

شناسایی و اولویت‌بندی مناطق بحرانی حوزه آبخیز از نظر فرسایش و رسوب با مدل SWAT

آرش زارع گاریزی^{۱*}، علی طالبی^۲ و منیره فرامرزی^۲

^۱ دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، ^۲ دانشیار، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد و ^۳ استادیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۱۶

چکیده

در این پژوهش از مدل SWAT برای شبیه‌سازی فرسایش و انتقال رسوب در حوضه قره‌سو استان گلستان و شناسایی اولویت‌بندی مناطق بحرانی حوضه از نظر فرسایش و رسوب استفاده شد. پس از واسنجی، اعتبارسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل با روش نیمه‌خودکار SUFI2، از خروجی‌های مدل واسنجی شده، برای بررسی تغییرات مکانی فرسایش و رسوب در سطح حوضه استفاده شد. برای این کار، چهار شاخص شامل رسوبدهی در واحد سطح، غلظت رسوب، بار رسوب و شاخص کلی بر اساس خروجی‌های مدل تعریف و تحلیل شد. نتایج نشان داد که علی‌رغم کمبود و عدم قطعیت داده‌های موجود، کارایی مدل SWAT برای شبیه‌سازی فرسایش و رسوب در حوضه قره‌سو نسبتاً قابل قبول است. دقت شبیه‌سازی رسوب ماهانه با استفاده از شاخص نش-ساتکلیف در دوره واسنجی ۰/۲۴ و با شاخص PBIAS، ۱۷- درصد و در دوره اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۲ و ۱۲/۱- درصد به دست آمد که بیانگر ضعف نسبی مدل در شبیه‌سازی نوسانات رسوب و توانایی خوب آن در پیش‌بینی کلی متوسط رسوب می‌باشد. بررسی توزیع مکانی شاخص‌های فرسایش و رسوب نشان داد که به‌طور کلی، زیرحوضه‌های بحرانی از نظر شاخص رسوبدهی در واحد سطح، در مناطق بالادست حوضه واقعند در حالی که زیرحوضه‌های حساس از نظر غلظت رسوب در مناطق میانی حوضه و زیرحوضه‌های حساس از نظر بار رسوب عمدتاً در پایین‌دست قرار دارند. در ادامه، اقدامات حفاظتی مناسب برای اجرا در هر یک از مناطق پیشنهاد شد. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان یک راهنمای اولیه و نقطه شروع برای برنامه‌ریزی اقدامات مدیریتی در منطقه به کارشناسان و مدیران کمک کند.

واژه‌های کلیدی: آبخیز قره‌سو، حفاظت آب و خاک، زیرحوضه‌های بحرانی، شبیه‌سازی

مقدمه

Lal، ۱۹۹۸؛ Collins و Walling، ۲۰۰۰). اثرات فرسایش خاک را می‌توان به دو دسته اثرات محلی^۱ و اثرات غیرمحلی^۲ تقسیم کرد. مهمترین اثر محلی

فرسایش خاک به‌علت اثرات نامطلوب زیست محیطی و اقتصادی، یک معضل جهانی محسوب شده و تهدیدی جدی برای استفاده پایدار از اراضی و کیفیت منابع آب به شمار می‌رود (Pimentel، ۱۹۹۳؛

^۱ On-site effects

^۲ Off-site effects

حفاظتی در این مناطق می‌باشد. برای این کار روش‌های مختلفی وجود دارد، ولی روشی مناسب‌تر است که اولاً سریع، اقتصادی و نسبتاً دقیق باشد و ثانیاً بتواند عامل‌ها و فرایندهای اصلی موثر بر فرسایش و انتقال رسوب و برهم‌کنش آن‌ها در سطح حوزه آبخیز را در نظر بگیرد. از این‌رو، استفاده از مدل‌های فرایند محور^۱ و توزیعی مکانی^۲ برای شبیه‌سازی فرایندهای حوزه آبخیز، رویکردی بهینه در زمینه برآورد فرسایش و رسوب و شناسایی مناطق مستعد فرسایش محسوب می‌شود.

مدل ارزیابی آب و خاک (SWAT)^۳ یک مدل جامع در مقیاس آبخیز می‌باشد که توسط سرویس تحقیقات کشاورزی ایالات متحده تهیه شده است. این مدل برای شبیه‌سازی حرکت آب، رسوب و آلاینده‌های شیمیایی-کشاورزی در سطح حوزه‌های آبخیز پیچیده و بزرگ با خاک، کاربری اراضی و شرایط مدیریتی متفاوت برای دوره‌های زمانی طولانی طراحی شده است (Neitsch و همکاران، ۲۰۱۱). این مدل که قابلیت اجرا در محیط GIS را دارد، فرایندهای هیدرولوژیکی، فرسایش خاک، کیفیت آب، مدیریت مرتع و اثرات تغییر اقلیم را شبیه‌سازی می‌کند و یک ابزار توانمند در مطالعات و برنامه‌ریزی‌های زیست‌محیطی محسوب می‌شود. قابلیت‌های این مدل به‌طور پیوسته در حال توسعه است.

با توجه به قابلیت‌های گسترده مدل SWAT در زمینه مطالعات آب و خاک، تاکنون تحقیقات زیادی با استفاده از این مدل در سراسر جهان صورت گرفته است. در ادامه، برخی از تحقیقاتی که به بررسی مکانی فرسایش و رسوب به کمک این مدل پرداختند، اشاره می‌شود. Tripathi و همکاران (۲۰۰۳)، در تحقیقی به شناسایی و اولویت‌بندی زیرحوضه‌های بحرانی از لحاظ تولید رسوب و هدر رفت عناصر غذایی در آبخیزی در شرق هندوستان پرداختند و توانایی مدل SWAT را برای این کار، خوب ارزیابی کردند. Ndomba و همکاران (۲۰۰۸)، به مدل‌سازی فرسایش و رسوب با کمک مدل SWAT در تانزانیا پرداختند و رسوب

فرسایش، کاهش تولیدات کشاورزی است. تلفات خاک از اراضی کشاورزی، تخریب ساختمان خاک و کاهش مواد آلی و عناصر غذایی، سبب کاهش عمق خاک قابل کشت و حاصلخیزی خاک می‌شوند. فرسایش، رطوبت قابل دسترس خاک را نیز کاهش داده و شرایط خشک‌تری را حاکم می‌سازد. اثرات غیرمحملی فرسایش ناشی از تولید رسوب بوده و عمدتاً به مسائل کیفیت آب و توسعه منابع آب مربوط می‌شود. مهمترین این اثرات شامل رسوبگذاری و کاهش ظرفیت حمل رودخانه‌ها و آبراهه‌ها، کاهش عمر مفید سدها، محدود شدن فعالیت‌های کشتیرانی و تفریحی و تخریب کیفیت زیستگاه‌ها می‌باشند. در سال‌های اخیر، نگرانی‌ها در مورد ورود آلودگی‌های غیرنقطه‌ای به زیست‌بوم‌های آبی به‌علت انتقال عناصر غذایی و آلوده‌کننده همراه با رسوبات، در حال افزایش است (Morgan, ۲۰۰۵).

