



دانشگاه گیلان

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و سوم، شماره ششم، ۱۳۹۵

<http://jwsc.gau.ac.ir>

مدل‌سازی رواناب روزانه حوضه نازلوچای در غرب دریاچه ارومیه با استفاده از مدل Tank

*حسین رضایی^۱، آناهیتا جباری^۲، جواد بهمنش^۱ و بهزاد حصار^۳

^۱دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، آکادمیای دریافت درجه دکتری، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه،

^۲استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

تاریخ دریافت: ۹۴/۶/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۶/۱۶

چکیده

سابقه و هدف: پس از انقلاب کامپیوتری دهه ۱۹۶۰ مدل‌سازی هیدرولوژیک شکل تازه‌ای به خود گرفت و می‌توان یکی از اولین تلاش‌های موفق را مدل دانشگاه استنفورد SWM دانست. مدل‌های بارش رواناب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارهای تصمیم‌گیری در مدیریت حوضه‌های آبریز همواره مورد توجه بوده‌اند. در این مطالعه از مدل بارش رواناب روزانه تانک در حوضه آبریز رودخانه نازلوچای، در غرب دریاچه ارومیه استفاده شده است. اهمیت نوسانات هیدرولوژیکی این دریاچه در شرایط بحرانی امروزی بر کسی پوشیده نیست. آگاهی از رابطه بارش و رواناب در تمامی زیرحوضه‌های دشت ارومیه به‌خصوص در زیرحوضه‌هایی مانند نازلو که دچار کمبود تعداد ایستگاه بوده و از طرفی از بخشی از حوضه که در ترکیه قرار گرفته نیز اطلاعاتی در دسترس نیست، بسیار مهم است. بنابراین هدف، ایجاد رابطه‌ای بین بارش حوضه و رواناب خروجی می‌باشد تا بتوان رواناب آینده را پیش‌بینی نمود.

مواد و روش‌ها: رودخانه نازلوچای، به طول تقریبی ۹۳ کیلومتر، یکی از رودخانه‌های ۱۳گانه منتهی به دریاچه ارومیه می‌باشد. مدل بارش رواناب تانک مدلی ساده، مفهومی و یکپارچه است. ورودی‌های مدل، بارش، تبخیر و رواناب رودخانه در خروجی می‌باشد. از میان ایستگاه‌های اندازه‌گیری سه ایستگاه با پوشش مناسب حوضه و با حداکثر دوره مشترک آماری برابر با ۱۶ سال انتخاب شدند. به دلیل برداشت زیاد آب از زیرحوضه منتهی به خروجی رودخانه، این زیرحوضه حذف و مساحت حوضه مدل شده تقلیل یافت. متوسط ماهانه داده‌های بارش و تبخیر با داده‌های بلندمدت ماهانه این پارامترها مقایسه و اصلاحاتی صورت گرفت تا فرآیندهای حوضه به‌نحو مطلوبی در ورودی منعکس شود. مدل تانک در بسته نرم‌افزاری RRL که در کشور استرالیا توسعه یافته است در کنار برخی دیگر از مدل‌ها، از پرکاربردترین مدل‌های بارش رواناب ارائه شده است. مجموع ۲۲۴ واسنجی و نیز صحت‌سنجی با به‌کارگیری ۷ روش واسنجی، ۸ تابع هدف اولیه و ۴ تابع هدف ثانویه انجام شد. اعتبار مدل در هر بار اجرا با معیار کارایی ناش و ضریب همبستگی پیرسون مورد ارزیابی قرار گرفت.

یافته‌ها: در مجموع حدود ۱۱۷ مورد از کل ۲۲۴ واسنجی که با روش‌های مختلف بهینه‌سازی انجام شدند برازش قابل‌قبول نشان دادند و ضریب ناش در آن‌ها بین صفر تا ۱ گزارش شد که به معنای واقع شدن در بازه قابل بررسی و

* مسئول مکاتبه: h.rezaie@urmia.ac.ir

یا مدل‌سازی است چراکه مقادیر ضریب ناش کم‌تر از صفر به‌طور کل مدل‌سازی را بی‌معنی می‌سازد زیرا در آن شرایط یعنی متوسط مقادیر مشاهداتی تخمین زننده بهتری از مدل می‌باشد. حدود ۳۰ مورد نیز دارای ضریب ناش بیش از ۰/۴ بودند و برازش رواناب مشاهداتی و محاسباتی نیز نشان‌دهنده برازش قابل قبول در این موارد بود. ضریب همبستگی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت که در حالت کلی برتری مدل‌هایی که بر مبنای ضریب ناش انتخاب شده بودند را تأیید نمود. اما ضریب ناش به دلیل برتری بر ضریب همبستگی، در این مطالعه بیش‌تر مدنظر قرار گرفت.

نتیجه‌گیری: مشاهده شد که مدل در شبیه‌سازی مقادیر رواناب بالا خوب عمل نمی‌کند و مقادیر پیک را عموماً کم‌تر از مقدار واقعی شبیه‌سازی می‌کند. با تحقیق صحرایی در حوضه و بررسی داده‌های تاریخی معلوم شد مقادیر پیک رواناب در ماه‌های اردیبهشت و نیمی از ماه خرداد رخ می‌دهد که علاوه بر بارش زیاد در منطقه آب ناشی از ذوب برف نیز به شکل‌گیری رواناب کمک می‌کند. نبود ایستگاه‌های کافی به‌خصوص در ارتفاعات و نبود گره‌ای در مدل برای ورود داده‌های ذوب برف باعث می‌شود ورودی بارش کم‌تری در این زمان‌ها وارد مدل شده و مدل از شبیه‌سازی دبی‌های اوج باز بماند. اما در حالت کلی دبی‌های پایه در شرایط خوبی شبیه‌سازی شده و عملکرد مدل قابل قبول می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مدل تانک، حوضه آبریز نازلوچای، دریاچه ارومیه، مدل‌سازی بارش رواناب روزانه

مقدمه

رابطه بین بارش و رواناب از اهمیت خاصی برخوردار است به این دلیل که داده‌های بارش در پیش‌بینی‌های مربوط به سیلاب‌ها کاربرد دارند و یک پیش‌بینی خوب زمانی صورت می‌پذیرد که یک رابطه مناسب، تعریف شود. علاوه بر آن از آنجایی که اغلب داده‌های بارش در مدت‌های زمانی طولانی‌تری نسبت به داده‌های رواناب موجود می‌باشند، می‌توان از این موجودیت برای پر کردن خلأهای آماری داده‌های رواناب استفاده نمود (اغلب این توسعه به سمت زمان‌های قدیمی‌تر صورت می‌گیرد). برای این اهداف نیز رابطه بارش رواناب بسیار مهم و کاربردی است. مدل‌های فراوانی برای تبدیل بارش به رواناب توسعه یافته‌اند. یکی از مهم‌ترین دستاوردها در مراحل اولیه، تئوری هیدرو گراف واحد است که توسط Sherman در ۱۹۳۲ ارائه شد. پس از ارائه این تئوری، پژوهشگران فراوانی کارهای شرمین را مورد ارزیابی قرار داده و مفهوم هیدروگراف واحد لحظه‌ای

را ارائه نمودند، که در واقع نتیجه روندیابی یک بارش مؤثر لحظه‌ای به مقدار واحد، در سیستم خطی فرضی حوضه آبریز می‌باشد. به‌منظور ایجاد همبستگی بین خصیصه‌های فیزیکی حوضه و پارامترهای ¹IUH، ناش در ۱۹۶۰ الزام تعیین یک مدل حوضه آبریز را بیان نمود؛ به‌نحوی که پارامترهای مدل قابلیت تخمین پارامترهای هیدروگراف را داشته باشند.

بسیاری از تلاش‌های پژوهشگران بعد از دهه ۱۹۶۰ به مدل‌های فراوانی رسید که هم‌اینک در بسیاری از نقاط جهان از آن‌ها استفاده می‌شود. در میان آن‌ها مدل ترکیب جریان آبراهه و تنظیم مخزن ²(SSARR) توسط راکوود در ۱۹۶۸، مدل حوضه آبریز دانشگاه استنفورد که توسط کرافورد و لینزلی در ۱۹۶۶ ارائه شد و مدل بارش رواناب Tank شوگاوارا در ۱۹۶۱ در جنوب شرقی آسیا بیش‌ترین استفاده را داشته‌اند. در مطالعه حاضر از مدل بارش رواناب تانک

1- Instantaneous Unit Hydrograph (IUH)
2- Stream flow Synthesis And Reservoir Regulation

