



شبیه‌سازی رواناب و بار رسوب جنگل بهره‌بردار شده (مطالعه موردی: حوزه آبخیز ذیلکی رود)

عادل کاظمی طالکویی^۱، مقداد جورغلامی^{۲*}، کریم عباسپور^۳ و جهانگیر فقهی^۴

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج
^۲ دانشیار گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج
^۳ استاد مؤسسه علوم و فناوری آب، Eawag، دانشگاه ETH زوریخ، سوئیس
^۴ استاد گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۳/۷)

چکیده

در این پژوهش، تأثیر بهره‌برداری و جاده‌سازی جنگل بر تولید رواناب سطحی و بار رسوب حوزه ذیلکی رود بررسی شد. از مدل SWAT-CUP و الگوریتم SUFI-2 در شبیه‌سازی رواناب و بار رسوب و بهینه‌سازی پارامترهای این مدل و تعیین حساسیت پارامترهای مدل در حوزه آبخیز ذیلکی رود استفاده شد. مقادیر تابع هدف ضرایب NS و R^2 برای مرحله واسنجی رواناب به ترتیب ۰/۷۲ و ۰/۸۸ و برای مرحله اعتبارسنجی آن ۰/۸۳ و ۰/۸۹ و این ضرایب برای مرحله واسنجی بار رسوب به ترتیب ۰/۵۱ و ۰/۵۶ و برای مرحله اعتبارسنجی آن ۰/۶۶ و ۰/۷۳ به دست آمد. مقادیر تابع هدف در دوره واسنجی و اعتبارسنجی نشان‌دهنده شبیه‌سازی مطلوب دبی رواناب و بار رسوب ماهانه حوزه آبخیز رودخانه ذیلکی رود و کارایی مدل SWAT2012 پس از واسنجی پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم SUFI-2 بود. براساس نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای مدل، پارامترهای چگالی خاک در حالت مرطوب (SOL_BD) و شماره منحنی در شرایط رطوبتی متوسط (CN2) به عنوان حساس‌ترین پارامترها در تعیین مقدار دبی رواناب خروجی از حوزه و پارامترهای شماره منحنی در شرایط رطوبتی متوسط (CN2) و ضریب زبری مانینگ آبراهه‌ها و زهکش‌ها (CH_N2)، حساس‌ترین پارامترها در تعیین مقدار بار رسوب خروجی از حوزه تشخیص داده شدند. می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بهره‌برداری جنگل با کاهش سطح تاج‌پوشش و با فشرده کردن خاک در مسیرهای چوبکشی، سبب کاهش نفوذپذیری و ظرفیت ذخیره آب در خاک می‌شود و سرعت رواناب به رودخانه‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین جاده‌سازی جهت جریان رواناب به رودخانه را تغییر می‌دهد و با افزایش سرعت جریان‌های سطحی و فرسایش خاک سبب افزایش پیک سیلاب و بار رسوب می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اعتبارسنجی، آنالیز حساسیت، حوزه آبخیز ذیلکی رود، مدل SWAT، واسنجی.

مقدمه

محیط زیستی حوزه آبخیز از جمله افزایش توان سیل‌خیزی و تولید رسوبات است. کاهش پوشش جنگلی و گیاهی در اثر بهره‌برداری، اغلب سبب افزایش حجم رواناب سطحی می‌شود

دخالت در چرخه طبیعت از طریق تخریب پوشش گیاهی، کاربری غیراصولی اراضی و توسعه سطوح نفوذناپذیر، دارای پیامدهای نامناسب در منابع

مستقیم اندازه‌گیری کرد (Beven, 2001). این پارامترها باید از طریق واسنجی^۱ و اعتبارسنجی^۲ برآورد شوند، به طوری که مقادیر خروجی پیش‌بینی‌شده و مقادیر مشاهده‌ای با هم سازگار باشند (Jabary et al., 2015). مدل‌های هیدرولوژیکی زیادی برای شبیه‌سازی هیدرولوژی حوزه‌های آبخیز وجود دارند که می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی جهانی، پارامترهای آنها را واسنجی کرد. در این تحقیق از مدل هیدرولوژیکی نیمه‌توزیعی SWAT^۳ برای شبیه‌سازی دبی رواناب و بار رسوب و تجزیه و تحلیل عدم قطعیت متغیرهای میزان رواناب و بار رسوب استفاده شد (Shimelis, 2010; Xu, 2009). در این مدل، تنوع مکانی منطقه ابتدا با تقسیم آبخیز به زیرحوزه‌ها و سپس تقسیم زیرحوزه‌ها به واحدهای واکنش هیدرولوژیکی، براساس نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و نقشه طبقات شیب و شبیه‌سازی فرایند بارش، رواناب و رسوب برای هر یک از این واحدها به صورت جداگانه مشخص می‌شود (Schuol & Abbaspour, 2007; Shooshtari et al., 2017).

برای حساسیت‌سنجی، عدم قطعیت و واسنجی پارامترهای مدل SWAT با استفاده از روش معکوس، از الگوریتم SUFI-2^۴ در نرم‌افزار SWAT-CUP^۵ استفاده می‌شود (Abbaspour, 2011, 2015). علت انتخاب برنامه SUFI-2، توانایی این برنامه در مدیریت تعداد زیاد پارامترها، همزمانی آنالیزهای حساسیت‌سنجی و عدم قطعیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل است که به کاربر اجازه می‌دهد بارها واسنجی را تکرار کند تا همگرایی مورد نظر به دست آید (Me, 2015).

این تحقیق با هدف بررسی تأثیر بهره‌برداری و جاده‌سازی جنگل بر تولید رواناب سطحی و بار رسوب

(Etehadi Abari et al., 2017). مشکلاتی که امروزه در این چرخه پدید آمده است، هزینه‌ای است که انسان به دلیل شناخت نادرست این چرخه پیچیده و نیز نبود برنامه‌ریزی در طرح‌ها از نظر ارتباط بین مدیریت منابع و تحولات جوامع متحمل شده است. (Bruijnzeel 2004) بیان کرد که پوشش گیاهی اهمیت اساسی در بیلان آبی حوزه دارد. (Suryatmojo & Purnomo 2009) با بررسی عملکرد هیدرولوژیکی جنگل‌های تروپیکال اندونزی اظهار داشت که حتی در تخریب کم و بهره‌برداری گزینشی، به دلیل کاهش تبخیر و تعرق و در نتیجه افزایش رطوبت خاک، رواناب افزایش می‌یابد. قطع درختان جنگلی در طول زمان بر زمان سیلاب و مقدار رواناب تأثیر می‌گذارد و حذف درختان از طریق بهره‌برداری یا به دلیل تبدیل جنگل به کاربری‌های دیگر، نفوذپذیری را کاهش می‌دهد و بر جریان آب تأثیر می‌گذارد. مسیرهای چوبکشی و کاهش پوشش گیاهی عامل اصلی افزایش رواناب در جنگل‌های طبیعی هستند (Joriz et al., 2018). تخریب خاک، مسیرهای چوبکشی و شبکه جاده‌ها، هیدرولوژی مناطق کوهستانی را تغییر می‌دهد و روندیابی جریان‌ها را به رودخانه از طریق زهکش‌ها و مسیل‌ها عوض می‌کند و سبب افزایش اوج سیلاب و بار رسوب می‌شود (Sidle, 2006).

در تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار اکوسیستم حوزه‌های آبخیز، مدیران از مدل‌های هیدرولوژیکی به عنوان ابزاری برای شناخت و مدیریت فعالیت‌های طبیعی و انسانی تأثیرگذار بر سیستم‌های حوزه آبخیز استفاده می‌کنند. مدل‌های هیدرولوژیکی بیشتر شامل پارامترهایی هستند که به دلیل محدودیت‌های اندازه‌گیری نمی‌توان آنها را به صورت

1. Calibration
2. Validation
3. Soil and Water Assessment Tool (SWAT)
4. Sequential Uncertainty Fitting
5. SWAT_Calibration and Uncertainty Programs

از سال ۱۳۷۲ شروع شد. در ده سال نخست اجرای طرح برای دسترسی به اعماق جنگل بیش از ۹۰ کیلومتر جاده جنگلی در حوزه ذیلکی رود ساخته شد. از ۱۹۱۷۴۹ مترمکعب پروانه قطع صادر شده از سال ۱۳۷۲ تا ۱۳۸۶ در حوزه ۲۳ ذیلکی رود، ۳۶۹۶۷ مترمکعب برداشت برای احداث مسیر جاده و ۱۰۴۱۱ مترمکعب برای احداث مخزن سد شهر بیجار، ۷۴۱۴ متر مکعب برداشت نواری و بقیه برداشت تک‌گزینی و گروه‌گزینی است. این آمار نشان می‌دهد که در عرض ۱۵ سال بیش از ۴۰۰ هکتار از جنگل‌های حوزه برای اهداف یادشده قطع کامل شده و در سطح حدود ۷۰۰۰ هکتار جنگل بیش از ۲۰ مترمکعب در هکتار به‌طور متوسط برداشت‌گزینشی صورت گرفته و شدت برداشت به‌نسبت زیاد است. بیشتر سطح حوزه ذیلکی رود را سازند شمشک با سنگ‌های آهکی، ماسه‌سنگ و شیل زغالی تشکیل می‌دهد. اقلیم حوزه در طبقه‌بندی اقلیم‌نمای دومارتن در طبقه خیلی مرطوب نوع الف قرار می‌گیرد.

روش پژوهش

از نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان جغرافیایی ارتش برای شمال ایران با خطوط میزان ۲۰ متری برای مشخص کردن اطلاعات فیزیوگرافی حوزه با استفاده از نرم‌افزار Arc-GIS10.3 استفاده شد. در مرحله بعد، همه نقشه‌های حاوی اطلاعات زمینی شامل نقشه‌های خاک‌شناسی، زمین‌شناسی و پوشش گیاهی از کتابچه‌های مطالعات آبخیزداری و طرح‌های جنگلداری (تهیه‌شده توسط اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گیلان) در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تهیه شده و ضمن عملیات میدانی و کنترل صحرائی، اطلاعات پایه مورد نیاز مدل به‌صورت رقومی استخراج شد. داده‌های متغیر زمانی مثل دما، بارش، رطوبت نسبی، تابش آفتاب، سرعت باد، تبخیر و تعرق، دبی و بارمعلق رسوب به‌صورت روزانه (Arnold, 2012) برای دوره آماری ۲۴ ساله ۱۳۶۸-۱۳۹۲ از ایستگاه‌های

حوزه ذیلکی رود و شبیه‌سازی دبی رواناب و بار رسوب انجام گرفت تا ضمن واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT در حوزه‌های با سابقه بهره‌برداری جنگل، پارامترهای مؤثر در تولید رسوب و رواناب را شناسایی کند و با جامع‌نگری و نگاه سیستمی، ضمن استفاده چندمنظوره و پایدار از اکوسیستم جنگلی، منابع آب و خاک حوزه حفظ شود.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

حوزه آبخیز ۲۳ ذیلکی رود با مساحت ۲۳۸۶۷/۰۴ هکتار، از جنوب به کوه درفک و دیلمان، از شمال به حوزه ۲۴ ملکرد و رودخانه سفیدرود، از شرق به حوزه ۲۵ شنرود و جاده سیاهکل به دیلمان و از غرب به حوزه ۲۲ فری رود منتهی می‌شود. این حوزه در مختصات جغرافیایی $49^{\circ}53'30''$ تا $49^{\circ}38'02''$ طول شرقی و $36^{\circ}51'33''$ تا $37^{\circ}01'58''$ عرض شمالی واقع شده است. محیط حوزه ۷۹/۱۹۴ کیلومتر و بیشترین و کمترین ارتفاع منطقه از سطح دریا به‌ترتیب ۲۵۸۳ و ۸۳ متر است. متوسط بارندگی حوزه ۸۱۷ میلی‌متر است که ۲۷۰ میلی‌متر آن به‌صورت بارش برف است. پربارش‌ترین ماه‌های سال به‌ترتیب آبان، آذر و مهر و کم‌باران‌ترین ماه‌های منطقه اردیبهشت، خرداد و تیر در طی سال‌های آماری ۱۳۶۸ - ۱۳۹۲ بوده است. تعداد روزهای استرس آبی حوزه ۷۶ روز در سال و تعداد روزهای استرس دمایی حوزه ۷۵ روز در سال بوده است. از مجموع ۲۳۸۶۷/۰۴ هکتار مساحت حوزه، ۱۹۲۴۵/۲۱ هکتار جنگل انبوه، ۱۲۴۵/۵۵ هکتار جنگل نیمه‌انبوه، ۸۳۰/۵۲ هکتار جنگل تنک، ۵۳۱/۱۲ هکتار فضا‌های باز داخل جنگل و گاوسراها، ۱/۳۲ هکتار اراضی بدون پوشش، ۳۸۹/۹۷ هکتار زراعت آبی، ۶۲۶/۳۱ هکتار مراتع مشجر و باقی‌مانده ۹۹۷/۰۴ هکتار سایر کاربری‌هاست. بهره‌برداری از جنگل‌های حوزه ذیلکی

