



## مدلسازی فرسایش خاک و اولویت‌بندی تولید رسوب در حوضه‌ی سد ستارخان اهر با استفاده از مدل‌های SWAT و MUSLE

فریبا کرمی<sup>۱\*</sup>، مریم بیاتی خطیبی<sup>۲</sup>

وصول مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۲۴ تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۱۴

### چکیده

در این پژوهش برای مدلسازی فرسایش، تولید رسوب و شناسایی زیرحوضه‌های بحرانی از نظر تولید رسوب در حوضه‌ی سد ستارخان اهر در شمال غرب کشور از مدل‌های SWAT و MUSLE استفاده شد. برای این منظور از داده‌های رسوب ماهانه‌ی ایستگاه اورنگ در خروجی حوضه استفاده شد. مرحله‌ی واسنجی مدل برای دوره‌ی آماری ۱۳۸۳-۱۳۸۸ و مرحله‌ی اعتبارسنجی آن برای دوره‌ی آماری ۱۳۹۲-۱۳۸۹ انجام شد. برای ارزیابی شبیه‌سازی مدل از روش‌های آماری شامل ضریب تعیین ( $R^2$ )، ضریب نش - ساتکلیف (NS) و نسبت میانگین مجذورات خطا به انحراف معیار داده‌های مشاهده‌اتی (RSR) استفاده شد. نتایج نشان داد مقادیر  $R^2$ ، NS و RSR برای مرحله‌ی واسنجی به ترتیب ۰/۷۶، ۰/۹۵ و ۰/۰۶ و برای مرحله‌ی اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۹۶، ۰/۹۳ و ۰/۱ به دست آمد. بررسی تغییرات مکانی فرسایش و تولید رسوب نشان داد که اراضی حوضه‌ی سد ستارخان از نظر متوسط سالانه رسوب از یکدیگر تفاوت دارند. مناطق بحرانی با مقادیر تولید رسوب زیاد و خیلی زیاد در بالادست حوضه در بخش‌های شمالی، شمال شرقی، غرب و جنوب غربی قرار دارند و حدود ۳۴/۱۷ درصد از مساحت حوضه را شامل می‌شوند. با توجه به نتایج خیلی خوب کارایی مدل، در تعیین اراضی بحرانی فرسایش و رسوب، پیشنهاد می‌شود از آن در بررسی اثرات اقدامات مدیریتی و حفاظت خاک استفاده شود.

**کلمات کلیدی:** فرسایش خاک، تولید رسوب، مدل SWAT، مدل MUSLE، حوضه‌ی سد ستارخان اهر.

E-mail:fkarami@tabrizu.ac.ir

۱- استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، (نویسنده‌ی مسئول)

۲- استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

## مقدمه

فرسایش خاک به دلیل اثرات زیست محیطی و اقتصادی آن یک معضل جدی جهانی است که بسیاری از اکوسیستم های طبیعی و انسانی را تحت تأثیر قرار می دهد (گال<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۷، ۱؛ زارع گاریزی و طالبی، ۲۰۱۶: ۲). فرسایش و رسوبگذاری به عنوان یک رفتار طبیعی رودخانه، باعث از دست رفتن خاک حاصلخیز کشاورزی و وارد کردن خسارت جبران ناپذیر به طرح های عمرانی آب می شود (بصیرانی و همکاران، ۱۳۹۴: ۲۴۴). به گونه ای که نه تنها خاک های غنی از مواد مغذی محل را از بین می برد، بلکه کیفیت آب را به دلیل رسوبات منتقل شده کاهش می دهد (زارع گاریزی و طالبی، ۲۰۱۶: ۲). علت فرسایش خاک به شرایط اقلیمی (به ویژه بارش های رگباری)، توپوگرافی و شیب زیاد زمین، لیتولوژی و فعالیت های انسانی مانند تغییر کاربری زمین، از بین بردن پوشش گیاهی، افزایش تولیدات کشاورزی، چرای بی رویه دام و غیره مربوط می شود (گال و همکاران، ۲۰۱۷: ۱). از سوی دیگر، استفاده نامناسب از زمین و مدیریت ضعیف اکوسیستم ها، تخریب اراضی را سرعت بخشیده و ظرفیت ذخیره سازی مخازن را کاهش می دهد (آی ال<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۷: ۲). در دامنه های مناطق کوهستانی نیمه خشک، به دلیل شیب زیاد و عمق کم خاک، اتلاف خاک در اثر انواع فرسایش از جدی ترین معضلات هیدروژئومورفولوژیکی محسوب می شود که مسائل اقتصادی و اجتماعی بسیاری را در پی دارد (بیاتی خطیبی و کرمی، ۱۳۹۵: ۸۸). تولید رسوب یکی از پیامدهای مهم فرسایش خاک است. هر ساله هزاران تن خاک حاصلخیز از اراضی مختلف کشور، در اثر فرسایش از دسترس خارج شده و با انباشت در مناطق رسوب گذاری، موجب بروز خسارات قابل ملاحظه ای می شوند. بنابراین، لازم است مناطق تولید رسوب همراه با شدت و مقدار آن شناسایی شوند تا از این طریق علاوه بر تعیین مناطق بحرانی و حساس به فرسایش و رده بندی مناطق تولید رسوب در بهبود مدیریت اراضی، حفاظت خاک و مقابله با فرسایش اقدام نمود (صدوق و همکاران، ۱۳۹۴، ۱۳۷). کاهش تولید

1- Gull

2- Ayele

رسوب نیازمند اجرای روش‌های مناسب کنترل رسوب و حفاظت خاک در مناطق بحرانی منبع رسوب در حوضه‌ی آبریز است (نوحه‌گر و همکاران، ۱۳۹۶: ۶۸؛ پاتریک لیسبای<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۵، ۲۱۱۸). در این زمینه، استفاده از مدل‌های فرسایشی، رویکردی بهینه در زمینه‌ی بررسی فرسایش، تولید رسوب و شناسایی مناطق بحرانی محسوب می‌شود. برای این منظور در سطح حوضه به مدلی نیاز است که بتواند حجم وسیع داده‌ها از جمله بارش، توپوگرافی، مرزهای حوضه، ویژگی‌های خاک و لایه‌ی زیرسطحی، کاربری اراضی و پوشش گیاهی، سامانه‌های انتقال آب، سازه‌های آبی و اقدامات مدیریتی موجود، داده‌های موجود کیفی آب و سطح آب زیرزمینی را در شبیه‌سازی به کاربرد (رضازاده و همکاران، ۱۳۹۷: ۴۱). مدل‌های فرسایشی می‌توانند به عنوان ابزارهای پیش‌بینی برای ارزیابی هدر رفت خاک، برنامه‌ریزی حفاظت، موجودی فرسایش خاک و برنامه‌ریزی پروژه‌ها مورد استفاده قرار گیرند. مدل‌ها می‌توانند به عنوان ابزاری برای درک فرایندهای فرسایش و تأثیر آنها مورد استفاده قرار گیرند (موشه<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۳: ۴۵). این مدل‌ها در سه گروه تجربی، مفهومی و فیزیک مینا طبقه‌بندی می‌شوند. مدل‌های تجربی فرسایش خاک که عمدتاً مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل USLE<sup>۳</sup>، RUSLE<sup>۴</sup>، MUSLE<sup>۵</sup> و SLEMSA<sup>۶</sup> می‌شوند (مریت<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۳: ۷۶۳). از مدل‌های فیزیک مینای فرسایش خاک می‌توان به SWAT<sup>۸</sup>، WEPP<sup>۹</sup>، AGNPS<sup>۱۰</sup> و غیره اشاره کرد (پندی<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۶: ۶۰۰). یکی از پرکاربردترین مدل‌های هیدرولوژیکی برای برآورد بار رسوب، مدل SWAT است.