بصری و همکاران، ۱۹۹۸؛ بصری و همکاران، ۲۰۰۲؛ کوردا و همکاران، ۱۹۹۹؛ بصری و همکاران، ۱۹۹۹؛ جایادی و همکاران، ۱۹۹۹؛ فوکودا و همکاران، ۱۹۹۹؛ در مالزی (کوک و همکاران، ۲۰۱۰)؛ در اندونزی (سوتویو و همکاران، ۲۰۰۳؛ بصری و همکاران، ۲۰۰۲؛ ستیاوان، ۲۰۰۳؛ عازمیری و همکاران، ۲۰۱۲) همگی برتری مدل تانک را در شبیه‌سازی فرآیندهای حوضه نشان داده‌اند (۲، ۴، ۵، ۶، ۱۱، ۱۳، ۱۵، ۱۶، ۲۲، ۲۴، ۲۵، ۲۶). در مطالعه حاضر، علی‌رغم اغلب مطالعات مشابه، از ۷ روش واسنجی به‌صورت خودکار استفاده شد تا ارزیابی جامعی بر روی همه روش‌ها صورت بگیرد. این روش‌ها عبارت‌اند از: الگوریتم ژنتیک، جستجوی الگوی چندشروع^۴، نمونه‌برداری تصادفی یکنواخت^۵، روش بهینه‌سازی چندشروع روزنبروک^۶، روش تک‌شروع روزنبروک^۷، روش SCE-UA^۸ و در نهایت جستجوی الگو^۹. بنابراین، این مطالعه علاوه بر مدل‌سازی بارش رواناب حوضه آبریز موردنظر، به ارزیابی بازه نسبتاً وسیعی از روش‌های بهینه‌سازی نیز می‌پردازد. هدف از این مطالعه مدل‌سازی بارش رواناب روزانه حوضه نازلوچای، حوضه مربوط به رودخانه نازلوچای می‌باشد. نبود شبکه جامعی از ایستگاه‌های ثبت داده در منطقه و نیاز به اطلاع دقیق از شرایط آبی آورد رودخانه به‌دلیل شرایط بحرانی دریاچه ارومیه، الزام مطالعه حاضر را توجیه می‌نماید.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه: محدوده مطالعاتی در بین طول جغرافیایی $53^{\circ} 45'$ تا $24^{\circ} 44'$ و عرض جغرافیایی $37^{\circ} 58'$ تا $37^{\circ} 30'$ قرار گرفته است. محیط حوزه

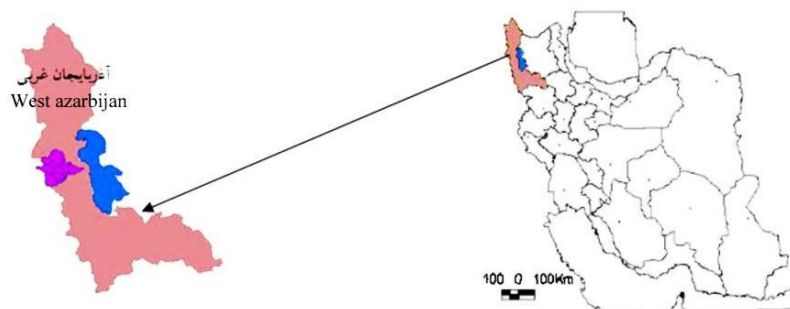
برای بررسی رابطه بین بارش و رواناب استفاده شد چرا که علاوه بر آن که ساختار ساده‌ای دارد واسنجی خودکار آن نیز مهیا می‌باشد (۱۹). جونگ‌کیم و همکاران (۲۰۰۴) برای واسنجی خودکار مدل تانک از سه الگوریتم بهینه‌سازی استفاده نمودند و نتیجه گرفتند که خودکارسازی فرآیند بهینه‌سازی پژوهشگران را از توجه صرف به واسنجی و انتخاب دستی پارامترها جدا کرده و آن‌ها را معطوف سایر خصوصیات مدل می‌سازد (۱۴). روحانی و فراهی‌مقدم (۱۳۹۲) عملکرد نسبی دو مدل یکپارچه و مفهومی تانک و SimHyd را باهم در حوضه آبریز چهل‌چای مقایسه نمودند، نتایج مطالعه با ضرایب ناش و RMSE تجزیه و تحلیل شد، و نتایج کلی نشان داد که در مجموع عملکرد مدل SimHyd بهتر بوده است (۲۱). کوپر و همکاران (۱۹۹۷ و ۲۰۰۷) مدل تانک را با استفاده از الگوریتم‌های تکامل رقابتی جامع^۱ (SCE)، الگوریتم ژنتیک^۲ (GA) و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده^۳ (SA) واسنجی نمودند که در نهایت نتایج پژوهش نشان داد روش SCE نسبت به دو روش دیگر برتری دارد (۹، ۱۰). البته گرچه در منابع مختلف از روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی خودکار پارامترهای مدل تانک استفاده شده است اما هیچ توافق جامعی برای ارجحیت یک الگوریتم خاص وجود ندارد. بصری (۲۰۱۳) چالش‌های مدل‌سازی با این مدل را در اندونزی مطالعه نموده است (۳). بسیاری از پژوهشگران از مدل تانک برای پیش‌بینی مقدار آب موجود و سیلاب‌ها در حوضه آبریز استفاده نموده‌اند. در بسیاری از مطالعات به برتری مدل تانک نسبت به سایر مدل در مدل‌سازی حوضه‌های آبریز اشاره شده است. برای مثال پژوهش‌هایی در مورد استفاده از مدل تانک در ژاپن (شوگاوارا و همکاران، ۱۹۸۴؛ شوگاوارا، ۱۹۶۱؛

- 4- Pattern search multi start
- 5- Uniform random sampling
- 6- Rosenbrock multi start optimizer
- 7- Rosenbrock single start
- 8- Shuffled complex evolution method developed at The University of Arizona
- 9- Pattern search

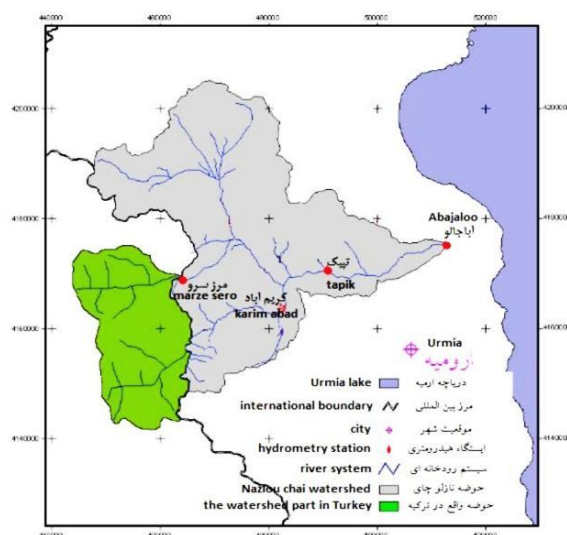
- 1- Shuffled Complex Evolution
- 2- Genetic Algorithm
- 3- Simulated Annealing

مساحت آن بالغ بر ۲۰۳۰ کیلومترمربع می‌باشد که حدود ۵۵۰ کیلومترمربع آن در کشور ترکیه واقع شده است. ایستگاه هیدرومتری آباچالو در ارتفاع ۱۲۹۰ متری و در خروجی حوضه نازلوچای واقع شده است. زیر حوضه بالادست این ایستگاه یکی از مهم‌ترین مراکز تمرکز کشاورزی در منطقه می‌باشد و بیش‌ترین مصرف و برداشت آب برای کشاورزی در این قسمت صورت می‌گیرد. ایستگاه قبل از آباچالو ایستگاه هیدرومتری تپیک در ارتفاع تقریبی ۱۴۰۰ متری بر روی رودخانه نازلوچای و تقریباً قبل از برداشت اصلی آب برای مصارف کشاورزی واقع شده است. در شکل‌های ۱- الف و ۱- ب موقعیت حوضه نازلوچای نسبت به کشور و استان قابل مشاهده است.

نازلوچای ۶۵,۲۶۰ کیلومتر، حداقل ارتفاع حوزه ۱۲۹۱ متر و حداکثر ارتفاع آن ۳۶۰۰ متر می‌باشد. بیش از ۹۰ درصد این حوضه در ایران واقع شده است و از نظر تقسیمات سیاسی ۹۹ درصد این حوضه جزء محدوده شهرستان ارومیه می‌باشد. رودخانه نازلوچای از رودخانه‌های اصلی و یکی از رودخانه‌های ۱۳ گانه‌ای است که به دریاچه ارومیه تخلیه می‌گردد. در استان آذربایجان غربی و در غرب دریاچه ارومیه، شمال‌غربی شهرستان ارومیه و در ۲۰ کیلومتری آن واقع شده است. رودخانه فوق از ارتفاعات مرزی جاری شده به طوری که قسمتی از آن در حوضه مارمیشو و مرز سرو از کشور ترکیه سرچشمه می‌گیرد. حوضه نازلوچای با کشور ترکیه دارای مرز مشترک بوده و



شکل ۱ - الف



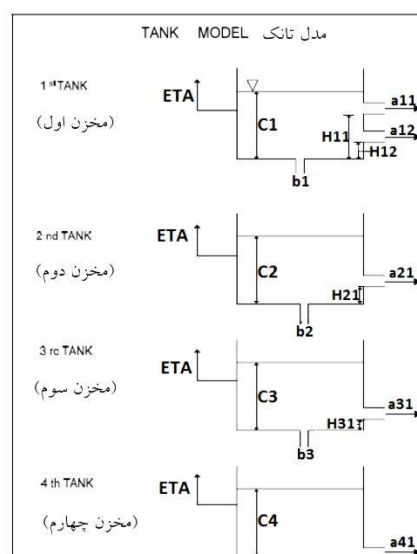
شکل ۱ - ب

شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در کشور (الف)، موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان (ب).

Figure 1. The study site location in country (A), the study site location in province (B).

