



دانشگاه گواران و منابع آب

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک  
جلد بیست و چهارم، شماره اول، ۱۳۹۶  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## ارزیابی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی حوضه با کمک مدل مفهومی پیوسته بارش - رواناب شماره منحنی اصلاح شده

ثریا گلنارکار<sup>۱</sup>، محسن پوررضا بیلندی<sup>۲</sup>، عباس خاشعی سیوکی<sup>۳</sup> و مهدی امیرآبادی زاده<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، آستادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند،

<sup>۲</sup> دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند

تاریخ دریافت: ۹۵/۸/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۳/۱۶

### چکیده

**سابقه و هدف:** مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژیکی پیوسته و روزانه یکی از بهترین ابزارهای برآورد رواناب حاصل از بارندگی می‌باشند. این مدل‌ها با شبیه‌سازی فرایند تبدیل بارش به رواناب قادر به تخمین میزان رواناب حوضه‌های آبریز بدون ایستگاه اندازه‌گیری با کم‌ترین زمان و هزینه ممکن می‌باشند. هدف این مقاله معرفی یک روش مدل‌سازی پیوسته، مفهومی و روزانه بارش - رواناب بر مبنای روش شماره منحنی تغییر یافته است که با استفاده از آن بتوان علاوه بر رواناب خروجی حوضه، غالب یا مغلوب بودن فرآیندهای هیدرولوژیکی مدل را نیز مشخص کرد.

**مواد و روش‌ها:** در پژوهش حاضر مدل بارش - رواناب بر اساس مدل شماره منحنی اصلاح شده، به صورت یکپارچه، مفهومی و در مقیاس روزانه در محیط برنامه‌نویسی متلب<sup>۱</sup> کدنویسی شد و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO و تابع هدف ناش - ساتکلیف (NSE) واسنجی گردید. واسنجی مدل توسط الگوریتم PSO (کدنویسی شده در زبان برنامه‌نویسی متلب) و با تکرار نه هزار مرتبه اجرای مدل، انجام شد. بدین ترتیب که، ابتدا متغیرهای تصمیم (پارامترهای مدل) در محدوده مشخص شده به صورت تصادفی مقداردهی اولیه شده و سپس الگوریتم PSO اجرا شده و سری پارامتر بهینه محاسبه گردید. ضمن آن‌که در مرحله شبیه‌سازی مدل ذکر شده با استفاده از داده‌های ایستگاه معرف جهانی برای حوضه لیف واقع در شمال شهر کالینز در ایالت می‌سی‌سی‌پی آمریکا و همچنین یکی از زیرحوضه‌های کرخه در داخل کشور واسنجی و صحت‌سنجی شده است.

**یافته‌ها:** مقایسه مقادیر رواناب مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در حوضه لیف با کمک آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب ناش - ساتکلیف (NSE) و معیار کلینگ گوپتا (KGE) به ترتیب در دوره واسنجی ۱/۴، ۰/۸۱ و ۰/۸۷ و در دوره صحت‌سنجی ۲/۵۳، ۰/۸۳ و ۰/۸۶ نشان از عملکرد مناسب و قابل قبول مدل داشت. نتایج معیارهای مذکور در زیرحوضه قره‌سو نیز قابل قبول برآورد گردید ولی به دلیل کیفیت بالاتر داده‌های حوضه لیف نتایج آن نسبتاً بهتر ارزیابی می‌گردد. نتایج مدل حاضر با خروجی‌های مشابه از مدل مفهومی بارش - رواناب روزانه Hymod (و با حیث ورودی‌های یکسان) مقایسه گردید. به‌طور کلی برتری نسبی مدل Hymod در مقایسه نتایج در هر دو حوضه به

\* مسئول مکاتبه: [mohsen.pourreza@birjand.ac.ir](mailto:mohsen.pourreza@birjand.ac.ir)

چشم می‌خورد که دلیل آن را شاید بتوان در عدم قطعیت کم‌تر ناشی از تعداد کم‌تر پارامترها و رابطه‌های ساده‌تر مدل Hymod جستجو کرد. ضمن آن‌که مدل ارائه شده مبتنی بر شماره منحنی علی‌رغم دارا بودن معیارهای کم‌تر از مدل hymod به دلیل محاسبه مؤلفه‌های مختلف هیدرولوژیکی شامل جریان میانی، جریان پایه، تلفات اولیه، نفوذ زیرسطحی، زهکشی و رواناب سطحی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و اطلاعات دقیق‌تری از فرآیندهای غالب مؤثر در رژیم هیدرولوژیکی زیرحوضه‌ها را در اختیار قرار می‌دهد.

**نتیجه‌گیری:** مدل (SCS-CN) اصلاح‌شده مدلی مفهومی بوده که رواناب را با استفاده از داده‌های بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل روزانه و با دقت مناسب محاسبه می‌نماید. مزیت اصلی این مدل نسبت به سایر مدل‌های مفهومی (به‌عنوان مثال hymod در این پژوهش) برآورد اجزای هیدرولوژیکی مدل و تعیین پروسه غالب حوضه آبریز مورد مطالعه می‌باشد. در این پژوهش می‌توان سه جز اصلی نفوذ، تبخیر و رواناب سطحی را به‌ترتیب فرآیندهای غالب در حوضه آبریز لیف و همان فرآیندها ولی با ترتیب از آخر به اول را فرآیندهای غالب در زیرحوضه قره‌سو دانست. بنابراین مدیریت حوضه آبریز با کمک خروجی‌های خاص ناشی از این نوع مدل‌ها (درصد مقادیر اجزاء مختلف رابطه بیلان هیدرولوژیکی) به‌نحو بسیار مؤثرتری قابل حصول می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** شبیه‌سازی بلندمدت بارش-رواناب، شماره منحنی، اجزاء رابطه بیلان هیدرولوژیکی، الگوریتم بهینه‌سازی PSO، مدل مفهومی hymod

## مقدمه

از آن‌جایی که مسأله پیش‌بینی و برآورد رواناب حاصل از بارش‌های جوی و درک کمی از فرآیندهای مختلف تولید آن به‌عنوان یکی از مباحث اساسی و بنیادی در دانش هیدرولوژی به‌شمار می‌رود، بنابراین دست‌یابی به میزان کمی و کیفی آن با نگرش سیستمی از این نظر دارای اهمیت است که پایه و مبنای مطالعاتی طرح‌های عمرانی را در زمینه‌های مختلف توسعه و بهره‌برداری در منابع آب و سازه‌های آبی و یا سایر عرصه‌های محیطی در حوضه‌های آبریز تشکیل می‌دهد بنابراین پیش‌بینی و تعیین میزان کمی فرآیندهای تولید رواناب و انتقال آن به نقطه خروجی حوضه آبریز از اهمیت خاصی برخوردار است. برای کنترل و هدایت رواناب و تخلیه جریان‌های سطحی در اراضی کشاورزی و انتقال آن‌ها به محل مناسب و خارج از منطقه، مدل‌های متفاوتی توسط پژوهشگران، سازمان‌های مطالعاتی-تحقیقاتی در کشورهای مختلف جهان ارائه شده و مورد استفاده نیز قرار گرفته است.

شبیه‌سازی بارش-رواناب اهمیت بالایی در جنبه‌های مختلف آبی از جمله توسعه منابع آب، کنترل و مدیریت سیل، برنامه‌ریزی آبیاری، طراحی آبیاری و زهکشی، طراحی هیدرولیکی سازه‌ها، برقابی و غیره نیز کاربرد دارد. تعیین رابطه قوی بین بارندگی و رواناب یک حوضه یکی از مهم‌ترین مشکلات برای هیدرولوژیست‌ها و مهندسان می‌باشد.

اولین پژوهش‌ها در این باره توسط پرولت در حدود ۳۲۵ سال قبل انجام شد (۲۰). روند تبدیل بارش به رواناب بسیار پیچیده، پویا و غیرخطی است و این پیچیدگی‌ها اغلب مرتبط با عوامل فیزیکی است. با این حال برای شناسایی این پیچیدگی‌ها در حوضه درک تغییرات مختلف (مکانی و زمانی) هیدرولوژیکی لازم و ضروری است. مدل‌های بسیاری در این رابطه وجود دارد که از این جمله می‌توان به پژوهش‌های سینگ و همکاران (۲۰۰۶)، توسعه مدل استانفورد (۷) و سینگ (۲۵، ۲۶) اشاره کرد.

همچنین مدل‌های مفهومی و یکپارچه که از میان آن‌ها می‌توان به مدل بوقتون (۲، ۳)، مدل هیدرولوژی (۲۲، ۱۵) و مدل حوضه کنتاکی (۱۴، ۱۲، ۱۳) اشاره نمود. روش (SCS-CN) در حال حاضر به‌عنوان روشی که از طرف سازمان حفاظت از منابع طبیعی آمریکا رایج شده، شناخته می‌شود. این مدل اولین بار در سال ۱۹۵۴ توسط وزارت کشاورزی ایالت متحده آمریکا برای تبدیل فرآیند بارش به رواناب به‌کار گرفته شد. پوینس و هاوکینز (۱۹۹۶) این مدل را مورد بررسی قرار دادند و به برتری این مدل نسبت به سایر مدل‌ها دست یافتند. پیشرفت‌های روزافزون در علوم کامپیوتری و سیستم اطلاعات جغرافیای (GIS) موجب تغییر قابل‌ملاحظه در مدل‌سازی هیدرولوژیکی با استفاده از مدل (SCS-CN) گشته است و باعث بروز نسخه‌های جدیدتری از مدل مبتنی بر شماره منحنی گردید (۱، ۱۱، ۲۳، ۵، ۲۱، ۱۶، ۱۸). کاربرد اصلی مدل‌های توسعه داده شده در منابع بالا در شبیه‌سازی روزانه پیوسته می‌باشد اما علاوه بر آن، از این روش در تعیین نرخ نفوذپذیری و رواناب نیز در چند مورد استفاده شده است (۱۷، ۸، ۱۹، ۲۰). اخیراً نیز تحقیقات همکاران (۲۰۱۶) مدلی توزیعی مبتنی بر ترکیب استفاده از دو مفهوم شماره منحنی خاک و دیاگرام زمان - مساحت توسعه و ارائه دادند.

