

بررسی تأثیر بهره‌برداری از جنگل بر دبی رواناب و هدررفت منابع آبی با استفاده از مدل SWAT در حوزه آبخیز جنگلی خیرود

مریم مرادنژادی^۱، مقداد جورغلامی^{۲*}، امید بزرگ حداد^۳

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 گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۱۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۲۳

چکیده

آگاهی از تأثیرات بهره‌برداری از جنگل بر مقدار هدررفت آب و وقوع سیلاب‌های ویرانگر، در مدیریت آبخیزهای جنگلی ضرورت دارد. در پژوهش حاضر، تأثیر بهره‌برداری از جنگل بر دبی رواناب و هدررفت آب در حوزه آبخیز جنگلی خیرود با استفاده از مدل بارش-رواناب SWAT بررسی شد. برای این منظور مدل واسنجی و سپس اعتبارسنجی شد. سپس با فرض کاهش شماره منحنی در اثر بهره‌برداری، با اعمال گزینه ۲۰ گزینه برداشت در هر پنج زیرحوضه و اجرای مکرر مدل SWAT، مقدار تغییرات دبی ماهانه با استفاده از شاخص‌های %F و f بررسی شد. واسنجی مدل با الگوریتم SUFI2 در نرم‌افزار SWAT-CUP انجام گرفت و برای اعتبارسنجی مدل SWAT از معیارهای ارزیابی خطا استفاده شد. نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT نشان داد که این مدل از عملکرد رضایت‌بخشی برخوردار است ($NSE=0/64$ و $RSR=0/59$). اجرای گزینه‌های مختلف بهره‌برداری نشان داد که با افزایش درصد بهره‌برداری از درختان جنگلی در زیرحوضه‌های واقع در سرشاخه و میانه حوضه، مقدار دبی ماهانه افزایش می‌یابد، درحالی که اجرای گزینه‌های مشابه در زیرحوضه‌های نزدیک خروجی حوضه، تأثیری در افزایش دبی ماهانه خروجی از حوزه آبخیز ندارد. در واقع زیرحوضه‌های واقع در میانه و سرشاخه‌های حوزه آبخیز خیرود، به دلیل همزمانی دبی خروجی زیرحوضه‌ها در خروجی حوزه آبخیز، به همراه شرایط فیزیوگرافی مستعد تولید رواناب، شرایطی را رقم می‌زند که با اجرای گزینه‌های بهره‌برداری، دبی ماهانه خروجی از حوزه آبخیز خیرود با افزایش ملموس‌تری مواجه شود. یافته‌های پژوهش حاضر می‌تواند در انتخاب مناسب‌ترین مکان برای بهره‌برداری، با رویکرد کنترل سیلاب و جلوگیری از هدررفت منابع آبی مفید واقع شود.

واژه‌های کلیدی: بارش-رواناب، بهره‌برداری جنگل، حوزه آبخیز جنگلی، دبی ماهانه، مدل SWAT.

مقدمه

می‌گذارد، به طوری که آثار چنین تغییراتی در واکنش‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی و تنوع زیستی مشهود است [۱]. در بسیاری از پژوهش‌های انجام‌گرفته تغییر جریان رواناب [۱-۶]، جریان آب زیرزمینی [۳-۷، ۹]، تبخیر و تعرق [۵، ۸-۱۰]، انتقال رسوب معلق [۴]، پارامترهای کیفی آب [۱۱] و

تغییرات پوشش/کاربری جنگل از اصلی‌ترین تغییرات در مقیاس جهانی است که افزون بر آسیب رساندن به اکوسیستم، تأثیر شدیدی بر معیشت جوامع انسانی

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۲۶۳۲۲۴۹۳۱۲

Email: mjgholami@ut.ac.ir

مدل‌های بسیاری برای ارزیابی تأثیرات تغییرات کاربری گذشته و آینده در شرایط هیدرولوژیکی استفاده شده است که یکی از این مدل‌ها، مدل نیمه‌توزیعی SWAT^۲ است. SWAT یک مدل فیزیکی است که در دهه ۱۹۹۰ توسعه یافته است. این مدل برای پیش‌بینی تأثیر شیوه‌های مدیریت زمین بر آب، رسوب در حوزه‌های آبخیز بزرگ با شرایط مختلف در طی دوره طولانی مدت طراحی شده است [۹]. مدل SWAT به دلیل تأکید بر تعاملات پوشش گیاهی و شرایط هیدرولوژیکی مبتنی بر پوشش/کاربری اراضی مناسب کرده است [۶،۴،۳].

در پژوهش‌های متعددی به بررسی تأثیر تغییرات پوشش اراضی بر پارامترهای هیدرولوژیکی با استفاده از مدل SWAT پرداخته شده است. Wu و همکاران [۱۲] در یک پژوهش در حوزه آبخیز جنگلی رودخانه هیبه^۳ در شمال غرب چین با کاربرد مدل SWAT نشان دادند که سناریوی افزایش ۱۲ درصدی مساحت جنگل، عملکرد کل آب ۱۲/۶ میلی‌متر افزایش و مقدار تولید رواناب ۲۲/۲ میلی‌متر کاهش می‌یابد. محققان مذکور عنوان کردند که این کاهش، نشان‌دهنده تأثیر بستر اسفنجی جنگل بر منابع آب در حوزه آبخیز کوهستانی است. Sajikumar و همکاران [۱۵] در دو حوزه آبخیز در جنوب هند، با استفاده از مدل SWAT نشان دادند که با کاهش ۶۰ و ۳۲ درصدی پوشش جنگلی، مقدار دبی پیک به‌طور متوسط به ترتیب ۱۷/۳ و ۱۵/۸ درصد افزایش می‌یابد. Marhaento و همکاران [۶] در پژوهشی در حوزه آبخیز سامین^۴ در جاوه در اندونزی با کاربرد مدل SWAT نشان دادند که با کاهش مساحت پوشش جنگلی از ۴۹ درصد به ۱۷ درصد، افزایش اراضی کشاورزی از ۳۹ درصد به ۴۵ درصد و اراضی مسکونی از ۱۰ درصد به ۳۴ درصد،

