

هیدروژئومورفولوژی، شماره ۱۵، تابستان ۱۳۹۷، صص ۷۴-۵۵

وصول مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۱۰ تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۲۴

بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی آینده بر تغییرات دبی رودخانه‌ی هروچای اردبیل با استفاده از مدل‌های SWAT و LARS-WG

رضا قضاوی^{*۱}

میثم ندیمی^۲

ابراهیم امیدوار^۳

رسول ایمانی^۴

چکیده

آگاهی از نحوه تغییرات دبی رودخانه و به دنبال آن تغییرات ویژگی‌های کمی آب، می‌تواند کمک شایانی به مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب نماید. میزان اثرات زیست محیطی و اقتصادی- اجتماعی تغییرات دبی رودخانه، در مدیریت آب زیست محیطی بسیار حائز اهمیت است. لذا در این تحقیق، به منظور بررسی تغییرات کمی آب رودخانه‌ی هروچای اردبیل، دبی رودخانه با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی گردید. در ادامه با استفاده از مدل اقلیمی LARS-WG داده‌های دما و بارش به صورت روزانه تحت سه سناریو A2، B1 و A1B برای دوره‌ی ۲۰۱۴-۲۰۴۰ استخراج و داده‌های شبیه‌سازی شده به مدل SWAT وارد و مدل برای دوره‌ی آماری مذکور اجرا گردید. بر اساس نتایج حاصل از پیش‌بینی بارش، تحت شرایط دو سناریو A2 و B1 بارش در دوره‌ی پیش‌بینی افزایش خواهد یافت ولی کاهش بارش تحت شرایط سناریو A1B اتفاق خواهد افتاد. نتایج شبیه‌سازی دبی نشان داد که مدل SWAT طی

۱- دانشیار گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران (نویسنده مسئول).

E-ghazavi@kashanu.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

۳- استادیار گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

۴- دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

دوره‌ی واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب با ضریب کارایی ۰/۸۱ و ۰/۸۴ دارای عملکرد قابل قبولی بوده است. سایر نتایج، افزایش دبی را بر اساس نتایج دو سناریو A2 و B1 و کاهش دبی را بر اساس نتایج سناریو AIB نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، مدل SWAT، مدل LARS-WG، رودخانه‌ی هروچای.

مقدمه

آخرین گزارش IPCC^۱ (۲۰۱۳) از نقش اصلی انسان در گرم شدن کره‌ی زمین به ویژه در ۲۰ سال اخیر سخن می‌گوید که در اثر افزایش گازهای گل‌خانه‌ای حادث شده است (باسی و همکاران^۲، ۲۰۱۴، مانوژ و همکاران^۳، ۲۰۱۴). بسته به میزان انتشار گازهای گل‌خانه‌ای، مقدار متوسط افزایش دمای جهانی در انتهای قرن ۲۱ نسبت به سال‌های ۱۹۸۹-۱۹۹۹ بین ۱/۱ تا ۶/۴ درجه سانتی‌گراد خواهد بود (وزنیکی^۴، ۲۰۰۷). این تغییرات می‌تواند منجر به تغییر در مدت، شدت، فرم و زمان بارش و به تبع آن تغییر در حجم، زمان و مدت رواناب گردد؛ به گونه‌ای که با هر گونه تغییر در رژیم بارش و دما، جریان رودخانه تغییر پیدا می‌کند (عباسی‌پور و همکاران، ۲۰۱۳؛ شی و همکاران^۵، ۲۰۱۵). به منظور برنامه‌ریزی دوره‌های آبی، شناخت وضعیت منابع آب و بخصوص آبدهی ناشی از تغییر اقلیم ضروری است. منابع کمی آب، متأثر از دما و بارش بوده و از طرف دیگر این متغیرها در حال تغییر هستند، بنابراین بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب دارای اهمیت می‌باشد (باسی و همکاران، ۲۰۱۴؛ پاراژولی و همکاران^۶، ۲۰۱۶). برای ارزیابی و پیش‌بینی تأثیر تغییرات اقلیمی بر تغییرات میزان دبی، انتخاب و استفاده از مدل مناسب، که پیش‌بینی‌های معقولی ارائه کند ضروری است. برای ارزیابی این

1- Intergovernmental Panel on Climate Change

2- Busi et al.,

3- Manoj et al.,

4- Woznicki

5- Shi

6- Parajuli et al.,

اثرات، به طور فزاینده‌ای از مدل‌های مولد اطلاعات ریزمقیاس شده اقلیمی مانند LARS-WG در کنار مدل‌های هیدرولوژیک مانند SWAT استفاده می‌گردد (لین و همکاران^۱، ۲۰۱۵).

اثرات تغییر اقلیم روی کمیت منابع آب توسط محققان زیادی در دنیا مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله می‌توان به تحقیق یاتز و استرزپک^۲ (۱۹۹۸) روی رودخانه‌ی نیل در مصر اشاره نمود که نتایج آن‌ها حاکی از افزایش میزان دبی در دوره‌ی آتی بوده است. همچنین پروسکی و نیرینگ^۳ (۲۰۰۲)، اثر تغییر رژیم بارندگی بر رواناب ماهانه را در هشت منطقه ایالات متحده آمریکا با استفاده از خروجی‌های مدل HadCM3، بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که تغییرات در بارندگی سالانه از ۱۰/۶ تا ۹/۶- درصد و تغییر در میزان رواناب از ۴۱/۵ تا ۲۴- درصد متغیر است. در تحقیقی دیگر یوپینگ‌ژو و همکاران^۴ (۲۰۱۳)، با بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی در رودخانه‌ی حوضه‌ی کینتانگ واقع در شرق چین را برای دوره‌ی آینده ۲۰۱۱-۲۱۰۰ با استفاده از مدل SWAT به این نتیجه رسیدند که میزان رواناب سالانه در مقیاس زمانی بلندمدت کاهش می‌یابد. همچنین سایر پیش‌بینی‌های آن‌ها نیز حاکی از کاهش دبی ماهانه طی فصل زمستان و افزایش در فصل تابستان است.