مفهومی مدل‌های پرکاربرد هستند که علاوه بر تعیین رابطه بین بارش و رواناب به محاسبه مؤلفه‌های مختلف موجود در چرخه هیدرولوژیکی نیز می‌پردازند. هدف از انجام این پژوهش ارائه یک روش مفهومی مدل‌سازی پیوسته و روزانه بارش - رواناب بر مبنای روش شماره منحنی تغییر یافته است که ایده اولیه آن توسط گیتا و همکاران (۲۰۰۸) مطرح گردید. مقایسه عملکرد این مدل با مدل مفهومی **hymod** در حوضه‌هایی در داخل و خارج از کشور نیز هدف بعدی پژوهش حاضر می‌باشد. مدل (SCS-CN) اصلاح‌شده مدلی مفهومی بوده که رواناب را با استفاده از داده‌های بارش و تبخیر - تعرق پتانسیل روزانه و با دقت مناسب محاسبه می‌نماید. این مدل می‌تواند علاوه بر رواناب خروجی حوضه، به برآورد اجزای هیدرولوژیکی مدل پرداخته و فرآیندهای غالب و مغلوب را نیز مشخص کند. بنابراین این مورد نیز از مهم‌ترین خروجی‌های این مدل به حساب می‌آید که در کم‌تر مدل مشابه دیگر یافت می‌شود. بنابراین مدیریت حوضه آبریز با کمک خروجی‌های خاص ناشی از این نوع مدل‌ها (درصد مقادیر اجزاء مختلف رابطه بیلان هیدرولوژیکی) به‌نحو بسیار مؤثرتری قابل حصول می‌باشد.

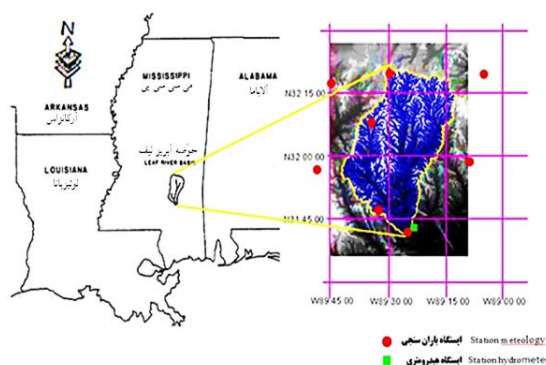
### مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در خارج از کشور: حوضه آبریز رودخانه لیف با مساحت تقریبی ۱۹۵۰ کیلومترمربع در شمال شهر کالینز در ایالت می‌سی‌سی‌پی کشور آمریکا قرار دارد (شکل ۱). حوضه مذکور دارای آب و هوای مرطوب بوده و داده‌های هواشناسی (بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه) و هیدرومتری (دبی روزانه) در مدل بارش - رواناب مربوط به آن از سایت گروه عمران و محیط زیست دانشگاه کالیفرنیا آمریکا به‌عنوان حوضه معرف

از اوایل دهه ۱۶۹۰ میلادی مدل‌های مفهومی زیادی به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند بارش رواناب توسعه یافتند. در مدل‌های مفهومی همه فرآیندهای بارش - رواناب به‌صورت مفاهیم ساده شده توصیف می‌شوند، به همین دلیل در صورتی که هدف اصلی مطالعه شبیه‌سازی جریان در خروجی حوضه باشد، مدل‌های مفهومی اغلب بر انواع دیگر مدل‌های بارش - رواناب، از جمله مدل‌های فیزیکی، ترجیح داده می‌شوند (۶) زیرا با ورودی و محاسبات کم‌تر پاسخ‌های قابل‌قبول‌تری را ارائه می‌دهند. در میان انواع مدل‌های

یک دوره ۵ سال (۱۹۵۷-۱۹۶۱) برای واسنجی و یک سال نیز (۱۹۵۳) برای صحت‌سنجی مدل انتخاب گردید.

دارای داده‌های موثق اخذ شده است. لازم به ذکر است از داده‌های این حوضه تاکنون در پژوهش‌های بسیاری استفاده شده است. با استفاده از این داده‌ها

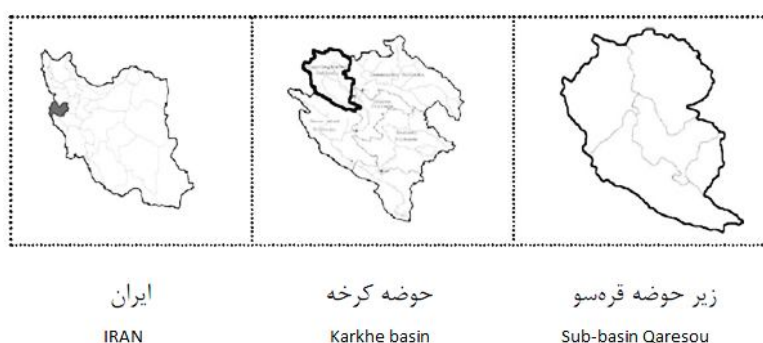


شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه رودخانه لیف در کشور آمریکا.

Figure 1. The geographical location of Leaf River watershed in America.

مساحت آن برابر ۵۳۵۴ کیلومتر مربع و حداکثر و حداقل ارتفاع آن نیز به ترتیب ۳۳۴۶ و ۱۱۸۰ متر است. متوسط بارندگی سالیانه آن بین ۳۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر متغیر است. سه رودخانه اصلی مرک، قره‌سو و رازآور در این حوضه جریان دارند که در این پژوهش از زیرحوضه قره‌سو استفاده شده است. شکل ۲ موقعیت زیرحوضه قره‌سو را نشان می‌دهد.

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در داخل کشور: حوضه آبریز کرخه به مساحت ۵۰۷۶۴ کیلومتر مربع در غرب کشور، در مناطق میانی و جنوب‌غربی رشته‌کوه‌های زاگرس بین ۴۶ درجه و ۶ دقیقه و ۴۹ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۵۸ دقیقه و ۳۴ درجه و ۵۶ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. زیرحوضه قره‌سو در شمال‌غربی حوضه کرخه و در غرب ایران واقع شده و



شکل ۲- موقعیت زیر حوضه قره‌سو.

Figure 2. Location of Qaresou subbasin.

جدول ۱- نامگذاری مفاهیم هیدرولوژیکی به کار رفته در تحقیق.

**Table 1. Notation of hydrological concepts used in research.**

THR <sub>t</sub>	جریان میانی در زمان 't' بر اساس مدل SCS-CN	P	بارندگی
BF <sub>t</sub>	جریان پایه در زمان 't' بر اساس مدل SCS-CN	I <sub>a</sub>	تلفات اولیه
TRO <sub>t</sub>	رواناب کلی بر اساس مدل SCS-CN	P <sub>e</sub>	بارش مؤثر
EVP <sub>t</sub>	تبخیر و تعرق در زمان 't'	F <sub>t</sub>	میزان نفوذ در زمان 't' در مدل SCS-CN
EV <sub>t</sub>	تبخیر در زمان 't'	RO <sub>t</sub>	رواناب سطحی به مدت ۵ روز بعد از آغاز طوفان
TR <sub>t</sub>	تعرق در زمان 't'	DR <sub>t</sub>	زهکشی خاک در زمان 't'
ET <sub>t</sub>	تبخیر و تعرق واقعی در زمان 't' بر اساس مدل SCS-CN	PR <sub>t</sub>	نفوذ زیرسطحی در زمان 't'
SMS	میزان ذخیره رطوبت در خاک	DSP <sub>t</sub>	نفوذ عمیق در زمان 't' بر اساس مدل SCS-CN
GWS	میزان ذخیره آب در زمین	DPR <sub>t</sub>	نفوذ عمقی غیرفعال
SCS-CN	روش حفاظت خاک- شماره منحنی	SRO <sub>t</sub>	رواناب سطحی در زمان 't'، اگر t > 5

محاسبه رواناب سطحی: ترکیبی از رابطه‌های ۱، ۲، ۳ منجر به تولید معادله روش SCS-CN می‌شود که از آن برای محاسبه رواناب مستقیم استفاده می‌شود. در این معادله  $P_e(t)$  از میزان بارندگی در زمان  $t$  منهای میزان تلفات اولیه حاصل می‌شود.

$$RO_t = \frac{P_{e_t}^2}{P_{e_t} + S_t} \quad (4)$$

$$P_{e(t)} = P_t - I_a(t) \quad (5)$$

$$S_t = \frac{25400}{CN_t} - 254 \quad (6)$$

که در آن‌ها،  $CN_t$  نشان‌دهنده شماره منحنی در زمان  $t$  است. در این معادله باید  $P_e(t) \geq 0$  باشد. در غیر این صورت  $RO_t=0$  می‌شود. در معادله ۶ مقدار  $S_t$  از  $\alpha - 0$  متغیر است که می‌توان مقدار آن را از روی  $CN_t$  شماره منحنی بدون بعد با طیف وسیعی از ۱۰۰ - ۲۰ در نظر گرفت. در ضمن باید در نظر داشت همه ابعاد معادلات بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

مدل SCS-CN موجود: مدل اولیه SCS-CN اولین بار در بخش ۴ از کتاب Engineering Handbook National در سال ۱۹۵۶ ثبت شده است و پس از آن در سال‌های متمادی (۱۹) مورد تجدیدنظر و اصلاح قرار گرفت.

$$P = I_a + F + Q \quad (1)$$

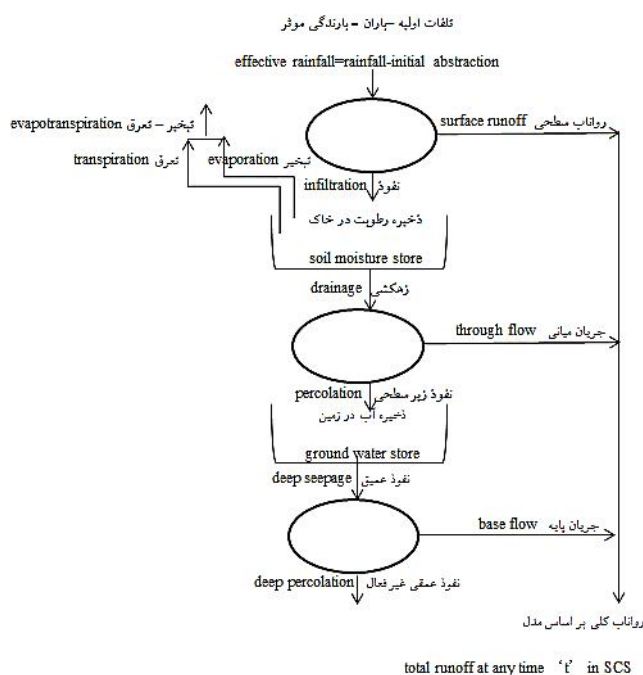
$$\frac{Q}{P - I_a} = \frac{F}{S} \quad (2)$$

$$I_a = \lambda S \quad (3)$$

این روش از محاسبه رواناب سطحی حاصل از بارندگی در یک حوضه کشاورزی کوچک بر اساس معادله بیلان آب و دو فرضیه تجدیدنظرشده بالا حاصل شده است. (۱۹) که در آن،  $P$  مجموع بارش،  $I_a$  تلفات اولیه،  $F$  نفوذ تجمعی،  $Q$  رواناب مستقیم،  $S$  حداکثر ذخیره پتانسیل و نفوذ،  $\lambda$  ضریب تلفات اولیه می‌باشد. که مقدار آن از  $\alpha - 0$  متفاوت می‌باشد که برای آن مقدار معمول و استاندارد ۰/۲ در نظر گرفته می‌شود.

برای توضیح رفتار فیزیکی حوضه آبریز نیاز به داده‌های روزانه بارش و تبخیر به‌عنوان ورودی می‌باشد. همچنین از مقادیر رواناب مشاهده شده در خروجی حوضه برای ارزیابی مدل استفاده می‌شود (۹).

