

ارزیابی واکنش هیدرولوژیک حوضه آبخیز سد لتیان به جنگلکاری در اقلیم نیمه خشک

فرشته کردرستمی^۱، پدram عطارد^{۲*}، امید بزرگ حداد^۳، وحید اعتماد^۴، کریم عباسپور^۵ و رالف لودویگ^۶

^۱ دانشجوی دکتری جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج.

^۲ استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج.

^۳ استاد دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج.

^۴ استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج.

^۵ پژوهشگر ارشد مؤسسه تحقیقات علوم آب و تکنولوژی سوییس.

^۶ استاد دانشکده علوم زمین، دانشگاه لودویگ ماکسیمیلیان، مونیخ.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۰)

چکیده

جنگل‌های طبیعی، گستره وسیعی از خدمات اکوسیستم از جمله خدمات مربوط به منابع آب را ارائه می‌کنند؛ با وجود این، اثر جنگلکاری‌ها در شرایط مختلف، سبب ایجاد نتایج متفاوت می‌شود و گاهی تهدیدکننده امنیت منابع آب به شمار می‌رود. از این رو توسعه جنگلکاری در مناطق دارای اکوسیستم شکننده، مانند مناطق خشک و نیمه خشک، باید به دقت ارزیابی شود. هدف اصلی تحقیق حاضر، کمی‌سازی واکنش هیدرولوژیک حوضه آبخیز سد لتیان به جنگلکاری است. بدین منظور از مدل SWAT و داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی (در مقیاس روزانه)، آب‌سنجی (در مقیاس ماهانه) و اطلاعات مکانی برای شبیه‌سازی جریان خروجی از حوزه آبخیز سد لتیان واقع در شمال شرق استان تهران، تحت سناریوی پایه (شرایط فعلی) و سناریوی جنگلکاری استفاده شد. با توجه به مقادیر ضریب نش-ساتکلیف، ضریب تعیین، P-فاکتور و R-فاکتور که در مرحله واسنجی در خروجی حوضه به ترتیب ۰/۸۳، ۰/۸۴، ۰/۷۸ و ۰/۷۸ به دست آمد، مدل SWAT کارایی زیادی در شبیه‌سازی رواناب در حوضه بررسی شده نشان داد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌های بارش-رواناب در طی دوره آماری ۳۹ ساله نشان داد که گسترش جنگلکاری به اندازه ۸/۵ درصد از مساحت حوضه، سبب کاهش جریان خروجی از حوضه به مقدار $2/7 \pm 0/2$ درصد شد. این پژوهش به طور کمی نشان داد که جنگلکاری را می‌توان از عوامل کاهنده رواناب در حوضه آبخیز سد لتیان محسوب کرد. با توجه به نتیجه تحقیق حاضر، پیشنهاد می‌شود توسعه پروژه‌های جنگلکاری با بررسی همه‌جانبه اثرهای آن بر منطقه به‌ویژه اثر بر پاسخ هیدرولوژیک حوضه صورت گیرد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم SUFI2، تغییر کاربری اراضی، جنگلکاری، حوضه آبخیز سد لتیان، مدل SWAT.

مقدمه

یک منطقه حفاظت کنند (Ellison et al., 2012) و بسیاری از خدمات اکوسیستم مانند جلوگیری از فرسایش بادی، کاهش سیل و رسوب، تنظیم آب‌وهوا و کاهش آلودگی را ارائه دهند (Wang et al., 2011).

کمبود آب از معضلات محیط زیست جهانی است که امنیت بشر و توسعه اجتماعی-اقتصادی را به مخاطره می‌اندازد. جنگل‌ها به طور بالقوه می‌توانند از منابع آبی

با این حال هنوز قابلیت پروژه‌های جنگلکاری برای ارائه چنین خدماتی مشخص نیست. بسیاری از پژوهش‌ها نشان می‌دهند که جنگلکاری و احیای وسیع جنگل، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بدون آب کافی برای تغذیه درختان ممکن است دارای اثر معکوس باشد (Cao et al., 2011; Mátyás & Sun., 2014). به اعتقاد بعضی از محققان، اهتمام و اعتقاد به جنگلکاری وسیع، حتی در مناطق مرطوب با آب کافی نیز ممکن است سبب مشکلات جدیدی در موجودی منابع آب شود که این مشکلات با تغییر اقلیم تشدید خواهند شد (Zheng et al., 2016). بیشتر مدیران پروژه‌های جنگلکاری برای تجدید نسل سریع‌تر جنگل و بازسازی محیط زیست از گونه‌های تندرشد استفاده می‌کنند. متأسفانه جنگل‌های دست‌کاشت (به‌طور معمول با گونه‌های تندرشد) اغلب بیشتر از پوشش گیاهی طبیعی (برای مثال درختان بومی، درختچه‌ها و علفزارها) آب مصرف می‌کنند که این مسئله ممکن است سبب نامتعادل شدن عرضه و تقاضای آب شود. تحقیق درباره بیلان آب حوزه آبخیز می‌تواند اطلاعات مفیدی را در این زمینه فراهم آورد. از آنجا که در ایران، بیشتر حوزه‌های آبخیز با پوشش جنگلی، به‌ویژه حوضه‌های کوهستانی، فاقد ایستگاه‌های هیدرومتری هستند یا داده‌های اندازه‌گیری‌شده کیفیت مناسبی ندارند، استفاده از مدل‌های هیدرولوژی می‌تواند راه حل بهینه‌ای برای مدل‌سازی پارامترهای بیلان آب باشد (Rostamian et al., 2009). هدف از به‌کارگیری مدل‌های هیدرولوژی عبارت است از: ۱. درک بهتر فرایندها و رفتارهای هیدرولوژیکی پدیدآمده در حوزه آبخیز؛ ۲. تولید داده‌های هیدرولوژیکی برای مطالعه، برنامه‌ریزی و مدیریت هرچه بهتر حوضه (Khalighi Sigaroudi et al., 2009). مدل ارزیابی آب و خاک (SWAT)^۱، نوعی مدل هیدرولوژیکی با پایه فیزیکی و نیمه‌توزیعی است و در حوضه‌های فاقد آماربرداری منظم کاربرد دارد. این مدل تاکنون با

