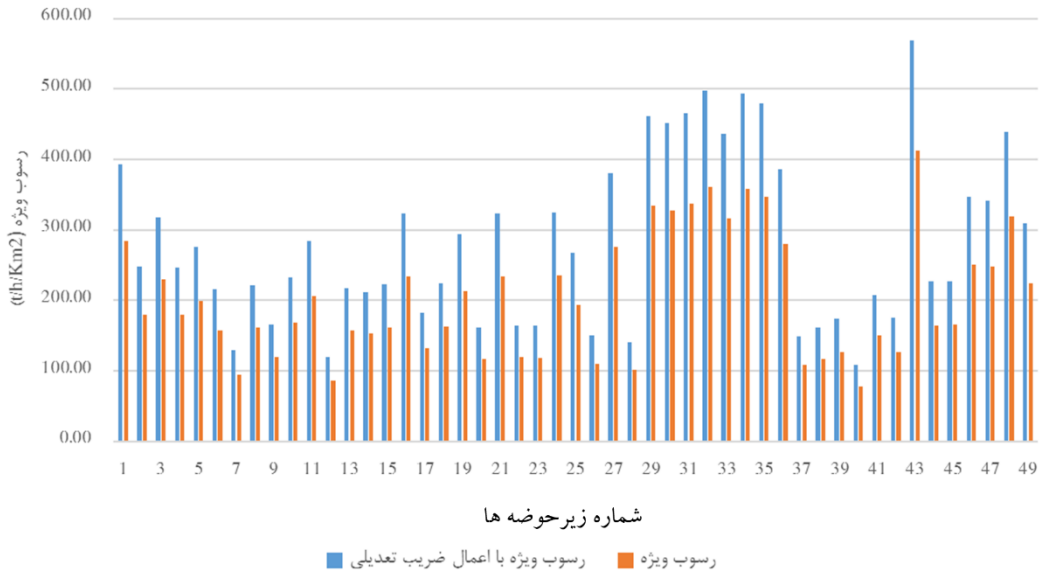
دبی ویژهٔ حوضهٔ میانی حد واسط ایستگاه پل شالو و سد شهید عباسپور، بر اساس نتایج حاصل از به‌کارگیری روش تجربی (روش EPM) معادل (ton/km^2year) ۱۰۴۸ به دست آمد. بنابراین، وزن رسوبات این حوضهٔ میانی معادل Mton/y ۲/۸ برآورد شد. از آن‌جایی که دبی ویژهٔ حوضهٔ میانی تولید شده از روش تجربی، مربوط به دورهٔ بلندمدت است؛ در نتیجه بایستی با اعمال ضریب تعدیلی، وزن رسوبات حوضهٔ میانی در طی دورهٔ بلندمدت به دورهٔ آماری ۲۷ ساله تعدیل شود. برای دستیابی به این هدف، میزان رسوبات عبوری از ایستگاه اصلی پل شالو طی دو دورهٔ بلندمدت (دورهٔ شاخص آماری ۱۳۳۶ تا ۱۳۸۶) و کوتاه‌مدت (هم ارز با هیدروگرافی ۱۳۵۶ تا ۱۳۸۳) محاسبه شد. با

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.4.9]

توجه به مقادیر رسوبات عبوری از ایستگاه پل شالو در طی دوره‌های بلندمدت و کوتاه‌مدت، به ترتیب معادل ۱۸/۴ و ۲۵/۵ Mton/y و ضریب تعدیلی نسبت رسوبات در طی دوره‌های کوتاه‌مدت به بلندمدت، معادل ۱/۳۸ برآورد شد.

