

## بهینه‌سازی و تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر بر بار رسوب بر پایه الگوریتم SUFI2 (مطالعه موردی: حوضه آبخیز رودخانه دویرج)

نصرالله بصیرانی<sup>۱</sup>، حاجی کریمی<sup>۲</sup>، علیرضا مقدم نیا<sup>۳</sup>، حیدر ابراهیمی<sup>۴\*</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۵/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۲۴)

### چکیده

فرسایش و رسوب‌گذاری به‌عنوان یک رفتار طبیعی رودخانه منجر به از دست رفتن خاک حاصلخیز و وارد کردن خسارات جبران‌ناپذیر به طرح‌های عمرانی آب می‌گردد. از آنجایی که پدیده فرسایش و رسوب یکی از پیچیده‌ترین فرآیندهای طبیعی بوده و عوامل زیادی بر آن تأثیر گذار می‌باشد، لذا شناخت کامل عوامل مؤثر بر این پدیده کاری بسیار مشکل است. این تحقیق با هدف بهینه‌سازی پارامترها و تعیین حساسیت آنها در تولید رسوب حوضه آبخیز دویرج در غرب ایران انجام شد. برای این منظور مدل نیمه‌توزیعی SWAT، الگوریتم SUFI2 و آمار بار رسوب ماهانه سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۰۴ مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا مدل برای شبیه‌سازی جریان ماهانه اجرا گردید که براساس مقادیر شاخص‌های ارزیابی در مرحله واسنجی، عملکرد این مدل در شبیه‌سازی جریان ماهانه حوضه مورد مطالعه رضایت‌بخش می‌باشد. در مرحله بعد به‌منظور شبیه‌سازی بار رسوب ماهانه اقدام به اجرای مدل گردید، در اولین اجرای مدل ضرایب  $R^2$ ،  $NS$  و  $Br^2$  به‌ترتیب ۰/۴۳، ۰/۳۹ و ۰/۲۸ به‌دست آمد که نشان می‌دهد عملکرد آن با داده‌های پیش‌فرض رضایت‌بخش نیست. بنابراین با استفاده از الگوریتم SUFI2 و مدل‌سازی معکوس، مقادیر بهینه پارامترها تعیین و مدل با مقادیر جدید اجرا شد. براساس نتایج جدید، ضرایب  $R^2$ ،  $NS$  و  $Br^2$  به‌ترتیب ۰/۷۵، ۰/۷۳ و ۰/۶۵ به‌دست آمدند و عملکرد مدل بهبود و دقت آن در حد قابل قبول افزایش یافت. در گام بعد، اقدام به تعیین اهمیت پارامترها گردید که از میان ۳۰ پارامتر بررسی شده،  $(CH\_N2)$ ،  $(USLE\_K)$ ،  $(USLE\_P)$  و  $(OV\_N)$  از پارامترهای بسیار مهم در تعیین میزان بار رسوب خروجی از حوضه شناخته شدند و از بین آنها عامل  $USLE\_K$  به‌عنوان حساس‌ترین پارامتر تشخیص داده شد. نتایج این تحقیق می‌تواند در مدیریت مؤثرترین عوامل بر بار رسوب مورد استفاده قرار گیرد. همچنین تهیه مقادیر دقیق پارامترهای مؤثرتر در سایر مطالعات می‌تواند به بهبود نتایج شبیه‌سازی حوضه‌های مشابه کمک زیادی نماید.

واژه‌های کلیدی: مدل SWAT، مدل‌سازی معکوس، بار رسوب، رودخانه دویرج

۱. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل

۲. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام

۳. گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۴. گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: h.ebrahimi33@gmail.com

## مقدمه

مختلف جهان قرار گرفته است. محمودزاده (۱۱) در سال ۱۹۹۴ در تحقیقات خود در منطقه سیدنی استرالیا نشان داد که کاربری زمین مهم‌ترین عامل مؤثر در فرسایش خاک و تولید رسوب می‌باشد. نامبرده نتیجه گرفت که تبدیل اراضی جنگلی به مرتعی باعث افزایش تولید رسوب به میزان ۲۰ درصد و تبدیل اراضی مرتعی به زراعی منجر به افزایش رسوب به مقدار ۱۳۰ درصد می‌شود. شو و همکاران (۱۹) در سال ۲۰۰۹ با استفاده از مدل SWAT مقدار رواناب و رسوب حوضه مخزن «می‌یان» را شبیه‌سازی نمودند. ضریب ناش - ساتکلیف و ضریب تعیین برای رسوب ماهانه بزرگتر از ۰/۸۴ و ۰/۶ در طول دوره واسنجی و بزرگ‌تر از ۰/۸۴ و ۰/۹۵ در طول دوره اعتبارسنجی بودند. در این بررسی، پارامترهای حساس برای شبیه‌سازی عبارت بودند از دبی و مقدار رسوب، شماره منحنی، ضریب جریان پایه، فاکتور تصحیح تبخیر خاک، ظرفیت آب موجود در خاک، عمق پروفیل خاک و زمان تأخیر جریان سطحی. طالبی‌زاده و مرید (۶) در سال ۱۳۸۷، از مدل SWAT به منظور برآورد غلظت رسوب در حوضه جنگلی کسلیان استفاده کرده‌اند که پس از واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل، نتایج حاصل از مدل تطابق خوبی با آمار مشاهده شده غلظت رسوب داشته‌اند و ۷۲ درصد از مقادیر مشاهده شده غلظت رسوب در داخل باندهای اطمینان در سطح ۹۵ درصد قرار گرفتند. همچنین براساس نتایج حاصل از مدل، پارامترهای شماره منحنی، فرسایش‌پذیری کانال و پوشش کانال به‌عنوان حساس‌ترین پارامترها در واسنجی مدل برای غلظت رسوب شناخته شدند.