موفقیت برای حل مسائل مختلف محیط زیستی درباره کمیت و کیفیت آب در سراسر جهان به کار گرفته شده است (Neitsch et al., 2005). به کار گرفته شده است (Abbaspour et al., 2007). به شبیه‌سازی همه فرایندهای مؤثر بر کمیت آب، بار رسوب و مواد مغذی در حوزه آبخیز تور در سوییس پرداختند و نتیجه گرفتند که می‌توان از مدل SWAT، به‌عنوان مدل پیشرو برای مدیریت حوزه‌های آبخیز در مناطق دارای داده‌های با کیفیت استفاده کرد. (Faramarzi et al., 2009) با استفاده از مدل SWAT، اجزای بیلان آب را در کل ایران شبیه‌سازی کرده و ارتباط آنها را با تولید گندم، با در نظر گرفتن عملکرد سدها و آبیاری اراضی کشاورزی بررسی کردند. نتایج این تحقیق بر کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی بیلان آب در شرایط ایران تأکید کرد. آنان همچنین رویکردی یکپارچه برای تجزیه و تحلیل آب آبی و آب سبز در کشورهای با اقلیم خشک و نیمه‌خشک ارائه دادند. (Von Stackelberg et al., 2007) از مدل SWAT برای شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب دو حوضه زوجی کوچک در شمال اروگوئه استفاده کردند. هدف این مدل‌سازی، پیش‌بینی تأثیر هیدرولوژیکی تبدیل مرتع طبیعی به جنگلکاری کاج بود. نتایج نشان داد که تبدیل کاربری حوضه از وضعیت مرتع طبیعی به جنگلکاری کاج، سبب کاهش میانگین آبدهی سالانه از حوضه آبخیز تحت مطالعه می‌شود. (Kazemi Talkouyee et al., 2019) تأثیر بهره‌برداری و جاده‌سازی جنگل بر تولید رواناب سطحی و بار رسوب حوضه ذیلکی رود را با استفاده از مدل SWAT بررسی کردند و نتیجه گرفتند که بهره‌برداری جنگل با کاهش سطح تاج‌پوشش و فشردن خاک در مسیرهای چوبکشی، سبب کاهش نفوذپذیری و ظرفیت ذخیره آب در خاک می‌شود و سرعت رواناب به رودخانه‌ها را افزایش می‌دهد. از آنجا که در مقیاس جهانی، ذخایر آبی در شرایط افزایش تهدیدشوندگی قرار

از غرب به حوزه آبخیز کرج، از جنوب به حوزه آبخیز شمال تهران و از شرق به حوزه آبخیز دماوند محدود می‌شود. حداکثر ارتفاع حوضه، ۴۲۹۸ متر و حداقل ارتفاع آن ۱۵۳۲ متر از سطح دریا در محل خروجی سد لتیان است (شکل ۱). اقلیم منطقه با روش آمبرژه از نوع نیمه‌خشک سرد تعیین شده است. در این حوضه، دبی در نه ایستگاه هیدرومتری اندازه‌گیری می‌شود، ولی با توجه به تعداد سال‌های آماری موجود و کیفیت داده‌های ثبت‌شده، دو ایستگاه رودک و لتیان برای تحقیق حاضر انتخاب شدند و داده‌های این ایستگاه‌ها از شرکت مدیریت منابع آب ایران دریافت شد (جدول ۱).

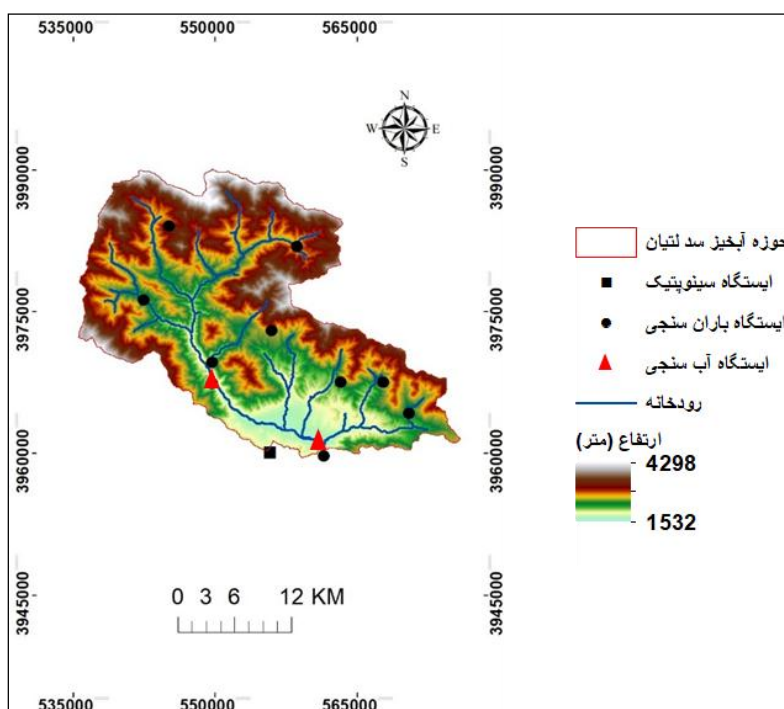
از میان ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک مجاور منطقه تحقیق، از داده‌های هواشناسی ایستگاه شمال تهران استفاده شد که نزدیک‌ترین ایستگاه است. با توجه به دامنه تغییرات ارتفاعی زیاد در حوضه، از داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی در داخل حوضه نیز استفاده شد (جدول ۲).