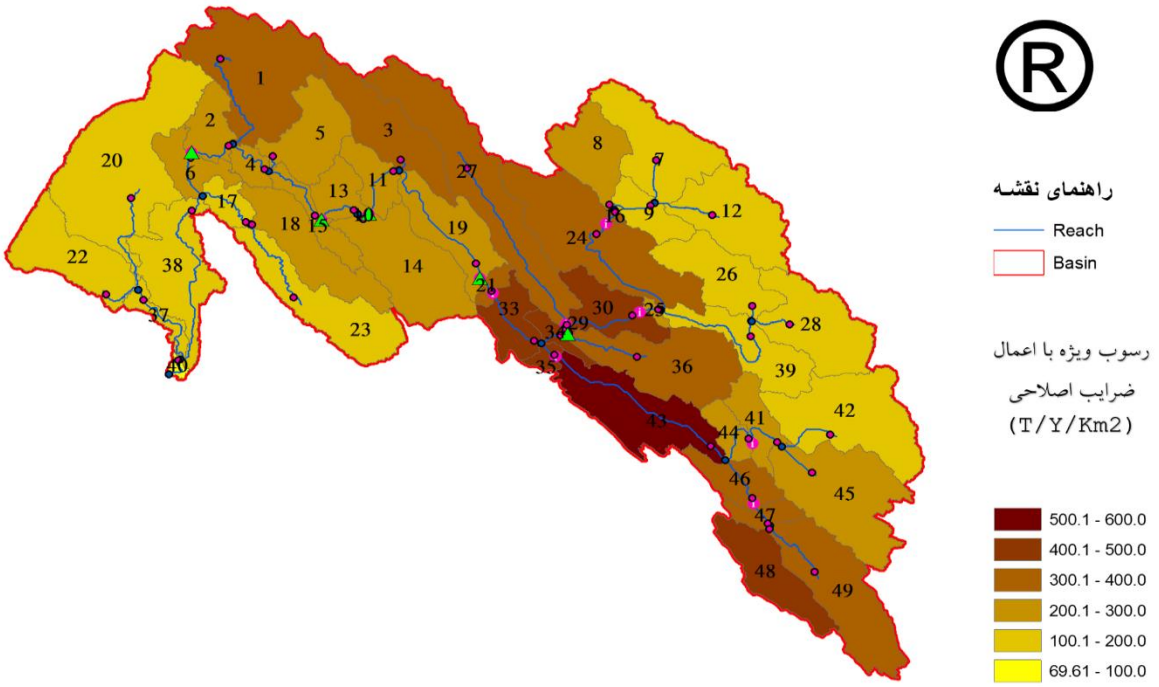
با اعمال ضریب تعدیلی ۱/۳۸ وزن رسوبات سالانهٔ حوضهٔ میانی ایستگاه پل شالو تا محل سد شهید عباسپور از رقم ۲/۸ Mton/y (در طی دورهٔ بلندمدت) به ۳/۸۸ Mton/y (در طی دورهٔ کوتاه‌مدت ۲۷ ساله) تعدیل شد. با کسر این رقم از میزان رسوبات ورودی به سد شهید عباسپور، میزان رسوبات سالانه در محل ایستگاه هیدرومتری پل شالو نیز برابر با ۳۱/۰۸ Mton محاسبه شد. بدین‌ترتیب، تناژ کل رسوبات در محل ایستگاه هیدرومتری پل شالو (طی دورهٔ بهره‌برداری از سد شهید عباسپور تا آخرین عملیات هیدروگرافی انجام شده در مخزن سد) معادل ۸۳۸ Mton است (IWPRDC, 2013).

پس استفاده از نتایج گزارش‌های شرکت آب نیرو در خصوص اصلاحات انجام شده برای منحنی‌های سنجه رسوب و اعمال ضریب اصلاحی برای تعدیل میزان بار رسوبی حوضهٔ مورد مطالعه، نتایج مدل اجرا شده توسط SWAT با مدل MPSIAC و EPM ــ که توسط محققان شرکت منابع آب در همین حوضه بررسی شده بود ــ مقایسه شد. طبق این مقایسه‌ها، مدل MPSIAC نتایجی مشابه با نتایج مدل SWAT بیان می‌کند که علت آن، ضعف هر دو مدل در شبیه‌سازی دبی پیک رسوبات در شرایط سیلابی است. بر خلاف این دو مدل، مدل EPM بار رسوبی را در شرایط سیلابی به خوبی برآورد می‌کند که با گزارش‌های شرکت منابع آب ــ که توسط رسوبات تله‌اندازی شده پشت سدها برآورد شده‌است ــ نتایج نزدیک‌تری دارد. نتایج حاصل از میزان فرسایش ویژه پس از اعمال ضریب تعدیلی در مدل SWAT به صورت زیر است (شکل ۸ و ۹).



شکل ۸: مقایسهٔ رسوب ویژه پس از اعمال ضرایب اصلاحی

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.4.9]