به‌طور کلی، مشکلات فرسایش خاک در کشورهای در حال توسعه به‌علت میزان بالای رشد جمعیت، فشار بر اراضی حساس به فرسایش و محدود بودن منابع آب موجود حادث‌تر است (Collins و Walling, ۲۰۰۰). میزان فرسایش در مناطق نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای بیشتر از مناطق دیگر است (Morgan, ۲۰۰۵). بخش زیادی از ایران نیز جزء مناطق نیمه‌خشک محسوب می‌شود و میزان فرسایش و تولید رسوب زیادی دارد. بر اساس آمار منتشره از سوی فائو، میزان فرسایش خاک در کشور ما بین ۱۵ تا ۲۰ تن در هکتار در سال برآورد شده است، در حالی که میزان متوسط فرسایش خاک در آمریکا و اروپا کمتر از یک تن در هکتار در سال می‌باشد. بر اساس تحقیقات جدیدتری که توسط عرب‌خدری و همکاران صورت گرفته است، متوسط فرسایش خاک در ایران شش تن بر هکتار در سال برآورد شده است که این رقم نیز با توجه به نرخ خاک‌سازی در کشور بسیار بالا است (Arabkhedri, ۲۰۱۴).

مهار فرسایش خاک و کاهش رسوب در حوزه‌های آبخیز نیازمند اجرای عملیات حفاظت آب و خاک در چهارچوب پروژه‌های آبخیزداری می‌باشد. اجرای بهینه این عملیات مستلزم شناسایی مناطق بحرانی حوزه آبخیز از نظر فرسایش و رسوب و تمرکز عملیات

¹ Process-based

² Spatially distributed

³ Soil and Water Assessment Tool

قره‌سو و تعیین مناطق بحرانی حوضه از نظر فرسایش و رسوب می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: حوزه آبخیز قره‌سو یکی از حوضه‌های استان گلستان است که با مساحت حدود ۱۶۱۵۰۰ هکتار حدود هشت درصد آن را در بر می‌گیرد. حداکثر ارتفاع حوضه حدود ۳۳۰۰ متر در ارتفاعات البرز و حداقل آن ۲۸- متر در خروجی حوضه (خلیج گرگان) می‌باشد (شکل ۱). تغییرات توپوگرافی در حوضه قره‌سو زیاد است و شکل‌های مختلف ناهمواری شامل کوهستان، تپه ماهور، دشت‌های دامن‌های و مناطق پست در آن به چشم می‌خورد (شکل ۲). به‌طور کلی، در منطقه پنج نوع کاربری اراضی اصلی شامل جنگل، مرتع، کشاورزی آبی و دیم، و مناطق مسکونی وجود دارد. بیشترین مساحت حوضه به کاربری کشاورزی و کمترین آن به کاربری مسکونی اختصاص دارد. اراضی تحت زراعت آبی و دیم اغلب در قسمت‌های دشتی حوضه پراکنده‌اند. مناطق جنگلی بیشتر در قسمت‌های میانی حوضه و دامن‌های رشته کوه البرز واقع هستند. کاربری مرتع در مناطق کوهستانی جنوب حوضه متمرکز است (شکل ۲). میانگین بارش سالانه حوضه قره‌سو حدود ۶۵۰ میلی‌متر می‌باشد که ماه‌های آبان تا اسفند از بیشترین و ماه‌های خرداد، تیر و مرداد از کمترین بارندگی برخوردار هستند. جریان رودخانه قره‌سو از مهر ماه روند افزایشی به خود می‌گیرد و در فروردین به بیشترین مقدار خود می‌رسد، سپس آبدهی رودخانه کم می‌شود و در مرداد ماه به کمترین مقدار خود می‌رسد.

شبیه‌سازی فرسایش و انتقال رسوب در مدل SWAT: در مدل SWAT، شبیه‌سازی فرسایش در پایه زمانی روزانه با استفاده از معادله جهانی فرسایش خاک اصلاح شده MUSLE (رابطه ۱) به‌طور جداگانه برای هر واحد واکنش هیدرولوژیک (HRU)^۱ انجام می‌شود (Neitsch و همکاران، ۲۰۱۱). HRU کوچک‌ترین واحد کاری در مدل SWAT است که از

طولانی مدت حوضه را با خطای نسبی ۲/۶ درصد شبیه‌سازی کردند. مدل منابع فرسایش را از نظر مکانی مطابق مطالعات دیگر و بررسی های صحرایی پیش‌بینی نمود. Busted و همکاران (۲۰۰۹)، از مدل SWAT برای تعیین مناطق بحرانی حوضه دریاچه ویستر (در ایالت اوکلاهما آمریکا) از نظر تولید رسوب و سفر استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که حدود ۸۵ درصد آلاینده‌های حوضه از تنها ۱۰ درصد مساحت آن نشأت می‌گیرد. Tibebe و Bewket (۲۰۱۱)، با استفاده از مدل SWAT تولید رواناب سطحی و نرخ فرسایش خاک حوضه کوچک کلتا را در اتیوپی شبیه‌سازی نمودند.

به‌طور کلی، تولید رواناب سطحی و فرسایش خاک در مناطق دارای خاک‌های سنگین با رس زیاد و با ظرفیت نفوذپذیری پایین، کاربری کشاورزی و شیب بیش از ۲۵ درصد، زیادتر از سایر مناطق پیش‌بینی شد. Mukundan و همکاران (۲۰۱۳)، برای مکان‌یابی مناطق تولید رسوب و پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر فرسایش خاک و تولید رسوب در آبخیزی در ایالت نیویورک از مدل SWAT استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که در آینده افزایش شدیدی در میزان فرسایش سالانه خاک رخ خواهد داد، ولی تغییرات رسوبدهی در خروجی حوضه به آن شدت نخواهد بود. Pongpetch و همکاران (۲۰۱۵) مدل SWAT را با موفقیت برای ارزیابی مناطق بحرانی آلودگی‌های غیرنقطه‌ای در آبخیزی در شمال شرقی تایلند به‌کار بردند. در ایران نیز تحقیقاتی در زمینه شبیه‌سازی فرسایش و رسوب با مدل SWAT انجام شده است که از بین آن‌ها می‌توان به مطالعات Gholami (۲۰۰۳)، در حوزه آبخیز امامه، Rostamian و همکاران (۲۰۰۸)، در حوزه‌های آبخیز بهشت‌آباد و ونک، Hosseini (۲۰۱۰)، در حوزه آبخیز طالقان و Arefi-asl و همکاران (۲۰۱۳)، در حوزه آبخیز چهل‌چای استان گلستان اشاره نمود. در تحقیقات فوق بیشتر به واسنجی و ارزیابی کارایی مدل SWAT پرداخته شده و تحلیل مکانی خروجی‌های مدل کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

هدف از تحقیق حاضر به‌کارگیری مدل SWAT برای شبیه‌سازی فرسایش و انتقال رسوب در حوضه

¹ - Hydrologic Response Unit

روی هم‌گذاری نقشه‌های کاربری اراضی، خاک و طبقات شیب حاصل می‌شود.

