نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۲، جلد ۱۳، خرداد - تیر ۱۳۹۸، ص. ۴۸۵-۴۷۵

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 2, Vol. 13, Jan.-Jul. 2019, p. 475-485

مدلسازی رواناب و برآورد میزان تغییرات رواناب در اثر عوامل اقلیمی و انسانی

حبیبه عباسی[۱]، لیلا ملکانی[۲*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۳۱

چکیده:

تفکیک تاثیر هر یک از عوامل اقلیمی و عوامل بشری در فرآیندهای هیدرولوژیکی در مدیریت منابع آب بسیار مهم می‌باشد. در این مطالعه، آنالیز روند و آنالیز تغییرات کوتاه مدت رواناب سالانه حوضه سجاسرود واقع در استان زنجان به ترتیب با روشهای رگرسیون خطی و آزمون پتیت در دوره آماری ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۲ انجام شد. نتایج حاصل نشان داد که سری زمانی رواناب در حوضه سجاسرود روند کاهشی داشته و نقطه شکست سری زمانی رواناب سال ۱۹۹۸ می‌باشد. بر این اساس، سری زمانی رواناب به بازه زمانی پایه و بازه زمانی ارزیابی تقسیم گردید. جهت شبیه‌سازی فرآیند هیدرولوژیکی از ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT) استفاده شد. واسنجی مدل SWAT برای رواناب ماهانه انجام گردید. مقادیر پارامترهای NSE، PBIAS و RSR در دوره زمانی واسنجی ۰/۷، ۷/۳ و ۰/۵۵ محاسبه گردید. در دوره صحت‌سنجی نیز مقادیر پارامترهای NSE، PBIAS و RSR به ترتیب ۰/۶۵، ۹/۴- و ۰/۵۸ تخمین زده شد. بررسی نتایج نشان داد که عملکرد مدلSWAT در شبیه‌سازی جریان در دوره واسنجی و صحت‌سنجی خوب می‌باشد. همچنین نتایج مطالعه در حوضه سجاسرود نشان داد که سهم عوامل اقلیمی و عوامل انسانی در کاهش رواناب حوضه به ترتیب ۳۳٪ و ۶۷٪ می‌باشد. رویکرد ارائه شده به مدیران کمک می‌کند تا سیاست‌هایی را اتخاذ نمایند که می‌تواند شرایط رودخانه و اکوسیستم منطقه را بهبود ببخشد.

واژه‌های کلید: عوامل اقلیمی، عوامل انسانی، رواناب، آزمون پتیت، مدل SWAT

مقدمه

در دهه‌های اخیر، به دلیل افزایش تقاضای آب و محدودیت این منابع در نقاط مختلف جهان، سرانه منابع آب تجدید شونده کاهش یافته است. جهت تضمین توسعه پایدار، بهره‌برداری از این منابع بایستی به شکل مطلوب، موثر و کارا صورت پذیرد. رشد صنایع و کارخانه‌ها از یک طرف و جنگل‌زدائی و تخریب محیط زیست از طرف دیگر باعث افزایش روزافزون گازهای گلخانه‌ای در سطح کره زمین طی دهه‌های اخیر شده است. تحقیقات مختلف نشان از تاثیر این افزایش بر روی کره زمین دارد. مهمترین اثر این افزایش بر روی درجه حرارت اتمسفر کره زمین بوده که در نوشته‌های علمی از آن به عنوان گرمایش جهانی اطلاق می‌کنند. تاثیر این افزایش تنها بر درجه حرارت اتمسفر زمین نبوده و دیگر متغیرهای اقلیمی را نیز تحت تاثیر قرار داده که پدیده تغییر اقلیم را شکل می‌دهد. تغییر اقلیم در حال حاضر یکی از مهمترین چالش‌های زیست محیطی در سطح جهان است که افزایش درجه حرارت، ذوب شدن یخ‌های قطبی، بالا آمدن سطح آزاد آب‌های جهان و تغییر در آستانه‌های آب و هوایی از پیامدهای آن محسوب می‌شوند.

از مهمترین مسائل کنونی جهان، رقابت جهت دسترسی به منابع آب می‌باشد. مساله‌ای که بیشتر مناطق جهان به ویژه کشورهای خاورمیانه از جمله ایران را در آینده نه چندان دور وارد ابعاد تازه‌ای از چالش خواهد کرد. کاهش منابع آب در این مناطق با توجه به مساله تغییر اقلیم جهانی و تغییرات آب و هوا، شیوه‌های آبیاری نادرست و کاهش منابع آب زیرزمینی از مهمترین عوامل گسترش کم آبی در کشور می‌باشند. بطور خلاصه می‌توان عواملی مانند افزایش مصرف، ضعف در مدیریت منابع آب، خشکسالی‌ها و به خصوص پدیده تغییر اقلیم به عنوان عامل موثر در به وجود آمدن شرایط بحرانی اشاره کرد (Mishra & Singh 2010).

مطالعات متعددی روی تاثیرات بالقوه تغییر اقلیم بر منابع آب شامل تاثیر روی کمیت آب، هیدرولوژی و تقاضای آب انجام شده است. در مطالعه‌ی لتنماير و همکاران در رودخانه میزوری آمریکا مشخص شد که تغییر اقلیم موجب کاهش جریان رودخانه به میزان ۶ تا ۳۴ درصد خواهد شد (Lettenmaier et al, 1999). آنها گزارش دادند که افزایش دما به میزان ۱ و ۳ درجه و تغییر در مقدار بارش به میزان ۴ و ۱۳ درصد منجر به تغییراتی در جریان سالانه رودخانه به

۱- دکتری عمران - آب ، دانشگاه تبریز
۲- استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی مرند، دانشگاه تبریز
(*- نویسنده مسئول: (Email: lmalekani@tabrizu.ac.ir

ترتیب به میزان ۳ و ۱۸ درصد در منطقه ساحلی کامرون می‌گردد. در مطالعه‌ای دیگر لگسه و همکاران کاهش ۳۰ درصدی در مقدار رواناب را بر اثر کاهش ۱۰ درصد در مقدار بارش پیش‌بینی کردند. در حالی که افزایش ۱/۵ درصد دما کاهش رواناب به میزان کمتر و ۱۵ درصد را به همراه داشته است (Legesse et al, 2003). گوسین و همکاران تاثیر سناریوهای تغییر اقلیم بر دبی جریان در ۱۲ حوضه رودخانه‌های هند را برای دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعه آنها دلالت بر کاهش جریان و افزایش شدت سیلاب و خشکسالی دارد (Gosain et al, 2006).