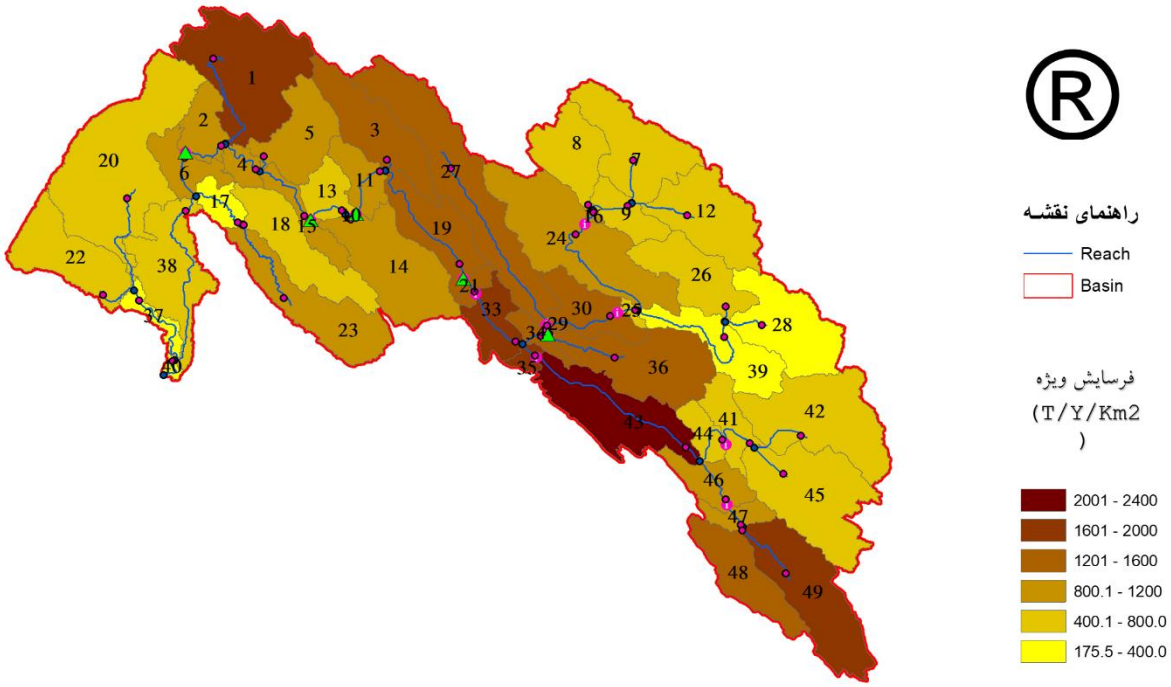
شکل ۹: رسوب ویژه با اعمال ضرایب اصلاحی

نتایج حاصل از اجرای راهکارهای مدیریتی و حفاظتی

در این بخش از تحقیق، راهکار حفاظتی برای کاهش فرسایش در استفاده از مدل SWAT بررسی شد. این راهکار شامل اجرای نوار فیلتر گیاهی در برخی نواحی است که در ادامه بررسی می‌شود.

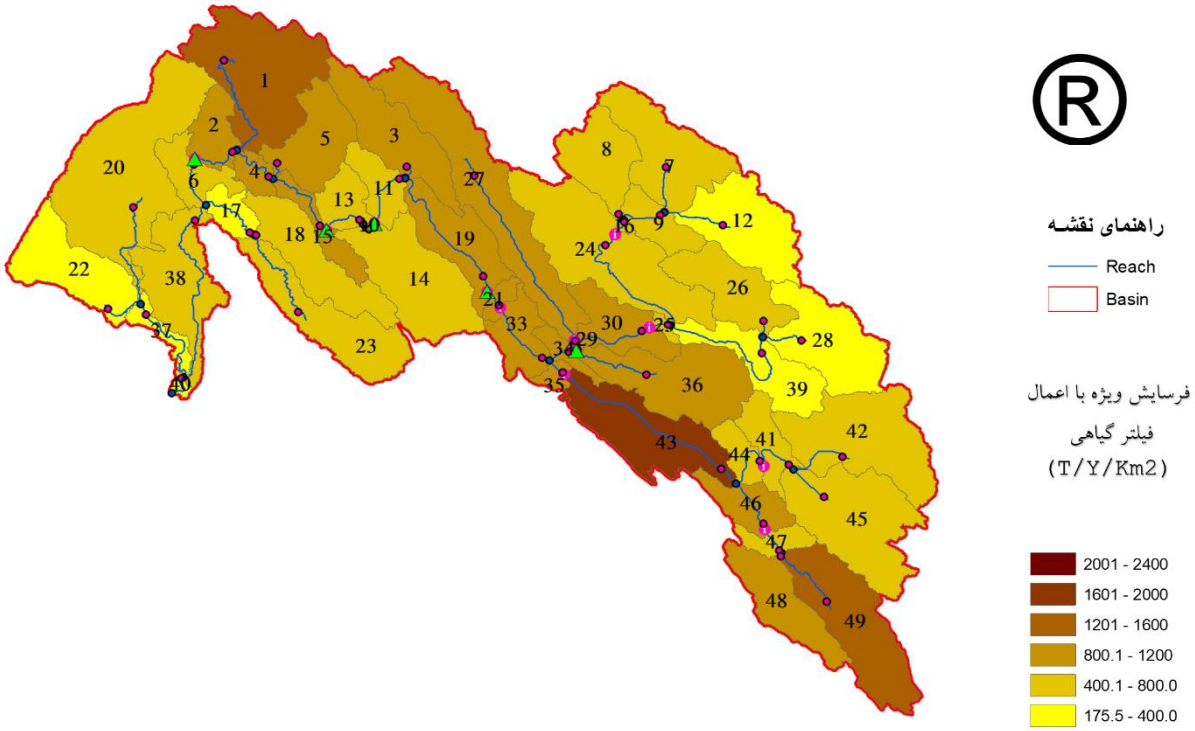
اجرای فیلتر گیاهی که پوشش گیاهی متراکم برای کاهش سرعت جریان رواناب است و تله‌اندازی رسوبات را به همراه دارد، می‌تواند به صورت ترکیباتی از چمنزار، چمن، درختان و درختچه باشد. برای نوآوری در طرح اعمال فیلترها، عرض نوارهای فیلتر در تمام زیر حوضه‌ها به صورت یکسان تعریف نشده‌اند بلکه با توجه به مساحت هر زیرحوضه، میزان فیلتر متفاوت درنظر گرفته شد. در این راستا، نسبت مساحت واحد هیدرولوژیکی به نوار پوشش گیاهی برابر با ۴۰ در نظر گرفته شده‌است. ذکر این امر لازم است که مقدار ۳۰ تا ۶۰ برای آن بسیار معمول است و عدد در نظر گرفته شده در این مطالعه، همان عدد پیش‌فرض مدل است. پس از اجرای فیلتر گیاهی، نتایج به دست آمده از رسوب هر زیر حوضه در مقابل میزان رسوبات هر حوضه قبل از اجرای فیلتر گیاهی مقایسه شد. نتایج نشان داد که اجرای فیلتر می‌تواند مقادیر رسوب را در برخی از زیرحوضه‌ها تا ۲۸ درصد کاهش دهد.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.4.9]