شبه‌سازی رواناب روزانه: روابط ارائه شده در مدل حاضر در حقیقت تلفیقی از مفهوم اولیه مدل SCS-CN می‌باشد که در آن تلفات اولیه و محاسبه جریان‌های مختلف مانند رواناب سطحی، جریان‌های میانی و جریان‌های پایه اصلاح شده است (شکل ۳). عملکرد این مدل بر اساس زمان روزانه است بنابراین



شکل ۳- نمای شماتیک روش SCS-CN ویرایش شده.

Figure 3. Schematic diagram of SCS-CN-based lumped conceptual rainfall-runoff model.

۲۰٪ از حداکثر پتانسیل نگهداشت آب توسط تلفات اولیه قبل از شروع رواناب است. در غیر این صورت:

$$I_a(t) = \lambda_1 S_t \left[ \frac{P_t}{P_t + S_t} \right]^\alpha \quad (8)$$

که در آن،  $\lambda_1$  ضریب و  $\alpha$  توان تلفات اولیه می‌باشند که جز پارامترهای واسنجی بوده و باید بهینه گردند. سابقه بارندگی: سابقه بارندگی از ۳۰-۵ روز متفاوت است هیچ دستورالعمل خاصی برای رطوبت خاک‌های متفاوت با سابقه بارندگی با مدت زمان معلوم در

تلفات اولیه: تلفات اولیه به‌عنوان بخش کوچکی از تلفات قبل از ذخیره مانند زهکشی، نفوذ و ذخیره سطحی در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود که این تلفات بخشی از نگهداشت آب ممکن در خاک است که برای محاسبه آن از فرمول زیر استفاده می‌شود.

$$I_a(t) = \lambda S_t \quad \text{if } t \leq 5 \text{ day} \quad (7)$$

که در آن،  $\lambda = 0.2$  در نظر گرفته شده است. از نظر فیزیکی این بدان معناست که در یک رخداد بارش

$$S_t = \frac{(S_t)^2}{(AM_t + S_t)} \quad (11)$$

در این مدل چنین در نظر گرفته شده است که مقدار رطوبت پیشین روزانه  $AM_t$  از مقادیر بارندگی روزانه متفاوت است (رابطه ۱۰). از این رو برای محاسبه میزان آب ذخیره شده در خاک از رابطه ۱۱ استفاده می‌شود.

**بارش مازاد:** بارندگی مؤثر ( $P_e$ ) از باران ( $P$ ) پس از رسیدن بر روی زمین با کسر تلفات اولیه ( $I_a$ ) حاصل می‌شود و این میزان برای شروع پروسه‌های مختلف هیدرولوژیکی در دسترس است. بارندگی مؤثر ( $P_e$ ) به رواناب سطحی یا بارش مازاد ( $RO$ ) و نفوذ ( $F$ ) تقسیم می‌شود (رابطه ۱). با استفاده از بارندگی مؤثر روزانه ( $Pe_t$ ) می‌توان مقادیر بارندگی مازاد روزانه را با استفاده از (رابطه ۴) برای اولین ۵ روز از شبیه‌سازی در صورتی که بارندگی  $P$  بیش از تلفات اولیه ( $I_a$ ) باشد محاسبه نمود در غیر این صورت رابطه ۴ برابر صفر خواهد شد.

**روندپایی بارش مازاد:** زمانی که تعداد روزها بیش از ۵ باشد برای تبدیل رواناب سطحی به رواناب خروجی حوضه با استفاده از یک مفهوم مخزن خطی به شرح زیر عمل می‌شود که در آن‌ها  $K$  ضریب ذخیره است.

$$SRO_t = C0 \times RO_t + C1 \times RO_{(t-1)} + C2 \times SRO_{(t-1)} \quad (12)$$

$$C0 = \frac{(1/K)}{2 + (1/K)} \quad (1-13)$$

$$C1 = C0 \quad (2-13)$$

$$C2 = \frac{2 - (1/K)}{2 + (1/K)} \quad (3-13)$$

دسترس نیست. از آن‌جا که در منابع مختلف (بخش ۴ کتاب National Engineering Handbook و SCS) از ۵ روز بارندگی در تحقیقات میدانی جامع استفاده شده در این پژوهش هم از همین ۵ روز استفاده می‌شود. در این مدل برای ۵ روز آغاز دوره از شروع شبیه‌سازی شماره منحنی  $CN_0$  به عنوان  $CN$  در نظر گرفته شده و روزهای بعدی  $CN$  متفاوت با توجه به سابقه مقدار رطوبت موجود در خاک  $AM$  بر اساس بارندگی‌های پسین ( $ANTRF$ ) تعیین می‌گردد.

$$ANTRF_t = P_{(t-1)} + P_{(t-2)} + P_{(t-3)} + P_{(t-4)} + P_{(t-5)} \quad (9)$$

که در آن،  $t$  روزهای در نظر گرفته شده و  $P$  بارش روزهای مربوطه است.

**رطوبت پیشین:** رطوبت اولیه موجود در خاک قبل از شروع بارندگی نقشی کلیدی را در برآورد میزان رواناب بازی می‌کند و شماره منحنی‌های متفاوت در درجه اول به رطوبت پیشین نسبت داده می‌شود که ممکن است به جهش ناگهانی در مقادیر شماره منحنی روزانه منجر شود. در این مدل فرض می‌شود که پتانسیل نگهداشت آب در خاک مدل  $S_t$  ثابت است از این رو در ۵ روز ابتدایی شبیه‌سازی  $CN_t = CN_0$  می‌باشد. با استفاده از رابطه ۶ می‌توان  $S_t$  از روی شماره منحنی  $CN_0$  روزهای اول تعیین نمود.

هنگامی که تعداد روزهای در دسترس بیش از ۵ روز شود رطوبت پیشین به نمایندگی از رطوبت اولیه موجود ( $AM_t$ ) در حوضه مورد بررسی قرار می‌گیرد:

$$AM_t = \beta \sqrt{ANTRF_t} \quad (10)$$

که در آن،  $\beta$  در آن ضریب سابقه رطوبت است که توسط بهینه‌سازی تعیین می‌گردد.

$$DR_t = C_2 \times (S_{abs} - S_t - \theta_f) \quad (18)$$

که در آن،  $C_2$  ضریب زهکشی خاک،  $S_{abs}$  حداکثر پتانسیل ذخیره آب،  $S_t$  آب ذخیره شده در  $t$  امین روز  $DR_t$  میزان زهکشی در زمان  $t$  و  $\theta_f$  ظرفیت خاک مزرعه است.

**جریان میانی:** جریان خروجی از خاک اشباع نشده به دو بخش تقسیم می‌شود: (۱) نفوذ یا جریان میانی در جهت جانبی و (۲) نفوذ عمودی آب به جریان آب زیرزمینی. بخش اول یا همان جریان جانبی به‌عنوان کسری از مقدار جریان زهکشی در نظر گرفته می‌شود.

$$THR_t = C_3 \times DR_t \quad (19)$$

که در آن،  $THR_t$  جریان میانی در زمان  $t$  و  $C_3$  ضریب رواناب خاک اشباع‌نشده منطقه است.

**نفوذ زیرسطحی:** بخش دیگری از آب زهکشی است که در منطقه غیراشباع خاک به‌صورت عمودی و مستقیم در حرکت است و به‌میزان نفوذ پذیری خاک وابسته است.

$$PR_t = (1 - C_3) \times DR_t \quad (20)$$

که در آن،  $PR_t$  نفوذ در زمان  $t$  می‌باشد.

**نفوذ عمیق:** ذخیره اشباع به‌عنوان یک منبع غیرخطی در نظر گرفته می‌شود و از این مخزن میزان جریان خروجی (نفوذ عمیق) که تابعی نمایی از نفوذ عمیق است طبق رابطه زیر تولید می‌شود:

$$DSP_t = (PR_t)^E \quad (21)$$

که در آن،  $DSP_t$  نفوذ عمیق در زمان  $t$  و  $E$  توان آب زیرزمینی منطقه است. نفوذ عمیق می‌تواند هم در جهت مایل و هم در جهت عمودی در میان ذخیره

**نفوذ:** بخشی از آب باران رسیده به زمین، به‌عنوان رواناب سطحی مستقیم پس از تلفات اولیه در لایه بالایی خاک نفوذ می‌کند.

$$F_t = P_t - I_{a(t)} - RO_t \quad (14)$$

**تبخیر و تعرق:** مقداری از آب از دست رفته یا برگشته به جو را می‌توان در قالب تبخیر و تعرق از مجموع تبخیر روزانه و تعرق خاک در حوضه به‌دست آورد.

۱- **تبخیر:** تبخیر روزانه از فرمول زیر محاسبه می‌شود که در آن  $EVP_t$  تبخیر تعرق روزانه بر اساس داده‌های میدانی می‌باشد. همچنین PANC یک ضریب است که برای ژوئن تا سپتامبر ۰/۸ و برای اکتبر تا نوامبر ۰/۶ در نظر گرفته شده است.

$$EV_t = PANC \times EVP_t \quad (15)$$

۲- **تعرق:** تعرق از سطح خاک به‌عنوان تابعی از آب ذخیره شده در خاک، با نقطه پژمردگی بالاتر از خاک در نظر گرفته شده است.  $C_1$  ضریب تعرق از خاک منطقه،  $\theta_w$  نقطه پژمردگی خاک،  $S_{abs}$  حداکثر آب ذخیره شده ممکن  $S_t$  میزان ذخیره ممکن در  $t$  امین روز است.

$$TR_t = C_1 \times (S_{abs} - S_t - \theta_w) \quad (16)$$

$$ET_t = EV_t + TR_t \quad (17)$$

در نهایت تبخیر-تعرق واقعی از مجموع تبخیر و تعرق حاصل می‌شود:

**زهکشی:** آب زهکشی آبی است که به‌عنوان خروجی از یک مخزن خطی در نظر گرفته می‌شود و تنها زمانی که رطوبت خاک منطقه افزایش یافته و از  $\theta_f$  ظرفیت مزرعه بیش‌تر شود حاصل می‌شود.



بیلان هیدرولوژیکی: در نظر گرفتن رابطه بیلان رطوبتی خاک در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی ضروریست. مدل SCS-CN ویرایش شده در این پژوهش نشان‌دهنده یک مدل تعادلی آب-خاک است.  $S_t$  فضای فعلی موجود برای نگهداشت آب می‌باشد که باید با در نظر گرفتن میزان تبخیر-تعرق از دست رفته، میزان زهکشی از منطقه مرطوب خاک و نفوذ روزانه در ناحیه غیراشباع به‌صورت زیر اصلاح گردد:

$$S_t = S_{(t-1)} - F_{(t-1)} + ET_{(t-1)} + DR_{(t-1)} \quad (25)$$

که در آن،  $S_{(t-1)}$  حداکثر پتانسیل ذخیره شده در روز گذشته،  $ET_{(t-1)}$  تبخیر تعرق در روز گذشته،  $DR_{(t-1)}$  میزان زهکشی در روز گذشته،  $F_{(t-1)}$  نفوذ در روز گذشته می‌باشد که همه بر حسب میلی‌متر می‌باشند.