- 1- Patrick Laceyby
- 2- Moche
- 3- Universal Soil Loss Equation
- 4- Revised Universal Soil Loss Equation
- 5- Modified Universal Soil Loss Equation
- 6- Soil Loss Estimator for Southern Africa
- 7- Merritt
- 8- Agricultural Non-Point Source
- 9- Water Erosion Prediction Project
- 10- Soil and Water Assessment Tool
- 11- Pandey

ایران از نظر وسعت و شدت فرسایش خاک در میان کشورهای بسیار آسیب دیده جهان قرار دارد (زارع گاریزی و طالبی، ۲۰۱۶: ۲). براساس گزارش سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری، میزان فرسایش خاک در ایران حدود ۲ میلیارد تن در سال (حدود ۱۶/۷ تن در هکتار) برآورد شده است که با شاخص جهانی ۵ تا ۶ تن در هکتار فاصله زیادی دارد. اثرات این میزان فرسایش خاک بالغ بر ۲۳۶ میلیون مترمکعب رسوب‌گذاری در مخازن پشت سدها و به میزان حدود ۵۰۰ میلیون مترمکعب رسوب‌گذاری در شبکه‌های آبیاری و زهکشی مدرن و سنتی و از دسترس خارج شدن هزاران هکتار اراضی مزروعی است (firw.org.ir,1396). درحالی‌که محمدی و همکاران (۱۳۹۷: ۵۵۱) با استفاده از مدل RUSLE متوسط فرسایش سالانه‌ی خاک در کشور را حدود ۲۴ تن در هکتار برآورد کردند و نشان دادند سالانه حدود ۶ میلیارد تن خاک از اراضی کشور فرسایش می‌یابد.

در شمال غرب کشور، سد ستارخان قبل از ورود رودخانه‌ی اهرچای به شهر اهر، روی آن احداث شده است که منبع تأمین آب در منطقه است. در حوضه‌ی آبریز سد ستارخان که بالادست اهرچای را شامل می‌شود، شرایط فیزیکی مانند کوهستانی و پُرشیب بودن و نحوه‌ی مدیریت نامطلوب اراضی، مانند گسترش اراضی دییم همراه با شخم در جهت شیب، فعالیت‌های عمرانی و غیره، موجب فرسایش خاک، تولید رسوب، کاهش ظرفیت مخزن سد و افزایش هزینه‌های رسوب‌زدایی مخزن می‌شود. به منظور کاهش خطرات و خسارات ناشی از این امر و انجام دادن اقدامات مدیریتی مناسب در این زمینه، برآورد تولید رسوب و پیش‌بینی شرایط آبی در بالادست حوضه‌ی آبریز اهر چای امری ضروری به نظر می‌رسد.

با توجه به قابلیت‌های گسترده مدل SWAT در زمینه‌ی مطالعات آب و خاک، تاکنون تحقیقات زیادی با استفاده از این مدل در سراسر جهان صورت گرفته است. برای مثال، ایستون<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۰) برای تحلیل رواناب و رسوب حوضه‌ی بلونیل

1- Easton

در اتیوپی، ترن تی ترن تی فونگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۴) برای شبیه‌سازی فرسایش خاک بالادست حوضه‌ی رود بو در ویتنام مرکزی، بریک<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۶) برای برآورد بار رسوب در حوضه‌ی کالایا در شمال کشور مراکش، دورو<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۸) برای پیش‌بینی جریان رودخانه و بار رسوب حوضه‌ی آنکارا در ترکیه از مدل SWAT استفاده کردند. نتایج مطالعات نشان دادند این مدل در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و برآورد بار رسوب می‌تواند در حوضه‌ای با ویژگی‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد. در ایران نیز مطالعات ارزشمندی مانند، عارفی اصل و همکاران (۱۳۹۲) برای بررسی میزان و توزیع مکانی تولید رسوب در حوضه‌ی چهل‌چای استان گلستان، عرفانیان و همکاران (۱۳۹۴) برای شبیه‌سازی تولید رسوب در حوضه‌ی رودخانه نازلوچای، غفاری (۱۳۹۷) برای مدلسازی و تخمین میزان فرسایش در حوضه‌ی سد قشلاق، از مدل SWAT و GIS استفاده کردند. نتایج مطالعات، گویای قابلیت مناسب مدل SWAT هستند. با توجه به توانمندی‌های این مدل، هدف پژوهش حاضر مدلسازی فرسایش خاک، تولید رسوب و شناسایی زیرحوضه‌های بحرانی از نظر تولید رسوب در حوضه‌ی سد ستارخان اهر در شمال غرب کشور با استفاده از مدل‌های SWAT و MUSLE و با کمک الگوریتم SUFI2 می‌باشد.

#### مواد و روش‌ها

##### - معرفی منطقه‌ی مورد مطالعه

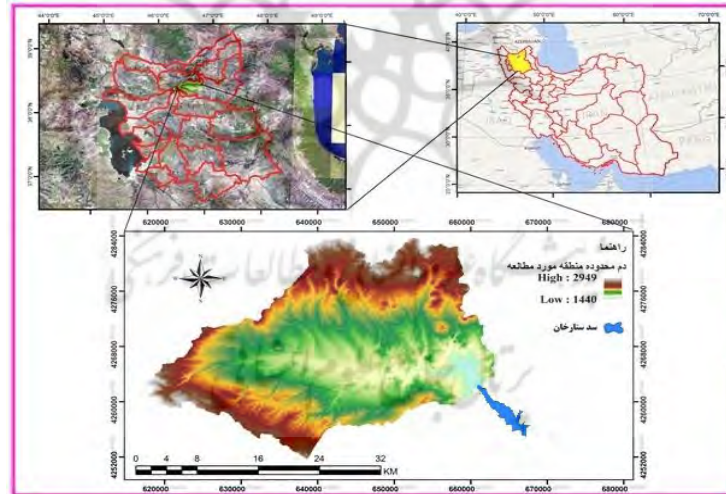
منطقه‌ی مورد مطالعه، بالادست حوضه‌ی اهرچای را در استان آذربایجان شرقی دربر می‌گیرد (شکل ۱). حداقل و حداکثر ارتفاع از سطح دریا در آن حدود ۱۴۴۰ الی ۲۹۵۰ متر است. اهر چای در این منطقه از غرب به شرق جریان دارد. مساحت حوضه‌ی اهرچای علیا ۸۳۱/۸۵ کیلومتر مربع و طول آبراهه‌ی اصلی تا خروجی ۶۲/۷۶ کیلومتر

1- Tran Thi Phoung

2- Briak

3- Duru

است. میانگین بارش سالانه طبق آمار بارش سالانه ایستگاه اهر در دوره آماری (۱۹۹۴-۲۰۱۵) ۲۷۷/۶۳ میلی‌متر محاسبه شده است. براساس اقلیم نمای آمبرژه، اقلیم اهر نیمه‌خشک سرد می‌باشد که به سمت نیمه‌خشک معتدل متمایل است. سد ستارخان اهر نام سدی است خاکی که بر رودخانه اهرچای در ۱۵ کیلومتری غرب شهر اهر در جاده اهر- ورزقان در استان آذربایجان شرقی قرار گرفته است و در ادامه مسیر خود به رودخانه قره‌سو می‌پیوندد. رودخانه قره‌سو نیز به رودخانه ارس و در نهایت به دریای خزر می‌ریزد. با احداث سد ستارخان ضمن کنترل و تنظیم جریان‌های سطحی اهرچای، آب مورد نیاز بخشی از اراضی کشاورزی پایین دست سد و آب شهر اهر تأمین می‌گردد. سد ستارخان از نوع خاکی با هسته ناتراوای رسی، به ارتفاع ۷۵ متر از روی سنگ بستر می‌باشد که در سال ۱۳۷۷ به بهره برداری رسیده است.