همچنین در سال‌های اخیر مطالعات متعددی بر روی تاثیر فعالیت‌های انسانی (تغییرات کاربری اراضی، افزایش مصارف و ...) بر روی منابع آب انجام شده است. آرنولد و همکاران با استفاده از مدل *SWAT* به بررسی اثر تغییر کاربری اراضی بر جریان پایه رودخانه و سطح آب زیر زمینی رودخانه می‌سی سی‌پی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که در طی ۵۰ سال گذشته کاهش سطح اراضی جنگلی و علفزارهای حوضه منجر به کاهش جریان پایه رودخانه و سطح آب زیرزمینی رودخانه گردیده است (Arnold et al, 2007). لیو همکاران در تحقیق خود در حوضه ای در غرب آفریقا با استفاده از مدل *SWAT* نشان دادند که تغییر مناطق با کاربری جنگل، مرتع و بوته‌زار به اراضی کشاورزی و یا مناطق شهری باعث تغییر شرایط هیدرولوژی طبیعی در یک حوضه آبخیز می‌شود و نتیجه این تغییر به صورت افزایش در حجم رواناب سطحی، کاهش تغذیه منابع آب زیر زمینی و آب پایه رودخانه‌ها و تغییر در مقدار و شدت فرسایش و رسوب می‌باشد (Li, et al, 2007). ایلدرمی و همکاران (۱۳۹۶) اثرات اجرای سناریو تغییر کاربری اراضی در میزان رواناب و رسوب خروجی از حوضه دینور در کرمانشاه بررسی کردند.

افزایش تقاضای آب در بخش‌های مختلف همراه با افزایش سریع جمعیت جهان، فشار زیادی به منابع آب وارد می‌کند. بنابراین، سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیران در جهت مدیریت بهینه منابع آب، نیازمند مدیریت تاثیرات تغییرات اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر روی فرایندهای هیدرولوژیکی هستند. بر این اساس تفکیک نقش هریک از عوامل مذکور برای انجام اقدامات مدیریتی در جهت تطبیق با شرایط تغییر اقلیم در آینده و برآورد میزان تقاضای آب مرتبط با فعالیت‌های انسانی ضروری می‌باشد.

می‌یاو و همکاران با استفاده از روش رگرسیون خطی در ارزیابی تاثیر تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر رواناب حوضه رود *Yellow* به این نتیجه رسیدند که رواناب حوضه در اثر فعالیت‌های بشری در طول ۵۰ سال حدود ۸۶٪ کاهش یافته است (Miao et al, 2011). دونگ و همکاران با مطالعه رودخانه *Jinghe* گزارش نمودند که جریان رودخانه تا قبل از سال ۱۹۸۱ طبیعی بوده ولی از سال ۱۹۸۱ تا ۲۰۰۸ فعالیت‌های انسانی میزان رواناب را تا ۸۵/۷ درصد کاهش داده است در حالیکه تغییر اقلیم ۱۴/۳ درصد در کاهش رواناب موثر بوده است (Dong et al, 2014). زو و همکاران از دو روش برای کمی‌سازی و جداسازی میزان تاثیر تغییر اقلیم و فعالیت‌های بشری بر رواناب حوضه رود Huaihe استفاده نمودند. مطالعه آنها نشان داد که تغییر اقلیم بیشتر از فعالیت‌های بشری در کاهش رواناب حوضه مذکور موثر بوده است (Zho et al, 2015).

با توجه به تحقیقات صورت گرفته مشاهده می‌شود که تحقیقات کمتری در زمینه بررسی روند تغییرات دبی در رودخانه و کمی نمودن نقش هر یک از عوامل موثر در تغییر آن با استفاده از یک مدل هیدرولوژیکی مفهومی انجام شده است. لذا در این پژوهش به بررسی روند تغییرات رواناب در حوضه مطالعاتی پرداخته می‌شود و با استفاده از یک مدل هیدرولوژیکی مفهومی نقش تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی در کاهش رواناب به تفکیک بررسی می‌شود، تا تصمیم گیران و مدیران منابع آب سیاست‌های مناسبی در مدیریت آب رودخانه‌ها اتخاذ نمایند.

مواد و روش‌ها

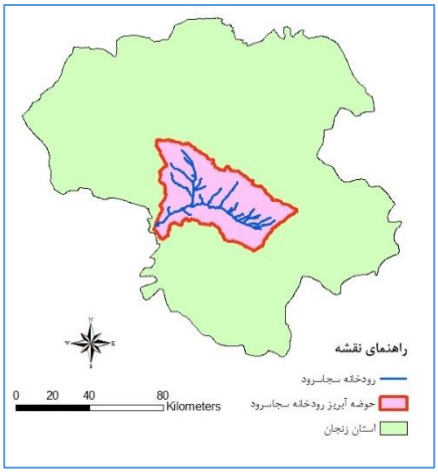
منطقه مورد مطالعه

رودخانه سجاسرود از رودخانه‌های دائمی و نسبتاً پرآبی است که از زمین‌های مجیدآباد خدابنده در استان زنجان سرچشمه می‌گیرد و پس از دریافت آب رودهای محلی و گذشتن از دو آبادی سجاس و قلابر پایین و سیراب کردن زمین‌های کناره‌ای به رودخانه قزل‌اوزن می‌ریزد. این رودخانه از دامنه‌های جنوبی کوه آق داغ در ۲۸ کیلومتری شمال خاوری خدابنده سرچشمه می گیرد و ارتفاع سرچشمه آن ۱۹۰۰ متر است. در منتهی الیه رودخانه سجاسرود ایستگاه هیدرومتری ینگی کندی در مختصات جغرافیائی ´۵۸-°۴۷ طول شرقی و ´۱۴-°۳۶ عرض شمالی و ارتفاع ۱۴۲۰ متری از سطح دریا واقع شده است. مساحت حوضه آبریز سجاسرود در محل ایستگاه هیدرمتری ینگی کندی ۲۴۸۴ کیلومتر مربع می‌باشد. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

معرفی مدل SWAT

مدل SWAT یک مدل شبیه‌سازی هیدرولوژیکی نیمه توزیعی و از نظر زمانی پیوسته می‌باشد و قابل استفاده برای پیش‌بینی اثرات روش‌های مدیریتی مختلف بر چرخه آب و نیز شبیه‌سازی پیوسته رواناب سطحی، نفوذ، تبخیر و تعرق، فرسایش، جریان آب زیرزمینی، جابجایی مواد مغذی و همچنین بررسی تغییرات اقلیم در دوره‌های زمانی گذشته و آینده می‌باشد که برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ به عنوان مدلی برای تعیین کیفیت آب زیرزمینی توسط دکتر جف آرنولد از سرویس تحقیقات کشاورزی آمریکا ارائه گردید. این مدل کارآیی

مناسبی در شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیکی و مدیریت حوضه آبریز داراست. مدل SWAT قابلیت اتصال به سامانه اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS) را دارا بوده و محدودیتی از نظر ورود حجم وسیعی از اطلاعات در مورد حوضه‌هایی با وسعت زیاد و پیچیده وجود ندارد.