بعدی رواناب میانی، خروجی مخزن سوم رواناب زیرسطحی و خروجی مخزن پایینی، جریان پایه می‌باشد. علی‌رغم این مفهوم‌های ساده، رفتار مدل زیاد هم ساده نیست. رفتار مدل تا حد زیادی از مقدار ذخیره در هر مخزن تأثیر می‌پذیرد. تحت یک بارش یکسان و احجام متفاوت برای ذخیره‌سازی، رواناب تولیدی بسیار متفاوت خواهد بود. از مدل Tank برای تحلیل دبی روزانه از ورودی‌های بارش روزانه و تبخیر روزانه استفاده می‌شود. در نظر گرفتن مفهوم کسر اولیه از بارش نیاز نیست چراکه اثر آن در سیستم غیرخطی مدل لحاظ شده است. رواناب کل در این مدل، از مجموع رواناب‌های تولیدی از همه مخازن به دست می‌آید (شکل ۲). مدل تانک روشی است بر مبنای این فرض که جریان رواناب و نفوذ در خاک تابعی است از مقدار آب در خاک (۲۴).

مختصری بر مدل بارش رواناب روزانه Tank: مدل بارش رواناب روزانه Tank مدلی ساده، مفهومی و یکپارچه مکانی و توزیعی زمانی می‌باشد. این مدل توسط شوگووارا در ۱۹۶۷ و در ژاپن ارائه شده است. به دلیل ساختار ساده مدل تانک، از این مدل در مدل‌سازی بسیاری از حوضه‌های آبریز استفاده می‌شود (۱۹). مدل تانک، در نسخه اصلی، شامل ۴ مخزن می‌باشد، که به صورت متوالی و عمودی قرار گرفته‌اند. بارش وارد اولین مخزن شده و مقدار تبخیر به صورت سلسله‌وار از اولین مخزن به طرف پایین، کسر می‌شود. هرگاه مخزنی خالی می‌شود، مقدار کمبود تبخیر از مخزن بعدی تأمین می‌شود؛ تا زمانی که همه مخازن خالی شوند. برآمدهای حاصل از خروجی‌های کناری هر مخزن نیز جزئی از رواناب کل را تشکیل می‌دهد. خروجی مخزن بالایی رواناب سطحی، خروجی مخزن



شکل ۲- ساختار گرافیکی مدل تانک (نمایش پارامترهای موجود در جدول ۱).

Figure 2. Tank model structure.

مخزن محاسبه شده و در نهایت طبق رابطه مدل جمع می‌شود، C_x سطح آب در ذخیره x (ذخیره‌ها به شماره‌های ۱ تا ۴)، H_{xy} ارتفاع خروجی و a_{xy} نیز ضریب رواناب برای خروجی تانک یا مخزن موردنظر است. نکته قابل توجه این‌که اگر سطح آب پایین‌تر از

رواناب تولیدی از هر مخزن با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$q = \sum_{x=1}^4 \sum_{y=1}^{n_x} (C_x - H_{xy}) a_{xy} \quad (1)$$

که در آن، q برابر است با عمق رواناب به میلی‌متر، این مقدار رواناب خروجی به ترتیب از هر چهار

تعرق پتانسیل نیز از هرکدام از ذخایر پایین‌تر کم می‌شود تا زمانی که یا مقدار پتانسیل تبخیر انجام شود و یا همه مخازن خالی بشوند. پس از کسر مقدار تبخیر تعرق از ذخایر، مقدار بارش به بالاترین مخزن ذخیره افزوده شده و مقدار رواناب و نفوذ نیز بر مبنای آن تخمین زده می‌شود. این تخمین به‌صورت متوالی از سطوح ذخیره انجام می‌شود و مخزن ذخیره در سطح پایین‌تر، مقدار آب نفوذیافته از مخزن بالاتر را دریافت می‌نماید. همین فرآیند در سایر مخازن نیز به همین صورت تکرار می‌شود. مقادیر پیش‌فرض، حداقل و حداکثر مدل در جدول ۱ دیده می‌شود (۲۰). اغلب پژوهشگران از این مدل به‌دلیل سادگی ساختار آن استفاده می‌کنند اما رفتار مدل خیلی هم ساده نیست. برخی از معمول‌ترین رفتارهای مدل در شکل ۳ قابل مشاهده است. در شکل ۴ نیز شماتیکی از حوضه در ارتباط با طبیعت قابل مشاهده است.

سطح ارتفاع خروجی مخزن باشد، تخلیه‌ای صورت نمی‌گیرد. تبخیر تعرق در این مدل، با استفاده از رابطه بکن (۱۹۷۹) محاسبه می‌شود:

$$ETA = ETP * (1 - \exp(-\alpha \sum_{x=1}^4 C_x)) \quad (2)$$

که در آن، ETA مقدار تبخیر تعرق به میلی‌متر، α ضریب تبخیر تعرق (۰,۱) و C_x نیز سطح آب در مخزن است. مقدار نفوذ در هر مخزن با رابطه زیر به‌دست می‌آید که در آن I_x مقدار نفوذ به میلی‌متر، C_x سطح آب در مخزن x و B_x نیز ضریب نفوذ در مخزن x است:

$$I_x = C_x - B_x \quad (3)$$

مقدار آب موجود در هر مخزن، از مقدار بارش، نفوذ، تبخیر و رواناب تأثیر می‌پذیرد. مقدار ذخایر از بالاترین تانک به‌سمت پایین‌ترین مخزن، مورد محاسبه قرار می‌گیرد. مقدار تبخیر، تا حداکثر پتانسیل آن، ابتدا از مخزن اول کسر می‌شود. مقدار باقی‌مانده تبخیر

جدول ۱- مقادیر پیش‌فرض عوامل در مدل تانک.

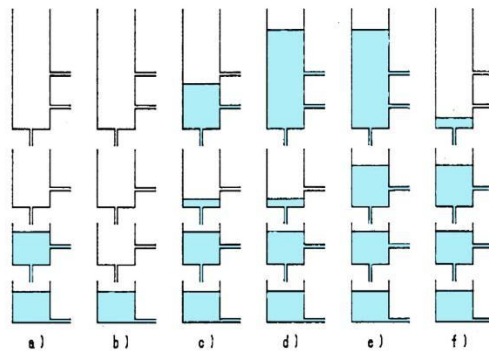
Table 1. The default parameter values in Tank model.

پارامتر Parameter	مقدار پیش‌فرض Default value	حداقل پیش‌فرض Min default	حداکثر پیش‌فرض Max default
H11	0	0	500
a11	0.2	0	1
a12	0.2	0	1
a21	0.2	0	1
a31	0.2	0	1
a41	0.2	0	1
alpha	0.1	0	1
b1	0.2	0	1
b2	0.2	0	1
b3	0.2	0	1
C1	20	0	100
C2	20	0	100
C3	20	0	100
C4	20	0	100
H12	0	0	300
H21	0	0	100
H31	0	0	100
H41	0	0	100

تبدیل می‌شود، همان‌طور که در شکل نیز قابل مشاهده است به علت طولانی‌تر بودن مدت بارش مدل فرصت دارد تا مخزن دوم را نیز پر کند، وقتی بارش قطع می‌شود، آب مخزن بالاتر به سرعت خالی می‌شود و مدل به حالتی که در شکل ۳-f نشان داده شده است تبدیل می‌شود. سپس خروجی مخزن دوم به آرامی کاهش می‌یابد و بازوی پایین دست هیدروگراف را بعد از یک سیل عظیم تشکیل می‌دهد (۲۴).

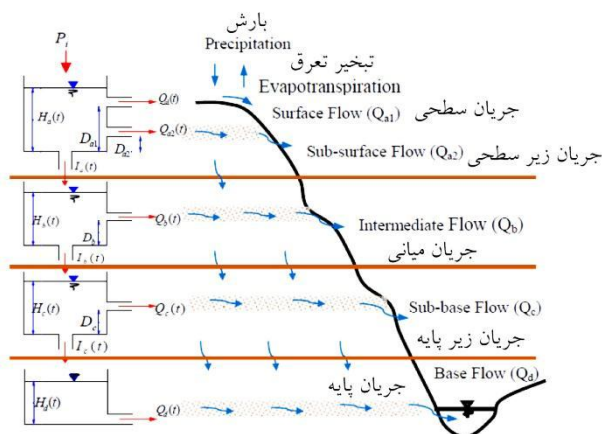
رفتار مدل در این دو حالت اخیر بر مبنای رفتار هیدروگراف سیل بعد از نقطه پیک تنظیم شده است به نحوی که تخلیه سریع‌تر حوضه و افت ناگهانی پیک در شکل ۳-e و از زمان قطع بارش تا زمانی که مخزن اول به طور کامل تخلیه گردد روی می‌دهد. یعنی این فرآیند از نقطه پیک تا نقطه عطف هیدروگراف فروکش سیلاب را مدل می‌نماید. در این بازه شیب تندتر و تخلیه و آهنگ افت دبی پیک بالاتر است. سپس نوبت به حالت ۳-f می‌رسد یعنی از نقطه عطف بازوی پایین‌رونده سیلاب تا انتهای سیلاب. از این نقطه به بعد مخزن اول کاملاً خالی است و مخزن دوم طبیعتاً با آهنگ آرام‌تری تخلیه می‌شود بنابراین طی مدت طولانی‌تری با افت کم‌تری در دبی سیلاب مواجه خواهیم بود. این حالت نقطه بعد از عطف هیدروگراف پایین‌رونده سیلاب تا نقطه پایان سیلاب را مدل می‌کند.