این تحقیق با هدف بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر بار رسوب و تعیین میزان تأثیر هر یک از آنها در تولید رسوب حوضه آبخیز دویرج انجام شده است. برای این منظور مدل نیمه توزیعی SWAT و الگوریتم SUFI2 مورد استفاده قرار گرفت. نبودن داده‌های واقعی مستمر و اهمیت شبیه‌سازی بار رسوب این حوضه با توجه به وجود سد مخزنی دویرج در خروجی آن، انجام این تحقیق را الزامی می‌نماید.

فرسایش خاک یک مشکل جهانی است که به‌طور جدی منابع آب و خاک را تهدید می‌کند. برای تشکیل یک سانتی‌متر خاک بیش از ۳۰۰ سال زمان لازم است (۱۵). طبق گزارش سازمان خوار و بار کشاورزی جهانی در سال ۱۹۸۵، بیش از ۵۶ میلیون هکتار از اراضی ایران در معرض خسارت ناشی از فرسایش آبی بیشتر از ۱۰ تن در هکتار در سال بوده است (۳ و ۱۰). نتایج ارزیابی عرب‌خداری (۷ و ۹) در سال ۲۰۰۳ با استفاده از داده‌های بیش از ۲۰۰ ایستگاه رسوب‌سنجی نیز مؤید فرسایش ۱ میلیارد تن در سال در ایران می‌باشد. فرسایش و رسوبگذاری به‌عنوان یک رفتار طبیعی رودخانه منجر به از دست رفتن خاک حاصلخیز کشاورزی و وارد کردن خسارات جبران‌ناپذیر به طرح‌های عمرانی آب می‌گردد (۴ و ۵). تخمین و پیش‌بینی دبی رسوب در طیف گسترده‌ای از مسائل نظیر مهندسی رودخانه‌ها، طراحی سدها، انتقال آلودگی، محیط‌زیست، آبخیزداری و بسیاری از بحث‌های منابع آب کاربرد دارد از سوی دیگر، حمل رسوب بر شاخص‌های کیفی آب به لحاظ شرب و کشاورزی تأثیرگذار است. از اینرو، متخصصین همواره در جهت برآورد بار معلق جریان رودخانه‌ها تلاش‌هایی نموده‌اند (۵). در این راستا مدل‌های مختلف تجربی و فیزیکی توسعه یافته‌اند. برآورد میزان فرسایش و رسوب و اعمال مدیریت مناسب در یک منطقه همانند هر پدیده طبیعی دیگر نیازمند شناخت کامل عوامل تأثیرگذار بر آن است. از آنجایی که پدیده فرسایش و رسوب یکی از پیچیده‌ترین فرآیندهای طبیعی بوده و عوامل زیادی بر آن تأثیرگذار می‌باشد، شناخت کامل همه این عوامل کاری بسیار مشکل است (۱). تحلیل حساسیت برای تعیین این‌که یک مدل چقدر به تغییر مقدار امتیاز پارامتری از آن و تغییر در ساختار مدل حساس است، انجام می‌شود. مدل SWAT که در این تحقیق از آن برای شبیه‌سازی بار رسوب استفاده شده است به‌علت جامع بودن و در نظر گرفتن جنبه‌های مختلف از قبیل هواشناسی، توپوگرافی، خاک‌شناسی و کاربری اراضی و پوشش گیاهی و سازه‌های مدیریتی مورد توجه محققین بسیاری در نقاط



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز دویرج در ایران

۴/۳۳۴ میلی‌متر می‌باشد. دمای هوا در فصل تابستان در این حوضه آبخیز، به‌خصوص در ناحیه جنوبی آن، بالا است. میانگین حداکثر دما ۶/۲۷ درجه سانتی‌گراد و میانگین حداقل دما ۷/۱۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

#### مدل SWAT

مدل SWAT مخفف عبارت Soil and Water Assessment Tool یک مدل مفهومی - نیمه‌توزیعی در مقیاس حوضه‌ای است که دارای بازده محاسباتی بالا می‌باشد. این مدل یک مدل پیوسته زمانی است که در گام‌های زمانی ساعتی، روزانه و یا طولانی مدت‌تر اجرا می‌شود (۲). مدل با تقسیم کردن یک حوضه به تعداد زیادی زیرحوضه، جزئیات مکانی را شبیه‌سازی می‌کند. بخش‌های اصلی مدل شامل هیدرولوژی، اقلیم، فرسایش، رشد گیاهان، عناصر غذایی، آفت‌کش‌ها، مدیریت اراضی و روندیابی جریان می‌باشد (۱۲).

در این مدل هر حوضه به چند زیرحوضه و هریک از زیرحوضه‌ها به چند واحد واکنش هیدرولوژیک (HRU) که از نظر کاربری اراضی و خصوصیات خاک همگن هستند، تقسیم می‌شود. در ابتدا آب موجود در خاک، رواناب سطحی، چرخه عناصر غذایی، رسوب، رشد گیاهان و روش‌های مدیریتی برای هر واحد واکنش هیدرولوژیک و سپس برای هر زیرحوضه

#### مواد و روش‌ها

##### معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز رودخانه دویرج از حوضه‌های مرزی کشور محسوب می‌شود که با مساحت ۱۱۶۰ کیلومترمربع در محدوده استان ایلام و در شهرستان‌های دهلران و آبدانان واقع شده است شکل ۱. محدوده مورد مطالعه دارای مختصات جغرافیایی  $16^{\circ} 47'$  تا  $40^{\circ} 47'$  طول شرقی و  $32^{\circ} 34'$  تا  $33^{\circ} 5'$  عرض شمالی می‌باشد که از شمال به کبیرکوه، در جنوب به موسیان، در شرق به کوه دال پری و حوضه آبخیز رودخانه چیخواب و از غرب به دینارکوه و دهلران محدود می‌شود. بلندترین نقطه حوضه، کبیرکوه با ارتفاع حدود ۲۲۰۰ متر و کمترین ارتفاع، در خروجی آن با ارتفاع ۱۰۰ متر از سطح دریا می‌باشد.