شکل (۱) نقشه‌ی موقعیت جغرافیایی حوضه‌ی سد ستارخان اهر

#### – روش تحقیق

مدل SWAT که قابلیت اجرا در محیط GIS را دارد فرایندهای هیدرولوژیکی، فرسایش خاک، کیفیت آب، مدیریت مرتع و اثرات تغییر اقلیم را شبیه‌سازی می‌کند (زارع

گاریزی و همکاران، ۱۳۹۵: ۳۵۱). یک مدل مفهومی - نیمه‌توزیعی در مقیاس حوضه‌ی رودخانه‌ای می‌باشد. این مدل، یک مدل پیوسته زمانی است که در گام‌های زمانی ساعتی، روزانه و یا طولانی‌تر اجرا می‌شود (آرنولد<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۹۸؛ نیچ<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۵؛ بتری<sup>۳</sup>، ۲۰۱۱: ۸۰۸). با توجه به اینکه مدل SWAT به عنوان یک مدل جامع و کارآمد در نقاط مختلف دنیا و ایران شناخته شده است و از آنجایی که از پارامترهای مختلفی در این مدل استفاده می‌شود، لذا می‌تواند پارامترهای مؤثر بیشتری وارد مدل گردد و خروجی آن می‌تواند با خطای کمتری همراه باشد. همچنین خروجی این مدل با استفاده از مدل الحاقی SUFI2 سنجیده می‌شود. از این رو صحت‌سنجی و اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های مدل امکان‌پذیر است. در این مدل ابتدا، حوضه‌ی آبریز اصلی از روی نقشه‌ی مدل رقومی ارتفاع، به چند زیرحوضه و هر یک از زیرحوضه‌ها با توجه به همگنی کاربری اراضی، خصوصیات خاک و شیب به چند واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU)<sup>۴</sup> تقسیم می‌شود (آرنولد و همکاران، ۲۰۱۱؛ بریک و همکاران، ۲۰۱۶: ۱۸۱). در مدل SWAT از معادله‌ی جهانی فرسایش خاک اصلاح شده (MUSLE) رابطه‌ی (۱) استفاده می‌شود.

$$S_{ed} = 11.8 (Q_{surf} \times q_{peak} \times area_{HRU})^{0.56} \times K \times C \times P \times LS \times CFRG \quad (1) \text{ رابطه‌ی (۱)}$$

که در آن  $S_{ed}$  مقدار رسوب (تن در روز)،  $Q_{surf}$  رواناب (میلی‌متر در هکتار)،  $q_{peak}$  حداکثر رواناب (متر مکعب بر ثانیه)،  $area_{HRU}$  مساحت هر واحد پاسخ هیدرولوژیکی (هکتار)،  $K_{USLE}$  عامل فرسایش‌پذیری خاک،  $C_{USLE}$  عامل مدیریت و پوشش،  $P_{USLE}$  عامل روش‌های حفاظتی،  $LS_{USLE}$  عامل توپوگرافی،  $CFRG$  عامل ذرات درشت دانه خاک می‌باشد (یسوف<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۹۲).

- 
- 1- Arnoled et al.,
  - 2- Nietsch et al.,
  - 3- Betrie
  - 4- Hydrologic Response Unit
  - 5- Yesuf et al.,

### – داده‌های مورد نیاز

داده‌های مورد نیاز در این پژوهش شامل نقشه‌ی کاربری اراضی حوضه‌ی مورد مطالعه از طریق روش شی‌گرا و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ با دقت مکانی ۱۵ متر مربوط به سال ۲۰۱۳ تهیه شده است. نقشه کاربری اراضی با کمک پیمایش صحرایی تایید و تکمیل شد. برای نقشه‌ی خاکشناسی از نقشه‌ی ۱/۲۵۰۰۰۰ سازمان جنگل‌ها و مراتع کل کشور استفاده شد و با بازدیدهای میدانی و استفاده از طیف رنگی تیپ خاک-های حوضه تعیین شد. همچنین برای مطالعات اقلیم‌شناسی از داده‌های ایستگاه سینوپتیک اهر در دوره‌ی زمانی ۱۹۹۴-۲۰۱۳ استفاده شد. برای داده‌های بارش مدل از ایستگاه‌های باران‌سجی (وردین، کاسین، ورزقان، اولیق و اورنگ) حوضه‌ی اهر چای علیا در بازه‌ی زمانی ۱۳۸۳-۱۳۹۲ استفاده شد. داده‌های دبی متوسط روزانه و غلظت رسوب نیز از ایستگاه هیدرومتری و رسوب‌سنجی اورنگ در بازه‌ی زمانی ۱۳۸۳-۱۳۹۲ استفاده شد.

### – فرایند اجرای مدل در حوضه‌ی سد ستارخان

در این پژوهش ابتدا مدل رقومی ارتفاع حوضه‌ی بالادست اهرچای به مدل معرفی شد. سپس شبکه‌ی آبراهه‌ی حوضه‌ی مورد مطالعه طراحی شد و محل ایستگاه اورنگ به عنوان خروجی حوضه تعریف شد. سپس نقشه‌ی کاربری اراضی با ۱۰ طبقه، خاک با ۶ طبقه، شیب (با استفاده از DEM) با ۶ طبقه تهیه شد (شکل ۳). در ادامه با تلفیق سه لایه شیب، کاربری اراضی و خاک، نقشه‌ی واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی به دست آمد. بدین ترتیب ۶۷ زیرحوضه و ۶۰۰ واحد پاسخ هیدرولوژیکی در محدوده‌ی بالادست حوضه‌ی اهرچای تشکیل شد (شکل ۴). با در نظر داشتن آمار ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی یک دوره‌ی آماری مشترک ۱۳۸۳-۱۳۹۲ در نظر گرفته شد. بازه‌ی زمانی ۱۳۸۳-۱۳۸۸ برای واسنجی و ۱۳۸۹-۱۳۹۲ برای اعتبار‌سنجی، انتخاب و مدل اجرا شد. در پژوهش حاضر، همانند عباسپور (۲۰۱۳)، زارع‌گاریزی و همکاران (۲۰۱۷)، عارفی اصل و همکاران (۱۳۹۲) و بصیرانی و همکاران (۱۳۹۲) برای واسنجی مدل



SWAT در بالادست حوضه‌ی مورد مطالعه، از برنامه‌ی SUFI-2 به عنوان یکی از الگوریتم‌های SWAT-CUP استفاده شد.<sup>۱</sup> اجرای الگوریتم SUFI-2 برای بهینه‌سازی و تحلیل حساسیت پارامترهای مدل در تولید رسوب، به منظور تعیین اهمیت هر پارامتر برنامه مقادیر t-test و p-value را ارائه می‌دهد.<sup>۲</sup> برای ارزیابی تطابق خروجی‌های مدل با داده‌های مشاهداتی همانند مورپاسی<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۷)، بتری و همکاران (۲۰۱۱)، زارع گاریزی و همکاران (۱۳۹۵) و غفاری (۱۳۹۷) از شاخص‌های آماری شامل ضریب تعیین ( $R^2$ )، ضریب ناش ساتکلیم (NS) و نسبت میانگین مجذورات خطا به انحراف معیار داده‌های مشاهداتی (RSR) استفاده شد. ضریب تبیین بیانگر نسبت تغییرات توضیح داده شده توسط برازش یک خط رگرسیون است و به عنوان قدرت اندازه‌گیری یک رابطه‌ی خطی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی می‌باشد (رابطه ۱).