همچنین میزان نفوذ نیز بر اساس معادله بیلان آب محاسبه می‌شود:

$$F_{(t-1)} = P_{(t-1)} - I_{(t-1)} - RO_{(t-1)} \quad (26)$$

با شرط اینکه،  $F \geq 0$  و  $P_e(t) \geq 0$

توسعه مدل شبیه‌سازی پیوسته: استفاده از مدل شبیه‌سازی هیدرولوژیکی بلندمدت (شکل ۲) برای توصیف حوضه آبریز هیدرولوژیکی با توجه به تغییرات زمانی و مکانی فرآیندهای مختلف درگیر در مکانیزم رواناب پیشنهاد می‌شود. همچنین با استفاده از روش تغییر یافته SCS-CN مفاهیم ذخیره‌سازی حوضه آبریز پاسخ بهتری داده می‌شود. بنابراین ۱۴ پارامتر مؤثر این مدل که باید واسنجی گردند عبارتند از:

$$CN_0, K, \lambda, \alpha, \beta, C_1, C_2, C_3, BCOEF, E, S_{abs}, \theta_f, \theta_w, PANC$$

اشباع می‌باشد. این نفوذ خود به دو بخش تقسیم می‌شود: (۱) جریان آب زیرزمینی فعال یا همان جریان پایه و (۲) جریان آب زیرزمینی غیرفعال یا نفوذ عمقی به درون سفره‌های آب زیرزمینی.

۱- جریان پایه (نفوذ عمقی فعال): منشا جریان پایه یک رودخانه، جریان زیر زمینی رها شده از آبخوان آن می‌باشد. این جریان آب فعال زیرزمینی که به جریان تاخیری هم شناخته می‌شود به‌عنوان جریان خروجی از یک منبع غیرخطی با رابطه زیر مدل می‌شود:

$$BF_t = BCOEF \times DSP_t \quad (22)$$

که در آن، BCOEF ضریب رواناب آب زیرزمینی منطقه می‌باشد.

۲- نفوذ عمقی غیرفعال: جریان آب زیرزمینی غیرفعال در سفره‌ها نفوذ عمقی نامیده می‌شود، که از آب زیرزمینی منطقه اشباع در جهت عمودی حاصل می‌شود و به‌عنوان یک کاهش‌دهنده از ذخیره اشباع در نظر گرفته می‌شود.

$$DPR_t = (1 - BCOEF) \times DSP_t \quad (23)$$

که در آن،  $DPR_t$  نفوذ عمقی غیرفعال در زمان  $t$  و BCOEF ضریب رواناب آب زیرزمینی منطقه است. در این جا تأکید می‌شود که مدل پیشنهادی نفوذ عمیق را که خود دارای دو بخش فعال و غیرفعال می‌باشد در نظر می‌گیرد.

رواناب کلی: رواناب کلی  $TRO_t$  از مجموع سه جزء رواناب سطحی، جریان میانی و جریان پایه حاصل می‌شود.

$$TRO_t = RO_t + THR_t + BF_t \quad (1-24) \quad \text{if } t \leq 5 \text{ day}$$

$$TRO_t = SRO_t + THR_t + BF_t \quad (2-24) \quad \text{if } t > 5 \text{ day}$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(cc - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (27)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{O_i} - Q_{S_i})^2} \quad (28)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{S_i} - Q_{O_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{O_i} - \bar{Q}_O)^2} \quad (29)$$

که در آن‌ها،  $Q_{O_i}$  دبی مشاهده‌ای،  $Q_{S_i}$  دبی شبیه‌سازی شده،  $\bar{Q}_O$  میانگین دبی مشاهداتی،  $n$  تعداد داده‌های مشاهداتی،  $cc$  ضریب همبستگی خطی بین  $Q_S$  و  $Q_O$ ،  $\alpha$  برابر نسبت انحراف معیار  $Q_S$  بر انحراف معیار  $Q_O$  و  $\beta$  برابر نسبت میانگین  $Q_S$  بر میانگین  $Q_O$  می‌باشد. لازم به ذکر است معیار معرفی شده در رابطه ۲۷، جدیدترین معیار ارزیابی مدل‌های هیدرولوژیکی می‌باشد که توسط گوپتا و همکاران (۲۰۰۹) ارائه گردیده و در حقیقت تغییر یافته معیار ناش - ساتکلیف می‌باشد.

### نتایج و بحث

۱- مدل اصلاح شده شماره منحنی: مدل تشریح شده (SCS-CN اصلاح شده) با استفاده از رطوبت پیشین، مقدار نگهداشت آب را محاسبه می‌کند. همچنین میزان تلفات آب در بخش تبخیر- تعرق و میزان آب نفوذ کرده به زمین و زهکشی از خاک را به‌روزرسانی می‌کند.

محدوده اولیه انتخاب شده به همراه مقادیر نهایی پارامترهای واسنجی برای دو حوضه مورد بررسی در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

که همگی در رابطه‌های قبل معرفی شده‌اند و با واسنجی آن‌ها مدل خروجی مقادیر قابل‌قبولی را شبیه‌سازی می‌نماید. در این مدل تعداد پارامترهای درگیر در مدل نسبتاً زیاد است اما این پارامترها تأثیر قابل‌توجهی در به‌دست آوردن راندمان بالا دارد همچنین از ویژگی‌های متمایزکننده این مدل نه تنها پیش‌بینی جریان است بلکه جزئیات آن یا همان اجزای هیدرولوژیکی حوضه را نیز قادر است محاسبه نماید.

**مدل مفهومی Hymod:** مدل Hymod نیز به‌دلیل دقت بالا، سادگی و همچنین بار محاسباتی کم آن در این پژوهش برای مقایسه به‌کار گرفته شده است. این مدل به تعداد زیادی توسط پژوهشگران مختلف و به‌منظور انجام مقایسه با مدل توسعه داده شده خودشان و یا مقایسه روش‌های مختلف واسنجی و یا تحلیل عدم قطعیت مورد استفاده قرار گرفته است (۲۸، ۲۹). از آن‌جا که شرح کامل مدل نامبرده در پژوهش‌های زیادی (۴، ۳۰، ۲۸) به تفصیل بیان شده است بنابراین در این‌جا از ذکر جزئیات بیش‌تر در این‌باره صرف‌نظر می‌شود.

قابل ذکر است ورودی‌های هر دو مدل بارش رواناب ارائه شده: بارش، تبخیر- تعرق می‌باشد که با دبی روزانه نیز واسنجی انجام می‌گیرد.

**معیارهای ارزیابی و سنجش مدل:** جهت ارزیابی و سنجش مدل از سه معیار کلینگ- گوپتا، ناش- ساتکلیف و ریشه میانگین مربعات خطا استفاده گردید که رابطه آن‌ها در زیر آمده است:

جدول ۲- مقادیر محدوده اولیه پارامترها و مقادیر بهینه واسنجی شده در حوضه لیف.

**Table 2. Ranges and initial estimates of parameters in Leaf River watershed (SCS-CN-Based model).**

شماره number	پارامتر parameters	حد اولیه initial Ranges	مقدار برآورد شده Estimated value	شماره Number	پارامتر parameters	حد اولیه initial Ranges	مقدار برآورد شده Estimated value
1	CN <sub>0</sub>	50-99	67.200	8	C <sub>3</sub>	0.01-10	0.68
2	K	0.001-5	3.779	9	BCOEF	0.005-1	0.893
3	λ	0.01-1	0.690	10	E	0.10-2	1.951
4	α	0.01-10	5.715	11	S <sub>abs</sub>	20-5000	189.121
5	β	0.1-10	8.731	12	θ <sub>f</sub>	50-500	94.347
6	C <sub>1</sub>	0.01-1	0.01	13	θ <sub>w</sub>	5-100	17.493
7	C <sub>2</sub>	0.001-1	0.147	14	PANC	0.5-0.9	0.824

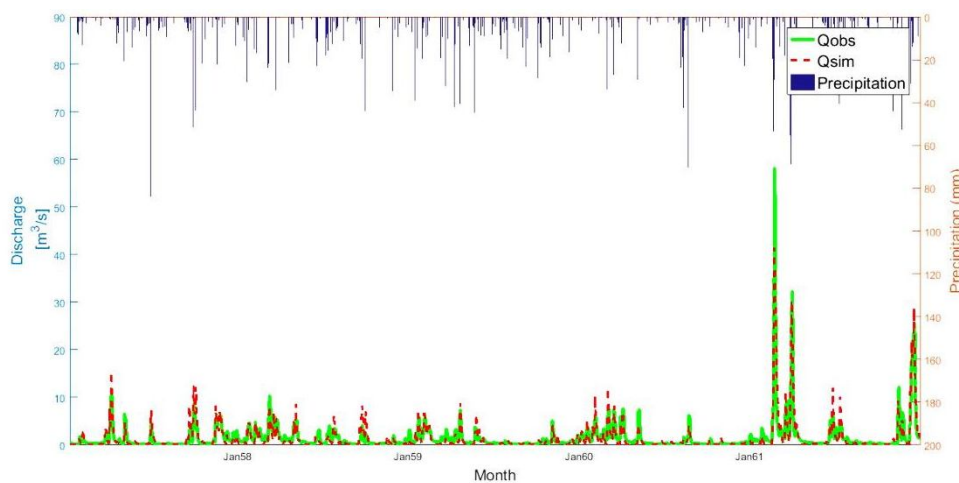
جدول ۳- مقادیر محدوده اولیه پارامترها و مقادیر بهینه واسنجی شده در حوضه قره‌سو.