آب و هوای استان ایلام به‌طورکلی تحت تأثیر عرض جغرافیایی، ارتفاع، امتداد کوه‌ها و فاصله از دریا قرار دارد. توده هوای دریایی حاره مدیترانه‌ای از نواحی غربی و جنوب غربی در فصل زمستان وارد حوضه آبخیز رودخانه دویرج و تمامی نواحی اطراف آن می‌شود. همچنین از ناحیه شمال توده هوای دیگری به نام توده هوای دریایی قطبی در فصول زمستان، پاییز و بهار وارد منطقه فوق‌الذکر می‌شود. بارندگی در حوضه آبخیز رودخانه دویرج عمدتاً در فصول پاییز و زمستان صورت می‌گیرد و متوسط بارندگی سالانه در این حوضه در حدود

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های استفاده شده حوضه دویرج

سال تأسیس	مشخصات جغرافیایی			نوع ایستگاه	نام ایستگاه
	ارتفاع (متر)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی		
۱۹۸۷	۲۳۲	۳۲° ۴۱' ۰۰"	۴۷° ۱۶' ۰۰"	سینوپتیک	دهلران
۱۹۸۸	۹۴۰	۳۲° ۵۹' ۰۰"	۴۵° ۲۵' ۰۰"	باران‌سنجی	آبدانان
۱۹۷۲	۱۶۵	۳۲° ۳۵' ۴۰"	۴۷° ۲۴' ۰۰"	هیدرومتری	پل دویرج

دهلران (دما، بارش و رطوبت نسبی) و ایستگاه باران سنجی آبدانان از سازمان هواشناسی و آمار بار رسوب ایستگاه هیدرومتری پل دویرج از شرکت آب منطقه‌ای استان ایلام اخذ گردید (جدول ۱). نقشه خاک حوضه در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. دوازده کلاس خاک تعریف و برای تکمیل بخشی از اطلاعات خاک مورد نیاز مدل مانند بافت و ضریب فرسایش‌پذیری و هدایت هیدرولیکی خاک، از نقشه‌های تهیه شده در سایر مطالعات، اطلاعات پروفیل‌های حفر شده و نرم‌افزار SHPC استفاده گردید. پس از بررسی اولیه آمار هیدرومتری و هواشناسی تهیه شده، یک دوره مشترک آمار ۱۱ ساله با در نظر گرفتن عدم وجود داده‌های ناقص، بین سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۰۴ میلادی در نظر گرفته شد.

### الگوریتم بهینه‌سازی SUFI-2

در این مطالعه، پس از استفاده از مدل SWAT برای تخمین رواناب حوضه دویرج، پارامترهای متفاوتی که در مدل به کار برده می‌شوند، نظیر پارامترهای مؤثر بر بار رسوب، با استفاده از روش معکوس و با استفاده از برنامه SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting) به‌عنوان یکی از الگوریتم‌های موجود در نرم‌افزار SWAT\_CUP که مخفف عبارت (SWAT\_Calibration and Uncertainty Programs) است تعیین و میزان حساسیت و عدم قطعیت آنها با استفاده از این برنامه برآورد شد. علت انتخاب برنامه SUFI2، توانایی این برنامه در مدیریت تعداد زیاد پارامترها، همزمانی تحلیل حساسیت، عدم قطعیت، واسنجی و اعتبارسنجی است (۴).

به‌صورت متوسط وزنی محاسبه می‌شود. این کار دقت محاسبات را افزایش داده و توصیف فیزیکی بهتری از بیلان حوضه به‌دست می‌دهد (۱۲).

در مدل SWAT، فرسایشی که به‌وسیله بارش و رواناب ایجاد می‌شود از رابطه اصلاح شده معادله جهانی فرسایش (MUSLE) محاسبه می‌شود (۱۶). MUSLE یک نسخه اصلاح شده از معادله جهانی هدر رفت خاک (USLE) است که توسط ویشمایر و اسمیت (۱۷ و ۱۸) ارائه شده است، محاسبه می‌شود:

$$Sed = 11.8(Q_{surf} q_{peak} area_{hru})^{0.56} K_{USLE} C_{USLE} P_{USLE} L_{USLE} C_{FRG} \quad [1]$$

که در آن: Sed مقدار رسوب (تن در روز)،  $Q_{surf}$  رواناب (میلی‌متر در هکتار)،  $q_{peak}$  حداکثر رواناب (متر مکعب بر ثانیه)،  $area_{hru}$  مساحت هر HRU (هکتار)،  $K_{USLE}$  فاکتور فرسایش‌پذیری خاک،  $C_{USLE}$  فاکتور مدیریت و پوشش،  $P_{USLE}$  فاکتور روش‌های حفاظتی،  $L_{USLE}$  فاکتور توپوگرافی و  $C_{FRG}$  فاکتور ذرات درشت دانه می‌باشد.

