

## شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه آبریز سد نهند و شناسایی مناطق بحرانی حوضه از نظر فرسایش با استفاده از مدل SWAT

فرزاد رستمی<sup>۱</sup>، محمد تقی اعلمی<sup>۲</sup>، حبیبه عباسی<sup>۳\*</sup>، لیلا ملکانی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه تبریز، تبریز

۲. استاد گروه آب دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز

۳. استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی مرند، دانشگاه تبریز، تبریز

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۵/۱۰؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۰۶/۳۱)

### چکیده

با توجه به قرارگیری کشور ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک و جنس خاک‌های متداول در ایران، یکی از معضلات کشورمان میزان زیاد فرسایش و رسوب است. میزان رسوب تولیدی از حوضه‌های آبریز در نتیجه اندرکنش پیچیده اقلیم، نوع خاک، کاربری اراضی و فعالیت‌های بشری حاصل می‌شود. بر این اساس، حصول روش‌های مناسب و دقیق در پیش‌بینی بار رسوبی رودخانه‌ها را می‌توان به عنوان یکی از چالش‌های مهم دانست. هدف اصلی این مطالعه، شناسایی مناطق بحرانی از نظر فرسایش و رسوب در حوضه بالادست سد نهند واقع در استان آذربایجان شرقی است. در این راستا، مدل SWAT برای پیش‌بینی دبی و بار رسوب ماهانه با استفاده از الگوریتم SUFI-2 واسنجی و صحت‌سنجی شد. ضریب نش‌ساتکلیف (NS) به عنوان تابع هدف برای دبی در دوره واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۸۴ و ۰/۷۵ به دست آمد. مقدار ضریب نش‌ساتکلیف بار رسوب در دوره واسنجی ۰/۶۵ و در دوره صحت‌سنجی ۰/۸ محاسبه شد. در ادامه، با استفاده از نتایج مدل SWAT، میزان متوسط رواناب و رسوب خروجی زیرحوضه‌ها با روش گروه‌بندی شکست طبیعی کلاس‌بندی شده و مناطق بحرانی فرسایش تعیین شد. بر این اساس، ۵۲ کیلومتر مربع (۲۵ درصد) از مساحت حوضه که در کلاس با تولید رسوب بیشتر طبقه‌بندی شده‌اند، جزء مناطق بحرانی از نظر فرسایش و رسوب هستند و بنابراین، در اولویت نخست برای انجام عملیات کنترل فرسایش قرار دارند. از آنجا که فرسایش باعث از بین رفتن و کاهش حاصلخیزی خاک می‌شود و از طرفی، رسوبات تولیدی در مخزن سد رسوب‌گذاری می‌کنند، انجام عملیات کنترل فرسایش در این زیرحوضه‌ها ضروری است.

**واژه‌های کلیدی:** شبیه‌سازی؛ رواناب؛ بار رسوب حوضه؛ مناطق بحرانی؛ مدل SWAT.

## مقدمه

یکی از مشکلات مهم در مدیریت حوضه‌های آبخیز کشور، فرسایش و رسوب‌زایی است، که پیامدهای ناشی از آن با تشدید بهره‌برداری انسان از طبیعت از اوایل قرن بیستم اثرات منفی خود را بر اکوسیستم‌های حیاتی وارد ساخته است. عامل اصلی فرسایش افزایش جمعیت و استفاده بیش از حد از زمین است [۱]. سالیانه مقدار زیادی خاک از سطح حوضه‌های آبخیز به وسیله آب شسته شده و از محل اصلی خود جابه‌جا شده و حجم زیادی از آن در پشت سدها، آب‌های ساکن، چاله‌های داخلی و یا دریاها و اقیانوس‌ها ته‌نشین می‌شود. بخش زیادی از این رسوبات بر اثر فرسایش خاک حاصلخیز سطحی ایجاد می‌شود که با بررسی و توجه بیشتر به چگونگی پیدایش خاک، اهمیت این عنصر طبیعی مشخص خواهد شد [۱]. با توجه به اینکه آب و خاک مهم‌ترین عوامل در تأمین مایحتاج بشری هستند [۳]، کوچک‌ترین کم‌توجهی در حفظ و نگهداری این دو عامل، خسارت جبران‌ناپذیری را وارد خواهد کرد.

فرسایش آبی از جمله فرایندهایی است که بر منابع آب و خاک کشور تأثیر نامطلوبی دارد؛ به طوری که ۷۵ میلیون هکتار از حدود ۱۰۰ میلیون هکتار اراضی کشور، در معرض فرسایش آبی و به تبع آن، پدیده بیابان‌زایی است [۲]. برای جلوگیری از فرسایش و هدررفت منبع بارزش خاک، اقدامات متعددی همچون قرق مراتع برای تقویت و بهبود پوشش گیاهی، مرتع‌کاری و اصلاح مراتع و احداث سازه‌های مختلف همچون آب‌بندها، سدهای کوچک و متوسط در سطح حوضه‌های آبخیز در دستور کار قرار گرفته‌اند؛ اما با توجه به محدودیت منابع مالی و لزوم اقتصادی و پرثمر بودن اقدامات انجام‌شده، اجرای عملیات اصلاحی و حفاظتی باید از مناطقی با بیشترین میزان هدررفت و فرسایش آغاز شود و برای دستیابی به این مهم، برآورد میزان فرسایش حوضه‌های آبخیز و قسمت‌های مختلف آن، الزامی و تعیین‌کننده نوع، حجم و مکان انجام اقدامات مختلف برای حفظ خاک است [۴]. بنابراین، بررسی فرسایش و تولید رسوب در زنجیره مطالعات منابع طبیعی، به عنوان یکی از حلقه‌های مهم در تصمیم‌گیری‌ها و موفقیت و کارآمدی طرح‌های آبخیزداری، دارای اهمیت زیادی است. برای برنامه‌ریزی و آگاهی از وضعیت تخریبی

حوضه آبخیز، برآورد میزان فرسایش و رسوب تولیدی هر حوضه لازم و ضروری است.

مه‌ار فرسایش خاک و کاهش رسوب در حوضه‌های آبریز نیازمند اجرای عملیات حفاظت آب و خاک در سطح حوضه است. با توجه به مساحت زیاد حوضه‌ها و در نتیجه، هزینه زیاد اجرای عملیات آب و خاک در کل حوضه، باید نواحی‌ای از حوضه آبریز که میزان فرسایش زیادی دارند، شناسایی شده و نسبت به اجرای عملیات حفاظت آب و خاک اقدام شود. برای این کار، روش‌های مختلفی وجود دارد، ولی روشی مناسب‌تر است که نخست سریع، اقتصادی و نسبتاً دقیق باشد و دوم، بتواند عامل‌ها و فرایندهای اصلی مؤثر بر فرسایش و انتقال رسوب و برهم‌کنش آنها در سطح حوضه آبریز را در نظر بگیرد. از این‌رو، استفاده از مدل‌های فرایندمحور و توزیعی مکانی برای شبیه‌سازی فرایندهای حوضه آبریز، رویکردی بهینه برای برآورد فرسایش و رسوب و شناسایی مناطق مستعد فرسایش محسوب می‌شود. در تحقیق حاضر با استفاده از یک مدل هیدرولوژیکی، میزان رواناب و رسوب تولیدشده در حوضه بالادست سد مطالعه‌شده، شبیه‌سازی خواهد شد. در ادامه، با استفاده از نتایج حاصل، مناطق مستعد فرسایش شناسایی خواهد شد. در سال‌های اخیر، استفاده از مدل‌سازی به عنوان راه‌کار ارزیابی اقدامات کاهش فرسایش مطرح شده است.