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\left[ \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]^{0.5} \left[ \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2 \quad \text{رابطه‌ی (۱)}$$

در این رابطه، n تعداد مشاهدات،  $O_i$  مقادیر مشاهده‌ای رسوب  $P_i$  مقادیر پیش بینی شده رسوب،  $\bar{O}$  میانگین میزان رسوب مشاهده‌ای برای کل مدت زمان ارزیابی،  $\bar{P}$  میانگین میزان بار رسوب شبیه‌سازی شده برای کل مدت زمان ارزیابی. مقدار این ضریب بین ۱- تا ۱ تغییر می‌کند. مقادیر  $R^2$  و طبقات آن در جدول (۱) ارائه شده

۱- مدل دارای پارامترهای متعددی است که مقدار بهینه پارامترهای مدل به شرایط منطقه و داده‌های ورودی بستگی دارد و تا زمانی که مقدار بهینه پارامترها تخمین زده نشود، نمی‌توان شبیه‌سازی فرایندهای فیزیکی حوضه را به خوبی انجام داد (عباسپور، ۲۰۰۷). لذا همواره لازم است تا مدل را واسنجی کرد و به یک مدل کالیبره شده با مقادیر بهینه پارامتر دست یافت. مدل واسنجی شده باید در یک دوره‌ی آماری دیگر با عنوان مرحله‌ی اعتبارسنجی مورد ارزیابی قرار گیرد (عرفانیان و همکاران، ۱۳۹۴: ۵۵۵).

۲- t-test برای شناسایی اندازه‌ی حساسیت هر پارامتر (مقادیر مطلق بزرگ‌تر، حساسیت بیشتر) استفاده می‌شود و مقادیر p-value برای تعیین سطح معنی‌داری حساسیت (مقادیر نزدیک به صفر اهمیت بیشتری دارند) بکار می‌رود (یسوف و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۹۹).

3- Moriasi et al.,

است. رابطه‌ی (۲) معادله‌ی ضریب نش - ساتکیف (NS) می‌باشد:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{رابطه‌ی (۲)}$$

که در آن:  $n$  تعداد مشاهدات،  $O_i$  و  $P_i$  مقادیر متناظر مشاهده شده و پیش‌بینی شده می‌باشند،  $\bar{O}$  نیز میانگین ریاضی مقادیر مشاهده شده می‌باشد. مقدار آن از منفی بی‌نهایت تا ۱ متغیر است. عدد یک برازش مناسب بین مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد (موشه و همکاران، ۲۰۱۳: ۴۹). مقادیر نش ساتکیف و طبقات آن در جدول (۱) ارائه شده است. رابطه‌ی (۳) نسبت میانگین مجذورات خطا به انحراف معیار داده‌های مشاهده‌اتی (RSR) است و در آن:  $n$  تعداد مشاهدات،  $X^{obs}$  مقدار مشاهده‌ای رسوب،  $X^{sim}$  مقدار برآوردی رسوب و  $X^{mean}$  میانگین مقادیر مشاهده‌ای می‌باشند.

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \left[ \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs} - X_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs} - X^{mean})^2}} \right] \quad \text{رابطه‌ی (۳)}$$

در این پژوهش پس از واسنجی و اعتبار سنجی مدل و ارزیابی آنها، از متوسط سالانه خروجی‌های مدل برای شناسایی و توزیع مکانی فرسایش و تولید رسوب حوضه سد ستارخان استفاده شد. به این ترتیب زیرحوضه‌های حوضه‌ی آبریز اهرچای علیا براساس روش جنکز (۱۹۶۷) و زارع گاریزی و همکاران (۱۳۹۵) به پنج طبقه از نظر فرسایش و رسوب (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) تقسیم‌بندی شدند (جدول ۲) و مناطق بحرانی تولید رسوب معین شدند. فرایند اجرای مدل در شکل (۲) به صورت دیاگرام ترسیم شده است.

### بحث و نتایج

نقشه‌ی کاربری اراضی در بالادست حوضه‌ی اهرچای، نشان می‌دهد کشت دیم (۲۷/۱۵ درصد)، مراتع نیمه‌متراکم (۲۴/۶۶ درصد)، مراتع ضعیف (۲۴/۲۵ درصد)، مراتع متراکم

(۹/۱۴)، کشت آبی (۷/۷۴)، اراضی بایر (۳/۹۴)، جنگل تنک (۲/۴۹ درصد)، باغ (۰/۴۴ درصد) و مسکونی (۰/۰۵ درصد) است (شکل ۳ ج). از نظر طبقات شیب بالادست حوضه‌ی اهرچای، شیب‌های ۰-۲ درصد که به مناطق با شیب ملایم ۵ر سطح دشت و نواحی نزدیک رودخانه مربوط می‌شود ۳۹/۱۷ درصد از مساحت حوضه را شامل می‌شود. شیب‌های ۲-۵ درصد که سطوح پایکوهی منطقه را تشکیل می‌دهند ۴۵/۹۲ درصد و شیب‌های ۵-۸ درصد و ۸-۱۰ درصد به ترتیب دارای ۹/۸۲ درصد و ۴/۲۸ از مساحت حوضه هستند. در حالی که شیب‌های بین ۱۰-۱۵ درصد کمتر از یک درصد (۰/۷۹) مساحت دارند، شیب‌های بیشتر از ۱۵ درصد ۰/۰۲ مساحت حوضه را در بر گرفته است (شکل ۳ ب).