شکل ۱۰: سیمای فرسایش قبل از اعمال فیلتر گیاهی

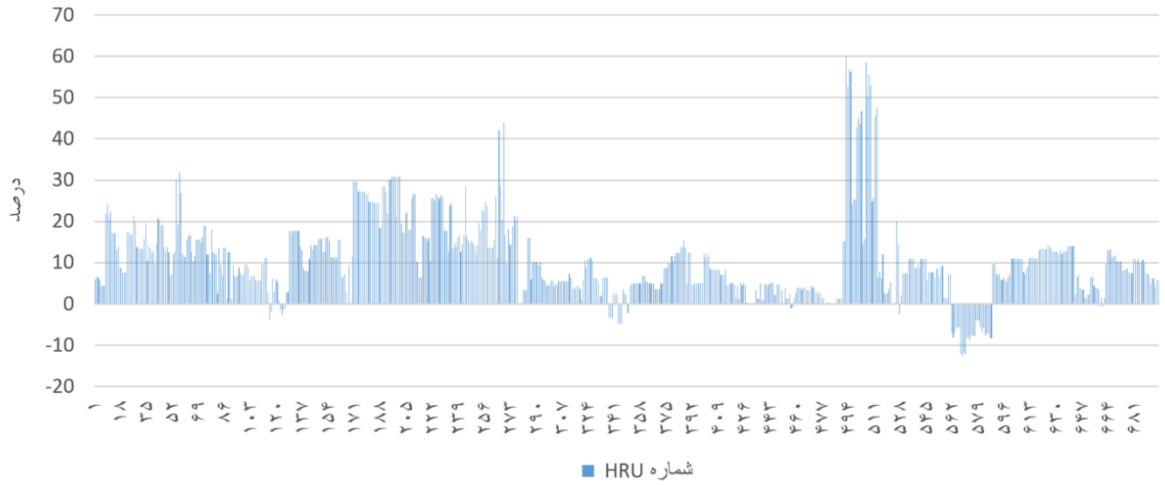
با مقایسهٔ شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ــ که اثر اجرای فیلتر گیاهی را در کاهش رسوب در هر زیر حوضه نمایش می‌دهد ــ و نقشهٔ شیب منطقه می‌توان دریافت، مناطقی که شیب بیشتری دارند در اثر اعمال فیلتر گیاهی عملکرد نسبتاً قابل-توجهی داشته‌اند.