**Table 3. Ranges and initial estimates of parameters in Qarasou subbasin (SCS-CN-Based model).**

شماره number	پارامتر parameters	حد اولیه initial Ranges	مقدار برآورد شده Estimated value	شماره Number	پارامتر parameters	حد اولیه initial Ranges	مقدار برآورد شده Estimated value
1	CN <sub>0</sub>	50-99	71.312	8	C <sub>3</sub>	0.05-1	0.643
2	K	0.0009-120	88.228	9	BCOEF	0.001-1	0.767
3	Λ	0.01-15	7.261	10	E	0.10-5	2.285
4	A	0.01-20	8.974	11	S <sub>abs</sub>	50-5000	200.432
5	B	0.1-20	6.583	12	θ <sub>f</sub>	50-100	75.618
6	C <sub>1</sub>	0.01-10	0.01	13	θ <sub>w</sub>	1-100	45.617
7	C <sub>2</sub>	0.001-1	0.00189	14	PANC	0.001-1	0.669

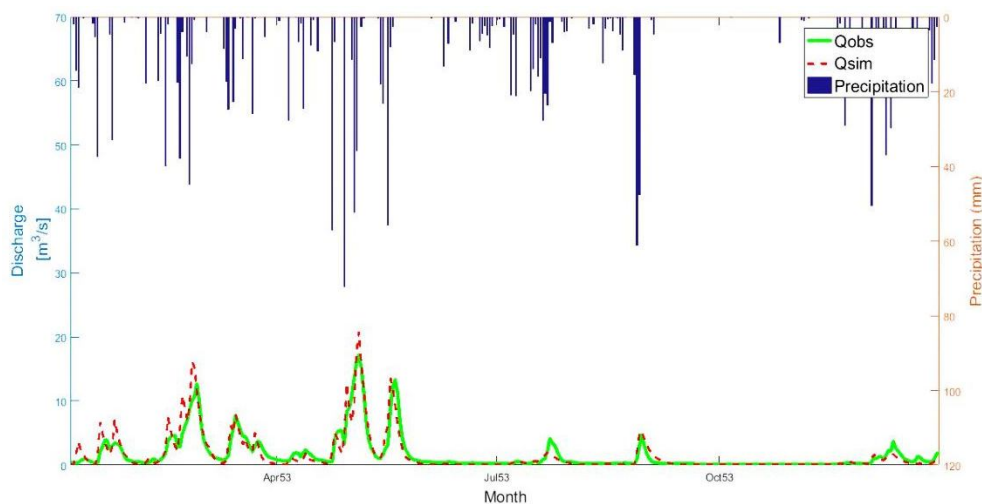
حوضه لیف در دوره واسنجی ۱۹۵۷-۱۹۶۱ بهینه شده و صحت‌سنجی نتایج با کمک داده‌های مربوط به سال ۱۹۵۳ انجام گردید (شکل‌های ۴ و ۵).

با کمک الگوریتم PSO کدنویسی شده در محیط متلب ۱۴ پارامتر مدل حاضر (لیست شده در جدول‌های ۲ و ۳)، با محدوده‌های مشخص شده برای



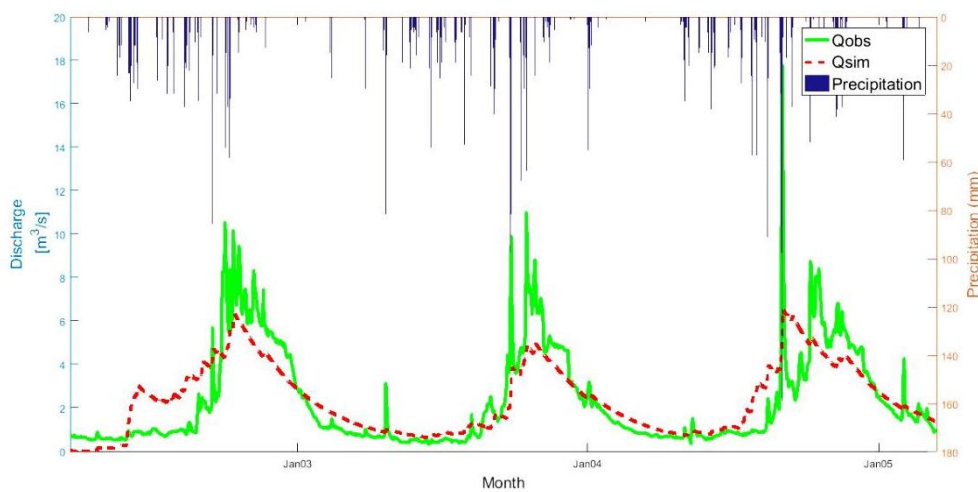
شکل ۴- رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مدل SCS-CN اصلاح شده در دوره واسنجی در حوضه لیف.

**Figure 4. Observed runoff and simulated runoff model during the calibration period in Leaf River watershed.**

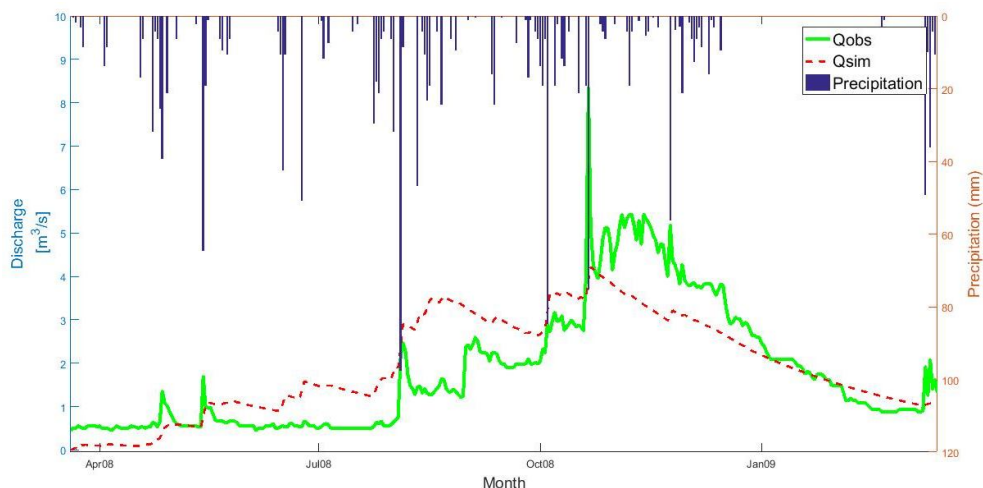


شکل ۵- رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مدل SCS-CN اصلاح شده در دوره صحت‌سنجی در حوضه لیف.  
**Figure 5. Observed runoff and simulated runoff model during the Validation period in Leaf River watershed.**

همچنین این عمل برای حوضه قره‌سو در دوره واسنجی (۱۳۸۱-۱۳۸۴) و صحت‌سنجی نتایج با استفاده از داده‌های مربوط به سال ۱۳۸۷ انجام شده است (شکل‌های ۶ و ۷).



شکل ۶- رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مدل SCS-CN اصلاح شده در دوره واسنجی برای حوضه قره‌سو.  
**Figure 6. Observed runoff and simulated runoff model during the calibration period in Qarasou subbasin.**



شکل ۷- رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مدل SCS-CN اصلاح شده در دوره صحت‌سنجی در زیرحوضه قره‌سو.

Figure 7. Observed runoff and simulated runoff model during the validation period in Qarasou subbasin.

همین موضوع باعث ایجاد خطای بیش‌تر در مرحله صحت‌سنجی (شکل ۷) می‌گردد. در مجموع نتایج ضرایب ناش- ساتکلیف به‌ترتیب برای حوضه لیف در دوره‌های واسنجی (۰/۸۱) و صحت‌سنجی (۰/۸۳) و برای حوضه قره‌سو در دوره واسنجی (۰/۶۱) و صحت‌سنجی (۰/۶۴) نشان‌دهنده شبیه‌سازی مناسب و قابل‌قبول می‌باشد. همچنین مقادیر درصد خطای نسبی رواناب محاسباتی و مشاهداتی در هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی در جدول‌های ۴ و ۵ قرار گرفته است. ردیف اول مربوط به دوره صحت‌سنجی و بقیه مربوط به واسنجی می‌باشد.

همان‌طور که از شکل‌های ۴ و ۵ نتیجه می‌شود، مقادیر رواناب مشاهداتی به خوبی شبیه‌سازی شده و در حقیقت تطابق بالای دو هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. مقایسه مقادیر دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده شده با کمک ضریب ناش- ساتکلیف (NSE) در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی انجام گرفت. نتیجه‌گیری نسبتاً مشابه برای شکل‌های ۶ و ۷ (حوضه قره‌سو) قابل حصول می‌باشد. مدل در این حوضه قادر به شبیه‌سازی دبی‌های اوج در دوره واسنجی نبوده و آن‌ها را کم تخمین زده است که دلیل احتمالی آن نقص داده و کیفیت پایین آن‌ها می‌باشد.

جدول ۴- میزان بارش سالانه، رواناب مشاهده شده، رواناب محاسبه شده و خطای نسبی مدل در حوضه لیف.

Table 4. Annual rainfall, observed runoff, simulated runoff and relative error in Leaf River watershed.

شماره number	سال year	بارندگی (mm) Rainfall (mm)	رواناب مشاهده شده (mm) observed runoff (mm)	رواناب محاسبه شده (mm) simulated runoff (mm)	درصد خطای نسبی relative error
1	1953	4.413	1.607	1.571	2.240
2	1957	4.041	1.141	1.196	-4.82
3	1958	4.027	1.309	1.057	19.25
4	1959	3.637	1.004	0.812	19.12
5	1960	3.487	1.096	0.833	23
6	1961	5.667	2.861	2.900	-1

جدول ۵- میزان بارش سالانه، رواناب مشاهده شده، رواناب محاسبه شده و خطای نسبی مدل در حوضه قره‌سو.

**Table 5. Annual rainfall, observed runoff, simulated runoff and relative error in Qarasou subbasin.**

شماره number	سال year	بارندگی (mm) Rainfall (mm)	رواناب مشاهده شده (mm) observed runoff (mm)	رواناب محاسبه شده (mm) simulated runoff (mm)	درصد خطای نسبی relative error
1	1387	4.223	1.809	1.936	-7.020
2	1381	4.370	2.430	2.582	-6.255
3	1382	4.306	2.064	1.893	8.284
4	1383	5.190	2.422	2.597	-7.225

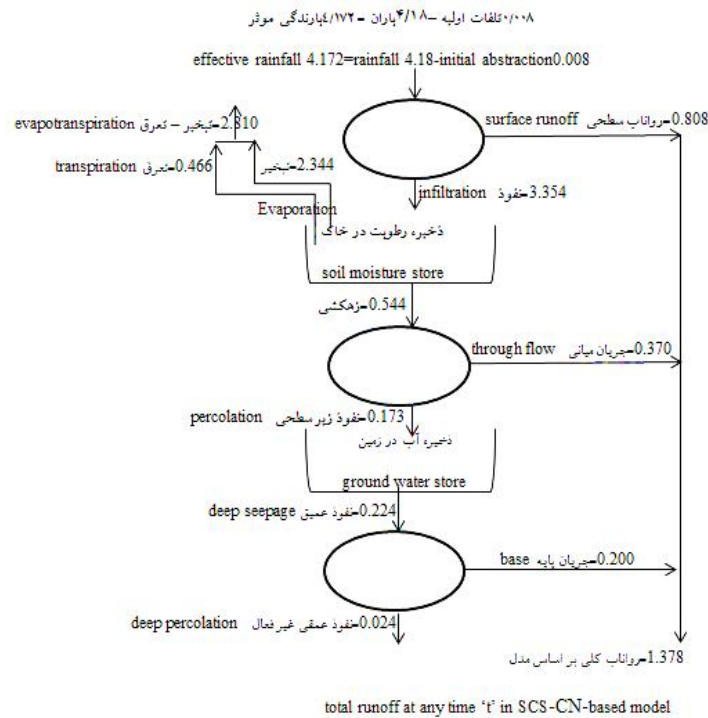
همان‌طور که در جدول‌های بالا مشاهده می‌شود درصد خطای نسبی که از اختلاف رواناب مشاهده شده و محاسبه شده بر رواناب مشاهده شده حاصل می‌شود عملکرد رضایت‌بخشی از مدل را در دو حوضه نشان می‌دهد. اعداد منفی به معنی بالاتر بودن پیش‌بینی مدل از مقدار واقعی رواناب می‌باشد. جدول‌های ۶ و ۷ مقادیر عددی مؤلفه‌های مختلف

هیدرولوژیکی محاسبه شده توسط مدل متناظر با دو شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب برای دو حوضه لیف و زیرحوضه قره‌سو نشان می‌دهند که با استفاده از نتایج آن می‌توان فرآیندهای مغلوب (فرآیندهای زیر ده درصد) و همچنین فرآیندهای غالب در حوضه را مشخص نمود (۹).