اگر برای مدتی طولانی بارش رخ ندهد، دو مخزن بالایی خالی شده و مدل مشابه شکل ۳-a و یا ۳-b خواهد بود. تحت چنین شرایطی رواناب پایدار خواهد بود. در حالت شکل ۳-a دبی با سرعت بسیار پایینی کاهش می‌یابد و مخزن سوم به آرامی داخل مخزن چهارم تخلیه می‌شود ولی در شکل ۳-b دبی تقریباً ثابت باقی می‌ماند. اگر یک بارش نسبتاً شدید در یک دوره کوتاه در این شرایط رخ دهد مدل تانک به یکی از دو حالت ۳-c یا ۳-d تبدیل می‌شود. در این حالت چون بارش با مدت کوتاه و شدید نیز بوده است مدل فرصت پر کردن مخازن دوم (از بالا) را ندارد بنابراین فقط مخازن اولیه که نشان‌دهنده ذخیره در لایه‌های ابتدایی زمین هستند پر می‌شود، در این شرایط، یک دبی بالا با مدت کوتاه، قبل از این که مدل به حالت پایدار قبل بازگردد اتفاق می‌افتد. این دبی سریع همان پاسخ سریع حوضه به بارش‌های شدید و کوتاه‌مدت است که به صورت رواناب سطحی با شدت بالا و مدت کوتاه از حوضه خارج می‌شود، با این تفاوت که شدت تخلیه جریان از اولین مخزن حالت ۳-c بیش‌تر از حالت ۳-d است. تحت این شرایط، سهم اعظم دبی رواناب سطحی از مخزن بالایی بوده و رواناب کمی از مخزن دوم ایجاد می‌شود که امکان دارد هیچ روانابی نیز از مخزن‌های پایینی ناشی نشود. حال اگر یک بارش سنگین در طی دوره زمانی طولانی‌تری رخ دهد، مدل تانک به حالت شکل ۳-e



شکل ۳- توالی ۴ مخزن در مدل تانک در حالات گوناگون.

Figure 3. 4 reservoirs locations in Tank model in different situations.



شکل ۴- ساختار مدل تانک و تطبیق آن با شرایط طبیعی (after G. Suntoro).

Figure 4. Tank model structure and its illustration in natural conditions.

داده‌ها، فرآیند مدل‌سازی و سنجش اعتبار مدل: داده‌های مورد استفاده برای این مدل عبارتند از: تبخیر و تعرق روزانه، بارش روزانه و نیز دبی روزانه در خروجی حوضه برای واسنجی مدل. محدودیت وجود آمار روزانه در منطقه به‌خصوص در ارتفاعات سرمنشأ رودخانه و از طرف دیگر اطلاعات بسیار ضعیف از شرایط هیدرولوژیکی زیرحوضه‌های واقع در کشور ترکیه، یکی از عوامل محدودکننده در مطالعه حاضر است. از میان ایستگاه‌های اندازه‌گیری موجود در منطقه، سه ایستگاه کریم‌آباد، مرز سرو و تپیک به‌عنوان ایستگاه‌های دارای طولانی‌ترین دوره آماری مشترک بارش در منطقه مورد استفاده قرار گرفتند. تعداد ایستگاه‌های دارای آمار بارش روزانه بسیار کم و از میان آن‌ها سه ایستگاه فوق دارای حداکثر دوره مشترک آماری ۱۶ ساله می‌باشند. پس از اعمال ضرایب بارش (سهم محاسباتی تیسن هر ایستگاه در تخمین بارش منطقه) به بارش هر ایستگاه و محاسبه بارش حوضه، جهت بالا بردن دقت کار، داده‌ها با نقشه‌های بارش ماهانه حوضه در GIS اصلاح شدند. بدین‌صورت که متوسط بارش لایه‌های رقومی بارش حوضه نازلوچای بدون احتساب زیرحوضه مربوط به آباچالو تعیین شد. عدد به‌دست آمده، متوسط بارش

ماهانه حوضه نازلوچای در یک دوره زمانی طولانی مدت است (۱۲). با این فرض، متوسط ماهانه بارش‌های موجود نیز باید برابر این عدد باشند. به‌این‌ترتیب با متوسط‌گیری از داده‌های موجود به‌صورت ماه‌به‌ماه و برای ۱۲ ماه سال، در دوره آماری ۱۶ ساله و مقایسه آن‌ها با متوسط‌های درازمدت ضرابی به‌دست آمد که با ضرب آن‌ها در تک‌تک داده‌ها، داده‌های اصلاحی به‌دست آمدند. دبی ایستگاه تپیک نیز به‌عنوان دبی خروجی و جهت اجرای واسنجی در همین دوره آماری وارد مدل شد. دوره آماری مطالعه حاضر ۱۶ سال آبی از اول مهرماه سال ۱۳۷۶ تا ۳۱ شهریور سال ۱۳۹۲، مطابق با ۲۳ سپتامبر ۱۹۹۷ میلادی تا ۲۲ سپتامبر ۲۰۱۳ میلادی، را شامل می‌شود. خروجی حوضه نازلوچای نزدیک دریاچه ارومیه و در ایستگاه هیدرومتری آباچالو واقع است، ولی به‌دلیل برداشت زیاد آب در زیرحوضه مربوط به آن، ایستگاه هیدرومتری تپیک انتخاب و مساحت زیرحوضه مربوط به آباچالو حذف شد. با حذف این زیرحوضه مساحت حوضه به ۱۷۵۶/۹ کیلومتر مربع تقلیل یافت. علت حذف این زیرحوضه به ساختار مدل تانک باز می‌گردد. این مدل، مدلی یکپارچه مفهومی^۱ می‌باشد به‌عبارتی دارای

1- Conceptual lumped

همگی به داده‌های ورودی سهل‌الوصول احتیاج داشته و یکپارچه مکانی و توزیعی زمانی می‌باشند. در مطالعه حاضر از مدل تانک برای شبیه‌سازی رواناب در خروجی حوضه نازلوچای استفاده شد. مجموع ۲۲۴ واسنجی و صحت‌سنجی به‌صورت خودکار برای مدل انجام شد. چرا که در این نرم‌افزار واسنجی ابزار واسنجی خودکار کاربر را مجهز به ۷ روش واسنجی، ۸ تابع هدف اولیه و ۴ انتخاب برای تابع هدف ثانویه، می‌کند (۷). الگوریتم‌هایی که در مدل برای جستجوی بهترین مقدار پارامترهای مدل موجود است به نام تابع هدف شناخته می‌شود. از این توابع در روند بهینه‌سازی مدل یا واسنجی استفاده می‌شود به این ترتیب که ابتدا مقادیر اولیه‌ای برای پارامترها فرض می‌شود و تابع هدف محاسبه می‌گردد، سپس در تکرارهای بعدی مقادیر پارامترها در دامنه مجاز خود آن‌قدر تغییر داده می‌شود تا تابع هدف به کم‌ترین مقدار خود برسد. مقدار حداقل تابع هدف نشان‌دهنده کوچک‌ترین اختلاف بین هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی بوده و بنابراین پارامترهای نظیر، پارامترهای بهینه‌شده می‌باشند. به‌طور معمول از یک تابع هدف در آن واحد برای یک واسنجی استفاده می‌شود اما در برخی نرم‌افزارها همانند نرم‌افزار مورد مطالعه حاضر دو سری تابع هدف می‌توان تعریف نمود. تابع هدف اولیه و تابع هدف ثانویه. نحوه عملکرد مدل در این شرایط با در نظر گرفتن هر دو تابع هدف در هر بار واسنجی تحلیل می‌شود؛ بدین ترتیب که ابتدا سری پارامترهای ابتدایی مدل به تابع هدف اولیه داده می‌شود و این پارامترها آن‌قدر تغییر می‌کنند تا تابع هدف اولیه به کم‌ترین مقدار خود برسد، مدل در اینجا متوقف نمی‌شود و سری پارامترهای تولیدشده را به‌عنوان پارامترهای اولیه تابع هدف ثانویه تعریف و روند تغییر پارامترها تکرار می‌شود.

قابلیت داده‌گیری در گره‌های مختلف حوضه نبوده و برای هر پارامتر تنها یک عدد در یک روز به‌عنوان ورودی می‌پذیرد. نوع کاربری اراضی در اغلب مناطق حوضه (به‌جز کوه‌های واقع در کشور ترکیه)، تقریباً دارای بافت یکنواختی از مناطق شهری و کشاورزی می‌باشد، اما در زیرحوضه انتهایی حوضه یعنی قبل از ایستگاه هیدرومتری آباچالو، کاربرد کشاورزی به‌شدت پررنگ شده و برداشت از رودخانه افزایش می‌یابد. به‌علت نبود گره‌ای در مدل برای ورود تنوع کاربری اراضی، زیرحوضه مربوط به آباچالو در این مطالعه حذف و ایستگاه هیدرومتری تپیک به‌عنوان خروجی حوضه انتخاب شد.

آمار تبخیر- تعرق روزانه از ایستگاه سینوپتیک ارومیه به‌دست آمد و مجدداً با متوسط‌گیری از لایه‌های راقومی تبخیر (تبخیر- تعرق ماهیانه یک دوره طولانی‌مدت از این حوضه)، برای تبخیر- تعرق نیز ضرایب اصلاحی به‌دست آمد. علت اصلاح داده‌ها با داده‌های درازمدت، کمبود داده‌های روزانه مشاهداتی در منطقه و وجود نقایصی در سری داده‌ها می‌باشد که با اصلاح آن‌ها بر مبنای روند کلی داده‌های درازمدت و تطبیق آن‌ها با داده‌های درازمدت می‌توان تا حدی از تشابه روند داده‌های ورودی با شرایط واقعی منطقه اطمینان حاصل نمود و نتایج بهتری از مطالعه گرفت.