معیار p -value نشان‌دهنده اهمیت حساسیت پارامتر است که هر چه مقدار آن به صفر نزدیک‌تر باشد، پارامتر برای مدل مهم‌تر است. معیار t -stat اندازه حساسیت را نشان می‌دهد که هر چه بزرگ‌تر باشد، حساسیت پارامتر بیشتر است (Abbaspour, 2007). واسنجی با مقادیر بهینه جدید پارامترها و تعیین بهترین مقدار تابع هدف تکرار شد تا جایی که مقدار بهینه جدیدتر تابع هدف به‌دست نیامد و پارامترهای حساس‌تر، تعیین شد. پس از واسنجی پارامترها، مدل SWAT به‌صورت ماهانه برای داده‌های دوره ۱۳۹۲ - ۱۳۸۷ اعتبارسنجی شد. بعد از اعتبارسنجی و تعیین مقدار بهینه پارامترهای مؤثر، دوباره مقادیر پارامترهای مؤثر در نرم‌افزار ARCSWAT2012 وارد و مدل اجرا شد و مقادیر هیدرولوژیکی حوزه به‌دست آمد و با داده‌های فعالیت‌ها و بهره‌برداری‌های صورت‌گرفته در حوزه مقایسه شد.

تابع هدف و محدودیت‌ها

NS: این ضریب اختلاف نسبی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده را نشان می‌دهد. مقدار ضریب NS بین یک تا منفی بی‌نهایت تغییر می‌کند. مقدار بهینه این شاخص ۱ است. اگر میزان آن از ۰/۵ بیشتر باشد، مدل شبیه‌سازی خوبی داشته است (Arnold, 2012; Bressiani, 2015). در صورت منفی شدن ضریب NS بهتر است از نتایج مدل استفاده نشود و از متوسط مقادیر مشاهده‌ای استفاده شود.

R^2 : همخوانی بین مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی‌شده می‌تواند با استفاده از روش تجزیه رگرسیونی بررسی شود. ضریب تعیین، بیان‌کننده بخشی از کل واریانس مقادیر مشاهده‌ای است که توسط مقادیر شبیه‌سازی‌شده توجیه می‌شود. به عبارت دیگر، قسمتی از واریانس کل است که به‌وسیله رابطه خطی موجود بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی

داخل حوزه جمع‌آوری و تحلیل شد. پس از ایجاد پایگاه اطلاعاتی جامع لازم، مدل SWAT اجرا شد و شبکه هیدروگرافی، زیرحوزه‌ها و واحدهای واکنش هیدرولوژیکی^۱ به‌عنوان واحدهای مطالعاتی به‌دست آمد. سپس آمار و اطلاعات ایستگاه‌ها به مدل وارد شد. داده‌های سال‌های ۱۳۶۸ و ۱۳۶۹ به‌عنوان Warmup برای اجرای مقدماتی مدل SWAT2012 در نرم‌افزار ArcGIS10.3 استفاده شد و با کاربرد داده‌های ۱۳۷۰ - ۱۳۹۲ به‌صورت ماهانه مدل SWAT اجرا شد. پس از اجرای مدل SWAT و شبیه‌سازی هیدرولوژی حوزه، خروجی‌هایی شامل مؤلفه‌های رواناب، تولید آب، تولید رسوب و غیره به‌صورت فایل متنی حاوی اطلاعات به‌دست آمد. این فایل‌های متنی در پوشه‌ای به نام TxtInOut ذخیره شد. با اتصال این پوشه به نرم‌افزار SWAT-CUP با استفاده از روش معکوس و الگوریتم SUFI-2، با انتخاب پارامترهای مؤثر اولیه در رواناب و رسوب (Hartanto, 2003; Ndomba, 2005; Feyereisen, 2007)، در دوره آماری ۱۳۸۶-۱۳۷۰، واسنجی و حساسیت‌سنجی شدند و عدم قطعیت آنها با استفاده از این برنامه برآورد شد. علت انتخاب برنامه SUFI-2، توانایی این برنامه در مدیریت تعداد زیاد پارامترها، همزمانی تحلیل‌های حساسیت و عدم قطعیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل است. صحت برازش براساس ضریب نش- ساتکلیف (NS) یا شاخص‌های آماری R^2 و bR^2 بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده بهینه نهایی تعیین شد (Abbaspour, 2008; Me, 2015). پارامترهای مؤثر به‌همراه محدوده مجاز تغییرات آنها در مدل وارد شد و در جهت بهینه‌سازی خروجی‌های مدل، ۳۸ تکرار^۲ و در هر تکرار ۸۰ شبیه‌سازی انجام گرفت و بهترین مقدار تابع هدف به‌دست آمد. در مراحل مختلف با حساسیت‌سنجی حساسیت پارامترها به‌صورت دو معیار p -value و t -stat نشان داده شد.

1. Hydrologic Response Unit (HRU)
2. Iteration

بررسی شاخص‌های ارزیابی کارایی این مدل نشان داد که در اولین اجرا و با مقادیر اولیه پارامترهای ورودی، دارای دقت مناسبی برای شبیه‌سازی دبی رواناب و بار رسوب حوزه آبخیز ذیلکی رود نیست.

جدول ۲ شاخص‌های ارزیابی مدل‌های رواناب و رسوب را نشان می‌دهد. در تکرار^۱ ۲۴ واسنجی، بهترین مقدار تابع هدف ضرایب NS، R^2 و bR^2 برای مرحله واسنجی رواناب به ترتیب ۰/۷۲، ۰/۸۸ و ۰/۸۸۴ و برای مرحله اعتبارسنجی آن ۰/۸۳، ۰/۸۹ و ۰/۸۸ و این ضرایب برای مرحله واسنجی بار رسوب به ترتیب ۰/۵۱، ۰/۵۶ و ۰/۳۳ و برای مرحله اعتبارسنجی آن ۰/۶۶، ۰/۷۳ و ۰/۴۷ برآورد شدند.

مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل در دوره واسنجی و اعتبارسنجی نشان‌دهنده شبیه‌سازی مطلوب دبی رواناب و بار رسوب ماهانه حوزه آبخیز رودخانه ذیلکی رود و کارایی مدل SWAT2012 پس از واسنجی پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم SUFI-2 است.

شده توجیه می‌شود. ضریب تعیین بین صفر تا ۱ تغییر می‌کند و مقدار بهینه آن ۱ است.