جدول ۶- برآورد اجزای هیدرولوژیکی مدل (درصد) در حوضه لیف.

**Table 6. Percent estimates of hydrological components in Leaf River watershed.**

شماره No.	اجزا Components	درصد (%) Percent (%)	میانگین (mm) Average (mm)	شماره No.	اجزا components	درصد (%) Percent (%)	میانگین (mm) Average (mm)
1	بارندگی (P) Rainfall	100	4.18	9	تبخیر (EV <sub>t</sub> ) evaporation	56.076	1.5613
2	تلفات اولیه (I <sub>a</sub> ) initial abstraction	0.191	0.008	10	تعرق (TR <sub>t</sub> ) transpiration	11.148	0.7111
3	بارش موثر (P <sub>e</sub> ) effective rainfall	99.808	4.172	11	تبخیر و تعرق (EV <sub>t</sub> ) evaporation	67.224	2.2724
4	نفوذ (F <sub>t</sub> ) infiltration	80.239	3.354	12	رواناب سطحی (RO <sub>t</sub> ) surface runoff	19.330	0.808
5	زهکشی (DR <sub>t</sub> ) drainage	13.014	0.544	13	جریان میانی (THR <sub>t</sub> ) Through flow	8.851	0.370
6	نفوذ زیر سطح (PR <sub>t</sub> ) percolation	4.138	0.173	14	جریان پایه (BF <sub>t</sub> ) base flow	4.784	0.200
7	نفوذ عمیق (DSP <sub>t</sub> ) deep seepage	5.358	0.224	15	رواناب کلی (TRO <sub>t</sub> ) total runoff	32.966	1.378
8	نفوذ عمقی غیرفعال (DPR <sub>t</sub> ) deep percolation	0.574	0.024				



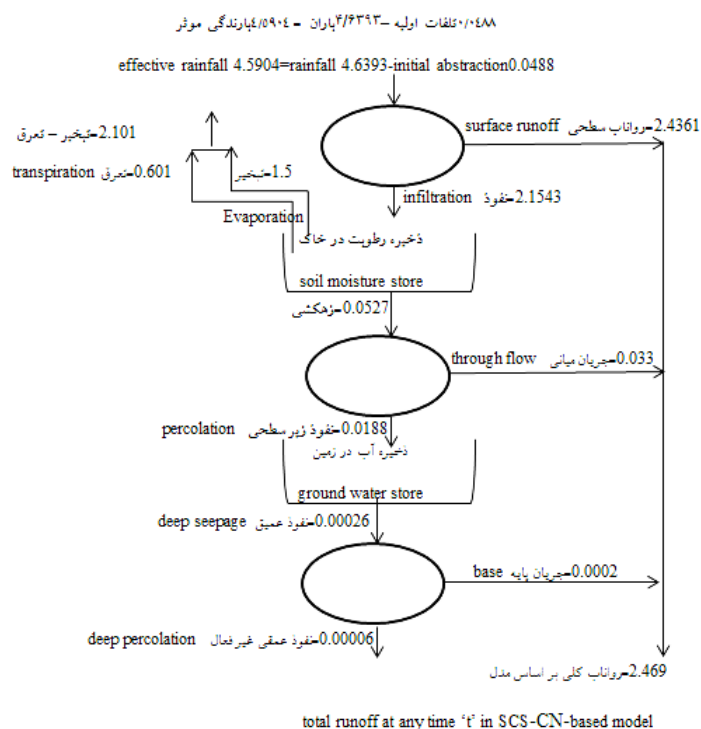
شکل ۸- برآورد اجزای هیدرولیکی مدل در حوضه لیف به صورت شماتیک.

Figure 8. Schematic estimates of hydrological components in Leaf River watershed.

جدول ۷- برآورد اجزای هیدرولوژیکی مدل (درصد) برای حوضه قره‌سو.

Table 7. Percent estimates of hydrological components in Qarasou subbasin.

شماره No.	اجزا components	درصد (%) Percent (%)	میانگین (mm) Average (mm)	شماره No.	اجزا components	درصد (%) Percent (%)	میانگین (mm) Average (mm)
1	بارندگی (P) Rainfall	100	4.639	9	تبخیر (EV <sub>t</sub> ) evaporation	32.3345	1.500
2	تلفات اولیه (I <sub>a</sub> ) initial abstraction	1.0519	0.0488	10	تعرق (TR <sub>t</sub> ) transpiration	12.9338	0.601
3	بارش موثر (P <sub>e</sub> ) effective rainfall	98.9523	4.5904	11	تبخیر و تعرق (ET <sub>t</sub> ) evaporation	45.2683	2.1016
4	نفوذ (F <sub>t</sub> ) infiltration	46.4388	2.1543	12	رواناب سطحی (RO <sub>t</sub> ) surface runoff	52.5134	2.4361
5	زهکشی (DR <sub>t</sub> ) drainage	1.1364	0.05272	13	جریان میانی (THR <sub>t</sub> ) Through flow	0.7307	0.0339
6	نفوذ زیر سطح (PR <sub>t</sub> ) percolation	0.4054	0.018816	14	جریان پایه (BF <sub>t</sub> ) base flow	0.0043	0.0002
7	نفوذ عمیق (DSP <sub>t</sub> ) deep seepage	0.0056	0.00026	15	رواناب کلی (TRO <sub>t</sub> ) total runoff	53.22	2.469
8	نفوذ عمقی غیر فعال (DPR <sub>t</sub> ) deep percolation	0.001	0.0000633				



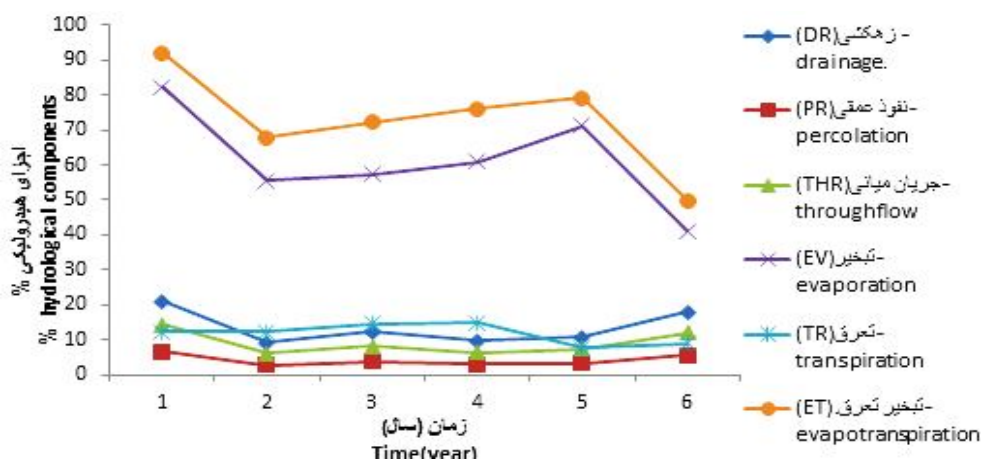
شکل ۹- برآورد اجزای هیدرولیکی مدل در زیرحوضه قره‌سو به صورت شماتیک.

Figure 9. Schematic estimates of hydrological components in Qarasou subbasin.

نمودارهای ۱۰ (حوضه لیف) و ۱۱ (حوضه قره‌سو) مقادیر مؤلفه‌های موجود در مخزن اول مدل محاسبه شده در طی سال‌های شبیه‌سازی را نشان می‌دهند. با توجه به نمودارها و نظر به معادلات پیوستگی ارائه شده در مقاله به خوبی قابل مشاهده است که مقدار زهکشی به جریان میانی و نفوذ عمقی تقسیم شده و به عبارت دیگر مجموع جریان میانی و نفوذ عمقی برابر با زهکشی می‌باشد.

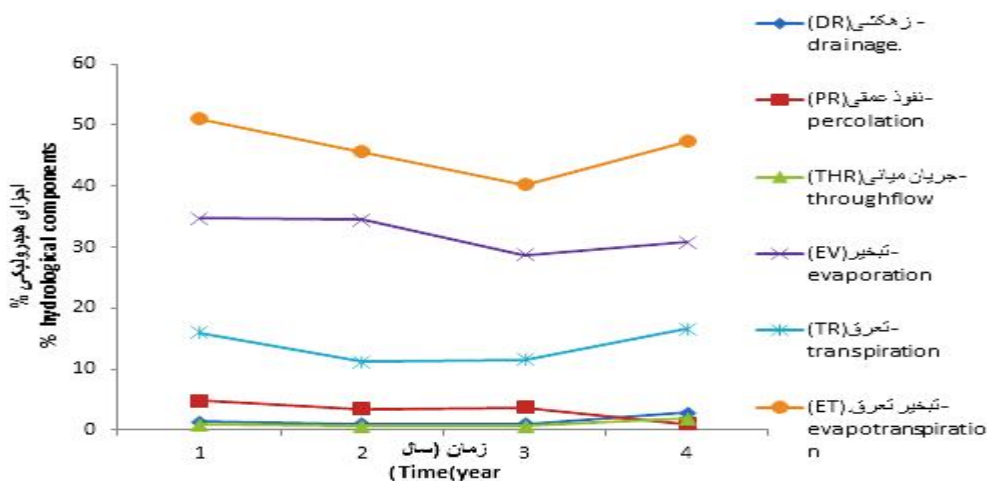
همان‌طور که از جدول‌های ۶ و ۷ مشخص شده است نفوذ، تبخیر و رواناب سطحی به ترتیب سه مؤلفه غالب حوضه لیف و عکس ترتیب فوق به عنوان مؤلفه‌های غالب حوضه قره‌سو ارزیابی شده‌اند. عموماً این نتیجه برای حوضه‌های خشک و نیمه‌خشک با متوسط دمای بالا و بارش اندک که اکثر حوضه‌های داخل کشور را نیز شامل می‌باشد صادق می‌باشد.





شکل ۱۰- نتایج حاصل از مدل در مخزن اول (حوضه لیف).

Figure 10. The results of the model in the first tanks in Leaf River watershed.

