تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال هفدهم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰
Volume 17, No. 1, Spring 2021 (IR-WRR)
۲۷۷-۲۸۹

ارزیابی تأثیرات اقدامات آبخیزداری بر مؤلفه‌های بیلان آبی و رسوب مطالعه موردی: حوضه آبریز وردیج–واریش

امیرحسین نورافکن[۱]، روح‌انگیز اختری[۲*] و مجید دلاور[۳]

چکیده

اقدامات آبخیزداری و سیاست‌های توسعه‌ای آن از جمله موارد مهم در اسناد بالادستی بخش آب و محیطزیست محسوب می‌گردد. در توسعه چنین اقداماتی توجه به اصل کلیدی مدیریت یکپارچه منابع آب بسیار ضروری است. ارزیابی جامعی از اثرات این اقدامات بر بیلان آبی حوضه آبریز موضوع اصلی این مطالعه است. مطالعه حاضر تلاش دارد تا با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی جامع این اقدامات، ضمن ارزیابی آنها، به بررسی کارآیی و اثرات جانبی آن‌ها بپردازد. بدین منظور حوضه آبریز وردیج– واریش و اقدامات آبخیزداری انجام شده توسط پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری در منطقه ورکباد این حوضه با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی شد. مدل برای دوره ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار گرفت. که برای دوره واسنجی مقادیر R^2 و ضریب NS برابر با ۰/۸۵ و ۰/۷ و برای دوره اعتبارسنجی برابر با ۰/۸۹ و ۰/۶۳ می‌باشد. نتایج حاصل از ارزیابی اقدامات آبخیزداری نشان داد که همه اقدامات تأثیر مناسبی در راستای حفظ منابع آبی و خاکی دارند و متناسب با اهداف مربوطه می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. اقدام بیولوژیک بذرکاری در افزایش رطوبت خاک در منطقه غیر اشباع (۶۰ درصد) و نهال‌کاری در کاهش رواناب حوضه (۳۶ درصد) مؤثر بود. این دو اقدام همراه با عملیات بیومکانیکی در افزایش و یا کاهش مؤلفه‌های بیلان آبی تأثیرگذارتر خواهد بود. به گونه‌ای که افزایش تبخیر و تعرق به میزان ۱۱/۵ درصد در بذرکاری با تلفیق با کنتور فارو به ۱/۵ درصد تقلیل می‌یابد. همچنین، با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره اقدام بذرکاری به عنوان بهترین شیوه مدیریتی در افزایش رطوبت خاک و کاهش خروج منابع آب از حوضه آبریز وردیج– واریش انتخاب شد.

کلمات کلیدی: مؤلفه‌های بیلان آب، اقدامات آبخیزداری، مدل SWAT، حوضه آبریز وردیج– واریش.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۱۲/۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۳/۱۷

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
۲- استادیار گروه پژوهشی مهندسی رودخانه و سواحل، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی.
۳- استادیار گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۰ امکانپذیر است.

Evaluating the Impact of Watershed Management Practices on Water Balance Components and Sediment in Verdij–Varish Catchment

A.H. Nourafkan[1], R. Akhtari[2], and M. Delavar[3]*

Abstract

Watershed management practices and the strategies towards its development are among the important articles in water and environment sections in governmental higher documents. One of the important aspects of watershed's development is the Integrated Water Rsources Management. The focus of this research is on comprehensive assessment of the effects of these practices on a catchment's water balance. To this end, the SWAT model was used as a comprehensive simulation tool. Verdij - Varish Basin was selected as a case study since it has served as a pilot area for the implementation of various watershed management practices (biological, biomechanical and mechanical) in recent years The SWAT model has been calibrated and validated for the period of 2017 to 2018. The values of R^2 and Nash Sutcliffe (NS) coefficient were respectively equal to 0.85 and 0.7 for the calibration period and 0.89 and 0.63 for the calibration period. The watershed management practices were simulated by the SWAT model and their effects on water balance components and sediment were evaluated. As compared to the original state, seeding has increased soil moisture in the unsaturated area by about 60% and transplant has reduced runoff by 36%. Using multi-criteria decision making method, a type of biological practice (seeding) was determined to be the best management practice for increasing soil moisture and reducing outflow in Vardij Varish catchment.

Keywords: Water Balance Components, Watershed Management, SWAT, Verdij–Varish Catchment.

Received: February 24, 2021
Accepted: June 7, 2021

1- M.Sc. Graduate of Water Recourses Engineering, Department of Water Recourses Engineering, College of Agriculture, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran.
2- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. Email: r.akhtari@gmail.com
3- Associate Professor, Department of Water Recourses Engineering, College of Agriculture, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran. Email: m.delavar@modares.ac.ir
*- Corresponding Author
Dor: 20.1001.1.17352347.1400.17.1.17.8

۱- مقدمه

کل منابع آب یک حوضه آبریز بر توسعه اجتماعی- اقتصادی مناطق آن تأثیرگذار خواهد بود و لذا تعیین دقیق این منبع حیاتی برای حوضه آبریز به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که با بحران آب روبرو هستند، ضروری است (Gao et al., 2018). هرگونه اقدام انسانی از یک سو می‌تواند با سوء مدیریت و برداشت بی‌رویه از منابع آبی سبب تشدید بحران کم آبی شود و از سوی دیگر می‌تواند با یک مدیریت صحیح، علمی و سازگار با هر منطقه از خارج شدن سریع آب ناشی از بارش‌های جوی به عنوان تنها منبع تغذیه‌کننده منابع آبی یک حوضه آبخیز جلوگیری کند. این امر می‌تواند در بالادست حوضه آبخیز که منشاء تولید رواناب هستند و یا در حوضه‌های شهری که میزان نفوذ به حداقل خود رسیده است، اعمال شود. در این ارتباط سازمان خواروبار جهانی (۲۰۱۷) آبخیزداری را به‌عنوان هر اقدام انسانی با هدف حصول اطمینان از استفاده پایدار از منابع حوضه آبریز تعریف می‌کند که برخلاف رویکردهای توسعه‌ای، با بررسی تعامل میان فرآیندهای طبیعی مختلف، مدیریت زمین، آب و اکوسیستم حوضه آبخیز سعی در ایجاد یک مدیریت یکپارچه دارد (FAO, 2017). هدف از اجرای اقدامات آبخیزداری، مدیریت جامع حوضه‌های آبریز، کاهش فرسایش خاک و رسوب‌دهی، کنترل هرز آب‌ها، کاهش سیل‌خیزی، بهره‌وری بهینه از نزولات آسمانی و بهره‌برداری بهینه از اراضی هست. عملیات مدیریتی، عملیات بیولوژیکی، عملیات مکانیکی و عملیات بیومکانیکی از عمده‌ترین اقدامات آبخیزداری هست.

انجام عملیات آبخیزداری به‌عنوان ضرورتی اجتناب‌ناپذیر نیز در کشور ما مورد توجه قرار گرفته و در اسناد بالادستی نیز تأکید ویژه‌ای بدان شده است. اما همواره باید توجه داشت به‌کارگیری غیراصولی و ناپایدار این اقدامات بدون در نظرگیری یکپارچگی منابع آب سبز (درصدی از بارش است که یا صرف تبخیر می‌شود و یا به منطقه ریشه گیاهان نفوذ می‌کند و برای رشد زیست‌توده مورد استفاده قرار می‌گیرد) و منابع آب آبی حوضه (شامل رواناب سطحی و زیرزمینی) و همچنین مؤلفه‌های تعیین‌کننده بیلان آبی در چرخه هیدرولوژیکی آن نه‌تنها منجر به حصول اهداف مورد انتظار از به‌کارگیری این اقدامات نمی‌شود بلکه موجبات ایجاد و یا تشدید تنش‌ها و مشکلات در حوضه را فراهم می‌کند (Rohanizadeh, 2008). در این راستا استفاده از ابزارهای مدل‌سازی جامع حوضه آبریز می‌تـــواند نقطه عطفی در جهت اولویت‌بندی و ارزیابی طرح‌های آبخیزداری با لحاظ به‌هم‌پیوستگی منابع آب و خاک باشد. در این زمینه مدل SWAT به‌عنوان یک مدل جامع فرایندمحور[۱] و با توجه به قابلیت‌های آن در شبیه‌سازی فرآیندهای درهم‌تنیده‌ی هیدرولوژی، فرسایش خاک و مواد مغذی در داخل حوضه ابزار مناسبی در جهت شناسایی مناطق بحرانی و ارزیابی یکپارچه اقدامات آبخیزداری محسوب می‌گردد (Ghebremichael et al., 2010) و در مطالعات مختلفی مورد توجه قرار گفته است. در مطالعه‌ای Leman et al. (2016) تغییرات توزیع آب آبی، آب سبز و عملکرد رسوب را با اجرای تراس‌بندی به عنوان یک نوع اقدام حفاظتی آب و خاک (SWCMs[۲]) در مقیاس مزرعه در منطقه‌ای از حوضه رودخانه نیل را با مدل SWAT مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که میزان رواناب در سطح حوضه آبریز در پایین‌دست تغییر چندانی نکرده، اما میزان بار رسوبی حوضه به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. میانگین بار رسوبی سالانه از ۳۷ تن در هکتار به ۱۷ تن در هکتار رسیده است. در مطالعه‌ای Sun Sook Jang et al. (2017) به‌منظور بررسی و کاهش اثرات منابع آلایندگی غیرنقطه‌ای در حوضه مرتفع کشاورزی Haean در کره جنوبی با به‌کارگیری بهترین شیوه‌های مدیریتی، نصب نوار فیلتر گیاهی،کنترل کود، استفاده از مالچ کاه برنج با استفاده از مدل SWAT پرداختند. در این حوضه ۵۲ کیلومتر مربعی در سه نقطه، پارامترهای رواناب، غلظت رسوب، غلظت نیتروژن و میزان فسفر به مدت دوسال با مقیاس روزانه مورد پیمایش قرار گفت. نتایج گویای عملکرد خوب نوار فیلتر گیاهی در کاهش بار آلاینده‌ها بود. شبیه‌سازی سناریو استفاده از نوار فیلترهای گیاهی با سه عرض مختلف نشان داد که افزایش ظرفیت حذف بار رسوبی از دامنه ۱۶ درصد (با عرض نوار ۱ متر) در خروجی حوضه تا میزان ۳۴/۸ درصد (با عرض نوار ۵ متر) در نقطه اول در بالادست حوضه متغیر خواهد بود. همچنین این سناریو ظرفیت حذف فسفر را از دامنه ۵/۱ درصد (با عرض فیلتر ۱ متر) در نقطه دوم تا میزان ۲۱/۳ درصد (با عرض فیلتر ۵ متر) در نقطه سوم نزدیک به خروجی حوضه افزایش خواهد داد.