واسنجی مدل تانک در این مطالعه به‌صورت خودکار و با توابع هدف پیشنهادشده در بسته نرم‌افزاری ^۱RRL انجام شد. بسته نرم‌افزاری RRL توسط مؤسسه ^۲CRCCH در استرالیا ارائه شده است و به‌نحو مطلوبی ۵ مدل بارش رواناب مفهومی روزانه را در یک بسته گرد هم آورده است. مدل‌های موجود در این بسته عبارت‌اند از: Sacramento – Tank – SimHyd و AWBM – SMAR. این مدل‌ها

1- Rainfall runoff library

2- Cooperative research center for catchment hydrology

است که بزرگی نسبی واریانس باقی‌مانده^۶ را در مقایسه با واریانس داده‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. NSE نشان می‌دهد که تا چه حد نمودار داده‌های مشاهداتی رسم شده در برابر داده‌های شبیه‌سازی شده، بر خط ۱:۱ برازش می‌یابد. NSE طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y})^2} \quad (۴)$$

که در آن، Y_i^{obs} عبارت است از i امین مشاهده موردی که قرار است ارزیابی شود، Y_i^{sim} i امین مقدار برآورد شده همان متغیر می‌باشد، \bar{Y} متوسط داده‌های مشاهداتی و n تعداد کل مشاهدات می‌باشد. مقدار NSE از $-\infty$ تا ۱ متغیر است که مقدار NSE برابر ۱ مقدار بهینه این آماره می‌باشد. مقادیر بین ۰ تا ۱ اغلب به‌عنوان مقادیر کارایی قابل قبول مدل پذیرفته می‌شود، این مطلب به معنای مورد قبول بودن هر مدلی در این دامنه ضریب ناش نیست، بلکه از آنجایی که این ضریب از منهای بی‌نهایت تا ۱ تغییر می‌کند باید بازه‌ای از آن وجود داشته باشد که در مطالعات مدل‌سازی تنها به آن بازه توجه شود. مقادیر ضریب ناش زیر صفر عملاً از بازه مورد توجه مدل‌سازی حذف می‌شوند یعنی دو مدل با ناش زیر صفر و بالای صفر حتی با اختلاف ضریب بسیار اندک بسیار با هم متفاوت‌اند، چرا که مقادیر ضریب ناش کم‌تر یا مساوی صفر نشان‌دهنده این مطلب است که متوسط مقدار مشاهداتی پیش‌بینی‌کننده بهتری نسبت به مقدار شبیه‌سازی شده است و عملکرد ناکارآمد را نشان می‌دهد، یعنی عملاً به مدل نیازی نیست. NSE به دو دلیل عمده همواره پیشنهاد می‌شود: (۱) استفاده از این معیار توسط ASCE (۱۹۹۳) و لگاتس و مک‌کابه (۱۹۹۹) پیشنهاد شده است (۱، ۱۷، ۲) این

جهت سنجش اعتبار مدل، تعداد ۴ معیار سنجش اعتبار در نرم‌افزار ارائه شده‌اند: اختلاف نسبی، اختلاف مطلق، ضریب تبیین یا R^2 و معیار کارایی ناش می‌باشد. در این بین به دلیل مقبولیت عمومی کارایی دو معیار آخر از مقایسه بین آنها برای انتخاب مدل برتر استفاده شد.

آماره ارزیابی مدل^۱ (رگرسیون استاندارد) - ضریب همبستگی پیرسون^۲ (r) و ضریب تبیین (R^2): ضریب همبستگی پیرسون (r) و ضریب تبیین (R^2) درجه هم‌خطی بودن بین داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهداتی را شرح می‌دهند. ضریب همبستگی که از -۱ تا +۱ متغیر است، شاخصی است از درجه و میزان رابطه خطی بین داده‌های مشاهداتی و داده‌های شبیه‌سازی شده. اگر $r=0$ باشد به منزله این است که هیچ رابطه خطی‌ای وجود ندارد. اگر r برابر -۱ یا +۱ باشد یعنی یک رابطه کامل منفی و یا مثبت خطی موجود است. به‌طور مشابه، R^2 سهم واریانس را در داده‌های مشاهداتی که توسط مدل شرح داده می‌شوند نشان می‌دهد. مقدار R^2 از ۰ تا ۱ متغیر است و مقادیر بالاتر آن نشان‌دهنده خطای کم‌تر واریانس بوده و اغلب، به‌طور معمول مقادیر R^2 بالاتر از ۰/۵ قابل قبول تلقی می‌شود. علی‌رغم این که از این دو فاکتور برای ارزیابی مدل به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود اما هر دوی آنها شدیداً به مقادیر حدی بالای حساس بوده و برعکس اختلافات نسبی و یا بیش و کم شدن‌ها بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده توسط مدل روی آنها بی‌تأثیر است (۱۸).

آماره ارزیابی مدل (بی‌بعد) - ضریب ناش ساتکلیف^۵ (NSE): فاکتور کارایی ناش یک آماره نرمال شده

- 1- Model Evaluation Statistics
- 2- Pearson's correlation coefficient
- 3- Coefficient of determination
- 4- Outliers
- 5- Nash-Sutcliffe efficiency

6- Noise

صحت‌سنجی برای مدل انجام شد و کارایی مدل در هر بار اجرای مدل مورد سنجش قرار گرفت.

در مجموع مدل‌سازی‌ها مجموعاً حدود ۳۰ مورد از ۲۲۴ مورد واسنجی، ضریب ناش بالاتر از ۰/۴ گزارش شد. اما نکته قابل توجه در مدل‌سازی این است که برخلاف عقیده اغلب پژوهشگران، آنالیز حساسیت، مرحله‌ای از مدل‌سازی است که باید قبل از واسنجی دستی پارامترها انجام داد. به عبارتی در مرحله واسنجی خودکار گروهی از پارامترها به دست می‌آیند که باید حساسیت هر کدام از آن‌ها را در تعیین پارامترهای خروجی مدل (برای مثال رواناب شبیه‌سازی‌شده) سنجید و سپس با تغییرات دستی پارامترها در محدوده تعیین‌شده به بهترین حالت رسید.

واسنجی خودکار باعث می‌شود بسیاری از مسیر هموار شده و حدود تقریبی همه پارامترها به دست آید. پس از تعیین حساسیت مدل به هر پارامتر، پارامترهای حساس را (که باعث تغییرات اساسی در مدل می‌شوند)، در بازه‌ای از نمودار آنالیز حساسیت که تغییرات شدید نشان داده‌اند، آن قدر تغییر می‌دهیم تا معیارهای سنجش اعتبار اعداد بهتری را گزارش نموده و در حالت کلی برازش گرافیکی رواناب مشاهداتی و رواناب شبیه‌سازی‌شده نیز بهتر شود. متوسط فاصله از مقدار ۱ (مقدار بهینه ناش) ضرایب ناش به دست آمده برای هر سری داده (هر بار واسنجی و صحت‌سنجی) از رابطه زیر محاسبه شد:

$$(5) \quad \text{تعداد اجرای مدل} = \frac{1-Nash}{\text{متوسط فاصله از مقدار بهینه}}$$

معیار معمولاً بیش از سایر معیارها مورد استفاده قرار می‌گیرد و این مسأله باعث می‌شود که در مورد اعداد نتیجه شده نتایج گزارش شده زیادی موجود باشد. در ضمن سوات و دزتر در ۱۹۹۱ گزارش نمودند که NSE بهترین تابع هدف برای نشان دادن برازش کلی هیدروگراف‌ها است (۲۳). چو و مک‌ماهان (۱۹۹۳) در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که می‌توان از معیار زیر برای ارزیابی کمی اعتبار مدل استفاده نمود: عالی اگر NSE بزرگ‌تر از ۰/۹۳ باشد، قابل قبول اگر NSE بزرگ‌تر از ۰/۸ باشد و به‌طورکلی مناسب اگر NSE بیش از ۰/۶ باشد (۸). البته این مقادیر برای داده‌ها و شبیه‌سازی ماهانه می‌باشد.

یو و همکاران (۲۰۱۵)، مقادیر فوق را برای سری داده‌های روزانه و شبیه‌سازی روزانه تطابق دادند به این صورت که: برای رواناب روزانه اگر NSE بزرگ‌تر از ۰/۷ باشد عملکرد قابل قبول است و اگر NSE کم‌تر از ۰/۵ باشد عملکرد غیرقابل قبول خواهد بود. برای مقادیر بینابین این دو حد آستانه آزمون‌های بیشتری مورد نیاز خواهد بود (۲۷).