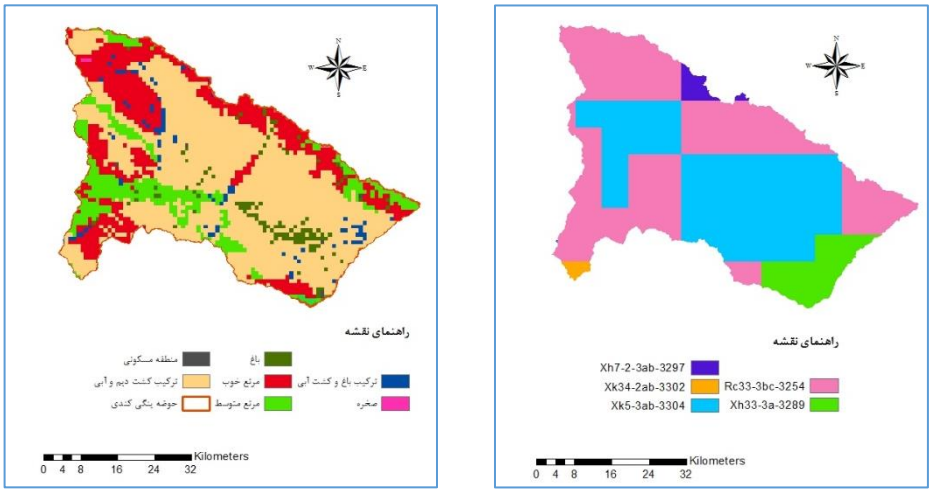
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز رودخانه سجاسرود

داده‌های مورد نیاز و واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT

به منظور انجام محاسبات هیدرولوژیکی در مدل SWAT طیف وسیعی از نقشه‌ها، اطلاعات و داده‌ها مورد نیاز می‌باشد که در مرحله نخست بایستی تهیه و سپس آماده‌سازی و بر اساس فرمت مدل تنظیم گردند که در جدول (۱) آورده شده است. شکل (۲) نقشه کاربری اراضی و خاک حوضه آبریز رودخانه سجاسرود را نشان می‌دهد. تعدیل و اصلاح پارامترهای ورودی مدل به نحوی که بهترین برازش بین داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهداتی حاصل شود را واسنجی گویند. جهت واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT از بسته نرم‌افزاری SWATCUP که شامل روش‌ها و برنامه‌های مختلف تجزیه و تحلیل جهت واسنجی کردن و محاسبه عدم قطعیت برای SWAT استفاده می‌گردد. هم اکنون این بسته نرم افزاری می‌تواند الگوریتم‌های SUFI-2، ParaSol، PSO، GLUE و MCMC را اجرا کند. SWATCUP به کاربر اجازه می دهد تا با انتخاب یکی از این روش‌ها و تکرار آن به همگرایی مورد نظر برسد. در این تحقیق از الگوریتم SUFI-2 استفاده شده است (اعلمی و همکاران ۱۳۹۷) در این روش سنجش میزان عدم قطعیت در مدلسازی، شامل عدم قطعیت در ورودی‌ها، مدل مفهومی، پارامترها و داده های اندازه گیری شده می باشد برای این منظور نیز از معیار p-factor استفاده می شود. این معیار بیانگر درصد داده‌های اندازه گیری شده ای است که درون باند عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار گرفته اند (ولی نژاد و همکاران ۱۳۹۲، اعلمی و همکاران ۱۳۹۷).

جدول ۱- داده‌های مورد استفاده در مدل *SWAT* و در واسنجی و صحت‌سنجی مدل

ردیف	داده	منابع	توضیحات
۱	نقشه مدل رقوم ارتفاعی	*SRTM*	-
۲	نقشه کاربری اراضی	از سایت *waterbase.org*	-
۳	نقشه خاک منطقه	از سایت *waterbase.org*	۱/۵۰۰۰۰۰۰ (نقشه فائو)
۵	داده‌های روزانه بارندگی	آب منطقه‌ای زنجان	ایستگاه بارندگی قلتوق
٦	داده‌های دمای روزانه	هواشناسی زنجان	(ایستگاه سینوپتیک خرم دره – زنجان)
۷	داده‌های درصد رطوبت روزانه	هواشناسی زنجان	(ایستگاه سینوپتیک خرم دره – زنجان)
۸	داده‌های تشعشع خورشیدی روزانه	هواشناسی زنجان	(ایستگاه سینوپتیک خرم دره – زنجان)
۹	داده های سرعت متوسط باد روزانه	هواشناسی زنجان	(ایستگاه سینوپتیک خرم دره – زنجان)
۱۰	داده‌های دبی ماهانه	آب منطقه‌ای زنجان	ایستگاه هیدرومتری ینگی کندی



شکل ۲- نقشه خاک و کاربری اراضی حوضه آبریز رودخانه سجاسرود

معیارهای ارزیابی مدل SWAT

معیارهای مختلفی برای مطابقت دادن داده‌های مشاهداتی و محاسباتی در مدلسازی پیشنهاد شده است. در این رساله از چهار معیار مختلف به شرح زیر استفاده خواهد شد.

معیار نش ساتکلیف (NSE): معیار نش ساتکلیف یک آماره نرمال شده می‌باشد که بزرگی نسبی واریانس باقیمانده را در مقایسه با واریانس داده‌های مشاهداتی تعیین می‌کند *(Moriasi et al. 2007)*. این معیار با نماد NSE نشان داده شده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$NSE = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - O_{avg})^2} \right) \quad (۱)$$

که در آن O_{avg} میانگین مقادیر مشاهداتی، S_i مقدار شبیه‌سازی شده توسط مدل، O_i مقدار داده مشاهداتی و n تعداد داده های مشاهداتی می‌باشد. مطابق رابطه داده شده، دامنه تغییرات NSE از $-\infty$ تا ۱ می‌باشد که مقدار ۱ بهترین مقدار ممکن محسوب می‌شود.