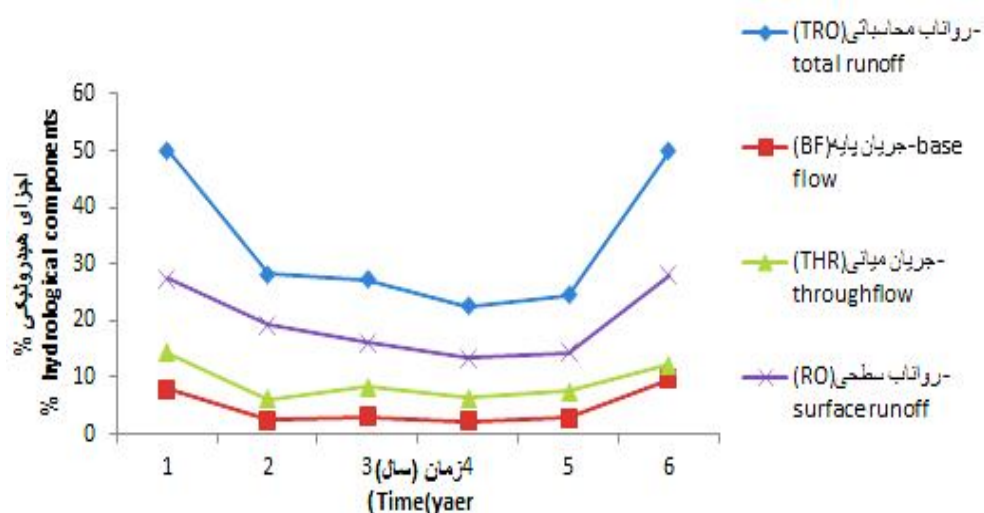


شکل ۱۱- نتایج حاصل از مدل در مخزن اول (زیرحوضه قره‌سو).

Figure 11. The results of the model in the first tanks in Qarasou.subbasin.

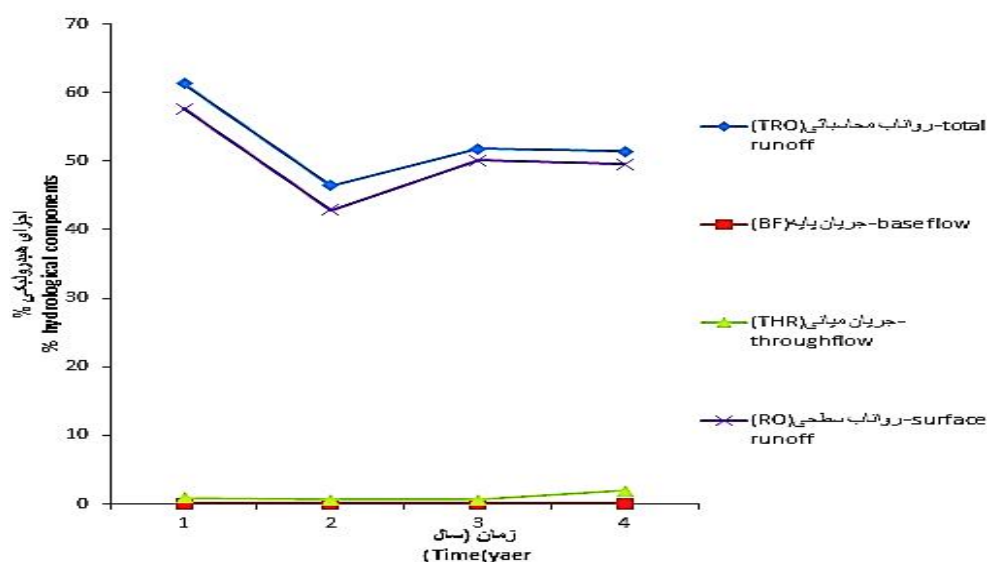
مجموع خروجی سه مخزن تعریف شده در مدل (رواناب سطحی، جریان میانی و جریان پایه) حاصل می‌شود.

همچنین شکل‌های ۱۲ (حوضه لیف) و ۱۳ (حوضه قره‌سو) نیز مقادیر مؤلفه‌های موجود در مخزن دوم در طی سال‌های شبیه‌سازی مدل را به خوبی نمایش می‌دهند. رواناب کلی بر اساس این مدل از



شکل ۱۲- نمایش اجزای مدل در برآورد رواناب کلی در حوضه لیف.

Figure 12. Hydrological components of the model showing the overall runoff in Leaf River watershed.



شکل ۱۳- نمایش اجزای مدل در برآورد رواناب کلی در حوضه قره‌سو.

Figure 13. Hydrological components of the model showing the overall runoff in Qarasou subbasin.

حسب درصد مقایسه نمود. به‌عنوان مثال برای حوضه لیف (شکل ۱۲) سهم دبی پایه و جریان میانی در تشکیل رواناب نهایی بیش‌تر از حوضه قره‌سو (شکل ۱۳) بوده و مکانیزم تولید رواناب در دو حوضه را به‌خوبی نشان می‌دهد.

نمودارهای ۱۰ تا ۱۳ صورت دیگر نمایش جدول‌های ۶ و ۷ می‌باشد که در آن‌ها محور عمودی نشان‌دهنده درصد مقادیر محاسبه‌شده توسط مدل برای هر یک از مؤلفه‌های مدل می‌باشد. با مشاهده آن‌ها به راحتی می‌توان سهم هر یک از اجزای هیدرولوژیکی در مدل را از میزان بارش ورودی بر

۲- مقایسه دو مدل مفهومی: مقایسه دو مدل بر مبنای معیارهای ارزیابی ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب ناش- ساتکلیف (NSE) و ضریب کلینگ- گوپتا (KGE) برای یک دوره یکسان واسنجی و صحت‌سنجی صورت گرفته است. ضرایب رواناب نیز محاسبه شده است که بیانگر پتانسیل تولید رواناب حوضه می‌باشد (جدول‌های ۸ و ۹).

جدول ۸- مقایسه مقادیر معیارهای عملکرد و ضرایب رواناب دو مدل (حوضه لیف).

**Table 8. Comparison of performance criteria and runoff ratio for two hydrological models (Leaf River watershed).**

مدل Model				شاخص Indicator
مدل مفهومی SCS-CN conceptual model SCS-CN		مدل مفهومی Hymod conceptual model Hymod		
واسنجی calibration	صحت‌سنجی Validation	واسنجی calibration	صحت‌سنجی Validation	
0.8129	0.8327	0.8521	0.8354	(NSE)
1.401	2.53	1.241	2.474	(RMSE)
0.8715	0.8609	0.86	72.44	(KGE)
0.32	0.27	0.34	0.31	ضرایب رواناب runoff ratio

جدول ۹- مقایسه مقادیر معیارهای عملکرد و ضرایب رواناب دو مدل (حوضه قره‌سو).

**Table 9. Comparison of performance criteria and runoff ratio for two hydrological models (Qarasou subbasin).**

مدل Model				شاخص Indicator
مدل مفهومی SCS-CN conceptual model SCS-CN		مدل مفهومی Hymod conceptual model Hymod		
واسنجی calibration	صحت‌سنجی Validation	واسنجی calibration	صحت‌سنجی Validation	
0.64	0.61	0.75	0.72	(NSE)
1.32	0.89	1.24	0.76	(RMSE)
0.65	0.66	0.85	0.78	(KGE)
0.50	0.35	0.50	0.45	ضرایب رواناب runoff ratio

اشاره شد نتایج نشان از برتری نسبی مدل Hymod دارد که دلیل آن را می‌توان در پیچیدگی‌ها و عدم قطعیت بالاتر پارامترها و روابط مدل مبتنی بر شماره منحنی جستجو کرد. ذکر این نکته بسیار دارای اهمیت است که مدل Hymod تنها رواناب خروجی را شبیه‌سازی کرده در حالی که مدل رایج شده قادر به مدل‌سازی تمامی اجزای هیدرولوژیکی و به‌روزرسانی آن‌ها بوده و این ویژگی منحصر به فردی می‌باشد که در کم‌تر مدلی نهفته است.

به‌طور کلی مقایسه نتایج دو مدل (جدول‌های ۸ و ۹) بیانگر برتری نسبی مدل hymod در دو حوضه می‌باشد که دلیل آن را می‌توان در سادگی روابط حاکم بر مدل و تعداد پارامترهای کم‌تر آن جستجو کرد. در حالی که مدل ارائه شده جدید با وجود دقت کم‌تر نتایج خروجی قادر به شبیه‌سازی مؤلفه‌های مختلف هیدرولوژیکی حوضه و تعیین فرآیندهای غالب حوضه می‌باشد.

جدول ۱۰ حاوی نتایج مقایسه نتایج دو مدل بر اساس درصد خطای نسبی می‌باشد. همان‌طور که

جدول ۱۰- مقایسه میانگین بارندگی، رواناب مشاهده‌ای، رواناب محاسبه‌ای و درصد خطای نسبی دو مدل.

Table 10. Comparison of average rainfall, observed runoff, simulated runoff and relative error for two hydrological models.

حوضه مورد مطالعه	مدل مفهومی SCS-CN conceptual model SCS-CN				مدل مفهومی Hymod conceptual model Hymod			
	میانگین بارندگی (mm)	میانگین رواناب مشاهده شده (mm)	میانگین رواناب محاسبه شده (mm)	میانگین درصد خطای نسبی (mm)	میانگین رواناب محاسبه شده (mm)	میانگین رواناب مشاهده شده (mm)	میانگین درصد خطای نسبی (mm)	
	average rainfall (mm)	average observed runoff (mm)	simulated runoff (%)	average relative error (mm)	average observed runoff (mm)	simulated runoff (%)	average relative error (mm)	
حوضه لیف	4.18	1.49	1.35	32.29	9.395	1.45	34.68	2.68
حوضه قره‌سو	4.63	2.31	2.36	50.97	-2.164	2.34	50.53	-1.29

نسبت به سایر مدل‌های مفهومی برآورد اجزای هیدرولوژیکی مدل و تعیین غالب یا مغلوب بودن آن‌ها می‌باشد. در این مطالعه به بررسی عملکرد مدل SCS-SN اصلاح شده در دو حوضه لیف آمریکا به‌عنوان حوضه معرف (در بسیاری مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است) و زیرحوضه قره‌سو در داخل کشور پرداخته شد. ارزیابی مدل در حوضه لیف با استفاده از مقادیر آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ضریب ناش- ساتکلیف (NES) و ضریب کلینگ- گوپتا (KGE) به‌ترتیب در دوره

### نتیجه‌گیری کلی

واسنجی مدل توسط الگوریتم PSO (کدنویسی شده در زبان برنامه‌نویسی متلب) و با تکرار ۹۰۰۰ مرتبه اجرای مدل، انجام شد. بدین ترتیب که، ابتدا متغیرهای تصمیم (پارامترهای مدل در محدوده مشخص شده) به‌صورت تصادفی مقداردهی اولیه شده و سپس الگوریتم PSO اجرا شده و سری پارامتر بهینه محاسبه گردید.