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

که در آن، Sed تولید رسوب (تن)، Q_{surf} ارتفاع رواناب سطحی (میلی‌متر)، q_{peak} حداکثر میزان رواناب (متر مکعب بر ثانیه)، $area_{HRU}$ مساحت واحد واکنش هیدرولوژیک (هکتار)، K عامل فرسایش‌پذیری خاک، C عامل پوشش و مدیریت اراضی، P عامل اقدامات حفاظتی، LS عامل توپوگرافی و $CFRG$ عامل مربوط به قطعات درشت خاک می‌باشد.

عامل $CFRG$ با توجه به میزان سنگ‌ریزه‌های خاک با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

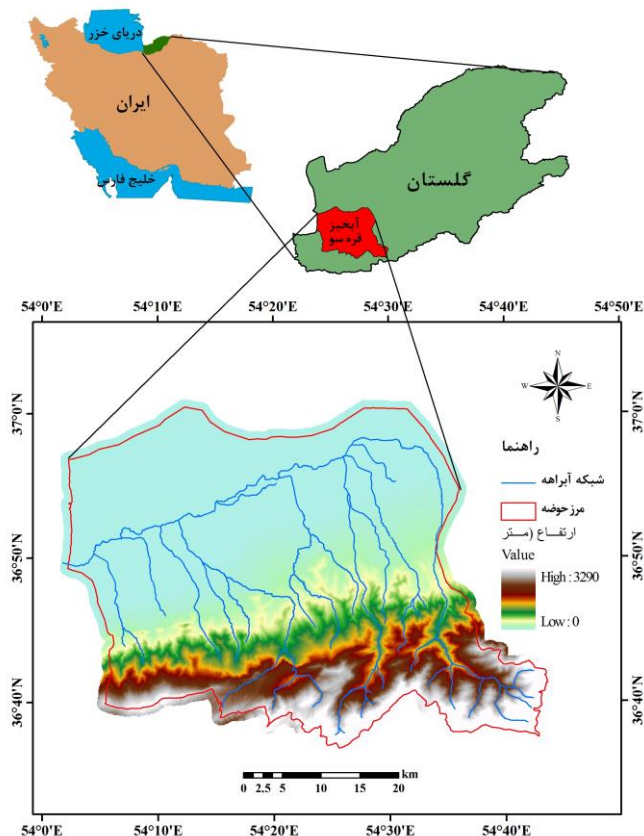
$$CFRG = \exp(-0.053 \times rock) \quad (2)$$

که در آن، $rock$ درصد سنگ‌ریزه در لایه اول

خاک می‌باشد.

حجم رواناب سطحی برای هر واحد پاسخ هیدرولوژیک با استفاده از روش شماره منحنی (CN) و مقادیر روزانه یا زیر روزانه داده دما و بارش محاسبه می‌شود. حداکثر نرخ رواناب (که معرف قدرت فرسایشی یک رگبار است) با روش استدلالی اصلاح شده پیش‌بینی می‌شود.

در معادله MUSLE، به جای عامل بارندگی، عامل رواناب سطحی جایگزین شده است. یعنی رواناب سطحی به‌عنوان عامل اصلی فرسایش در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه در مدل SWAT این امکان فراهم شده که فرسایش ناشی از رواناب ذوب برف نیز پیش‌بینی شود. تاخیر انتقال رسوب در سطح، رسوب در جریان جانبی و آب زیرزمینی نیز در محاسبات لحاظ می‌شود.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و مدل رقومی ارتفاع (DEM) حوزه آبخیز قره‌سو

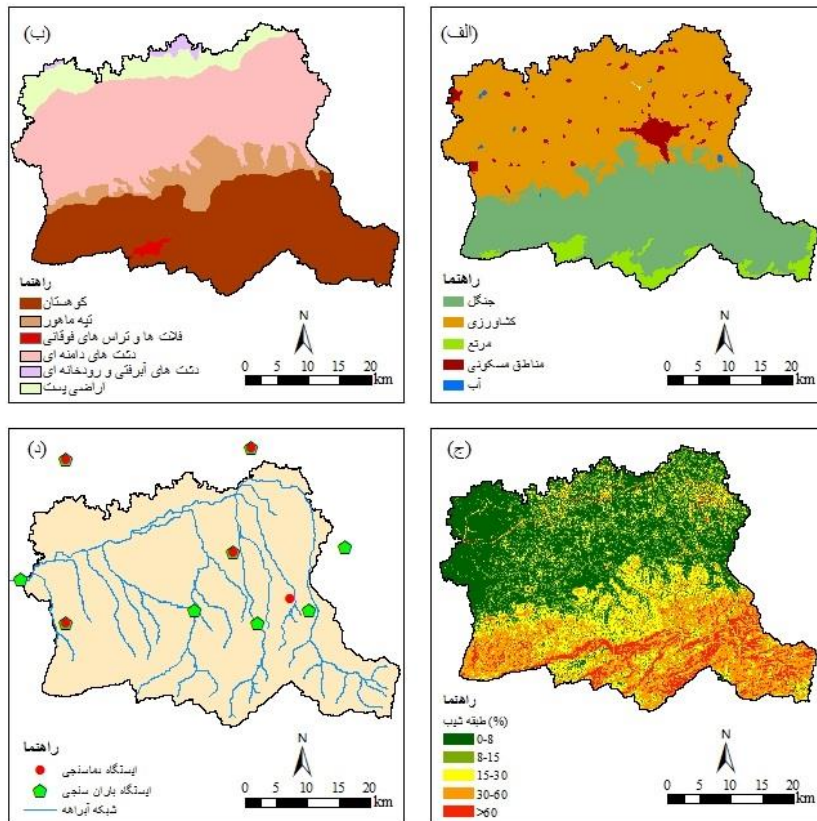
حداکثر مقدار رسوب قابل حمل در یک بازه کانال که خود تابعی از نیروی جریان است، صورت می‌گیرد. در مدل SWAT برای محاسبه نیروی جریان چهار معادله

انتقال رسوب در کانال تابعی از دو فرایند تنشینی و تخریب کانال می‌باشد که به‌طور هم‌زمان عمل می‌کنند. تعیین تخریب یا تنشست با محاسبه

مقدار تخریب و ته‌نشست محاسبه شد، مقدار نهایی رسوب در بازه کانال، از مجموع مقدار رسوب در آغاز دوره زمانی و رسوب ایجاد شده در طول کانال منهای رسوب ته‌نشست شده در بازه کانال حاصل می‌شود. برای جزئیات بیشتر در مورد روش‌ها و معادلات شبیه‌سازی فرایندهای مختلف حوزه آبخیز در مدل SWAT به کتابچه راهنمای مدل (Neitsch و همکاران، ۲۰۱۱) مراجعه شود.