بیان آبی [۶] در اثر تغییرات پوشش/کاربری به‌ویژه در حوزه‌های آبخیز جنگلی گزارش شده است. به‌طور معمول استدلال می‌شود که جنگل‌ها به‌واسطه تبخیر و تعرق (ET^۱)، سبب افزایش هدررفت رطوبت می‌شوند و از طرف دیگر به‌سبب داشتن بسترهای اسفنجی، رطوبت خاک بیشتری را حفظ می‌کنند؛ بنابراین در حوزه‌های آبخیز جنگلی، جریان آب کمتری نسبت به حوضه‌هایی که کاربری اراضی دیگری دارند، تولید می‌شود [۱۲،۱]. جنگل‌زدایی، تولید رواناب و دبی پیک سالانه به‌ویژه در فصل مرطوب را با افزایش مواجه می‌کند، اما با افزایش هدررفت آب، روند تداوم جریان آب نیز در فصول خشک با کاهش همراه می‌شود [۱۴،۱۳،۹،۱]، چراکه بین درصد پوشش جنگلی و جریان پایه آب رابطه مستقیمی برقرار است [۶،۲] و به همین سبب این مسئله همراه با کاهش منابع آبی، رخداد سیلاب‌های مخرب و فرسایش خاک را به همراه دارد [۱۴،۴]. از طرف دیگر بازیابی تغییرات رخ داده در اثر تغییرات پوشش جنگلی همچون تغییرات در رژیم جریان کم‌آبی و دبی اوج از طریق جنگلکاری، ممکن است طولانی‌تر از حد انتظار باشد، زیرا به‌علت فرسایش شدید خاک و از دست رفتن خاک، ظرفیت نفوذپذیری پس از جنگل‌زدایی کاهش می‌یابد [۱۴]. به همین سبب آگاهی از شرایط حوزه‌های آبخیز، تعیین اولویت و مقایسه آنها، ارزیابی و درک رابطه بین تغییر کاربری اراضی و بررسی پاسخ هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز ضرورت دارد که این امر در تلاش‌های مدیریتی برای به حداقل رساندن آثار ناخواسته می‌تواند بسیار مفید باشد [۴]. در واقع ارزیابی آثار تغییرات پوشش/کاربری در هیدرولوژی، گامی مهم در راهبردهای مدیریت آبخیزداری شامل برنامه‌ریزی منابع آب و اقدامات حفاظتی است [۸]. امروزه به‌منظور ارزیابی تأثیرات تغییر پوشش/کاربری زمین در بیان آب، به‌طور معمول از روش مدل‌سازی استفاده می‌شود [۱۰،۶].

2. Soil and Water Assessment Tool
3. Heihe
4. Samin

1. Evapotranspiration

به دریای خزر می‌ریزند. رژیم بارندگی این حوضه براساس شاخص طبقه‌بندی اقلیمی کوپن، کاملاً مدیترانه‌ای و میانگین بارش سالانه حدود ۱۲۷۵ میلی‌متر است. ارتفاع متوسط حوزه آبخیز خیرود ۱۴۰۰ متر و ارتفاع حداقل و حداکثر آن به ترتیب ۱۰ و ۲۶۲۱ متر از سطح دریاست. این حوضه از نظر ژئومورفولوژیکی حوضه‌ای کوهستانی است، به طوری که اختلاف ارتفاع آن ۲۳۶۱ متر و شیب متوسط آن ۳۵ درصد است.

روش تحقیق

پژوهش حاضر در دو مرحله انجام گرفت: در مرحله اول، مدل پیوسته توزیعی بارش - رواناب SWAT برای دوره ۲۰۱۰-۲۰۰۲ واسنجی شد و سپس برای دوره ۲۰۱۴-۲۰۱۱ برای ایستگاه هیدرومتری خیرود واقع در خروجی حوزه آبخیز اعتبارسنجی صورت گرفت. در مرحله دوم برای ارزیابی تأثیرات بهره‌برداری، گزینه‌های مختلف در نظر گرفته شد و با اعمال گزینه‌های بهره‌برداری مذکور در مدل SWAT، تغییرات دبی ماهانه در هر کدام از زیرحوضه‌ها بررسی شد که در ادامه آمده است. در شکل ۱ نمودار گردش کار نشان داده شده است.

مدل SWAT

در پژوهش حاضر، برای بستن مرز حوزه آبخیز و تفکیک زیرحوضه‌ها با کاربرد افزونه ArcSWAT از DEM ۳۰ متری ماهواره ASTER استفاده شد. بر این اساس، حوزه آبخیز خیرود شامل پنج زیرحوضه است (شکل ۲). هر زیرحوضه براساس نوع خاک، کاربری اراضی و طبقات شیب به واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRUs^۱) تفکیک می‌شود که امکان شبیه‌سازی در سطوح کوچک‌تر را ارائه می‌کند [۸،۹]. چرخه هیدرولوژیکی که در این مدل شبیه‌سازی می‌شود براساس بیلان آبی است که به صورت رابطه ۱ است [۸،۹]:

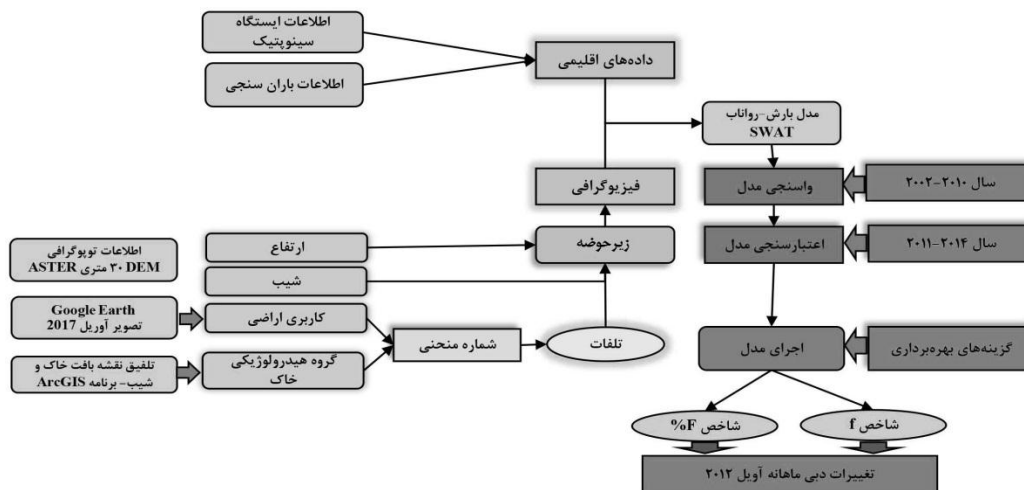
ضریب رواناب از ۳۶ درصد به ۴۵ درصد، جریان رواناب سطحی از ۲۷ درصد به ۳۸ درصد افزایش یافته است. یافته‌های Guzha و همکاران [۱] در حوزه‌های آبخیز شرق آفریقا با استفاده از مدل SWAT نشان می‌دهد که با کاهش ۶۳ درصدی پوشش جنگلی، جریان سالانه و رواناب سطحی به ترتیب $16 \pm 5/5$ درصد و 45 ± 14 درصد و دبی پیک نیز $10 \pm 2/8$ افزایش پیدا می‌کند و جریان پایه $7 \pm 5/3$ کاهش می‌یابد.

