

بهینه سازی پارامترهای موثر بر بارش- رواناب در مدل نیم توزیعی SWAT (مطالعه موردی حوزه آبخیز قزاقلی استان گلستان)

حسین سلمانی^{۱*}، محمد رستمی خلج^۲، محسن محسنی ساروی^۳، حامد روحانی^۴، علی سلاجقه^۵
تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۰/۳۰

چکیده

بررسی فرایندهای بارش-رواناب در مدل‌های هیدرولوژیکی به سبب تأثیرپذیری از پارامترهای مختلف، دشوار و با عدم قطعیت همراه می‌باشد. دقت این مدل‌ها در پیش بینی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه می‌تواند با بومی سازی مقادیر بهینه پارامترها بهبود بخشیده شود. برای این منظور در این پژوهش از مدل نیمه توزیعی SWAT و برنامه GLUE در بسته نرم افزاری SWAT CUP برای بهینه سازی پارامترهای حساس بهره گرفته شد. بررسی‌ها در دو پایه زمانی روزانه و ماهانه و در حوزه آبخیز قزاقلی با مساحت ۷۰۷۲ کیلومترمربع انجام گرفت. بعد از اجرای اولیه مدل، حوضه به ۳۷ زیر حوضه و ۲۷۸ واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) تقسیم گردید. در تحلیل حساسیت پارامترها، ۱۷ پارامتر از ۲۷ پارامتر اولیه حساس‌تر شناخته شد که حساس‌ترین پارامتر در پایه روزانه و ماهانه شماره منحنی رواناب تشخیص داده شد. بعد از تحلیل حساسیت و شناخت پارامترهای حساس مدل دبی با ضریب تعیین (R^2) ۰/۶۹ و ۰/۸۶، ضریب نش- ساتکلیف (E_{NS})، ۰/۶۸ و ۰/۸۴ در طی دوره روزانه و ماهانه واسنجی شد. مقادیر R^2 و E_{NS} طی دوره‌های روزانه و ماهانه برای دوره صحت سنجی به ترتیب ۰/۷۸، ۰/۸۶ و ۰/۶۵ و ۰/۸۳ بدست آمدند. بعد از شبیه سازی، مقدار P_factor بین ۰/۳۴-۰/۹ و R_factor بین ۰/۵۱-۱/۱۴ به دست آمدند که نشان دهنده کمی بودن عدم قطعیت و دقت بالای مدل در شبیه سازی است به طوری که اکثر داده‌های مشاهداتی در محدوده تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار گرفتند؛ لذا این مدل می‌تواند به عنوان ابزاری مفید برای مدیریت منابع آب، توصیف و مدیریت بهینه حوضه و ارزیابی سیستم‌های منابع آبی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: بهینه سازی، بارش- رواناب، حوزه آبخیز قزاقلی، مدل SWAT، GLUE

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه تهران، کرج

* نویسنده مسئول: Email: hsalmani@alumni.ut.ac.ir

^۲ دانشجوی دکترا آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

^۳ استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

^۴ استادیار مجتمع آموزش عالی گنبد، گلستان، گنبد

^۵ دانشیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

مقدمه

مدل شکل ساده شده یک سیستم طبیعی است که بخشی از واقعیت را شبیه سازی می کند. هدف از مدل کردن، مشخص ساختن عملکرد و رفتار یک پدیده طبیعی تحت شرایط معین می باشد. مدل یک پدیده را در ساده ترین حالت ممکن بررسی کرده و در صورت موفق بودن می توان آن را به حالت های پیچیده تعمیم داد. در این حالت می توان پدیده های بسیار پیچیده را تفسیر و پیشگویی های صحیحی به عمل آورد (۱۲). در سال های اخیر مدل های هیدرولوژیکی به طور گسترده ای توسط هیدرولوژیست ها و مدیران منابع آبی برای توصیف و مدیریت بهینه حوضه و ارزیابی سیستم های منابع آبی مورد استفاده قرار گرفته اند (۲۴). این مدل ها با داشتن پارامترهای مختلف برای بررسی جامع مؤلفه های رواناب سطحی و زیر سطحی، آب زیر زمینی، آب گذاری به آبخوان عمیق، تبخیر و تعرق، ویژگی های مختلف خاک و کاربری اراضی و کمیت و کیفیت آب مورد نیازند (۲۳،۹). پژوهشگران مختلف بر این باورند که دقت مدل شبیه سازی در پیش بینی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه می تواند با بومی سازی مقادیر بهینه پارامترها بهبود بخشیده شود (۱۱). در این مطالعه از مدل نیمه توزیعی SWAT و نسخه ۲۰۰۹ آن که SWAT۲۰۰۹ Arc نامیده می شود برای این مقصود استفاده گردیده است. اصولاً در مدل SWAT پایگاه داده ها برای شرایط ایالت متحده طراحی شده است. بنابراین برای استفاده این مدل در مناطق دیگر بایستی تغییراتی در این اطلاعات از جمله داده های مربوط به خاک، کاربری اراضی و

ایستگاه های مولد اقلیمی و همچنین اطلاعات مدیریتی صورت گیرد (۴). این مدل به طور موفقیت آمیزی برای شبیه سازی رواناب، مقدار رسوب و بار مواد مغذی خاک در بسیاری از حوضه ها در سرتاسر آمریکا، آسیا و اروپا مورد استفاده قرار می گیرد (۶). Ahmad et al (۲۰۰۲) اجزاء زهکشی زیر زمینی در مدل SWAT را برای سه نوع مدیریت در ایالت آیوا مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که مقادیر پیش بینی شده به وسیله مدل و اندازه گیری شده با هم توافق خوبی دارند. Van Liew (۲۰۰۳) توانایی مدل SWAT را در تخمین شدت جریان تحت شرایط آب و هوایی مختلف، در سه زیر حوضه از ایالت اوکلاهما آمریکا بررسی نمود و چنین دریافت که مدل SWAT می تواند به خوبی مقدار رواناب روزانه را در هر زیر حوضه تحت شرایط آب و هوایی خشک، معتدل و مرطوب پیش بینی کند. همچنین ایشان در مطالعه ای دیگر در مقایسه دو مدل SWAT و HSPF^۱ در پیش بینی شدت جریان حوضه رودخانه واشیتا^۲ آمریکا دریافتند که اختلاف عملکرد دو مدل بیشتر به دلیل اختلاف مکانیزم آن ها در محاسبه رواناب می باشد. سپس نتیجه گرفتند که مدل SWAT در رابطه با پیش بینی جریان، نتایج قابل اعتمادتری نسبت به مدل HSPF تحت شرایط آب و هوایی مختلف بدست می دهد و برای بررسی درازمدت تأثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب سطحی ابزار بهتری می باشد (۲۰). Saleh and Du (۲۰۰۴) در واسنجی مدل های SWAT