مختلف وجود دارد. در این تحقیق از معادله Kodoatie (۱۹۹۹) به دلیل فیزیکی پایه بودن و همچنین سهولت برآورد (در دسترس بودن اطلاعات لازم برای برآورد) پارامترهای معادله استفاده شد.

اگر در یک بازه و در اولین گام زمانی، غلظت رسوب بیشتر از حداکثر غلظت رسوب قابل حمل باشد، ته‌نشست رسوب رخ می‌دهد و اگر کمتر از آن باشد، تخریب فرایند غالب خواهد بود. هنگامی که



شکل ۲- نقشه الف) کاربری اراضی، ب) اشکال ناهمواری، ج) طبقات شیب و د) موقعیت ایستگاه‌های دماسنجی و باران‌سنجی

دمای روزانه مربوط به نه ایستگاه باران‌سنجی و پنج ایستگاه دماسنجی (شکل ۲) بود. علاوه بر این باید آمار طولانی مدت حداقل یک ایستگاه مرجع هواشناسی در اختیار باشد تا برخی آماره‌های مورد نیاز مدل از آن استخراج شود. در این پروژه از آمار روزانه ایستگاه سینوپتیک گرگان استفاده شد. با بررسی آمار تهیه شده، یک دوره مشترک آماری برای داده‌ها در نظر گرفته شد. سعی شد، این دوره به گونه‌ای انتخاب شود که حداقل نیاز به بازسازی و ترمیم داده‌ها را داشته باشد تا خطاهای احتمالی ناشی از بازسازی

مراحل انجام شبیه‌سازی حوضه قره‌سو با استفاده از مدل SWAT: برای شروع کار با مدل SWAT، ابتدا مدل رقومی ارتفاع و نقشه شبکه آبراهه حوضه قره‌سو، به محیط نرم‌افزار مدل فراخوانده شدند. سپس، با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی، خاک و طبقات شیب (شکل ۲)، واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRUها) تعریف شدند. در این مرحله، ۳۸۸ واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) در محدوده حوضه قره‌سو تشکیل شد. در مرحله بعد، داده‌های هواشناسی به مدل وارد شدند. این داده‌ها شامل آمار بارندگی و

جزئیات بیشتر در مورد این شاخص‌ها، به مقاله Moriasi و همکاران (۲۰۰۷) مراجعه شود.

شناسایی و اولویت‌بندی مناطق بحرانی حوضه از نظر فرسایش و رسوب: پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT برای حوضه قره‌سو، از خروجی‌های مدل واسنجی‌شده، برای بررسی تغییرات مکانی فرسایش و رسوب در سطح حوضه استفاده شد. خروجی‌های مدل شامل رسوبدهی هر HRU (تن در هکتار)، رسوبدهی هر زیرحوضه (تن در هکتار)، غلظت رسوب در آبراهه اصلی هر زیرحوضه (میلی‌گرم در لیتر) و بار رسوب در آبراهه اصلی هر زیرحوضه (تن) می‌باشند که برای گام‌های زمانی روزانه، ماهانه، سالانه یا متوسط سالانه برای کل دوره شبیه‌سازی قابل محاسبه است. در این تحقیق پس از واسنجی مدل، از متوسط سالانه خروجی‌های مدل برای شناسایی و اولویت‌بندی مناطق بحرانی حوضه از نظر فرسایش و رسوب استفاده شد.

با توجه به این‌که هر کدام از خروجی‌های مدل معرف بخشی از اثرات محلی و غیرمحلی ناشی از فرسایش و رسوب در حوضه هستند، به‌منظور انجام یک بررسی و اولویت‌بندی جامع، شاخص‌های زیر بر اساس خروجی‌های مدل تعریف و تحلیل شد: الف) شاخص رسوبدهی در واحد سطح: این شاخص معرف فرسایش زیرحوضه‌ها می‌باشد و تأثیر منفرد هر زیرحوضه را در تولید رسوب نشان می‌دهد. ب) شاخص غلظت رسوب: این شاخص بر مبنای غلظت رسوب در آبراهه اصلی هر زیرحوضه می‌باشد و تأثیر زیرحوضه مورد نظر و تمامی زیرحوضه‌های بالادست آن را در بر می‌گیرد. با توجه به مستقل بودن از دبی جریان، این شاخص در تعیین مناطق بحرانی از نظر آلودگی آب در دوره‌های کم‌آبی و پرآبی مفید است. ج) شاخص بار رسوب: این شاخص بر اساس بار رسوب در آبراهه اصلی هر زیرحوضه می‌باشد و تأثیر زیرحوضه مورد نظر و تمامی زیرحوضه‌های بالادست آن را در نظر می‌گیرد. بار رسوب معرف اثر ترکیبی غلظت رسوب و دبی جریان می‌باشد. د) شاخص کلی: برای جمع‌بندی و اولویت‌بندی کلی زیرحوضه‌ها، شاخصی تجمعی با ترکیب سه شاخص فوق تعریف و محاسبه شد. برای این کار ابتدا هر سه شاخص با روش

داده‌ها نیز به حداقل ممکن برسد. با در نظر داشتن این نکته، پایه مشترک ۱۸ساله از ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۷ انتخاب شد. در ادامه، سایر اطلاعات مورد نیاز به‌صورت دستی و در جداول نرم‌افزار وارد شدند. پس از این مرحله دستور اجرای مدل داده شد و نتایج استخراج شد.

واسنجی، اعتبارسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل: به‌منظور مقایسه خروجی‌های شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل SWAT با داده‌های واقعی و واسنجی و اعتبارسنجی مدل، از داده‌های جریان رودخانه و نمونه‌های رسوب اندازه‌گیری شده در ایستگاه هیدرومتری سیاه‌آب واقع در خروجی حوضه استفاده شد. این داده‌ها به‌وسیله شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان ثبت شده‌اند. داده‌های دبی رودخانه به‌صورت روزانه اندازه‌گیری شده‌اند، ولی در مورد داده‌های رسوب، هر ماه یک بار نمونه‌برداری و اندازه‌گیری انجام شده است. مراحل ارزیابی کیفیت داده‌ها نیز توسط کارشناسان شرکت آب منطقه‌ای انجام شده است. داده‌های مربوط به سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۳ برای واسنجی و آمار سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۷ برای اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت.

در این تحقیق برای واسنجی دقیق و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT برای حوضه قره‌سو، از نرم‌افزار SWAT-CUP و روش SUFI-2 (Abbaspour, 2013) استفاده شد. در روش SUFI-2، میزان عدم قطعیت به‌وسیله دو معیار عامل P و عامل R محاسبه می‌شود. به لحاظ تئوری، مقادیر عامل P بین صفر تا یک و مقادیر عامل R در بازه صفر تا بی‌نهایت تغییر می‌کند. هر چقدر عامل P به یک و عامل R به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده عدم قطعیت کمتر در پارامترهای مدل است.