با توجه به پژوهش‌های انجام‌گرفته، اگرچه تأثیرات تغییر کاربری/پوشش بر رواناب خروجی از حوزه آبخیز، بررسی شده است، به چالش‌های پیچیده مدیریت بهره‌برداری از اراضی و پوشش جنگلی با رویکرد کنترل سیلاب و جلوگیری هدررفت منابع آبی، کمتر پرداخته شده است. به همین سبب، هدف پژوهش حاضر به‌کارگیری روشی است که بتوان با انتخاب مناسب‌ترین مکان برای بهره‌برداری از درختان جنگلی، امکان مدیریت بهینه منابع آبی را فراهم کرد. برای این منظور در پژوهش حاضر با طراحی گزینه‌های متعدد بهره‌برداری از درختان جنگل و استفاده از مدل بارش - رواناب SWAT به بررسی تأثیر اجرای این گزینه‌ها در زیرحوضه‌های مختلف، بر دبی رواناب خروجی از حوزه آبخیز جنگلی خیرود پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

موقعیت حوزه آبخیز تحت بررسی

حوزه آبخیز خیرود با مساحت $98/73$ کیلومتر مربع در شهرستان نوشهر در استان مازندران قرار گرفته است. این منطقه از روستای نچارده شروع و به ارتفاعات هشتادتن منتهی می‌شود. رودخانه اصلی این حوضه از جنگل‌های بالادست در روستای کهنه‌ده و کلیک سرچشمه گرفته است و در قسمت جنوب غربی بخش پاتم با رودخانه‌های جنگل گلبنده هم می‌پیوندند و با تشکیل رودخانه خیرود



شکل ۱. روندنمای پژوهش

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (2)$$

$$Q_{Surf} = \left\{ \frac{(R - 0.2S)^2}{(R + 0.8S)} \right\}, \quad R > 0.2S \quad (3)$$

در رابطه‌های ۲ و ۳؛ S تلفات حوضه به میلی متر، CN شماره منحنی، R ارتفاع بارندگی روزانه برحسب میلی متر و Q_{Surf} ارتفاع رواناب برحسب میلی متر است.

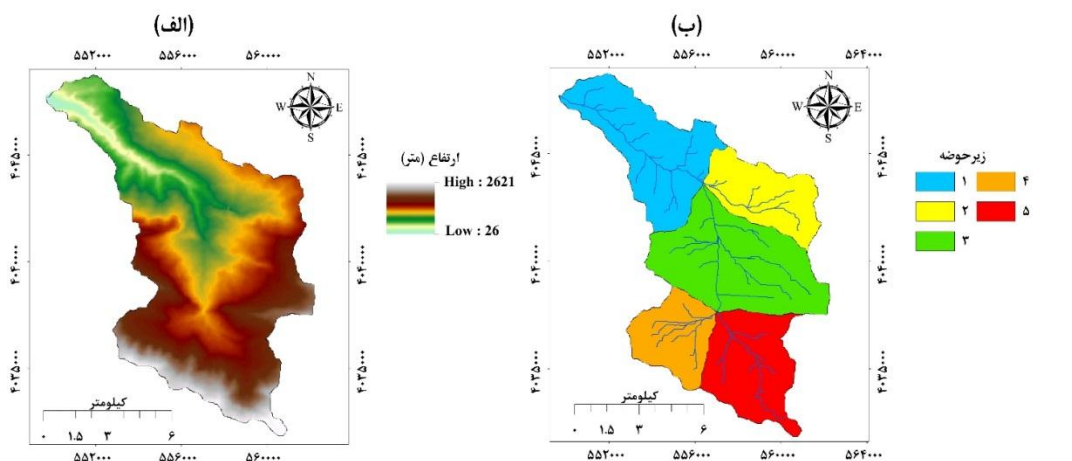
به منظور تهیه نقشه کاربری اراضی از برنامه Google Earth نسخه Professional استفاده شد. در این نسخه، امکان دسترسی به آرشیو تصاویر تاریخی از محدوده‌ای معین وجود دارد که از تصاویر سال ۲۰۱۷ استفاده شد. استفاده از تصاویر Google Earth، به سبب قدرت تفکیک مکانی زیاد تصاویر و سهولت تفسیر بصری، در بسیاری از پژوهش‌ها معمول است [۱۷]. با تلفیق طبقات شیب با طبقات نفوذپذیری، نقشه گروه‌های هیدرولوژیکی خاک تهیه شد [۱۶]. پس از تهیه نقشه کاربری اراضی و نقشه گروه هیدرولوژیکی با تلفیق نقشه‌های مذکور براساس جدول SCS، در نهایت نقشه شماره منحنی تهیه شد (شکل ۳). سپس با ورود داده‌های اقلیمی ایستگاه سینوپتیک نوشهر، شبیه‌سازی اولیه مدل اجرا شد.

$$SWt = SWo + \sum_{i=1}^t (Rday - Q_{surf} - Ea - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

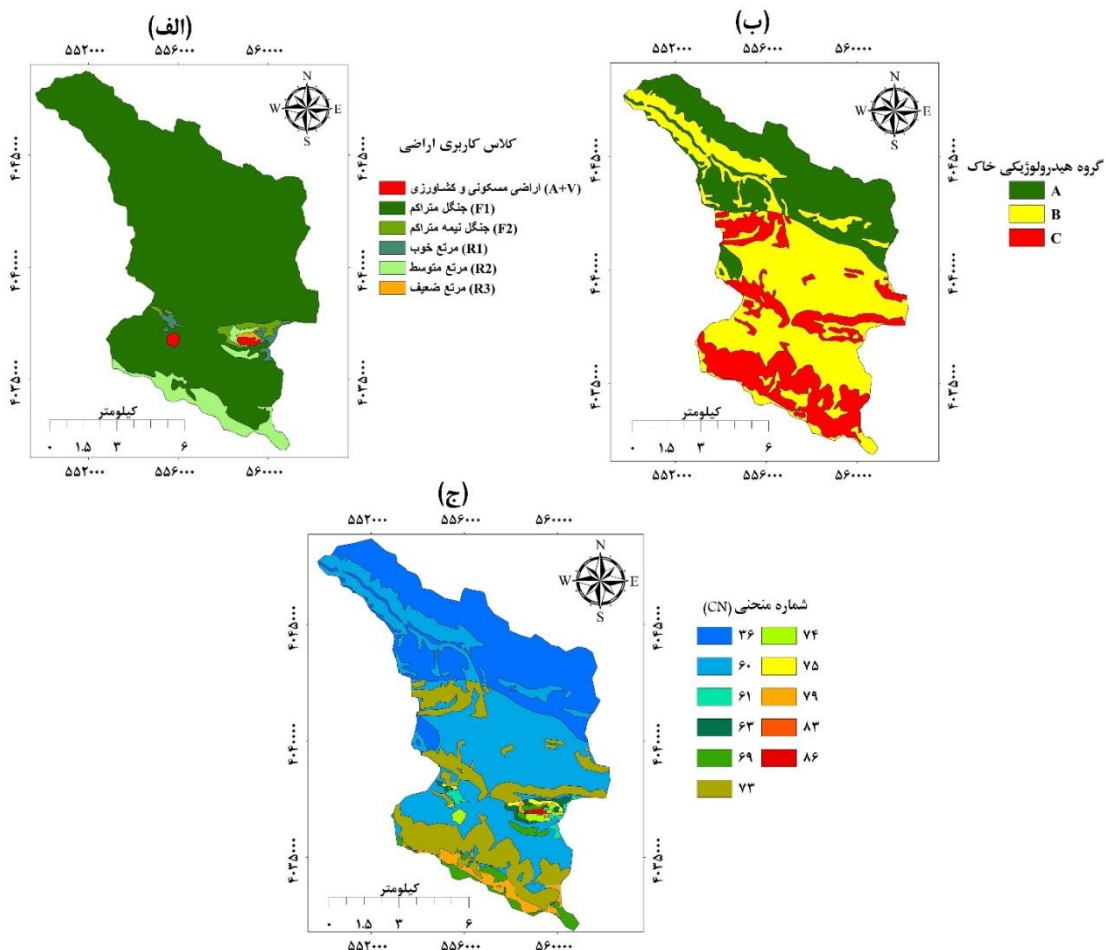
SWt مقدار نهایی آب در خاک (میلی متر)، t زمان (روز)، SWo مقدار آب موجود در خاک (میلی متر)، Rday مقدار بارش در روز Δt (میلی متر)، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی در روز Δt (میلی متر)، Ea مقدار تبخیر و تعرق در روز Δt (میلی متر)، Wseep مقدار آب نفوذ کرده به منطقه قشری در نیمرخ خاک (میلی متر) و Q_{gw} مقدار جریان برگشتی در روز Δt (میلی متر) است.