همچنین، Zhu et al. (2018) سه شاخص جدید MSGW[۳]، CGW[۴] وUGW[۵] را برای ارزیابی جامع آب‌های سبز ارائه دادند. شاخص حداکثر ذخیره آب سبز (MSGW) براساس عمق ریشه گیاه پتانسیل استفاده/ بهره‌برداری از آب سبز را در یک حوضه آبخیز تعیین می‌کند. کل تبخیر و تعرق واقعی در مزارع، چمن‌زارها و زمین‌های جنگلی به عنوان آب سبز مصرف شده (CGW) درنظر گرفته شد. شاخص آب سبز قابل استفاده (UGW) برای نشان دادن بخشی از آب سبز پیشنهاد شد، که هنوز هم توسط گیاه قابل استفاده است. آنها فرایندهای چرخه هیدرولوژیکی و همچنین بیلان آب حوضه رودخانه‌ای Hai (یک منطقه کشاورزی با مشکل کمبود آب) با سه جزء بارش، آب سبز، آب آبی را برای یک دوره ده ساله (۱۹۹۵-۲۰۰۴)، با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی کردند. آنها نتایج خود را براساس نقشه‌های توزیع مکانی و زمانی شاخص‌های جدید ارائه دادند و نتیجه گرفتند که

شاخص حداکثر ذخیره محتمل آب سبز (MSGW) دارای مقدار کمی در دشت‌ها هست و همچنین توزیع مکانی آن نیز به نوع خاک بستگی دارد و راندمان بهره‌برداری از بارش (درصد بارشی که به آب سبز تبدیل می‌شود) در مزارع کشاورزی بالاتر از سایـــر استفاده‌های مختلف از خاک هست. ایـــن بدان معنی است کـــه کاشت گیاه مناسب در افزایش بهره‌برداری از آب سبز می‌تـــواند کمک کند. همچنین Zhang et al. (2014) بر اساس مدل هیدرولوژیکی SWAT روند تغییرات مکانی آب آبی و منابع آب سبز را در سرشاخه حوضه رودخانه زرد به‌صورت کوانتومی مورد تجزیه و تحلیل قراردادند. هدف تغییر ابعاد آب آبی و منابع آب سبز در مقاطع مختلف مکانی(حوضه و زیرحوضه) و مقیاس زمانی(دوره‌ای، غیر دوره‌ای و فصلی) بوده است. نتایج حاکی از اهمیت توزیع مکانی در بیان تغییر پارامترهای موردنظر دارد. در مطالعه‌ای دیگر در حوضه آبریز بالای رودخانه دوو، مدیریت آب سبز با روش‌هایی مانند تراس‌های زمینی، خطوط خاک‌ورزی، کشت مالچ و خط سنگی با مدل SWAT مورد مطالعه قرار گرفت. مشخص شد که تمام چهار اقدامات مدیریت آب سبز می‌تواند جریان پایه رودخانه را تقویت کند (Li and Yin, 2014).

در تحقیقات داخلی، Geyrani (2016) با استفاده از مدل SWAT رسوب ویژه گاماسیاب را ۲/۸ تن بر هکتار برآورد کرد که گزارش مؤسسه تحقیقات آبخیزداری و حفاظت خاک نیز رقم ۲ تن بر هکتار را نشان می‌دهد. همچنین ارزیابی برخی راه‌کارهای مدیریتی و حفاظتی نشان داد که استفاده از راه‌کار آب‌بند در سرشاخه‌های زیرحوضه‌های رسوب‌خیز، به‌تنهایی می‌تواند تا ۱۶ درصد از بار رسوب سالانه را کاهش دهد. در مطالعه‌ای دیگر (Nikkhah, 2015) با استفاده از نسخه توسعه‌یافته مدل SWAT (Delavar et al., 2020)، اثربخشی چهار اقدام مالچ پاشی، خطوط سنگی، تراس و کانتور را بر روی متغیرهای آب سبز و آب آبی (رواناب سطحی، تبخیر خاک، تعرق گیاه، تغذیه به آب زیرزمینی) بررسی کرد. نتایج حاکی از آن بود که تحت اقدام مالچ و خطوط سنگی بیشترین کاهش را در تبخیر از سطح خاک و بیشترین افزایش را در تعرق از گیاه داریم. همچنین تحت دو اقدام تراس و کانتور رواناب سطحی به مقدار زیاد کاهش پیدا می‌کند. Ahmadabadi et al. (2017) به تحلیل اثرات عملیات آبخیزداری بر خصوصیات هیدروژئومورفولوژی حوضه آبریز عنبران‌چای با استفاده از مدل نیمه توزیعی SWAT پرداختند. عملیات آبخیزداری به‌صورت عملیات بیولوژیکی (یونجه‌کاری)، عملیات مکانیکی، کودپاشی و درخت‌کاری به اجرا درآمده است. نتایج شبیه‌سازی توسط مدل SWAT نشان می‌دهد که میانگین شماره منحنی از ۷۵/۶۸ پس از عملیات آبخیزداری به ۶۱/۲۴ کاهش یافت که نشان‌دهنده افزایش میزان نفوذپذیری و نگهداشت آب در سطح حوضه است، به‌تبع آن میزان رواناب سطحی نیز کاهش چشمگیری را نشان می‌دهد.

در این پژوهش تلاش شد تا با استفاده از رویکرد مدل‌سازی جامع حوضه آبریز با استفاده از مدل SWAT، ارزیابی، اولویت‌بندی و میزان اثربخشی اقدامات آبخیزداری در هر یک از مؤلفه‌های بیلان آب (تبخیر- تعرق، نفوذ، رطوبت خاک، رواناب) و بار رسوبی حوضه مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. لازم به ذکر است که در راستای طرح حفظ محیط‌زیست و منابع طبیعی دامنه جنوبی البرز به مساحتی حدود ۱۵۰هزار هکتار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری با حمایت معاونت فن‌آوری ریاست جمهوری و سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور جهت ارایه راه حل مناسب و معرفی روش‌های کارآمد، پروژه مطالعاتی تحقیقاتی، آبخیزداری و جنگل‌کاری را در مساحت ۴۰۰ هکتار را در منطقه وردیج (زیرحوضه ورکباد) غربی‌ترین محدوده بخش طرح حفاظت و احیا بـــه عنوان منطقه پایلوت را در دستور کار قرار داد (Sharifi, 2015). لذا در این پژوهش حوضه آبریز وردیج- واریش مشتمل به منطقه پایلوت ورکباد به‌عنوان منطقه مطالعاتی و جهت ارزیابی روش‌شناسی مذکور انتخاب گردید.