علاوه بر دو معیار عامل‌های P و R، شاخص‌های نیکویی برازش نیز برای ارزیابی تطابق خروجی‌های مدل با داده‌های مشاهداتی محاسبه شد. این شاخص‌ها شامل ضریب تعیین (R^2)، ضریب تعیین وزنی (bR^2)، نش-ساتکلیف (NSE)، درصد اریبی (PBIAS) و نسبت میانگین مجذورات خطا به انحراف معیار داده‌های مشاهداتی (RSR) می‌باشند. برای

الگوریتم SUFI2، دامنه و مقدار بهینه پارامترها تعیین شد. ابتدا پارامترهای حساس مرتبط با فرسایش سطحی (مانند USLE_C، USLE_K، HRU_SLP و ...)، مورد واسنجی قرار گرفتند.

سپس پارامترهای مربوط به انتقال رسوب در کانال آبراهه با توجه به مشاهدات میدانی و مقادیر پیشنهادی در راهنمای مدل و مطالعات قبلی به تناسب تغییر داده شدند. نمودارهای واسنجی و اعتبارسنجی بار رسوب ماهانه در ایستگاه سیاه‌آب در شکل ۳ نمایش داده شده‌اند و شاخص‌های کارایی مدل در جدول ۱ ارائه شده است.

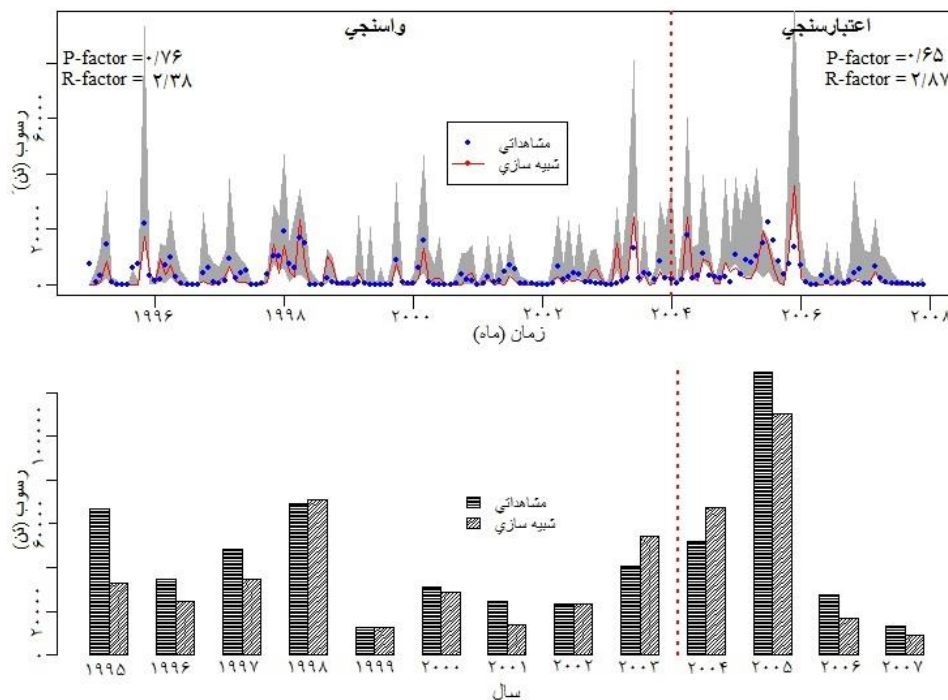
در جدول ۱ مشاهده می‌شود که ضریب NSE برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی کمتر از ۰/۳۶ به‌دست آمده که نشان‌دهنده ضعف مدل در شبیه‌سازی تغییرات و نوسانات رسوب ماهانه است. در عین حال، مقادیر شاخص PBIAS بسیار کمتر از حداکثر مجاز تعیین شده برای ارزیابی بار رسوب یعنی $\pm 50\%$ (Moriasi و همکاران، ۲۰۰۷) می‌باشد که بیانگر این است که، توانایی کلی مدل در پیش‌بینی متوسط رسوب خوب است.

استانداردسازی خطی در محدوده صفر تا ۱۰۰ استاندارد شدند، سپس میانگین امتیاز استاندارد شده شاخص‌ها به‌عنوان شاخص کلی برای هر زیرحوضه در نظر گرفته شد. این شاخص، میزان حساسیت زیرحوضه‌ها را بر اساس اثر تجمعی فرسایش، غلظت و بار رسوب نشان می‌دهد.

زیرحوضه‌های آبخیز قره‌سو بر اساس هر یک از شاخص‌های فوق با روش Jenks به پنج طبقه حساسیت (اولویت) از نظر فرسایش و رسوب (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) تقسیم‌بندی شدند. در این روش، داده‌ها به‌گونه‌ای در گروه‌های مختلف طبقه‌بندی می‌شوند که انحراف داده‌های هر گروه از میانگین گروه به حداقل و اختلاف با میانگین گروه‌های دیگر به حداکثر برسد (Jenks، ۱۹۶۷).

نتایج و بحث

نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل: پس از اجرای مدل SWAT، خروجی‌های مدل شامل مولفه‌های بیلان آب و فرسایش و رسوب به‌صورت فایل متنی حاوی اطلاعات به‌دست آمد. در ادامه با اجرای



شکل ۳- نمودارهای رسوب ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (بالا) و رسوب سالانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (پایین) برای ایستگاه سیاه‌آب، ناحیه خاکستری رنگ بر روی نمودار ماهانه نشان‌دهنده باند عدم قطعیت مربوط به دامنه نهایی پارامترها در روش SUFI-2 می‌باشد.

جدول ۱- شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل برای شبیه‌سازی رسوب ماهانه در ایستگاه سیاه‌آب

دوره اعتبارسنجی		دوره واسنجی		شاخص
مشاهداتی	شبیه‌سازی	مشاهداتی	شبیه‌سازی	
۴۵۷۴	۴۰۱۸	۳۲۴۴	۲۶۹۳	میانگین (تن)
۲۲۷۲۷	۳۵۵۱۰	۲۱۸۸۱	۲۴۴۳۰	حداکثر (تن)
۵۳۵۳	۶۸۹۹	۴۵۳۰	۴۶۶۸	انحراف معیار (تن)
	۰/۴		۰/۴۳	R^2
	۰/۳۵		۰/۳۷	bR^2
	۰/۲		۰/۲۴	NSE
	-۱۲/۱		-۱۷	PBIAS
	۰/۸۵		۰/۷۶	RSR
	۰/۶۵		۰/۷۶	P-factor
	۲/۸۷		۲/۳۸	R-factor

شده است. محدوده‌های تعیین شده برای طبقه‌بندی شاخص‌ها در جدول ۲ آمده است.