عطفی (۱۳۹۳) در پایان‌نامه‌اش با عنوان «شبیه‌سازی بیلان آب و رسوب حوضه آبخیز اهرچای با استفاده از مدل SWAT و Arc GIS» به بررسی رسوب‌گذاری در حوضه آبخیز اهرچای پرداخت. ایشان پایش و ارزیابی منابع آب و خاک را از اقدامات ضروری در زمینه مطالعات آبخیزها دانسته است. مطالعه ساختار بیلان آب برای بررسی چرخه هیدرولوژی بسیار مهم است. مطالعات، تهیه و تدوین بیلان آب و رسوب در حوضه‌های آبخیز نیاز به حجم زیادی از داده‌های مکانی و پردازش آنها دارد، بنابراین استفاده از تکنولوژی‌های نوین، مدل‌ها و ابزارهایی مثل GIS، امری اجتناب‌ناپذیر است. در این تحقیق مدل SWAT که مدلی مفهومی و نیمه‌توزیعی در مقیاس حوضه آبریز است، برای شبیه‌سازی بیلان آب و رسوب حوضه آبخیز اهرچای واقع در استان آذربایجان شرقی شهرستان اهر مورد استفاده قرار گرفته و کارایی مدل در شبیه‌سازی هیدرولوژیک این

مطالعه موردی: سد ملاصدرا» به رسوب‌گذاری حوضه آبریز سد ملاصدرا پرداخته است. در پژوهش یادشده اشاره شده که امروزه در بیشتر اراضی سرعت فرسایش خاک بیش از سرعت تشکیل خاک است. فرسایش نه تنها خود خاک را از بین می‌برد و یا حاصلخیزی آن را کاهش می‌دهد، بلکه با ایجاد رسوب مواد در آبراهه‌ها سبب انسداد آنها می‌شود. سد ملاصدرا در سال ۱۳۸۵ روی رودخانه کر احداث شد و اهدافی همچون افزایش عمر مفید سد درودزن با کنترل بخش زیادی از رسوبات، جلوگیری از تخریب اراضی دشت کربال بر اثر سیلاب‌های سالانه و بهبود اراضی دشت کامفیروز را به دنبال دارد. یکی از راه‌های تخمین میزان فرسایش و رسوب خاک، استفاده از مدل است. در این مطالعه سعی شده به صورت کمی میزان رسوب‌دهی و رواناب در حوضه آبخیز بالادست سد ملاصدرا با استفاده از مدل SWAT مورد ارزیابی قرار گیرد. مدل طی دوره ۲۳ ساله اجرا شده است. در مرحله اول، مدل با استفاده از اندازه‌گیری‌های دبی در ایستگاه هیدرومتری خسرو شیرین واسنجی شده که با توجه به ضریب نش‌ساتکلیف ۰/۶۱ و ضریب  $R^2$  برابر با ۰/۸۳ برای دبی و ۰/۶۴ و ۰/۸۱ برای رسوب در ایستگاه قابل قبول ارزیابی شده است. در مرحله اعتبارسنجی، مقادیر ضریب نش‌ساتکلیف ۰/۵۵ و ضریب  $R^2$  ۰/۹۱ برای دبی و ۰/۷۹ و ۰/۸۰ برای رسوب برآورد شده است. نتایج کلی واسنجی نشان داد مدل SWAT می‌تواند ابزار مناسبی در رابطه با شبیه‌سازی رواناب و رسوب این حوضه باشد [۷].

گیامفی و همکاران (۲۰۱۶) برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه آبریز Olifants آفریقای جنوبی توسط مدل SWAT و به تمرکز روی واسنجی، اعتبارسنجی و تحلیل حساسیت مدل پرداختند. آنها بعد از تعیین پارامترهای حساس جریان برای واسنجی مدل توسط الگوریتم SUFI-2، عملکرد مدل SWAT را توسط ضرایب NSE،  $R^2$ ، PBIAS و RSP مورد ارزیابی قرار دادند که با توجه به مقادیر این ضرایب مدل از عملکرد مطلوبی برخوردار بود [۸].

قرا با (۲۰۱۵) در تحقیقی بیان داشت که مدل‌های جدید ریاضی برای مطالعه فرایندهای هیدرولوژیکی پیچیده یک حوضه آبریز و ارتباط مستقیم آنها با آب‌وهوا، توپوگرافی، زمین‌شناسی و کاربری اراضی توسعه یافته‌اند.

منطقه ارزیابی شده است. دوره آماری ۱۹۷۹-۲۰۱۰ برای شبیه‌سازی مدل انتخاب شد. سال‌های ۱۹۸۲ تا ۲۰۰۲ برای مرحله واسنجی و ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ برای اعتبارسنجی مدل منظور شد. مراحل کالیبره و اعتبارسنجی با استفاده از نرم‌افزار SWATCUP و الگوریتم PSO انجام شد. ضریب نش‌ساتکلیف (NS) در مرحله واسنجی برای متغیرهای دبی جریان و رسوب به ترتیب ۰/۳۹، ۰/۰۶- و در مرحله اعتبارسنجی ۰/۷- و ۰/۴۵- به دست آمده‌اند. با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق، کارایی مدل در شبیه‌سازی جریان بهتر از رسوب بوده است. کم بودن اطلاعات مورد نیاز، متفاوت بودن داده‌های مربوط به دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی از نظر تأثیرگذاری احداث سد ستارخان و وجود مخزن سد در داخل حوضه (با مساحت زیاد) از جمله عوامل تأثیرگذار در پایین بودن ضرایب کارایی مدل هستند [۵].

امیرسرمداری (۱۳۹۵) در پایان‌نامه‌اش با عنوان «برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS) در چارچوب مدل SWAT (سد رودبار الیگودرز)» به بحث رسوب‌گذاری پرداخت. در این مطالعه، توان مدل SWAT در شبیه‌سازی فرسایش و رسوب حوضه سد رودبار الیگودرز با مساحت حدود ۲۲۵۵ کیلومتر مربع بررسی شد و واسنجی و تحلیل مدل با استفاده از برنامه SUFI-2 انجام گرفت. شاخص‌های ضریب تبیین نش‌ساتکلیف به منظور ارزیابی توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رسوب به کار برده شد. آمار رواناب سه ایستگاه هیدرومتری در سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۱۰ برای واسنجی و اعتبارسنجی این حوضه به کار برده شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد در مرحله واسنجی رسوب ماهانه در خروجی حوضه، ضریب تبیین و نش‌ساتکلیف، به ترتیب ۰/۶۶ و ۰/۲۵ و در مرحله اعتبارسنجی ۰/۴۹ و ۰/۳۰ به دست آمد. بررسی نقشه خطر فرسایش خاک نشان می‌دهد میزان خطر فرسایش خاک در سطح حوضه از صفر تا ۶۵۰۰ بر حسب تن در هکتار در سال متغیر است. میانگین بار رسوب سالانه در خروجی این حوضه تا ۷/۵ تن در هکتار در سال برآورد شد [۶].

باقری (۱۳۹۵) در پایان‌نامه خود با عنوان «بررسی رواناب و رسوب حوضه آبریز با استفاده از مدل SWAT،

برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب استفاده شده است. در گام بعدی، با استفاده از نتایج مدل SWAT، میزان متوسط رواناب و رسوب خروجی زیرحوضه‌ها با روش گروه‌بندی شکست طبیعی ((Natural Breaks (Jenks) کلاس‌بندی شده و مناطق بحرانی فرسایش تعیین شد. مناطق بحرانی تعیین‌شده در اولویت نخست برای انجام عملیات حفاظت آب و خاک با کمترین هزینه و بازده بیشتر قرار دارند.