با توجه به اینکه در مدل SWAT شرایط فیزیکی واقعی در حوزه آبخیز ارائه می‌شود، می‌توان تأثیر این شرایط مانند پوشش زمین، خاک و مدیریت بر رفتار هیدرولوژی را بررسی کرد [۵]. به همین سبب، در پژوهش حاضر برای محاسبه رواناب سطحی از روش سازمان حفاظت خاک ایالات متحده (SCS^۱) استفاده شد [۱۶]. در روش SCS به منظور تعیین بارش مازاد یا رواناب، به مقدار کل تلفات یا S نیاز است که با استفاده از رابطه ۲ با یک عامل بی بعد^۲ به نام شماره منحنی (CN^۳) محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از رابطه ۳ ارتفاع رواناب ناشی از بارندگی روزانه محاسبه می‌شود [۸].

1. Soil Conservation Service
2. Dimensionless
3. Curve Number



شکل ۲. نقشه DEM ماهواره استر (الف) و زیرحوضه‌های حوزه آبخیز خیرود (ب)



شکل ۳. نقشه کاربری اراضی (الف)، گروه‌های هیدرولوژیکی خاک (ب) شماره منحنی (ج) حوضه

واسنجی و اعتبارسنجی مدل

پس از اجرای اولیه مدل، با استفاده از داده‌های ایستگاه سینوپتیک و ایستگاه هیدرومتری خیرود در دوره ۲۰۱۰-۲۰۰۲، مدل واسنجی شد. واسنجی مدل برای به دست آوردن مقدار بهینه پارامترها با استفاده از ویرایش دوم الگوریتم SUFI2 در نرم افزار SWAT-CUP انجام گرفت. این الگوریتم، به منظور نشان دادن حساسیت هر کدام از پارامترها از دو فاکتور t-Stat و p-Value استفاده می‌کند. هر چه مقدار t-Stat بدون در نظر گرفتن جهت آن بزرگ‌تر و مقدار P-Value کمتر باشد، حساسیت پارامتر بیشتر است [۲،۶]. برای این منظور، ابتدا ۳۳ پارامتر مؤثر و مهم برای واسنجی مدل انتخاب شد. دامنه تغییرات پارامترها براساس پیش فرض مدل و اطلاعات ایستگاه هیدرومتری خیرود تنظیم شد. پس از آنالیز حساسیت، تعداد پارامترها به ۱۰ عدد تقلیل یافت که در مرحله نهایی شبیه‌سازی وارد مدل شدند. درجه عدم قطعیت‌ها با اندازه‌گیری فاکتور P که درصد جزء صحیح داده‌های اندازه‌گیری شده با ۹۵ درصد عدم قطعیت (95PPU) در پیشگویی است، مشخص می‌شود. پس از کالیبراسیون مدل، از پارامترهای بهینه برای ارزیابی مدل در دوره ۲۰۱۴-۲۰۱۱ استفاده شد. به منظور ارزیابی عملکرد مدل بارش-رواناب SWAT از معیارهای خطای مختلف و از معیارهای ارزیابی خطا شامل، نسبت ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE^1$) به انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده (RSR) ضریب تعیین (R^2)، ضریب کارایی ناش-ساتلکیف (NSE^2) و ضریب کارایی کلینگ-گوپتا (KGE) استفاده شد [۴،۹]. به منظور ارزیابی مدل‌سازی جریان رودخانه، رتبه‌بندی براساس ضرایب NSE و RSR که توسط Moriasi و همکاران [۱۸] پیشنهاد شده که در جدول ۱ ارائه شده است.

گزینه‌های بهره‌برداری

در روش سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS)، عدد

شماره منحنی اختصاص یافته به هر یک از کاربری‌ها با توجه به ویژگی‌های توصیفی کاربری اختصاص یافته است [۱۸]. به عنوان مثال برای کاربری جنگلی تنها با توجه به ویژگی‌های توصیفی همچون جنگل خوب، جنگل متوسط و جنگل ضعیف، شماره منحنی خاصی اختصاص یافته است، بدون آنکه مشخص شود منظور از واژه‌های خوب، متوسط و ضعیف، چه کمیتی از درصد پوشش جنگلی را در بر می‌گیرد. بر این اساس به منظور دستیابی به روشی که بتوان به صورت کمی با توجه به مقدار درصد پوشش جنگلی، عددی به عنوان شماره منحنی برای کاربری جنگلی با مقدار درصد پوشش مشخص در نظر گرفت، در این تحقیق فرضیاتی اختیار شد تا بتوان گزینه‌هایی را به صورت کمی در نظر گرفت. برای این منظور ابتدا فرض شد که پوشش جنگلی خوب، متوسط و ضعیف به ترتیب دارای درصد پوشش ۱۰۰، ۷۰ و کمتر از ۴۰ درصد است. از این رو برای انجام گزینه‌های مختلف با درصد برداشت‌های مختلف با توجه به موارد گفته شده، از روش تناسب استفاده شد. برای سهولت بررسی تأثیر گزینه‌های بهره‌برداری از هر یک از زیرحوضه‌ها بر مقدار دبی رواناب تولیدی، داده‌های اقلیمی آوریل سال ۲۰۱۲ استفاده شد، چراکه دبی ماهانه خروجی از حوزه آبخیز در این تاریخ بیشترین مقدار است. بنابراین بررسی تأثیر گزینه‌ها در خروجی دبی ماهانه حوزه آبخیز در این تاریخ و تغییرات ناشی از اجرای گزینه‌ها ملموس‌تر خواهد بود. پس از اعمال گزینه‌های بهره‌برداری به صورت جداگانه در هر یک از زیرحوضه‌ها و اجرای مدل SWAT، میزان تغییرات دبی ماهانه هر یک از زیرحوضه‌ها با کاربرد شاخص‌های F/F و f بررسی شد. شاخص F/F پارامتر مساحت را در آنالیز سیل‌خیزی دخالت می‌دهد و شاخص f شاخصی است که پارامتر مساحت را حذف می‌کند و سیل‌خیزی را در واحد سطح بیان می‌کند که از طریق رابطه‌ی ۴ و ۵ محاسبه می‌شود.