همچنین در داخل کشور نیز مطالعات متعددی روی پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژیکی صورت گرفته است. از جمله می‌توان به تحقیقات ثانی‌خانی و همکاران (۱۳۹۲) در حوضه آبی‌چای آذربایجان شرقی، عابدی (۱۳۹۳) در حوضه‌ی هروی‌چای آذربایجان شرقی، بیرانوند (۱۳۹۳) در لرستان، ناصری و همکاران (۱۳۹۴) در حوضه‌ی بهشت‌آباد کارون شمالی اشاره نمود که با بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب با استفاده از مدل‌های LARS-WG و SWAT به این نتیجه رسیدند که در مناطق مورد مطالعه

1- Lin et al.,

2- Yaterz and Sterzpek

3- Pruski and Nearing

4- Yue-Ping Xu

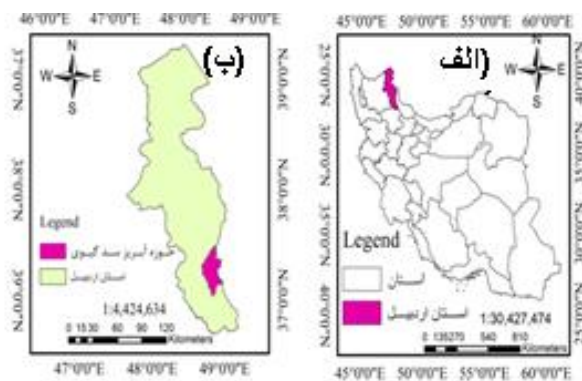
طی دوره‌ی آینده میزان بارش و رواناب کاهش و دما افزایش خواهد داشت. همچنین تحقیقات مشابه دیگری نیز در مورد اثر تغییر اقلیم روی رژیم هیدرولوژیکی حوضه با استفاده از مدل‌های LARS-WG و SWAT توسط محققینی از جمله علیزاده (۱۳۹۴) در حوضه‌ی بالادست ایستگاه تمر در استان گلستان، قربانی و همکاران (۱۳۹۵) در حوضه‌ی آبریز گالیکش استان گلستان، بحری و همکاران (۱۳۹۵) در حوضه‌ی آبخیز اراز کوسه استان گلستان، منصوری و همکاران (۱۳۹۵) در حوضه‌ی زیرنه‌رود و همچنین ذهبیون و همکاران (۱۳۹۵) در حوضه‌ی قره‌سو از سرشاخه‌های رودخانه‌ی کرخه انجام شده که نتایج آن‌ها بیان‌گر افزایش یا کاهش متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژیکی در دوره‌های زمانی خاصی بوده است.

بررسی سوابق پژوهشی نشان داد که به طور کلی مدل LARS-WG برای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی و همچنین مدل SWAT برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی دارای کارایی قابل قبولی بوده است. از این‌رو در تحقیق حاضر به منظور بررسی اثر تغییرات متغیرهای اقلیمی دما و بارش بر جریان رودخانه از این مدل‌ها استفاده می‌گردد. همچنین سایر بررسی‌های منابع مختلف در داخل و خارج از کشور بیان‌گر این امر است که به طور کلی در مناطق مختلف طی دوره‌ی آتی تحت سناریوهای مختلف دما دارای روند افزایشی و بارش دارای روند کاهشی بوده است و این تغییرات نیز روی متغیرهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های مورد بررسی بیشتر تأثیرگذاری منفی داشته است. به طور خاص تحقیقات انجام شده در ناحیه‌ی شمال غرب ایران (ثانی‌خانی و همکاران، ۱۳۹۲؛ عابدی ۱۳۹۳، منصوری و همکاران؛ ۱۳۹۵) نیز حاکی از افزایش دما، کاهش بارش و متغیرهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های این منطقه طی دوره‌ی آینده می‌باشد. بنابراین با توجه به گزارش تغییرات اقلیمی در منطقه، تحقیق حاضر با هدف بررسی تأثیر این تغییرات روی جریان رودخانه هروچای به عنوان یکی از رودخانه‌های دائمی استان اردبیل انجام می‌گردد. با توجه به این‌که رودخانه‌ی مذکور تأمین‌کننده‌ی آب شرب و کشاورزی شهرستان‌های خلخال و گیوی بوده و سدخاکی ذخیره‌ای گیوی نیز در

پایین‌دست این روخانه احداث شده لذا تحقیق حاضر می‌تواند نتایج مفیدی برای مدیریت آینده منابع آب در حوضه‌ی مورد مطالعه فراهم نماید.

مواد و روش‌ها

حوضه‌ی آبخیز رودخانه‌ی هروچای در محدوده‌ی طول‌های $37^{\circ}27'13''$ تا $37^{\circ}58'58''$ شمالی و در عرض‌های $48^{\circ}22'13''$ تا $48^{\circ}41'01''$ شرقی واقع شده و مساحتی حدود ۶۵۰۰۰ هکتار دارد. این رودخانه، از رودخانه‌های دائمی استان اردبیل است و آب جاری در این رودخانه فراهم‌کننده‌ی آب مخزن سد ذخیره‌ای خاکی گیوی است که با هدف تأمین آب شرب و کشاورزی در پایین‌دست شهر خلخال و بالادست شهر گیوی احداث شده است (شکل ۱). متوسط ارتفاع منطقه ۲۲۵۶/۵، حداقل و حداکثر ارتفاع منطقه به ترتیب ۱۴۹۴ و ۳۰۱۹ متر از سطح دریا می‌باشد. بر اساس روش آمبرژه، منطقه‌ی مورد مطالعه دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد است.



شکل (۱) موقعیت حوضه‌ی آبخیز رودخانه‌ی هروچای در ایران و استان اردبیل (الف و ب)

روش انجام مطالعه

در این مطالعه از مدل SWAT2009 جهت شبیه‌سازی دبی و از مدل LARS-WG جهت پیش‌بینی تغییرات اقلیمی استفاده شد. به این منظور ابتدا تحلیل‌ها و پردازش‌های

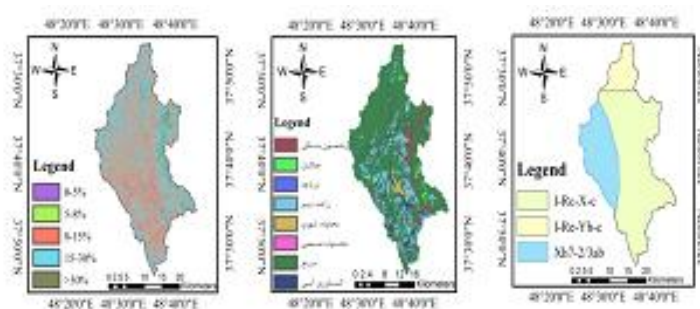
اولیه آماری مانند بررسی همگنی داده‌ها، کنترل کیفیت، تعیین صحت و حذف داده‌های پرت و رفع نواقص آماری قبل از انجام محاسبات روی داده‌ها انجام شد.