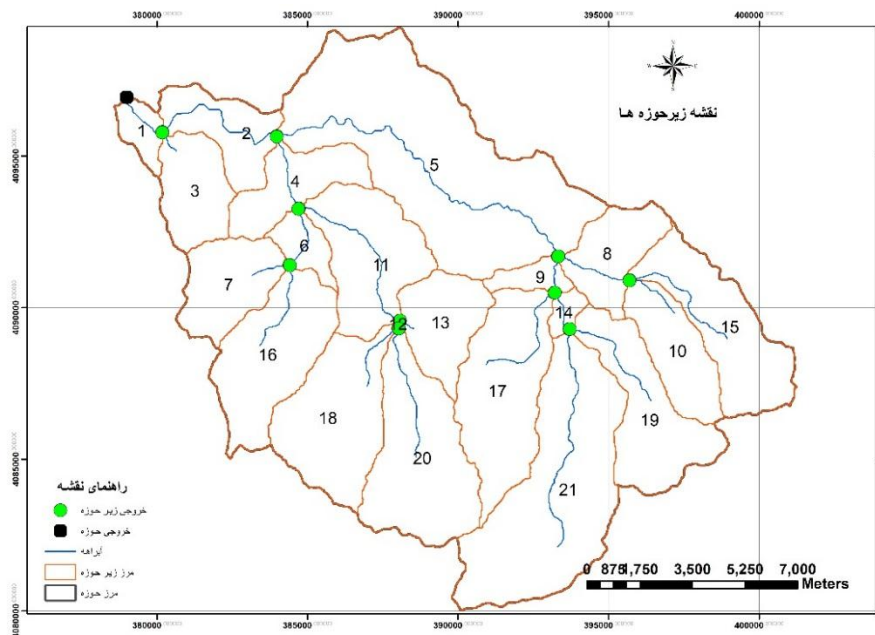
bR^2 : اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و همچنین پویایی بین آنها با استفاده از تابع bR^2 نشان داده می‌شود. این تابع حاصل ضرب ضریب تبیین در ضریب رگرسیون است. ضریب رگرسیون، اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و ضریب تبیین، پویایی بین آنها را نشان می‌دهد.

نتایج

براساس نتایج ضریب نش-ساتکلیف (NS)، ضریب تبیین (R^2) و ضریب bR^2 در اولین اجرای واسنجی بین داده‌های رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی به ترتیب ۰/۳۱، ۰/۵۱۲ و ۰/۵۰۱ و بین داده‌های بار رسوب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی به ترتیب ۰/۳۲، ۰/۴۸/۸۲ و ۰/۳۰۶ به دست آمد. نتایج مربوط به شبیه‌سازی رواناب و بار رسوب در اولین اجرای مدل SWAT و

جدول ۱- جدول زیرحوزه‌ها و واحدهای واکنش هیدرولوژیکی حوزه آبخیز ۲۳ ذیلکی رود

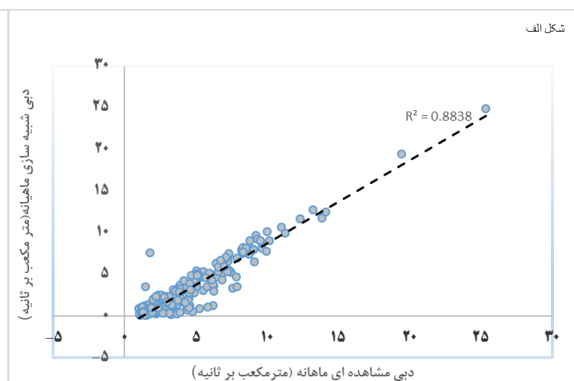
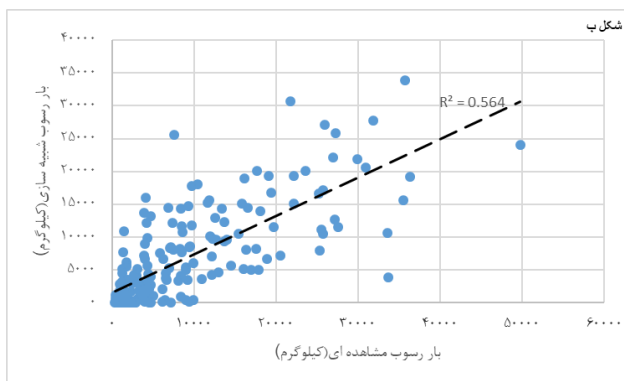
شماره زیرحوزه	مساحت (هکتار)	درصد	تعداد HRU	شماره زیرحوزه	مساحت (هکتار)	درصد	تعداد HRU
۱	۲۵۲/۳۲	۱/۰۶	۱۳	۱۲	۴/۸۴	۰/۰۲	۱۴
۲	۷۶۷/۵۶	۳/۲۲	۲۸	۱۳	۸۰۶/۹۲	۳/۳۸	۱۳
۳	۷۶۸/۹۶	۳/۲۲	۲۴	۱۴	۱۳۷/۴۴	۰/۵۸	۱۲
۴	۷۷۷/۱۲	۳/۲۶	۲۱	۱۵	۱۳۷۳/۳۶	۵/۷۵	۴۸
۵	۴۱۸۵/۸۰	۱۷/۵۴	۵۴	۱۶	۱۴۴۷/۴۴	۶/۰۶	۲۰
۶	۳۰۹/۷۲	۱/۳۰	۱۹	۱۷	۱۶۴۷/۴۸	۶/۹۰	۱۹
۷	۸۶۱/۳۲	۳/۶۱	۲۴	۱۸	۱۵۲۶/۹۶	۶/۴۰	۴۲
۸	۷۵۲/۰۸	۳/۱۵	۴۲	۱۹	۱۳۰۹/۲۴	۵/۴۹	۲۸
۹	۲۲۲/۵۶	۰/۹۳	۱۸	۲۰	۱۷۵۳/۴۴	۷/۳۵	۳۷
۱۰	۸۳۰/۷۶	۳/۴۸	۳۷	۲۱	۲۷۸/۶۸	۱۱/۶۷	۵۹
۱۱	۱۳۴۶/۴۰	۵/۶۴	۳۶	جمع	۲۳۸۶۷/۰۴	۱۰۰	۶۰۸



شکل ۱- نقشه زیرحوزه و آبراهه‌های حوزه ۲۳ ذیلکی رود

جدول ۲- مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل‌سازی رواناب و بار رسوب در مراحل مختلف اجرای مدل SWAT با ۹۵ درصد عدم قطعیت