شکل ۱۱: سیمای فرسایش بعد از اعمال فیلتر گیاه

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.4.9]

همچنین در شکل ۱۲، درصد کاهش میزان رسوب در هر HRU نمایش داده شده‌است. همان طور که مشاهده می‌شود، اعمال فیلتر گیاهی غالباً به کاهش بار رسوب منجر می‌شود و به طور میانگین، ۱۰/۴ درصد بار رسوب کل حوضه کاهش می‌یابد. در مقایسه با مطالعات دیگر که از مدل SWAT استفاده کردند، می‌توان به پژوهش Risal و همکاران (2021) اشاره کرد که در این مطالعه از نوار پوشش گیاهی برای کاهش رسوب و مواد مغذی استفاده شد که در کاهش رسوب، میزان اثرگذاری آن بین ۲۲ تا ۳۰ درصد متغیر بوده‌است. یکی از تفاوت‌های مطالعهٔ مذکور با مطالعهٔ حاضر در این است که در آن مطالعه، از نوار پوشش گیاهی با عرض ثابت استفاده شد؛ در صورتی که در مطالعهٔ حاضر نسبت مساحت واحد هیدرولوژیکی به مساحت نوار پوشش گیاهی، ثابت در نظر گرفته شد.



شکل ۱۲: درصد کاهش رسوب هر HRU

در مطالعه‌ای که توسط Leh و همکاران (2018) صورت گرفت، میزان اثرگذاری نوار پوشش گیاهی بر کاهش رسوب بین ۲/۵ تا ۹/۲ درصد به‌دست آمد. همچنین در مطالعهٔ Bosch و همکاران (2013) میزان اثرگذاری بین صفر تا سه درصد متفاوت بود. Luo and Zhang (2009) به طور میانگین میزان اثرگذاری استفاده از نوار پوشش گیاهی را چهارده درصد اعلام کردند. Panagopoulos و همکاران (2011a,b) این اثرگذاری را بین ۱/۵ تا ۱۱/۹ گزارش کردند. عدد ۱۰/۴ درصد که در این مطالعه گزارش شد به برخی از این نتایج، نزدیک و با برخی دیگر متفاوت است. علاوه بر تفاوتی که می‌تواند در شیوهٔ مدل‌سازی ریشه داشته باشد، تفاوت در حوضه، کاربری اراضی، جنس خاک و ... از وجوه تمایز نتایج است.

۵ـ بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، توانایی مدل SWAT در تخمین رواناب و بار رسوب تولید شده در حوضه آبخیز کارون ارزیابی شد؛ به عنوان مثال، در یکی از ایستگاه‌ها میزان ضریب نش در برآورد جریان و رسوب به ترتیب ۰/۶۸ و ۰/۳۳ بود. گرچه میزان این ضریب در برآورد جریان مدل عملکرد نسبتاً مناسبی داشت، دقت کافی را در برآورد رسوب به همراه نداشت که علت آن، نادیده گرفته شدن حجم رسوبات شرایط سیلابی در منحنی سنجه رسوب بود. در بخش بعدی مطالعه، نقشهٔ فرسایش‌پذیری منطقه تولید و مناطق دارای فرسایش‌پذیری بالاتر شناسایی شد. سپس با ارائه راهکار استفاده از

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.4.9]

فیلتر گیاهی به عنوان راهکار مدیریتی، به ارزیابی کارایی آن در کاهش رسوب منطقه پرداخته شد. بر اساس نقشه‌های ارائه شده در جهت توزیع مکانی فرسایش، زیر حوضه‌های بالادست رسوبات کمتری داشتند و تجمع رسوبات در نزدیکی مخازن سدها بیشتر بود. با توجه به نقشهٔ شیب منطقه، در مناطقی که شیب بیشتری وجود داشت، فرسایش بیشتری نیز به چشم می‌خورد که استفاده از فیلترهای گیاهی در این مناطق اثربخشی بیشتری را به همراه داشت. به طور کل، اجرای فیلتر گیاهی در کاهش بار رسوبات تأثیر قابل توجهی داشت و در برخی از زیر حوضه‌ها توانست بار رسوبی را به تنهایی تا ۲۸ درصد کاهش دهد. همچنین با اجرای فیلتر گیاهی، میزان تغییر در هر HRU نیز بررسی شد و نتایج نشان داد که اعمال فیلتر در غالب واحدهای هیدرولوژی اثرات بسیار مثبتی داشته و به طور میانگین توانسته‌است ۱۰/۴ درصد از بار رسوب کل حوضه را کاهش دهد.

منابع

1. Abbaspour, K. C.; Vejdani, M.; Haghighat, S.; & J. Yang, 2007. SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for SWAT. In MODSIM 2007 international congress on modelling and simulation, modelling and simulation society of Australia and New Zealand, pp, 1596-1602.