^۱ Hydrologic Simulation Program Fortran

^۲ Washita

فرایندهای هیدرولوژیکی حوزه آبخیز رودخانه می سی سی پی نشان داد که افزایش حدود ۱- ۴٪ رواناب حوضه در طول سال ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۸ می تواند مربوط به افزایش غلظت CO₂ باشد. همچنین بررسی ها با استفاده از مدل SWAT نشان داد که مقدار رطوبت خاک و آب در بهار افزایش یافته و در تابستان کاهش پیدا می کند و فرایندهای سیلابی شدن و خشکسالی افزایش یافته است. Hyung -Kyung (۲۰۱۱) برای شبیه سازی رواناب و کیفیت آبی حوزه آبخیز سد چونگیو^۲ در کره جنوبی از بسته نرم افزاری SWAT CUP و برنامه های SUFI۲، PARASOL و GLUE استفاده نمودند. در آنالیز حساسیت مدل با استفاده از شاخص های p-value و t-stat حساس ترین پارامترها، شماره منحنی رواناب، زمان تأخیر انتقال آب از آخرین پروفیل لایه خاک به سطح آب زیرزمینی و هدایت هیدرولیکی موثر بستر رودخانه اصلی شناخته شدند. بررسی کارایی مدل با استفاده از شاخص های ارزیابی R^۲، E_{NS}، p-factor و R-factor در سه سایت پایشی نشان دهنده قابلیت بالای سه برنامه در شبیه سازی داشتند. به طوری کلی هدف از مطالعه حاضر بررسی قابلیت مدل SWAT در شبیه سازی رواناب روزانه و ماهانه حوزه آبخیز قزاقلی استان گلستان می باشد؛ لذا برای این کار از بسته نرم افزاری SWAT CUP و برنامه GLUE برای بهینه سازی پارامترهای مختلف موثر بر بارش رواناب در حوضه مذکور استفاده گردید. به دلایل مختلفی از قبیل تغییر پذیری فضایی،

و HSPF در شبیه سازی مقادیر دبی، رسوب و مواد مغذی خاک در پنج زیر حوضه از حوزه آبخیز رودخانه باسک^۱ در تگزاس مرکزی نتیجه گرفتند که متوسط جریان روزانه، متوسط میزان رسوب و مواد مغذی خاک شبیه سازی شده توسط مدل SWAT در طول دوره های واسنجی و اعتبار سنجی مدل، نسبت به نتایج مدل HSPF به مقادیر اندازه گیری شده نزدیک تر بوده است. Rostamian (۲۰۰۷) در حوضه بهشت آباد با استفاده از مدل SWAT اقدام به برآورد مقادیر دبی و بار رسوب کرده و دریافت که مدل SWAT در برآورد دبی رودخانه عملکرد مناسبی داشته، اما در شبیه سازی دبی های اوج رودخانه موفقیتی نداشته است. همچنین توانایی مدل در برآورد بار رسوب را در حد متوسط ارزیابی نمود. Bekele (۲۰۰۷) در واسنجی مدل SWAT برای تخمین مقادیر رواناب و غلظت رسوب روزانه تحت دو سناریو، دریافتند که استفاده از اهداف مختلف در حین فرایند واسنجی باعث اصلاح کارایی مدل می شود و توزیع بیشتر پارامترها در طول فرایند پارامتربندی منجر به شبیه سازی بهتر می شود. Zhang et al (۲۰۰۹) برای واسنجی پارامترهای هیدرولوژی مدل SWAT از الگوریتم بهینه سازی جهانی استفاده کردند. در این مطالعه از پنج الگوی بهینه سازی جهانی برای واسنجی اتوماتیک چهار حوضه استفاده شد و نتایج، روش الگوریتم ژنتیک را نسبت به روش های دیگر مناسب تر تشخیص دادند. تحقیقات Wu et al (۲۰۱۱) در شبیه سازی

^۲ Chungju

^۱ Bosque River Basin

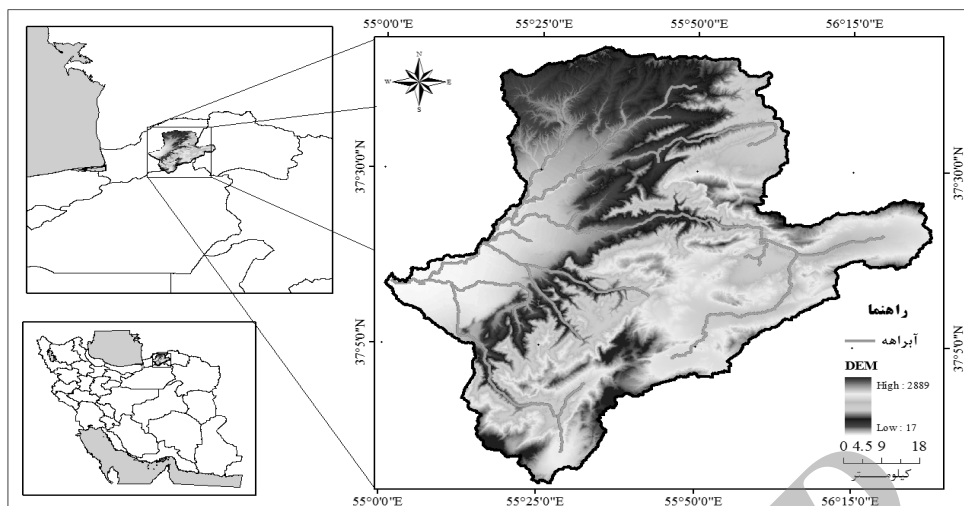
غرب به بخشی از حوضه بزرگ گرگان رود محدود می‌شود. حداکثر ارتفاع حوضه ۲۸۸۹ متر و کمترین ارتفاع آن ۱۸ متر از سطح دریا می‌باشد. به طور کلی آب و هوای حوضه تحت تأثیر عرض جغرافیایی، ارتفاع، امتداد کوه‌ها و فاصله از دریا بسیار متغیر است. بر اساس تقسیم بندی دومارتن اقلیم منطقه از نیمه خشک تا خیلی مرطوب تغییر می‌کند. جابجایی توده های هوا در تعیین نوع آب و هوای منطقه نقش مهمی دارد به طوری که عمده بارش‌ها در حوضه در فصول پاییز و زمستان صورت می‌گیرد که در ارتفاعات پایین غالباً به صورت باران و در ارتفاعات به صورت برف می‌باشد. متوسط بارندگی منطقه ۵۵۶ میلی متر و حرارت متوسط سالانه ۱۸/۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. رودخانه اصلی این حوضه امتداد عمومی شرقی- غربی دارد و زیر حوضه های این حوضه از شرق به غرب شامل زیر حوضه ساری سو، زاو، آجی سو، دوغ، اوغان، قلی تپه، چهل چای و خرمارود می‌باشد. در شکل ۱ موقعیت حوضه قزاقلی در استان گلستان و کشور ایران نشان داده شده است.

خطاهای اندازه گیری و محدودیت زمانی، امکان اندازه گیری مستقیم بسیاری از این پارامترها وجود ندارد (۷) لذا برای شناخت مقادیر بهینه بسیاری از پارامترها فرایند واسنجی مدل امری ضروری و اجتناب ناپذیر است (۱۸). بدینسان پس از انجام آنالیز حساسیت مدل شبیه سازی با استفاده از پارامترهای حساس انجام گرفت و بعد از بدست آوردن مقدار بهینه پارامترها در طی دوران واسنجی، اعتبارسنجی مدل بدون تغییر پارامترهای حاصل از دوران واسنجی صورت پذیرفت. به طور کلی نتایج بدست آمده از این پژوهش می‌تواند برای مطالعات بعدی که در این حوضه و یا حوضه های مشابه انجام می‌شود مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز رودخانه قزاقلی با وسعت ۷۰۷۲ کیلومتر مربع در استان گلستان و در مختصات جغرافیایی $55^{\circ}01'37''$ تا $56^{\circ}27'40''$ طول شرقی و $36^{\circ}45'48''$ تا $37^{\circ}47'56''$ عرض شمالی واقع شده است. این حوضه از شمال به حوزه آبخیز اترک، از جنوب به حوزه آبخیز شاهرود، از شرق به استان خراسان شمالی و از