مدل SWAT برای حوضه‌ی مورد مطالعه کالیبره و واسنجی شد. سپس تغییرات میزان بارش و دما با استفاده از مدل LARS-WG پیش‌بینی شد و خروجی آن به عنوان ورودی‌های مدل SWAT وارد این مدل شد و تغییرات دبی شبیه‌سازی گردید.

شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل SWAT

مدل SWAT یک مدل جامع و کامل در مقیاس حوضه‌ی آبخیز می‌باشد که برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مدیریتی مختلف بر جریان آب، رسوب، عناصر غذایی و تعادل مواد شیمیایی در حوضه‌های بزرگ و پیچیده با کاربری‌های اراضی، خاک و شرایط مدیریتی گوناگون برای دوره‌های زمانی طولانی مدت تهیه و ارائه گردیده است (رومانگنولی و همکاران^۱، ۲۰۱۷).

در این مطالعه از نسخه SWAT2009 استفاده شد. با توجه به شرایط و داده‌های در دسترس، نقشه‌های کاربری اراضی، خاک و شیب در فرمت رستری و با اندازه سلول ۳۰ متر در مدل مورد استفاده قرار گرفتند (شکل‌های ۲-د، ه، و).



شکل (۲) نقشه‌ی مدل رقومی خاک (د)، کاربری اراضی (ه) و شیب حوضه (و)

1- Romagnoli et al.,

سه نقشه‌ی مذکور در محیط نرم‌افزار مدل با هم ترکیب شدند. حاصل کار این مرحله تشکیل ۳۵۸ واحد هیدرولوژیکی و تشکیل ۲۹ زیرحوضه بود. قابل ذکر است که نقشه‌های خاک (شکل ۱-د) و کاربری اراضی (شکل ۱-ه) با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و نقشه‌ی مدل رقومی ارتفاعی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ در مدل مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱-ج). در این پژوهش نقشه‌ی شبکه‌ی جریان به صورت دستی تهیه و به مدل ارائه گردید. همچنین داده‌های بارش ۵ ایستگاه و همچنین حداقل و حداکثر دمای روزانه مربوط به ۲ ایستگاه، که در محدوده‌ی مورد مطالعه قرار داشتند، به مدل معرفی گردید. دوره‌ی آماری مورد استفاده با توجه به طول دوره‌ی آماربرداری ایستگاه‌ها از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۳ انتخاب گردید. لازم به ذکر است که داده‌های مورد استفاده ابتدا به صورت روزانه و با فرمت تاریخ شمسی بوده و به وسیله‌ی افزونه‌ی پروفیسور اکسل^۱ به تاریخ میلادی تبدیل و سپس به صورت ماهانه محاسبه گردیدند. مدل SWAT، برای محاسبه‌ی رواناب ناشی از بارش باران و ذوب برف از روش بیلان آب استفاده می‌نماید. آب ناشی از ذوب برف با روش شاخص دما محاسبه می‌شود. طبق بررسی مطالعات انجام شده، روش شماره‌ی منحنی برای محاسبه رواناب سطحی و روش ساده‌ی هارگریوز برای محاسبه پتانسیل تبخیر و تعرق به کار گرفته شدند. رواناب سطحی نیز پس از محاسبه در هر HRU با روش ذخیره‌ی متغیر روندیابی شد. در این تحقیق مقادیر مشاهداتی، رواناب روزانه از ایستگاه سد گیوی که در خروجی حوضه واقع شده است، استخراج شد.

پس از آماده‌سازی داده‌ها، اجرای مدل و انجام کالیبراسیون در گام زمانی ماهانه انجام گرفت. در نهایت مدل برای دبی ماهانه سد خاکی گیوی، که در خروجی حوضه‌ی آبخیز هروچای قرار دارد، طی دوره‌ی آماری ۲۰۰۸-۲۰۰۴ به کمک SUFI2 واسنجی و برای دوره‌ی ۲۰۱۳-۲۰۰۹ اعتبارسنجی گردید. ضمناً برای متعادل‌سازی مدل با شرایط محیطی، بازه‌ی زمانی ۲۰۰۴-۲۰۰۲ نیز به عنوان Warm up در نظر گرفته شد. همچنین تحلیل حساسیت پارامترهای مدل نیز با استفاده از روش PSO روی پارامترهای شبیه

1- Professor Excel

سازی جریان انجام شد. به منظور ارزیابی کارایی مدل SWAT در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی از معیارهای ضریب تعیین (R^2) و ضریب نش-ساتکلیف (NS)، شاخص P-factor و R-factor استفاده گردید. همچنین عدم قطعیت خروجی مدل نیز به وسیله عدم قطعیت تخمین ۹۵ درصد که در سطح ۲/۵ و ۹۷/۵ درصد تابع توزیع متغیر خروجی نمونه برداری می شود، محاسبه و با معیار $95PPU^1$ بیان می شود. برای تمامی متغیرها به وسیله ۲/۵ امین X_L و ۹۷/۵ امین X_U درصد از تابع توزیع هر نقطه شبیه سازی شده محاسبه می شود (عباس پور و همکاران، ۲۰۱۱). بر اساس نتایج پژوهش گران مقادیر P-factor بیشتر از ۶۰ درصد و R-factor کمتر از ۱/۳۰ نشان دهنده توانایی قابل قبول مدل در شبیه سازی می باشد (بسالت پور و همکاران، ۱۳۹۳).