2. Arnold, J. G.; Srinivasan, R.; Muttiah, R. S.; & J. R. Williams, 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. JAWRA, *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.

3. Bosch, N. S.; Allan, J. D.; Selegean, J. P.; & D. Scavia, 2013. Scenario-testing of agricultural best management practices in Lake Erie watersheds, *Journal of Great Lakes Research*, 39(3), 429-436.

4. Chekol, A. D., 2006. Modeling of hydrology and soil erosion of upper Awash river basin, Ethiopia. Pub (Doctoral dissertation, PhD Thesis, University Bonn)

5. Gassman, P. W.; Reyes, M. R.; Green, C. H.; & J. G. Arnold, 2007. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions, *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211-1250.

6. Farokhzadeh, B.; Ildoromi, A.; Attaeian, B.; & M. Nourouzi, 2015. Assessment the estimation of suspended load under the influence of land use change using SWAT model (Case study: Yalfan watershed), *Environmental Erosion Research*, 5 (3), 28-46. (in Persian)

7. Ghaffari, G., 2018. Erosion intensity zoning by using SWAT model in Gheshlagh Dam Basin, *Geography And Development Iranian Journal*, 16(50), 55-74. (in Persian)

8. Giglioli, N., & A. Saltelli., (2003). Simlab 2.2, Software for sensitivity and uncertainty analysis, Simlab manual. Joint Research Centre European Commission.

9. IWPRDC (Iran Water and Power Resources Development Company), (2013). Calibration Studies for Sediment Estimation in Karun Watershed Using Control Projects. Report. (in Persian)

10. Jirani, F., 2009. Simulation of erosion, sediment transfer and protection solutions in Gamasiab catchment using SWAT model. Master Thesis. Ministry of Science, Research and Technology - Tarbiat Modares University - Faculty of Agriculture. (in Persian)

11. Khaleghi, S.; nosrati, K.; & R. abbaspour, 2020. Estimation of Soil Erosion and Sediment Transport by SWAT model (Case Study: Upstream of Badavar Basin, Lorestan), *Quantitative Geomorphological Research*, 9(3), 186-202. (in Persian)

12. Kheyrodin, H. A. M. I. D., 2016. Modeling soil erosion in Iran, *Innovat Intl. J. Med. Pharmac. Sci*, 1(1), 1-12.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.4.9]

13. Kim, J. G.; Park, Y.; Yoo, D.; Kim, N. W.; Engel, B. A.; Kim, S. J.; ... & K. J. Lim, 2009. Development of a SWAT Patch for Better Estimation of Sediment Yield in Steep Sloping Watersheds 1, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 45(4), 963-972.
14. Leh, M. D.; Sharpley, A. N.; Singh, G.; & M. D. Matlock, 2018. Assessing the impact of the MRBI program in a data limited Arkansas watershed using the SWAT model, *Agricultural water management*, 202, 202-219.
15. Luo, Y., & M. Zhang., (2009). Management-oriented sensitivity analysis for pesticide transport in watershed-scale water quality modeling using SWAT. *Environmental Pollution*. 157(12), 3370-3378.
16. McCuen, R. H.; Knight, Z.; & A. G. Cutter, 2006. Evaluation of the Nash–Sutcliffe efficiency index, *Journal of hydrologic engineering*, 11(6), 597-602.
17. Mtibaa, S.; Hotta, N.; & M. Irie, 2018. Analysis of the efficacy and cost-effectiveness of best management practices for controlling sediment yield: a case study of the Joumine watershed, Tunisia, *Science of the Total Environment*, 616, 1-16.
18. Naseri, F.; Azari, M.; & M. T. Dastorani, 2021. Spatial optimization of soil and water conservation practices using coupled SWAT model and evolutionary algorithm, *International Soil and Water Conservation Research*.
19. Ni, X., & P. B. Parajuli., (2018). Evaluation of the impacts of BMPs and tailwater recovery system on surface and groundwater using satellite imagery and SWAT reservoir function. *Agricultural water management*. 210, 78-87.
20. Panagopoulos, Y.; Makropoulos, C.; Baltas, E.; & M. Mimikou, 2011a. SWAT parameterization for the identification of critical diffuse pollution source areas under data limitations, *Ecological Modelling*, 222(19), 3500-3512.
21. Panagopoulos, Y.; Makropoulos, C.; & M. Mimikou, 2011b. Reducing surface water pollution through the assessment of the cost-effectiveness of BMPs at different spatial scales, *Journal of environmental management*, 92(10), 2823-2835.
22. Parajuli, P. B.; Mankin, K. R.; & P. L. Barnes, 2008. Applicability of targeting vegetative filter strips to abate fecal bacteria and sediment yield using SWAT, *Agricultural water management*, 95(10), 1189-1200.
23. Pimentel, D., 2006. Soil erosion: a food and environmental threat, *Environment, development and sustainability*, 8(1), 119-137.
24. Ricci, G. F.; De Girolamo, A. M.; Abdelwahab, O. M.; & F. Gentile, 2018. Identifying sediment source areas in a Mediterranean watershed using the SWAT model, *Land degradation & development*, 29(4), 1233-1248.
25. Risal, A.; Parajuli, P. B.; & Y. Ouyang, 2021. Impact of BMPs on water quality: a case study in Big Sunflower River watershed, Mississippi, *International Journal of River Basin Management*, 1-14.
26. Setegn, S. G.; Dargahi, B.; Srinivasan, R.; & A. M. Melesse, 2010. Modeling of Sediment Yield From Anjeni-Gauged Watershed, Ethiopia Using SWAT Model 1, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 46(3), 514-526.
27. Singh, A.; Imtiyaz, M.; Isaac, R. K.; & D. M. Denis, 2012. Comparison of soil and water assessment tool (SWAT) and multilayer perceptron (MLP) artificial neural network for predicting sediment yield in the Nagwa agricultural watershed in Jharkhand, India, *Agricultural Water Management*, 104, 113-120.
28. Uniyal, B.; Jha, M. K.; Verma, A. K.; & P. K. Anebagilu, 2020. Identification of critical areas and evaluation of best management practices using SWAT for sustainable watershed management, *Science of the Total Environment*, 744, 140737.
29. Waldo, P. G., 1987. Validation of sediment delivery ratio prediction techniques. Fort Worth TX: US Soil Conservation Service, Southern Reg. Tech. Ctr.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.4.9]