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز مورد مطالعه

پایه زمانی روزانه است. متغیرهای اقلیمی مورد نیاز مدل شامل بارش روزانه، حداقل و حداکثر دما، تشعشع خورشید، رطوبت نسبی و سرعت باد بر پایه زمانی روزانه است. این اطلاعات به عنوان ورودی‌هایی از فایل مقادیر مشاهده ای خوانده می‌شوند یا این که به وسیله مدل SWAT با استفاده از مقادیر متوسط ماهانه خلاصه شده در فایل ورودی مولد آب و هوایی (userwgn.dbf) ایجاد می‌شوند. فایل ورودی مولد آب و هوایی شامل اطلاعات آماری مورد احتیاج برای تولید داده های اقلیمی معرف زیر حوضه‌هاست. حداقل ۲۰ سال آمار برای محاسبه این فایل مورد احتیاج است. در این بررسی از داده های ۱۱ ایستگاه باران سنجی، ۶ ایستگاه رطوبت سنجی، ۹ ایستگاه دماسنجی، ۲ ایستگاه باد سنجی و ۲ ایستگاه تشعشع سنجی استفاده گردید که موقعیت آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است. پس از ورود تمامی این اطلاعات مدل به اجرا در آمد.

معرفی مدل SWAT

اساس مدل نیمه توزیعی SWAT بر اساس معادله بیلان آبی استوار است که به صورت زیر بیان می‌شود:

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

که در آن: SW_t : مقدار نهایی رطوبت خاک (بر حسب میلی متر آب)، SW_0 : مقدار اولیه رطوبت خاک (بر حسب میلی متر آب)، t : زمان (بر حسب روز)، R_{day} : مقدار بارش در روز t ام (بر حسب میلی متر آب)، Q_{sur} : مقدار رواناب سطحی در روز t ام (بر حسب میلی متر آب)، E_a : مقدار تبخیر و تعرق در روز t ام (بر حسب میلی متر آب)، E_{seep} : مقدار نشست که در روز t ام از نیم‌رخ خاک وارد منطقه غیر اشباع می‌شود (بر حسب میلی متر آب)، Q_{sur} : مقدار آب برگشتی در روز t ام (بر حسب میلی متر آب) می‌باشد.

اطلاعات مورد نیاز مدل داده های مدل رقومی ارتفاع، نقشه شبکه زهکشی، داده های خاک شناسی، کاربری اراضی و اطلاعات اقلیمی بر

جدول ۱- مشخصات ایستگاه های مورد استفاده در منطقه مورد مطالعه

ردیف	ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	نوع ایستگاه
۱	مراوه تپه	۴۰۷۶۸۷	۴۱۹۵۲۴۰	۴۶۰	سینوپتیک
۲	گنبد	۳۳۷۴۰۵	۴۱۲۴۱۸۱	۳۷	سینوپتیک
۳	پارک ملی گلستان	۳۹۳۵۶۸	۴۱۳۹۹۰۳	۴۶۰	سینوپتیک
۴	تمر	۳۶۷۵۸۴	۴۱۵۰۴۰۴	۱۳۲	سینوپتیک
۵	چشمه خان	۴۲۱۷۷۴	۴۱۲۸۱۷۴	۱۲۵۰	سینوپتیک
۶	رباط قره بیل	۴۳۹۹۴۰	۴۱۳۴۲۹۵	۱۴۵۰	سینوپتیک
۷	لزوره	۳۵۸۲۶۹	۴۱۲۰۹۸۳	۱۵۵	سینوپتیک
۸	اراز کوسه	۳۳۶۱۱۱	۴۱۲۱۴۱۳	۳۵	سینوپتیک
۹	رامیان	۳۳۴۲۴۶	۴۰۹۸۷۵۵	۲۰۰	سینوپتیک
۱۰	تنگه راه	۳۹۰۲۸۸	۴۱۳۹۴۷۱	۳۳۰	باران سنجی
۱۱	قلی تپه	۳۵۹۵۴۸	۴۱۲۱۹۳۲	۲۵۰	سینوپتیک
۱۲	نوده	۳۴۵۷۸۴	۴۱۰۴۵۲۰	۲۸۰	باران سنجی
۱۳	قزاقلی	۳۲۴۳۷۲	۴۱۲۱۹۹۳	۳۰	آب سنجی

CN = مقدار شماره منحنی در روز مورد نظر می باشد. مقدار $0 \leq CN \leq 100$ تغییر می کند. CN تابعی از گروه هیدرولوژیکی خاک، پوشش مختلط زمین و شرایط رطوبت پیشین می باشد. همچنین حداکثر رواناب از روش استدلالی یا منطقی و تبخیر و تعرق با روش پنمن - مانتیس محاسبه گردید که پارامترهای مورد نیاز آن شامل دمای هوا، تشعشع خورشیدی، رطوبت نسبی و سرعت باد می باشد. بعد از اجرای مدل حوزه آبخیز قزاقلی بر اساس نقشه های DEM و شبکه زهکشی به ۳۷ زیر حوضه تقسیم گردید. سپس برای کاهش ناهمگنی هر زیر حوضه بر اساس نقشه های کاربری اراضی، خاک شناسی و شیب به ۲۷۸ واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) تقسیم گردید. متغیرهای مختلف برای هر HRU محاسبه می شود و سپس بعد از وزن دهی جمع بندی می شود تا نهایتاً مقدار کلی آن برای خروجی حوضه مورد مطالعه محاسبه

به طور کلی در این بررسی جریان آب در کانال جریان با سطح آزاد در نظر گرفته می شود. سرعت جریان از رابطه مانینگ و روندیابی جریان با استفاده از روش ماسکینگام صورت گرفت. رواناب سطحی با استفاده از روش شماره منحنی SCS به صورت زیر محاسبه گردید:

$$Q_{sur} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} + 0.8S)} \quad (2)$$

Q_{sur} = مقدار تجمعی رواناب یا باران اضافی (بر حسب میلی متر آب)، R_{day} = عمق بارش در روز مورد نظر (بر حسب میلی متر آب) و S = ضریب نگه داشت سطحی خاک (بر حسب میلی متر آب) که به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

گردد (۶). این کار باعث کاهش ناهمگنی و افزایش دقت مطالعات می‌گردد. به طور کلی بسیاری از پارامترهای مدل بر اساس پیش فرض مدل می‌باشند لذا برای حوزه آبخیز مورد مطالعه بایستی بهینه سازی گردند. این کار با استفاده از برنامه GLUE که در بسته نرم افزاری SWAT CUP قابل اجرا است انجام گرفت.