1. Root Mean Square Error
2. Nash-Sutcliffe efficiency

نتایج و بحث

نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای مربوط به شبیه‌سازی رواناب با استفاده از الگوریتم SUFI2 نشان داد که از میان ۳۳ پارامتر انتخاب‌شده، ۱۰ پارامتر دارای حساسیت بیشتری است. به همین سبب این ۱۰ پارامتر به‌منظور واسنجی و اعتبارسنجی در SWAT CUP استفاده شدند که در جدول ۳ به‌همراه مقادیر بهینه تعیین‌شده برای هر پارامتر، نشان داده شده است.

$$F = \frac{\Delta Q_p}{Q_p} \times 100 \quad (4)$$

$$f = \frac{\Delta Q_p}{A} \quad (5)$$

ΔQ_p مقدار افزایش دبی خروجی در اثر افزایش عدد شماره منحنی زیرحوضه مورد نظر برحسب متر مکعب بر ثانیه، Q_p دبی خروجی کل حوضه برحسب متر مکعب و A مساحت برحسب کیلومتر مربع است.

جدول ۱. رتبه‌بندی عملکرد برای ارزیابی مدل [۱۸]

رتبه	NSE	RSR
خیلی خوب	$0.75 < NSE \leq 1$	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$
خوب	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$0.50 < RSR \leq 0.60$
قابل قبول یا رضایت‌بخش	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$0.60 < RSR \leq 0.70$
غیرقابل پذیرش	$NSE \leq 0.50$	$RSR > 0.70$

جدول ۲. مقادیر افزایش شماره منحنی (CN) در گزینه‌های مختلف به‌ازای درصد بهره‌برداری

گزینه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
درصد بهره‌برداری	۳	۶	۹	۱۲	۱۵	۱۸	۲۱	۲۴	۲۷	۳۰	۳۳	۳۶	۳۹	۴۲	۴۵	۴۸	۵۱	۵۴	۵۷	۶۰
افزایش CN	۰/۴۵	۰/۹۱	۱/۳۸	۱/۸۶	۲/۳۵	۲/۸۵	۳/۳۶	۳/۸۴	۴/۴۵	۵	۵/۵۶	۶/۱۲	۶/۶۹	۷/۳۷	۷/۸۶	۸/۴۶	۹/۰۷	۹/۰۷	۱۰/۳۵	۱۱

جدول ۳. مقادیر بهینه پارامترهای تحت مطالعه برای شبیه‌سازی رواناب همراه با بازه مقادیر پارامترها

نام پارامتر	توضیح پارامتر	مقدار بهینه	حداقل	حداکثر
R_CN2.mgt	شماره منحنی	۰/۹۱	۰/۷۰	۰/۹۱
R_SOL_BD (...).sol	وزن مخصوص خاک در حالت مرطوب	۰/۵۰	۰/۴۹	۰/۵۲
R_SOL_ALB (...).sol	ضریب آلودگی خاک مرطوب	۰/۰۳	-۰/۰۸	۰/۰۷
V_GW_REVAP.gw	ضریب تعیین نفوذ به آب زیرزمینی عمیق یا صعود مویبگی از سفره آب کم‌عمق	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۶
V_RCHRG_DP.gw	درصد تغذیه سفره عمیق از سفره کم‌عمق یا غیرمحصور	۰/۷۱	۰/۶۰	۰/۷۲
V_SLSUBBSN.hru	متوسط طول شیب در هر HRU (M)	۴۵/۹۲	۴۸/۳۲	۲۵/۱۹
V_CH_N2.rte	ضریب مانینگ برای رودخانه اصلی	۰/۰۱	-۰/۰۱	۰/۰۳
V_ALPHA_BNK.rte	ضریب α پایه برای ذخیره ساحلی کانال	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۶
R_TLAPS.sub	نرخ تغییرات دما با ارتفاع در هر زیرحوضه (C°/km)	۸۵/۶۵	۷۸/۱۷	۸۸/۸
V_SFTMP.bsn	دمای ذوب توده برف (C°)	۵	۴/۱۱	۵/۰۰

واسنجی نشان می‌دهد، براساس طبقه‌بندی عملکردی Moriasi و همکاران [۱۸]، مدل SWAT دارای عملکرد رضایت‌بخشی در دوره واسنجی است ($NSE=0.60$) و ($RSR=0.63$). در شکل ۴ نیز مقادیر شبیه‌سازی شده و

ارزیابی کارایی مدل در دوره واسنجی با استفاده از معیارهای R^2 ، R ، NSE ، KGE ، RSR و P -factor و R -factor بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که نتایج ارزیابی مدل در دوره

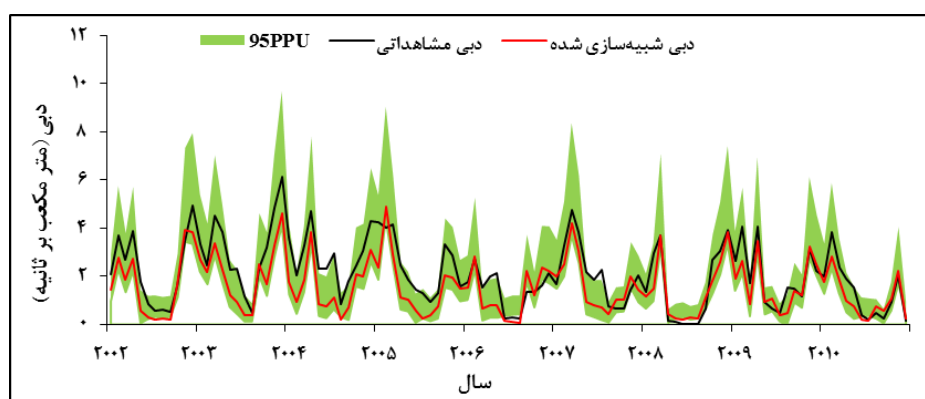
نتایج اعتبارسنجی در سطح اعتماد ۹۵ درصد در شکل ۵ و مقادیر مربوط به بررسی دقت مدل نیز در جدول ۵ ارائه شده است که نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل SWAT است، به طوری که بر اساس طبقه‌بندی عملکردی Moriasi و همکاران [۱۸] دارای عملکرد رضایت‌بخش در دوره اعتبارسنجی است ($NSE=0/64$ و $RSR=0/59$). معیار R^2 نیز بالاتر از ۰/۵ است که نشان‌دهنده مطلوبیت مدل برای شبیه‌سازی است.

مشاهداتی به همراه حدود اطمینان ۹۵ درصد برای دوره واسنجی نشان داده شده است.