### مواد و روش‌ها

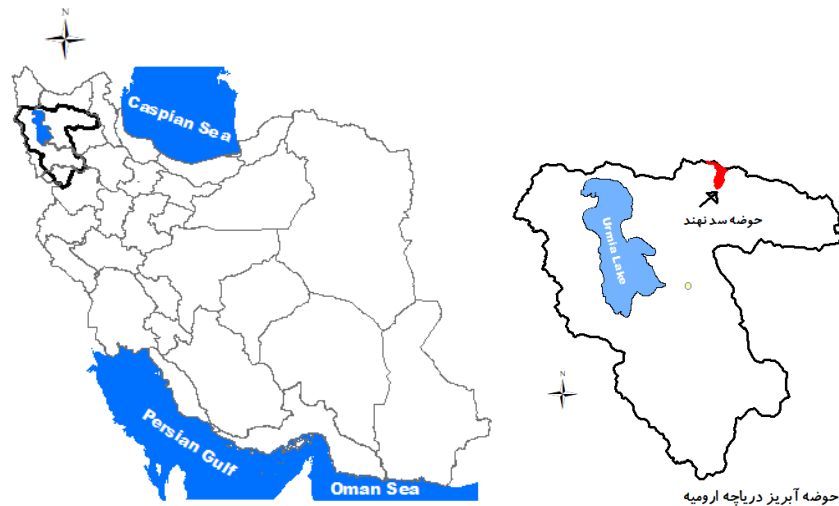
#### منطقه مطالعه‌شده

حوضه آبریز نهندچای از نظر تقسیمات کلی حوضه‌های آبریز، جزء حوضه دریاچه ارومیه بوده و رودخانه نهند به عنوان زهکش اصلی منطقه است. حوضه آبریز رودخانه نهندچای بین عرض جغرافیایی  $38^{\circ}13'$  تا  $38^{\circ}29'$  و طول شرقی  $46^{\circ}20'$  تا  $46^{\circ}33'$  با حداکثر ارتفاع ۲۸۲۰ متر و حداقل ارتفاع ۱۴۴۹ متر و مساحتی برابر  $346/6$  کیلومتر مربع در شمال شرق تبریز واقع شده است. مساحت حوضه آبریز این رودخانه در بالادست سد نهند و در محل ورودی سد نهند (ایستگاه هیدرومتری نهند)، ۲۲۹ کیلومترمربع است که در این تحقیق تمامی مدل‌سازی‌های رواناب و رسوب تا ورودی سد نهند انجام گرفته است. بررسی توزیع فصلی و ماهانه رودخانه نهند بیانگر آن است که ۸۰ درصد کل جریان در دو فصل زمستان و بهار و ۲۰ درصد جریان سالانه در ماه‌های خرداد لغایت آذرماه اتفاق می‌افتد. وضعیت توپوگرافی و اقلیمی در حوضه آبریز نهندچای، شرایطی را فراهم کرده که بررسی جریان سیلابی و متأثر از آن، توزیع مکانی رسوبات در حوضه اهمیت بسزایی را داشته باشد. از جمله خصوصیات بارز حوضه آبریز نهند داشتن شیب زیاد و در نتیجه، تخلیه جریان در مدت زمان کوتاه است که باعث ایجاد سیلاب‌هایی در حوضه می‌شود و پتانسیل فرسایش‌پذیری حوضه را افزایش می‌دهد. سیلاب بخش وسیعی از قسمت‌های حوضه را در بر گرفته و مقدار قابل توجهی از رسوبات وارد مخزن سد نهند شده و باعث کاهش حجم مفید مخزن می‌شود. شکل ۱ موقعیت و شکل حوضه نهند چای را نشان می‌دهد.

در این مطالعه هیدرولوژی حوضه آبریز سد واقع در حوضه رودخانه ساون در شمال شرقی اسلام‌آباد با استفاده از ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT) مدل‌سازی شده است. این هدف برای شبیه‌سازی جریان هیدرولوژیکی، ایجاد تعادل آب و برآورد میزان ورود حجم ماهانه سد به منظور کمک به مدیران در برنامه‌ریزی و اداره این مخزن مهم است. رابط ArcSWAT پیاده‌سازی شده در نرم‌افزار ArcGIS برای مشخص کردن منطقه مورد مطالعه و زیرمؤلفه‌های آن، ترکیب لایه‌های داده و ویرایش بانک اطلاعاتی مدل استفاده شده است. این مدل از ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۱ کالیبره شد و از ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۱ مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس چهار ضرایب آماری توصیه‌شده، ارزیابی نشان می‌دهد عملکرد خوبی برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی و توافق قابل قبول بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده از هر دو ترازوی مقیاس سالانه و ماهانه اجزای تعادل آب به‌درستی تخمین زده شده و جریان سد Simly با موفقیت با ضریب تعیین  $0/75$  بازتولید شد. این نتایج نشان داد در صورت واسنجی صحیح، مدل SWAT می‌تواند به طور مؤثر در مناطق نیمه‌خشک برای پشتیبانی از سیاست‌های مدیریت آب استفاده شود [۹].

جیسوال و همکاران (۲۰۲۰) به منظور مدل‌سازی تعادل آب و محاسبه رواناب حوضه آبریز مخزن Tandula هند، به دلیل عدم دسترسی به داده‌های رواناب، از مدل SWAT و برنامه SWAT-CUP استفاده کردند. تجزیه و تحلیل آنها نشان داد پارامتر تبخیر یکی از مؤلفه‌های اصلی در تعادل آب مخزن است، در ادامه توسط الگوریتم SUFI-2 مدل SWAT را واسنجی (۱۹۹۵-۲۰۰۷) و اعتبارسنجی (۲۰۰۸-۲۰۱۵) کردند که در نتیجه، ضرایب  $(r_{CN2})$  و  $(sol_k)$  حساس‌ترین ضرایب برای محاسبه رواناب به شمار آمد و نیز مقدار ضریب نش برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی (۰/۷۵ و ۰/۶۵) مطلوب تلقی شد [۱۰].

اگرچه تا کنون تحقیقات زیادی برای تخمین بار رسوب حوضه‌ها با استفاده از روش‌های تجربی انجام شده، اما در این تحقیق از مدل فیزیکی و نیمه‌توزیعی SWAT



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز رودخانه نهند در بالادست سد نهند

SWAT ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی، کیفیت آب، فرسایش خاک، مدیریت مرتع و اثرات تغییر اقلیم است. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، کوچک‌ترین واحد کاری در این مدل واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی یا HRU است، که از ترکیب نقشه‌های کاربری اراضی، خاک و طبقات شیب حاصل می‌شود.

#### الف) معادله بیلان آب در مدل SWAT

معادله بیلان آبی که مدل هیدرولوژیکی SWAT بر مبنای آن پایه‌ریزی شده، به صورت ذیل است [۱۱]:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

که در این معادله،  $SW_t$  مقدار نهایی رطوبت خاک (میلی‌متر آب)،  $SW_0$  مقدار اولیه رطوبت خاک (میلی‌متر آب)،  $t$  زمان (روز)،  $R_{day}$  مقدار بارش در روز  $i$  ام (میلی‌متر آب)،  $Q_{surf}$  مقدار رواناب در روز  $i$  ام (میلی‌متر آب)،  $E_a$  مقدار تبخیر و تعرق در روز  $i$  ام (میلی‌متر آب)،  $W_{seep}$  مقدار نشت که در روز  $i$  ام از نیم‌رخ خاک وارد منطقه غیر اشباع می‌شود (میلی‌متر آب)،  $Q_{gw}$  مقدار آب بازگشتی (دبی آب زیرزمینی یا جریان پایه) در روز  $i$  ام (میلی‌متر آب) است.

در مدل SWAT روندیابی جریان از دو روش ماسکینگ‌هم و ذخیره متغیر انجام می‌شود. شبکه جریان حوضه آبخیز طی مدل‌سازی توسط مدل ایجاد می‌شود. در

#### معرفی مدل SWAT

SWAT که مخفف عبارت Soil and Water Assessment Tool، مدلی در مقیاس حوضه آبریز است که توسط آرنولد و همکاران (۱۹۹۸) ارائه شده است [۱۱]. SWAT نوعی مدل نیمه‌توزیعی، جامع و کامل در مقیاس حوضه‌ای است که برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مدیریتی متفاوت بر جریان، رسوب، عناصر غذایی و بیلان مواد شیمیایی در حوضه‌هایی با خاک و کاربری اراضی متفاوت برای دوره‌های زمانی طولانی ارائه شده است. از نظر زمانی فرایندهای مختلف بیان‌شده قابلیت شبیه‌سازی در مقیاس‌های زمانی روزانه، ماهانه و سالانه را دارند.