SWAT CUP و برنامه GLUE

در این پژوهش برای آنالیز حساسیت، واسنجی، اعتبارسنجی و آنالیز عدم قطعیت از بسته نرم افزاری SWAT CUP و برنامه GLUE استفاده گردید. SWAT-CUP یک برنامه عمومی غالب و الحاقی به مدل SWAT است که برای واسنجی مدل‌های SWAT مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱). در واقع برنامه GLUE روشی برای انجام آنالیز عدم قطعیت به وسیله نمونه بردای تقاضا و آنالیز حساسیت محلی می‌باشد. در GLUE عدم قطعیت پارامتر برای همه منابع عدم قطعیت از جمله عدم قطعیت ساختاری، عدم قطعیت پارامترهای موجود و عدم قطعیت پاسخ محاسبه می‌گردد. برای محاسبه عدم قطعیت از دو فاکتور P-factor و R-factor استفاده می‌شود. P-factor عبارت است درصد داده های مشاهده ای پوشش داده شده مساوی باند تخمین عدم قطعیت ۹۵٪ (۹۵PPU) است. در این حالت عدم قطعیت ۹۵ درصد در سطوح ۲/۵ و ۹۷/۵ درصد از تابع توزیع تجمعی متغیر خروجی که با روش نمونه برداری لاتین- هایپرکیوب (Latin hypercube) بدست آمده، محاسبه می‌گردد. بعد از اندازه‌گیری شدت

آنالیز عدم قطعیت R-factor محاسبه می‌گردد که عبارت است از متوسط ضخامت باند ۹۵PPU که بر انحراف معیار داده اندازه گیری شده تقسیم می‌شود. در ابتدا داده های اندازه گیری شده در سطح ۹۵PPU قرار می‌گیرند. در هر مرحله پارامترهای قبلی تجدید نظر شده و فاصله اطمینان ۹۵٪ پارامترها بر اساس ماتریس همبستگی کاهش می‌یابد. این پارامترها سپس مورد تجدید نظر قرار می‌گیرند و سپس این عدم قطعیت در گام‌های متوالی کاهش می‌یابد و فاکتورهای P-factor و R-factor مورد بازبینی قرار بگیرد. در این صورت دامنه داده های جدید نسبت به دامنه قبلی کوتاه‌تر است و اطراف بهترین شبیه سازی متمرکز می‌شوند. این کار تا زمانی ادامه می‌یابد که دو شرط زیر برقرار شود:

۱- اکثر داده های مشاهده‌ای در سطح ۹۵ ppu واقع شوند (p-factor)

۲- فاصله متوسط بین حد بالا و حد پایین ۹۵ درصد تقسیم بر انحراف معیار داده های اندازه گیری شده تا حد ممکن کوچک شود (R-factor).

به طور کلی هر چه که p-factor به ۱۰۰ و R-factor به یک نزدیک‌تر باشد شبیه‌سازی با دقت بیشتری صورت گرفته است. بر اساس مطالعات مختلف صورت گرفته در این زمینه ۲۷ پارامتر برای تحلیل حساسیت انتخاب گردیدند. آنالیز حساسیت با استفاده از روش اتوماتیک و بر دو پایه زمانی روزانه و ماهانه در طی دوره واسنجی و سال‌های آماری ۱۹۹۰-۱۹۸۷ (سال آبی (۶۶-۱۳۶۵) تا (۶۹-۱۳۶۸))

صورت گرفت. پارامترهای مختلف بر این اساس در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۲- پارامترهای مورد استفاده برای آنالیز حساسیت و دامنه تغییرات آنها

نام پارامتر	توضیحات	دامنه
CN _۲	شماره منحنی SCS اولیه برای شرایط رطوبتی متوسط (II)	۲۰ تا ۹۰
SOL_K()	هدایت هیدرولیکی اشباع لایه های خاک (mm/hr)	۰ تا ۲۰۰۰
CH_K _۲	هدایت هیدرولیکی موثر بستر رودخانه اصلی (mm/hr)	۰ تا ۱۵۰
CH_N _۲	ضریب مانینگ رودخانه اصلی	۰ تا ۰/۷
ALPHA_BNK	فاکتور آلفا جریان پایه برای ذخیره کناری (روز)	۰ تا ۱
SLSUBBSN	متوسط طول شیب زمین در هر HRU (متر)	۱۰ تا ۱۵۰
GWQMN	حداقل عمق مورد نیاز سطح ایستابی در سفره های کم عمق برای جریان بازگشتی (mmH _۲ O)	۰ تا ۵۰۰۰
TLAPS	نرخ تغییرات دما با ارتفاع در هر زیر حوضه (°C/km)	۰ تا ۵۰
SMFMX	فاکتور ذوب برف در تاریخ ۲۱ ژوئن (mmH _۲ O/°C-day)	۰ تا ۱۰
SOL_ALB()	ضریب بازتاب لایه های خاک (آلبیدو)	۰ تا ۰/۲۵
GW_DELAY	زمان تأخیر انتقال آب از آخرین لایه خاک به سطح آب زیرزمینی (روز)	۰ تا ۵۰۰
SOL_AWC()	ظرفیت رطوبت قابل استفاده لایه های خاک (mmH _۲ O/mmsoil)	۰ تا ۱
EPCO	فاکتور جبران جذب آب توسط گیاه	۰/۱ تا ۱
GW_REVAP	ضریب تعیین نفوذ به سفره آب زیر زمینی عمیق یا صعود مویبگی از سفره آب کم عمق	۰/۱ تا ۱/۵
ALPHA_BF	پارامتر آلفا در جریان پایه (روز)	۰ تا ۱
SFTMP	متوسط دمای هوا برای تبدیل باران به برف (°C)	۵- تا ۵+
LAT_TTIME	زمان تأخیر رسیدن جریان های زیر سطحی به رودخانه در هر HRU (روز)	۰ تا ۱۸۰
SMFMN	فاکتور ذوب برف در تاریخ ۲۱ دسامبر (mmH _۲ O/°C-day)	۰ تا ۱۰
ESCO	فاکتور جبران کننده تبخیر از خاک	۰/۱ تا ۱
SOL_BD()	جرم مخصوص ظاهری لایه های خاک (Mg/m ^۳ یا g/cm ^۳)	۱/۱ تا ۲/۵
SMTMP	دمای پایه ذوب توده برف (°C)	۵- تا ۵+
CANMX	حداکثر آب نگه داشته شده توسط پوشش گیاهی (mm H _۲ O)	۰ تا ۱۰۰
SLOPE()	شیب متوسط زمین در هر (HRU m/m)	۰ تا ۰/۶
SURLAG	ضریب تأخیر رواناب سطحی (روز)	۱ تا ۲۴
RCHRG_DP	درصد تغذیه سفره عمیق از سفره کم عمق یا غیر محصور	۰ تا ۱
TIMP	فاکتور تأخیر دمای فشرده سازی برف	۰/۱ تا ۱
REVAPMN	حداقل عمق سطح ایستابی در سفره های کم عمق برای صعود از طریق مویبگی یا تغذیه سفره	۰ تا ۵۰۰

طی سال های آماری ۱۹۹۰-۱۹۸۷ (سال آبی ۶۶-۱۳۶۵) تا (۶۹-۱۳۶۸)) صورت گرفت. بعد از بهینه سازی پارامترها برای به دست آوردن بهترین نتایج آنالیز عدم قطعیت در محدوده عدم قطعیت ۹۵ درصد و در سطوح

بعد از تحلیل حساسیت پارامترها و شناسایی مؤثرترین پارامترها واسنجی با استفاده از برنامه GLUE بر دو پایه زمانی روزانه و ماهانه و با استفاده از داده های مشاهداتی ایستگاه هیدرومتری قزاقلی واقع در خروجی حوضه در

است. بعد از اطمینان از کارایی و دقت مدل در شبیه سازی دوره روزانه و ماهانه اقدام به صحت سنجی در بازه زمانی ۱۹۹۱-۱۹۹۲ (سال های آبی ۷۰-۱۳۶۹ تا ۷۱-۱۳۷۰) گردید.