نتایج مرحله واسنجی نشان داد که مدل از قابلیت خوبی به منظور شبیه‌سازی جریان آب در دوره زمانی مورد نظر برخوردار است. این نتایج زمانی قابل اعتماد خواهد بود که مدل برای دوره زمانی جدا از مرحله واسنجی اجرا شود و خروجی مدل (مرحله اعتبارسنجی) با خروجی مدل در مرحله واسنجی از دقت مشابهی برخوردار باشد.

جدول ۴. ضرایب حاصل در مرحله واسنجی مدل برای شبیه‌سازی رواناب

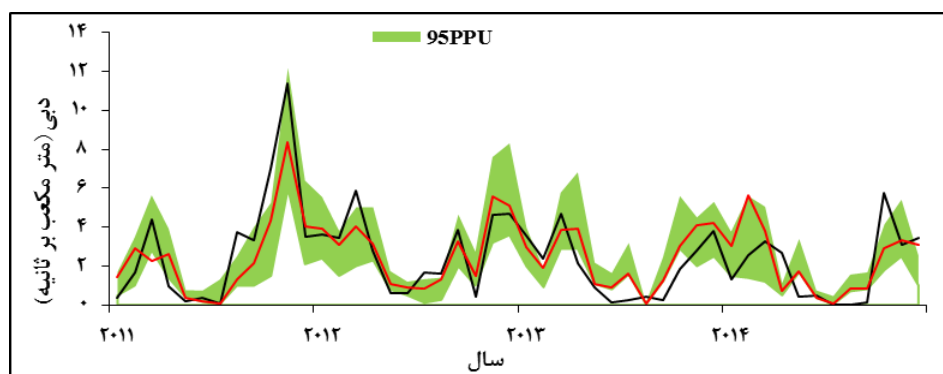
R-factor	P-factor	KGE	RSR	NSE	R^2
۱/۰۷	۰/۸۴	۰/۶۸	۰/۶۳	۰/۶۰	۰/۷۶



شکل ۴. مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی به همراه حدود اطمینان برای دوره واسنجی (سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۰۲)

جدول ۵. ضرایب حاصل در مرحله اعتبارسنجی مدل برای شبیه‌سازی رواناب

R-factor	P-factor	KGE	RSR	NSE	R^2
۱/۲۱	۰/۷۱	۰/۷۹	۰/۵۹	۰/۶۴	۰/۶۸



شکل ۵. مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی به همراه حدود اطمینان برای دوره اعتبارسنجی

۳۰ درصد کل مساحت حوزه آبخیز را شامل می‌شود، با اجرای گزینه‌های بهره‌برداری در مقایسه با زیرحوضه ۴ به‌عنوان کوچک‌ترین زیرحوضه (۱۲ درصد کل حوزه آبخیز)، تأثیر کمتری در افزایش دبی ماهانه خروجی از حوزه آبخیز از خود نشان داد. به‌ویژه در حالتی که اثر مساحت زیرحوضه حذف می‌شود (شاخص f)، تأثیرگذاری بهره‌برداری از زیرحوضه، در افزایش دبی ماهانه در خروجی حوزه آبخیز، بسیار کمتر از زیرحوضه‌های ۵ و ۴ است. به‌طوری که در زیرحوضه‌های ۵ و ۴ با اجرای گزینه بهره‌برداری ۶۰ درصد در هر کیلومتر مربع از مساحت این زیرحوضه‌ها، مقدار دبی ماهانه به ترتیب در حدود ۰/۳۳ و ۰/۳۲ متر مکعب بر ثانیه افزایش می‌یابد، درحالی که همین گزینه بهره‌برداری، به‌ازای هر کیلومتر مربع از زیرحوضه ۳ به‌عنوان وسیع‌ترین زیرحوضه، حدود ۰/۰۶ متر مکعب بر ثانیه با افزایش می‌یابد. این نتیجه با یافته‌های Rahman و همکاران [۱۹] مشابه است. محققان مذکور در پژوهش انجام‌گرفته، به این نتیجه رسیدند که میزان مشارکت زیرحوضه‌ها در دبی خروجی، متناسب با مساحت زیرحوضه‌ها نیست و لزوماً زیرحوضه‌ای که مساحت بیشتری دارد، در سیل خروجی کل حوزه آبخیز تأثیر بیشتری ندارد، بلکه اثر متقابل عوامل مؤثر مانند موقعیت مکانی زیرحوضه‌ها و روندیابی در رودخانه اصلی و شاخص‌های مورفومتری کانال رود، نقش مهمی دارد.

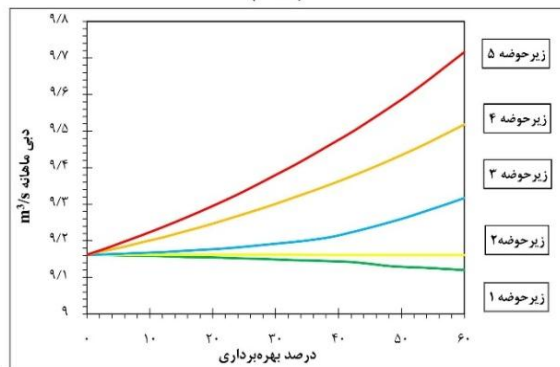
نکته حائز اهمیت دیگر این است که اگرچه با افزایش درصد بهره‌برداری از زیرحوضه‌های ۵، ۴ و ۳، دبی ماهانه افزایش می‌یابد، رابطه بین درصد بهره‌برداری از جنگل و درصد افزایش دبی ماهانه خروجی از حوزه آبخیز خطی نیست، بلکه نمایی است؛ به این معنا که با افزایش درصد بهره‌برداری از جنگل، شیب خط منحنی افزایش دبی ماهانه خروجی از حوزه آبخیز به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد، به‌طوری که در زیرحوضه ۵ با اجرای گزینه ۳۰ درصد