مدل SWAT از طریق یک رابط گرافیکی به عنوان یک الحاقی به محیط GIS اضافه می‌شود و تمامی مراحل ورود داده‌ها و مدل‌سازی به کمک ابزارهای GIS و بخش الحاقی صورت می‌گیرد. در این مدل ابتدا برای معرفی حوضه محدوده مطالعاتی، لایه DEM مربوطه معرفی شده و سپس، مدل با تجزیه و تحلیل این لایه اطلاعاتی، مسیر جریان را در حوضه مشخص خواهد کرد و مرز حوضه و نیز زیرحوضه‌ها مشخص خواهد شد. پس از معرفی نقشه رستری شده کاربری اراضی، خاک و کلاسه‌بندی شیب حوضه، زیرحوضه‌ها به واحدهای کوچک‌تر HRU تقسیم می‌شوند. HRUها واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی هستند که خاک، پوشش گیاهی، شیب و مدیریت تقریباً یکسانی دارند.

### معیارهای ارزیابی مدل SWAT

معیارهای مختلفی برای مطابقت دادن داده‌های مشاهداتی و محاسباتی در مدل‌سازی پیشنهاد شده است. در این رساله از چهار معیار مختلف به شرح زیر استفاده خواهد شد.

معیار نش‌ساتکلیف (NSE): یک آماره نرمال شده است که بزرگی نسبی واریانس باقی‌مانده را در مقایسه با واریانس داده‌های مشاهداتی تعیین می‌کند [۱۴]. این معیار با نماد  $NSE$  نشان داده شده و از رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$NSE = 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{avg})^2} \right) \quad (3)$$

که در آن  $O_{avg}$  میانگین مقادیر مشاهداتی،  $S_i$  مقدار شبیه‌سازی شده توسط مدل،  $O_i$  مقدار داده مشاهداتی و  $n$  تعداد داده‌های مشاهداتی است. مطابق رابطه داده شده، دامنه تغییرات  $NSE$  از  $-\infty$  تا ۱ است که مقدار ۱ بهترین مقدار ممکن محسوب می‌شود.

درصد اریبی (PBIAS): نشان‌دهنده متوسط تمایل داده‌های شبیه‌سازی شده به بزرگ‌تر یا کوچک‌تر بودن از مقادیر مشاهده‌ای متناظر است. بهترین مقدار آن صفر بوده و مقادیر مثبت نشان‌دهنده تمایل مدل به کوچک‌تر بودن از داده‌های مشاهده‌ای و مقادیر منفی تمایل مدل به بزرگ‌تر بودن از داده‌های مشاهده‌ای است [۱۵]. این معیار از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i) * 100}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \quad (4)$$

نسبت باقیمانده میانگین مربعات خطا به انحراف از معیار داده‌های مشاهداتی (RSR): پارامتر  $RSR$  با استاندارد کردن مقادیر باقی‌مانده میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ ) با استفاده از انحراف از معیار مقادیر مشاهداتی به دست می‌آید.

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{abs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{avg})^2}} \quad (5)$$

حدود متناظر معیارهای ارزیابی مدل SWAT در جدول ۱ نشان داده شده است [۱۴].

این مدل با استفاده از دو روش شماره منحنی (CN) و رابطه نفوذ گرین آمپت می‌توان رواناب سطحی را شبیه‌سازی کرد.

### ب) مدل‌سازی فرسایش در مدل SWAT

در مدل SWAT برآورد فرسایش با استفاده از رابطه اصلاح شده معادله جهانی فرسایش<sup>۱</sup> (MUSLE) محاسبه می‌شود، که رابطه آن به قرار زیر است:

$$Sed = 11.8 (Q_{surf} \times q_{peak} \times Area_{HRU})^{0.56} K_{USLE} \times C_{USLE} \times P_{USLE} \times LS_{USLE} \times CFRG \quad (2)$$

$Q_{surf}$  ارتفاع رواناب سطحی به میلی‌متر،  $q_{peak}$  دبی اوج رواناب به مترمکعب در ثانیه،  $Area$  مساحت هر  $HRU$  به هکتار،  $K$  فرسایش‌پذیری خاک،  $C$  پوشش و مدیریت،  $LS$  توپوگرافی،  $P$  اقدامات حفاظتی و  $CFRG$  فاکتور قطعات درشت در خاک است.

### واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT

برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT بسته نرم‌افزاری SWATCUP برای تجمیع روش‌های مختلف برنامه‌های تجزیه و تحلیل، واسنجی کردن و محاسبه عدم قطعیت برای SWAT طراحی شده است. هم‌اکنون این برنامه می‌تواند الگوریتم‌های SUFI-2، ParaSol، PSO، GLUE و MCMC را اجرا کند. SWATCUP به کاربر اجازه می‌دهد تا با انتخاب یکی از این روش‌ها و تکرار آن به همگرایی مورد نظر برسد [۱۳].

### داده‌های مورد نیاز و واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT

به منظور انجام محاسبات هیدرولوژیکی در مدل SWAT طیف وسیعی از نقشه‌ها، اطلاعات و داده‌ها مورد نیاز است که در مرحله نخست باید تهیه و سپس، آماده‌سازی و بر اساس فرمت مدل تنظیم شد. تعدیل و اصلاح پارامترهای ورودی مدل به گونه‌ای که بهترین برازش بین داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهداتی حاصل شود را واسنجی گویند. در این پژوهش برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT از الگوریتم SUFI-2 در بسته نرم‌افزاری SWAT-CUP استفاده شده است.

جدول ۱. معیارهای ارزیابی مدل و حدود تشخیص آنها

ضرایب ارزیابی		NS	ارزیابی
RSR	PBIAS		
$0 < RSR \leq 0.5$	$PBIAS \leq \pm 10$	$0.75 < NS \leq 1$	خیلی خوب
$0.5 < RSR \leq 0.6$	$\pm 10 \leq PBIAS \leq \pm 15$	$0.65 < NS \leq 0.75$	خوب
$0.6 < RSR \leq 0.7$	$\pm 15 \leq PBIAS \leq \pm 25$	$0.5 < NS \leq 0.65$	قابل قبول
$RSR > 0.7$	$PBIAS \geq \pm 25$	$NS < 0.5$	عدم قبول

## نتایج و بحث

## الف) ساخت مدل SWAT حوضه بالادست سد نهند

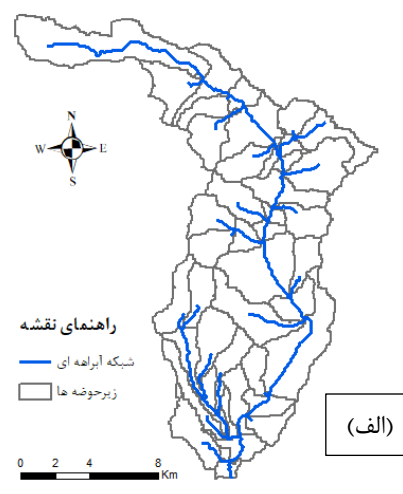
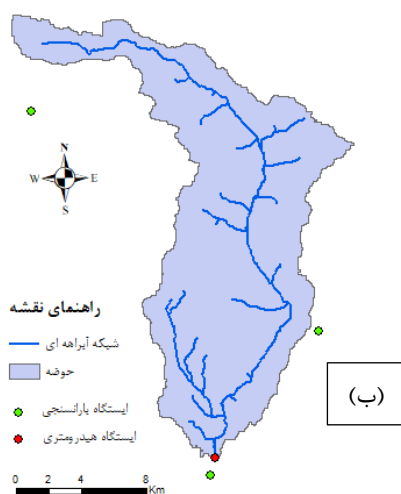
بعد از جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌های هواشناسی و نقشه‌های مورد نیاز، با توجه به مقادیر پیش‌فرض پارامترها، مدل SWAT منطقه مطالعه شده آماده شد. داده‌های استفاده شده در مدل SWAT و کالیبراسیون مدل در جدول ۲ آورده شده است. محل قرارگیری ایستگاه‌های هیدرومتری و ایستگاه‌های باران‌سنجی در شکل ۲ آورده شده است.