30. Walling, D. E., 1983. The sediment delivery problem, *Journal of hydrology*, 65(1-3), 209-237.
31. Xu, Z. X.; Pang, J. P.; Liu, C. M.; & J. Y. Li, 2009. Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment by using SWAT model, *Hydrological Processes: An International Journal*, 23(25), 3619-3630.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.4.9]

Sediment Simulation Using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) in a Multi-reservoir Basin

Ahmad Khazaiepoul[1]: *Researcher of Water Resources Research Committee, Civil Engineering Center, Imam Hossein University, Tehran, Iran.*

Fatemeh Zarezadeh: *Master of Water Resources Management, Faculty of Water and Environmental Civil Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran.*

Ali Moridi: *Assistant Professor of Water Resources Management, Faculty of Water and Environmental Civil Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran*

Article History (Received: 2021/05/29 Accepted: 2021/12/2)

Extended abstract

1- Introduction

Knowing the extent of erosion in each area and the amount of sediment load they produce, especially near dams, is very important and this leads to identifying the factors affecting each area and creating solutions to control or reduce sediment load to dam reservoirs. This effort has become a necessity. Therefore, by simulating runoff and sediment in Karun basin by SWAT model and performing the calibration process and reviewing the results of the stations and their sediment load, areas with higher susceptibility to erosion were identified. After identifying the critical erosion areas and in order to reduce erosion and sediment load of the whole basin, a plant filter was used to apply the management and protection strategies of the SWAT model. Evaluation of the results in this section showed that the implementation of plant filtration in some sub-basins can reduce sediment load by up to 28%.

2- Methodology

To build and prepare the SWAT model, inputs such as topographic information, meteorology, soil, vegetation, reservoirs and management data were used. Daily temperature, precipitation information, location of meteorological and rainfall stations with dbf or txt extensions, topographic information in the form of digital elevation model with UTM coordinate system, Grid format and location of hydrometric stations and springs in tables with dbf extension were introduced to the model as well. Maps of waterways and rivers in vector form and land use and soil maps as raster from in Arc GIS 10.4 software are included in the model.

One of the parameters required to simulate the basin by the model is meteorological information. In this study, rainfall statistics of 57 rain gauge stations and 8 hydrometric observation stations with a statistical period of more than 26 years have been used in the catchment area of Karun River. In this research, the characteristics of the basin have been investigated using the digital model of DEM height with a cell size accuracy of 90 × 90 m and using the GIS geographic information system. For this purpose, with the help of Arc GIS10.4 software, the physiographic characteristics of the basin such as the area and average slope of the basin and river were extracted. Based on hydrological characteristics, Karun Basin erosion studies have been divided into 49 sub-basins and 424 hydrological reaction units.