پیش بینی متغیرهای اقلیمی با استفاده از مدل LARS-WG

در این تحقیق، برای ریزمقیاس نمایی داده های مدل های گردش عمومی جو از مدل LARS-WG استفاده گردید. این مدل قادر است داده های بارش (میلی متر)، دمای کمینه و بیشینه (درجه سلسیوس) و تابش خورشیدی (مگاژول بر مترمربع در روز) را برای شرایط حاضر و آینده شبیه سازی کند. در این مطالعه از داده های ایستگاه هواشناسی خلخال و نئور طی سال های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۳ استفاده گردید و داده های دما و بارش به صورت روزانه تحت سه سناریو A2، B1 و A1B برای دوره ی ۲۰۴۰-۲۰۱۴ از مدل اقلیمی استخراج شد. پس از واسنجی و صحت سنجی مدل SWAT، داده های حاصل از مدل اقلیمی LARS-WG، به مدل کالیبره شده وارد و تغییرات دبی در مقیاس زمانی ماهانه برای دوره ی ۲۰۴۰-۲۰۱۴ مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به منظور ارزیابی قابلیت مدل LARS-WG نیز علاوه بر معیارهای آماری R^2 و NS از معیارهای میانگین خطای انحراف MBE^2 و مجذور مربعات خطا (RMSE) استفاده شد.

1- 95 Percent Prediction Uncertainty

2- Mean Bias Error

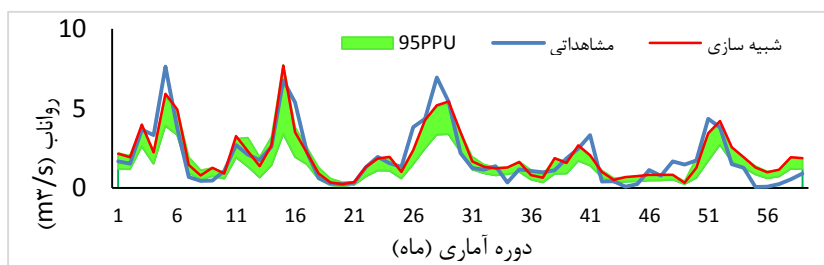
بحث و نتایج

شبیه‌سازی جریان

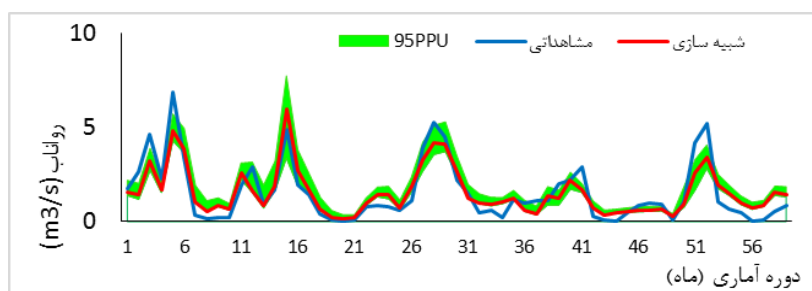
پس از پارامترسازی و ورود داده‌ها، شبیه‌سازی دبی برای یک دوره‌ی ۱۱ ساله از ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۳ بر اساس گام زمانی ماهانه صورت گرفت. در انتهای مرحله‌ی واسنجی مقدار بهینه پارامترهای حساس منطقه تعیین و مدل کالیبره شد. مقادیر پارامترهای حساس برای دبی ماهانه در بهترین حالت واسنجی در جدول (۱) ارائه شده است. بر اساس نتایج، عوامل مربوط به خاک و کاربری اراضی تأثیر به‌سزایی را نشان می‌دهد که با نتایج پاراگوپولوس و همکاران (۲۰۱۱) و پاراچولی و همکاران (۲۰۱۳) مطابقت دارد.

جدول (۱) مقادیر بهینه پارامترهای حساس دبی ماهانه بعد از واسنجی برای حوضه هروچای

نام پارامتر	مقدار بهینه	حداقل	حداکثر
ضریب چولگی برای بارش روزانه (PCPSKW.wgn)	-۰/۰۰۵۶	-۰/۱۰۵۱۹	۰/۰۵۸۱
حداقل عمق در ۱۰۰٪ پوشش برف (TLAPS.sub)	۷/۴۱۵۰	۷/۱۷۷۸	۷/۷۶۸۴
دمای پایه ذوب برف (SMFMN.bsn)	۰/۵۶۶۳	-۰/۲۹۹۴	۰/۶۸۴۲
ضریب هدایت هیدرولیکی کانال (CH_K2.rte)	-۲۲/۰۸۵۹	-۲۵/۸۲۲۷	-۴/۵۵۶۲
متوسط طول شیب (SLSUBBSN.hru)	۴۴/۳۵۷۴	۳۷/۳۳۰۱	۴۶/۹۵۷۱
فاکتور ذوب برف (SMFMX.bsn)	۵/۹۳۹۶	۷/۷۱۷۳	۷/۷۰۸۱
شماره منحنی (CN2.mgt)	-۰/۲۹۷۱	-۰/۳۳۴۱	-۰/۲۷۱۳
ضخامت عمق برف (SOL_Z.sol)	۳/۶۹۲۵	۳/۵۶۷۹	۴/۳۸۹۴
چگالی ظاهری خاک (SOL_BD.sol)	۰/۲۷۵۹	۰/۲۶۴۹	۰/۲۸۷۲
متوسط آب قابل استفاده (SOL_AWC.sol)	۰/۲۵۸۱	۰/۲۱۹۴	۰/۳۴۱۹



شکل (۲) دبی متناظر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای ماهانه، دوره‌ی واسنجی ۲۰۰۸-۲۰۰۴



شکل (۳) دبی متناظر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای ماهانه، دوره‌ی اعتبارسنجی ۲۰۰۹-۲۰۱۳

با توجه به شکل‌های ۳ و ۴، مقادیر برآورد شده دبی‌های حداکثر نسبت به مقادیر مشاهداتی دارای مقداری اختلاف می‌باشد. این اختلاف در پیش‌بینی مقادیر دبی‌های حداکثر در تحقیقاتی مانند چو و شیرمحمدی (۲۰۰۴)، رستمیان و همکاران (۲۰۰۸) و همچنین سانترا و داس (۲۰۱۳) نیز گزارش شده است. یکی از مهم‌ترین دلایل این امر می‌تواند مربوط به ضعف مدل در شبیه‌سازی فرآیند ذوب برف و بهره‌برداری از آب باشد که محققانی مانند رستمیان و همکاران (۲۰۰۸) و همچنین سانترا و داس (۲۰۱۳) نیز به آن اشاره کرده‌اند. مدل SWAT بارش را با استفاده از متوسط دمای روزانه به صورت باران یا برف تقسیم‌بندی می‌کند. با توجه به هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده در مرحله‌ی واسنجی و اعتبارسنجی می‌توان نتیجه گرفت که مدل در شبیه‌سازی رواناب ماهانه، طی ماه‌های پس از فصل سرما که در آن‌ها برف موجود در ارتفاعات ذوب می‌شود دچار مقداری کم‌برآورد می‌باشد، از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت که مدل قادر به شبیه‌سازی قابل قبول ذوب برف در این منطقه نبوده است.