درصد اریبی $(PBIAS)$: درصد اریبی $(PBIAS)$ نشان دهنده متوسط تمایل داده‌های شبیه‌سازی شده به بزرگتر یا کوچکتر بودن از مقادیر مشاهده‌ای متناظر می‌باشد. بهترین مقدار آن صفر بوده و مقادیر مثبت نشان دهنده تمایل مدل به کوچکتر بودن از داده‌های مشاهده‌ای و مقادیر منفی تمایل مدل به بزرگتر بودن از داده‌های مشاهده‌ای می‌باشد *(Gupta et al. 1999)*. این معیار از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - S_i) * 100}{\sum_{i=1}^{n}(O_i)} \quad (۲)$$

نسبت باقیمانده میانگین مربعات خطا به انحراف از معیار داده‌های مشاهداتی (RSR): پارامتر RSR با استاندارد نمودن مقادیر باقیمانده میانگین مربعات خطا $(RMSE)$ با استفاده از انحراف از معیار مقادیر مشاهداتی به دست می‌آید.

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{abs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i - O_{avg})^2}} \quad (۳)$$

حدود متناظر معیارهای ارزیابی مدل $SWAT$ در جدول (۲) نشان داده شده است *(Moriasi et al. 2007)*.

جدول ۲- معیارهای ارزیابی مدل و حدود تشخیص آنها

ارزیابی	ضرایب ارزیابی		
	NS	PBIAS	RSR
خیلی خوب	$0.75 < NS \leq 1$	$PBIAS \leq \pm 10$	$0 < RSR \leq 0.5$
خوب	$0.65 < NS \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS \leq \pm 15$	$0.5 < RSR \leq 0.6$
قابل قبول	$0.5 < NS \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS \leq \pm 25$	$0.6 < RSR \leq 0.7$
عدم قبول	$NS < 0.5$	$PBIAS \geq \pm 25$	$RSR > 0.7$

بررسی وجود روند در آمار ایستگاه هیدرومتری

روند عبارت است از حرکات رو به بالا و پایین یک سری زمانی که نشان دهنده کاهش یا افزایش بلند مدت یک سری زمانی است. یک سری دارای روند، در واقع یک سری ناایستا است زیرا میانگین این سری ثابت نبوده و دستخوش تغییرات دراز مدت می‌باشد. تاکنون روش‌های آماری متعددی جهت تحلیل روند در سری‌های زمانی ارائه گردیده است. در این تحقیق از مدل رگرسیون خطی در تحلیل سری زمانی رواناب سالانه رودخانه استفاده شده است. به اینصورت که با ترسیم نمودار سری زمانی رواناب وجود خم رگرسیونی نشان دهنده‌ی آنست که رواناب دارای روند خطی می‌باشد (فیض بخش و همکاران).

تحلیل تغییرات سریع سری‌های زمانی با استفاده از آزمون پتیت

تغییرات سریع در سری‌های زمانی به مفهوم کاهش و یا افزایش ناگهانی در خصوصیات آماری یک سری زمانی طی یک گام زمانی کوتاه است. در این مطالعه آزمون پتیت به منظور تحلیل تغییرات سریع در سری‌های زمانی دبی رودخانه مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه توضیحات مختصری در خصوص این آزمون ارائه می‌شود.

برای بررسی وقوع روند سریع در سری‌های زمانی روش‌هایی پیشنهاد شده که از آن جمله می‌توان به آزمون پتیت (Pettitt Test) اشاره نمود که جزء روش‌های ناپارامتری بوده و در مطالعه روند متغیرهای هیدروکلیماتولوژی مورد استفاده قرار گرفته است. مزیت اصلی این روش‌ها، قابلیت آن‌ها در تعیین زمان وقوع این تغییرات در سری زمانی مورد بررسی می‌باشد. تست پتیت آزمونی ناپارامتری است که در سال ۱۹۷۹ توسط پتیت توسعه داده شد. این روش برای پیدا کردن نقاط تغییر در یک سری زمانی به کار برده می‌شود. تست پتیت آزمونی جهت تشخیص تغییرات معنی‌دار در میانگین سری زمانی است و این موضوع زمانی اهمیت دارد که هیچ فرضیه‌ای در مورد زمان تغییر موجود نباشد. آماره آزمون پتیت به شرح زیر است. ابتدا سری زمانی U_{zn} از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$U_{zn} = \sum_{i=1}^{t} \sum_{j=t+1}^{n} sgn(x_i - x_j) \qquad if\ z = 2 \dots n \qquad (۴)$$

t طول دوره آماری و n تعداد رخداد در سری آماری می‌باشد. تابع sgn( ) نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$sgn(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \qquad (۵)$$

مقدار K با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$K = max|U_{zn}| \qquad (۶)$$

در مرحله بعد مقدار K در رابطه (۳-۷) جایگزین و آماره p با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$p = exp\left[\frac{-6(k_n)^2}{n^3 + n^2}\right] \qquad (۷)$$

هر چه آماره p به صفر نزدیک‌تر باشد اختلاف میانگین سری قبل از پرش و بعد از پرش معنادارتر می‌شود و معمولا اگر $p < 0.05$ معنادار تلقی می‌شود.

محاسبه میزان تاثیر تغییرات اقلیمی و فعالیتهای انسانی بر میزان رواناب

پس از بررسی وجود روند در سری زمانی و تعیین نقطه تغییر با استفاده از روش پتیت، سری زمانی ایستگاه هیدرومتری به بازه زمانی پایه و بازه زمانی ارزیابی تقسیم می‌شود. میزان کل تغییرات در میانگین سالانه رواناب با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta Q_{Total} = Q_{Observed-baseline} - Q_{Observed-evaluation} \qquad (۸)$$

که در آن ΔQ_{Total} میزان کل تغییرات، $Q_{baseline}$ و $Q_{evaluation}$ میانگین سالانه دبی در بازه زمانی پایه و بازه زمانی ارزیابی در سری زمانی مشاهداتی می‌باشد. با فرض اینکه میزان کل تغییرات از تغییر در شرایط اقلیمی و فعالیت‌های انسانی ناشی می‌شود چنین نتیجه می‌شود که:

$$\Delta Q_{Total} = \Delta Q_h + \Delta Q_c \qquad (۹)$$

$$\Delta Q_c = Q_{Simulated-baseline} - Q_{Simulated-evaluation} \qquad (۱۰)$$

که در آن ΔQ_c و ΔQ_h به ترتیب تغییرات هیدرولوژیکی ناشی از تغییر در شرایط اقلیمی و فعالیت‌های انسانی می‌باشد. $Q_{Simulated-baseline}$ و $Q_{Simulated-evaluation}$ میانگین سالانه دبی در بازه زمانی پایه و بازه زمانی ارزیابی در سری زمانی شبیه‌سازی شده توسط مدل *SWAT* می‌باشد. جهت محاسبه تغییرات صورت گرفته در میزان دبی، در مرحله اول، مدل *SWAT* برای بازه زمانی پایه واسنجی و صحت‌سنجی می‌شود. مدل آماده شده برای بازه زمانی ارزیابی شبیه‌سازی شده و در نهایت، تفاوت بین جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل، در بازه زمانی پایه و بازه زمانی ارزیابی به عنوان تغییرات مربوط به شرایط اقلیمی خواهد بود.