نتایج و بحث

مدل بارش رواناب تانک برای محاسبه رواناب حاصل از مساحت حوضه‌های رودخانه‌ای با جانمایی تعدادی مخازن ذخیره به هم مرتبط، تعریف شده است. رودخانه نازلوچای یکی از رودخانه‌های اصلی آب‌آور برای دریاچه ارومیه است و مطالعه هرچه دقیق‌تر رواناب آن و ارتباط آن با بارش حوضه بسیار مهم و کارآمد است. مجموع ۲۲۴ واسنجی و

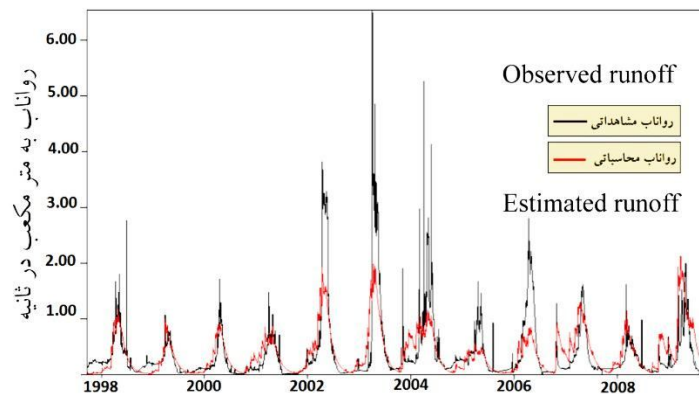
جدول ۲- بخشی از برترین نتایج حاصل از اجرای مدل.

Table 2. Some of the best model runs.

(الگوریتم ژنتیک + ناش ساتکلیف + بدون تابع هدف ثانویه)					
(Genetic algorithm + Nash Sutcliffe+ none)					
اجراها	تاریخ شروع	تاریخ پایان	طول (روز)	ضریب ناش	ضریب همبستگی
run 1	Start date	End date	Length (day)	Nash coefficient	Correlation coefficient
رواناب واسنجی (calibration runoff)	9/23/1998	9/22/2009	4018	0.521	0.663
رواناب صحت سنجی (verification runoff)	9/23/2009	9/22/2013	1461	-0.604	0.632
(الگوریتم ژنتیک + مجموع مربعات خطا + بدون تابع هدف ثانویه)					
(Genetic algorithm + sum of square errors+ none)					
run2					
رواناب واسنجی	9/23/1998	9/22/2009	4018	0.401	0.671
رواناب صحت سنجی	9/23/2009	9/22/2013	1461	-2.717	0.397
(الگوریتم ژنتیک + جذر میانگین مربعات خطا + بدون تابع هدف ثانویه)					
(Genetic algorithm + RMSE+ none)					
run 3					
رواناب واسنجی	9/23/1998	9/22/2009	4018	0.423	0.658
رواناب صحت سنجی	9/23/2009	9/22/2013	1461	0.115	0.616
(الگوریتم ژنتیک + اختلاف جذر میانگین مربعات حول خطا + بدون تابع هدف ثانویه)					
(Genetic algorithm + Root mean square difference about bias+ none)					
run 4					
رواناب واسنجی	9/23/1998	9/22/2009	4018	0.511	0.666
رواناب صحت سنجی	9/23/2009	9/22/2013	1461	1.333	0.427
(تکامل مجتمع‌های مخلوط شده + جذر میانگین مربعات خطا + بدون تابع هدف ثانویه)					
(SCE-UA + RMSE+ none)					
run 5					
رواناب واسنجی	9/23/1998	9/22/2009	4018	0.44	0.676
رواناب صحت سنجی	9/23/2009	9/22/2013	1461	-0.49	0.609
(روزنبروک تک شروع + جذرمیانگین مربعات خطا + تداوم جریان)					
(Rosenbrock single start + RMSE+ flow duration curve)					
run 6					
رواناب واسنجی	9/23/1998	9/22/2009	4018	0.478	0.656
رواناب صحت سنجی	9/23/2009	9/22/2013	1461	0.361	0.5

از برترین اجراها با ضریب ناش حدود ۰/۵ قابل مشاهده است. این حالت اجرای مدل با روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و با تابع هدف ناش می‌باشد. در جدول ۲ به‌طور نمونه برآمدهای حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی در نرم‌افزار، مربوط به برخی از برترین حالات واسنجی و صحت‌سنجی، که اجرای مربوط به شکل ۵ نیز در آن قابل مشاهده است، از میان ۲۲۴ حالت برای مثال آمده است.

بدیهی است هرچه این مقدار به صفر میل کند نشان از عملکرد برتر مدل در اجراها دارد، اما این مقدار برای دوره واسنجی در این مدل حدود ۳/۴۴۲ و برای دوره صحت‌سنجی ۱۲ گزارش شد. از طرفی تعداد اجراهای مدل در دوره واسنجی که ضریب ناش آنها بین ۰ و ۱ قرار می‌گیرد ۱۱۷ عدد بود. در حالت کلی ضریب ناش بین صفر و یک قابل قبول قلمداد می‌شود. در شکل ۵ نمودار مقایسه بارش رواناب یکی



شکل ۵- مقایسه رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در یکی از حالات برتر.

Figure 5. Observed and estimated runoff in one of the best model calibrations.

سبب این رخداد شده است و یا ضعف و نا اطمینانی در داده‌ها باید بررسی شود. تصاویر شکل ۶ یک بازه مشابه از رودخانه نازلوچای را در ۲ هفته پیاپی نشان می‌دهد. در تصویر پایینی (ب) که ۲ هفته بعد از تصویر بالا (الف) را نشان می‌دهد اثرات یک سیلاب ناگهانی ناشی از بارش در ماه اردیبهشت سال ۱۳۹۴ قابل مشاهده است. این بازه در نزدیکی پایاب رودخانه و در خروجی می‌باشد.

در اجرای این مدل و با توجه به نمودار فوق، نتایج بیانگر این بود که علی‌رغم شبیه‌سازی خوب دبی‌های پایین، دبی‌های اوج توسط مدل به خوبی مدل نشده است. بنابراین فاصله زیاد متوسط ضرایب ناش از مقدار بهینه را می‌توان ناشی از این موضوع دانست. در اینجا برازش گرافیکی مدل در حالت‌های بعدی اجرای مدل نیز این نکته را به خوبی آشکار می‌کند که مدل در شبیه‌سازی دبی‌های اوج به شدت ضعیف عمل نموده است. اما این که آیا ناتوانی مدل



شکل ۶- مقایسه دو تصویر قبل و بعد از بارش سیلابی به فاصله دو هفته.

Figure 6. Photos of the same place in river before and after the rainfall events in two weeks.

پارامتر یعنی از زمان شروع بارش تا اشباع یک‌دهم از لایه فوق حساسیت نشان می‌دهد. می‌توان نتیجه‌گیری نمود که بعد از اشباع اولیه لایه سطحی حساسیت مدل نسبت به آب جذبی کم شده و حتی از بین می‌رود چرا که مدل بعد از این نقطه شدیداً نسبت به مقدار نفوذ از لایه فوقانی حساس می‌شود.

- b1 در کل بازه پارامتر (۰-۱): هم‌زمان با اشباع لایه فوقانی از آب نفوذ از لایه فوقانی به لایه دوم (مخزن دوم) شروع شده و مدل به مقدار این نفوذ به‌دلیل حساسیت به پارامتر H11 حساس است. از آنجایی‌که نسبت به گنجایش لایه اول در مراحل ابتدایی حساسیت دیده شد بنابراین نسبت به مقدار نفوذ به لایه دوم که از همان ذخیره صورت می‌پذیرد از ابتدا حساسیت مدل منطقی و قابل درک است.

- H12 (حداکثر گنجایش آب در لایه فوقانی تا زمان جاری شدن جریان زیرسطحی) در کل بازه پارامتر (۰-۳۰۰): همانند حساسیتی که مدل نسبت به پارامتر H11 دارد نسبت به این پارامتر نیز حساسیت نشان می‌دهد. در حالت کلی مدل اجرا شده نسبت به گنجایش حداکثری آب در لایه‌ها (هر ۴ مخزن) و مقدار نفوذ از هر لایه به لایه زیرین، به‌خصوص در حدود ابتدایی بازه پارامترها، حساس است، یعنی پارامترهای b2 در بازه ۰ تا ۰/۱ (نفوذ از دومین مخزن یا لایه زیر لایه فوقانی به لایه سوم یا مخزن زیرین)، پارامتر b3 در کل بازه پارامتر (۰-۱) (نفوذ از سومین لایه به چهارمین لایه)، C1 از مقدار ۴۰ تا ۱۰۰ (حداکثر گنجایش آب در مخزن اول و یا به‌عبارتی حد اشباع لایه فوقانی زمین)، H21 از مقدار ۰ تا حدود ۱۰ (حداکثر گنجایش آب در لایه دوم تا زمان جاری شدن جریان میانی)، H31 در بازه مقادیر ۰ تا ۴۰ (حداکثر گنجایش آب در لایه سوم تا زمان جاری شدن جریان زیرسطحی)، a41 در بازه ۰ تا ۰/۱ یعنی حدود یک‌دهم بازه تغییر این پارامتر (یا رواناب پایه)،