بررسی هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل طی دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی (شکل ۴ و ۳) حاکی از آن است که مدل SWAT مقادیر دبی‌های کمینه را نیز با مقداری بیش‌برآورد نسبت به هیدروگراف مشاهداتی شبیه‌سازی نموده است. یکی از دلایل این امر می‌تواند به خاطر بهره‌برداری‌هایی باشد که از آب رودخانه‌ی اصلی به منظور آبیاری اراضی کشاورزی و باغ‌های اطراف طی فصول خشک انجام می‌شود. این

بهره‌برداری‌ها باعث شده که بخشی از جریان رودخانه به محل خروجی یا ایستگاه هیدرومتری نرسیده و بنابراین مقادیر دبی در هیدروگراف مشاهداتی از مقدار واقعی جریان کمتر بوده و در نتیجه با شبیه‌سازی‌های مدل تطابق نداشته باشد. مسأله بهره‌برداری‌ها از رودخانه اصلی و تأثیر آن‌ها روی تفاوت بین دبی مشاهداتی و محاسباتی و همچنین کارایی مدل توسط رستمیان و همکاران (۲۰۰۸) نیز گزارش شده است. سایر نتایج هیدروگراف‌های شبیه‌سازی مدل در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داد که بیشتر مقادیر شبیه‌سازی شده مدل در محدوده مقادیر 95PPU قرار داشته است. به نحوی که مقادیر P-factor محاسبه شده نیز نشان داد که در دوره‌ی واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۷۰ و ۷۸ درصد از داده‌های شبیه‌سازی در این محدوده قرار گرفته‌اند (جدول ۲). نتایج حاصل از ارزیابی کارایی مدل SWAT با استفاده از سایر معیارها نیز در جدول (۲) ارائه گردید. مقادیر بالای معیارهای R^2 و NS در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی بیان‌گر این است که مدل از دقت قابل قبولی برخوردار است. دقت بالای مدل SWAT طی مراحل واسنجی و اعتبارسنجی در این تحقیق با نتایج سایر محققان (چو و شیرمحمدی، ۲۰۰۴؛ رستمیان و همکاران، ۲۰۰۸؛ و سانترا و داس، ۲۰۱۳؛ یوپینگ‌ژو و همکاران، ۲۰۱۳؛ بیرانوند، ۱۳۹۳؛ ناصری و همکاران، ۱۳۹۴، ذهبیون و همکاران، ۱۳۹۵ و...) مطابقت دارد.

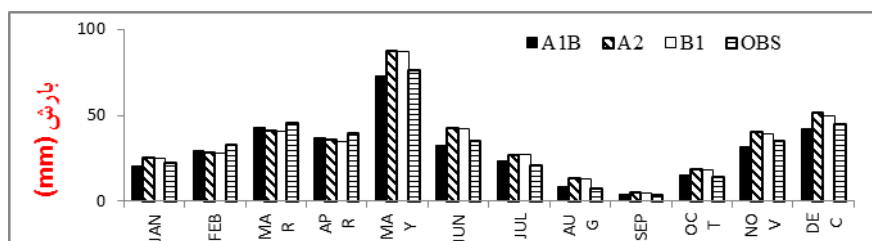
جدول (۲) معیارهای آماری کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی ماهانه

آماره	R^2	NS	R-factor	P-factor (%)
دوره‌ی واسنجی	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۴۳	۰/۷۰
دوره‌ی اعتبارسنجی	۰/۸۴	۰/۷۹	۰/۴۱	۰/۷۸

پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی و جریان رودخانه

برای پی بردن به تغییرات دبی در دوره‌ی ۲۰۴۰-۲۰۱۴، داده‌های بارش و دمای دو ایستگاه خلخال و نئور، به صورت روزانه، به وسیله مدل LARS-WG تولید گردید.

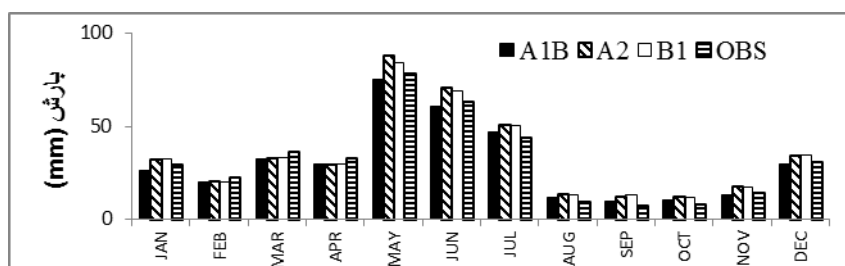
شکل ۴، افزایش بارش ایستگاه خلخال تحت شرایط دو سناریو A2 و B1 و کاهش بارش تحت شرایط سناریو A1B را نشان می‌دهد. تغییرات به گونه‌ای است که دو سناریو A2 و B1، افزایش بارش در فصول تابستان (۵۳/۲۹ درصد تحت سناریوی A2 و ۲۸/۶۰ درصد تحت سناریوی B1)، پاییز (۲۱/۱۷ درصد تحت سناریوی A2 و ۱۴/۵۰ درصد تحت سناریوی B1) و بهار (۸/۹۷ درصد تحت سناریوی A2 و ۵/۶۶ درصد تحت سناریوی B1)، و کاهش بارش، در فصل زمستان (۴/۰۸ درصد تحت سناریوی A2 و ۵/۹۲ درصد تحت سناریوی B1)، و سناریو A1B، کاهش بارش در در تمامی فصول بجز فصل تابستان را نشان می‌دهد. میزان کاهش بارش سناریوی A1B برای فصول پاییز، زمستان و بهار به ترتیب ۰/۶۸، ۸/۷۰ و ۵/۹۲ درصد بوده است در حالی که در تابستان افزایش ۱۹/۶۳ درصدی پیش‌بینی شده است.