در سطوح ۲/۵ و ۹۷/۵ درصد انجام گرفت. برای ارزیابی کارایی مدل از ضرایب تغییرات (D)، ضریب تعیین (R^2)، ضریب نش- ساتکلیف (E_{NS}) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده گردید. شاخص های ارزیابی مدل بر این اساس در جدول (۳) ارائه شده

جدول ۳- معیارهای اندازه گیری دقت شبیه سازی

معیار	روش محاسبه	معیار	روش محاسبه
ریشه میانگین مربعات اشتباه	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{obs})^2}$	ضریب همبستگی	$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{simav})(Q_i^{obs} - Q_i^{obsav}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{simav})^2 \sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{obsav})^2}$
درصد تفاوت	$D = \frac{100(\sum_{j=1}^n Q_j^{sim} - \sum_{j=1}^n Q_j^{obs})}{\sum_{j=1}^n (Q_j^{obs})}$	ضریب کارایی نش- ساتکلیف	$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{obsav})^2}$

هیدرولیکی اشباع لایه های خاک) و SLSUBBSN (متوسط طول شیب زمین در هر HRU) تأثیرگذارترین پارامترها بر دبی روزانه و ماهانه حوزه آبخیز قزاقلی می باشند. تحلیل حساسیت با استفاده از دو شاخص p-value و t-stat انجام گرفت. به طور کلی پارامترهایی با کمترین مقدار p-value و بالاترین مقدار مطلق t-stat بیشترین حساسیت را دارا می باشند. بعد از شناسایی پارامترهای حساس واسنجی با استفاده از ۱۷ پارامتر تأثیرگذار انجام شد. دامنه تغییرات پارامترها با توجه به پیش فرض مدل و بر اساس ایستگاه هیدرومتری قزاقلی تنظیم گردید. واسنجی طی سال های ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۰ (سال ۱۹۸۶ به عنوان warming up در نظر گرفته شد) و بر پایه زمانی روزانه و ماهانه

که در این جدول Q_i^{sim} مقدار برآوردی برای نقطه آام، Q_i^{simav} مقدار میانگین دبی برآوردی، Q_i^{obs} مقدار مشاهده ای برای نقطه آام، Q_i^{obsav} میانگین دبی مشاهداتی و n = تعداد داده ها می باشد.

نتایج

نتایج آنالیز حساسیت انجام گرفته بر روی ۲۷ پارامتر اولیه نشان داد که از بین این پارامترها در پایه زمانی روزانه پارامترهای CN۲ (شماره منحنی SCS اولیه برای شرایط رطوبتی متوسط)، CH-N۲ (ضریب مانینگ رودخانه اصلی) و ALPHA-BANK (فاکتور آلفا جریان پایه برای ذخیره کناری) و در پایه زمانی ماهانه CN۲، SOL-K (هدایت

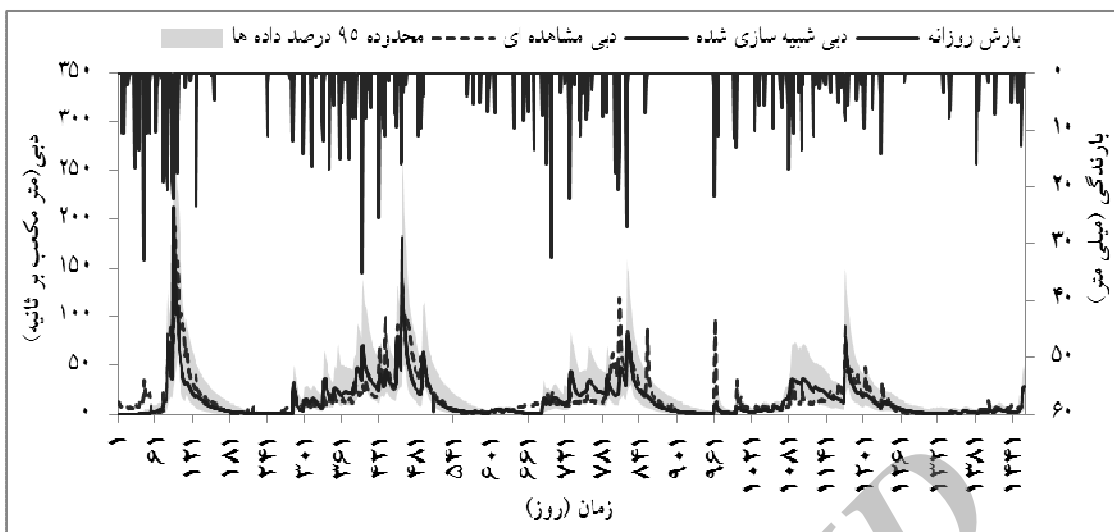
انجام گرفت. در مراحل مختلف شبیه سازی به بهینه سازی پارامترهای مختلف پرداخته شد و در نهایت مقادیر بهینه پارامترها جهت شبیه سازی رواناب ماهانه و روزانه حوزه آبخیز مورد مطالعه تعیین شد. در جدول ۴ نتایج آنالیز حساسیت و مقادیر بهینه پارامترهای موثر بر بارش-رواناب (مقدار یا درصد تغییرات) بعد از ۲۰۰۰ بار اجرای مدل در طی دوره واسنجی نشان داده شده است. بر اساس مطالعات مختلف صورت گرفته در این زمینه برای تغییر مقادیر پارامتر در مدل به سه روش عمل می-

شود که شامل: (۱) تغییر پارامتر با جایگزین کردن مقادیر موجود پارامتر با مقدار داده شده (۲) اضافه کردن میانگین مقادیر داده شده به مقدار پارامتر اولیه و پیش فرض مدل و (۳) ضرب کردن مقادیر موجود پارامتر در (۱+ مقدار داده شده) است. همچنین در اشکال ۲ و ۳ نتایج واسنجی در بهترین اجرای مدل و محدوده تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد نمایش داده شده است.

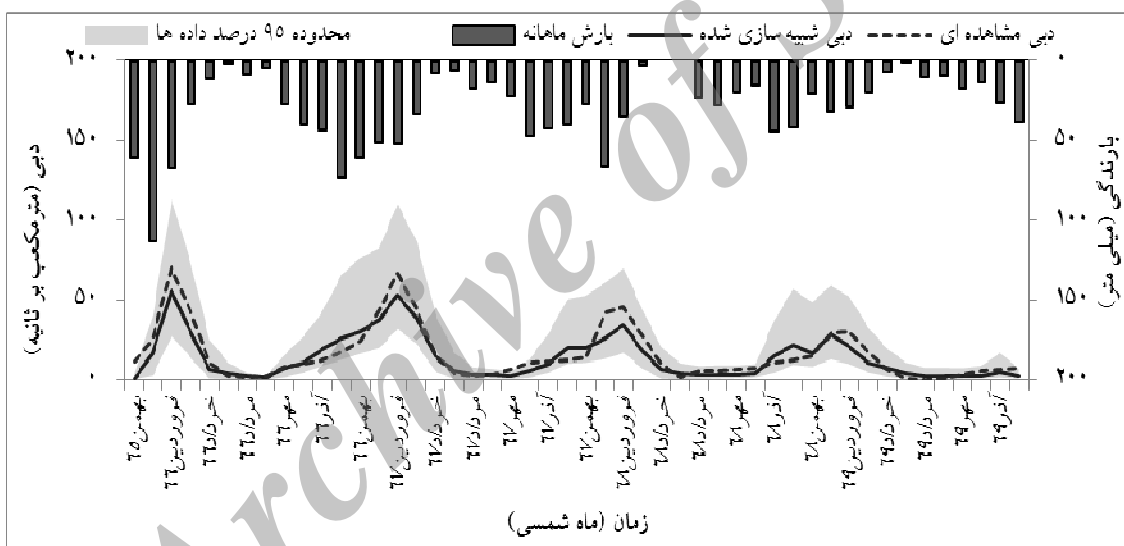
جدول ۴- مقدار نهایی پارامترها (مقدار یا درصد تغییرات) و پارامترهای حساس در پایه زمانی روزانه و ماهانه