نقشه‌های پایه مورد نیاز شامل نقشه مدل ارتفاعی رقومی (DEM)، نقشه کاربری اراضی و نقشه خاک می‌باشند که هر سه باید به مدل معرفی شوند. سایر اطلاعات مورد نیاز شامل: داده‌های هواشناسی، عوامل مؤثر بر جریان سطحی و جریان کانال، اطلاعات آب‌های زیرزمینی و بهره‌برداری آب، اطلاعات مدیریت اراضی، اثرات مخازن آب و برخی زمینه‌های دیگر می‌باشد (۱۳).

برای انجام این پژوهش، آمار و داده‌های مورنیاز مدل شامل نقشه توپوگرافی و کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه از اداره کل منابع طبیعی، آمار و اطلاعات هواشناسی ایستگاه سینوپتیک

تعیین اهمیت نسبی هر پارامتر، برنامه SUFI2 یک مقدار t-test برای آنها ارائه می‌دهد. این برنامه حساسیت نسبی را بر پایه تقریب‌های خطی (Linear approximations) ارائه می‌دهد. از این رو تنها اطلاعاتی جزئی درباره حساسیت تابع هدف نسبت به پارامترهای مدل را فراهم می‌کند. مقادیر قدر مطلق t-stat میزان حساسیت هر پارامتر را نشان می‌دهد. پارامترهای با مقدار t-stat بیشتر دارای حساسیت نسبی بیشتری می‌باشند. همچنین این برنامه یک مقدار p-value را برای هر پارامتر به منظور تعیین میزان معنی‌داری حساسیت نسبی آنها ارائه می‌کند که هر چه مقدار آن به عدد صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده معنی‌داری بیشتر حساسیت پارامتر می‌باشد (۸).

۸- در این گام، عدم قطعیت محاسبه می‌شود.

۹- به دلیل بزرگ بودن عدم قطعیت پارامترها در ابتدا لازم است دامنه هر یک از پارامترها تعدیل شود. در این گام، دامنه جدیدی برای هر پارامتر با استفاده از روابط ویژه محاسبه می‌شود.

برای تعیین حساسیت مطلق هر پارامتر، با تغییر مقدار آن و ثابت نگه داشتن مقادیر سایر پارامترها میزان اثر آن بر توابع هدف بررسی می‌شود و این روند برای تمام پارامترها تکرار می‌شود و در نهایت پارامترهایی که تغییر آنها بیشترین تأثیر را بر توابع هدف دارد به‌عنوان حساس‌ترین پارامترها شناسایی می‌شوند (۱۴).

### نتایج

یکی از قابلیت‌های مدل SWAT محاسبه متغیرهای حوضه مانند بار رسوب، دبی و تبخیر و تعرق به‌صورت جداگانه می‌باشد. در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی بار رسوب در حوضه مورد مطالعه، ابتدا اقدام به شبیه‌سازی جریان ماهانه گردید. برای بررسی نتایج، ضریب تبیین ( $R^2$ )، ضریب ناش-ساتکلیف (NS) و حاصلضرب ضریب تبیین در ضریب رگرسیون خطی ( $Br^2$ ) به‌عنوان تابع هدف مورد استفاده قرار گرفت. جدول ۲ مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل را برای شبیه‌سازی دبی رواناب ماهانه، در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهد.

برنامه SUFI-2 واسنجی و عدم قطعیت را ترکیب می‌کند. در این برنامه فرض می‌شود که هر پارامتر ناشناخته به‌طور یکنواخت در یک دامنه با عدم قطعیت معین توزیع شده است. حد بالا و پایین این دامنه را می‌توان براساس تجربیات، آزمایش‌ها و یا اندازه‌گیری‌های انجام شده در مطالعات قبلی و منابع علمی انتخاب نمود. توصیف مختصر و گام به گام الگوریتم SUFI-2 در زیر آورده شده است:

۱- در گام اول، تابع هدف تعیین می‌شود. در این برنامه، ۷ نوع تابع هدف شامل: حاصل ضرب مربع خطا، مجموع مربع خطا، ضریب تبیین، مربع کای ( $\chi^2$ )، ضریب ناش-ساتکلیف، حاصلضرب ضریب تبیین در ضریب رگرسیون خطی و روش SSQR وجود دارد.

۲- در گام دوم، حد بالا و پایین برای پارامترها براساس تجربیات، آزمایش‌ها و یا اندازه‌گیری‌های انجام شده در مطالعات قبلی و منابع علمی تعریف می‌شود.

۳- این مرحله اختیاری است اما به شدت برای تحلیل حساسیت مطلق تمام پارامترها در مراحل اولیه واسنجی توصیه شده است. تحلیل حساسیت با ثابت نگه داشتن تمام پارامترها در مقدار واقعی و با تغییر تنها یک پارامتر در هر مرحله اجرا می‌شود. به‌طوری‌که تأثیر تغییرات هر پارامتر بر تابع هدف انتخاب شده در گام یک مشخص شود.

۴- نخستین دامنه عدم قطعیت هر پارامتر برای نمونه‌برداری لاتین «هایپرکیوب» تعیین می‌گردد.

۵- نمونه‌برداری به روش هایپرکیوب در هر مرحله شبیه‌سازی انجام می‌شود.

۶- تابع هدف انتخابی در گام اول برای هر مرحله شبیه‌سازی محاسبه می‌شود.