جدول (۱) مقادیر و طبقات شاخص‌های  $R^2$ ، NS و RSR

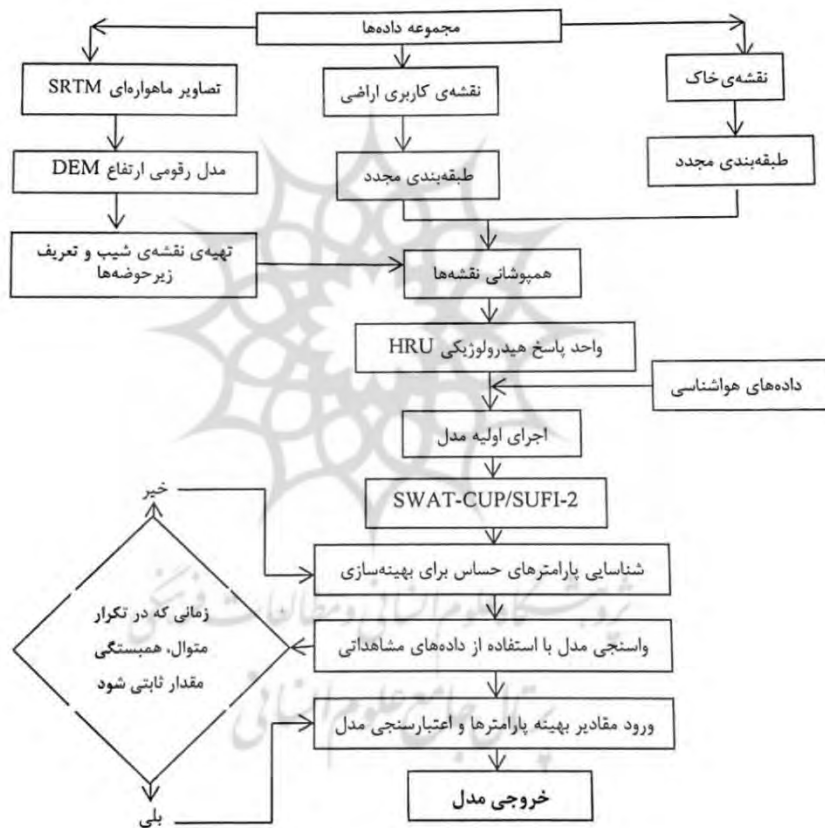
شاخص	مقادیر	طبقات
$R^2$	$< 0.05$	ناکارآمد
	$0.05-0.06$	رضایتبخش
	$0.06-0.07$	خوب
	$0.07-1$	خیلی خوب
NS	$< 0.04$	ناکارآمد
	$0.04-0.05$	قابل قبول
	$0.05-0.065$	رضایتبخش
	$0.065-0.075$	خوب
RSR	$0-0.05$	خیلی خوب
	$0.05-0.06$	خوب
	$0.06-0.07$	رضایتبخش
	$> 0.07$	ناکارآمد

منبع: موربانی و همکاران (۲۰۰۷) و آی ال و همکاران (۲۰۱۷)

جدول (۲) مقادیر و طبقات اولویت بندی تولید رسوب

طبقات	بسیار کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
رسوبدهی در واحد سطح (تن در هکتار)	۰-۰/۷	۰/۷-۱/۵	۱/۵-۳	۳-۵	۵-۱۰

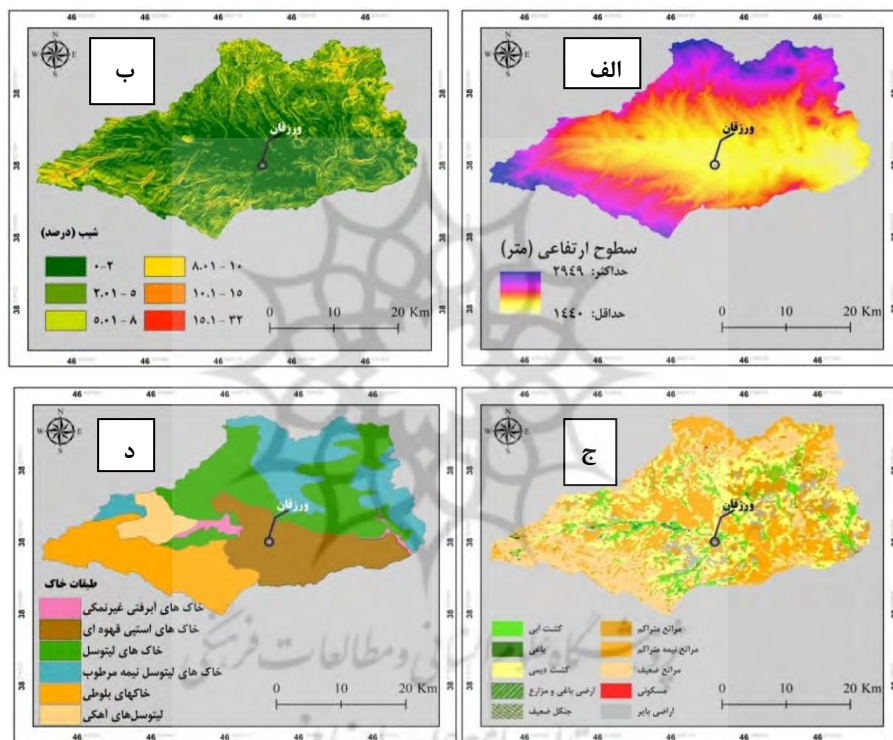
منبع: براساس روش جنکز (۱۹۶۷) به نقل از زارع گاریزی و همکاران (۱۳۹۵)



شکل (۲) دیاگرام مراحل انجام کار

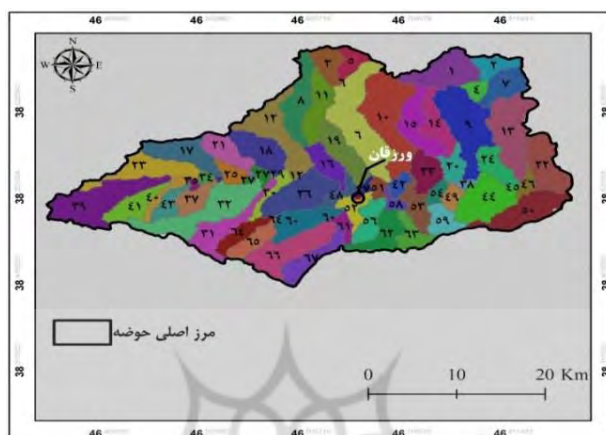
بیشترین مساحت خاک‌های حوضه‌ی سد ستارخان را تیپ خاک‌های لیتوسل با ۳۰/۲۲ درصد تشکیل می‌دهد. خاک‌های آبرفتی (۱/۵۶ درصد)، لیتوسل‌های نیمه

مرطوب (۲۱/۵۷ درصد)، خاک‌های استپی قهوه‌ای (۲۰/۲۱ درصد)، خاک‌های بلوطی (۲۱/۱۹ درصد) و لیتوسل‌های آهکی (۵/۲۵ درصد) پوشش خاکی بالا دست اهرچای را دربرگرفته است (شکل ۳).



شکل (۳) نقشه‌ی مدل رقمی ارتفاع، ب: شیب، ج: کاربری اراضی د: خاک در حوضه‌ی سد ستارخان اهر

نقشه‌ی واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی که از تلفیق سه لایه شیب، کاربری اراضی و خاک، به دست آمده شامل ۶۷ زیرحوضه و ۶۰۰ واحد پاسخ هیدرولوژیکی می‌باشد (شکل ۴).



شکل (۴) نقشه‌ی زیرحوضه‌های حوضه‌ی سد ستارخان اهر

در اجرای الگوریتم SUFI-2 برای بهینه‌سازی و تحلیل حساسیت پارامترهای مدل، ۱۹ پارامتر در تولید رسوب حوضه‌ی سد ستارخان مؤثر شناخته شد و در مدل وارد شدند. در نهایت بعد از تکرارهای متعدد مقادیر بهینه این پارامترها برای شبیه‌سازی رسوب ماهانه حوضه‌ی مورد مطالعه تعیین شد. براساس نتایج به دست آمده هفت پارامتر در تولید رسوب حوضه‌ی سد ستارخان بیشترین حساسیت را دارند (جدول ۳). در این مدل پارامترهای USLE\_K, PRF, CH\_N2, SMFMN, CH\_K2, ESCO, CN2 همانند مطالعات بصیرانی و همکاران (۱۳۹۴)، عرفانیان و همکاران (۱۳۹۴)، یسوف و همکاران (۲۰۱۵)، بریک (۲۰۱۶) و آی ال و همکاران (۲۰۱۷) دارای بیشترین حساسیت هستند. با تحلیل حساسیت و تعیین حساس‌ترین پارامترها، اعتبارسنجی مدل با استفاده از مقادیر بهینه‌ی پارامترهای حساس انجام شد. شکل (۵) نمودارهای واسنجی و اعتبارسنجی رسوب ایستگاه اورنگ حوضه سد ستارخان اهر را نشان می‌دهد. همانطور که از نمودارها مشخص است مدل SWAT در دوره‌ی واسنجی، اوج‌ها را در بیشتر موارد کمتر از مقادیر مشاهداتی برآورد کرده است (شکل ۵الف). همچنین مدل در دوره‌ی اعتبارسنجی انطباق کم حداکثرها و حداقل‌های رسوب را با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد (شکل ۵ب). با وجود این ضعف مدل SWAT در شبیه‌سازی نوسانات