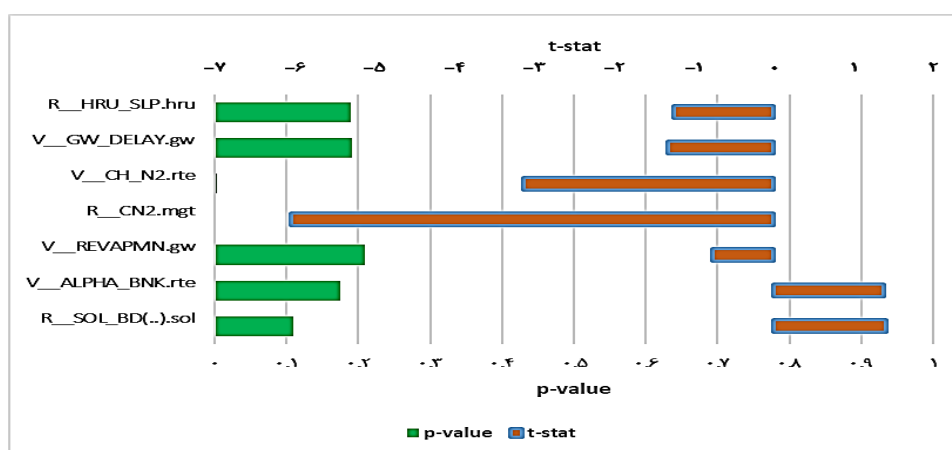
بار رسوب		رواناب		متغیر
مرحله	مرحله	مرحله	مرحله	شاخص‌های
اعتبارسنجی	واسنجی	اعتبارسنجی	واسنجی	ارزیابی مدل
۰/۷۳	۰/۵۶	۰/۸۹	۰/۸۸	R^2
۰/۶۶	۰/۵۱	۰/۸۳	۰/۷۲	NS
۰/۴۷۶	۰/۳۳	۰/۸۸	۰/۸۸۴	bR^2



شکل ۲- نمودار داده‌های پراکنده مقادیر ماهانه؛ الف) رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده؛ ب) بار رسوب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده حوزه آبخیز ۲۳ ذیلکی رود پس از واسنجی مدل SWAT دوره آماری ۱۳۷۰ تا ۱۳۸۶

سفره برای شروع تبخیر از آن (Revapmn) و شماره منحنی در شرایط رطوبتی متوسط (CN2) از پارامترهای بسیار مهم در تعیین میزان دبی رواناب خروجی از حوزه شناخته شدند که از بین آنها عامل چگالی خاک در حالت مرطوب (SOL_BD) و شماره منحنی (CN2) با t -stat بیش از ۱ و p -value حدود ۰/۱ به عنوان حساس ترین پارامتر تشخیص داده شد.

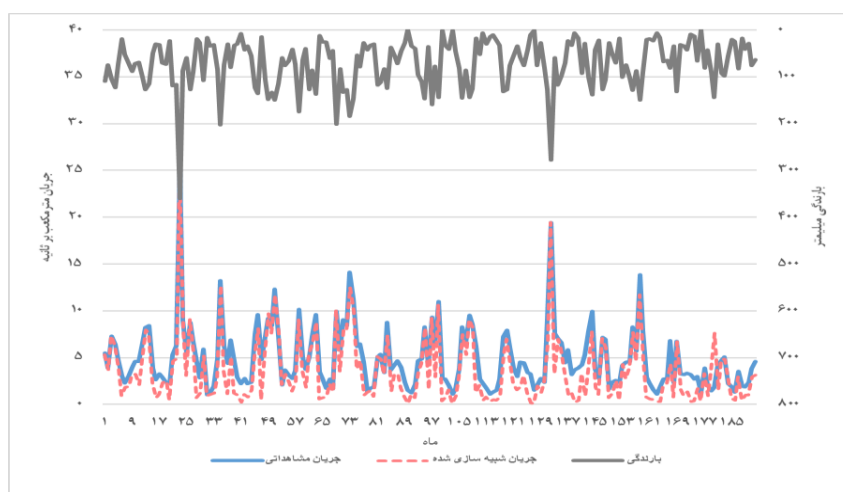
شکل ۳ حساسیت سنجی پارامترهای مؤثر در مدل سازی شبیه سازی رواناب و رسوب حوزه ۲۳ ذیلکی رود را نشان می دهد. براساس نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای مدل، پارامترهای چگالی خاک در حالت مرطوب (SOL_BD)، ضریب α آب پایه برای ذخیره سازی ساحلی زهکش ها و آبراهه های حوزه (ALPHA_BNK)، حداقل مقدار ذخیره آب لازم در



شکل ۳- حساسیت سنجی پارامترهای مؤثر در مدل سازی شبیه سازی رواناب و رسوب حوزه ۲۳ ذیلکی رود

بسیار مهم در تعیین مقدار بار رسوب خروجی از حوزه شناخته شدند که از بین آنها عوامل، شماره منحنی و ضریب مانینگ، حساس ترین پارامترها تشخیص داده شدند.

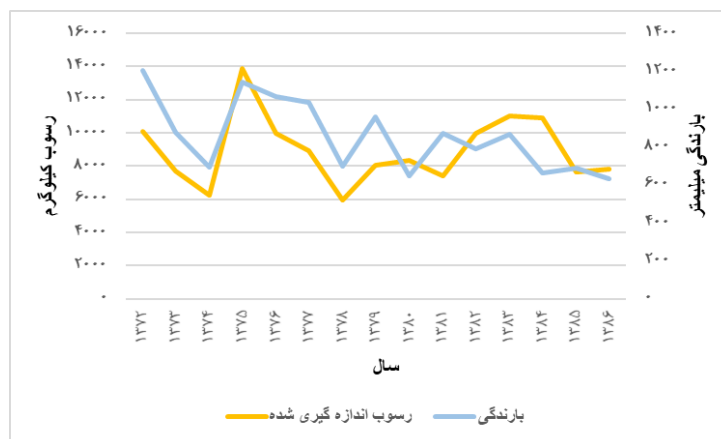
همچنین پارامترهای ضریب مانینگ آبراهه ها و زهکش ها (CH_N2)، شماره منحنی (CN2)، شیب واحدهای HRU (HRU_SLP) و زمان تأخیر انتقال آب به سطوح زیرین (GW_DELAY) از پارامترهای



شکل ۴- نمودار بارندگی و جریان مشاهده ای و شبیه سازی شده ماهانه حوزه آبخیز ۲۳ ذیلکی رود پس از واسنجی مدل SWAT دوره آماری ۱۳۸۶-۱۳۷۰

نشان می‌دهد که دبی اوج مقادیر شبیه‌سازی شده همزمان با دبی اوج مقادیر مشاهده‌ای اتفاق افتاده است.