شکل (۵) تغییرات بارش ماهانه و سالانه سناریوهای A1B، A2 و B1 در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۴ در مقایسه با مقادیر مشاهداتی ایستگاه خلخال

نتایج بارش در ایستگاه نئور (شکل ۶)، نشان می‌دهد که دو سناریو A2 و B1، افزایش بارش در فصول تابستان (۳۱/۶۳ درصد تحت سناریوی A2 و ۲۶/۸۷ درصد تحت سناریوی B1)، پاییز (۲۵/۰۷ درصد تحت سناریوی A2 و ۱۸/۲۷ درصد تحت سناریوی B1) و بهار (۰/۲۲ درصد تحت سناریوی A2 و ۰/۱۸ درصد تحت سناریوی B1) و کاهش بارش در فصل زمستان (۵/۲۵ درصد تحت سناریوی A2 و ۱/۵۰ درصد تحت سناریوی B1) و سناریو A1B کاهش بارش در تمامی فصول بجز فصل تابستان را نشان می‌دهد. میزان کاهش سناریوی A1B برای فصول پاییز، زمستان و بهار به ترتیب

۳/۵۰، ۱۱/۰۷ و ۶ درصد بوده است در حالی که در تابستان افزایش ۱۸/۱۵ درصدی پیش‌بینی شده است.



شکل (۶) تغییرات بارش ماهانه و سالانه سناریوهای A1B، A2 و B1 در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۴ در مقایسه با مقادیر مشاهداتی ایستگاه نئور

برای بررسی دقت شبیه‌سازی مدل LARS-WG از چهار پارامتر آماری (جدول ۳) استفاده گردید. نتایج دقت قابل قبول شبیه‌سازی برای هر سه متغیر بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل در دو ایستگاه خلخال و تئور را نشان داد. این یافته‌ها با نتایج سایر تحقیقات انجام شده در شمال غربی کشور روی مدل LARS-WG از جمله ثانی‌خانی و همکاران (۱۳۹۲) در حوضه‌ی آجی‌چای آذربایجان شرقی و همچنین عابدی (۱۳۹۳) در حوضه‌ی هروچای آذربایجان شرقی مطابقت دارد.

پس از بررسی دقت داده‌های شبیه‌سازی شده، داده‌های شبیه‌سازی شده به مدل SWAT معرفی گردید. نتایج، افزایش دبی تحت شرایط دو سناریو A2 و B1 و کاهش دبی تحت شرایط سناریو A1B را نشان می‌دهد. تغییرات به‌گونه‌ای است که دو سناریو A2 و B1، افزایش دبی در فصول تابستان (۸۶ درصد تحت سناریوی A2 و ۸۷ درصد تحت سناریوی B1)، پاییز (۱۸ درصد تحت سناریوی A2 و ۳۴ درصد تحت سناریوی B1) و بهار (۴۸ درصد تحت سناریوی A2 و ۱۵ درصد تحت سناریوی B1)، و کاهش دبی، در فصل زمستان (۱۲ درصد تحت سناریوی A2 و ۱۴ درصد تحت سناریوی B1)، و سناریو A1B، کاهش دبی در در تمامی فصول به جز فصل تابستان را نشان می‌دهد.

جدول (۳) معیارهای ارزیابی کارایی مدل LARS-WG برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی

نام ایستگاه	متغیر	R ²	NS	MBE	RMSE
	بارش	۰/۹۶	۰/۹۵	-۰/۴۴	۳/۷۵
خلخال	دمای حداکثر	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۰۰۰۸۳	۰/۲۵
	دمای حداقل	۰/۹۹	۰/۹۹	-۰/۰۲۷۵	۰/۲۵
	بارش	۰/۸۷	۰/۸۶	۰/۱۵	۷/۲۲
نئور	دمای حداکثر	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۱۷۵	۰/۳۹
	دمای حداقل	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۱۲	۰/۲۹

میزان کاهش دبی در هنگام استفاده از نتایج سناریوی A1B برای فصول پاییز، زمستان و بهار به ترتیب ۰/۷، ۳۶، و ۲۷ درصد بوده است در حالی که در تابستان افزایش ۴۶ درصدی پیش‌بینی شده است (جدول ۴).

نتایج سناریوی اقلیمی دما و بارش مدل HadCM3 و سری زمانی دبی شبیه‌سازی شده توسط مدل بارش-رواناب، نشان می‌دهد که متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژی حوضه‌ی سد گیوی در دوره‌ی آتی تغییرات قابل توجهی خواهند داشت. مقایسه‌ی پارامترهای اقلیمی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره‌ی ۲۰۴۰-۲۰۱۴ نشان می‌دهد که میزان دبی تحت سناریوهای A2 و B1 نسبت به دبی مشاهداتی افزایش و تحت سناریوی A1B کاهش می‌یابد. میانگین درازمدت دبی مشاهداتی حوضه‌ی مورد مطالعه‌ی ۱/۹۵ مترمکعب در ثانیه بوده است در صورتی که سناریوهای A1B، A2 و B1 به ترتیب برابر ۱/۵۱، ۲/۴۵، ۲/۹۱ می‌باشد. میزان کاهش دبی در هنگام استفاده از نتایج سناریوی A1B برای فصول پاییز، زمستان و بهار به ترتیب ۰/۷، ۳۶، و ۲۷ درصد بوده است در حالی که در تابستان افزایش ۴۶ درصدی پیش‌بینی شده است. افزایش میزان بارش پیش‌بینی شده در فصل تابستان و کاهش آن در فصول بهار و زمستان می‌تواند ناشی از تغییر الگوی بارش منطقه باشد.