In this study, the region is classified into 5 categories. Accordingly, about 25% of the area has flat land and a slope of less than 5%; 12% have a slope between 5 to 10%; 9% have a slope between 10 to 15% and 8% have a slope between 15 to 20, and most of the area has sections with a slope of more than 20%, which covers more than 45% of the area.

[1] **Corresponding Author: akhazaie@ihu.ac.ir**

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.4.9]

3- Results

Implementing a plant filter that is densely vegetated to reduce runoff flow and trap sediments can be in the form of combinations of meadows, grass, trees and shrubs. In order to innovate in the application of filters, the width of filter strips in all sub-basins is not defined uniformly, but according to the area of each sub-basin, the amount of filter is considered different and the filters are applied equal to 40% of the area of each sub-basin. After applying the plant filter, the results obtained from the sediment of each sub-basin were compared against the amount of sediment in each basin before the application of the plant filter. The results showed that the implementation of the filter can reduce the amount of sediment up to 28% in some sub-basins in some areas. By comparing the figures that show the effect of plant filter application in reducing sediment in each sub-basin and the slope map of the area, it can be seen that the areas that had more slope had a relatively significant performance due to plant filter application. In addition, the application of plant filters has often reduced the sediment load and the average sediment load of the entire basin by an average of 10.4%.

4- Discussion & Conclusions

The purpose of this study was to estimate the amount of runoff and sediment load produced in Karun watershed and to investigate the implementation of plant filtration as one of the most effective management and conservation strategies to reduce the amount of sediment load in the entire basin. According to the topography of the region and the slope characteristics of the region, most of the area has areas with a slope of more than 20%, which covers more than 45% of the region, and land use of the region, which uses more than 46% of forests and vineyards. It has been covered with pastures with an area of about 31% of the total use basin of the region and also the existence of livestock equivalent to the area which is equal to 11.29. Erosion control in this area requires strategies to reduce this sediment load, including the construction of dams. After simulation of runoff and sediment in hydrometric and sediment measurement stations and evaluation of SWAT model by good fitting coefficients (NS, R2) and uncertainty coefficients using SWAT-CUP model, the facilities and areas with higher erodibility were identified. Then, by examining the sediment load trapped behind the dams, the sediment measurement curve was modified and adjustment coefficients were applied to correct the sediment results of the area. Then, by presenting the use of plant filter as a management solution, the sediment load of the area and special erosion were reduced. The results show that the SWAT model has a high ability to simulate all the details of the area. This feature allows the model to be simulated accurately to identify any level of details in the area that the user needs. This model makes good use of the effects of rainfall, snowmelt, irrigation and withdrawal from dams or groundwater, which led to the results of good runoff fitting coefficients of acceptable values. Also, different thresholds of information layer overlaps were estimated to determine the number of hydrological units. Baes on this estimation, 696 HRU achieved better results and the use of 7-station data in determining the parameters selected for calibration increased the possibility of better spatial variation of parameters in the final calibration of results. The results of this study are given in the daily time frame; in fact, the results are estimated in 3 days, and the results are given in the daily basis.

According to the proposed maps for spatial distribution of erosion, the upstream sub-basins have less sediment and the accumulation of sediment near the reservoirs of dams is higher, which made the areas more effective. Also, as other ways, the effects of using slopes or cultivation on level lines can be examined in these areas. In addition to the slope of the region, due to the high density of livestock in Chaharmahal and Bakhtiari province, another factor of high erodibility in this area can be considered as overgrazing.

Also, the results of the MPSIAC methods were closer to the results of the SWAT model than the current method of estimating the exchange rate. However, the reports of the Water and Power Company expressed the results of the EPM model closer to the results of the flood conditions.

In this area, the SWAT model was not accurate enough in estimating sediment load due to the neglect of sediment volume in flood conditions in the sediment measurement curve. In order to solve this problem, in this study, the correction of sediment measurement curve by fitting two equations for flood and non-flood conditions was used.

In the field of management solutions, among the solutions, the implementation of plant filters has had the greatest impact on reducing sediment load and in some sub-basins alone has been able to reduce the sediment load up to 28% of the sub-basin. Of course, in this study, a fixed value for the width of the filter strips is not considered, but for better filter performance, we considered the width of the filter strip in proportion to the area of each hydrological unit, which is defined as a percentage of its area. Also, with the implementation of the plant filter, the amount of change in each HRU was investigated. The results in the percentage change scale of

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.4.9]

sediment rate showed well that the application of the filter in most hydrological units had very positive effects and had reduced sediment load with an average of 10.4%.

Key Words: Sediment load estimation, Karun catchment, Management and protection strategies, SWAT model.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1401.12.1.4.9]