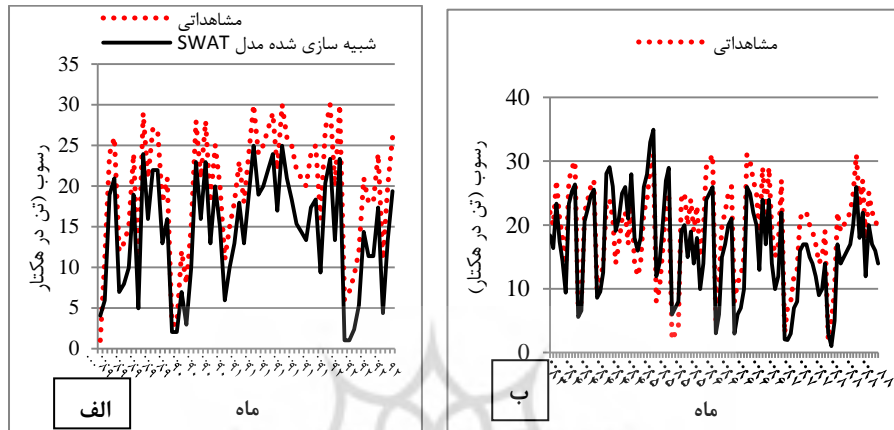
رسوب بویژه مقادیر بیشینه آن می‌باشد (رستمیان و همکاران، ۲۰۰۸؛ عارفی اصل، ۱۳۹۲؛ عرفانیان و همکاران، ۱۳۹۴).

جدول (۳) پارامترهای حساس در تولید رسوب حوضه‌ی سد ستارخان اهر با استفاده از مدل SWAT

پارامتر	نام پارامتر	حداقل	حداکثر	مقادیر بهینه	t-test	p-value
v_CH_K2.rte	هدایت هیدرولیکی موثر در آبرفت‌های کانال اصلی	۲۰	۴۰	۲۹/۰۲	-۶/۶۱	۰
v_CH_N2.rte	ضریب زبری مانینگ در کانال اصلی	۰	۰/۱	۰/۰۶۲۱	۲/۶۲	۰/۰۱
v_SMFMN.bsn	کمینه‌ی نرخ ذوب برف	۰	۱	۰/۶۹۱	۶/۰۹	۰
r_CN2.mgt	شماره منحنی برای شرایط رطوبتی	-۰/۱۲	-۰/۶۲	-۰/۱۸	-۱۴/۶	۰
v_ESCO.hru	عامل جبران تخییر خاک	۰/۱	۱	۰/۹۲	۶/۶۸	۰
v_PRF.bsn	عامل تعیین اوج برای روندیابی رسوب در کانال اصلی	۰/۸	۱/۱	۱/۳۶	-۱/۹۴	۰/۰۲
r_USLE_K(1).sol	عامل فرسایش پذیری خاک در معادله جهانی فرسایش	-۰/۱۲	۰/۱۲	-۰/۰۶	-۱/۴۱	۰/۱۶

V: به معنی جایگزینی مقادیر موجود پارامتر با مقدار داده شد.  $\alpha$ : به معنی ضرب کردن مقادیر موجود پارامتر +۱) مقدار داده شده است.

نتایج شاخص‌های کارایی در جدول (۴) ارائه شده است. براساس نتایج این جدول مقادیر  $R^2$  در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۷۶ و ۰/۹۶ می‌باشند که بیانگر پیش‌بینی خیلی خوب فرسایش و رسوب در حوضه‌ی سد ستارخان به وسیله‌ی مدل است. شکل (۶) همبستگی بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد و بیانگر این است که ضریب تبیین بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده بعد از واسنجی مدل و بهینه کردن پارامترها از ۰/۷۶ به ۰/۹۶ افزایش یافته و سبب افزایش دقت در شبیه‌سازی و پیش‌بینی مدل در تخمین رسوب برای دستیابی به اقدامات مدیریتی شده است.



شکل (۵) نمودار رسوب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده حوضه‌ی سد ستارخان در الف: دوره‌ی واسنجی ب: دوره‌ی اعتبارسنجی

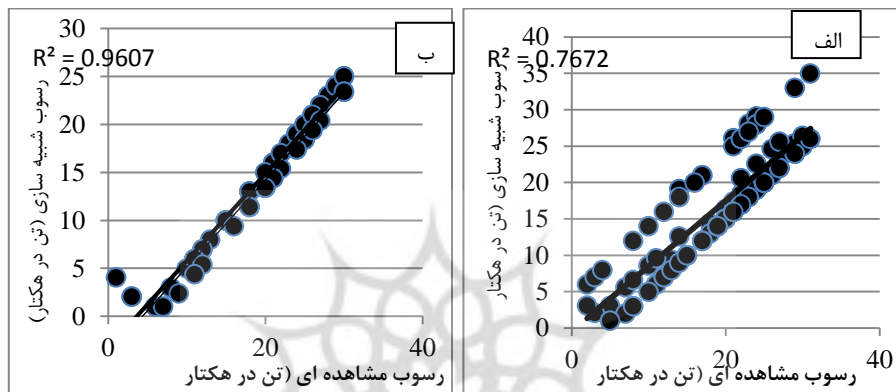
جدول (۴) مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل SWAT در مراحل مختلف اجرا

شاخص‌ها	مرحله‌ی واسنجی (۱۳۸۸-۱۳۸۳)	مرحله‌ی اعتبارسنجی (۱۳۹۲-۱۳۸۹)
ضریب تبیین ( $R^2$ )	۰/۷۶	۰/۹۶
ضریب نش-ساتکلیف (NS)	۰/۹۵	۰/۹۳
ضریب RSR	۰/۰۶	۰/۱

مقادیر NS برای تخمین رسوب در دوره‌ی واسنجی ۰/۹۵ و در دوره‌ی اعتبارسنجی ۰/۹۳ به دست آمد که در هر دو حالت براساس طبقه‌بندی موریاسی (۲۰۰۷) و آی ال بیانگر شبیه‌سازی خیلی خوب رسوب توسط مدل SWAT در حوضه‌ی سد ستارخان می‌باشد. نسبت میانگین مجذورات خطا به انحراف معیار داده‌های مشاهده‌اتی (RSR) نیز در دوره‌ی واسنجی و اعتبارسنجی مدل به ترتیب ۰/۰۶ و ۰/۱ به دست آمد که شبیه‌سازی خیلی خوب مدل را در تخمین رسوب حوضه‌ی سد ستارخان نشان می‌دهد (جدول ۴). به این ترتیب مدل همانند زارع گاریزی و همکاران (۱۳۹۵)، عارفی اصل و همکاران (۱۳۹۲) و غفاری (۱۳۹۷) و غیره توانایی خوبی در پیش‌بینی کلی متوسط رسوب در حوضه‌ی آبریز کوهستانی پر شیب نشان می‌دهد. می‌توان از مدل



برای بررسی تغییرات مکانی و زمانی فرسایش و رسوب و پیش‌بینی اثرات اقدامات مدیریتی استفاده کرد.