نتایج و بحث

بررسی وجود روند و تغییرات سریع رواناب ایستگاه هیدرومتری ینگی‌کندی

شکل (۳) تغییرات دبی سالانه مشاهداتی در ایستگاه ینگی‌کندی را بین سالهای ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۲ نشان می‌دهد. بیشترین دبی سالانه در سال ۱۹۹۸ و کمترین دبی سالانه در سال ۲۰۱۱ اتفاق افتاده است.

جهت بررسی وجود روند در دبی سالانه ایستگاه ینگی کندی از روش رگرسیون استفاده شده است که نشان می‌دهد دبی سالانه در این ایستگاه روند کاهشی دارد. جدول (۳) مشخصات آماری دبی سالانه را نشان می‌دهد. روند کاهشی دبی در این ایستگاه در سطح ۵٪ معنی دار بود بنابراین روند کاهشی دبی سالانه تایید می‌گردد.

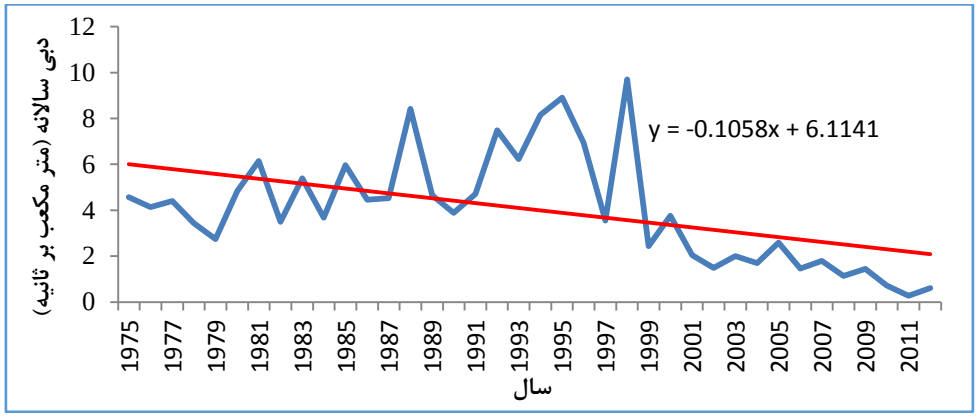
جدول ۳- مشخصارت آماری دبی سالانه ایستگاه هیدرومتری ینگی‌کندی

متغییر	میانگین	انحراف از معیار داده‌ها	سطح اطمینان	P-value
دبی سالانه	۴/۰۵	۲/۴	٪۵	۰/۰۰۱۸ <۰/۰۵

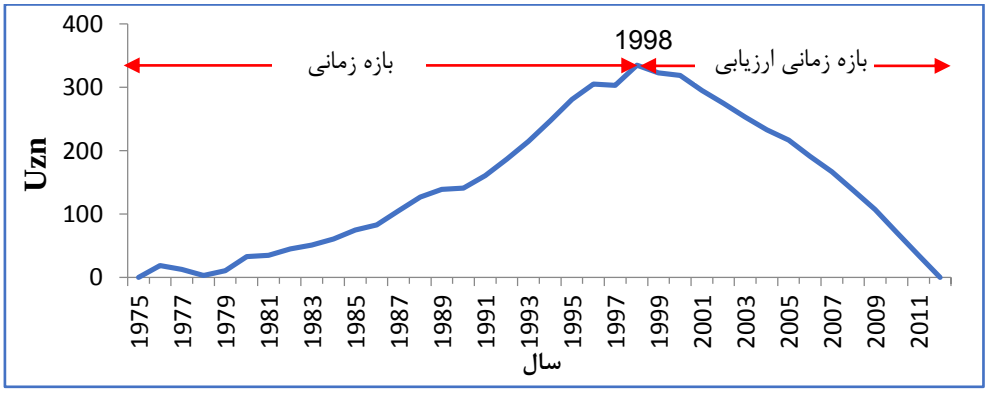
شکل (۴) تغییرات در میانگین سری زمانی دبی سالانه که با روش پتیت بدست آمده است نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است تغییر سری در میانگین سری زمانی در سال ۱۹۹۸ اتفاق افتاده است. بر این اساس سری زمانی به بازه زمانی قبل از سال ۱۹۹۸ به عنوان بازه زمانی پایه و بعد از سال ۱۹۹۸ به عنوان بازه زمانی ارزیابی تقسیم می‌شود. شکل (۵) تغییرات دبی سالانه و میانگین دبی سالانه ایستگاه هیدرومتری ینگی کندی در بازه زمانی پایه و ارزیابی را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است میانگین دبی سالانه در بازه زمانی پایه ۵/۴۳ متر مکعب بر ثانیه و در بازه زمانی ارزیابی ۱/۶۸ متر مکعب بر ثانیه محاسبه گردید. میانگین دبی سالانه در بازه زمانی ارزیابی به اندازه ۶۹ درصد نسبت به بازه زمانی پایه کاهش داشته است.