دارند، مدیریت پایدار آب برای نسل کنونی و نیز نسل‌های آینده ضروری است (Allen & Chapman, 2001). در مناطق خشک و نیمه‌خشک، آب از منابع محدودکننده است و مدیریت آن چالش محسوب می‌شود. این مسئله ضرورت شناسایی هرگونه اثر نامطلوب را قبل از ایجاد آسیب بازگشت‌ناپذیر تقویت می‌کند. مدل‌های بیلان آب می‌توانند مدیریت منابع آب را از طریق تعیین اثر نوع پوشش گیاهی بر هیدرولوژی حوضه بهبود بخشند. بر این اساس، هدف اصلی تحقیق حاضر، کمی‌سازی واکنش هیدرولوژیک حوزه آبخیز سد لتیان به جنگلکاری از طریق مدل‌سازی جریان خروجی از حوضه است.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

حوزه آبخیز سد لتیان با مساحت ۷۰۰ کیلومتر مربع، در مختصات جغرافیایی $51^{\circ}23'$ تا $51^{\circ}51'$ طول شرقی و $35^{\circ}45'$ تا $36^{\circ}05'$ عرض شمالی واقع شده است. این حوضه از شمال به حوزه آبخیز سد لار،



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز سد لتیان و ایستگاه‌های سینوپتیک، باران‌سنجی و آب‌سنجی

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های آب‌سنجی استفاده‌شده در تحقیق حاضر واقع در حوزه آبخیز سد لتیان

ایستگاه	رودخانه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	سال تأسیس
لتیان	جاجرود	۵۱°۴۸'	۳۵°۴۵'	۱۵۶۰	۱۳۲۴
رودک	جاجرود	۵۱°۵۵'	۳۵°۸۵'	۱۶۹۰	۱۳۳۵

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی موجود در حوزه آبخیز سد لتیان

ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	سال تأسیس
شمال تهران	سینوپتیک	۵۱°۴۱'	۳۵°۷۸'	۱۵۴۸	۱۳۶۶
لتیان	باران‌سنج معمولی	۵۱°۴۱'	۳۵°۴۶'	۱۵۶۳	۱۳۴۶
رودک	باران‌سنج معمولی و ثبات	۵۱°۳۳'	۳۵°۵۰'	۱۷۰۰	۱۳۴۶
کلوکان	باران‌سنج معمولی	۵۱°۳۲'	۳۵°۵۲'	۱۸۹۰	۱۳۴۹
برگ جهان	باران‌سنج معمولی	۵۱°۴۴'	۳۵°۵۰'	۲۰۰۰	۱۳۶۸
افجه	باران‌سنج معمولی	۵۱°۴۱'	۳۵°۵۱'	۲۱۰۰	۱۳۵۱
آهار	باران‌سنج معمولی	۵۱°۲۷'	۳۵°۵۶'	۲۱۰۰	۱۳۴۹
لواسان	باران‌سنج معمولی	۵۱°۴۷'	۳۵°۴۹'	۲۲۰۰	۱۳۵۱
امامه	باران‌سنج معمولی و ثبات	۵۱°۳۵'	۳۵°۵۴'	۲۲۴۸	۱۳۴۸
شمشک	باران‌سنج معمولی	۵۱°۲۹'	۳۶°	۲۵۰۰	۱۳۵۳

حرکت آب و مواد را شبیه‌سازی می‌کند (Neitsch et al., 2005). مدل SWAT به‌طور گسترده برای مشخص کردن اثر روش‌های مدیریت زمین بر حوزه آبخیز استفاده شده و شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژیک در آن براساس معادله بیلان آب است (Arnold et al., 1998) (رابطه ۱).

$$\text{رابطه ۱} \quad SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} - E_a - W_{\text{seep}} - Q_{\text{gw}})_i$$

SW_t مقدار نهایی آب در خاک، SW_0 مقدار اولیه آب در خاک، t زمان برحسب روز، R_{day} مقدار بارندگی روزانه، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی، E_a مقدار تبخیر و تعرق واقعی، W_{seep} مقدار آبی که از منطقه ریشه خارج می‌شود و Q_{gw} مقدار جریان برگشتی است. همه واحدها برحسب میلی‌متر در روز است.

تئوری شبیه‌سازی در مدل SWAT

SWAT یک مدل اکوهیدرولوژیک بر پایه فیزیکی، پیوسته و نیمه‌توزیعی است (Neitsch et al., 2005). مدل ابتدا حوضه را به قسمت‌های کوچک‌تر، تحت عنوان زیرحوضه تقسیم می‌کند. زیرحوضه‌ها نیز به واحدهای کوچک‌تری به نام واحدهای واکنش هیدرولوژیک (HRU) تقسیم می‌شود که واحد اصلی شبیه‌سازی در مدل SWAT هستند. در واقع هر یک از این واحدها، نوع خاک، شیب و کاربری اراضی یکسانی دارد. به‌طور کلی شبیه‌سازی یک سیستم در مدل SWAT را می‌توان به دو بخش کلی بخش زمینی و بخش آبی تقسیم کرد. بخش زمینی مربوط به فرایندهای سطح زمین و ورود آب، رسوب و عناصر شیمیایی به آبراهه اصلی هر زیرحوضه است و بخش آبی یا همان روندیابی، فرایندهای آبراهه‌ها از جمله

اجرای مدل SWAT

رویکرد این تحقیق در استفاده از مدل SWAT شامل چهار بخش اصلی است که عبارتند از:

۱. تنظیم مدل؛ ۲. واسنجی و اعتبارسنجی مدل؛
۳. شبیه‌سازی سناریوی مدیریت زمین (جنگلکاری)؛
۴. بررسی اثر سناریوی جنگلکاری بر هیدرولوژی حوضه آبخیز سد لتیان.