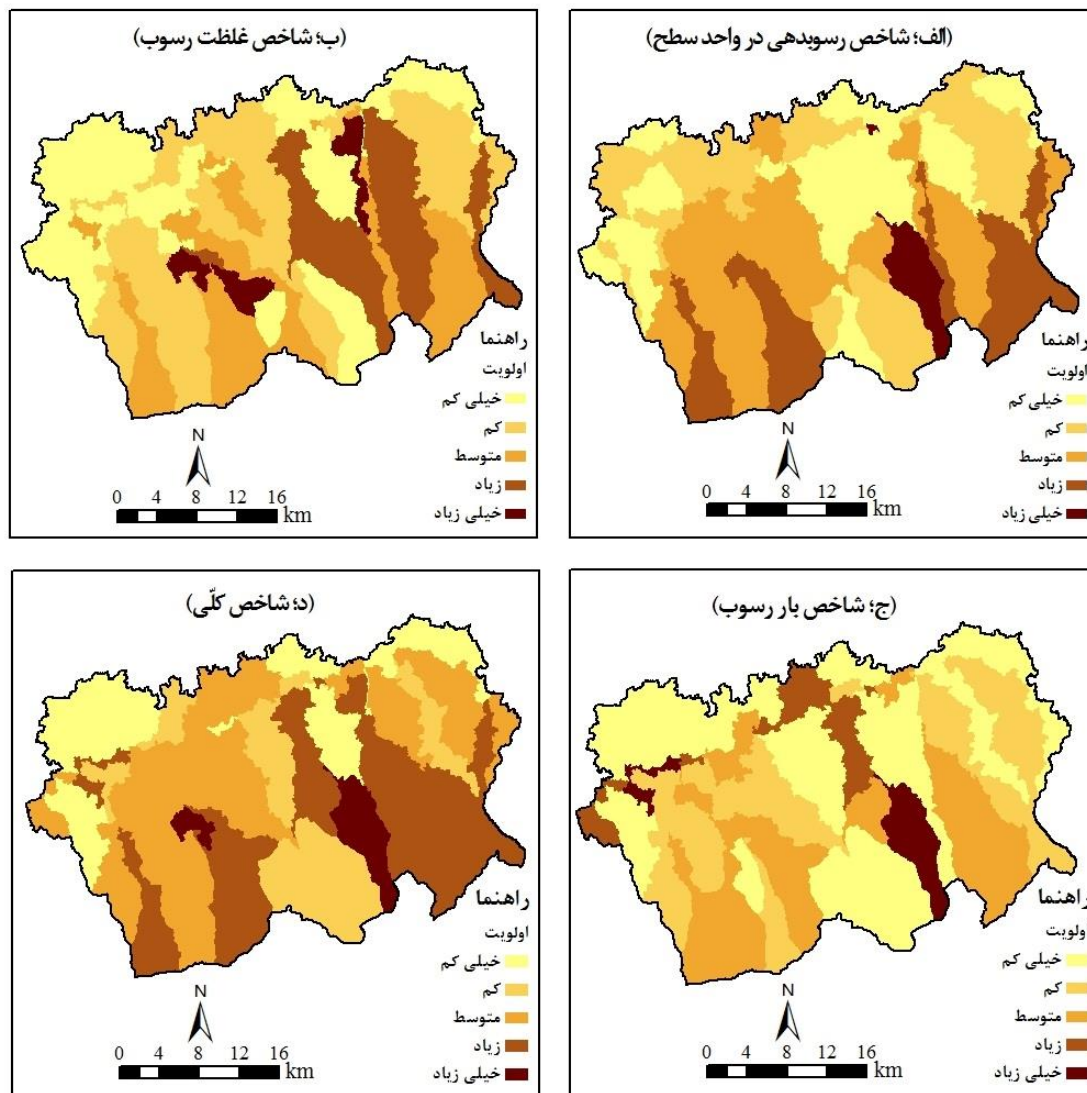
بر اساس شاخص رسوبدهی در واحد سطح، یک زیرحوضه (۳/۵ درصد مساحت حوضه قره‌سو) در طبقه حساسیت (اولویت) بسیار زیاد قرار گرفته است. از لحاظ موقعیت مکانی، این زیرحوضه در حاشیه جنوب غربی شهر گرگان قرار گرفته و بیشتر سطح آن را اراضی کشاورزی و مسکونی پوشانده است. این در حالیست که شیب عمومی منطقه زیاد است و خاک منطقه نیز از نوع لسی و حساس به فرسایش است. حدود ۲۰ درصد مساحت حوضه در طبقه حساسیت (اولویت) زیاد قرار گرفته است. بررسی نقشه‌های پایه نشان داد که فرسایش و رسوبدهی در این مناطق تحت تأثیر شیب زمین و کاربری کشاورزی می‌باشد. عملیات حفاظتی مبتنی بر مهار فرسایش سطحی، مانند ترانس‌بندی، کشت نواری و کشت روی خطوط تراز، برای کاهش رسوبدهی در مناطق با اولویت بسیار زیاد و زیاد توصیه می‌شود.

بر اساس شاخص غلظت رسوب، سه زیرحوضه کوچک (کمتر از ۲/۵ درصد مساحت حوضه) در طبقه حساسیت (اولویت) بسیار زیاد و هشت زیرحوضه (حدود ۲۱ درصد مساحت حوضه) در طبقه زیاد قرار گرفته‌اند. به‌طور کلی این زیرحوضه‌ها دارای آبدهی نسبتاً کم و رسوب نسبتاً زیاد می‌باشند. برای بهبود کیفیت آب در این مناطق می‌توان عملیات مهار فرسایش سطحی و نیز اقدامات حفاظتی که مانع از ورود رسوبات به آبراهه‌ها می‌شوند، مانند کاشت

مقادیر شاخص RSR در دوره واسنجی و اعتبارسنجی، اندکی بیش از مقدار توصیه شده (۰/۷)؛ Moriasi و همکاران، (۲۰۰۷) به‌دست آمده است. نتایج تحلیل عدم قطعیت نشان می‌دهد که حدود ۷۰ درصد داده‌های رسوب مشاهداتی در باند عدم قطعیت قرار گرفته‌اند، ولی پهنای این باند نسبتاً زیاد است (عامل R برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۲/۳۸ و ۲/۸۷ محاسبه شده است). بررسی ظاهری نمودارهای رسوب مشاهداتی و شبیه‌سازی، نشان‌دهنده عدم قطعیت زیاد در نقاط اوج نمودارهاست. دلایل اصلی خطاها و عدم قطعیت‌های شبیه‌سازی رسوب در این تحقیق مربوط به موارد زیر می‌باشد. (۱) عدم قطعیت در داده‌های ورودی مدل به‌ویژه نقشه خاک، (۲) عدم قطعیت پارامترهای مدل به‌خصوص پارامترهای مربوط به خصوصیات کانال آبراهه و (۳) عدم قطعیت در داده‌های مشاهداتی مورد استفاده برای واسنجی مدل. به‌طور کلی، هماهنگی نسبتاً مناسب بین داده‌های رسوب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی (شکل ۳) و پایین بودن شاخص PBIAS، بیانگر این است که مدل واسنجی شده برای حوضه قره‌سو، برای پیش‌بینی فرسایش و رسوب، به‌ویژه در گام‌های زمانی طولانی‌تر، قابل اطمینان است. از این‌رو، می‌توان از آن برای بررسی تغییرات مکانی-زمانی فرسایش و رسوب و نیز پیش‌بینی اثرات اقدامات مدیریتی استفاده کرد.