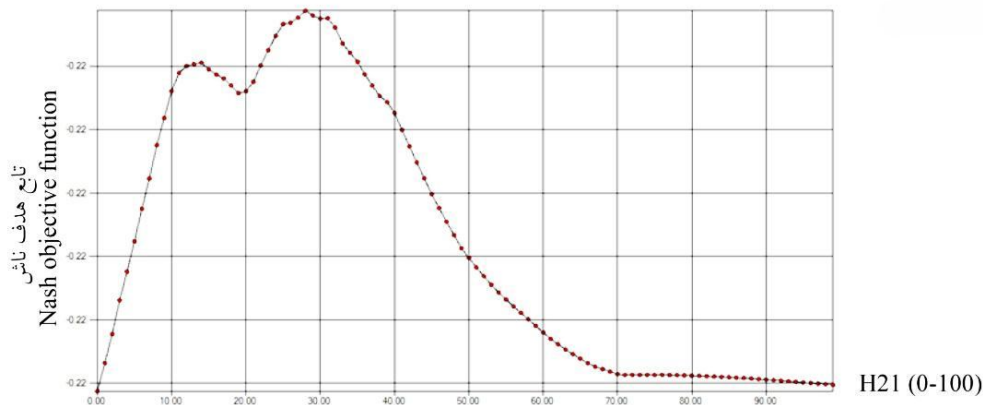
یک بارش سیلابی نه‌چندان طولانی آثاری چنین ژرف در رواناب انتهایی رودخانه داشته است. از طرفی با بررسی داده‌ها معلوم شد که اغلب سیلاب‌های شدید نیز در اردیبهشت و فروردین رخ داده‌اند. یعنی دبی‌های پیک اغلب در تاریخی مشابه تاریخ ثبت تصاویر فوق رخ داده‌اند. رواناب‌ها ثبت گشته‌اند اما تغییری که باعث چنین روانابی شده است اغلب در داده‌ها گزارش نشده است. علت این امر عدم وجود تعداد کافی ایستگاه‌های باران‌سنجی در منطقه و به‌خصوص در ارتفاعات است. عدم وجود ایستگاه‌های برف‌سنجی در ارتفاعات نیز مزید بر علت می‌باشد. به‌عبارتی داده‌های ورودی به مدل در این بازه‌ها دچار نقصان‌هایی می‌باشند که مدل از شبیه‌سازی رواناب‌های بالا بازمی‌ماند. اگر این نکته را در نظر بگیریم با توجه به نمودار مقایسه رواناب مشاهداتی و محاسباتی، می‌توان نتیجه گرفت علی‌رغم مقادیر ناش پایین، برازش گرافیکی مدل در اغلب بازه‌ها قابل قبول بوده و مدل عملکرد مناسبی داشته است. از طرفی در ۱۱۷ مورد واسنجی که ضرایب ناش در آن‌ها بین ۰ و ۱ قرار دارد، متوسط ضریب ناش حدود ۰/۳ می‌باشد. آنالیز حساسیت این مدل در برخی از بهترین اجراها به تمامی پارامترها سنجش شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. میزان حساسیت و روند آن در هیچ کدامیک از پارامترها مشابه هم نبود، در شکل ۷ به‌عنوان نمونه نمودار آنالیز حساسیت به پارامتر H21 در اجرایی که مقایسه رواناب آن در شکل ۵ ارائه شده است، قابل مشاهده است.

در این اجرای مدل، حساسیت مدل بیشتر به پارامترهای زیر بود:

- H11 در بازه ۰ تا ۵۰: این پارامتر حداکثر ظرفیت آب لایه خاک فوقانی را تا آستانه جاری شدن رواناب سطحی نشان می‌دهد. بازه تغییرات این پارامتر از ۰ تا ۵۰۰ بوده که نشان می‌دهد مدل به یک‌دهم ابتدایی این

کمتری دارند شرایط برتری حاصل نشد. برترین حالات مدل‌سازی با ضرایب ناش بالاتر از ۰/۴ اغلب با روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک حاصل شد و روش بهینه‌سازی غالب بعدی جستجوی الگو بود. جدول ۳ پارامترهای به‌دست آمده را برای یکی از حالات برتر مدل که در شکل ۵ مقایسه رواناب آن انجام شده، نشان می‌دهد. روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، تابع هدف ناش در این حالت مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت.

یعنی به عبارتی به مقادیر اشباع آب و نفوذ از هر لایه تا رواناب پایه مدل حساسیت نشان می‌دهد و به رواناب‌های ناشی از هر لایه حساسیت یا بسیار کم بوده و یا اصلاً حساس نمی‌باشد. پس رواناب کل به مقدار رواناب پایه حساس می‌باشد و باید بتوان با تغییر رواناب پایه که به عبارتی ماحصل نفوذها و حدود گنجایش آب در هر لایه می‌باشد، به بهترین حالت مدل، این بار با واسنجی دستی رسید. با تغییر دستی پارامترها و ثابت نگاه داشتن پارامترهایی که حساسیت ندارند و یا حساسیت بسیار



شکل ۷- نمودار آنالیز حساسیت به پارامتر H21.

Figure 7. The sensitivity analysis result for H21 parameter.

جدول ۳- مقادیر بهینه‌سازی شده پارامترهای مدل در یکی از حالات برتر (اجرای هایلایت شده در جدول ۲).

Table 3. The calibrated parameters in one of the best model calibrations (the highlighted run in table 2).

پارامترهای مدل The model parameters	مقدار بهینه‌سازی شده The optimized value	پارامترهای مدل The model parameters	مقدار بهینه‌سازی شده The optimized value
a_{11}	0.162	C_1	100
a_{12}	0.172	C_2	99
a_{21}	0.036	C_3	91
a_{31}	0.394	C_4	98
a_{41}	0.022	H_{11}	80
alpha	4	H_{12}	80
b_1	0.033	H_{21}	19
b_2	0.073	H_{31}	16
b_3	0.118	H_{41}	8

- قدرت مدل‌ها و مدل‌سازی بر خلاف تصور عموم به نوع مدل و میزان پیچیدگی آن بستگی زیادی ندارد، بلکه به اعتبار داده‌های ورودی وابسته است. این مطلب با مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی با این مدل در سطح حوضه نازلو با نتایج حاصل از مدل‌سازی با همین مدل در حوضه‌هایی که دارای داده‌های ورودی معتبرتر بودند روشن شد. حوضه‌های آبریز کشورهای هم‌چون استرالیا تحت مطالعه با همین مدل گاه ضرایب همبستگی تا ۹۷ درصد و مقادیر ناش بسیار نزدیک به یک به دست داده‌اند. بنابراین اعتبار داده‌های ورودی در مطالعات هیدرولوژی بسیار مهم است.

- تأثیر طول دوره آماری نیز همانند قسمت قبل با مطالعات دیگر مقایسه شد. و معلوم شد که طول دوره آماری مطالعه تأثیر مستقیمی روی نتایج حاصل از مدل‌سازی و بالا بردن میزان تطبیق مدل به داده‌های مشاهداتی دارد. به عبارت دیگر حتی از بهترین مدل‌ها نیز نمی‌توان با داده‌هایی ناقص انتظار چندانی داشت.

- نتایج حاصل از این مطالعه معیارهای اعتبارسنجی را نیز به چالش کشید. نتیجه این‌که تطبیق تصویری مدل‌هایی که بر مبنای برتری معیار ناش انتخاب شده بودند بسیار بهتر از تطبیق تصویری مدل‌هایی بود که بر مبنای برتری معیار پیرسون انتخاب شده بودند. برای مثال در دو واسنجی مختلف ضرایب ناش و همبستگی به ترتیب ۰/۴ و ۰/۷ در یک سری و ۰/۴۵ و ۰/۶ در سری بعدی بود. که ضریب ناش ۰/۴۵ علی‌رغم ضریب همبستگی حدود ۰/۱ کم‌تر برآزش گرافیکی برتری را نشان داد.

- نااطمینانی روابط بارش- جریان روزانه بیشتر از روابط هفتگی، ماهانه و سالانه است. نااطمینانی مدل‌های بارش- رواناب نمی‌تواند از بین برود ولی می‌تواند با کاربرد روش‌های مناسب کاهش داده شود. عموماً، فرضیات مختلفی در طول مدل‌سازی بیلان آبی فرض می‌شود که به‌طور ذاتی خطا را وارد مدل

البته لازم به ذکر است که در علم مدل‌سازی معرفی تنها یک سری پارامتر به‌عنوان پارامترهای برتر غیرحرفه‌ای بوده و دور از اهداف مدل‌سازی می‌باشد. یک مدل‌سازی مناسب در نهایت شامل دسته‌ای از اعداد و یا بازه‌ای از اعداد برای هر پارامتر می‌باشد تا با تغییرات جزئی در میزان آن‌ها برای منطقه مورد مطالعه شبیه‌سازی‌هایی برای آینده انجام دهد. محدود نمودن نتایج مدل‌سازی تنها به یک سری پارامتر اختیار و آزادی عمل را از مدل‌ساز سلب می‌نماید.

مطلب مهم دیگر در انتخاب مدل برتر در میان تمامی حالات اجرای مدل این است که از دو معیار برای سنجش اعتبار مدل در این مطالعه استفاده نمودیم. اما در روند بررسی‌ها برتری معیار ناش به‌وضوح مشخص شد. تطبیق و یا برآزش تصویری و گرافیکی داده‌های مشاهداتی و داده‌های محاسباتی در مدل‌هایی با معیار پیرسون برابر اما ناش متفاوت، در مدلی بهتر بود که معیار ناش مناسب‌تری داشت و برعکس در مدل‌هایی با ناش تقریباً برابر برتری معیار پیرسون در بسیاری موارد همراه با برآزش گرافیکی بهتر نبود. با وجود مشکلات خاصی که در زمینه داده‌ها وجود داشت و در بخش‌های پیشین نیز به آن‌ها اشاره شد تطبیق مدل با حوضه در حد قابل‌قبولی به دست آمد.