۲- روش انجام کار و مطالعه موردی

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه وردیج- واریش به وسعت ۶۸۸۴ هکتار در دامنه‌های جنوبی رشته کوه البرز، به عنوان غربی‌ترین حوضه آبخیز در استان تهران، تقریباً ۰/۵ درصد مساحت این استان را شامل می‌شود (شکل ۱). این حوضه جزء زیرحوضه‌های درجه چهار کشور بوده که به ترتیب زیرمجموعه‌ای از حوضه آبخیز تهران- کرج (درجه سه)، حوضه آبخیز دریاچه نمک (درجه دو) و حوضه اصلی فلات مرکزی قرار می‌گیرد. حوضه آبریز رودخانه کن همسایه شرقی و رودخانه کرج همسایه غربی این حوضه می‌باشند. شیب متوسط آن ۱۹ درصد و شیب متوسط وزنی حوضه ۴۶ درصد است. تعداد ۲۳۸۶ آبراهه با مجموع طول تقریبی ۸۵ کیلومتر دارد که از رتبه ۱ تا رتبه ۷ تقسیم می‌شوند. طول آبراهه اصلی آن تقریباً ۱۳ کیلومتر از ارتفاع ۱۴۰۴ تا ۲۶۹۰ متر است. شیب خالص آن ۸/۶۶ درصد و شیب ناخالص آن ۱۰ درصد گزارش شده است. شیب متوسط وزنی آبراهه اصلی ۱۲/۴۲ درصد است که زمان تمرکز این حوضه با استفاده از کرپیچ معادل ۱/۰۷ ساعت تخمین زده شده است (Jahad Tahghighat Grope, 2011). حوضه آبریز ورکباد در قسمت شرقی حوضه آبریز وردیج واریش قرار دارد. مجموعه اقدامات آبخیزداری برای مدل‌سازی در حوضه آبریز ورکباد اجرا شده است (شکل ۱). محیط و مساحت حوضه آبریز ورکباد به ترتیب ۸/۱۶

کیلومتر و ۳/۳ کیلومتر مربع است. مجموع طول آبراهه‌های حوضه آبریز ورکباد ۲/۱ کیلومتر و ارتفاع متوسط آن برابر با ۲۱۰۰ متر می‌باشد. شیب متوسط حوضه آبخیز ۳۹ درصد و زمان تمرکز آن براساس رابطه کرپیچ ۷ دقیقه محاسبه شده است.

۲-۱-۱- اقدامات آبخیزداری در حوضه پایلوت ورکباد

شکل ۲ انواع اقدامات آبخیزداری انجام شده در حوضه پایلوت ورکباد را به اختصار نشان می‌دهد که موقعیت مکانی هر یک نیز در شکل ۳ آمده است.

۲-۲- روش تحقیق

۲-۲-۱- مدل‌سازی با استفاده از مدل SWAT

SWAT مخفف ابزار ارزیابی آب و خاک، بوده که توسط دکتر آرنولد جف در سال ۱۹۹۸ برای سرویس تحقیقات کشاورزی، وزارت کشاورزی ایالات‌متحده (Jeremiah et al., 2012) و با حمایت گروه تحقیقاتی دانشگاه M&A تگزاس توسعه یافت. بخش‌های اصلی مدل شامل هیدرولوژی، اقلیم، فرسایش، رشد گیاهان، عناصر غذایی، آفت‌کش‌ها، مدیریت اراضی و روندیابی جریان هست. در این مدل ابتدا حوضه آبریز بر اساس نقشه‌های رقومی (DEM) به زیر حوضه‌هایی تقسیم‌بندی شده و سپس با توجه به نقشه‌های خاک و کاربری اراضی، به واحدهای واکنش هیدرولوژیک که ازنظر کاربری اراضی و خصوصیات خاک همگن هستند، تقسیم‌بندی می‌گردد تا امکان شبیه‌سازی با جزییات مکانی بیشتر را فراهم آورد. در مدل SWAT ابتدا آب موجود در خاک، رواناب سطحی، چرخه عناصر غذایی، رسوب، رشد گیاهان و روش‌های مدیریتی برای هر واحد واکنش هیدرولوژیک شبیه‌سازی و سپس برای هر زیر حوضه به‌صورت متوسط وزنی محاسبه می‌گردد. اساس ساختار این مدل بر پایه مجموعه‌هایی از معادلات ریاضی و فرمول‌های تجربی مختلف هست. در سال‌های اخیر به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر منابع آب موجود در قاره‌ها و کشورها از مدل SWAT استفاده شده است. علت استفاده از این مدل این است که این مدل، یک مدل پیوسته زمانی بوده و در گام‌های زمانی روزانه، ساعتی یا طولانی‌مدت در مقیاس یک حوضه آبریز اجرا می‌شود. مدل SWATنیز در شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژی از معادله بیلان آبی به شکل زیر اســتفاده می‌کند (Neitsch et al., 2011):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t}\left(R_{day} - Q_{surf} - ET_a - W_{seep} - Q_{gw}\right) \quad (۱)$$

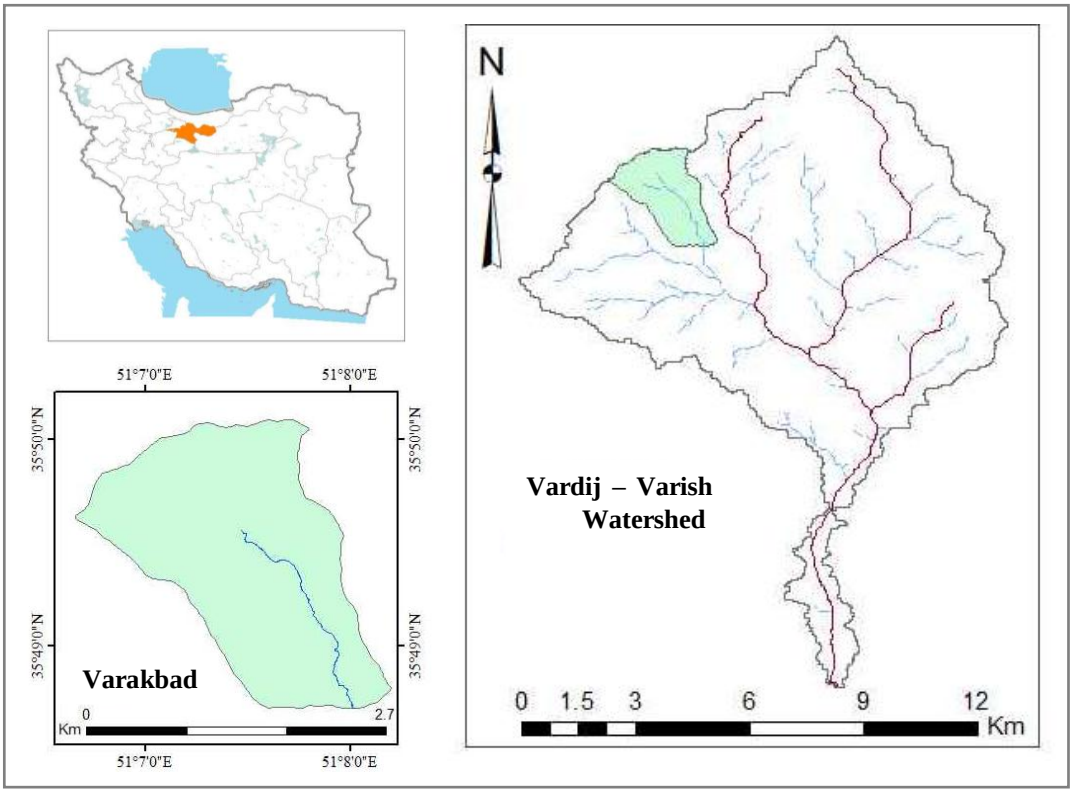

Fig. 1- Map of the study area

شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی

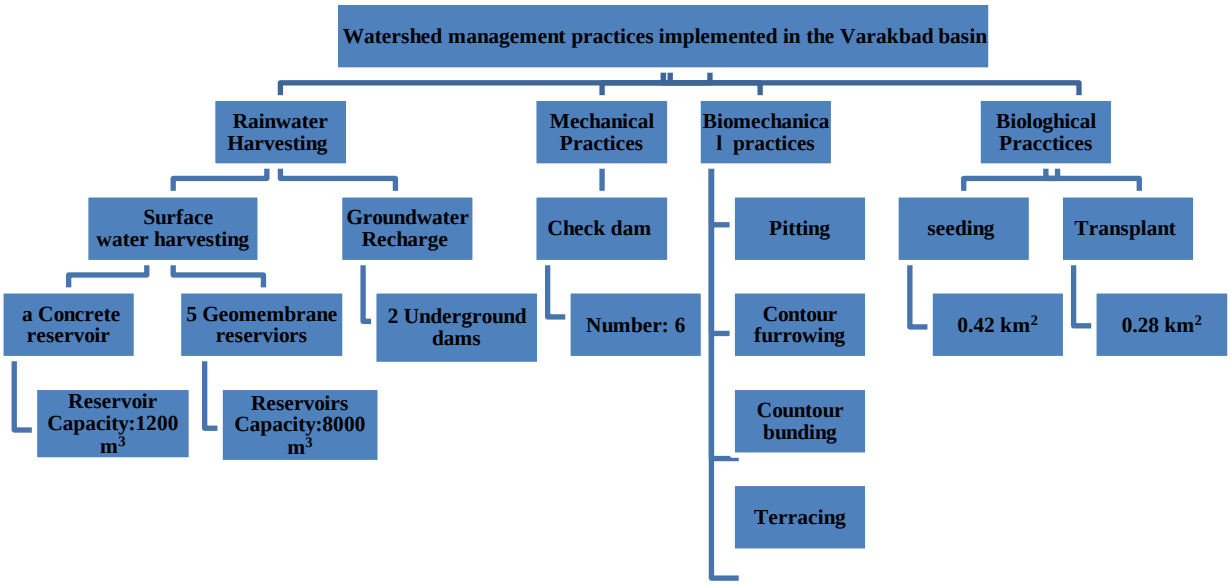

Fig. 2- Watershed management practices implemented in the Varakbad basin in Vardij-Varish Watershed