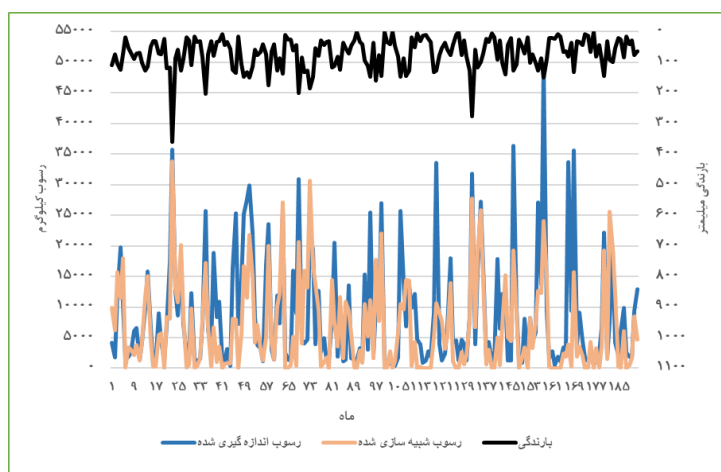
شکل ۴ نمودار بارندگی و جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده ماهانه حوزه آبخیز ۲۳ ذیلکی رود را پس از واسنجی مدل SWAT نشان می‌دهد. شکل ۴



شکل ۵- نمودار بار رسوب مشاهده‌ای و بارندگی سالیانه حوزه ۲۳ ذیلکی رود در دوره آماری ۱۳۷۲-۱۳۸۶

رسوب اوج مقادیر شبیه‌سازی شده همزمان با بارندگی اوج و رسوب اوج مقادیر مشاهده‌ای ولی با مقدار کمتر اتفاق افتاده است.

شکل ۵ مقایسه بار رسوب مشاهده‌ای و بارندگی سالیانه و شکل ۶ مقادیر رسوب ماهیانه شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در طول دوره زمانی تحقیق را بیان می‌کند. مقایسه نشان می‌دهد که



شکل ۶- نمودار بارندگی و بار رسوب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده ماهانه حوزه آبخیز ۲۳ ذیلکی رود پس از واسنجی مدل SWAT دوره آماری ۱۳۷۲ - ۱۳۸۶

بارندگی حوزه، $270/59$ میلی‌متر به‌صورت برف و $546/54$ میلی‌متر به‌صورت باران است. همچنین از $817/13$ میلی‌متر بارش، $162/33$ میلی‌متر به‌صورت

با ورود مقدار بهینه پارامترهای مؤثر و اجرای نهایی مدل SWAT برای شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژی حوزه ۲۳ ذیلکی رود، از $817/13$ میلی‌متر

سنگین با رس زیاد و با ظرفیت نفوذپذیری کم و مناطق پرشیب، بیشتر است.

نمودار بار رسوب مشاهده‌ای و حجم برداشت درختان در شکل ۷ و بررسی پروانه قطع‌های صادر شده نشان می‌دهد که خاک‌برداری‌های صورت گرفته برای جاده‌سازی جنگلی در چندین محور از سال ۱۳۷۲ که اوج آن سال‌های ۱۳۷۳، ۱۳۷۵ و ۱۳۸۰ بود و همچنین برداشت درختان و پاک‌سازی تراز ۱۶۰ و دپوی خاک برای آماده‌سازی تاج سد شهر بیجار در سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۶، سبب خاک‌برداری و جابه‌جایی حجم عظیمی خاک از بستر طبیعی شد و بارندگی‌های متوسط، خاک‌های ریخته‌شده روی زهکش‌ها و مسیل‌ها را حمل و سیلاب جاری کرد و سبب افزایش بار رسوب شد. این نتیجه با یافته‌های (2008) FAO تأیید می‌شود. برپایه این یافته‌ها تخریب جنگل می‌تواند سرعت رواناب به رودخانه‌ها را افزایش دهد که دلیل اصلی آن کاهش نفوذپذیری و ظرفیت ذخیره آب خاک است و همچنین جاده‌سازی، جهت جریان رواناب به رودخانه را تغییر می‌دهد و سبب افزایش پیک سیلاب و بار رسوب می‌شود. این یافته‌ها همچنین با نتایج پژوهش (Sidle et al. 2006) تأیید می‌شود. آنان بیان داشتند که تخریب خاک، مسیرهای چوبکشی و سیستم‌های جاده، هیدرولوژی مناطق کوهستانی را تغییر می‌دهد و روندیابی جریان‌ها به رودخانه را از طریق زهکش‌ها و مسیل‌ها عوض می‌کند و سبب افزایش پیک سیلاب و بار رسوب می‌شود. شکل ۷ نمودار بار رسوب مشاهده‌ای و حجم برداشت درختان مسیر جاده‌های جنگل و مخزن سد در دوره آماری ۱۳۸۶-۱۳۷۲ را نشان می‌دهد.

خروج ۳۹۶/۴ میلی‌متر در واحد سطح از بارندگی حوزه به‌صورت تبخیر و تعرق از برگ، تنه درختان و کف جنگل، تأثیر بسیار مهم جنگل‌های حوزه در تعادل چرخه هیدرولوژی و بیلان آبی حوزه را که برپایه رابطه Neitsch et al. (2002) است نمایان می‌کند. تخریب

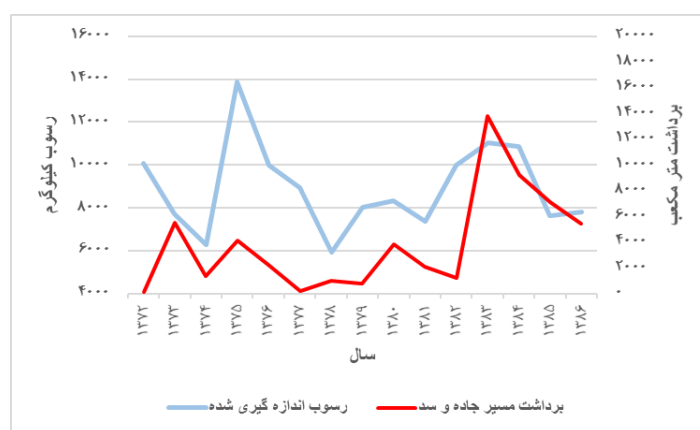
رواناب سطحی، ۲۲۷/۶۵ میلی‌متر به‌صورت جریان زیرسطحی و ۲۷/۹۳ میلی‌متر به‌صورت جریان برگشتی و در مجموع ۴۱۷/۹۱ میلی‌متر به‌صورت دبی و تولید آب حوزه از حوزه خارج می‌شود، ۳۹۶/۴ میلی‌متر به‌صورت تبخیر و تعرق از تاج و تنه درختان و کف جنگل تبخیر می‌شود و به جو برمی‌گردد و تنها ۲/۸ میلی‌متر با نفوذ به اعماق زمین از دسترس خارج می‌شود. تولید رسوب ماهیانه حوزه ۶/۹۸ تن در هکتار در سال است که بیشترین آن در اسفند و کمترین آن در تیر است. در بین کاربری‌ها بیشترین تولید رسوب در اراضی بایر، زراعت آبی و جنگل‌های تنک و تخریب‌یافته ارتفاعی است. از لحاظ مکانی نیز بیشترین تولید رسوب در زیرحوزه‌های ۲۱ و ۵ است.