تنظیم مدل SWAT

داده‌های اولیه شامل مدل رقومی ارتفاع^۱، نقشه الگوی زهکشی حوضه، نقشه کاربری اراضی، نقشه خاک و داده‌های هواشناسی روزانه شامل بارش، دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی و سرعت باد به‌عنوان ورودی برای تنظیم مدل استفاده شد. با فراخوانی نقشه رقومی ارتفاع به محیط نرم‌افزار، کل حوضه به ۵۶ زیرحوضه تقسیم شده و سپس از طریق روی هم‌گذاری نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و طبقات شیب، واحدهای واکنش هیدرولوژیکی (HRUs) تعریف شد. حاصل کار این مرحله، تشکیل ۶۱۴ واحد واکنش هیدرولوژیکی بود. در مرحله بعد، داده‌های هواشناسی به‌همراه مشخصات و موقعیت ایستگاه‌ها وارد مدل شد. با توجه به کوهستانی بودن منطقه، برای افزایش دقت شبیه‌سازی، حوضه به پنج طبقه ارتفاعی تقسیم و گرادیان دما و بارش با استفاده از داده‌های دما و بارش ثبت‌شده در ایستگاه‌های دماسنجی و باران‌سنجی داخل حوضه، محاسبه و در شبیه‌سازی لحاظ شد. در نهایت با اجرای مدل، نتایج اولیه استخراج شد.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل

در این پژوهش، واسنجی و اعتبارسنجی مدل با استفاده از الگوریتم (SUFI-2)^۲ در بسته نرم‌افزاری SWAT-CUP به‌عنوان یک مدل‌سازی

معکوس نیمه‌خودکار برای ترکیب واسنجی و تحلیل عدم قطعیت انجام گرفت (Abbaspour et al., 2007). بدین منظور دوسوم از داده‌های ماهیانه دبی ایستگاه‌های رودک و لتیان برای واسنجی مدل (۲۰۰۲-۱۹۷۶) و یک‌سوم باقی‌مانده نیز برای اعتبارسنجی (۲۰۱۴-۲۰۰۳) به‌کار گرفته شد. با توجه به زیاد بودن پارامترهای مدل در مرحله واسنجی، از تحلیل حساسیت برای شناسایی پارامترهای حساس و تأثیرگذار بر مدل استفاده شد. با اجرای SWAT-CUP در ۷۵۰ تکرار، مقادیر بهینه پارامترهای حساس تعیین شد. سپس مدل برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی با پارامترهای نهایی اجرا شد. با توجه به اینکه نتایج حاصل از مدل‌سازی معکوس منحصر به فرد نیست، خروجی نتایج به‌صورت ۹۵ درصد عدم اطمینان پیش‌بینی (۹۵PPU)^۳ بیان می‌شوند. SWAT-CUP برای ارزیابی عدم قطعیت و کیفیت مدل واسنجی‌شده، دو شاخص P-فاکتور و R-فاکتور را محاسبه می‌کند. P-فاکتور درصد داده‌های اندازه‌گیری‌شده قرارگرفته در محدوده ۹۵PPU را نشان می‌دهد و مقدار آن بین صفر و ۱ متغیر است (۱ نشان‌دهنده آن است که ۹۵PPU، ۱۰۰ درصد داده‌های اندازه‌گیری‌شده را در بر می‌گیرد). R-فاکتور ضخامت باند ۹۵PPU را نشان می‌دهد که به‌عنوان میانگین اختلاف بین مرزهای بالا و پایین باند ۹۵PPU تقسیم بر انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری‌شده تعریف می‌شود. مقادیر R-فاکتور در بازه صفر تا بی‌نهایت تغییر می‌کنند. افزون بر این دو معیار، از ضریب نش-ساتکلیف (NSE) (رابطه ۲) و ضریب تعیین (رابطه ۳) نیز برای ارزیابی کارایی مدل استفاده شد.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_{avg})^2} \quad \text{رابطه ۲}$$

1. Digital Elevation Model (DEM)
2. Sequential Uncertainty Fitting ver.2
3. 95 Percent Prediction Uncertainty (95PPU)

نقشه کاربری فعلی حوضه به عنوان سناریوی پایه اجرا شد و سپس نقشه کاربری طراحی شده به مدل SWAT به عنوان ورودی استفاده شد. برای قابل مقایسه بودن نتایج، به جز نقشه کاربری اراضی جدید، همه اطلاعات ورودی، از جمله داده‌های هواشناسی، یکسان در نظر گرفته شد.

نتایج

هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی ماهانه برای دوره واسنجی (۲۰۰۲-۱۹۷۶) و دوره اعتبار سنجی (۲۰۱۴-۲۰۰۳) به همراه نتایج معیارهای ارزیابی کارایی مدل، شامل ضریب نش-ساتکلیف، ضریب تعیین و شاخص‌های P-فاکتور و R-فاکتور در شکل ۲ ارائه شده است.

شکل ۳، نقشه پتانسیل جنگلکاری تهیه شده براساس ویژگی‌های محیط زیستی و اکولوژیک مهم برای رویش درخت، شامل ارتفاع از سطح دریا، بارش، دما، شیب، جهت، خصوصیات خاک و فاصله از رودخانه را نشان می‌دهد. با توجه به نقشه پتانسیل جنگلکاری تهیه شده، حدود ۲۱۰ کیلومتر مربع از مساحت حوضه دارای پتانسیل کاشت و ایجاد جنگل است که براساس طبقه‌بندی صورت گرفته تنها ۶۰ کیلومتر مربع از آن دارای پتانسیل زیاد است.