۷- حساسیت نسبی پارامترها محاسبه می‌شود. این حساسیت با حساسیت محاسبه شده در گام سوم کاملاً متفاوت است. در این گام، متوسط تغییرات تابع هدف که از تغییرات هر پارامتر نتیجه می‌شود به دست می‌آید. این درحالی‌است که بقیه پارامترها نیز تغییر می‌کنند. بنابراین این حساسیت، نسبی است. به‌منظور

جدول ۲. مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل‌سازی رواناب در مراحل مختلف اجرای مدل SWAT

مرحله واسنجی	اولین اجرای مدل	شاخص‌های ارزیابی و مراحل اجرای مدل
۰/۷۵	۰/۵۰	ضریب تبیین (R <sup>۲</sup> )
۰/۶۵	۰/۲۲	ضریب نش - ساتکلیف (NS)
۰/۷۴	۰/۴۳۷	ضریب Br <sup>۲</sup>

و شبیه‌سازی شده را، قبل و بعد از بهینه‌سازی پارامترها نشان می‌دهد.

به منظور تعیین اهمیت نسبی هر پارامتر، برنامه SUFI2 یک مقدار t-test و p-value برای آنها ارائه می‌دهد. در این تحقیق ۳۰ پارامتر در میزان بار رسوب مؤثر شناخته شد که حساسیت بار رسوب خروجی به آنها متفاوت است. براساس نتایج، پارامترهای CH\_N2، SOL\_Z و USLE\_K دارای بیشترین حساسیت نسبی و پارامترهای ALPHA\_BF، GWQMN، و پارامترهای GW\_DELAY دارای کمترین میزان حساسیت نسبی می‌باشند. مقادیر t-test و p-value برای پارامترهای مختلف مؤثر در بار رسوب خروجی حوضه ارائه شده است (جدول ۵).

برای تعیین حساسیت مطلق هر پارامتر، با تغییر مقدار آن و ثابت نگه‌داشتن مقادیر سایر پارامترها میزان اثر آن روی توابع هدف بررسی می‌شود و این روند برای تمام پارامترها تکرار می‌شود و در نهایت پارامترهایی که تغییر آنها بیشترین تأثیر را بر توابع هدف دارد به عنوان حساس‌ترین پارامترها شناسایی می‌شوند. براساس نتایج از میان پارامترهای بررسی شده، چهار پارامتر ضریب مانینگ رودخانه اصلی (CH\_N2)، عامل مربوط به فرسایش‌پذیری خاک در معادله جهانی هدررفت خاک (USLE\_K)، عامل مربوط به عملیات حفاظت خاک در معادله جهانی هدررفت خاک (USLE\_P) و ضریب مانینگ برای جریان سطحی (OV\_N) از پارامترهای بسیار مهم در تعیین میزان بار رسوب خروجی از حوضه شناخته شدند که از بین آنها عامل USLE\_K به عنوان حساس‌ترین پارامتر تشخیص داده شد (جدول ۶).

به‌طورکلی نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که توانایی و دقت مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی رواناب ماهانه حوضه آبخیز رودخانه دویرج رضایت بخش می‌باشد.

پس از شبیه‌سازی جریان ماهانه و رضایت بخش بودن عملکرد مدل، بار رسوب ماهانه حوضه آبخیز دویرج با استفاده از این مدل شبیه‌سازی شد. به‌طورکلی، نتایج حاصل از اولین اجرای مدل SWAT و بررسی شاخص‌های ارزیابی دقت شبیه‌سازی این مدل نشان می‌دهند که مدل SWAT در اولین اجرا و با مقادیر اولیه پارامترهای به‌کار رفته در آن، به‌دلیل به‌دست آمدن مقادیر کم شاخص‌های ارزیابی دارای دقت قابل قبولی برای شبیه‌سازی بار رسوب حوضه آبخیز رودخانه دویرج نمی‌باشد و واسنجی و تحلیل عدم قطعیت پارامترهای این مدل می‌تواند به بهبود نتایج و افزایش دقت شبیه‌سازی آن کمک کند (جدول ۳ و ۵). بنابراین پس از این مرحله اقدام به واسنجی مدل به‌منظور شبیه‌سازی بار رسوب در حوضه آبخیز رودخانه دویرج گردید.

برای بهینه‌سازی و تحلیل حساسیت پارامترهای مدل SWAT از برنامه SUFI2 که در قالب نرم‌افزار SWAT\_CUP به مدل SWAT لینک شده است استفاده گردید. در ابتدا ۳۰ پارامتر در تولید رسوب حوضه آبخیز مؤثر شناخته شد که این پارامترها به همراه محدوده مجاز تغییرات آنها در مدل وارد شد و در جهت بهینه‌سازی خروجی‌های مدل، شبیه‌سازی با ۴۰۰۰ تکرار انجام گرفت. در مراحل مختلف به واقعی کردن پارامترها پرداخته شد و در نهایت مقادیر بهینه این پارامترها جهت شبیه‌سازی رسوب ماهانه حوضه مورد مطالعه تعیین شد (جدول ۴). نمودار ۱ همبستگی بین بار رسوب ماهانه مشاهده‌ای