بحث

مقادیر تابع هدف در دوره واسنجی و اعتبارسنجی، نشان‌دهنده شبیه‌سازی مطلوب دبی رواناب و متوسط بار رسوب ماهانه حوزه آبخیز ذیلکی‌رود با مدل SWAT پس از واسنجی پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم SUFI-2 بوده و کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی پس از واسنجی رضایت‌بخش است. نتایج این تحقیق با یافته‌های (Me et al. 2015) و (Shimelis 2010) مطابقت دارد. آنان بیان داشتند که شاخص‌های آماری نشان‌دهنده کارایی در پیش‌بینی رواناب با ضرایب تعیین و ضریب راندمان نش-ساتکلیف بزرگ‌تر از ۰/۵۰ است. یافته‌های این تحقیق نشان داد که پارامترهای عامل چگالی خاک در حالت مرطوب (SOL_BD) و شماره منحنی (CN2) حساس‌ترین پارامترها در تعیین دبی رواناب خروجی از حوزه‌اند. نتایج این تحقیق با یافته‌های (Tibebe 2010) مطابقت دارد. او رواناب و رسوب را در حوزه کتلا در اتیوپی با SWAT بررسی کرد. پارامترهای حساس نشان می‌دهند که تولید رواناب سطحی در بخش‌هایی از حوزه ذیلکی‌رود با خاک

قطع جنگل کاهش پیدا می‌کند، اما این کاهش فقط تا محدوده‌ای که خاک‌های جنگل تخریب شده و فشره می‌شود، ایجاد می‌شود و در مناطق تخریب‌نشده، مقدار نفوذ زیاد باقی می‌ماند. یافته‌های (Bruijnzeel 2004) نیز این نتیجه را تأیید می‌کند. او اظهار داشت پوشش گیاهی تأثیر زیادی در تعادل آب حوزه دارد.

پوشش گیاهی و کاهش باران‌رایی، سبب افزایش رواناب می‌شود. افزایش رواناب به کاهش ظرفیت نگهداری آب در خاک، افزایش سرعت جریان‌های سطحی و فرسایش خاک می‌انجامد. این نتیجه با یافته‌های (Stednick 1996) سازگار است. او بیان کرد در شرایطی که کف جنگل تحت عملیات چوبکشی بوده و خاک معدنی ظاهر شده باشد، نفوذ آب در خاک با



شکل ۷- نمودار بار رسوب مشاهده‌ای و حجم برداشت درختان مسیر جاده‌های جنگل و مخزن سد در دوره آماری ۱۳۷۲-۱۳۸۶

مختلف فرایندهای هیدرولوژیکی و فرسایش خاک در مدیریت جنگلداری و حوزه آبخیز باشد؛ اگرچه در مقایسه با مدل‌های دیگر، مدل SWAT به اطلاعات ورودی زیادی نیاز دارد که مستلزم صرف زمان و هزینه جمع‌آوری بیشتری است که از ضعف‌های مدل به‌شمار می‌رود. سازگاری مدل با محیط ARC-GIS کارایی این مدل را افزایش داده است. واسنجی و اعتبارسنجی مدل، عاملی اساسی در کاهش عدم قطعیت و افزایش اطمینان کاربر در شبیه‌سازی و پیش‌بینی مؤثرتر برای رسیدن به اهداف مدیریتی حوزه است. برای بررسی کارایی نتایج مدل پیشنهاد می‌شود که تحقیق در دو حوزه جفتی مجاور هم یا دو حوزه مشابه از لحاظ مورفولوژیکی بهره‌برداری‌شده و بهره‌برداری‌نشده صورت گیرد و نتایج با یکدیگر مقایسه شود تا تأثیرات بهره‌برداری جنگل و شدت‌های مختلف آن بر تولید رواناب و رسوب به‌صورت دقیق‌تر

مقایسه مقادیر دبی ماهیانه شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای در طول دوره زمانی تحقیق، نشان می‌دهد که دبی اوج مقادیر شبیه‌سازی‌شده همزمان با دبی اوج مقادیر مشاهده‌ای اتفاق افتاده و مدل SWAT به‌طور رضایت‌بخشی جریان رودخانه ذیلکی‌رود را شبیه‌سازی کرده است. یافته‌های بررسی کارایی و دقت مدل SWAT برای شبیه‌سازی دو متغیر بار رسوب و دبی رواناب حوزه آبخیز ۲۳ ذیلکی‌رود، همسو با نتایج تحقیقات (Rostamian 2008) و (Xu 2009) است و نشان می‌دهد که کارایی این مدل برای شبیه‌سازی دبی رواناب، بسیار بیشتر از کارایی آن برای شبیه‌سازی بار رسوب است.

به‌طور کلی مدل SWAT نوعی مدل اکوهیدرولوژیکی جامع در زمینه مطالعات مربوط به منابع طبیعی، می‌تواند ابزاری قدرتمند در برنامه‌ریزی‌ها و مدیریت‌های کلان و پیش‌بینی اهداف

و جزئی‌تر بررسی شود و به مدیریت حوزه آبخیز در
فرسایش و تولید آب باکیفیت کمک مؤثرتری کند.
زمینه حفاظت جنگل و منابع طبیعی آن، کنترل