نتیجه‌گیری کلی

به‌طورکلی تطبیق مدل منتخب با حوضه نازلوچای با وجود نواقص داده‌ای بسیار در سطح حوضه و ایستگاه‌های اندازه‌گیری مناسب بوده و می‌توان به‌عنوان پایه‌ای در تصمیم‌گیری‌های مهندسی به آن اتکا نمود. این عوامل اهمیت این حوضه و علم یافتن به شرایط هیدرولوژیک آن را بیش‌ازپیش روشن می‌سازد. بخشی از مهم‌ترین نتایج حاصل از مطالعه عبارتند از:

می‌کند که در طبیعت این ساده‌سازی وجود ندارد. خروجی‌های مدل می‌تواند مورد آزمون قرار گیرد و اثرات آن بر روی کل مدل دیده شود. آزمون‌های حساسیت، جهت برخورد با این فرضیات و روش‌ها هم در ورودی‌های مدل و هم در

منابع

1. ASCE. 1993. Criteria for evaluation of watershed models. *J. Irrig. Drain. Eng.* 119: 3. 429-442.
2. Azmeri, Basri, H., and Herissandy, N. 2012. Changing land use impact analysis toward water availability on Krueng Meureudu watershed. *J. Ekonomi dan Pembangunan.* 5: 1. 83-98.
3. Basri, H. 2013. Development of Rainfall-runoff Model Using Tank Model: Problems and Challenges in Province of Aceh, Indonesia. *Aceh Inter. J. Sci. Technol.* 2: 1. 26-36.
4. Basri, H., Fukuda, T., and Kuroda, M. 1998. Water balance and water Quality analysis of paddy field irrigation system in low lying area. *J. Fac. Agr. Kyushu Univ.* 43: 1-2. 222-237.
5. Basri, H., Nakano, Y., Kuroda, M., and Funakoshi, T. 1999. Water requirement analysis of paddy field irrigation system in diversified land use area. *J. Fac. Agr. Kyushu Univ.* 44: 1-2. 175-187.
6. Basri, H., Syahrul and Nursidah. 2002. Evaluation of hydrological response of Krueng Ireum watershed using computer simulation of tank model. *J. Agrista*, 6: 1. 7-18.
7. Behmanesh, J., Jabbari, A., Montaseri, M., and Rezaie, H. 2014. Comparing AWBM and SimHyd models in rainfall-runoff modeling (Case study: Nazlou Chay catchment in west Azarbijan). *Geography and environmental planning.* 24: 52: 4. 155-168.
8. Chiew, F.H.S., and McMahon, T.A. 1993. Assessing the adequacy of catchment stream flow yield estimates. *Austr. J. Soil Res.* 31: 665-680.
9. Cooper, V.A., Nguyen, V.T.V., and Nicell, A. 1997. Evaluation of global optimization methods for conceptual rainfall-runoff model calibration. *Water Science and Technology*, 36: 5. 53-60.
10. Cooper, V.A., Nguyen, V.T.V., and Nicell, A. 2007. Calibration of conceptual rainfall-runoff models using global optimization methods with hydrologic process-based parameter constraints. *J. Hydrol.* 334: 3-4. 455-466.
11. Fukuda, T., Jayadi, R., Nakano, Y., and Kuroda, M. 1999. Application of complex tank model for evaluating performance of water operation in a Reused water irrigation system. *J. Fac. Agr. Kyushu Univ.* 44: 1-2. 189-198.
12. Hessari, B. 2000. Evaluating the water balance of west Azarbijan with GIS. Technical report. Urmia.
13. Jayadi, R., Fukuda, T., Nakano, Y., and Kuroda, M. 1999. Evaluation of Reused water effect on irrigation water quality of low-lying paddy area. *J. Fac. Agr. Kyushu Univ.* 44: 1-2. 199-211.
14. Kim, J.H., Paik, K.R., Kim, H.S., and Lee, D.R. 2004. A conceptual rainfall – runoff model considering seasonal variation. *Advances in Hydro science and engineering.* 6: 1-11.
15. Kuok, K.K., Harun, S., and Shamsuddin, S.M. 2010. Global optimization of the hydrologic tank model's parameters. *Can. J. Civil Engin.* 1: 1. 1-14.
16. Kuroda, M., Nakano, Y., Basri, H., and Funakoshi, T. 1999. Analysis of intake water of agricultural water use operated under traditional water right in Japan. *J. Fac. Agr. Kyushu Univ.* 44: 1-2. 149-156.
17. Legates, D.R., and McCabe, G.J. 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydro climatic model validation. *Water Resources Res.* 35: 1. 233-241.
18. 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. *American Society of Agricultural and Biological Engineers.* 50: 3. 885-900.
19. Pheun, H.N., and Pradhan, P. 1983. The tank model in rainfall-runoff modelling. *Water SA.* 9: 3. 93-102.

20. Podger, G. 2003, Rainfall Runoff Library Manual. Version 1.0, CRC for Catchment Hydrology, 110.
21. Rohani, H., and Farahi, M.M. 2014. The automatic calibration of two rainfall runoff models, Tank and SimHyd by the use of genetic algorithm. *J. Range Water*. 66: 4. 521-533.
22. Setiawan, B.I. 2003. Optimization of tank model's parameters. *Bulletin Keteknikan Pertanian*, 17: 1. 8-16.
23. Sevat, E., and Dezetter, A. 1991. Selection of calibration objective functions in the context of rainfall-runoff modeling in a Sudanese savannah area. *Hydrol. Sci. J.* 36: 4. 307-330.
24. Sugawara, M. 1961. Automatic callibration of tank model. *Hydrological Sciences-Bulletin-des Sciences Hydrologiques*. 24: 3. 375-388.
25. Sugawara, M., Watanabe, E., Ozaki, E., and Katsuyama, Y. 1984. Tank model with snow component. The National Research Center for Disaster Prevention. Science and Technology Agency, Japan.
26. Sutoyo, Yanuar, M., and Purwanto, J. 2003. River runoff prediction based on rainfall data using tank model. *Bulletin Keteknikan Pertanian*, 13: 3. 25-39.
27. Yu, B., and Zhu, Z. 2015. A comparative assessment of AWBM and SimHyd for forested watersheds. *Hydrol. Sci. J. Special issue: Modelling Temporally-variable Catchments*. 1-13.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 23(6), 2017
<http://jwsc.gau.ac.ir>

Modelling the daily runoff of Nazloo Chai watershed at the west side of Urmia Lake by the use of Tank model

***H. Rezaie¹, A. Jabbari², J. Behmanesh¹ and B. Hessari³**

¹Associate Prof., Dept. of Water Engineering, University of Urmia,

²Ph.D. Candidate, Dept. of Water Engineering, University of Urmia,

³Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, University of Urmia

Received: 09/03/2015; Accepted: 09/06/2016

Abstract

Background and Objectives: After 1960,s computer revolution, the hydrologic modelling took on a new form and the Stanford watershed model may be considered as one of the early successful attempts in this regard. The rainfall runoff models have always been considered as one of the most effective decision tools in watershed management. In the current study, the Tank daily rainfall runoff model was used in Nazloo Chai river watershed at the west side of Urmia Lake. The importance of the lake hydrologic fluctuations in today's critical situation is obvious to everyone. Knowing the rainfall runoff relations in all sub catchments of the Urmia basin especially in a watershed such as Nazloo which suffers from insufficient number of measurement stations and limited information from those parts of catchment located in Turkey, is so important. As a result, the goal is building a relation between rainfall of catchment and the out let runoff, in order to predict the future amounts of runoff.

Materials and Methods: The Nazloo River with almost 93 km length is one of the 13 rivers drops into Urmia Lake. The Tank rainfall runoff model is a simple, conceptual and lumped model. The model inputs are precipitation, evaporation and daily runoff at the outlet of watershed. Among all available gauges, 3 stations with the most acceptable overlapping covered area and longest joint statistical period, 16 years, have been selected. Due to high water withdrawals in the last sub catchment before the watershed outlet, the mentioned sub catchment has been eliminated and the total area of modeled watershed has been decreased. The monthly average of precipitation and evaporation measured data have been compared with long term amounts of these parameters in order to modify the input data and reflect the watershed processes in input data as well. The Tank model is presented along with some other famous rainfall runoff models in RRL software package which has been developed in Australia. The sum of 224 calibrations and verifications by using 7 optimization methods, 8 primary objective functions and 4 secondary objective functions have been done. The model was evaluated by considering Nash and correlation coefficients in each run.

Results: Totally about 117 runs from all 224 runs have shown nice fit and their Nash coefficients were reported between 0 and 1 which is an acceptable range. About 30 cases also had a Nash coefficient more than 0.4 and the graphical fitness between observed and estimated runoffs also confirmed the acceptable fitness. The correlation coefficient was also evaluated and totally confirmed the models which were selected based on Nash coefficient. But due to Nash coefficient advantages compared with correlation coefficient, it was used in current study.

Conclusion: It was concluded that the model didn't perfectly simulate the peak discharges and they have been lower estimated. It was determined through field research and historic data evaluation, that the peak discharges occur mostly during April and May in the region. Along with the high rainfall events the snowmelts are also constituent the large part of runoffs at that time. Insufficient number of stations especially in highlands of the region and the lack of some nodes in model in order to exert snowmelt data, eventuate lower rainfall input data and as a result disable model to simulate peak flows. But generally the base flows were simulated well and the model performance was accepted.

Keywords: Tank model, Nazloo Chai watershed, Urmia Lake, The daily rainfall runoff modelling

* Corresponding Author; Email: h.rezaie@urmia.ac.ir