جدول ۳. مقادیر اولیه پارامترهای به کار رفته در مدل SWAT در اولین اجرای آن

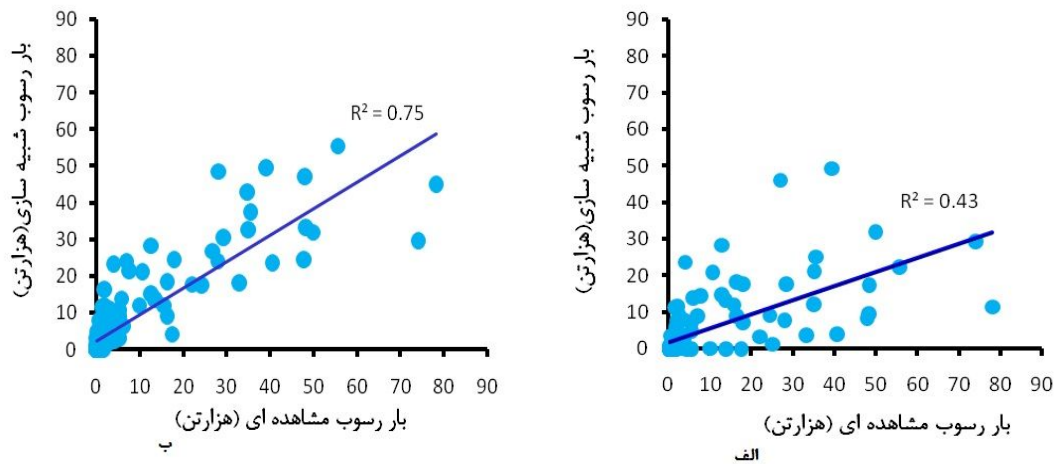
مقدار اولیه	حداکثر	حداقل	پارامتر	ردیف
۰/۰۴۸	۱	۰	Alpha_Bf	۱
۰	۱۰	۰	Canmx	۲
۰	۱	۰	Ch_Cov	۳
۰	۱	۰	Ch_Erod	۴
۰	۱۵۰	۰	Ch_K2	۵
۰/۰۱۴	۱	۰	Ch_N2	۶
USDA	۹۸	۳۵	Cn2	۷
۰/۹۵	۱	۰	Esco	۸
۳۱	۵۰	۰	Gw_Delay	۹
۰/۰۲	۰/۲	۰/۰۲	Gw_Revap	۱۰
۰	۱۰	۰	Shallst_N	۱۱
۰	۵۰۰۰	۰	Gwqmn	۱۲
۰/۰۰۳	۰/۴	۰	Gw_Spyld	۱۳
سطح خاک	۳۰	۰/۰۱	Ov_N	۱۴
۰/۰۵	۱	۰	Rchrg_Dp	۱۵
۱	۵۰۰	۰	Revapmn	۱۶
۱	۵	۰	Sftmp	۱۷
۴/۵	۱۰	۰	Smfmn	۱۸
۴/۵	۱۰	۰	Smfmx	۱۹
۰/۵	۵	۰	Smtmp	۲۰
۰/۵	۱	۰	Sol_Awc	۲۱
بافت خاک	۱۰۰	۰	Sol_K	۲۲
۱	۲/۵	۰/۹	Sol_Bd	۲۳
۳۰۰	۳۰۰۰	۰	Sol_Z	۲۴
۰/۰۰۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۰۱	Spcon	۲۵
۱	۲	۱	Spexp	۲۶
۴	۱۰	۰	Surlag	۲۷
۰	۵۰	۰	Tlaps	۲۸
خصوصیات خاک	۰/۶۵	۰	Usle_K	۲۹
۱	۱	۰	Usle_P	۳۰

جدول ۴. پارامترهای مؤثر در بار رسوب، مقادیر بهینه، حساسیت نسبی و معنی داری آنها

ردیف	پارامتر	مقدار بهینه	حداقل	حداکثر	t-Stat	P-Value
۱	r_CN2.mgt	-۰/۵۱	-۰/۶۵	۰/۴۵	-۲/۶۴	۰/۰۱
۲	v_ALPHA_BF.gw	۰/۴۹	۰	۱	-۰/۰۳	۰/۹۸
۳	v_GW_DELAY.gw	۴/۵	۰	۵۰۰	-۰/۱۴	۰/۸۹
۴	v_CH_N2.rte	۰/۸۹	۰	۱	۴/۶۶	۰
۵	v_CH_K2.rte	۳۷/۹۵	۰	۱۵۰	۰/۴۹	۰/۶۲
۶	r_SOL_AWC(1).sol	۰/۹۴	-۰/۹	۲	-۱/۱۲	۰/۲۷
۷	r_SOL_K(1).sol	۴۹/۵۴	-۰/۹	۵۰	۰/۳۶	۰/۷۲
۸	r_SOL_Z(1).sol	۸/۷۵	-۰/۹	۱۰	۳/۱۱	۰
۹	r_ESCO.hru	۰/۲۲	۰	۱	-۰/۲۷	۰/۷۹
۱۰	v_SFTMP.bsn	۱/۲۱	-۵	۵	-۰/۱۷	۰/۸۷
۱۱	v_SMTMP.bsn	-۱/۷۳	-۵	۵	۰/۳۲	۰/۷۵
۱۲	v_SMFMX.bsn	-۲/۸۹	-۴	۱۰	۰/۹۴	۰/۳۵
۱۳	v_SMFMN.bsn	۷/۴۷	-۴	۱۰	۱/۲۴	۰/۲۲
۱۴	v_GW_SPYLD.gw	۰/۷۹	۰	۱	-۱/۳۳	۰/۱۸
۱۵	v_GWQMN.gw	۲۵۴۵	۰	۵۰۰۰	۰/۰۳	۰/۹۸
۱۶	v_SHALLST.gw	۶۱	۰	۱۰۰۰	-۰/۸۲	۰/۴۱
۱۷	v_REVAPMN.gw	۲۸۰/۵	۰	۵۰۰	۰/۴۱	۰/۶۸
۱۸	v_TLAPS.sub	-۱/۰۵	-۵	۵	۱/۵۱	۰/۱۳
۱۹	v_GW_REVAP.gw	۰/۱۶	۰/۰۲	۰/۲	-۰/۷۰	۰/۴۸
۲۰	v_EPCO.hru	۰/۰۸	۰	۱	-۰/۸۰	۰/۴۲
۲۱	v_CH_COV.rte	۰/۱۸	۰	۱	۱/۱۲	۰/۲۶
۲۲	v_CH_EROD.rte	۰/۰۳	۰	۱	-۰/۵۷	۰/۵۷
۲۳	v_SPCON.bsn	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰۱	۰/۰۱	-۱/۸۸	۰/۰۶
۲۴	v_SPEXP.bsn	۱/۷۹	۱	۲	۱/۴۷	۰/۱۴
۲۵	r_USLE_P.mgt	-۰/۳۳	-۰/۹۹	۰/۵	-۱/۹۳	۰/۰۵
۲۶	v_CANMX.hru	۵/۳	۰	۱۰	-۰/۸۵	۰/۴۰
۲۷	v_RCHRG_DP.gw	۰/۲۷	۰	۱	-۱/۱۱	۰/۲۷
۲۸	r_USLE_K(1).sol	-۰/۱۸	-۰/۹	۰/۴	-۲/۸۶	۰
۲۹	v_OV_N.hru	۱۴/۷	۰/۰۱	۳۰	-۱/۵۰	۰/۱۳
۳۰	r_SOL_BD(1).sol	۰/۰۲	-۰/۲	۰/۴	۰/۵۶	۰/۵۷