به منظور بررسی اثر جنگلکاری بر هیدرولوژی حوضه آبخیز سد لتیان، میانگین سالانه دبی جریان خروجی شبیه‌سازی شده تحت سناریوی جنگلکاری و سناریوی پایه با هم مقایسه شد که نتایج آن در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

در شکل ۵، همبستگی سری‌های زمانی بارش و رواناب طی یک دوره ۳۹ ساله (۲۰۱۴-۱۹۷۶) در حوضه آبخیز سد لتیان تحت سناریوهای پایه و جنگلکاری ارائه شده است.

NSE ضریب نش-ساتکلیف، Q_m دبی اندازه‌گیری شده، Q_s دبی شبیه‌سازی شده و Q_{avg} میانگین دبی اندازه‌گیری شده است. این معیار برای برآورد تناسب بین مقادیر دبی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده به کار می‌رود و مقدار آن بین منفی بی‌نهایت تا ۱ متغیر است که هرچه به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده کارایی بهتر مدل است.

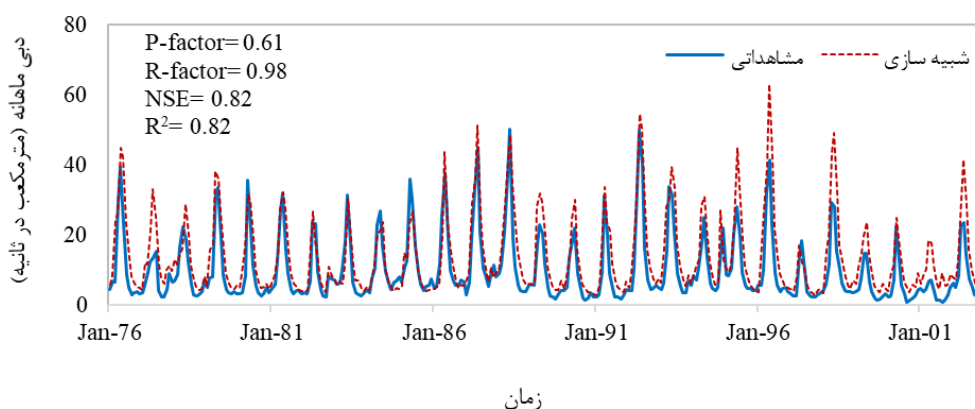
همخوانی مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده را می‌توان با استفاده از روش تجزیه رگرسیونی بررسی کرد. ضریب تعیین بیان‌کننده بخشی از کل واریانس مقادیر مشاهده شده است که توسط مقادیر شبیه‌سازی شده توجیه می‌شود. ضریب تعیین بین صفر تا ۱ تغییر می‌کند و مقدار بهینه آن ۱ است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_2 = \frac{[\sum(Q_i - Q_{avg})(Q_i - Q_{avg})]}{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{avg})^2 \sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{avg})^2} \quad \text{رابطه ۳}$$

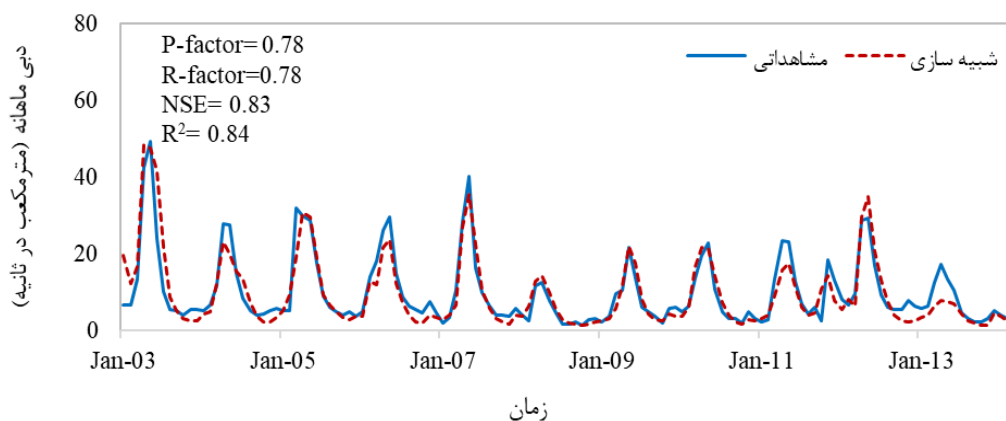
R^2 ضریب تعیین، Q_i مقدار اندازه‌گیری شده پارامتر، Q_{avg} میانگین پارامتر اندازه‌گیری شده، Q_i' مقدار شبیه‌سازی شده پارامتر توسط مدل و Q_{avg}' مقدار میانگین شبیه‌سازی شده پارامتر توسط مدل هستند.

طراحی و شبیه‌سازی سناریوی جنگلکاری و بررسی اثر آن بر هیدرولوژی حوضه

به منظور طراحی سناریوی جنگلکاری، در ابتدا نقاط مناسب برای جنگلکاری با توجه به ویژگی‌های محیط زیستی و اکولوژیکی حوضه، شناسایی و نقشه مربوط به آن با در نظر گرفتن محدودیت‌ها (مناطق کشاورزی، مناطق مسکونی و آب) از طریق ماژول 'تصمیم‌گیری چندمعیاره موجود در نرم‌افزار TerrSet تهیه شد. در مرحله بعد، با روی هم‌گذاری نقشه مناطق مناسب برای جنگلکاری و نقشه کاربری اراضی اولیه، نقشه کاربری جدید تهیه شد. برای بررسی اثر جنگلکاری به عنوان یک سناریوی مدیریتی بر هیدرولوژی حوضه آبخیز سد لتیان، در ابتدا مدل با