مقدار بهینه پارامتر (مقدار یا درصد تغییرات) بر پایه ماهانه	p-value	t-stat	نام پارامتر*	مقدار بهینه پارامتر (مقدار یا درصد تغییرات) بر پایه روزانه	p-value	t-stat	نام پارامتر*
-۰/۰۳	۰/۰۰	-۲۶/۸۹	r_CN۲	-۰/۱۹	۰/۰۰	-۲۴/۶۵	r_CN۲
-۰/۷۲	۰/۰۰	-۲۱/۳۹	r_SOL_K	۰/۴۵	۰/۰۰	۱۶/۳۲	v_CH_N۲
۰/۶۱	۰/۰۰	-۱۲/۲۸	r_SLSUBBSN	۰/۵۲	۰/۰۰	-۱۴/۶۱	v_ALPHA_BNK
۱/۳۶	۰/۰۰	-۸/۳۹	r_SOL_BD	۵۶/۰۰	۰/۰۰	۱۰/۳۳	v_CH_K۲
۵۸۶/۱۱	۰/۰۰	۷/۵۶	v_GWQMN	-۰/۴۱	۰/۰۰	-۹/۶۴	r_SOL_K
۰/۲۱	۰/۰۰	-۵/۷۹	v_ALPHA_BNK	۰/۶۹	۰/۰۰	۵/۷۰	r_SLSUBBSN
-۰/۳۹	۰/۰۰	-۴/۴۲	v_ALPHA_BF	۱/۷۹	۰/۰۰	-۲/۹۷	r_SOL_BD
۴۷/۹۹	۰/۰۰	-۴/۱۶	v_Canmx	۶۴/۸۷	۰/۰۱	-۲/۶۲	v_Canmx
۰/۳۵	۰/۰۰	۴/۱۶	v_Rchrg_Dp	۷/۵۳	۰/۰۶	-۱/۸۶	v_SMFMN
۳۶۳/۶۹	۰/۱۳	۱/۵۳	v_GW_DELAY	۰/۴۲	۰/۰۷	-۱/۸۲	r_ESCO
۰/۲۹	۰/۲۲	-۱/۲۲	r_SLOPE()	۳۵۱۳/۹۵	۰/۰۸	۱/۷۵	v_GWQMN
۱۴/۹۹	۰/۳۲	-۰/۹۹	v_SURLAG	۲۴۸/۱	۰/۱۰	-۱/۶۳	v_REVAPMN
۴۶۹/۳۸	۰/۴۰	-۰/۸۴	v_REVAPMN	-۱/۴۷	۰/۱۸	۱/۳۳	v_SFTMP
۵/۶۲	۰/۴۱	-۰/۸۲	v_SMFMN	۲/۶۷	۰/۱۹	۱/۳۰	v_SMTMP
۵/۶۴	۰/۴۴	۰/۷۷	v_SMFMX	۰/۷۹	۰/۴۳	-۰/۷۹	v_GW_REVAP
۰/۶۲	۰/۵۱	۰/۶۶	r_SOL_AWC()	۴۲/۲۴	۰/۴۴	۰/۷۶	v_TLAPS
۰/۹۷	۰/۵۸	-۰/۵۶	v_SFTMP	۰/۹۵	۰/۴۷	۰/۷۲	r_EPCO

*در این ستون جدول v به معنی جایگزینی مقادیر موجود پارامتر با مقادیر داده شده و r به معنی ضرب کردن مقادیر موجود پارامتر در (۱+ مقدار داده شده) است.



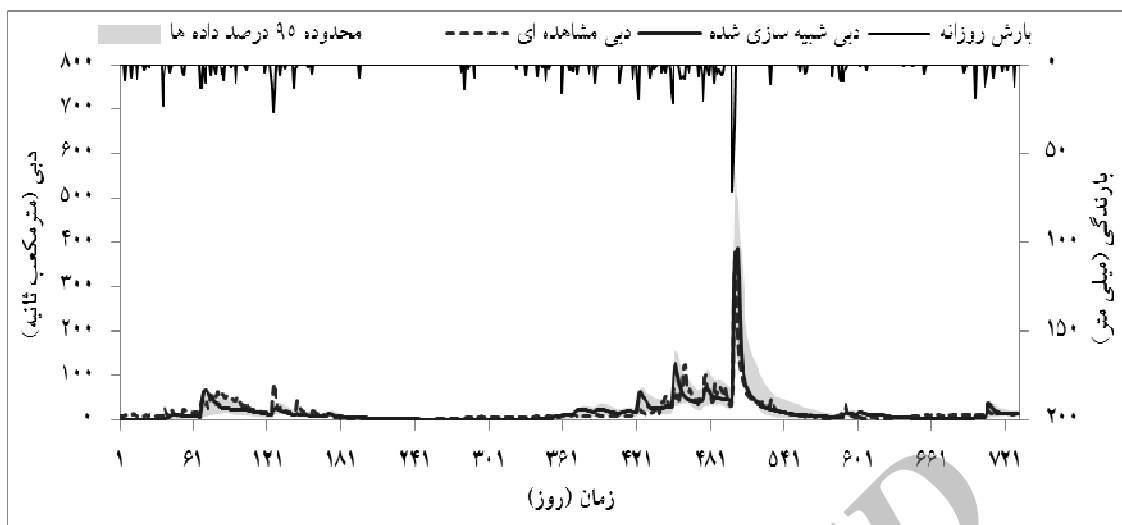
شکل ۲- مقایسه رواناب مشاهده ای و شبیه سازی شده در باند عدم قطعیت ۹۵ درصد در دوره واسنجی و بر پایه روزانه



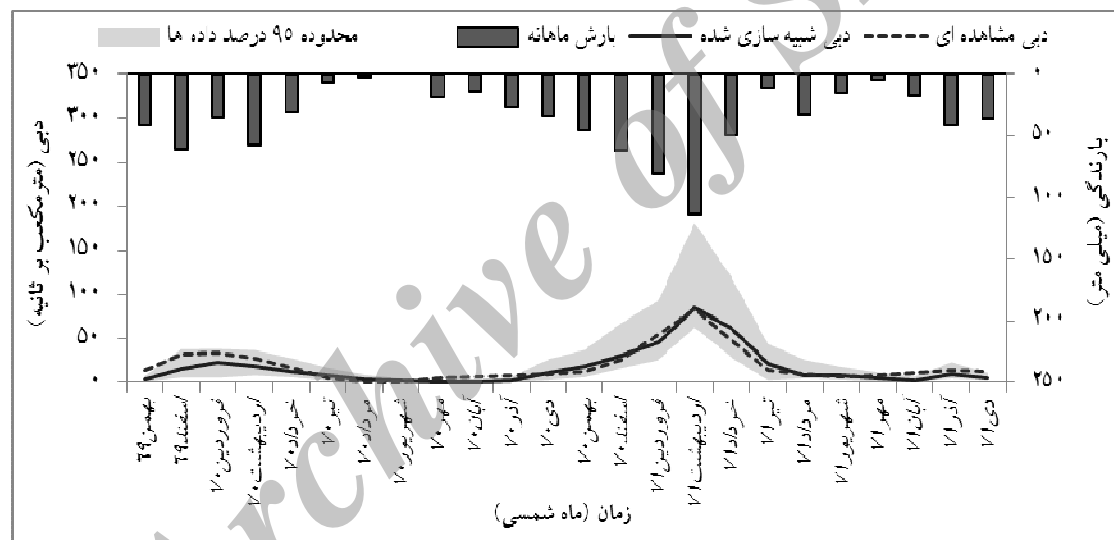
شکل ۳- مقایسه رواناب مشاهده ای و شبیه سازی شده در باند عدم قطعیت ۹۵ درصد در دوره واسنجی و بر پایه ماهانه

سازی در دوره چهار ساله فرآیند واسنجی باشد. در اشکال ۴ و ۵ نتایج اعتبارسنجی بر پایه زمانی روزانه و ماهانه در باند عدم قطعیت ۹۵PPU نشان داده شده است. همچنین در جدول ۵ نتایج ارزیابی مدل در طی دوره واسنجی و اعتبارسنجی بر اساس معیارهای ارائه شده نشان داده شده است.