v به معنی جایگزینی مقادیر موجود پارامتر با مقدار داده شده و t به معنی ضرب کردن مقادیر موجود پارامتر در (+۱ مقدار داده شده) است





نمودار ۱. همبستگی بین بار رسوب ماهانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده، (الف) قبل از بهینه‌سازی پارامترها و (ب) بعد از بهینه‌سازی پارامترها

جدول ۵. مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل‌سازی بار رسوب در مراحل مختلف اجرای مدل SWAT

مرحله واسنجی	اولین اجرای مدل	شاخص‌های ارزیابی
۰/۷۵	۰/۴۳	ضریب تبیین (R)
۰/۷۳	۰/۳۹	ضریب نش-ساتکلیف (NS)
۰/۶۵	۰/۲۸	ضریب $Br^2$

جدول ۶. حساسیت مطلق پارامترهای مدل SWAT و میزان تغییرات شاخص‌های ارزیابی آن

ردیف	پارامتر	Variation*	br	R	NS
۱	Ch_N2	۰/۶	۰/۶۲	۰/۷۱	۰/۷۶
۲	Usle_K	۰/۶	۰/۶۰	۰/۶۴	۰/۷۶
۳	Usle_P	۰/۶	۰/۶۱	۰/۶۷	۰/۷۵
۴	Spcon	۰/۶	۰/۶۴	۰/۷۵	۰/۷۲
۵	Tlaps	۰/۶	۰/۶۵	۰/۷۵	۰/۷۲
۶	Ov_N	۰/۶	۰/۶۱	۰/۷۲	۰/۷۲
۷	Spexp	۰/۶	۰/۶۵	۰/۷۴	۰/۷۴
۸	Gw_Spyld	۰/۶	۰/۶۵	۰/۷۴	۰/۷۳
۹	Smfmn	۰/۶	۰/۶۵	۰/۷۴	۰/۷۳
۱۰	Ch_Cov	۰/۶	۰/۶۴	۰/۷۵	۰/۷۱
۱۱	Sol_Awc	۰/۶	۰/۶۶	۰/۷۶	۰/۷۲
۱۲	Ch_Erod	۰/۶	۰/۶۴	۰/۷۵	۰/۷۳

\* مقدار بهینه یک پارامتر در ۰/۶ ضرب شده است و سایر پارامترها بدون تغییر به کار رفته‌اند.

## بحث و نتیجه گیری

مقایسه همبستگی بین بار رسوب ماهانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده، قبل و بعد از بهینه‌سازی پارامترها نشان می‌دهد که عملکرد آن با داده‌های پیش فرض رضایت‌بخش نیست. اما پس از تعیین مقادیر بهینه پارامترها، عملکرد مدل بهبود و دقت آن در حد قابل قبول افزایش یافته است که این نتیجه مؤید این مطلب است که واسنجی و بهینه‌سازی پارامترهای مدل می‌تواند به‌عنوان عامل کلیدی در کاهش عدم قطعیت، افزایش دقت در شبیه‌سازی، پیش‌بینی و به‌عنوان عاملی کمکی برای مدل‌سازی حوضه آبخیز با مدل SWAT در جهت رسیدن به اهداف مدیریتی حوضه آبخیز انجام گیرد. مدل واسنجی شده برای تحلیل بعدی تأثیر تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی مانند دیگر سناریوهای مدیریتی مختلف بر رواناب و فرسایش خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

براساس نتایج حاصل از تحقیق طالبی‌زاده و مرید (۶) در حوضه جنگلی کسلیان، پارامترهای شماره منحنی، فرسایش‌پذیری کانال و پوشش کانال و براساس نتایج حاصل از تحقیق شو و همکاران (۱۹) در حوضه مخزن Miyun پارامترهای شماره منحنی، فاکتور آلفای جریان پایه، فاکتور تصحیح تبخیر خاک، ظرفیت آب موجود در خاک، عمق پروفیل خاک، زمان تأخیر جریان سطحی، به‌عنوان حساس‌ترین پارامترها در واسنجی مدل SWAT برای غلظت رسوب شناخته شدند. ولی براساس نتایج این تحقیق پارامترهای ضریب مانینگ

رودخانه اصلی (CH\_N2)، عامل مربوط به فرسایش‌پذیری خاک در معادله جهانی هدررفت خاک (USLE\_K)، عامل مربوط به عملیات حفاظت خاک در معادله جهانی هدررفت خاک (USLE\_P) و ضریب مانینگ برای جریان سطحی (OV\_N) از پارامترهای بسیار مهم در تعیین میزان بار رسوب خروجی از حوضه شناخته شدند که این تفاوت نتیجه می‌تواند ناشی از تفاوت اقلیم، پوشش گیاهی، خاک‌شناسی و ویژگی‌های فیزیکی حوضه‌های مورد مطالعه باشد.