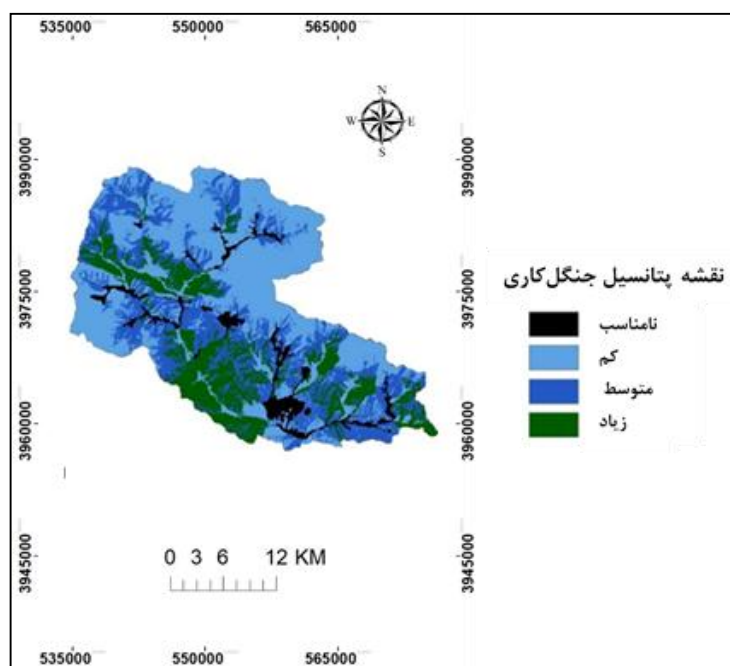


(الف)

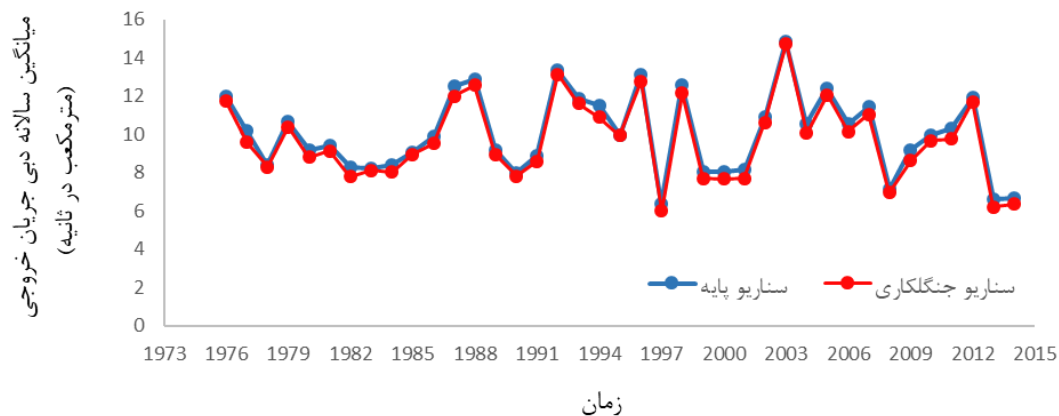


(ب)

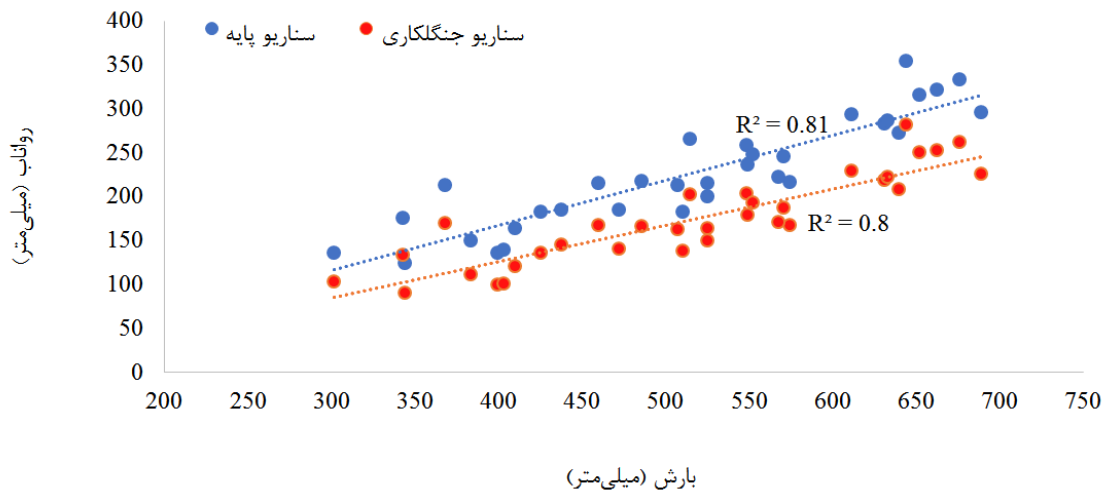
شکل ۲- هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT برای داده‌های ماهانه دبی در دوره واسنجی (الف) و دوره اعتبارسنجی (۲۰۰۳-۲۰۱۴) (ب) برای حوضه آبخیز سد لتیان (۱۹۷۶-۲۰۰۲)



شکل ۳- نقشه پتانسیل مناطق مناسب برای جنگل‌کاری در حوضه آبخیز سد لتیان



شکل ۴- میانگین سالانه دبی جریان خروجی از حوزه آبخیز سد لتیان، شبیه‌سازی شده تحت سناریوی پایه و سناریوی جنگلکاری در طی دوره ۳۹ ساله (۲۰۱۴-۱۹۷۶)



شکل ۵- مقایسه همبستگی سری‌های زمانی بارش و رواناب در طی دوره ۳۹ ساله (۲۰۱۴-۱۹۷۶) تحت سناریوهای پایه و جنگلکاری در حوزه آبخیز سد لتیان

بحث

محدوده مقادیر گزارش شده در پژوهش‌های Rostamian et al. (2009) و Ghodousi et al. (2014) است. Rostamian et al. (2009) با واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب در حوضه آبخیز بهشت‌آباد از زیرحوضه‌های کارون شمالی، مقادیر ضریب تعیین ۰/۵۲ تا ۰/۸۵ و ضریب نش- ساتکلیف ۰/۴۵ تا ۰/۷۵ را برای شش ایستگاه هیدرومتری موجود در منطقه تحت مطالعه خود گزارش کردند.