شکل ۲- اقدامات آبخیزداری انجام شده در زیرحوضه پایلوت ورکباد در حوضه آبخیز وردیج- واریش

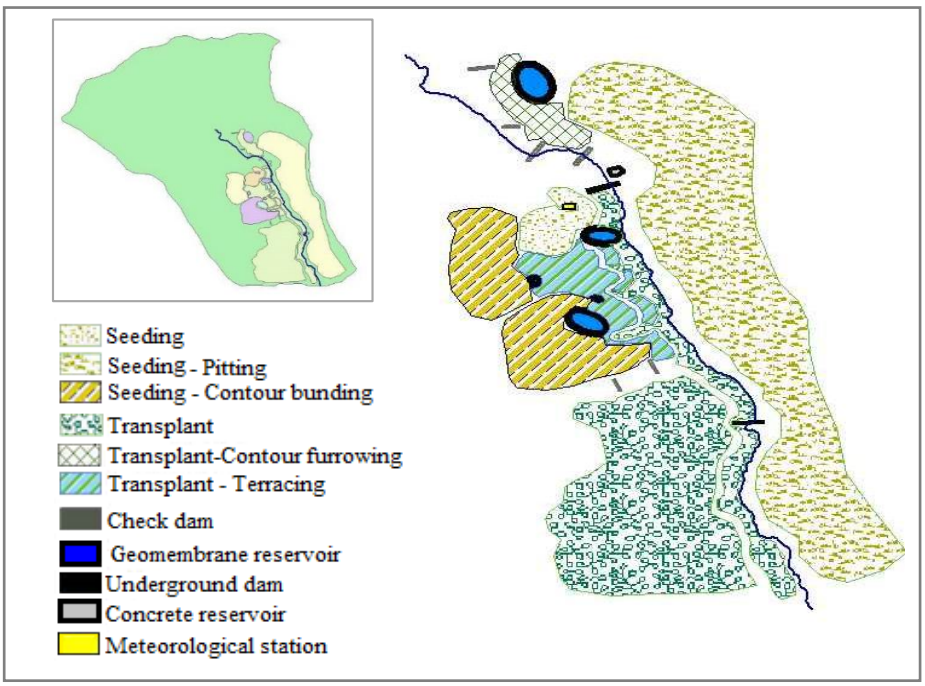

Fig. 3- Location of Watershed management practices in the Varkbad basin

شکل ۳- موقعیت مکانی اقدامات آبخیزداری در حوضه پایلوت ورکباد

در رابطه فوق SW_t مقدار نهایی رطوبت خاک (mm)، SW_0 مقدار اولیه آب در خاک در روز نخست (mm)، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی در روز i (mm)، R_{day} میزان بارندگی در روز i (mm)، t زمان بر حسب روز، ET_a مقدار تبخیر و تعرق در روز i (mm)، W_{seep} مقدار آبی که در روز i وارد منطقه ریشه می‌شود (mm) و Q_{gw} مقدار جریان برگشتی زیرزمینی در روز i است (mm).

در این تحقیق تخمین رواناب سطحی از روش SCS-CN (SCS, 1972)، تبخیر و تعرق پتانسیل از روش هارگریوز- سامانی[۶] براساس درجه حرارت هوا، میزان رطوبت خاک در هر مرحله زمانی با استفاده از بیلان جرم آب درون منطقه غیر اشباع خاک محاسبه می‌شود.

در مدل SWAT برای هر واحد هیدرولوژیکی (HRU[۲]) فرسایش و بار رسوب که بر اثر بارش و رواناب رخ داده است با استفاده از معادله اصلاح‌شده جهانی هدر رفت خاک (MUSLE) برآورد می‌شود (Williams and Singh, 1995).

$$SED = 11.8(Q_{surf}q_{peak}area_{hru})^{0.56}k_{usle}C_{usle}P_{usle}LS_{usle}CFRG \quad (۲)$$

SED: مقدار بار رسوب در یک روز (تن)، Q_{surf}: مقدار رواناب سطحی (میلی‌متر در هکتار)، q_{peak}: بیشینه شدت رواناب (مترمکعب بر ثانیه)، $area_{hru}$: مساحت هر HRU (هکتار)، K_{usle}: فاکتور فرسایش‌پذیری خاک، C_{usle}: فاکتور مدیریت و پوشش، P_{usle}: فاکتور روش‌های حفاظتی، LS_{usle}: فاکتور توپوگرافی و CFRG: فاکتور سنگ‌ریزه‌های درشت‌دانه می‌باشند.

۲-۲-۲- شبیه‌سازی اقدامات آبخیزداری در مدل SWAT

با توجه به مدیریت‌های مختلف آب و خاک در حوضه‌های مختلف و تأثیرات این مدیریت‌ها بر مؤلفه‌های بیلان آب، چگونگی شبیه‌سازی این اقدامات یکی از پیچیده‌ترین مراحل در بخش ورود اطلاعات در شبیه‌سازی منطقه، است (Neitsch et al., 2009). برای اعمال اقدامات آبخیزداری در این پژوهش از بخش operation موجود در مدل SWAT استفاده شد. شبیه‌سازی هر یک از اقدامات با تغییر برخی از پارامترهای مرتبط در این بخش انجام گرفت. بانکت و تراس‌بندی از طریق عملیات تراس‌بندی، کنتور فارو و پیتینگ از طریق عملیات کانتورینگ، اقدام بیولوژیکی نهال‌کاری و بذرکاری از طریق عملیات plant parm update به مدل معرفی شدند. نهال‌کاری با توجه به نوع درخت و به صورت یک نهال سه ساله لحاظ شد. علاوه بر این حوضچه‌های جمع‌آوری آب به‌صورت pond و بندهای اصلاحی (از نوع گابیون) به صورت detention pond شبیه‌سازی شدند. دو سد زیرزمینی نیز به‌صورت سد سطحی درنظر گرفته شد که با تغییر پارامتر به‌صورت زیرزمینی درآمدند. پارامترها و محدوده تغییرات آنها برای شبیه‌سازی هر اقدام آبخیزداری مطابق جدول ۱ می‌باشد.

در جدول ذیل علامت مثبت به منظور افزایش و منفی به‌منظور کاهش هست. در کنار عددهایی که علامت وجود ندارد، ثابت درنظر گرفته‌شده است. به منظور پیاده‌سازی هر کدام از اقدامات آبخیزداری ذکر شده در جدول ذیل پارامترها در واحد پاسخ هیدرولوژیکی با پارامترهای جدول ذیل مقایسه و تعویض می‌شوند.

۲-۲-۳- بهترین شیوه مدیریتی

به منظور انتخاب بهترین شیوه مدیریتی از روش تصمیم‌گیری چند معیاره (تاپسیس) استفاده می‌شود. بدین منظور با استفاده از روش آنتروپی شانون وزن معیارها مشخص می‌گردد و با ایجاد ماتریس تصمیم‌گیری بهترین شیوه مدیریتی مشخص می‌شود.

Table 1- Simulation of watershed management practices in SWAT

جدول ۱- پارامترها و محدوده تغییرات آنها جهت شبیه‌سازی هر یک از اقدامات آبخیزداری در SWAT

	Parameter	Seeding	Trans plant	Contour furrowing	Contour bunding	Pitting	Terracing	Check dam
1	CN			-3	-2	-6	-6	-6
2	Slope-HRU					-20%	-20%	
3	SUB Slope						10	
4	USLE-P			0.6		0.18	0.18	0.6
5	Ov-N			+0.3				
6	Filter-w				+0.5			
7	Esco				+0.6			
8	Sol-K							+ 10.8%
9	Ch-S2							- 75%
10	Crop-Number	108	106					
11	Lai-max	0.8	1.2					
12	Harvest index	0.05	0.05					
	Reference	Arnold et al. (2012)		Arabi et al. (2008) Brandsma et al. (2013)		Brandsma et al. (2013)	Arnold et al. (2012)	Tesfahunegn et al. (2012); Fandel (2016)

۱- شماره منحنی خاک، ۲- شیب واحد هیدرولوژیکی، ۳- شیب زیرحوضه، ۴- ضریب فرسایش‌پذیری خاک، ۵- ضریب مانینگ دامنه، ۶- عرض نوار فیلتر، ۷- فاکتور جبران تبخیر خاک، ۸- هدایت هیدرولیکی اشباع، ۹- کاهش شیب کانال، ۱۰- شماره گیاه، ۱۱- حداکثر شاخص سطح برگ، ۱۲- شاخص برداشت محصول

۲-۲-۴- اطلاعات موردنیاز مدل‌سازی

برای ساخت مدل اطلاعات هواشناسی و اطلاعات مکانی حوضه آبریز وردیج- واریش جمع‌آوری شد. نقشه خاک با ۲۱ نوع کلاس خاک، لایه کاربری اراضی با ۱۱ نوع کاربری و لایه رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متری در تهیه مدل استفاده شد (شکل ۴). حوضه آبریز وردیج واریش به ۱۶۴۰ واحد هیدرولوژیکی و ۱۱۳ زیر حوضه تقسیم شد. داده‌های اقلیمی و هواشناسی یکی از مهم‌ترین ورودی‌های مدل هیدرولوژیکی محسوب می‌شوند. لذا دقت و صحت این داده‌ها از اهمیت فراوانی برخوردار بوده و تأثیر زیادی بر خروجی مدل‌دارند. در این تحقیق داده‌های بارش و دما از ایستگاه هوشناسی موجود در حوضه آبریز ورکباد استفاده شد. همچنین داده‌های مربوط به جریان از دو ایستگاه هیدرومتری واقع در پایین دست سدهای زیرزمینی در این حوضه جمع‌آوری شد (شکل ۴). در پایان مدل برای دوره ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ اجرا شد.