در ادامه پس از تأیید عملکرد مدل، تأثیر گزینه‌های بهره‌برداری بر مقدار افزایش دبی ماهانه مربوط به آوریل سال ۲۰۱۲ با شاخص‌های $F\%$ و f بررسی شد. به‌طور کلی نتایج نشان داد که با افزایش درصد بهره‌برداری از جنگل، مقدار تولید رواناب و دبی افزایش می‌یابد که این نتایج با یافته‌های محققان دیگر از جمله Wu و همکاران [۱۲]، Sajikumar و همکاران [۱۵]، Marhaento و همکاران [۶] و یافته‌های Guzha و همکاران [۱] مشابهت دارد. چنانکه با اجرای گزینه‌های بهره‌برداری در زیرحوضه ۵، بیشترین افزایش دبی ماهانه در تاریخ مذکور مشاهده شد، به‌طوری که دبی ماهانه خروجی از حوزه آبخیز، از مقدار ۹/۱۶ متر مکعب بر ثانیه در شرایط بدون بهره‌برداری، به‌مقدار ۹/۷۲ متر مکعب بر ثانیه در شرایط گزینه بهره‌برداری ۶۰ درصد افزایش یافت (شکل ۶ الف). به‌عبارت دیگر، مقدار شاخص $F\%$ در حدود ۶ درصد افزایش یافت که نشان می‌دهد با اجرای گزینه بهره‌برداری ۶۰ درصد در کل مساحت زیرحوضه ۵، خروجی دبی ماهانه حوزه آبخیز، در حدود ۶ درصد افزایش می‌یابد (شکل ۶ ب). پس از این زیرحوضه، زیرحوضه ۴ بیشترین پاسخ هیدرولوژیکی را به اجرای گزینه‌های بهره‌برداری از خود نشان داد، به‌طوری که با اجرای گزینه ۲۰ (بهره‌برداری ۶۰ درصد) در این زیرحوضه، مقدار شاخص $F\%$ در حدود ۴ درصد افزایش یافت؛ اما در شاخص f که پارامتر مساحت را حذف کرده و مشارکت زیرحوضه‌ها را در دبی خروجی حوزه آبخیز در واحد سطح بیان می‌کند، مقدار تأثیر اجرای گزینه‌های بهره‌برداری در زیرحوضه‌های ۵ و ۴، در دبی ماهانه خروجی از حوزه آبخیز تا حدودی مشابه است، به‌طوری که مقدار شاخص f زیرحوضه ۵ به مقدار بسیار کمی از زیرحوضه ۴ بیشتر است (شکل ۶ ج). مقدار شاخص $F\%$ در زیرحوضه ۳ نیز با اجرای گزینه‌های بهره‌برداری ۶۰ درصد در حدود ۲ درصد افزایش می‌یابد؛ اگرچه زیرحوضه ۳ به‌عنوان بزرگ‌ترین زیرحوضه، حدود

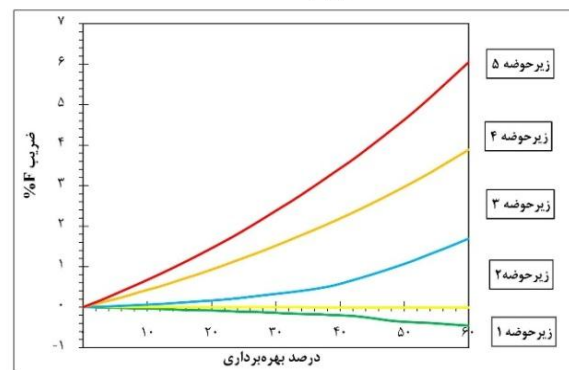
نزدیکی به خروجی حوزه آبخیز، دبی رواناب حاصل از آن، زودتر تخلیه می‌شود؛ بنابراین با اجرای گزینه‌های بهره‌برداری در زیرحوضه‌های ۱ و ۲، دبی ماهانه خروجی از حوزه آبخیز کمتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد، اما در زیرحوضه‌های واقع در قسمت‌های میانی و سرشاخه‌های حوزه آبخیز، به‌ویژه زیرحوضه‌های ۵ و ۴، به دلیل همزمانی دبی رواناب حاصل از این زیرحوضه‌ها در خروجی حوزه آبخیز، سبب افزایش دبی ماهانه خروجی از حوزه آبخیز می‌شود. این زیرحوضه‌ها از یک طرف به سبب شرایط فیزیوگرافی همچون شیب بیشتر، خاک نفوذناپذیرتر و پوشش گیاهی کمتر، مستعد تولید رواناب هستند و از طرف دیگر تجمع این شرایط با موقعیت مکانی و فاصله مشابه از خروجی حوزه آبخیز، شرایطی را فراهم می‌کند که با اجرای گزینه‌های بهره‌برداری از این زیرحوضه‌ها، دبی ماهانه خروجی از حوزه آبخیز افزایش ملموس‌تری دارد.

بهره‌برداری، دبی ماهانه خروجی از حوزه آبخیز در حدود ۲ درصد افزایش می‌یابد، درحالی که با اجرای ۶۰ درصد بهره‌برداری، دبی ماهانه خروجی در حدود ۶ درصد افزایش پیدا می‌کند. این در حالی است که زیرحوضه ۲، به اجرای گزینه‌های بهره‌برداری، واکنش هیدرولوژیکی ملموسی نشان نمی‌دهد و در زیرحوضه ۱ نیز با اجرای گزینه‌های بهره‌برداری، به مقدار کمی از خروجی دبی ماهانه از حوزه آبخیز کاسته می‌شود. بنابراین نتایج حاصل از شاخص f نشان می‌دهد که از نظر مکانی زیرحوضه‌هایی که در نزدیکی خروجی حوزه آبخیز قرار گرفتند، تأثیر کمتری در افزایش دبی دارند. این نتیجه با یافته‌های Roughani و همکاران [۲۰] مطابقت دارد که بیان کردند سطح هم‌پیمایش واقع در نزدیکی خروجی حوزه آبخیز، تأثیر بسیار کمتری در افزایش دبی رواناب دارد. در واقع زیرحوضه‌های نزدیک خروجی حوزه آبخیز، پس از رخداد بارندگی‌ها، به سبب

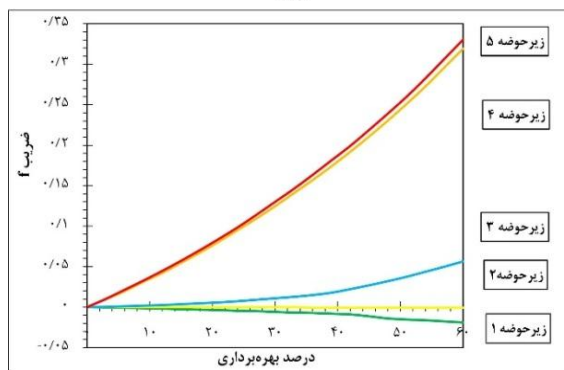
(الف)



(ب)



(ج)



شکل ۶. افزایش میزان دبی ماهانه (الف) و شاخص‌های $F\%$ (ب) و f (ج) در هر یک از زیرحوضه‌ها

of Tons River Basin, Madhya Pradesh, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(1): 295-310.