در این پژوهش، اثر جنگلکاری بر مقدار جریان خروجی از حوزه آبخیز سد لتیان با استفاده از مدل هیدرولوژیک SWAT به‌طور کمی بررسی شد. براساس نتایج پژوهش Moriasi et al. (2007)، وقتی ضریب نش-ساتکلیف بزرگ‌تر از ۰/۵ باشد، نتایج شبیه‌سازی پذیرفتنی است (Moriasi et al., 2007). مقدار ضریب تعیین نیز بین صفر تا ۱ متغیر است. ضریب تعیین به‌دست‌آمده در تحقیق حاضر در

جنگلکاری مؤید آن است که در شرایط بارش یکسان، مقدار رواناب تحت سناریوی جنگلکاری کمتر از سناریوی پایه است. بنابراین می‌توان بیان کرد که جنگلکاری به‌جز تأثیر بر تغییر ریزاقلیم یا بارش، می‌تواند بر کاهش رواناب در حوزه آبخیز سد لتیان نیز اثرگذار باشد. عوامل زیادی موجب مصرف بیشتر آب توسط درختان نسبت به دیگر انواع پوشش گیاهی و در نتیجه کاهش رواناب می‌شوند. برای مثال می‌توان به سیستم‌های ریشه‌ای عمیق‌تر که رطوبت را از قسمت‌های عمیق‌تر خاک بیرون می‌کشند، چرخه رشد طولانی‌تر، جذب بیشتر تابش، باران‌رایی بیشتر و در نتیجه افزایش تبخیر-تعرق اشاره کرد (Zheng et al., 2016). نتایج تحقیق حاضر در راستای یافته‌های Sun et al. (2006) است که کاهش رواناب در اثر تبدیل علفزارهای کم‌تراکم به جنگلکاری را در مناطق نیمه‌خشک چین گزارش کردند. (Fareley et al. (2005) نیز در تحقیق مشابهی، کاهش میانگین سالانه رواناب به میزان ۴۴ درصد در اثر جنگلکاری عرصه‌های طبیعی در مناطق مرطوب را گزارش کردند. نتایج تحقیق (Farley et al. (2005) نشان داد که جنگلکاری با کاهش رواناب در مناطق پایین‌دست، سبب پیامدهایی مانند کاهش موجودی آب در مقیاس محلی می‌شود. این مطالعات برای مکان‌یابی و برنامه‌ریزی پروژه‌های جنگلکاری، به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک ضروری است.

شدت تغییرات رواناب در اثر جنگلکاری به عوامل متعددی بستگی دارد و در مناطق مختلف، متفاوت است، ولی کاهش آن حتی به میزان اندک در مناطق نیمه‌خشک کوهستانی ممکن است پیامدهای منفی داشته باشد، چراکه این مناطق سرچشمه و تأمین‌کننده آب مناطق پایین‌دست هستند (Tian et al., 2016). گسترش جنگلکاری در مناطق آسیب‌پذیر، این خطر را مطرح می‌کند که تأثیر توأم

مقدار مطلوب برای شاخص P-factor زمانی است که ۱۰۰ درصد داده‌های شبیه‌سازی‌شده در محدوده ۹۵PPU قرار گیرند، ولی به‌طور معمول به‌دلیل خطاهای گوناگون در داده‌برداری و عدم قطعیت مدل‌های مفهومی، هیچ‌گاه این مقدار حاصل نمی‌شود. از این رو مقادیر کمتر از ۱، مقدار پذیرفتنی برای R-فاکتور و مقادیر نزدیک به ۱ مقدار پذیرفتنی برای P-فاکتور محسوب می‌شود (Rostamian et al. (2009). (Abbaspour et al., 2007) نیز مقادیر P-factor بزرگ‌تر از ۵۰ درصد و R-factor کمتر از ۱/۳۵ را به‌عنوان نتایج رضایت‌بخش معرفی کردند.

در تحقیق حاضر، ضریب نش-ساتکلیف در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی، به‌ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۸۳ و ضریب تعیین در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۸۴ به‌دست آمد، همچنین با توجه به اینکه مقادیر P-فاکتور و R-فاکتور در محدوده پذیرفتنی بود (شکل ۲)، کارایی مدل SWAT برای منطقه تحقیق رضایت‌بخش ارزیابی شد. براساس مقادیر t-stat و درصد معنی‌داری (P-value)، پارامترهای انتخاب‌شده در مرحله اولیه، مشخص شد که پارامتر شماره منحنی^۱ بیشترین تأثیر را بر دبی خروجی از حوضه داشت.

نتیجه اجرای مدل SWAT تحت سناریوی جنگلکاری، تبدیل تعداد ۹۹ واحد پاسخ هیدرولوژیک به کاربری جنگل آمیخته شد که معادل ۸/۵ درصد از مساحت کل حوضه است. بررسی تغییر پارامتر هیدرولوژیک زمانی مثل تغییر جریان خروجی از حوضه در یک دوره ۳۹ ساله نشان داد که افزایش مساحت جنگل به میزان ۶۰ کیلومتر مربع، موجب کاهش رواناب به میزان 0.2 ± 2.7 درصد شد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، کاهش بارش موجب کاهش رواناب می‌شود، ولی قرار گرفتن خط رگرسیون سناریوی پایه بالای سناریوی

توسعه پروژه‌های جنگلکاری با بررسی همه‌جانبه اثرهای هیدرولوژیک آن بر بیلان آب منطقه صورت گیرد.