۲-۲-۵- آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل

توانایی یک مدل هیدرولوژیکی برای تولید پیش‌بینی‌های رضایت‌بخش لزوماً با آنالیز حساسیت متناسب با کالیبراسیون مدل مشخص می‌شود. در این تحقیق تحلیل حساسیت مدل با استفاده از نرم‌افزار SWATCUP و با استفاده از الگوریتم SUFI-2 انجام شد کمی کردن درجه عدم قطعیت توسط دو فاکتور به نام‌های P-factor، R-factor انجام می‌شـــود. P-factor درصدی از داده‌های مشاهداتی را نشان می‌دهد که در باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار گرفته‌اند و مقدار آن بین صفر تا یک است. R-factor حاصل تقسیم میانگین باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد بر انحراف معیار داده‌های مشاهداتی است و مقدار آن بین صفر و بی‌نهایت بوده و میزان مطلوب آن کمتر از یک هست. زمانی که داده‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای کاملاً با هم منطبق باشند مقادیر P-factor و R-factor به ترتیب برابر یک و صفر می‌باشند با در دسترس بودن داده‌های هواشناسی و مدیریتی مدل SWAT برای سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ (سال‌های آبی ۹۶-۹۵ و ۹۷-۹۶) ساخته شد. همچنین داده‌های ایستگاه هیدرومتری (رواناب) برای سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ برای دو نقطه در پایین‌دست سدهای زیرزمینی در حوضه آبریز وردیج به‌صورت روزانه موجود هست. در این پژوهش نتایج براساس ایستگاه هیدرومتری دوم در خروجی سد زیرزمینی پایین‌تر بیان می‌شود. ۷۰ درصد داده‌های مشاهداتی برای واسنجی و مابقی برای اعتبارسنجی استفاده شد. این مدل برای رواناب واسنجی و اعتبارسنجی شد. عملیات اعتبارسنجی مدل با انتخاب صحیح مقادیر برای پارامترهای منتخب به‌صورت روزانه انجام گردید. سپس مدل با استفاده از چهار شاخص ضریب تبیین (R^2)، ضریب نش- ساتکلیف (NS)، R-factor و P-factor مورد ارزیابی قرار گرفت.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

۳-۱- واسنجی و اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی

نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT برای حوضه آبریز وردیج- واریش به ازای بارش ورودی روزانه از ایستگاه‌های هواشناسی و ایستگاه دبی‌سنجی در خروجی سد زیرزمینی پایین‌دست در حوضه آبریز ورکباد در شکل ۵ آمده است. ارزیابی کارآیی مدل در شبیه‌سازی رواناب نیز در جدول ۲ براساس شاخص‌های مورد نظر ارائه شده است.

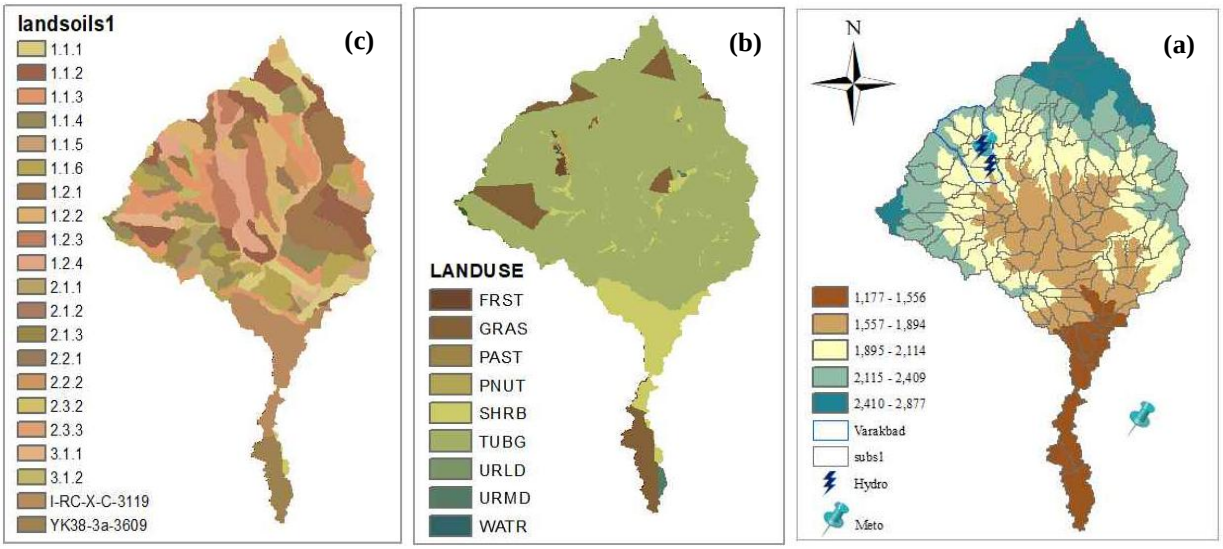

Fig. 4- (a) DEM and Subbasins, (b) land use and (c) Soil Type of Vardij- Varish watershed

شکل ۴- نقشه DEM و زیرحوضه‌ها، کاربری اراضی، خاک حوضه آبریز وردیج- واریش

ضریب نش- ساتکلیف و ضریب تبیین بیشتر از ۰/۶ برای هر دو دوره بیانگر توانایی قابل قبول مدل در شبیه‌سازی رواناب است.

در جدول ۳ مجموعه پارامترهایی ورودی به منظور شبیه‌سازی رواناب روزانه در حوضه وردیج– واریش و همچنین شبیه‌سازی عملیات آبخیزداری آمده است. آنالیز حساسیت آنها در مدل با استفاده از دو شاخص t-stat و p-value انجام شد. هر پارامتری که مقدار قدر مطلق t-stat بیشتری و مقدار p-value آن نزدیک صفر باشد، مدل حساسیت بیشتری به آن پارامتر دارد. مقادیر t-stat و p-value پارامترها نیز در جدول ۳ آمده است. پارامترهای CN2، SOL-Z، TMPINC و TLAPS پارامترهای حساس هست. حدود تغییرات پارامترها و مقدار بهینه آن‌ها نیز براساس دوره واسنجی در جدول ۳ ارائه شده است. تغییر پارامترها به صورت مطلق و یا به صورت نسبی انجام می‌شود. مقادیر مثبت و منفی در ستون سوم جدول ۳ به ترتیب بیان‌کننده افزایش و کاهش مقدار پارامتر در بازه تعریف شده نسبت به مقدار مطلق آن پارامتر است.

۲-۳- ارزیابی اقدامات آبخیزداری

ارزیابی کلیه اقدامات آبخیزداری در حوضه ورکباد در دو فاز زمین و رودخانه انجام شد. با بررسی منابع مختلف تأثیرگذاری اقداماتی مانند تراس‌بندی، خطوط کانتور، نهال‌کاری، بذرکاری، پیتینگ، خشکه‌چین و گابیون به دلیل اجرای این اقدامات در سطح وسیع و تأثیرگذاری

Table 2- Statistical criteria for SWAT performance for runoff simulation

جدول ۲- ارزیابی کارای مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب

Statistical criteria	R^2	NS	P-factor	R-factor
Calibration	0.85	0.7	0.43	0.9
verification	0.89	0.63	0.45	0.88