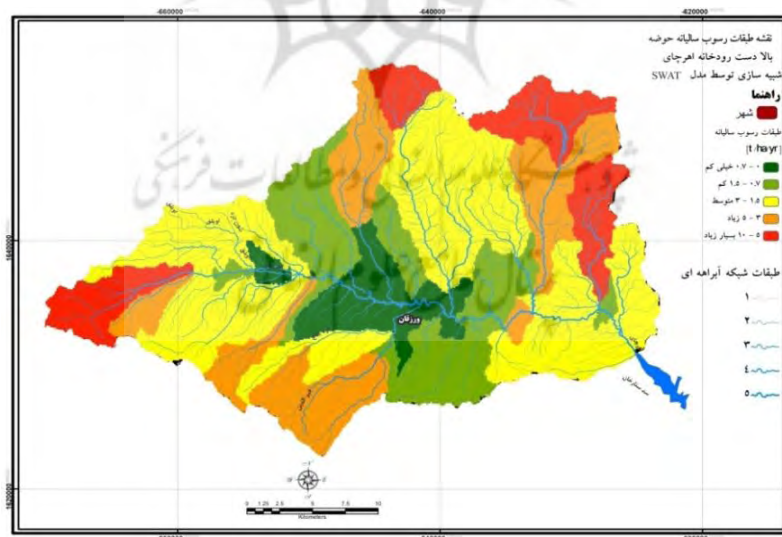


شکل (۶) نمودارهای همبستگی بین بار رسوب ماهانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده: الف- قبل از بهینه‌سازی پارامترها ب- بعد از بهینه‌سازی پارامترها در حوضه‌ی سد ستارخان

#### - بررسی توزیع مکانی فرسایش و تولید رسوب در حوضه‌ی سد ستارخان

در این پژوهش پس از واسنجی مدل از متوسط سالانه خروجی‌های مدل برای شناسایی و توزیع مکانی فرسایش و رسوب حوضه‌ی سد ستارخان استفاده شد. به این ترتیب زیرحوضه‌های حوضه‌ی مورد مطالعه براساس روش جنکز (۱۹۶۷) و زارع گاریزی و همکاران (۱۳۹۵) در پنج طبقه از نظر فرسایش و رسوب (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) تقسیم‌بندی شدند. شکل (۷) نقشه رسوب سالانه حوضه‌ی سد ستارخان را نشان می‌دهد. بر اساس نقشه‌ی رسوب، مناطق با تولید بسیار زیاد با مساحت ۱۴/۱۱ درصد، بخش‌های بالادست حوضه در شمال، شمال شرقی و غرب حوضه‌ی سد را دربرگرفته است و شامل شیب‌های بیش از ۱۵ درصد هستند که اغلب ارتفاعات حوضه با برونزدهای سنگی، پوشش گیاهی و مراتع ضعیف را تشکیل می‌دهد. این ویژگی‌ها سبب تشدید فرسایش و تولید مقادیر بالای رسوب در این حوضه شده است. تعداد ده زیرحوضه با فرسایش زیاد حدود ۲۰/۰۶ درصد مساحت حوضه را شامل شده است که

در شیب‌های ۸-۱۵ درصد با کاربری مراتع ضعیف، نیمه‌متراکم و کشت دیم قرار دارد. در این مناطق به دلیل فعالیت‌های نامناسب کشاورزی و استفاده غیراصولی از مراتع، تولید رسوب زیاد می‌باشد. مناطق با فرسایش متوسط با ۱۸ زیرحوضه، در حدود ۴۰/۰۷ درصد مساحت، بخش‌های زیادی از شرق، شمال و غرب حوضه را در بر گرفته است. فرسایش کم در ۱۴ زیرحوضه مساحتی در حدود ۱۷/۵۷ درصد دارد و فرسایش خیلی کم با مساحتی ۸/۱۹ درصدی ۷ زیرحوضه را شامل می‌شود و در شیب‌های کم و مناطق پست حوضه که دارای کاربری مراتع متراکم، اراضی باغی و کشت آبی می‌باشد اتفاق می‌افتد. بدین ترتیب نتیجه نشان می‌دهد که فرسایش و رسوبدهی در این مناطق تحت تأثیر شیب زمین و کاربری کشاورزی قرار دارد. اکثر زیرحوضه‌های رسوب‌زا و بحرانی با ۱۴/۱۱ درصد در نواحی کوهستانی و بالادست حوضه‌ی سد ستارخان واقع شده‌اند. مدیریت این محدوده‌های حساس به فرسایش می‌تواند بیشترین تأثیر را بر روی کاهش فرسایش و رسوب داشته باشد.



شکل (۷) نقشه‌ی تولید رسوب سالانه در حوضه‌ی سد ستارخان با استفاده از مدل SWAT و MUSLE

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش از مدل نیمه‌فیزیکی و توزیعی SWAT و الگوریتم SUFI-2 و همچنین مدل MUSLE با هدف تخمین فرسایش و تولید رسوب در حوضه سد ستارخان اهر استفاده شد. ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از شاخص‌هایی مانند ضریب تبیین ( $R^2$ )، ضریب نش-سانکلیف (NS) و ضریب RSR بیانگر کارایی خیلی خوب آن برای شبیه‌سازی فرسایش و تولید رسوب در حوضه‌ی سد ستارخان می‌باشد. مدل توانایی خوبی در پیش‌بینی کلی متوسط رسوب در حوضه‌ی آبریز کوهستانی پر شیب نشان می‌دهد. با وجود این ضعف مدل SWAT در شبیه‌سازی نوسانات رسوب به ویژه مقادیر بیشینه آن می‌باشد. بر اساس نتایج حاصل از مدل، پارامترهای شماره‌ی منحنی (CN2)، عامل فرسایش‌پذیری خاک (USLE\_K)، عامل جبران تبخیر خاک (ESCO)، کمینه میزان ذوب برف (SMFMN)، ضریب زبری مانینگ (CH\_N2) و هدایت هیدرولیکی مؤثر در آبرفت‌های کانال اصلی (CH\_K2) با بیشترین حساسیت، از پارامترهای مؤثر و بسیار مهم در تعیین میزان بار رسوب خروجی تشخیص داده شدند. در نهایت، نتایج ترسیم نقشه‌ی فرسایش و تولید رسوب نشان داد که الگوی مکانی مناطق از نظر فرسایش و تولید رسوب با یکدیگر متفاوت است. به‌طوری‌که مناطق بحرانی در بالادست حوضه در بخش‌های شمالی، شمال شرقی، غرب و جنوب غربی قرار دارند. این مناطق که تولید رسوب در آنها خیلی زیاد و زیاد برآورد شده است در حدود ۳۴/۱۷ درصد مساحت حوضه‌ی سد ستارخان را شامل می‌شوند. همچنین بررسی نقشه‌های پایه نشان داد که فرسایش و تولید رسوب در این مناطق تحت تأثیر شیب و کاربری کشاورزی می‌باشد.