در این پژوهش، نسخه SWAT2012 که به صورت Extension قابل نصب روی ARCGIS2012 است، مورد استفاده قرار گرفت. نقشه‌های مربوط به DEM، کاربری اراضی، خاک منطقه و شیب حوضه مطالعه شده در شکل ۳ نشان داده شده است. برای شروع کار با مدل، ابتدا نقشه DEM که پیش‌تر تهیه شده است، به محیط نرم‌افزار فراخوانده می‌شود. در این مرحله، محدوده حوضه آبریز و زیرحوضه‌ها و خصوصیات فیزیکی آبریز به وسیله مدل محاسبه می‌شود. در مرحله بعد، با استفاده از نقشه‌های خاک،

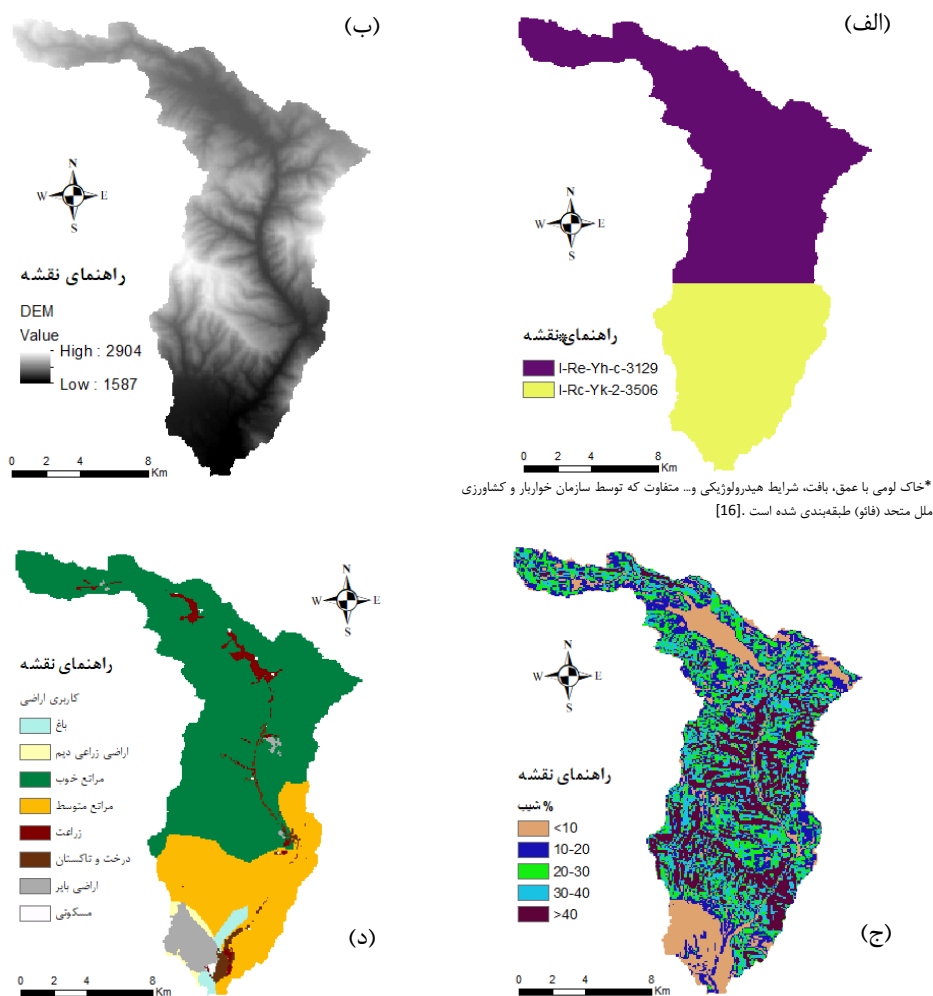
کاربری اراضی و طبقات شیب، نقشه همپوشانی این نقشه‌ها تهیه شد و واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی تعریف شدند که حاصل کار این مرحله، همان تشکیل HRU بوده است.

## ب) واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT با استفاده از الگوریتم SUFI-2

بیشتر پارامترهای مدل SWAT مفهوم فیزیکی روشنی دارند که با استفاده از DEM، نوع خاک و کاربری زمین قابل تخمین هستند. به هر حال، تعداد زیادی پارامترهای دیگر در مدل وجود دارند که نیاز به واسنجی (کالیبراسیون) دارند. واسنجی دستی بر پایه دانش و تجربه کاربر صورت می‌گیرد. در این روش به‌رغم وقت‌گیر بودن، رسیدن به جواب بهینه نیز بسیار مشکل است. در دهه‌های اخیر به منظور واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی، روش‌های زیادی توسعه یافته و در حوضه‌های متفاوتی استفاده شده است. در این پژوهش برای واسنجی مدل SWAT از نرم‌افزار SWATCUP و الگوریتم SUFI-2 استفاده شده است.



شکل ۲. الف) ساختن مرز حوضه و تقسیم‌بندی زیرحوضه‌ها در مدل SWAT (ب): محل قرارگیری ایستگاه‌های هیدرومتری و ایستگاه‌های باران‌سنجی



شکل ۳. الف: نقشه خاک؛ ب: نقشه DEM؛ ج: نقشه شیب حوضه؛ د: نقشه کاربری اراضی آبریز رودخانه نهند  
\* خاک لومی با عمق، بافت، شرایط هیدرولوژیکی و... متفاوت که توسط سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (فائو) طبقه‌بندی شده است. [16]

شکل ۳. الف: نقشه خاک؛ ب: نقشه DEM؛ ج: نقشه شیب حوضه؛ د: نقشه کاربری اراضی آبریز رودخانه نهند

جدول ۲. داده‌های استفاده‌شده در مدل SWAT و در واسنجی و صحت‌سنجی مدل

ردیف	داده	منابع	توضیحات	مورد کاربرد
۱	نقشه مدل رقمی ارتفاعی	SRTM	-	ورودی مدل SWAT
۲	نقشه کاربری اراضی	آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی	-	ورودی مدل SWAT
۳	نقشه خاک منطقه	نقشه‌های کلی خاک فائو	۱/۵۰۰۰۰۰	ورودی مدل SWAT
۴	داده‌های هواشناسی	سازمان هواشناسی	ایستگاه سینوپتیک تبریز	ورودی مدل SWAT
۵	داده‌های روزانه بارندگی	آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی	افشرد، نهند و کمانج	ورودی مدل SWAT
۶	داده‌های دما و درصد رطوبت	آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی	ایستگاه نهند (۲۰۰۴-۲۰۱۱)	ورودی مدل SWAT
۷	داده‌های دبی روزانه	آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی	ایستگاه نهند (۲۰۰۴-۲۰۱۱)	واسنجی مدل
۸	داده‌های رسوب	آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی	ایستگاه نهند (۲۰۰۴-۲۰۱۱)	واسنجی مدل

مشاهداتی قرار گرفت. بر این اساس، اجرای مدل بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۱ انجام شد. سال آماری ۲۰۰۴ به عنوان Warmup و از سال آبی (۲۰۰۵-۲۰۰۸) برای دوره واسنجی مدل و سال آبی (۲۰۰۹-۲۰۱۱) برای دوره

پس از آماده‌سازی نقشه‌ها و داده‌های مشاهداتی، باید دوره زمانی داده‌ها جهت ورود به مدل و اجرای آن تعیین شود. برای این منظور، داده‌هایی که بیشترین همپوشانی زمانی را با یکدیگر دارند، انتخاب و ملاک دوره زمانی



نتایج آنالیز حساسیت مدل نشان داد پارامترهای PLAPS.sub (میزان تغییرت دما با ارتفاع در هر زیرحوضه)، CN2.mgt (شماره منحنی SCS) و ALPHA\_BF.gw (ضریب تخلیه آب زیرزمینی) بیشترین تأثیر را در رواناب حوضه دارند (جدول ۳). به علاوه، پارامترهای USLE\_K().sol (عامل فرسایش‌پذیری خاک در USLE) و SPCON.bsn (ضریب انتقال رسوب) مؤثرترین پارامترها در تولید بار رسوب حوضه هستند (جدول ۴).