واسنجی و صحت سنجی مدل SWAT در دوره زمانی پایه

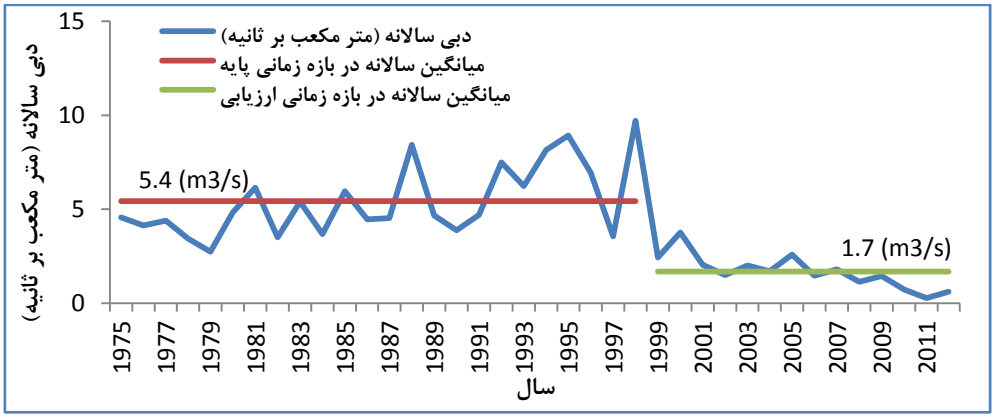
در ادامه پس از تایید وجود روند و تعیین نقطه تغییر در سری زمانی رواناب ایستگاه ینگی کندی، مدل SWAT حوضه ینگی‌کندی در بازه زمانی پایه (۱۹۹۸-۱۹۷۵) واسنجی و صحت سنجی گردید. از مدل شبیه ساز تهیه شده جهت تخمین میزان تاثیر تغییرات اقلیمی و دخالت بشری در کاهش جریان رودخانه سجاسرود در بازه زمانی ارزیابی (۲۰۱۱-۱۹۹۸) گردید.



شکل ۳- تغییرات دبی سالانه رودخانه سجاسرود در ایستگاه ینگی‌کندی



شکل ٤- تغییرات در میانگین سری زمانی دبی سالانه با روش پتیت



شکل ۵- تغییرات دبی سالانه و میانگین دبی سالانه ایستگاه هیدرومتری ینگی کندی در بازه زمانی پایه و ارزیابی

پس از آماده‌سازی نقشه‌ها و داده‌های مشاهداتی، بایستی دوره زمانی داده‌ها جهت ورود به مدل و اجرای آن تعیین گردد. برای این منظور داده‌هایی که بیشترین همپوشانی زمانی را با یکدیگر دارند انتخاب و ملاک دوره زمانی ساخت مدل قرار گرفت. از طرفی با توجه به اینکه مدل SWAT در بازه زمانی پایه (۱۹۷۵-۱۹۹۸) واسنجی و صحت سنجی میشود لازم است تا ایستگاههای بارش و سینوپتیک منطقه که دارای آمار ثبت شده در این بازه می‌باشند، استفاده شود. بنابراین از ابتدای سال ۱۹۸۶ تا انتهای سال ۲۰۱۳ به عنوان دوره مشاهداتی حوضه ینگی‌کندی تعیین گردید. سال ۱۹۸۶ به عنوان *warmup* و از ۶ سال برای واسنجی (۱۹۹۲-۱۹۸۷) و ۳ سال آخر (۱۹۹۵-۱۹۹۳) جهت صحت‌سنجی استفاده گردید. دوره زمانی *warmup* برای حذف اثر شرایط اولیه مدل بر نتایج خروجی از مدل در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به تعدد پارامترهای مربوط به خصوصیات حوضه آبریز نمی‌توان مدل را برای تمامی آنها واسنجی نمود. بنابراین برای انتخاب پارامترهای موثر و تعیین کننده در واسنجی مدل مورد تحلیل حساسیت قرار می‌گیرد تا از میان پارامترهای متنوع مدل SWAT، با انتخاب موثرترین پارامترها مدل به خوبی واسنجی و صحت‌سنجی شود. بدین منظور، در ابتدا تمام پارامترهای موثر در تولید رواناب تعیین گردید، در ادامه با استفاده از آنالیز حساسیت، پارامترهای حساس تعیین گردید. در جدول (۴) فهرستی از مهمترین پارامترهای مورد استفاده در واسنجی مدل SWAT نشان داده شده است. شماره منحنی رواناب (CN2)، مقدار رطوبت خاک (AWC) از حمله حساس‌ترین پارامترهای موثر بر رواناب می‌باشند. پس از تعیین پارامترهای حساس، از الگوریتم SUFI-2 در بسته نرم‌افزاری SWATCUP جهت واسنجی و صحت سنجی مدل استفاده گردید. با توجه به اینکه مدل به صورت ماهانه واسنجی می‌شود لازم است نتایج شبیه‌سازی مدل با مقادیر مشاهده‌ای در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه سنجیده شود.

جدول ٤- پارامترهای موثر در تولید رواناب

پارامتر	دامنه پارامتر		توضیحات
	کمینه	بیشینه	
r__SOL_Z().sol	-0.5	0.5	عمق کف لایه اول خاک
v__GW_DELAY.gw	1	500	زمان تاخیر انتقال آب از آخرین پروفیل لایه خاک به سطح آب زیرزمینی (روز)
v__PLAPS.sub	-500	500	نرخ تغییرت بارش با ارتفاع در هر زیر حوضه
v__SMTMP.bsn	-5	5	دمای ذوب توده برف
v__TLAPS.sub	-10	10	نرخ تغییرت دما با ارتفاع در هر زیر حوضه
r__SOL_AWC().sol	-0.25	0.25	ظرفیت آب قابل دسترس خاک
r__CN2.mgt	-0.25	0.06	شماره منحنی
v__ALPHA_BF.gw	0.04	0.99	ضریب تخلیه آب زیرزمینی

r و v کدهایی هستند که نوع تغییراتی را که برای پارامتر به کار برده می‌شوند، تعیین می‌کند. v بدان معنی است که مقدار پارامتر با مقدار جدید جایگزین شود و برای r مقدار پارامتر در (مقدار جدید+۱) ضرب شود.

در شکل (۶) دبی ماهانه اندازه گیری شده و شبیه سازی شده توسط مدل نشان داده شده است. شاخصهای ارزیابی عملکرد مدل در شبیه سازی رواناب نیز در جدول (۵) آورده شده است. همانطور که مشخص است مقادیر دبی ماهانه شبیه‌سازی و مشاهداتی همخوانی خوبی با هم دارند. عدم انطباقهای موجود بین مدل و مقادیر مشاهداتی اکثرا در دبی‌های پیک و بعضا در دبی‌های پایین می‌باشد. برای مثال در ماه مارس ۱۹۹۸ که پیک دبی مشاهداتی می‌باشد، مدل مقدار کمتری را نشان می‌دهد. سه عامل را می‌توان در ایجاد عدم انطباقهای مذکور ذکر نمود:

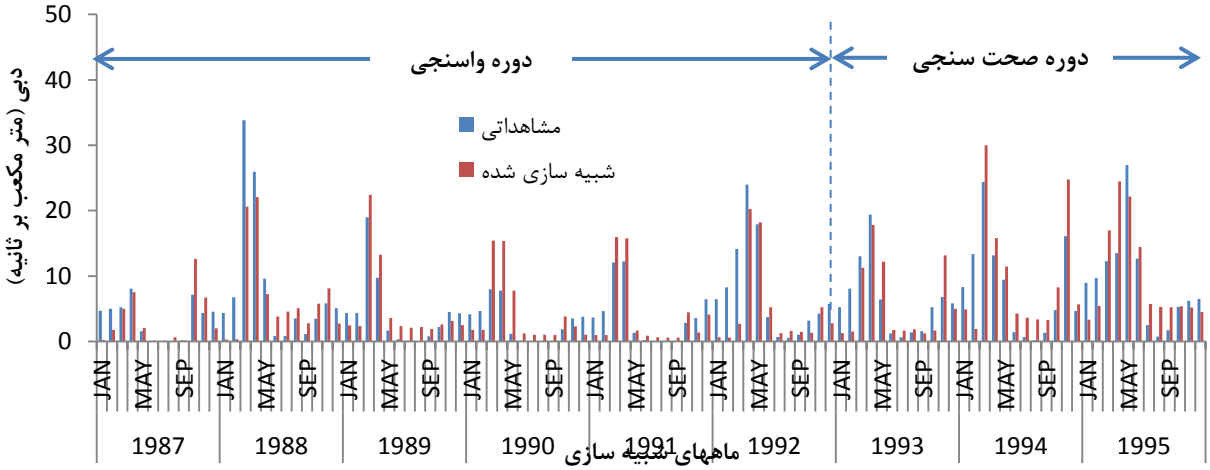
از آنجایی که لازم بود تا جهت مدلسازی بازه زمانی پایه، طول دوره شبیه‌سازی بیشتر باشد، و از طرفی بیشتر ایستگاههای بارندگی فاقد آمار در بازه زمانی پایه بودند، تعداد ایستگاههای کمی جهت مدلسازی استفاده گردید که می‌تواند عامل ایجاد خطا در نتایج خروجی شود.

نوع پوشش زمین به عنوان یکی از پارامترهای مهم در تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی و همچنین میزان رواناب حوضه می‌باشد. استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی با دقت پایین به دلیل عدم وجود نقشه کاربری با دقت بالا یکی از محدودیت‌های مدل در تخمین رواناب می‌باشد.

استفاده از نقشه‌های خاک با دقت پایین به دلیل عدم وجود نقشه خاک با دقت بالا

جدول ۵- شاخص های ارزیابی عملکرد مدل در شبیه سازی رواناب

معیارهای های ارزیابی عملکرد مدل					
واسنجی (۱۹۹۲-۱۹۸۷)			صحت‌سنجی (۱۹۹۵-۱۹۹۳)		
NS	PBIAS	RSR	NS	PBIAS	RSR
۰/۷	۷/۳	۰/۵۵	۰/۶۵	-۹/۴	۰/۵۸



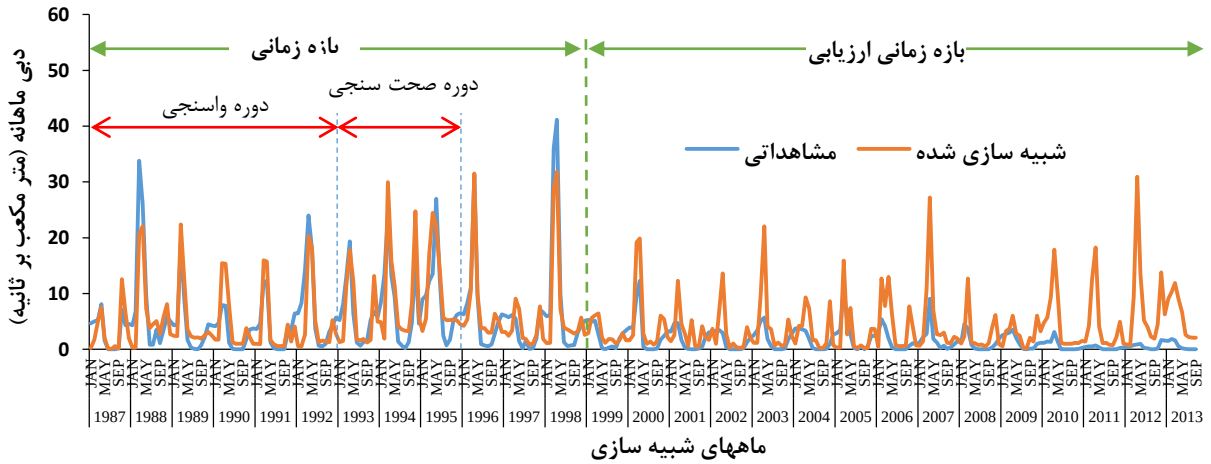
شکل ٦- دبی ماهانه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT

تعیین میزان اثر تغییرات اقلیمی و فعالیتهای بشری بر کاهش رواناب حوضه سجاسرود

پس از واسنجی و صحت‌سنجی، مدل آماده شده برای شبیه‌سازی دبی در بازه زمانی ارزیابی (۱۹۹۸-۲۰۱۳) استفاده گردید. شکل (۷) سری زمانی پیش بینی رواناب توسط مدل SWAT در بازه زمانی ارزیابی را نشان می‌دهد همانطور که از شکل مشخص است اختلاف زیادی بین دبی مشاهداتی و دبی شبیه‌سازی شده وجود دارد و این اختلاف در طی سالها روند افزایشی دارد به طوریکه در سال ۲۰۱۲ به ماکزیمم مقدار خود رسیده است. جدول (۶) رواناب سالانه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT را نشان می‌دهد. همانطور که در جدول مذکور محاسبه شده است تغییرات اقلیمی باعث کاهش رواناب سالانه ۱/۲۳ مترمکعب بر ثانیه در هر سال شده است که در حدود ۳۳٪ از کاهش کل جریان می‌باشد. بر این اساس ۶۷٪ از کاهش جریان رودخانه سجاسرود ناشی از فعالیتهای انسانی می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که فعالیتهای بشری نسبت به تغییرات اقلیمی سهم بیشتری در کاهش جریان رودخانه در بازه زمانی ارزیابی داشته‌اند.