## منابع

- بصیرانی، نصرالله؛ کریمی، حاجی، مقدم‌نیا و علیرضا ابراهیمی (۱۳۹۴)، بهینه‌سازی و تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر بر بار رسوب بر پایه‌ی الگوریتم **SUF2** (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبخیز رودخانه‌ی دویرج)، مجله‌ی علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، شماره‌ی ۷۲، صص ۲۴۳-۲۵۲.
- بیاتی خطیبی، مریم و فریبا کرمی (۱۳۹۵)، برآورد میزان فرسایش آبی و خاک تلف شده از یک خندق در سطح حوضه‌ی آتش‌بیگ، هیدروژئومورفولوژی، شماره‌ی ۷، صص ۱۰۶-۸۶.
- رضازاده، محمد سهیل، بختیاری بهرام، عباسپور، کریم، احمدی، محمد و مهدی (۱۳۹۷)، شبیه‌سازی رواناب، رسوب و تبخیر- تعرق با استفاده از سناریوهای مدیریتی برای کاهش بار رسوب با استفاده از مدل **SWAT**، نشریه‌ی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، شماره‌ی ۴۰، صص ۴۱-۵۱.
- زارع گاریزی، آرش، طالبی، علی و منیره فرامرزی (۱۳۹۵)، شناسایی و اولویت بندی مناطق بحرانی حوزه آبخیز از نظر فرسایش و رسوب با مدل **SWAT**، نشریه‌ی مهندسی و مدیریت آبخیز، شماره‌ی ۴، صص ۳۶۱-۳۵۰.
- صدوق، سیدحسین؛ حسین‌زاده، محمدمهدی و فهیمه آزادی (۱۳۹۴)، پهنه‌بندی فرسایش در حوضه‌ی آبخیز کهمان با استفاده از سه مدل **EPM**، **BLM** و **Fargas**، هیدروژئومورفولوژی، شماره‌ی ۲، صص ۱۵۴-۱۳۷.
- عارفی‌اصل، اکرم؛ نجفی‌نژاد، علی؛ کیانی، فرشاد و عبدالرسول سلمان ماهینی (۱۳۹۲)، شبیه‌سازی رواناب و رسوب با استفاده از مدل **SWAT** در آبخیز چهل‌چای استان گلستان، نشریه‌ی مرتع و آبخیزداری، دوره‌ی ۶، شماره‌ی ۳، صص ۴۴۶-۴۳۳.
- عرفانیان، مهدی؛ بیاضی، منصور؛ عبقری، هیراد و اباذر اسمعیلی عوری (۱۳۹۴)، شبیه‌سازی ماهانه دبی جریان و رسوب حوضه‌ی آبخیز نازلوچای با مدل **SWAT** و اولویت‌بندی نواحی تولید رسوب، نشریه‌ی مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد ۷، شماره‌ی ۴، صص ۵۶۲-۵۵۲.

- غفاری، گلاله (۱۳۹۷)، پهنه‌بندی شدت فرسایش با استفاده از مدل SWAT در حوضه‌ی سد قشلاق، جغرافیا و توسعه، شماره‌ی ۵۰، صص ۷۴-۵۵.
- محمدی، شاهین؛ کریم‌زاده، حمیدرضا و میثم علیزاده (۱۳۹۷)، برآورد مکانی فرسایش خاک کشور ایران با استفاده از مدل **RUSLE**، اکوهیدرولوژی، شماره‌ی ۲، صص ۵۶۹-۵۵۱.
- نوحه‌گر، احمد؛ کاظمی، محمد و سیدجواد احمدی (۱۳۹۶)، مقایسه‌ی سهم زیرحوضه‌ها در فرسایش و رسوب با استفاده از مدل‌های ترکیبی و الگوریتم ژنتیک (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبخیز تنگ بستانک، استان فارس)، هیدروژئومورفولوژی، شماره‌ی ۱۲، صص ۸۷-۶۷.
- Abbaspour, K.C., Vejdani, M., Haghigat, S., (2007), **SWATCUP Calibration and Uncertainty Programs for SWAT**. In: Oxley, L., Kulasiri, D. (Eds.), **Proc. Intl. Congress on Modeling and Simulation (MODSIM'07)**. Modeling and Simulation Society of Australia and New Zealand, Melbourne, Australia, PP. 1603-1609.
- 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, Vol. 34, No.1, PP.73-89.
- Ayele, G.T., Teshale, E.Z., Yu, B., Rutherford, I.D., Jeong, J. (2017), **Streamflow and Sediment Yield Prediction for Watershed Prioritization in the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia**, Water, Vol.9, No,782, PP. 1-29.
- Betrie, G.D., Mohammed, Y.A., Griensven, A.V., R. Srinivasan. (2011), **Sediment management modelling in the Blue Nile Basin using SWAT model**. Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 15, PP.807-818.
- Briak, H., Moussadek, R., Aboumaria, KH., Mrabet, R., (2016), **Assessing sediment yield in Kalaya gauge watershed (Northern Morocco) using GIS and SWAT model**, International Soil and Water Conservation Research, No.4, PP. 177- 185.

- Duru, U., Arabi, M., Whol, E., (2018), **Modeling stream flow and sediment yield using the SWAT model: a case study of Ankara River basin, Turkey**, Journal Physical Geography, Vol,39, No. 3, PP. 264-289.
- Gull, S., MA, A., Dar, A.M., (2017), **Prediction of Stream Flow and Sediment Yield of Lolab Watershed Using SWAT Model**. Hydrology Current Research, Vol.8, No.1, PP. 1-9.
- Merritt, W.S., Letcher, R.A., Jakeman, A.J. (2003), **A review of erosion and sediment transport models**. Environmental modelling and Software, No.18, PP. 761-799.
- Moriassi, D.N.; Arnold, J.G.; Van Liew, M.W.; Bingner, R.L.; Harmel, R.D.; Veith, T.L. (2007), **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations**. ASABE, No.50, PP. 885-900.
- Muche, H., Temesgen, M., Yimer, F., (2013), **Soil loss prediction using USLE and MUSLE under conservation tillage integrated with 'fanya juus' in Choke Mountain, Ethiopia**, International Journal of Agricultural Sciences, Vol. 3, No.10, PP. 046-052.
- Nash, J.E.; Sutcliffe, J. (1970), **River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principle**. J. Hydrol, No. 10, PP. 282-290.
- Pandey, A.; Himanshu, S.K.; Mishra, S.; Singh, V.P. (2016), **Physically based soil erosion and sediment yield models revisited**. Catena, No. 147, PP.595-620.
- Patrick Laceyby, J., McMahon, J., Evrard, O., Olley, J. (2015), **A Comparison of geological and statistical approaches to element selection for sediment fingerprinting**, Soils Sediments, No.15, PP.2117-2131.
- Tran Thi Phuong, Chau Vo Trung Thong, Nguyen Bich Ngoc, Huynh Van Chuong, (2014), **Modeling Soil Erosion within Small Mountainous Watershed in Central Vietnam Using GIS and SWAT**, Resources and Environment, Vol.4, No.3, PP. 139-147.

- Tyagi, J.V., Rai, S.P., Qaz, N., Singh, M.P. (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, Vol. 6, No. 1, PP. 49-66.
- Yesuf, H.M., Assen, M., Alamirew, T., Melesse, A.M., (2015), **Modeling of sediment yield in Maybar gauged watershed using SWAT, northeast Ethiopia**, Catena, No.127, PP. 191-205.
- Zare Garizi, A., Talebi, A., (2016), **Identification of critical sediment source areas across the Gharesou watershed, Northeastern Iran, using hydrological modeling**, Environmental Resources Research, Vol. 4, No. 1, PP. 1-25.