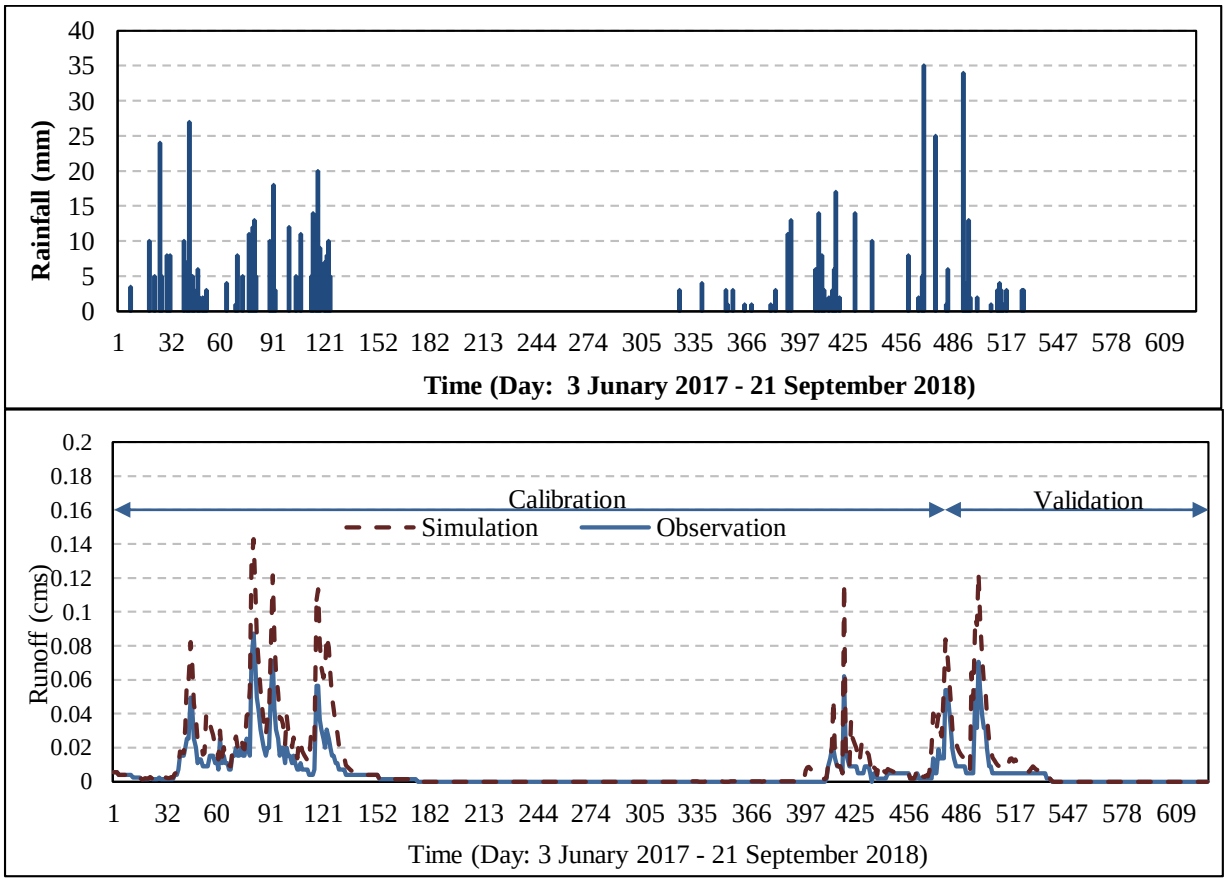

Fig. 5- Daily time series of rainfall and runoff for the calibration aZnd validation period

شکل ۵- سری زمانی روزانه بارش و رواناب برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی

Table 3- Sensitivity analysis and the optimal value of SWAT parameters

جدول ۳- آنالیز حساسیت و مقدار بهینه پارامترهای برای شبیه‌سازی

Parameter	Description	Range of variation	Optimal value	p-value	t-stat
CN2	شماره منحنی	(-0.32 _ 0.18)	-0.08	0	-23.5
SOL_Z	عمق از سطح خاک تا پایین لایه	(-0.4 _ 0.4)	-0.08	0	10.03
TMPINC	گرادیان دما	(3 _ 7)	5.6	0	8.81
TLAPS	گرادیان بارش	(-7.5 _ -6)	-7	0	4.82
SOL_AWC	ظرفیت آب قابل‌دسترس خاک (mmH2O/mmSoil)	(0.44 _ 0.66)	0.62	0.03	2.06
GW_DELAY	زمان رسیدن آب از آخرین لایه‌ی خاک به سفره آب زیرزمینی	(-0.3 _ 0.3)	-0.2	0.12	1.55
EPCO	ضریب جذب گیاه	(-0.44_ 0.16)	-0.37	0.15	1.47
GW_REVAP	ضریب حرکت آب از ناحیه اشباع به غیر اشباع در آب زیرزمینی	(-0.3 _ 0.3)	0.26	0.25	1.19
ADJ_PKR	فاکتور تصحیح نرخ حداکثر برای روندیابی رسوب در آبراهه‌های فرعی	(-0.5 _ 0.5)	0.018	0.29	1.07
LAT_TIME	زمان حرکت جریان آبراهه فرعی	(3.8 _ 8.2)	4.64	0.9	0.14
SLSUBBSN	میانگین طول شیب (m)	(-0.3 _ 0.3)	0.15	0.95	0.07
SURLAG	ضریب تأخیر رواناب سطحی	(-0.3 _ 0.3)	0.268	0.3	-0.08
SHALLST	عمق اولیه آب در آبخوان کم‌عمق	(-0.3 _ 0.3)	0.25	0.88	-0.17
ALPHA_BNK	ضریب جریان پایه برای جریان‌های جانبی	(-0.3 _ 0.3)	0.2	0.77	-0.29
OV_N	ضریب مانینگ برای جریان سطحی	(-0.3 _ 0.3)	0.005	0.7	-0.39
SOL_K	هدایت هیدرولیکی در منطقه اشباع	(-0.58 _ -0.22)	-0.45	0.62	-0.45
RFINC	تنظیم بارش	(6 _ 14)	10.89	0.6	-0.54
HRU_SLP	متوسط شیب (m/m)	(-0.3 _ 0.3)	-0.18	0.55	-0.61
SOL_K_29_27	هدایت هیدرولیکی در منطقه اشباع	(-0.82 _ -0.38)	-0.67	0.5	-0.67
SNOEB	مقدار آب برف اولیه در باند ارتفاع	(-0.5 _ 0.5)	-0.18	0.35	-0.96
GWQMN	حد آستانه عمق آب در آبخوان کم عمق برای وقوع جریان برگشتی (mmH2O)	(3000 _ 6500)	5575.68	0.3	-1.43
ALPHA_BF	ضریب جریان پایه آب زیرزمینی (days)	(-0.3 _ 0.3)	-0.1	0	-2.26
PLAPS	نرخ تأخیر باران	(65 _ 120)	109.17	0	-3.08

قابل توجه آن‌ها بر اجزای مختلف معادله بیلان آب (رابطه ۱) و همچنین بار رسوبی (رابطه ۲) با مدل SWAT در سطح زمین انجام شد و این اقدامات در سطح واکنش هیدرولوژیکی پیاده و مدل‌سازی شد. اما برخی از اقدامات از قبیل سدزیرزمینی، حوضچه جمع‌آوری آب باران و بند تأخیری با مطالعه منابع مختلف در سطح زیرحوضه مدل‌سازی شد، و برای ارزیابی این گونه اقدامات فاز رودخانه حوضه آبریز ورکباد مورد توجه قرار گرفت. مؤلفه‌های مقادیر بیلان آب و همچنین مقدار بار رسوب به صورت جداگانه برای HRU_s هایی که اقدامات آبخیزداری در آن‌ها پیاده شده است محاسبه شد. مدل حوضه آبریز ورکباد یک‌بار، تنها برای HRU که دارای اقدامات آبخیزداری هست شبیه‌سازی شد و نتایج آن با حالت پایه یعنی بدون وجود هیچ اقدام آبخیزداری مقایسه گردید. براساس مدل واسنجی شده، متوسط سالانه مؤلفه‌های بیلان آب در دوره آماری مورد بررسی برای حوضه وردیج- واریش که مبین شرایط پایه است عبارتند از: بارش ۳۳۸ میلیلمتر، تبخیر و تعرق واقعی (ET_a) ۲۱۳/۵ میلیمتر، تغییرات رطوبت خاک (SW) در سال ۳ میلیمتر، تغذیه آب زیرزمینی۱۴ میلیمتر، رواناب سطحی ۲/۳۷ میلیمتر و رواناب زیرسطحی ۱۰۷/۱۳ میلیمتر که با توجه به شنی بودن جنس خاک در این حوضه منطقی است.

متوسط درصد تغییرات مؤلفه‌های بیلان آبی (رابطه ۱) و بار رسوبی (رابطه ۲) به ازای اعمال سه دسته از اقدامات آبخیزداری، بذرکاری همراه با عملیات بیومکانیکی، نهال‌کاری همراه با عملیات بیومکانیکی و بخش سوم عملیات مکانیکی و مدیریت منابع آب در جدول ۴ ارائه شده است. رطوبت خاک (SW) تفاضل این مؤلفه در یک فاصله زمانی و مقدار جریان بازگشتی به آب زیرزمینی است. سایر مؤلفه‌ها نیز در رابطه ۱ و ۲ آمده است.