جدول ٦- تعیین تاثیر تغییرات اقلیمی و فعالیتهای انسانی بر روی کاهش دبی کاهش دبی رودخانه سجاسرود

	مشاهداتی	شبیه‌سازی شده	کل تغییرات	تغییرات اقلیمی	فعالیتهای انسانی
بازه زمانی پایه	۵/۴۳	۵/۴۰	-	-	-
بازه زمانی ارزیابی	۱/۶۷	۴/۲	۵/۴۳-۱/۶۷= ۳/۷۶	(۵/۴۳-۴/۲)/۳/۷۶=۳۳%	۶۷%



شکل ۷- دبی ماهانه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده رودخانه سجاسرود

نتیجه گیری

در این پژوهش، از روش رگرسیون خطی بر ای بررسی روند تغییرات سری زمانی رواناب رودخانه سجاسرود استفاده گردید. با استفاده از روش پتیت زمان وقوع تغییرات سریع در سری زمانی سالانه رواناب مشخص گردید. بر این اساس طول دوره آماری به دو بازه زمانی پایه و بازه زمانی ارزیابی تقسیم گردید. مدل هیدرولوژیکی حوضه با استفاده از داده‌های موردنیاز مدل برای باز زمانی پایه واسنجی و صحت‌سنجی گردید. مدل آماده شده در بازه زمانی ارزیابی اجرا گردید. نتایج حاصل از مدل در این دوره با مقادیر مشاهداتی دبی در ایستگاه هیدرمتری ینگی‌کندی مقایسه گردیده و درصد تاثیر رواناب از تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی به تفکیک محاسبه گردید. نتایج خروجی نشان داد که تاثیر عوامل انسانی در کاهش رواناب ٪۶۷ و تاثیر عوامل اقلیمی ٪۳۳ می‌باشد. بر این اساس لازم است تا مدیران محلی با اتخاذ استراتژیهای مناسب و با تغییر الگوی مصرف به مدیریت منابع آب حوضه در زمانهای آتی بپردازند چرا که کاهش رواناب پیامدهای جبران‌ناپذیر زیست محیطی در داخل حوضه و در پایین دست آن بوجود خواهد آورد.

منابع

اعلمی م.ت.، عباسی ح.، نیک سخن م.ح. (۱۳۹۷)، "مقایسه دو روش متفاوت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT در بر آورد میزان رواناب و بار مواد جامد معلق حوضه". دانش آب و خاک، ۲۸(۳): ۵۳-۶۴.

ایلدرمی ع.، نوری ح.، آقابیگی س.، حقیقی کرمانشاهی ا. (۱۳۹۶)، "ارزیابی سناریوهای تغییر بهینه‌ی کاربری اراضی و تأثیر آن بر پارامترهای هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز دینور)". فصل‌نامه علمی پژوهشی پژوهش‌های فرسایش محیطی. ۷ (۳): ۸۶-۹۹.

فیض بخش کوفلی س.، رادمهر س.، صالحی‌راد، م ر (۱۳۹۰)، "پیش بینی سری‌های زمانی تجمعی کوتاه مدت به روش رگرسیونی بر اساس مجموع‌های جزیی". مجله‌ی بررسی‌های آمار رسمی ایران، ۷۹: ۱۵۹-۱۷۲.

ولی نژاد ف.، قربانی خ.، ذاکری‌نیا م.، دهقانی ا.، آبابایی ب.، "ارزیابی عملکرد مدل SWAT در برآورد رطوبت خاک (مطالعه موردی: حوضه آبریز نومل)". آب و توسعه پایدار. ۱(۱): ۵۷-۶۴.

Arnold, J.G., Muttiah, R.S., Srinivasan, R., and Allen, P.M. 2000. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi River basin. J. Hydrol., 227: 1-4. 21-40.

Dong, W., Cui, B., Liu, Z., et al., 2014. Relative effects of human activities and climate change on the river runoff in 522 an arid basin in northwest China.

Mishra A.K. and Singh V. P. (2010). "A review of drought concepts", Journal of hydrology, vol. 391, pp. 202-216.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., and Veith, T. L., (2007). "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations". T. ASAE, 50, 885–900, 2007.

Zhu, Y., Wang, W., Liu, Y. & Wang, H. J. 2015, Runoff changes and their potential links with climate variability and anthropogenic activities: a case study in the upper Huaihe River Basin, China. Hydrol. Res. 46 (6), 1019–1036.

Hydrological Processes, 28(18), 4854-4864.

Gosain A., Rao S., and Basuray D., 2006. Climate change impact assessment on hydrology of Indian river basins. Current Science, 90(3): p. 346-353.

Lettenmaier D., 1999. Water Resources Implications of Global Warming: A U.S. Regional Perspective. Climatic Change, 43(3): p. 537-579.

Li, K.Y., Coe, M.T., Ramankutty, N., and De Jong, R. 2007. Modeling the hydrological impact of land-change in West Africa, J. of Hydro., 337: 258-268.

Miao, C. Y., Ni, J. R., Borthwick, A. G. L. & Yang, L., 2011. A preliminary estimate of human and natural contributions to the changes in water discharge and sediment load in the Yellow River. Global and Planetary Change, 76, 196–205.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 2, Vol. 13, Jan.-Jul. 2019, p. 475-485

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۲، جلد ۱۳، خرداد - تیر ۱۳۹۸، ص. ۴۸۵-۴۷۵

Runoff Modeling and Estimation of Runoff Changes Due to Climatic and Human Factors

H. Abbasi[1], L. Malekani[2]*

Recived: Fab.17, 2019 Accepted: May.21, 2019

Abstract

Quantifying the impact of climate change and human activities on hydrological processes is of great importance for regional water-resource management. In this study, trend analysis and analysis of the short-term variations in annual streamflow in the Sajasrood Watershed (SW) during the period 1987–2012 were conducted using linear regression and the Pettitt test. The time series for streamflow in SW exhibits declining trends. The results show that its break point is 1998, so that the streamflow can be divided into the baseline period and the evaluation period. The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) was employed to simulate the hydrological processes. SWAT was first calibrated at monthly time step. The NSE, PBIAS, and RSR for the calibration period (1988-1992) were 0.7, 7.3, and 0.55, respectively. The NSE, PBIAS, and RSR for the validation period (1993-1995) were 0.65, -9.4, and 0.58, respectively. The results suggest that SWAT performance was good during calibration and validation periods. The results show that the contribution rates of climate change and human activities to runoff are 33% and 67% during 1999-2012. The proposed framework can help policy makers to regulate the policies accordingly so that the river may restore to a better level and ecosystem may get improved.

Key words: climate change, human activities, streamflow, Pettitt test, SWAT

1- Ph.D, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz
2- Assistant Professor, Department of civil Engineering, Marand Faculty of Technical and Engineering, University of Tabriz
(*- Corresponding Author Email:lmalekani@tabrizu.ac.ir)