جدول (۴) تغییرات دبی ماهانه (m³/s) سناریوهای A2، B1 و A1B (۲۰۱۴-۲۰۴۰) در مقایسه با دبی مشاهداتی

ماه	OBS	اختلاف با رواناب مشاهداتی			درصد اختلاف (%)					
		A1B	B1	A2	A1B	B1	A2			
JAN	۱/۱۵	۱/۰۴	۱/۳۳	۱/۲۶	-۰/۱۱	۰/۱۷	۰/۱۱	۱۵/۰۸	۹/۶۳	-۹/۷۱
FEB	۱/۶۳	۰/۹۹	۱/۴۴	۱/۵۴	-۰/۶۴	-۰/۱۹	-۰/۰۹	-۱۱/۹۲	-۵/۷	-۳۹/۳۹
MAR	۳/۸۳	۱/۵	۲/۰۸	۲/۲۴	-۲/۳۳	-۱/۷۵	-۱/۵۹	-۴۵/۸۰	-۴۱/۴۵	-۶۰/۹۲
APR	۳/۸۱	۲/۳۱	۳/۳۱	۳/۶۷	-۱/۵۰	-۰/۵۰	-۰/۱۴	-۱۳/۱۵	-۳/۸	-۳۹/۴۲
MAY	۳/۸۷	۲/۸۲	۴/۴۵	۵/۹۲	-۱/۰۵	۰/۵۸	۲/۰۵	۱۵/۰۴	۵۲/۹۳	-۲۷/۱۵
JUN	۲/۸۹	۲/۴۱	۴/۱۳	۵/۶۸	-۰/۴۷	۱/۲۴	۲/۷۹	۴۳/۱۵	۹۶/۶۴	-۱۶/۳۴
JUL	۱/۶۵	۱/۹۱	۲/۸۰	۳/۰۲	۰/۲۵	۱/۵۱	۱/۳۶	۶۹/۴۵	۸۲/۳۴	۱۵/۳۰
AUG	۰/۶۲	۰/۹۷	۱/۲۳	۱/۱۱	۰/۳۳	۰/۶۰	۰/۴۸	۹۶/۵۸	۷۸	۵۶/۳۳
SEP	-۰/۴۹	-۰/۸۲	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۳۳	۰/۴۷	-۰/۴۸	۹۶/۱۶	۹۸/۰۷	۶۸/۷۸
OCT	-۰/۷۱	-۰/۸۱	۱/۰۷	۰/۹۰	۰/۰۹	۰/۳۵	-۰/۱۸	۴۹/۵۳	۲۶/۱۳	۱۳/۰۹
NOV	۱/۳۸	۱/۲۴	۱/۷۴	۱/۴۲	-۰/۱۳	۰/۳۶	۰/۰۳	۲۵/۹۸	۲/۶۴	-۹/۸۰
DEC	۱/۳۷	۱/۳۰	۱/۷۸	۱/۷۳	-۰/۰۷	۰/۴۰	۰/۳۵	۲۹/۳۵	۲۵/۴۳	-۵/۶۵
ANNUAL	۱/۹۵	۲/۱۹	۲/۴۵	۱/۹۵	-۰/۴۴	۰/۲۴	۰/۵۰	۱۲/۳۴	۲۵/۷۱	-۲۲/۵۸

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، برای شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه‌ی سد گیوی در استان اردبیل و بررسی اثر تغییر اقلیم روی جریان رودخانه، از مدل‌های SWAT و LARS-WG استفاده گردید. نتایج نشان داد میانگین دبی تحت دو سناریو A2 و B1 افزایش و تحت سناریو A1B کاهش می‌یابد.

به طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که مدل SWAT می‌تواند به عنوان ابزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی جریان رودخانه در حوضه‌ها و مناطق با آمار و اطلاعات کم مورد استفاده قرار گیرد. همچنین سایر نتایج نشان داد که تلفیق مدل‌های پیش‌بینی کننده‌ی متغیرهای اقلیمی مانند LARS-WG با مدل‌های هیدرولوژیکی می‌تواند

اطلاعات مفیدی از وضعیت آینده‌ی هیدرواقليم حوضه در اختیار مدیران قرار داده که مبنای برنامه‌ریزی برای مدیریت منابع آب باشد. در یک جمع‌بندی کلی از نتایج این تحقیق مشخص گردید که روند تغییرات دمایی طی دوره آبی به صورت افزایش دما در فصول سرد و کاهش دما در فصول گرم بوده و تغییرات بارش نیز با روند افزایشی در فصول گرم و کاهش در فصول سرد همراه خواهد بود. تأثیر این تغییرات بر میزان دبی رودخانه نیز به گونه‌ای است که طی دوره‌ی آبی میزان دبی در فصول سرد کاهش و در فصول گرم افزایش می‌یابد. نتایج تحقیق حاضر در این قسمت که نشان داده طی فصول سرد افزایش دما و کاهش بارش و دبی رخ خواهد داد با یافته‌های تحقیقاتی از جمله ثانی‌خانی و همکاران (۱۳۹۲)، عابدی و همکاران (۱۳۹۳) و همچنین منصوری و همکاران (۱۳۹۵) که در شمال غرب ایران انجام شده مطابقت دارد. یک برنامه‌ریزی اساسی برای آینده‌ی منابع آب یک حوضه نیازمند بررسی تمامی جنبه‌های تأثیرگذار روی منابع آب از جمله تغییرات جمعیتی و به تبع آن تغییرات کاربری و بهره‌برداری اراضی، همراه با متغیرهای اقلیمی می‌باشد. لذا این بررسی‌ها به عنوان یک موضوع پژوهش برای پیش‌بینی وضعیت آینده‌ی منابع آب حوضه‌ی آبخیز هروچای پیشنهاد می‌گردد.