Table 4- Effects of watershed management practices on water balance components and sediment in Vardij-Varish

جدول ۴- ارزیابی اقدامات آبخیزداری انجام شده بر مؤلفه‌های بیلان آبی حوضه وردیج- واریش

Watershed Management Practices	Perceptual change of the water-balance components				
	ET_a	SW	W_{seep}	Q_{surf}	Sed
Seeding	11.5	60	-50	-9	-40
Seeding - Pitting	5	2	80	-15	-92
Seeding - Check dam	3.5	32	-17	-52	-74
Seeding – Contour bunding	1.5	14	-11	-83	-90
Transplant	4.5	3	-25	-36	-44
Transplant - Terracing	2	3.5	-19	-91.5	-99
Transplant - Contour furrowing	2.5	16	-16	-51	-75
Transplant - Terracing- Contour furrowing	8.5	25	30	-77	-97.5
Terracing	4	10	24	-58	-96
Underground dam				-10	-50
Check dam				-20	-35
Reservoirs				-1.5	-33

با توجه به مثبت بودن درصد تغییرات رطوبت خاک و منفی بودن درصد تغییرات نفوذ و رواناب می‌توان بیان کرد که اکثر اقدامات آبخیزداری باعث حفظ رطوبت خاک و کاهش خروج منابع آب از حوضه آبریز می‌شود. بذرکاری به تنهایی و یا همراه با اقدامات بیومکانیکی (بخش اول جدول ۴) نسبت به دیگر اقدامات آبخیزداری بیشترین تأثیر را افزایش رطوبت خاک در منطقه غیر اشباع (افزایش ۶۰ درصدی SW) داشته است. اما از سوی دیگر این دسته تقریباً تبخیر و تعرق را بیشتر از دسته نهال‌کاری (بخش دوم جدول ۴) افزایش می‌دهد. به گونه‌ای که عملیات بیولوژیک بذرکاری تبخیر و تعرق را نسبت به شرایط پایه (عدم وجود بذرکاری در HRUهای مربوطه) ۱۱/۵ درصد افزایش می‌دهد. با ادغام عملیات بیومکانیکی همچون پیتینگ و بانکت‌بندی با بذرکاری می‌توان این مؤلفه بیلان به شدت کاهش داد (ردیف دوم تا چهارم جدول ۴). بانکت‌بندی در کنار بذرکاری تبخیر و تعرق را از ۱۱/۵ درصد به ۱/۵ درصد نسبت به شرایط پایه کاهش می‌دهد. پس از آن بذرکاری، اقدام بیومکانیک تراس‌بندی، کانتور فارو و نهال‌کاری بیشترین تأثیر را در افزایش رطوبت خاک دارد. همچنین اقدام ترکیبی تراس‌بندی و نهال‌کاری بیشترین کاهش در رواناب را داشته است. پس از آن اقدام ترکیبی بانکت‌بندی و بذرکاری قرار دارد. اقداماتی مانند پیتینگ و بذرکاری و تراس‌بندی و اقدام ترکیبی تراس‌بندی، خطوط کانتور و نهال‌کاری سبب افزایش نفوذ شدند. مابقی اقدامات سبب کاهش این مؤلفه شدند. در راستای حفظ منابع خاکی و کاهش رسوب همه اقدامات تأثیر بسزایی دارند که در راس آن می‌توان به اقدام ترکیبی تراس‌بندی و نهال‌کاری با یکدیگر اشاره کرد که سبب کاهش ۹۹ درصدی بار رسوب می‌شود.

همچنین، به منظور انتخاب بهترین روش مدیریتی از روش تصمیم‌گیری چند معیاره تاپسیس استفاده شد. در این روش پس از تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری، ابتدا وزن‌های هر اقدام مدیریتی با استفاده از روش آنتروپی به دست آمد سپس نتایج با استفاده از روش تاپسیس به شرح زیر به دست آمد. بهترین اقدام مدیریتی به ترتیب عبارتند از: بذرکاری؛ اقدام ترکیبی نهال‌کاری، تراس‌کاری، کانتور فارو؛ بذرکاری در کنار بند اصلاحی؛ نهال‌کاری با تراس‌بندی؛ بذرکاری و بانکت‌بندی؛ بذرکاری با پیتینگ؛ تراس‌بندی؛ نهال‌کاری و کانتور فارو و در نهایت نهال‌کاری، به عنوان بهترین روش‌های مدیریت حوضه در زمینه منابع آب و خاک انتخاب شد (شکل ۶).

۴- جمع‌بندی

در پژوهش حاضر حوضه آبریز وردیج واریش در مدل هیدرولوژیکی SWAT پیاده‌سازی شد. نتایج صحت‌سنجی مدل نشان داد این مدل در برآورد مؤلفه‌های بیلان حوضه آبریز وردیج واریش از کارآیی مناسبی برخوردار است و می‌توان برای تحلیل سناریوهای مختلف مدیریتی در حوضه آبریز مورد استفاده قرار داد. مدل حوضه آبریز وردیج واریش به صورت روزانه طی دوره زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ شبیه‌سازی شد. مقدار ضریب R^2 و ضریب نش ساتکلیف دوره واسنجی برای ایستگاه هیدرومتری مورد نظر معادل ۰/۸۵ و ۰/۷ بود. اقدامات آبخیزداری انجام شده در منطقه پایلوت ورکباد در مدل جانمایی شد و اثر بخشی هر اقدام در بهبود مؤلفه‌های بیلان آب و رسوب با حالت پایه مقایسه و ارزیابی شد.

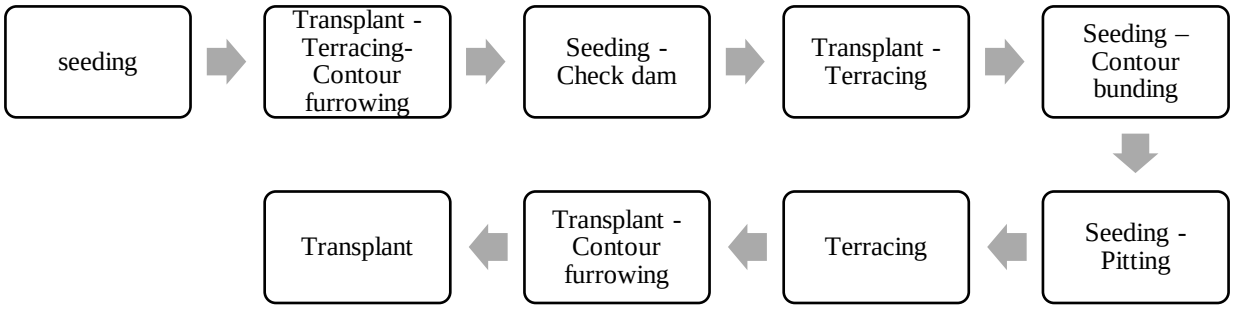

Fig. 6- Prioritization of watershed management measures in improving water balance components and sediment in Vardij-Varish

شکل ۶- اولویت‌بندی اقدامات آبخیزداری در بهبود مؤلفه‌های بیلان آب و رسوب در حوضه وردیج- واریش

در مقایسه دو عملیات بیولوژیک بذرکاری و نهال‌کاری می‌توان گفت بذرکاری تبخیر و تعرق را بسیار افزایش می‌دهد اما به واسطه تأثیر نفوذ آب، در افزایش رطوبت خاک در منطقه غیر اشباع بسیار موثرتر است. اما در کاهش رواناب حوضه نهال‌کاری از بذرکاری موفق‌تر عمل کرده است. می‌توان گفت اثربخشی هر دو این اقدام در کاهش بار رسوبی تقریباً یکسان است. نتایج تحقیق Hartwich et al. (2016) بر روی محصولات زراعی نیز افزایش تبخیر و تعرق واقعی، کاهش شارژ آب زیرزمینی و افزایش ظرفیت آب موجود در خاک را نشان می‌دهد که همسو با نتایج این تحقیق (ردیف اول جدول ۴) می‌باشد. افزایش ۳/۶ درصدی سطح جنگل موجب کاهش ۵/۹ درصدی رواناب سطحی و ۴۱/۹ درصدی بار رسوب در حوضه مطالعاتی تحقیق Bieger et al. (2015) شده است.

در این پژوهش ارزیابی هر یک از این دو اقدام بیولوژیک در ترکیب با یک اقدام بیومکانیکی این موارد قابل تأمل بود: بذرکاری و پیتینگ با حداقل تأثیر مثبت در افزایش رطوبت خاک در منطقه غیراشباع، با افزایش ۸۰ درصدی مؤلفه نفوذ، بیشترین تأثیر را در بهبود این مؤلفه در بین سایر اقدامات به خود اختصاص داده است. علاوه بر این بار رسوبی را نیز به بیش از ۹۰ درصد کاهش می‌دهد. اما در کاهش رواناب سطحی بیشتر از ۱۵ درصد تأثیر ندارد. اما بذرکاری همراه با بانکت‌بندی قادر خواهد بود تا ۸۳ درصد رواناب را کاهش دهد. نهال‌کاری همراه با اقدام بیومکانیک کنتور فارو، تبخیر و تعرق را کمتر کرده و رطوبت خاک را در منطقه غیر اشباع تقریباً چهار برابر افزایش می‌دهد و تأثیر بیشتری در کاهش رواناب و بار رسوبی خواهد داشت. تراس‌بندی به صورت مجزا نفوذ را تا ۲۴ درصد افزایش و رواناب را تا ۵۸ درصد کاهش می‌دهد، اما چنانچه با نهال‌کاری اجرا شود تا ۹۱ درصد رواناب را کاهش می‌دهد هر چند که نفوذ در لایه غیر اشباح را تا ۱۹ درصد کاهش می‌دهد. بنابراین در استفاده از هر گونه اقدام بیولوژیک و بیومکانیکی باید متناسب با هدف مورد نظر نوع اقدام را مشخص نمود. در مطالعه Habibzadeh et al. (2007) تأثیر پیتینگ و بذرکاری در کاهش رواناب سالانه بین ۳۵ تا ۶۵ درصد و کاهش بار رسوبی سالانه بین ۶۷ تا ۷۳ درصد گزارش شده است. ترکیب تراس و نهال‌کاری نیز رواناب و فرسایش خاک را در مقایسه با خاک برهنه به ترتیب ۷۸ و ۸۳ درصد کاهش داده است (Zuazo et al., 2011).