صحت‌سنجی انتخاب شد. باید توجه داشت که دلیل انتخاب داده‌ها در بازه یادشده برای شبیه‌سازی، ناقص بودن داده‌های سازمانی و رسمی بود که کار تخمین داده و ادامه کار را ناممکن می‌ساخت. بر اساس نقشه‌های رقومی ارتفاعی، نقشه‌های خاک و کاربری اراضی، کل حوضه مطالعاتی به تعداد ۴۳ زیرحوضه و ۱۹۰ واحد هیدرولوژیکی تقسیم شد. به منظور تعیین مؤثرترین پارامترهای مدل SWAT در تولید رواناب و بار رسوب حوضه، آنالیز حساسیت انجام شد.

جدول ۳. پارامترهای مؤثر بر تولید رواناب

توضیحات	دامنه پارامتر		پارامتر
	کمینه	بیشینه	
میزان تغییرت بارش با ارتفاع در هر زیرحوضه	-۵۰۰	۵۰۰	v__PLAPS.sub
شماره منحنی SCS	-۰/۲۵	۰/۰۶	r__CN2.mgt
ضریب تخلیه آب زیرزمینی	۰/۰۴	۰/۹۹	v__ALPHA_BF.gw
عمق کف لایه اول خاک	-۰/۵	۰/۵	r__SOL_Z().sol
دمای ذوب توده برف	-۵	۵	v__SMTMP.bsn
میزان تغییرت دما با ارتفاع در هر زیرحوضه	-۱۰	۱۰	v__TLAPS.sub
ظرفیت آب قابل دسترس خاک	-۰/۲۵	۰/۲۵	r__SOL_AWC().sol
زمان تأخیر انتقال آب از آخرین پروفیل لایه خاک به سطح آب زیرزمینی (روز)	۱	۵۰۰	v__GW_DELAY.gw

r و v کدهایی هستند که نوع تغییراتی را که برای پارامتر به کار برده می‌شوند، تعیین می‌کند. v به آن معناست که مقدار پارامتر با مقدار جدید جایگزین شود و برای r مقدار پارامتر در (مقدار جدید+۱) ضرب شود.

جدول ۴. پارامترهای مؤثر بر تولید رسوب

توضیحات	دامنه پارامتر		پارامتر
	کمینه	بیشینه	
عامل فرسایش‌پذیری خاک در USLE	-۰/۵	۰/۵	r__USLE_K().sol
ضریب رابطه انتقال رسوب	۰/۰۰۱	۰/۰۱	v__SPCON.bsn
تمرکز رسوب در جریان جانبی و زیرزمینی	۰	۵۰۰۰	v__LAT_SED.hru
نمای رابطه انتقال رسوب	۱	۲	v__SPEXP.bsn

r و v کدهایی هستند که نوع تغییراتی را که برای پارامتر به کار برده می‌شوند، تعیین می‌کند. v به آن معناست که مقدار پارامتر با مقدار جدید جایگزین شود و برای r مقدار پارامتر در (مقدار جدید+۱) ضرب شود.

شکل ۴ میزان و تغییرات زمانی دبی شبیه‌سازی را نشان می‌دهد از روند دبی مشاهداتی پیروی می‌کند. مقادیر ضریب نش‌ساتکلیف (۰/۷۵ و ۰/۸۴) طی دوره واسنجی و صحت‌سنجی دبی، توافق بهتری بین رواناب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. به بیان دیگر، مقادیر بیشتر ضریب نش‌ساتکلیف نشان می‌دهد مدل به‌خوبی الگو و میزان دبی را طی دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی شبیه‌سازی کرده است. در ضمن، مقدار کم PBIAS (۳/۸ و ۱۶/۸) نشان می‌دهد مدل میزان دبی را

ارزیابی نتایج مدل‌سازی هیدرولوژیکی SWAT برای انجام واسنجی لازم است نتایج شبیه‌سازی مدل با مقادیر مشاهده‌ای در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه سنجیده شود. از ضریب نش‌ساتکلیف به عنوان تابع هدف برای بهینه‌سازی استفاده شد. از معیارهای ضریب نش‌ساتکلیف، PBIAS و RSR برای ارزیابی کارایی مدل در مرحله‌های واسنجی و صحت‌سنجی استفاده شد. تجزیه و تحلیل آماری نتایج واسنجی و صحت‌سنجی، دبی و بار رسوب ماهانه در جدول ۵ ارائه شده است.

طی دوره واسنجی و صحت‌سنجی در سطح قابل قبول دقت، شبیه‌سازی کرده است.

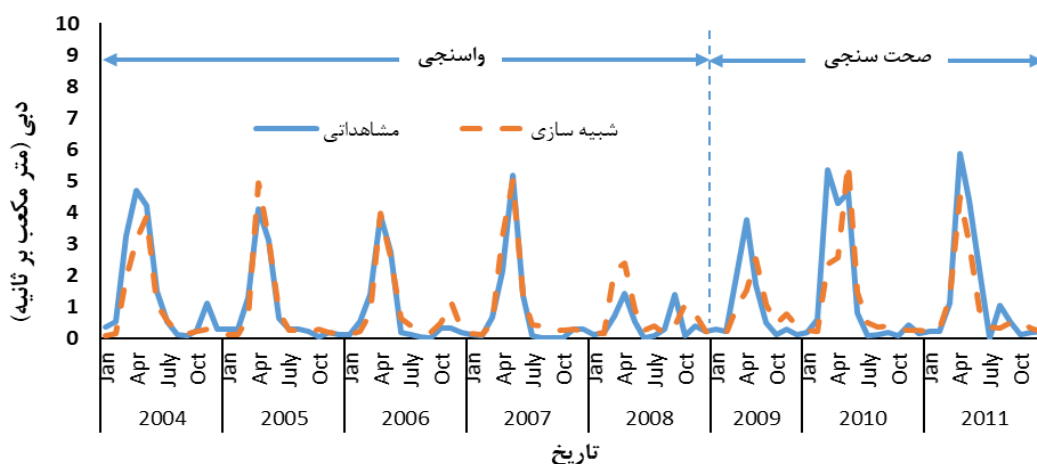
عملکرد رسوب رابطه مستقیمی با دبی دارد و از این‌رو مشاهده می‌شود که عملکرد رسوب نیز از روند شبیه‌سازی دبی پیروی می‌کند. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، رسوب شبیه‌سازی شده از روند رسوب مشاهداتی، پیروی می‌کند. مقایسه گرافیکی نشان می‌دهد مدل، روند بار رسوب را به‌خوبی شبیه‌سازی کرده است. مقادیر زیاد ضریب نش‌ساختکیف (۰/۶۵ و ۰/۸) و همچنین، مقادیر کم

PBIAS (۰/۵ و ۰/۶) طی دوره واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد این مدل عملکرد رسوب را به طور معقولی شبیه‌سازی کرده است.

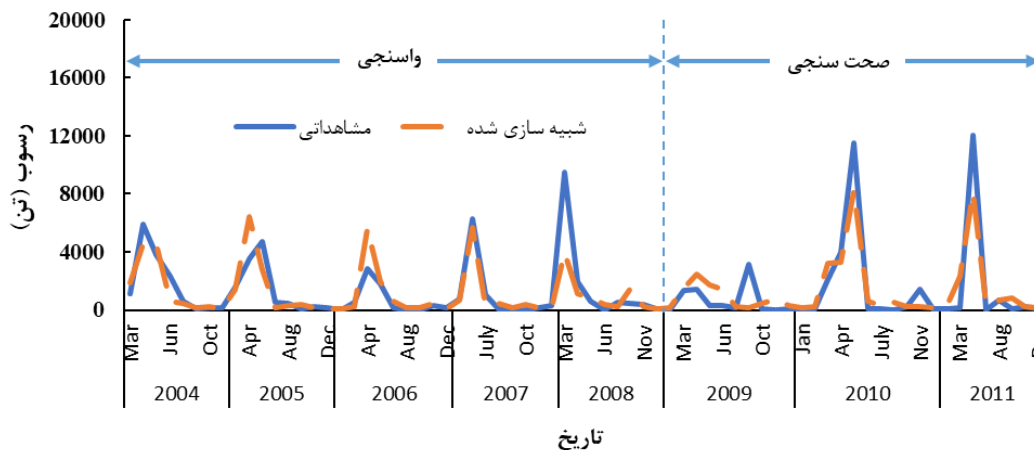
بر اساس مطالعه مروری انجام‌شده توسط موریاسی و همکاران [۱۴]، نتایج به‌خوبی در محدوده خوب دقت قرار دارد. مقایسه گرافیکی و آماری نتایج نیز نشان می‌دهد مدل کاملاً واسنجی شده و برای این حوضه آبریز معتبر است و می‌تواند برای مطالعه بیشتر در حوضه آبریز مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۵. نتایج واسنجی دبی و رسوب روزانه ایستگاه‌ها