منابع

- بحری، معصومه و احسان زاحدی (۱۳۹۵)، بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رژیم جریان هیدرولوژیکی جریان سطحی رودخانه‌ی حوضه‌ی آبخیز اراز کوه، نشریه‌ی تحقیقاتی کاربردی علوم جغرافیایی، دوره‌ی ۱۳۲، شماره‌ی ۴۲، صص ۱۳۲-۱۰۹.
- بسالت‌پور، علی‌اصغر؛ ایوبی، شمس‌الله؛ حاج‌عباسی، محمدعلی و احمد جلالیان (۱۳۹۳)، واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT با استفاده از الگوریتم پرنندگان برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب در یک حوضه‌ی آبخیز کوهستانی، نشریه‌ی مدیریت خاک و تولید پایدار، دوره‌ی ۴، شماره‌ی ۴، صص ۳۱۲-۲۹۵.
- ثانی‌خانی، هادی؛ دین‌پژوه، یعقوب؛ پوریوسف، سعید؛ زمان‌زاد قویدل، سروین و بهاره صولتی (۱۳۹۲)، بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوضه‌های آبخیز (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبخیز آجی‌چای در استان آذربایجان شرقی)، نشریه‌ی آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، دوره‌ی ۲۷، شماره‌ی ۶، صص ۱۲۳۴-۱۲۲۵.
- ذهبیون، باقر؛ گودرزی، محمدرضا و علیرضا مساح بوانی (۱۳۸۹)، کاربرد مدل SWAT در تخمین رواناب حوضه در دوره‌های آبی تحت تأثیر تغییر اقلیم، پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، دوره‌ی ۱، شماره‌ی ۳-۴، صص ۶۰-۴۵.
- عابدی، زهرا (۱۳۹۳)، ارزیابی تغییر اقلیم بر دبی جریان ماهانه با کاربرد مدل SWAT در حوضه‌ی آبخیز هروی چای استان آذربایجان شرقی، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه، دانشکده‌ی منابع طبیعی دریا، ۱۴۲ صفحه.
- علیزاده، یاسر (۱۳۹۴)، بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب دوره‌ی آبی با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: حوضه‌ی بالادست ایستگاه تهر)، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۵۲ صفحه.
- قربانی، خلیل؛ سهرابی‌ان، الهه؛ سالاری جزی، میثم و محمد عبدالحسینی (۱۳۹۴)، پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر روند دبی ماهانه‌ی رودخانه با بکار بردن مدل هیدرولوژیکی

- IHACRES (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبخیز گالیکش)، نشریه‌ی حفاظت آب و خاک، دوره‌ی ۵، شماره‌ی، صص ۱۸-۳۴.
- منصورى، بهاره؛ احمدزاده، حجت؛ مساح بوانى، علیرضا؛ مرید، سعید؛ دلاور، مجید و سعید لطفی (۱۳۹۳)، بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه‌ی زیرنه‌رود با استفاده از مدل SWAT، نشریه‌ی آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۸، شماره ۶، صص ۱۱۹۱-۱۲۰۳.
- Bussi, G., Francés, F., Horel, E., López-Tarazón, J.A., Batalla, R.J. (2014), **Modelling the impact of climate change on sediment yield in a highly erodible Mediterranean catchment**, J. Soils Sediments, Vol. 14, PP. 1921-1937.
- Chu, T.W., Shirmohammadi, A. (2004), **Evaluation of the SWAT Model's Hydrology Component in the Piedmont Physiographic Region of Maryland**, American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE), Vol. 47, PP. 1057-1073.
- Ficklin, D.L., Stewart, I.T., Maurer, E.P. (2013), **Climate Change Impacts on Streamflow and Sub basin-Scale Hydrology in the Upper Colorado River Basin**, Journals.plos, Vol. 3, PP. 71-85.
- Leong Tan, M., Ibrahim, AB., Yusop, Z., Chua, P. Chan N.W. (2017), **Climate change impacts under CMIP5 RCP scenarios on water resources of the Kelantan River Basin, Malaysia**, Atmospheric Research, Vol. 189, PP. 1-10.
- Lin, B., Chen, X., Yao H., Chen, Y., Liu, M., Gao, L., James, A., (2015), **Analyses of landuse change impacts on catchment runoff using different time indicators based on SWAT model**, Ecological Indicators, Vol. 58, PP. 55-63.
- Manoj, K., Gassman, P.W., (2014), **Changes in hydrology and streamflow as predicted by a modelling experiment forced with climate models**, Hydrol. Process, Vol. 28, PP. 2772-2781.
- Molina-Navarro, E., Trolle, D., Martínez-Pérez, S., Sastre-Merlín, A., 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, Vol. 509, PP. 354-366.
- Navarro, M.E., Alegría, H.M., Pérez, M.S., Hernández, R.J., Moctezuma, M.A., Merlin, S.A. (2016), **Hydrological modeling and climate change impacts in an agricultural semiarid region. Case study: Guadalupe River basin, Mexico**, Agricultural Water Management, Vol. 175, PP. 29-42.
- Parajuli, P.B., Jayakody, P., Sassenrath, G.F., Ouyang, Y., (2016), **Assessing the impacts of climate change and tillage practices on stream flow, crop and sediment yields from the Mississippi River Basin**, Agricultural Water Management, Vol. 168, PP. 112-124.
- Pruski F.F., Nearing, M.A. (2002), **Runoff and soil-loss responses to changes in precipitation: A computer simulation study**, Journal of Soil and Water Conservation, Vol. 57, No. 1, PP. 7-16.
- Romagnoli, M., Portapila, M., Rigalli, A., Maydana, G., Burgués, M., García, C., (2017), **Assessment of the SWAT model to simulate a watershed with limited available data in the Pampas region, Argentina**, Science of The Total Environment, Vol. 596-597, PP. 437-450.
- Rostamian, R., Jaleh, A., Afyun, M., Mousavi, S.F., Heidarpour, M., Abbaspour, K. (2008), **Application of a SWAT Model for Estimating Runoff and Sediment in Two Mountainous Basins in Central Iran**, Journal of Hydrological Science, Vol. 53, PP. 977-988.
- Santra, P. Das, B.S. (2013), **Modeling Runoff from an Agricultural Watershed of Western Catchment of Chilika Lake through Arc SWAT**, Journal of Hydro- Environment Research, Vol. 7, PP. 261-269.
- Shi, H.Y., Wang, G.Q. (2015), **Impacts of climate change and hydraulic structures on runoff and sediment discharge in the middle Yellow River**, Hydrological Processes, Vol. 29, No. 14, PP. 3236-3247.
- Woznicki, S.A., Nejadhashemi A.P., Parsinejad A. (2015), **Climate change and irrigation demand: Uncertainty and adaptation**, Journal of Hydrology: Regional Studies, Vol. 3, PP. 247-264.

- Xu Y.P., Zhang X., Ran Q., Tian Y. (2013), **Impact of climate change on hydrology of upper reaches of Qiantang River Basin, Est china**, Journal of Hydrology, Vol. 483, PP. 51–60.
- Yates, D.N., and Strzepek, K.M. (1998), **Modeling the Nile basin under climate change**, Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 3, No. 2, PP. 98–108.