در این مطالعه دو سوم از داده های موجود برای واسنجی و یک سوم برای اعتبارسنجی استفاده شد. در طی فرآیند واسنجی مدل، پارامترهای مختلف بهینه شدند و شبیه سازی مناسبی به عمل آمد لذا بهینه سازی پارامترها زمانی معتبر است که شبیه سازی در طی ۲ سال باقی مانده (۱۹۹۱ و ۱۹۹۲) مشابه شبیه



شکل ۴- مقایسه رواناب مشاهده ای و شبیه سازی شده در باند عدم قطعیت ۹۵ درصد در دوره اعتبارسنجی و بر پایه روزانه



شکل ۵- مقایسه رواناب مشاهده ای و شبیه سازی شده در باند عدم قطعیت ۹۵٪ در دوره اعتبارسنجی و بر پایه ماهانه

جدول ۵- ضرایب آماری ارزیابی دقت مدل در شبیه سازی رواناب روزانه و ماهانه در دوره های واسنجی و اعتبار سنجی

شاخص						دوره زمانی	پایه زمانی
P_factor	R_factor	R ^۲	NS	(%)D	RMSE(m ^۳ /s)		
۰/۷۰	۰/۹۹	۰/۶۹	۰/۶۸	-۹/۷۵	۱۲/۵۲	واسنجی	روزانه
۰/۳۴	۰/۵۱	۰/۷۸	۰/۶۵	-۲/۹۱	۱۶/۶۱	اعتبارسنجی	
۰/۹۰	۱/۱۴	۰/۸۶	۰/۸۴	-۱۳/۳۲	۷/۵۲	واسنجی	ماهانه
۰/۶۳	۰/۹۵	۰/۸۶	۰/۸۳	-۱۱/۹۳	۸/۵۸	اعتبارسنجی	

بحث و نتیجه گیری

تطابق زیادی بین مقادیر اوج بارندگی با رواناب شبیه سازی شده و رواناب خروجی از حوضه وجود دارد. به عبارتی دیگر اوج بارندگی مربوط به روزها و ماه های پرباران سال می باشد و در ایام فاقد بارندگی مقادیر شبیه سازی شده دبی صفر می باشد که علت آن مربوط به نادیده گرفتن جریان آب پایه و آب زیر زمینی برای حوزه آبخیز قزاقلی توسط مدل می باشد. در طی فرایند واسنجی مدل مقادیر پیش فرض مدل تغییر یافته و بعد از شبیه سازی به دفعات زیاد برای منطقه مورد مطالعه اصلاح و بهینه گردید. دامنه عدم قطعیت به تدریج کاهش یافته و در اطراف بهترین شبیه سازی قرار گرفت. پژوهشگران مختلف استفاده از چندین روش را به جای یک روش خاص برای بررسی کارایی واسنجی و تحلیل عدم قطعیت پیشنهاد می کنند (۱۷،۱) لذا در تحقیق حاضر کارایی مدل در شبیه سازی با شاخص های مختلف بررسی گردید. به طور کلی شبیه سازی اولیه مدل با خطای زیادی همراه بود به طوری که در دوره روزانه و ماهانه خطای اندازه گیری شده $432/8$ و 78 درصد بدست آمدند. این ضریب بعد از واسنجی مدل به $9/75$ و $13/32$ درصد کاهش پیدا نمود. به طور کلی با وجود پیش بینی صحیح مقادیر دبی اوج توسط مدل، انطباق چندانی بین زمان رسیدن به دبی اوج شبیه سازی شده و مقادیر خروجی از حوضه وجود ندارد که این روند در فصل بهار مشهود تر است. در واقع علت این امر را می توان به ضعف روش SCS در شبیه سازی رواناب حاصل از ذوب برف دانست. در واقع عدم انطباق

درست مقادیر اوج نشان دهنده ی عدم قابلیت مدل در شبیه سازی کامل ذوب برف در مناطق کوهستانی حوضه است (۵،۱۴). در منطقه مورد مطالعه تغییرات دامنه ارتفاعی بین مناطق کوهستانی و دشتی بین ۲۸۷۱ متر متغیر است به طوری که عمده بارش ها در مناطق کوهستانی به صورت برف می باشد. همچنین در پایه زمانی روزانه، مقادیر شبیه سازی خیلی بیشتر نسبت به مقادیر مشاهده ای می باشد اما در پایه زمانی ماهانه، مقادیر شبیه سازی شده نسبت به مقادیر مشاهده ای خیلی کمتر است که بعد از واسنجی تا حدود زیادی انطباق بین مقادیر مشاهده ای و شبیه سازی برقرار گردید. مقدار p-factor واسنجی مدل برای دوره روزانه و ماهانه به ترتیب 70 و 90 درصد و برای دوره اعتبارسنجی 34 و 63 درصد بدست آمد. همچنین مقادیر R-factor برای دوره روزانه و ماهانه به ترتیب $1/14,0/99$ و در طی دوره واسنجی و اعتبارسنجی $0/51$ ، $0/95$ محاسبه شد. مقادیر بالای p-factor و مقادیر پایین R-factor نشان دهنده شبیه سازی خوب در طی دوره واسنجی و اعتبارسنجی می باشد که نشان دهنده این است که اکثر داده های مشاهداتی در باند تخمین عدم قطعیت 95 درصد قرار دارند. یکی از دلایل پایین بودن p-factor در دوره روزانه در نظر گرفتن مقدار بالای جریان پایه توسط مدل است؛ لذا مقادیر مشاهده ای خارج از محدوده تخمین عدم قطعیت 95 درصد قرار می گیرند و شبیه سازی ضعیفی را در پایه زمانی روزانه شاهدیم. به طور کلی در ابتدا، داده ها در دامنه عدم قطعیت 95 درصد قرار گرفتند و در هر مرحله دامنه عدم قطعیت

کاهش یافته تا این که داده‌های مشاهداتی اکثراً در باند تخمین عدم قطعیت در نظر گرفته شده قرار گرفت. اگرچه قاعده خاصی برای ضریب R^2 وجود ندارد ولی Santhi et al (۲۰۰۱) مقدار بالاتر از ۰/۵ را مقدار مطلوب برای مدل‌های هیدرولوژیکی در نظر می‌گیرند که در این مطالعه مقدار این ضریب ۰/۶۹ تا ۰/۸۶ برای حوضه بدست آمد. به طور کلی تابع هدف در این مطالعه ضریب راندمان نش- ساتکلیف می‌باشد. Gassman et al (۲۰۰۷) و همچنین Santhi et al (۲۰۰۱) مقادیر بالاتر از ۰/۵ را مقدار مناسب برای مطلوبیت مدل می‌دانند. مقدار این پارامتر در حوضه مذکور برای دوره روزانه و ماهانه ۰/۶۸ و ۰/۸۴ برای واسنجی و

۰/۶۵ و ۰/۸۳ برای دوره اعتبارسنجی بدست آمد. به طور کلی فرایندهای واسنجی و اعتبارسنجی عوامل کلیدی برای کاهش عدم قطعیت و افزایش اعتماد به نفس کاربر در شبیه سازی و مدل سازی درست حوزه آبخیز شناخته شده‌اند. استفاده از این روش باعث کاهش عدم قطعیت مدل شده و باعث می‌گردد که مقادیر شبیه سازی شده با مقادیر مشاهداتی انطباق خوبی داشته باشد (۲۱،۱۴). بنابراین بهینه سازی پارامترها در این مطالعه عامل اساسی برای کاهش عدم قطعیت معرفی گردید که تحقیقات بعدی را در استفاده از این مدل در حوضه مذکور تسهیل می‌کند.