صحت‌سنجی			واسنجی			دوره
RSR	PBIAS	NS	RSR	PBIAS	NS	معیار ارزیابی
۰/۵۶	۱۶/۸	۰/۷۵	۰/۳۲	۳/۸	۰/۸۴	دبی
۰/۴۴	۰/۵	۰/۸	۰/۵۹	۶/۶	۰/۶۵	رسوب



شکل ۴. مقادیر رواناب ماهانه شبیه‌سازی و مشاهداتی در محدوده واسنجی و صحت‌سنجی برای حوضه سد نهند



شکل ۵. مقادیر رسوب ماهانه شبیه‌سازی و مشاهداتی در محدوده واسنجی و صحت‌سنجی برای حوضه سد نهند

### تعیین مناطق بحرانی از نظر تولید رسوب

هدف اصلی این مطالعه، شناسایی مناطق بحرانی حوضه از نظر تولید رسوب است. نقاط بحرانی حوضه، مناطقی هستند که بیشترین بار رسوب را در حوضه ایجاد می‌کنند. از آنجا که هر قسمت از حوضه آبریز میزان یکسانی از رسوب به جریان آب وارد نمی‌کند، تنها برخی از قسمت‌های حوضه با توجه به خصوصیات خاک، شیب و کاربری، دارای عملکرد سطح بالای رسوبی هستند، شناسایی این مناطق خاص در حوضه آبریز به تصمیم‌گیری در مورد گزینه‌های مدیریتی خاص و به‌صرفه بیولوژیکی یا مهندسی، برای کاهش مشکل انتقال رسوب کمک می‌کند.

در این مطالعه، مناطق بحرانی حوضه آبریز سد نهند، در سطح زیرحوضه شناسایی می‌شوند. به منظور شناسایی زیرحوضه‌های بحرانی، عملکرد رسوب هر زیرحوضه، بر اساس بار رسوب در واحد سطح (تن در هکتار در سال) مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. بر این اساس، پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT در حوضه بالادست سد نهند، میزان متوسط رواناب خروجی سالانه و همچنین، میزان متوسط رسوب خروجی سالانه از هر یک از زیرحوضه‌ها مشخص شد. در ادامه، هر یک از زیرحوضه‌ها، بر حسب رواناب و رسوب خروجی سالانه طبقه‌بندی شدند.

انواع مختلفی از طبقه‌بندی وجود دارد، همه آنها به طور کلی شامل یک الگو هستند که دربرگیرنده مجموعه‌ای از ضوابط و معیارها است (که معمولاً به خواص عوارض بستگی دارد) که در خصوص اینکه هر عارضه در کدام طبقه یا کلاس قرار گیرد، تصمیم‌گیری می‌کند. در این مطالعه، برای کلاس‌بندی (طبقه‌بندی) میزان متوسط رواناب و رسوب خروجی زیرحوضه‌ها از الگوی Natural Breaks (Jenks) استفاده شد [۱۷]. در این روش که به روش گروه‌بندی (شکست) طبیعی معروف است پس از تعیین تعداد طبقات، نرم‌افزار GIS با یک الگوریتم محاسباتی، سعی در به حداقل رساندن اختلاف بین داده‌ها در هر طبقه و به حداکثر رساندن اختلاف بین طبقات می‌کند. بر این اساس، زیرحوضه‌ها از نظر تولید رواناب به سه گروه کم، متوسط و زیاد تقسیم شدند. نتایج طبقه‌بندی رسوب خروجی سالانه در شکل ۶ نشان داده شده است.

کلاس طبقه‌بندی زیاد رسوب: زیرحوضه‌های ۱، ۱۶، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۴، ۲۷ و ۲۸ در کلاس با تولید رسوب بیشتر قرار می‌گیرند. مساحت زیرحوضه‌های واقع در این کلاس ۵۱/۷۱ کیلومتر مربع و حدود ۲۵ درصد از مساحت حوضه مطالعه شده است. میزان رسوب تولیدشده در این کلاس حدود ۴۲ درصد از رسوب تولیدی کل حوضه است. زیرحوضه‌های واقع در کلاس با تولید رسوب بیشتر، مناطق بحرانی حوضه هستند. از آنجا که سهم رسوب تولیدشده در این زیرحوضه‌ها بیشتر است، این مناطق در اولویت نخست برای انجام راهکارهای مدیریتی و کنترل رسوب قرار دارند.

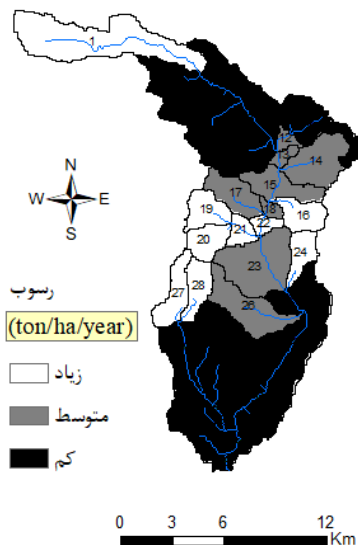
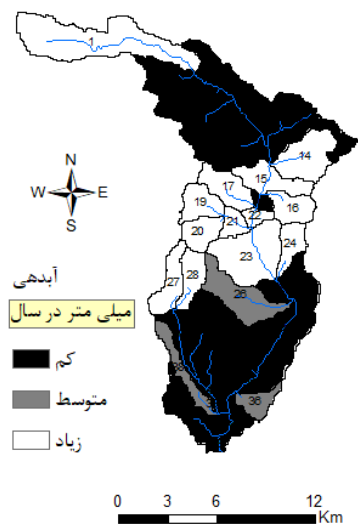
کلاس طبقه‌بندی متوسط رسوب: میزان متوسط رسوب خروجی سالانه از زیرحوضه‌های ۱۲-۱۵، ۱۷، ۱۸، ۲۳ و ۲۶ در کلاس با تولید رسوب متوسط قرار می‌گیرند. مجموع مساحت زیرحوضه‌های واقع در این کلاس ۴۵/۱۳ کیلومتر مربع و ۲۲ درصد از مساحت حوضه را تشکیل می‌دهند. میزان رسوب تولیدشده در این کلاس حدود ۲۵ درصد از رسوب تولیدی کل حوضه است.

کلاس طبقه‌بندی کم رسوب: بقیه زیرحوضه‌ها که در کلاس طبقه‌بندی رسوب زیاد و متوسط قرار ندارند متعلق به کلاس طبقه‌بندی کم رسوب هستند. این زیرحوضه‌ها حدود ۵۳ درصد از مساحت حوضه را تشکیل می‌دهند. ۳۳ درصد از رسوب حوضه متعلق به این زیرحوضه‌ها است.

همان‌طور که اشاره شد، در مرحله اول، فرسایش مربوط به هر یک از زیرحوضه‌ها مشخص شد و طبقه‌بندی زیرحوضه‌ها بر اساس میزان متوسط رسوب سالانه انجام گرفت. در ادامه، برای تعیین عوامل مؤثر بر میزان رسوب زیرحوضه‌ها، شیب متوسط زیرحوضه‌ها و میزان متوسط رواناب سالانه زیرحوضه‌ها، با استفاده از روش گروه‌بندی طبیعی در محیط نرم‌افزار ArcGIS انجام شد. شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب طبقه‌بندی رواناب متوسط سالانه و شیب متوسط زیرحوضه‌ها را نشان می‌دهد. بررسی طبقه‌بندی رواناب متوسط سالانه و شیب متوسط زیرحوضه‌ها، نشان می‌دهد در زیرحوضه‌هایی که در کلاس طبقه‌بندی زیاد رسوب قرار دارند، میزان رواناب و شیب زیرحوضه‌ها بیشتر است. به بیان دیگر، میزان رسوب تولیدی در زیرحوضه‌ها رابطه مستقیم با میزان رواناب و شیب حوضه دارد و زیرحوضه‌هایی که دارای رواناب و شیب متوسط بالایی هستند، میزان رسوب تولیدی، بیشتر است.