- [4]. Welde, K., and Gebremariam, B. (2017). Effect of land use land cover dynamics on hydrological response of watershed: Case study of Tekeze Dam watershed, northern Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research*, 5(1): 1-16.
- [5]. Lotz, T., Opp, C., and He, X. (2018). Factors of runoff generation in the Dongting Lake basin based on a SWAT model and implications of recent land cover change. *Quaternary International*, 475: 54-62.
- [6]. Marhaento, H., Booi, M.J., Rientjes, T.H.M., and Hoekstra, A.Y. (2017). Attribution of changes in the water balance of a tropical catchment to land use change using the SWAT model. *Hydrological Processes*, 31(11): 2029-2040.
- [7]. Baker, T.J., and Miller, S.N. (2013). Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. *Journal of Hydrology*, 486: 100-111.
- [8]. Gyamfi, C., Ndambuki, J.M., Anornu, G.K., and Kifanyi, G.E. (2017). Groundwater recharge modelling in a large scale basin: an example using the SWAT hydrologic model. *Modeling Earth Systems and Environment*, 3(4): 1361-1369.
- [9]. Gashaw, T., Tulu, T., Argaw, M., and Worqlul, A.W. (2018). Modeling the hydrological impacts of land use/land cover changes in the Andassa watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia. *Science of the Total Environment*, 619-620: 1394-1408.
- [10]. Wang, G., Yang, H., Wang, L., Xu, Z., and Xue, B. (2014). Using the SWAT model to assess impacts of land use changes on runoff generation in headwaters. *Hydrological Processes*, 28(3): 1032-1042.
- [11]. Molina-Navarro, E., Trolle, D., Martínez-Pérez, S., Sastre-Merlín, A., and Jeppesen, E. (2014). Hydrological and water quality impact assessment of a Mediterranean limno-reservoir under climate change and land use management scenarios. *Journal of Hydrology*, 509: 354-366.
- [12]. Wu, F., Zhan, J., Chen, J., He, C., and Zhang, Q. (2015). Water Yield Variation due to Forestry Change in the Head-Water Area of Heihe River Basin, Northwest China. *Advances in Meteorology*, 2015: 8.

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT به بررسی تأثیر گزینه‌های بهره‌برداری در مقدار دبی ماهانه خروجی از حوزه آبخیز جنگلی خیرود پرداخته شد. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی نشان داد که مدل از کارایی خوبی برخوردار است، به طوری که مقادیر معیارهای ارزیابی R^2 ، NSE، RSR و KGE در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی بیش از ۰/۶۰ به دست آمد. این موضوع براساس رتبه‌بندی Moriasi و همکاران [۱۸]، عملکرد مدل را در سطح رضایت‌بخشی تأیید کرد. از آنجا که R^2 به شدت به داده‌های پرت حساس است، Moriasi و همکاران [۱۸] رتبه‌بندی عملکرد را برای این آماره ارائه نکردند، اما در نظر گرفتن مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۵ به طور کلی برای آن قابل قبول است. بنابراین زیرحوضه‌های واقع در نزدیکی خروجی حوزه آبخیز، به ویژه زیرحوضه ۱، برای بهره‌برداری از درختان جنگل مناسب‌تر است. یافته‌های پژوهش حاضر می‌تواند در مدیریت بهره‌برداری از جنگل با رویکرد کنترل سیلاب و مدیریت منابع آبی مفید باشد، به طوری که با روش به کار گرفته شده در پژوهش حاضر، امکان انتخاب مناسب‌ترین زیرحوضه، برای بهره‌برداری از درختان جنگل با در نظر گرفتن کمترین تأثیر در افزایش دبی ماهانه و در نتیجه کاهش هدررفت آب فراهم می‌شود.

References

- [1]. Guzha, A.C., Rufino, M.C., Okoth, S., Jacobs, S., and Nóbrega, R.L.B. (2018). Impacts of land use and land cover change on surface runoff, discharge and low flows: Evidence from East Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 15: 49-67.
- [2]. Tarigan, S., Wiegand, K., Sunarti, and Slamet, B. (2018). Minimum forest cover required for sustainable water flow regulation of a watershed: a case study in Jambi Province, Indonesia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(1): 581-594.
- [3]. Kumar, N., Singh, S.K., Singh, V.G., and Dzwairo, B. (2018). Investigation of impacts of land use/land cover change on water availability

- [13]. Ogden, F.L., Crouch, T.D., Stallard, R.F., and Hall, J.S. (2013). Effect of land cover and use on dry season river runoff, runoff efficiency, and peak storm runoff in the seasonal tropics of Central Panama. *Water Resources Research*, 49(12): 8443-8462.
- [14]. Liu, W., Wei, X., Fan, H., Guo, X., Liu, Y., Zhang, M., and Li, Q. (2015). Response of flow regimes to deforestation and reforestation in a rain-dominated large watershed of subtropical China. *Hydrological Processes*, 29(24): 5003-5015.
- [15]. Sajikumar, N., and Remya, R.S. (2015). Impact of land cover and land use change on runoff characteristics. *Journal of Environmental Management*, 161: 460-468.
- [16]. SCS. (1972). *National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology*, USDA, U. S. Government printing Office, Washington, DC.
- [17]. Karan, S.K., and Samadder, S.R. (2016). Accuracy of land use change detection using support vector machine and maximum likelihood techniques for open-cast coal mining areas. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(8): 486.
- [18]. Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Binger, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3): 885-900.
- [19]. Rahaman, S.A., Ajeez, S.A., Aruchamy, S., and Jegankumar, R. (2015). Prioritization of Sub Watershed Based on Morphometric Characteristics Using Fuzzy Analytical Hierarchy Process and Geographical Information System – A Study of Kallar Watershed, Tamil Nadu. *Aquatic Procedia*, 4: 1322-1330.
- [20]. Roughani, M., Tabatabaei, S.M.R., Ghafouri, A., and Namaki, S.M. (2008). Promotion of Flood Control Implementation by using. *Iranian Journal of Watershed Management Science & Engineering*, 2(3): 43-52.

The effect of forest harvesting variants on runoff and loss of water resources using SWAT rainfall-runoff model in Kheyroud forest watershed

M. Moradnezehadi; Ph.D. Student of Forest Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

M. Jourgholami*; Assoc. Prof., Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

O. Bozorg-Haddad; Prof., Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

(Received: 05 July 2018, Accepted: 14 September 2018)

ABSTRACT

Knowing the effects of forest harvesting on water losses and the occurrence of devastating floods is necessary in the management of forest watersheds. In the current research, the effect of forest utilization was studied on the runoff and loss of water by using the SWAT model in the Kheyroud forest watershed. For this purpose, calibrating and validating of the model were firstly done by putting the 20 percent exploitation from each sub-basin into use and repeating the simulations of the SWAT model. The rate of monthly flow changes was obtained and then evaluated by using the indices % F and f. The % F index makes use of sub-region area parameter in monthly discharge analysis. The calibration and validation of the SWAT model were performed using SUFI2 algorithm in SWAT-CUP software and error evaluation criteria, respectively. The results of calibration and validation of the SWAT model showed the acceptable capability of simulation for this model. The implementation of 20 percent showed that increasing the exploitation percent of forest trees in sub-basins 3, 4, and 5 resulted in increasing the monthly discharge, while the implementation of 20 percent in sub-basins 1 and 2 presented no tangible effect on the increase of the watershed's monthly discharge. In fact, sub-basins situated in the middle of the Kheyroud watershed, especially sub-basins 4 and 5, due to the concurrency of the sub-basin discharge at the outlet point of the catchment, accompanied with the proper physiographic conditions providing a condition for the watershed to have a greater monthly discharge. These results can be useful in managing forest exploitation and selecting the most suitable utilization places.

Keywords: Rainfall-runoff, Forest harvesting, Forest watershed, Monthly discharge, SWAT model.

* Corresponding Author, Email: mjgholami@ut.ac.ir, Tel: +982632249312