به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهد که از بین عوامل موثر بر بار رسوب به ترتیب چهار عامل فرسایش‌پذیری خاک در معادله جهانی هدررفت خاک، عملیات حفاظت خاک در معادله جهانی هدررفت خاک، ضریب مانینگ رودخانه اصلی و ضریب مانینگ برای جریان سطحی مؤثرترین عوامل می‌باشند که تغییر جزئی در آنها منجر به تغییرات شدید در بار رسوب حوضه می‌شود از اینرو در اقدامات کنترل بار رسوب برای دستیابی به نتایج و اهداف مورد نظر، باید تلاش‌ها بیشتر بر روی مدیریت و اصلاح این پارامترها متمرکز شود تا از هدررفت وقت و هزینه جلوگیری به عمل آید. همچنین در مطالعات حوضه‌های آبخیزی که دارای شرایط طبیعی شبیه حوضه آبخیز مورد مطالعه در این تحقیق می‌باشند دقت زیاد در تهیه مقادیر این پارامترها، کمک زیادی به بهبود نتایج خواهد کرد.

## منابع مورد استفاده

- احمدی، ح.، جعفری، م.، گلکاریان، ع.، ابریشم، ا. و ج. لافلن. ۱۳۸۶. برآورد فرسایش و رسوب با استفاده از مدل WEPP مطالعه موردی در حوضه آبخیز باراریه نیشابور. مجله پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی ۷۵: ۱۷۲-۱۶۱.
- پورعبدالله، م. و م. تجریشی. ۱۳۸۵. مدل‌سازی فرسایش حوضه ای به کمک مدل‌های RUSLE و SWAT (منطقه مورد مطالعه: زیر حوضه امامه)، هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران. دانشگاه تربیت مدرس. ۱۸ تا ۲۰ اردیبهشت ۱۳۸۵.
- دفتر حفاظت خاک و آبخیزداری. ۱۳۶۳. گزارش نهایی بررسی کلی حفاظت خاک و آبخیزداری ایران در گذشته، حال و آینده. مؤسسه تحقیقات آب و خاک کشور، تهران. ۱۰۸ص.

۴. رستمیان، ر. ۱۳۸۵. تخمین رواناب و رسوب در حوضه بهشت‌آباد در کارون شمالی با استفاده از مدل SWAT2000. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
۵. شفاعی بجستان، م. ۱۳۸۱. هیدرولیک رسوب. ویرایش دوم، انتشارات دانشگاه شهید چمران. اهواز.
۶. طالبی‌زاده، م. و س. مرید. ۱۳۸۷. کالیبراسیون و آنالیز عدم قطعیت یک مدل هیدرولوژی (SWAT) با روش SUFI در برآورد غلظت رسوب. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب. دانشگاه تبریز. ۲۳ تا ۲۵ مهرماه ۱۳۸۷.
۷. عرب‌خدری، م. ۱۳۸۱. برآورد بار رسوب معلق در ایران. مجله آبخیزداری. ۱۱: ۴-۶.
8. Abbaspour, K. C. 2008. SWAT-CUP2 (SWAT Calibration and Uncertainty Programs, Version 2). Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. Dübendorf, Switzerland, 95 P.
9. Arabkhedri, M. 2003. Suspended sediment yield in Iran. *J. Watershed Management*. 11: 4-6.
10. Bureau of Soil Conservation and Watershed Management. 1985. An overview on soil conservation and watershed management in Iran, past, present and future. Research Institute, Tehran, Iran. 108 P.
11. Mahmoudzadeh, A. 1994. A study on the relationship between sediment generation and land use. *J. Forest and Range* 36: 25-30.
12. Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry and J. R. Williams. 2005. Soil and Water Assessment Tool: Theoretical documentation, version 2005. USDA Agricultural Research Service & Black land Research Center. Texas, USA. 494P.
13. Neitsch, S. L., J.G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan and J. R. Williams. 2004. Soil and Water Assessment Tool input/output file documentation version 2005. USDA Agricultural Research Service & Black land Research Center. Texas, USA. 541 p.
14. Remegio, B., Jr. Confesor. 2007. Sensitivity analysis and interdependence of the SWAT model parameters. Written for presentation at the 2007 ASABE Annual International Meeting, p. 101.
15. Tripathi, R. P. 2001. Soil Erosion and Conservation. New Age International, (P)Ltd. New Delhi, India. 350 p.
16. Williams, J. R. 1975. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. PP. 244-252. *In* Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources: Proceedings of the sediment yield workshop, USDA Sedimentation Lab., Oxford, MS, November 28-30, 1972. ARS-S-40.
17. Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1965. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. *Agriculture Handbook* 282. USDA-ARS.
18. Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. *Agriculture Handbook* 282. USDA-ARS.
19. Xu, Z. X., J. P. Pang, C. M. Liu and J. Y. Li. 2009. Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment by using SWAT model. *Hydrol. Process*. 23: 3619-3630