نتایج اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها از نظر فرسایش و رسوب: نتایج اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز قره‌سو بر اساس شاخص‌های تعریف شده در شکل ۴ ارائه

گیاهان دائمی در حاشیه مزارع، آبراهه‌های علفی و بافرهای گیاهی اطراف رودخانه، را اجرا نمود.



شکل ۴- اولویت‌بندی زیرحوزه‌های آبخیز قره‌سو از نظر فرسایش و رسوب بر اساس شاخص‌های مختلف، با توجه به ناچیز بودن فرسایش و رسوب در زیرحوزه‌های پوشیده از جنگل، در این شکل زیرحوزه‌های با کاربری غالب کشاورزی که منبع اصلی فرسایش و تولید رسوب در حوضه هستند، نمایش داده شده‌اند.

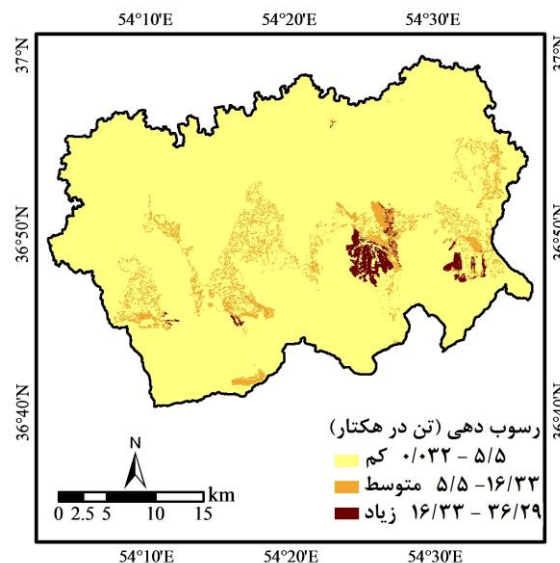
جدول ۲- محدوده طبقات اولویت برای شاخص‌های مختلف (بر اساس روش Jenks)

کلی	بار رسوب (تن)	غلظت رسوب (میلی‌گرم در لیتر)	رسوب‌دهی در واحد سطح (تن در هکتار)	
۰-۵	۰-۴۵۰۰	۰-۱۰۰	۰-۰/۷	بسیار کم
۵-۱۰	۴۵۰۰-۹۰۰۰	۱۰۰-۲۵۰	۰/۷-۱/۵	کم
۱۰-۲۰	۹۰۰۰-۱۸۰۰۰	۲۵۰-۴۵۰	۱/۵-۳	متوسط
۲۰-۴۰	۱۸۰۰۰-۳۰۰۰۰	۴۵۰-۷۵۰	۳-۵	زیاد
۴۰-۶۵	۳۰۰۰۰-۵۵۰۰۰	۷۵۰-۱۵۰۰	۵-۱۰	بسیار زیاد

نقشه تهیه شده بر اساس شاخص کلی، مناطق بحرانی که بیشتر در معرض اثرات نامطلوب فرسایش و رسوب هستند را مشخص کرده و می‌تواند به‌عنوان یک راهنما و نقطه شروع برای برنامه‌ریزی اقدامات حفاظتی در منطقه به کارشناسان و مدیران کمک کند. در ادامه با توجه به اهداف پروژه‌ها می‌توان به شاخص‌های دیگر رجوع کرد. برای مثال اگر هدف پروژه، حفظ حیات گیاهان و جانوران آبی باشد، بهتر است شاخص غلظت رسوب را مبنا قرار داد و اگر هدف جلوگیری از هدر رفت خاک باشد بهتر است به شاخص رسوبدهی در واحد سطح رجوع کرد.

به‌منظور بررسی جزئی‌تر مناطق تحت فرسایش در حوزه آبخیز قره‌سو، تحلیل نتایج مدل در مقیاس HRU نیز انجام شد. در شکل ۵، توزیع مکانی شاخص رسوبدهی در واحد سطح در مقیاس HRU ارائه شده است.

بررسی توزیع مکانی شاخص بار رسوب نشان می‌دهد که از بین زیرحوضه‌های دارای بار رسوب بسیار زیاد، یک زیرحوضه در بالادست و اطراف شهر گرگان قرار دارد. همان‌طور که قبلاً بیان شد، علت رسوب زیاد در این منطقه کشاورزی روی اراضی شیب‌دار می‌باشد. سایر زیرحوضه‌های حساس، در مناطق پایین‌دست حوضه واقع هستند و حساسیت آن‌ها ناشی از رسوب انتقال یافته از زیرحوضه‌های بالادست است. اقدامات مدیریتی قابل توصیه برای کاهش مشکلات ناشی از رسوب در این نواحی شامل عملیات حفاظتی سازه‌ای در آبراهه‌ها می‌باشد. احداث چکدم‌ها، برکه‌های نگهدارنده و آبگیرهای مصنوعی می‌تواند نقش موثری در کاهش سرعت و ظرفیت حمل رسوب جریان و نیز به دام انداختن رسوبات داشته باشد.



شکل ۵- اولویت‌بندی HRUهای آبخیز قره‌سو بر اساس شاخص رسوبدهی در واحد سطح

بیش از ۹۲ درصد مساحت حوضه را تشکیل می‌دهند، در طبقه اولویت کم قرار گرفته‌اند و حدود ۴۲ درصد رسوب حوضه را تولید می‌کنند. بررسی کاربری اراضی HRUها نشان داد که از بین ۱۰ HRU که جزء مناطق با اولویت زیاد طبقه‌بندی شده‌اند، یک HRU دارای کاربری اراضی مسکونی است و بقیه پوشیده از اراضی کشاورزی هستند. همچنین، در مورد HRU ۴۴ که در طبقه متوسط قرار گرفته‌اند، تنها یک HRU

نتایج نشان داد که از مجموع ۳۸۸ واحد واکنش هیدرولوژیک، ۱۰ HRU در طبقه رسوبدهی زیاد قرار می‌گیرند. این HRUها تنها ۱/۶ درصد مساحت حوضه را می‌پوشانند، ولی حدود ۲۱ درصد هدر رفت خاک حوضه در آن‌ها اتفاق می‌افتد. ۴۴ HRU که حدود ۳۷ درصد مساحت حوضه را تشکیل می‌دهند، در طبقه اولویت متوسط قرار گرفته‌اند و حدود ۳۷ درصد رسوب حوضه را تولید می‌کنند. مابقی HRUها که

شبه‌سازی رسوب به داده‌های مورد استفاده، به‌ویژه اطلاعات خاک، پارامترهای کانال آبراهه و داده‌های مشاهداتی رسوب، مربوط است.

اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز قره‌سو با استفاده از شاخص‌هایی که بر اساس خروجی‌های مدل SWAT تعریف شد نشان داد که الگوی مکانی مناطق حساس از نظر شاخص‌های مختلف با یکدیگر متفاوت است. مناطق حساس از نظر فرسایش و رسوب‌دهی در زیرحوضه‌های بالادست قرار دارند و کاربری اراضی کشاورزی و مناطق مسکونی و شیب زیاد زمین، عامل اصلی هدر رفت خاک در این قسمت از حوضه است. زیرحوضه‌های بحرانی از نظر غلظت رسوب در مناطق میانی حوضه واقع هستند و عدم توازن (غلبه) مقدار رسوب با میزان آب رودخانه علت زیاد بودن غلظت رسوب است. انتقال و افزایش تدریجی رسوب رودخانه به سمت پایین دست سبب شده که زیرحوضه‌های حساس از نظر بار رسوب عمدتاً در پایین دست قرار گیرند. به‌طور کلی، یافته‌های فوق با مشاهدات میدانی در منطقه تطابق دارد که این مؤید کاربرد رویکرد مدل‌سازی فرایند-محور و قابلیت‌های مدل SWAT در پهنه‌بندی فرسایش و رسوب در حوزه‌های آبخیز است. از مدل واسنجی شده برای حوضه قره‌سو می‌توان برای پیش‌بینی اثرات اقدامات حفاظتی استفاده نمود که موضوع تحقیق آینده در راستای این پژوهش است.

دارای پوشش جنگلی است، نه تا کاربری مسکونی دارند و مابقی دارای کاربری اراضی کشاورزی هستند. از نقشه اولویت‌بندی HRUها که نسبت به نقشه اولویت‌بندی در مقیاس زیرحوضه دارای جزئیات مکانی بیشتری است، می‌توان برای مکان‌یابی دقیق و بهینه عملیات حفاظت آب و خاک استفاده نمود. با تمرکز عملیات حفاظتی در اراضی تحت فرسایش متوسط و زیاد که کمتر از ۱۰ درصد مساحت حوضه را می‌پوشاند، می‌توان هدر رفت خاک را تا حد بسیار زیادی کاهش داد.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر سعی شد تا با استفاده از مدل SWAT و داده‌های در دسترس، به مدل‌سازی و بررسی وضعیت فرسایش و رسوب در حوضه قره‌سو استان گلستان پرداخته شود. ارزیابی عملکرد مدل بیانگر کارایی نسبت قابل قبول آن برای شبه‌سازی فرسایش و رسوب در این حوضه است. مقایسه ظاهری نمودارهای شبه‌سازی و مشاهداتی و همچنین، شاخص عددی ارزیابی کارایی مدل نشان داد که علی‌رغم ضعف نسبی مدل در پیش‌بینی نوسانات رسوب ماهانه، با توجه با ارزیابی بسیار کم ($PBIAS < 20\%$)، توانایی کلی آن در پیش‌بینی متوسط رسوب خوب است. منشاء اصلی خطاها و عدم قطعیت در

منابع مورد استفاده

1. Abbaspour, K.C. 2013. SWAT-CUP 2012: SWAT calibration and uncertainty programs-a user manual. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Switzerland, 100 pages.
2. Arabkhedri, M. 2014. Critical condition of soil erosion in Iran. <http://www.saat24.com/news/30175>.
3. Arefi-asl, A., A. Najafinejad, F. Kiani and A.S. Mahiny. 2013. Simulating runoff and sediment using SWAT model for the Chelchay Watershed, Golestan Province. *Journal of Rangeland and Watershed Management*, 66(3): 433-446.
4. Busted, P.R., D.E. Storm, M.J. White and S.H. Stoodley. 2009. Using SWAT to target critical source sediment and phosphorus areas in the Wister Lake Basin, USA. *American Journal of Environmental Sciences*, 5(2): 156-163.
5. Gholami, Sh. 2003. Simulating daily sediment using SWAT distributed model in mountainous watersheds (Amameh Watershed). *Pajouhesh-va-Sazandegi*, 59: 28-33.
6. Hosseini, M. 2010. Effect of land use changes on water balance and suspended sediment yield of Taleghan Catchment, Iran. PhD Thesis, University Putra Malaysia, 156 pages.
7. Jenks, G.F. 1967. The data model concept in statistical mapping. *International Yearbook of Cartography*, 7(1): 186-190.
8. Kodoatie, R.J. 1999. Sediment transport relations in alluvial channels. PhD Thesis, Colorado State University, 350 pages.
9. Lal, R. 1998. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 17(4): 319-464.

10. Morgan, R.P.C. 2005. Soil erosion and conservation (3rd edition). Blackwell Science, Oxford, 316 pages.
11. Moriasi, D.N., J.G. Arnold, M.W. Van Liew, R.L. Bingner, R.D. Harmel and T.L. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3): 885-900.
12. Mukundan, R., S.M. Pradhanang, E.M. Schneiderman, D.C. Pierson, A. Anandhi, M.S. Zion and T.S. Steenhuis. 2013. Suspended sediment source areas and future climate impact on soil erosion and sediment yield in a New York City water supply watershed, USA. *Geomorphology*, 183: 110-119.
13. Ndomba, P., F. Mtalo and A. Killingtveit. 2008. SWAT model application in a data scarce tropical complex catchment in Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 33(8): 626-632.
14. Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry and J.R. Williams. 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute, 618 pages.
15. Pimentel, D. 1993. World soil erosion and conservation. New York: Cambridge University Press, 364 pages.
16. Pongpetch, N., P. Suwanwaree, C. Yossapol, S. Dasananda and T. Kongjun. 2015. Using SWAT to assess the critical areas and nonpoint source pollution reduction best management practices in Lam Takong River Basin, Thailand. *EnvironmentAsia*, 8(1): 41-52.
17. Rostamian, R., A. Jaleh, M. Afyuni, S.F. Mousavi, M. Heidarpour, A. Jalalian and K. Abbaspour. 2008. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrological Sciences*, 53: 977-988.
18. Tibebe, D. and W. Bewket. 2011. Surface runoff and soil erosion estimation using the SWAT model in the Keleta Watershed, Ethiopia. *Land Degradation and Development*, 22(6): 551-564.
19. Tripathi, M.P., R.K. Panda and N.S. Raghuwanshi. 2003. Identification and prioritization of critical sub-watersheds for soil conservation management using the SWAT model. *Biosystems Engineering*, 85(3): 365-379.
20. Walling, D.E. and A.L. Collins. 2000. Integrated assessment of catchment sediment budgets: A technical manual. School of Geography and Archaeology, University of Exeter, 168 pages.