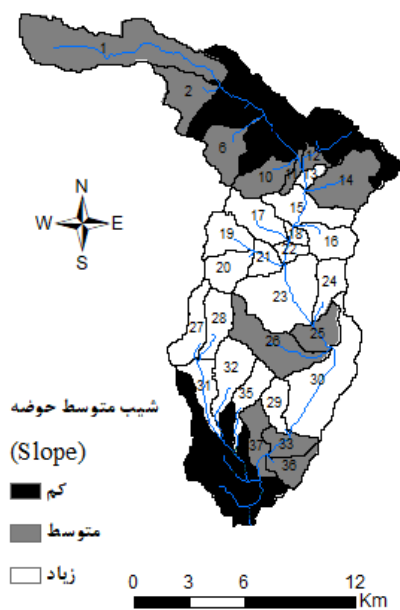
شناسایی شد. در ادامه، می‌توان با اجرای راهکارهای مدیریتی در زیرحوضه‌های بحرانی با هزینه کمتری اقدام به کاهش رسوب حوضه کرد. در نتیجه، میزان رسوب ورودی به مخزن سد نهند کاهش می‌یابد و عمر مفید مخزن افزایش خواهد یافت و مخزن سد کارایی خود را در تأمین اهداف تعریف‌شده، خواهد داشت.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده ۵۱/۷۱ کیلومتر مربع از مساحت حوضه بالادست سد نهند که در کلاس با تولید رسوب بیشتر طبقه‌بندی شده‌اند، جزء مناطق بحرانی از نظر فرسایش و رسوب هستند و در اولویت نخست برای انجام عملیات کنترل فرسایش قرار دارند. با استفاده از روش پیشنهادی در این مطالعه، مناطق بحرانی فرسایش و رسوب که تأثیر زیادی در تولید رسوب حوضه دارند،



شکل ۷. نقشه میزان رواناب هر یک از زیرحوضه‌های حوضه آبریز سد

شکل ۶. نقشه خطر فرسایش حوضه آبریز سد



شکل ۸. نقشه شیب متوسط زیرحوضه‌های حوضه آبریز سد

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از مدل SWAT و داده‌های در دسترس، به مدل‌سازی و بررسی وضعیت فرسایش و رسوب ماهانه در حوضه بالادست سد نهند پرداخته شد. پس از آماده کردن اطلاعات مورد نیاز، مدل SWAT حوضه بالادست سد نهند ساخته شد. پس از آن، واسنجی و صحت‌سنجی دبی و رسوب ماهانه حوضه انجام شد. نتایج ارزیابی مدل، بیانگر کارایی خوب آن برای شبیه‌سازی رواناب و فرسایش و رسوب در این حوضه است. پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT در حوضه بالادست سد نهند، میزان متوسط رواناب خروجی سالانه و همچنین، میزان متوسط رسوب خروجی سالانه از هر یک از زیرحوضه‌ها مشخص شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، با استفاده از روش شکست طبیعی، زیرحوضه‌ها از نظر تولید رواناب و رسوب سالانه و همچنین، شیب متوسط به سه گروه کم، متوسط و زیاد تقسیم شدند. بررسی نتایج نشان داد زیرحوضه‌هایی که رسوب خروجی بیشتری دارند، دارای رواناب و شیب متوسط بالایی هستند. به بیان دیگر، رابطه مستقیم بین افزایش تولید رسوب با افزایش شیب حوضه و رواناب حوضه وجود دارد. بر این اساس، حدود ۲۵ درصد (۵۱/۷۱ کیلومتر مربع) از مساحت حوضه بالادست سد نهند در کلاس با تولید رسوب بیشتر طبقه‌بندی شده‌اند و جزء مناطق بحرانی از نظر فرسایش و رسوب هستند. این مناطق در اولویت نخست برای انجام عملیات کنترل فرسایش قرار دارند. از آنجا که فرسایش باعث از بین رفتن و کاهش حاصلخیزی خاک می‌شود و از طرفی، رسوب تولیدشده در مخزن سد رسوب‌گذاری می‌کند و عمر مفید مخزن را کاهش خواهد داد. بنابراین، انجام عملیات کنترل فرسایش در این زیرحوضه‌ها ضروری است. پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی روش‌های مختلف راهکارهای مدیریتی برای کاهش رسوب حوضه بررسی و با هم مقایسه شوند تا بهترین راهکار مدیریتی انتخاب شود.

## منابع

- [3]. Refahi H G. Water erosion and its control. Tehran: Tehran University Press; 2006 [Persian].
- [4]. Nourani S N. Evaluation of four methods for selecting the best SDR method, (Case study: Taleghan watershed). M.Sc. Thesis, Azad University, Science and Research Branch 2005 [Persian].
- [5]. Atfi G. Simulation of Ahar Chay Water and Sediment Balance Using SWAT and ArcGIS Model. M.Sc. Thesis, University of Mohagheh Ardabili, Faculty of Agricultural Technology and Natural Resources, Department of Range land and Watershed Management 2015 [Persian].
- [6]. Amirsardar A. Estimation of soil erosion and sediment yield by using GIS and remote sensing in a SWAT model framework. M.Sc. Thesis, University of Ayatollah Aozma Boroujerdi, Faculty of Engineering, Department of Civil engineer 2017 [Persian].
- [7]. Bagheri M. The study of Basin runoff and sediment using the SWAT model, case study of Mulla Sadra dam. M.Sc. Thesis, Islamic Azad University Marvdasht Branch 2017 [Persian].
- [8]. Gyamfi C, Ndambuki JM, Salim RW. Application of SWAT model to the Olifants Basin: calibration, validation and uncertainty analysis. Journal of Water Resource and Protection. 2016; 8(03): 397-410.
- [9]. Ghoraba S M. Hydrological modeling of the Simly Dam watershed (Pakistan) using GIS and SWAT model. Alexandria Engineering Journal. 2015; 54(3): 583-594.
- [10]. Jaiswal RK, Yadav RN, Lohani AK, Tiwari HL, Yadav S. Water balance modeling of Tandula (India) reservoir catchment using SWAT. Arabian Journal of Geosciences. 2020; 13(4): 1-13.
- [11]. Arnold JG, Srinivasan R, Muttiah RS, Williams JR. Large area hydrologic modeling and assessment – Part1: Model development. Journal of the American Water Resources Association. 1998; 34(1): 73–89.
- [12]. Zhang Y, You Q, Chen C, Ge J. Impacts of climate change on streamflows under RCP scenarios: A case study in Xin River Basin, China. Atmospheric Research. 2016; 178: 521-34.
- [13]. Aalami M. T, Abbasi H, Niksokhan M. H. Comparison of two Calibration-Uncertainty Methods for Soil and Water Assessment Tool in Stream Flow and Total Suspended Solids Modeling. WATER AND SOIL SCIENCE (AGRICULTURAL SCIENCE). 2018; 28(3): 53-64 [Persian].
- [1]. Shirzadi h. Landslide potential on the new Sanandaj-Marivan road. M.Sc. Thesis, Tehran University 1388 [Persian].
- [2]. Feiznia S. Applied sedimentology with emphasis on soil erosion and sediment production. Gorgan. University of agricultural sciences and natural resources press; 2008 [Persian].

- [14]. Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, Bingner R L, Harmel R D, Veith T L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE. 2007; 50: 885–900.
- [15]. Gupta H V, Sorooshian S, Yapo P O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. J. Hydrologic Engineering. 1999; 4(2): 135–143.
- [16]. <http://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-classification/fao-legend/en/>
- [17]. Jenks G F. The data model concept in statistical mapping. International yearbook of cartography. 1967; 7(1): 186-190.