References:

- ۱-Abbaspour, K.C., ۲۰۰۸. A User Manual SWAT-CUP۲: SWAT Calibration and Uncertainty Programs. Swiss Federal, Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland: ۹۵pp.
- ۲-Ahmad K., P.W. Gassman and R. Kanwar, ۲۰۰۲. Evaluation of Tile Flow Component of SWAT Model under Different Management Systems. Center for Agricultural and Rural Development. Iowa State University. ۲۳pp.
- ۳-Bekele, E.G. and W. Niklow, ۲۰۰۷. Multi-objective automatic calibration of SWAT using NSGA-II. Journal of Hydrology. ۳۴۱:۱۶۵- ۱۷۶.
- ۴-Changbin L., Q. Jiaguo, F. Zhaodong, Y. Runsheng, Z. Songbing and Z. Feng, ۲۰۱۰. Parameters optimization based on the combination of localization and auto-calibration of SWAT model in a small watershed in Chinese Loess Plateau. Frontiers of Earth Science. ۴(۳): ۲۹۶-۳۱۰.
- ۵-Chu, T.W. and A. Shirmohammadi, ۲۰۰۴. Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the piedmont physiographic region of Maryland. American Society of Agricultural and Biological Engineers. ۴۷(۴): ۱۰۵۷- ۱۰۷۳.
- ۶-Di Luzio, M. and J.G. Arnold, ۲۰۰۴. Formulation of a hybrid calibration approach for a physically based distributed model with NEXRAD data input. Journal of hydrology. ۲۹۸(۱-۴): ۱۳۶-۱۵۴.

- ۹- Eckhardt, K. and J.G. Arnold, ۲۰۰۱. Automatic calibration of a distributed catchment model. *Journal of Hydrology*. ۲۵۱: ۱۰۳-۱۰۹.
- ۱۰- Gassman, P.W., M.R. Reyes, C.H. Green and J.G. Arnold, ۲۰۰۷. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. ۵۰(۴): ۱۲۱۱-۱۲۵۰.
- ۱۱- Hosseini, M., M.S. Amin, A.M. Ghafouri and M.R. Tabatabaei, ۲۰۱۰. Application of Soil and Water Assessment Tools Model for Runoff Estimation. *American Journal of Applied Sciences*. ۸ (۵): ۴۸۶-۴۹۴.
- ۱۲- Hyung -Kyung, J., P. Jong -Yoon, J. Hyun-Kyo, S. Hyung-Jin, K. Hyung-Joong and K. seong-joon, ۲۰۱۱. The uncertainty analysis of SWAT simulated stream flow and water quality applied to Chungju dam watershed of South Korea. ۲۰۱۱ International SWAT Conference. ۲۶pp
- ۱۳- Karlinger, M.R., D.P. Guertin and B.M Troutman, ۱۹۸۸. Regression estimates for topological—hydrograph input. *Journal of Water Resource*. ۱۱۴: ۴۴۶-۴۵۶.
- ۱۴- Phomcha, P., P. Wirojanagud, T. Vangpaisal and T. Thaveevouthti, ۲۰۱۱. Predicting sediment discharge in an agricultural watershed: A case study of the Lam Sonthi watershed Thailand. *Science Asia*. ۳۷(۱): ۴۳-۵۰.
- ۱۵- Rostamian, R., ۲۰۰۷. Estimation of runoff and sedimentation in Behesht Abad basin in Northern Karun watershed using SWAT ۲۰۰۰ Model. Master Dissertation. Industrial University of Esfahan. Agriculture faculty. Water engineering department. (In Persian).
- ۱۶- Rostamian, R., A. Jaleha, M. Afyunia, S. F. Mousavian, M. Heidarpour, A. Jalalian and K.C. Abbaspour, ۲۰۱۰. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrological Sciences Journal*. ۵۳(۵): ۹۷۷ – ۹۸۸.
- ۱۷- Saleh, A. and B. Du, ۲۰۰۴. Evaluation of SWAT and HSPF within basins program for the upper north Bosque river watershed in central Texas. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. ۴۷(۴): ۱۰۳۹-۱۰۴۹.
- ۱۸- Santhi, C., J.G. Arnold, J.R. Williams, W.A. Dugas, R. Srinivasan and L.M. Hauck, ۲۰۰۱. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association*. ۳۷(۵): ۱۱۶۹-۱۱۸۸.
- ۱۹- Setegn, S.G., R. Srinivasan, A.M. Melesse and B. Dargahi, ۲۰۱۰. SWAT model application and prediction uncertainty analysis in the Lake Tana Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrological processes*. ۲۴: ۳۵۷-۳۶۷.

۱۸-Sorooshian, S. and V.K. Gupta, ۱۹۹۵. Model calibration, In: Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications :۲۳-۶۸.

۱۹-Van Liew, M.W., ۲۰۰۳. Impact of flood retarding structures on simulated stream flow for various sized watersheds under varying climatic conditions, GIS and Remote Sensing in Hydrology. Journal of Water Resources and Environment. ۲۸۹: ۳۳-۴۰.

۲۰-Van Liew, M.W., J.G. Arnold and J.D. Garbrecht, ۲۰۰۳. Hydrologic simulation on Agricultural watershed: choosing between two models. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. ۴۶(۶): ۱۵۳۹-۱۵۵۱.

۲۱-White, k. and I. Chaubey, ۲۰۰۵. Sensitivity analysis, calibration and validation for a multisite and multivariable SWAT model. Journal of the American Water Resources Association. ۴۱(۵): ۱۰۷۷-۱۰۸۹.

۲۲-Wu, Y., S. Liu and O.I. Abdul-Aziz, ۲۰۱۱. Hydrological effects of the increased CO₂ and climate change in the Upper Mississippi River Basin using a modified SWAT. Journal of Climatic Change. ۱۱۰(۳-۴): ۹۷۷-۱۰۰۳.

۲۳-Yu, L. and N.N. Salvador, ۲۰۰۵. Modeling water quality in rivers. American Journal of Applied Sciences. (۴): ۸۸۱-۸۸۶.

۲۴-Zhang, X., R. Srinivasan, M. Van liew, ۲۰۰۸. Multi-Site Calibration of The SWAT Model for Hydrologic Modeling. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers: ۲۰۳۹-۲۰۵۰.

۲۵-Zhang, X., R. Srinivasan, and M. Van Liew, ۲۰۰۹. On the use of multi-algorithm, genetically adaptive multi-objective method for multi-site calibration of the SWAT model. Journal of Hydrological Processes. ۲۴: ۹۵۵-۹۶۹.