سد و حوضچه جمع‌آوری آب باران و در نهایت بندهای اصلاحی در کاهش رواناب و بار رسوبی کمترین تأثیر را در قیاس با دیگر اقدامات آبخیزداری داشته اند که با توجه به مقیاس شبیه‌سازی آن‌ها و همچنین وسعت ناچیز آن‌ها در مقایسه با مساحت مورد بررسی منطقی به نظر می‌رسد. در تحقیقی کاهش ۱۶/۸ درصد در حداکثر جریان روزانه به واسطه وجود حوضچه‌ها گزارش شده است (Kaini et al., 2007) در تحقیق دیگری آمده است که حوضچه و تالاب‌های طبیعی رواناب حدود ۴۰ درصد و بار رسوبی را حدود ۸ درصد کاهش می‌دهد (Almendinger et al., 2014).

در این پژوهش اولویت‌بندی اقدامات آبخیزداری در زمینه حفظ منابع آب و خاک با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس نشان داد که اقدام بیولوژیک بذرکاری رتبه نخست و اقدام بیولوژیک نهال‌کاری در رتبه آخر قرار می‌گیرد و ترکیب اقدامات بیولوژیک و بیومکانیکی جایگاه‌های میانی را به خود اختصاص می‌دهند.

در خاتمه قابل ذکر است که در این تحقیق اقدامات آبخیزداری اجرا شده در حوضه پایلوت ورکباد در حوضه وردیج- واریش مطابق با وسعت و پراکنش مکانی آن همراه با عدم قطعیت‌های آماری و شناختی شبیه‌سازی شد و تغییرات نسبی مؤلفه‌های بیلان در انتهای خروجی حوضه نسبت به شرایط پایه (عدم اجرای اقدامات) گزارش شده است. لذا تعمیم این نتایج به سایر حوزه‌ها نیازمند تحقیقات بیشتر است.

۵- تقدیر و تشکر

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از کارشناسان پروژه طرح الگویی حوضه پایلوت ورکباد به ویژه آقایان آصفی و یوسف‌وند برای تأمین اطلاعات مورد نیاز این پژوهش تشکر نمایند.

پی‌نوشت‌ها

1- Process Based
2- Soil and Water Conservation measures
3- Maximum Possible Storage of Green Water
4- Consumed Green Water
5- Utilizable Green Water
6- Hargreaves-Samani
7- Hydrologic Response Unit

۶- مراجع

Abouabdillah A, White M, Arnold J G, De Girolamo A M, Oueslati O, Maataoui A, Lo Porto A (2014) Evaluation of soil and water conservation measures in a semi-arid river basin in Tunisia using SWAT. Soil Use and Management 30(4):539-549

Ahmadabadi A, Kiani T, Ghaforpor P (2017) The effects of watershed management practices in Hydro-geomorphological characteristics in Anbaranchay watershed. spatial Planning (MODARES HUMAN SCIENCES) 21(2):35-55 (In Persian)

Almendinger JE, Murphy MS, and Ulrich JS (2014) Use of the soil and water assessment tool to scale sediment delivery from field to watershed in an agricultural landscape with topographic depressions. Journal of Environmental Quality 43(1):9-17

Arabi M, Frankenberger J R, Engel B A, Arnold J G (2008) Representation of agricultural conservation practices with SWAT. Hydrological Processes: An International Journal 22(16):3042-3055

Arnold J G, Kiniry J, Srinivasan R, Williams J, Haney E, Neitsch S (2012) Soil and water assessment tool input/output documentation version 2012. Texas Water Resources Institute 7

Brandsma J, van den Eertwegh G, Droogers P, Bai Z, Zhang S (2013) Green and blue water resources and management scenarios using the SWAT model for the upper Duhe Basin, China-Feasibility study. Future Water Report

Bieger K, Hörmann G, and Fohrer N (2015) The impact of land use change in the Xiangxi Catchment (China) on water balance and sediment transport. Regional Environmental Change 15(3):485-498

Delavar M, Morid S, Morid R, Farokhnia A, Babaeian F, Srinivasan R, Karimi P (2020) Basin-wide water accounting based on modified SWAT model and WA+ framework for better policy making. Journal of Hydrology 585:124762, ISSN 0022-1694

FAO (2017) Watershed management in action. Lessons Learned from FAO Field Projects, Rome,170P

Fandel C A (2016) The effect of gabion construction on infiltration in ephemeral streams. The University of Arizona

Gao X, Zuo D, Xu Z, Cai S, Xianming H (2018) Evaluation of blue and green water resources in the upper Yellow River basin of China. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences 379:159-167

Geyrani F (2016) Simulation of erosion, sediment transport and protection solutions in Gamasiab catchment using SWAT model. M.Sc. Thesis, School of Agriculture, Univercity of Tarbiat Modares (In Persian)

Ghebremichael L, Veith T, Watzin M (2010) Determination of critical source areas for phosphorus loss: Lake Champlain basin, Vermont. Transactions of the ASABE 53(5):1595-1604

Habibzadeh A, Kahni M, Ghodarzi M, Sadeghzadeh ME, Farhpour M (2007) The effect of pitting, ripping, and contour furrow watershed operations on the soil conservation and sediment decreasing. In: Proc. of national Conference on Watershed Management Science and Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, Tehran University, Karaj, Iran (In Persian)

Hartwich J, Schmidt M, Bölscher J, Reinhardt-Imjela C, Murach D, and Schulte A (2016) Hydrological modelling of changes in the water balance due to the impact of woody biomass production in the North German Plain. Environmental Earth Sciences 75(14):1071

Hunink J, Droogers P, Kauffman S, Mwaniki B, Bouma J (2012) Quantitative simulation tools to analyze up- and downstream interactions of soil and water conservation measures:Supporting policy making in the Green Water Credits program of Kenya. Journal of Environmental Management 111:187-194

Jahad Tahghiaghat Group (2011) Comprehensive plan for the protection and restoration of natural resources north of Tehran and Shemiranat (South Alborz). Forests, Rangelands and Watershed Management Organization, 81p (In Persian)

Jang S S, Ahn S R, Kim S (2017) Evaluation of executable best management practices in Haean highland agricultural catchment of South Korea

watershed of Borjestanak Dam (Ghaemshahr city). M.Sc. Thesis, School of Agriculture, Univercity of Shahid Beheshti (In Persian)

Sharifi F (2015) Design and implementation of a semi-industrial model of conservation, rehabilitation, development, water and soil and operation of the watershed. Research Project, Research Institute for Soil Conservation and Watershed Management (In Persian)

Tesfahunegn G B, Vlek P L, Tamene L (2012) Management strategies for reducing soil degradation through modeling in a GIS environment in northern Ethiopia catchment. Nutrient Cycling in Agroecosystems 92(3):255-272

Williams J R, Singh V (1995) Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch 909-1000

Wischmeier W, Smith D J W (1978) a guide to conservation planning (Agriculture Handbook 537). United States Department of Agriculture Predicting Rainfall Losses

Zhu K, Xie Z, Zhao Y, Lu F, Song X, Li L ,Song X (2018) The assessment of green water based on the SWAT model: A case study in the hai river basin, China. Water 10(6):2073-4441

Zhang W, Zha X, Li J, Liang W, Ma Y, Fan D, Li S (2014) Spatiotemporal change of blue water and green water resources in the headwaterof Yellow River Basin, China. Water Resources Management 28(13):4715-4732

Zuazo VD, Pleguezuelo CR, Peinado FM, De Graaff J, Martínez JF, and Flanagan D (2011) Environmental impact of introducing plant covers in the taluses of terraces: Implications for mitigating agricultural soil erosion and runoff. Catena 84(1-2):79-88

using SWAT. Agricultural Water Management 180(PB):224-234

Jeremiah E, Sisson S A, Sharma A, Marshall L (2012) Efficient hydrological model parameter optimization with Sequential Monte Carlo sampling. Environmental Modelling & Software 38:283-295

Kaini P, Artita K, and Nicklow J (2007) Evaluating optimal detention pond locations at a watershed scale. Paper Presented at the World Environmental and Water Resources Congress 2007: Restoring Our Natural Habitat

Lemann T, Zeleke G, Amsler C, Giovanoli L, Suter H, Roth V (2016) Modelling the effect of soil and water conservation on discharge and sediment yield in the upper Blue Nile basin, Ethiopia. Applied Geography 73:89-101

Li J, Yin W (2014) Effect of green water management on river base flow. Paper presented at the Applied Mechanics and Materials 692:90-96

Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, Williams J R (2011) Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute

Nikkhah R (2015) Co-management of green and irrigated water to increase water productivity, under the influence of climate change conditions (Case study of Namdan catchment). M.Sc. Thesis, School of Agriculture, Univercity of Tarbiat Modares (In Persian)

Rallison R E, Miller N (1982) Past, present, and future SCS runoff procedure. Paper presented at the Rainfall-runoff relationship/proceedings, International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling held May 18-21, Mississippi State University, Mississippi State, U.S.A.

Rohanizadeh S (2008) Evaluation of watershed management operations on soil protection in the