تغییر اقلیم و افزایش مصرف آب توسط درختان ممکن است موجودی آب برای محیط زیست و مصارف دیگر در داخل حوضه را تغییر دهد (Zheng et al., 2016)، بنابراین پیشنهاد می‌شود که تصمیم‌گیری درباره

References

- 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.
- Allen, A., & Chapman, D. (2001). Impacts of afforestation on groundwater resources and quality. *Journal of Hydrogeology*, 9(4), 390-400.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Mutiah, R.S. & Williams, J.R. (1998). Large area hydrologic modelling and assessment part; model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34, 73-89.
- Cao, S., Chen, L., Shankman, D., Wang, C., Wang, X. & Zhang, H. (2011). Excessive reliance on afforestation in China's arid and semi-arid regions: lessons in ecological restoration. *Earth-Science Reviews*, 104(4), 240-245.
- Ellison, D., Futter, M.N. & Bishop, K. (2012). On the forest cover-water yield debate: from demand-to supply side thinking. *Global Change Biology*, 18(3), 806-820.
- Faramarzi, M., Abbaspour, K.C., Schulin, R. & Yang, H. (2009). Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrological Processes: An International Journal*, 23(3), 486-501.
- Farley, K.A., Jobbagy, E.G. & Jackson, R.B. (2005). Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology*, 11, 1565-1576.
- Ghodousi, M., Delavar, M. & Morid, S. (2014). Impact of Land Use Changes on Hydrology of Ajichai Basin and its Input to Urmia Lake, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(2), 123-133.
- Kazemi Talakoui, A., Jorgolami, M., Abbaspour, K., & Feghhi, J. (2019). Simulation runoff and sediment yield in a harvested forest (Case study: Zailakirood Basin, northern Iran). *Iranian Journal of Forest*, 11(1), 29-41.
- Khalighi Sigaroudi, Sh., Zinnati Radha, T., Salajegah, A., Kohandel, A. & Mortezaee, Gh. (2009). The semi-distributed of rainfall-runoff modelling in low data subbasins (Case Study: Latian basin). *Fifth National Conference on Watershed Management Science and Engineering, Iran*.
- Mátyás, C., & Sun, G. (2014). Forests in a water limited world under climate change. *Environmental Research Letters*, 9(8), p.085001.
- Moriassi, D., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R., Harmel, R. & Veith, T. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885-900.
- Nash, J.E., & Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I, A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. & King, K.W. (2005). Soil and water assessment tool: Theoretical documentation. Black land Research Center, *Texas Agricultural Experiment Station*, 494 p.

- Rostamian, R., Mousavi, S., Heidarpour, M., Afyuni, M. & Abaspour, K. (2009). Application of SWAT2000 Model for Estimating Runoff and Sediment in Beheshtabad Watershed, a Sub-basin of Northern Karun. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 12(46): 517-531.
- Sun, G., McNulty, S.G., Lu, J., Amatya, D.M., Liang, Y. & Kolka, R.K. (2005). Regional annual water yield from forest lands and its response to potential deforestation across the southeastern United States. *Journal of Hydrology*, 308(1-4), 258-268.
- Tian, F., Lü, Y.H., Fu, B.J., Yang, Y.H., Qiu, G., Zang, C. & Zhang, L. (2016). Effects of ecological engineering on water balance under two different vegetation scenarios in the Qilian Mountain, northwestern China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 5, 324-335.
- Von Stackelberg, N.O., Chescheir, G.M., Skaggs, R.W. & Amatya, D.M. (2007). Simulation of the hydrologic effects of afforestation in the Tacuarembó River Basin, Uruguay. *Transactions of the Journal of the American Water Resources Association*, 50(2), 455-468.
- Wang, D., & Hejazi, M. (2011). Quantifying the relative contribution of the climate and direct human impacts on mean annual streamflow in the contiguous United States. *Water Resource Research*, 47(10), 411.
- Zheng, H., Wang, Y., Chen, Y. & Zhao, T. (2016). Effects of large-scale afforestation project on the ecosystem water balance in humid areas: An example for southern China. *Ecological engineering*, 89, 103-108.



Research Article

Evaluation of hydrological response of Latian Dam watershed to afforestation in semi-arid climate

F. Kordrostami¹, P. Attarod^{2*}, O. Bozorg-Haddad³, V. Etemad⁴, K. C. Abbaspour⁵, R. Ludwig⁶

¹ Ph.D. candidate, Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran

² Prof., Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran

³ Prof., Dept. of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering & Technology, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran

⁴ Associate Prof., Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran

⁵ Senior research scientist of Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland

⁶ Prof., Dept. of Geography & Remote Sensing, Faculty of Geosciences, Ludwig Maximilian University, Munich, Germany

(Received: 2 December 2019; Accepted: 9 February 2020)

Abstract

Natural forests provide a wide range of ecosystem services especially water-related benefits. However, the effects of afforestation in different situations may lead to contradictory results. In some cases, afforestation considered as a land use activity that threatens water resources security. So, it is necessary to evaluate the afforestation development in fragile ecosystems, such as arid and semi-arid regions. The main goal of this study is to quantify the hydrological responses of Latian Dam watershed to afforestation projects. To reach the goal, SWAT model were employed combined with meteorological data (daily), hydrological data (monthly) and spatial data to simulate the out flow of Latian Dam watershed, located in northeast of Tehran-Iran, under two land use scenarios (baseline & afforestation). The SWAT model showed good performance in the Latian Dam watershed with acceptable values for Nash-Sutcliffe, P-factor and R-factor which were 0.82, 0.82, 0.68, 0.98 respectively for calibration and 0.83, 0.84, 0.78, 0.78 respectively for validation at the outlet of watershed. Simulation results under proposed scenarios demonstrated that as afforestation expansion 8.5% of the study area, runoff declined by 2.7% in downstream. This research quantitatively showed that afforestation will reduce the runoff in Latian watershed. The result of this study suggested that it is necessary to fully assess the effects of afforestation development in the given area, especially on hydrologic responses of watershed.

Keywords: Land use change, Afforestation, Sufi-2 algorithm, SWAT model, Latian Dam watershed