References

- Abbaspour, K.C. (2008). *SWAT-CUP2 (SWAT Calibration and Uncertainty Programs, Version 2)*. Eawag; Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland, 95pp.
- Abbaspour, K.C. (2011). *SWAT-CUP4: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – A user manual*. Eawag, Swiss Federal Institute for Aquatic Science and Technology. 25p.
- Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., & Klove, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733-752.
- Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., & Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333(2-4), 413-430.
- Arnold, J.G, Kiniry, J.R., Srinivasan, R., Williams, J.R., Haney, E.B., & Neitsch, S.L. (2012). *Soil and water assessment tool Input/output documentation Version 2012*. Texas Water Resources Institute, College Station, TX. TR-439.
- Beven, K.J. (2001). *Rainfall-Runoff Modeling: The Primer*, John Wiley and Sons, Ltd., New York, New York. 372 p.
- Bressiani, D.A, Gassman, P.W, Fernandes, J.G, Garossa, L.H, Srinivasan, R, Bonuma, N.B, & Mendiondo, E.M. (2015). Review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: challenges and prospects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(3), 9-35.
- Bruijnzeel, L.A. (2004). Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees, *Agriculture, ecosystems and environment*, 104(1), 185-228.
- Etehad Abari, M., Majnonian, B., Malekian, A., & Jourgholami, M. (2017). Hydrological effects of forest selective harvesting on runoff and sediment yields (case study: Kheyroud Forest). *Journal of Natural Environment*, 70(3), 481-491.
- FAO, CIFOR, (2005). *Forests and Floods: Drowning in Fiction or Thriving in Facts*, RAP Publication 2005/03—Forest Perspectives 2. UN Food and Agriculture Organization and Center for International Forestry Research. Bangkok, Thailand.
- Feyereisen, G.W., Strickland, T.C., Bosch, D.D., & Sullivan, D.G. (2007). Evaluation of SWAT manual calibration and input parameter sensitivity in the little river watershed. *American Society of agricultural and biological engineers*, 50(3): 843-855.
- Hartanto, H., Prabhu, R., Widayat, A.S.E., & Asdak, C. (2003). Factors affecting runoff and soil erosion. *Forest Ecology and Management*, 180, 361-374.
- Jabary, A., TorabiPodeh, H., Hossaini, M., & Haghiabi, A.H. (2015). Evaluation of particle swarm optimization algorithm for calibration of SWAT hydrologic model parameters. *Iranian Water Research Journal*, 9(3), 99-109.
- Joriz, S., Jourgholami, M., & Malekian, A. (2018). Environmental impact of forest harvesting operations on runoff in skid trails skidding (case study: Kheyroud Forest). *Journal of Natural Environment*, 70(4), 813-828.

- Me, W., Abell, J.M., & Hamilton, D.P. (2015). Modelling water, sediment and nutrient fluxes from a mixed land-use catchment in New Zealand. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 12(4), 4315-4352.
- Ndomba, P.M., Mtalo, F.W., & Killingtveit, A. (2005). *The suitability of SWAT model in sediment yield modeling for ungauged catchments: a case of Simiyu River Subcatchment*, Tanzania, 3rd International SWAT Conference, Zurich, 61-69.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams J.R., & King, K.W. (2002). *Soil and water assessment tool user's manual*. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Temple, TX. 412 p.
- Rostamian, R., Jaleh, A., Afyuni, M., Mousavi, S.F., Heidarpour, M., Jalalian, A., & Abbaspour, K. (2008). Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrological Sciences*, 53, 977-988.
- Schuol, J., & Abbaspour, K.C. (2007). Using monthly weather statistics to generate daily data in a SWAT model application to West Africa. *Ecological Modeling*, 28, 301-311.
- Shimelis, G., Dargahi., B., & Melesse, M. (2010). Modeling of sediment yield from Anjeini-Gauged watershed, Ethiopia using SWAT model. *Journal of the American Water Resources Association*, 46, 3-15.
- Shooshtari, S.J., Shayesteh, K., Gholamalifard, M., Azari, M., Serrano-Notivoli, R., & López-Moreno, J.I. (2017). Impacts of future land cover and climate change on the water balance in northern Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 62(16), 2655-2673.
- Sidle, R.C., Ziegler, A.D., Negishi, J.N., Nik, A.R., Siew, R., & Turkelboom, F. (2006). Erosion processes in steep terrain -Truths, myths, and uncertainties, related to forest management in Southeast Asia. *Forest Ecology and Management*, 224, 199-225.
- Stednick, J.D. (1996). Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *Journal of Hydrology*, 176, 79-95.
- Suryatmojo, H., & Purnomo, W. (2009). *The Effect of Line Planting Toward Infiltration*. Proceeding of International Seminar. Research on Plantation Forest Management: Challenges and Opportunities, Bogor. P: 12-23.
- Tibebe, D., & Bewket, W. (2011). Surface runoff and soil erosion estimation using the SWAT model in the Keleta watershed, Ethiopia. *Land Degradation and Development*, 22, 551-564.
- Xu, Z.X., Pang, J.P., Liu, C.M., & Li, J.Y. (2009). Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment by using swat MODEL. *Hydrological Processes*, 23, 3619-3630.



Research Article

**Simulation runoff and sediment yield in a harvested forest
(Case study: Zailakirood Basin, northern Iran)**

A. Kazemi Talkouyee¹, M. Jourgholami^{2*}, K. Abbaspour³, and J. Feghhi⁴

¹Ph.D. student of Forest Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, I. R. Iran

²Associate Prof., Faculty of Natural Resources, University of Tehran, I. R. Iran

³Prof., Eawag, Swiss Federal Institute for Aquatic Science and Technology, Switzerland

⁴Prof., Faculty of Natural Resources, University of Tehran, I. R. Iran

(Received: 24 February 2018, Accepted: 28 May 2018)

Abstract

In this research, the impacts of forest operation and road construction on runoff and sediment yield were investigated in Zailakirood Basin. As there was only one hydrometric station and sediment measurement at the outlet of the basin, estimation of runoff and sediment from different parts of the Basin was not possible which limits our understanding of the effective factors. We used Soil and Water Assessment Tools (SWAT2012) and SWAT-CUP and SUFI-2 algorithm to model the monthly runoff and sediment yield at the outlet of the Basin. The values of the objective function, NS, and the coefficient of determination, R^2 , for runoff were 0.72 and 0.88, respectively, for calibration and 0.83 and 0.89 for validation. For sediment yield, we obtained R^2 0.51 and 0.56 for calibration and 0.66 and 0.73 for validation, respectively. Overall, we concluded that the SWAT model performance and capabilities were acceptable for simulating the monthly runoff and sediment yield in the Zailakirood Basin. Based on the results of sensitivity analysis for runoff, SOL_BD and CH_N2 were determined as the most sensitive parameters, whereas CH_N2 and CN2 were identified as the most sensitive parameters for sediment yield. It can be concluded that forest harvesting reduced the forest canopy and compact the soil of the skidding path, decreased the permeability and capacity of soil water storage, and increased the speed of runoff into rivers. Road construction changed the direction of runoffs to the rivers, increasing the speed of surface runoff and soil erosion. Overall, deforestation resulted in increases in the peak flows and sediment yield.

Keywords: SWAT model, Calibration, Validation, Sensitivity analysis, Zailakirood Basin.