مدل SCS-CN اصلاح شده مدلی مفهومی بوده که رواناب را با استفاده از داده‌های بارش و تبخیر - تعرق پتانسیل روزانه محاسبه نموده و مزیت آن

برآورد اجزای هیدرولوژیکی مدل و تعیین فرآیندهای غالب حوضه می‌باشد. به طوری که در دو حوضه مورد مطالعه در این پژوهش سه مؤلفه نفوذ، تبخیر و رواناب سطحی به عنوان فرآیندهای غالب شناخته شده و بنابراین در انتخاب روش‌های شبیه‌سازی آن‌ها باید بیش‌ترین حساسیت در نظر گرفته شود.

بنابراین مدیریت حوضه آبریز با کمک خروجی‌های خاص ناشی از این نوع مدل‌ها (درصد مقادیر اجزاء مختلف رابطه بیلان هیدرولوژیکی) به نحو بسیار مؤثرتری قابل حصول می‌باشد. با توجه به ویژگی مهم مذکور و نظر به معیارهای عملکرد ارائه شده، دقت خوب و رضایت‌بخش مدل SCS-CN اصلاح‌شده، این روش را به عنوان ابزاری مناسب برای شبیه‌سازی رواناب روزانه در مناطق بدون شبکه هیدرومتری با کم‌ترین امکانات، کم‌ترین هزینه و کوتاه‌ترین زمان معرفی می‌گردد.

واسنجی (۰/۴۰۱، ۰/۸۱ و ۰/۸۷) و در دوره صحت‌سنجی (۰/۸۳، ۲/۵۳ و ۰/۸۶) به دست آمد.

نتایج به دست آمده از دوره واسنجی و صحت‌سنجی گویای قدرت بالای مدل در شبیه‌سازی دبی روزانه حوضه است. مقادیر متناظر برای زیرحوضه قره‌سو نیز به ترتیب برابر با ۱/۳۲، ۰/۶۴ و ۰/۶۵ برای دوره واسنجی و ۰/۸۹، ۰/۶۱ و ۰/۶۶ برای دوره صحت‌سنجی به دست آمد که نشان از برتری نسبی نتایج معیارها در حوضه لیف (خارج کشور) می‌باشد. به دلیل دارا بودن داده‌های موثق و قابل اعتماد حوضه مذکور به عنوان حوضه معرف در بسیاری مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است.

هر چند مقادیر بهتر معیارهای عملکرد در مدل Hymod برتری نسبی آن را نتیجه می‌دهد اما مزیت اصلی مدل SCS اصلاح‌شده نسبت به سایر مدل‌های مفهومی (به عنوان مثال hymod در این پژوهش)

### منابع

1. Arnold, J.G., Engel, B.A., and Srinivasan, R. 1993. Continuous time, grid cell watershed model, application of advanced information technologies. Effective management of natural resources. ASAE Publication, 04-93. American Society of Agricultural Engineers, Pp: 267-278.
2. Boughton, W.C. 1966. A mathematical model for relating runoff to rainfall with daily data. Civil Engineering Trans I.E Australia, 38: 2. 779-787.
3. Boughton, W.C. 1968. A mathematical catchment model for estimating runoff. J. Hydrol. (New Zealand), Pp: 75-100.
4. Boyle, D.P., Gupta, H.V., and Sorooshian, S. 2000. Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods. Water Resources Research, 36: 12. 3663-3674.
5. Choi, J.Y., Engel, B.A., and Chung, H.W. 2002. Daily streamflow modelling and assessment based on the curve-number technique. Hydrological Processes, 16: 16. 3131-3150.
6. Cooper, V.A., Nguyen, V.T.V., and Nicell, J.A. 2007. Calibration of conceptual rainfall-runoff models using global optimisation methods with hydrologic process-based parameter constraints. J. Hydrol. 334: 3. 455-466.
7. Crawford, N.H., and Linsley, R.K. 1966. Digital Simulation in Hydrology'Stanford Watershed Model 4.
8. Douglas, E.M., Jacobs, J.M., Sumner, D.M., and Ray, R.L. 2009. A comparison of models for estimating potential evapotranspiration for Florida land cover types. J. Hydrol. 373: 3. 366-376.
9. Geetha, K., Mishra, S.K., Eldho, T.I., Rastogi, A.K., and Pandey, R.P. 2008. SCS-CN-based continuous simulation model for hydrologic forecasting. Water Resources Management, 22: 2. 165-190.

10. Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K., and Martinez, G.F. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *J. Hydrol.* 377: 1. 80-91.
11. Heaney, J.P., Sample, D., Wright, L., and Koustas, R. 1999. Geographical information systems, decision support systems and urban stormwater management. US Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development.
12. James, D. 1970. An Evaluation of Relationships Between Streamflow Patterns and Watershed Characteristics Through the Use of OPSET: A Self Calibrating Version of the Stanford Watershed Model.
13. James, L.D. 1972. Hydrologic modeling, parameter estimation and watershed characteristics. *J. Hydrol.* 17: 4. 283-307.
14. Liou, E.Y. 1970. Opset: program for computerized selection of watershed parameter values for the Stanford watershed model.
15. Mandeville, A.N., O'connell, P.E., Sutcliffe, J.V., and Nash, J.E. 1970. River flow forecasting through conceptual models part III-The Ray catchment at Grendon Underwood. *J. Hydrol.* 11: 2. 109-128.
16. Michel, C., Andréassian, V., and Perrin, C. 2005. Soil conservation service curve number method: how to mend a wrong soil moisture accounting procedure?. *Water Resources Research*, 41: 2.
17. Mishra, S.K. 1998. Long-term hydrologic simulation using SCS-CN method. Tech report. National Institute of Hydrology, Roorkee-247 667. UP, India.
18. Mishra, S.K., and Singh, V. 2013. Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology (Vol. 42). Springer Science and Business Media.
19. Mishra, S.K., and Singh, V.P. 2002. SCS-CN-based hydrologic simulation package. *Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications*, Water Resources Publs., LLC, Highlands Ranch, Pp: 391-464.
20. Mishra, S.K., and Singh, V.P. 2004a. Long-term hydrological simulation based on the Soil Conservation Service curve number. *Hydrological Processes*, 18: 7. 1291-1313.
21. Mishra, S.K., and Singh, V.P. 2004b. Validity and extension of the SCS-CN method for computing infiltration and rainfall-excess rates. *Hydrological Processes*, 18: 17. 3323-3345.
22. Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I- A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10: 3. 282-290.
23. Ponce, V.M., and Hawkins, R.H. 1996. Runoff curve number: Has it reached maturity?. *J. Hydrol. Engin.* 1: 1. 11-19.
24. Saghafian, B., Noroozpour, S., Kiani, M., and Nasab, A.R. 2016. A coupled ModClark-curve number rainfall-runon-runoff model. *Arab. J. Geosci.* 9: 4. 1-13.
25. Singh, V.P. 1989. *Hydrologic systems: watershed modeling* (Vol. 2). Prentice Hall.
26. Singh, V.P. 1995. *Computer Models of Watershed Hydrology* Water Resources Publications. Littleton, Colorado.
27. Singh, V.P., Frevert, D.K., Rieker, J.D., Levenson, V., Meyer, S., and Meyer, S. 2006. Hydrologic modeling inventory: cooperative research effort. *J. Irrig. Drain. Engin.* 132: 2. 98-103.
28. Vrugt, J.A., Gupta, H.V., Bouten, W., and Sorooshian, S. 2003. A Shuffled Complex Evolution Metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters. *Water Resources Research*, 39: 8.
29. Vrugt, J.A., Ter Braak, C.J., Gupta, H.V., and Robinson, B.A. 2009. Equifinality of formal (DREAM) and informal (GLUE) Bayesian approaches in hydrologic modeling?. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 23: 7. 1011-1026.
30. Wagener, T., Boyle, D.P., Lees, M.J., Wheeler, H.S., Gupta, H.V., and Sorooshian, S. 2001. A framework for development and application of hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 5: 1. 13-26.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 24(1), 2017*  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## Assessment of basin hydrological components by modified conceptual continuous rainfall-runoff SCS-CN

S. Golnarkar<sup>1</sup>, \*M. Pourreza-Bilondi<sup>2</sup>, A. Khashei-Siuki<sup>3</sup> and M. Amirabadizadeh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>M.Sc. Graduate, Dept. of Sciences and Water Engineering, University of Birjand,

<sup>2</sup>Assistant Prof., Dept. of Sciences and Water Engineering, University of Birjand,

<sup>3</sup>Associate Prof., Dept. of Sciences and Water Engineering, University of Birjand

Received: 11/03/2016; Accepted: 06/06/2017

### Abstract

**Background and Objectives:** Since the problem of predicting and runoff estimating play a key role in integrated water resources management, therefore hydrological modeling especially continuous rainfall-runoff modeling may be most important part of water resource planning which is released from reservoir dams. Thus continuous daily hydrological models are useful tools for estimating runoff from rainfall. These models are able to estimate the runoff in ungagged basin. The purpose of this paper is to provide a continuous simulation model for Hydrologic forecasting so that investigate dominancy or dormancy of the processes.

**Materials and Methods:** In this study rainfall-runoff processes involved in modified SCS-CN model calibrated in Leaf River Watershed located in US and Qarasou subbasin located in west of Iran through PSO optimization algorithm developed in MATLAB programming language with 9000 simulation numbers. Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) is used as objective function and the decision variables (14 parameters) within the specified range are randomly initialized. Optimum parameters were extracted through PSO. This model is calibrated and validated with two periods 1957-1961 and 1953 for Leaf River Watershed and two periods 1381-1384 and 1387 for Qarasou subbasin respectively.

**Results:** Model parameters were calibrated and Validation for two case studies. Comparison of the observed and simulated runoff carried out based on three performance criteria: Nash-Sutcliffe (NSE) and Kling-Gupta Efficiency (KGE) and Root Mean Square Error (RMSE). Proposed model performed these three statistics respectively for leaf River Watershed 0.81,0.87,1.40 as calibration period and 0.83, 0.86, 2.53 as validation period. Reasonable values for these criteria is also attained in Qarasou subbasin but due to more reliable data, better results is expected in Leaf River watershed. A result comparison of the SCS-CN model with Hymod as a simple conceptual model, both with the same inputs revealed latter model can simulate hydrology behavior of Leaf River Watershed and Qareso River Watershed slightly better. This may be originated due to fewer model complexities and thus less parameter uncertainty of Hydmod. In spite of this superior skill in runoff simulation of Hydmod, special capabilities of modified SCS-CN model which calculate hydrological components (baseflow, percolation, throughflow, surface runoff and initial abstraction) may prove usefulness and efficiency of this new model easily.

**Conclusion:** Modified SCS-CN model as a conceptual model calculates daily runoff using rainfall and potential evapotranspiration dataset. This model may be used to assess annual hydrologic components as well as total runoff values. Based on the results, the dominancy of the infiltration, evaporation and surface runoff processes were approved in Leaf River Watershed. These three processes but in reverse order is ranked in Qarasou subbasin as main hydrological components.

**Keywords:** Long-term hydrologic simulation, Hydrological components, Curve number method, Optimization algorithm PSO, Conceptual Model Hymod

---

\* Corresponding Author; Email: mohsen.pourreza@birjand.ac.ir

