برآورد میزان رواناب با کمک مدل‌های تغییر یافته SCS

سعید سروری[۱] محسن پوررضا بیلندی*[۲] زهرا زراعتکار[۳]

۱- کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بیرجند

۳- کارشناس ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بیرجند

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۳

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۱

چکیده

در دهه‌های اخیر مدل‌های مفهومی مختلفی ارائه شده است که این مدل‌ها همواره دارای پارامترهایی هستند که می‌بایست با توجه به داده‌های مشاهداتی مورد تخمین قرار گیرند. از طرف دیگر، یافتن مقادیر بهینه برای پارامترهای هر مدل شبیه‌سازی، کاری است که همواره با شک و تردید همراه می‌باشد. یکی از روش‌های عمده برای پیش‌بینی سیلاب، روش سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) می‌باشد که توسط محققین زیادی مورد بازبینی و تغییر قرار گرفته است. هدف از تحقیق حاضر، واسنجی پارامترهای ۱- روش اصلاحی CN، ۲- مدل میشرا و سینگ، ۳- روش قدیمی شماره منحنی هر سه نسخه مدل معروف SCS و مقایسه نتایج آن‌ها می‌باشد. با توجه به مشکل اعتماد و نقص در داده‌های حوضه‌های داخل کشور، حوضه معرف با کیفیت داده‌های بارش و رواناب ساعتی مورد قبول، واقع در جنوب شیلی با استفاده از الگوریتم فراکاوشی PSO مورد مطالعه قرار گرفت. مقادیر دبی شبیه‌سازی شده با استفاده از معیارهای خطای کلینگ گوپتا (KGE)، ضریب ناش- ساتکلیف (NS)، ضریب همبستگی (R^2) و میانگین مربعات خطا (RMSE) مورد بررسی قرار گرفت. به طور خلاصه مقایسه نتایج مقادیر رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهده شده با کمک معیارهای ارزیابی مدل، نشان ازکارایی بالاتر دو روش ۱- میشرا و سینگ و ۲- روش اصلاحی CN (KGE=0.91) در شبیه‌سازی بارش-رواناب بود که لزوم بازنگری جدی استفاده از روش‌های بارش-رواناب مرسوم مبتنی بر شماره منحنی را می‌طلبد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم فراکاوشی PSO، سیلاب، شماره منحنی، مدل بارش-رواناب، واسنجی

مقدمه

تعیین کمی و کیفی رواناب به عنوان مبنای مطالعاتی طرح‌های عمرانی، به منظور توسعه و بهره‌برداری از منابع آب در حوضه می‌باشد. با توجه به وسعت زیاد ایران و عدم وجود ایستگاه‌های هیدرومتری کافی، تعیین رواناب و دبی حاصل از بارندگی همواره یکی از مشکلات اساسی حوضه‌های آبریز کشور بوده و استفاده از روش‌های برآورد رواناب در حوضه‌های آبخیز فاقد ایستگاه از اهمیت شایان توجهی برخوردار است. امروزه برآورد دبی حاصل از رگبارها به ویژه در حوضه‌های آبخیز کوچک و فاقد آمار از اصلی‌ترین فعالیت‌های هیدرولوژیست‌ها می‌باشد و برآورد حجم رواناب حاصل از بارندگی به منظور پیش‌گیری از وقوع سیلاب از اهمیت زیادی برخوردار است. در این راستا یکی از روش‌های تجربی که مورد توجه بیشتری قرار گرفته است روش شماره منحنی رواناب یا سرویس حفاظت خاک آمریکا می‌باشد. کاربرد این روش نظر به نیاز آن به داده‌های قابل دستیابی در بیشتر حوضه‌های آبخیز، ساده بوده و از دامنه کاربرد گسترده‌ای نیز برخوردار است.

بسیاری از روش‌های بهینه‌سازی الهام گرفته از طبیعت بوده و بر اساس یکی از شیوه‌های گوناگون جستجوی تصادفی عمل می‌کنند و به الگوریتم‌های فراکاوشی[۱] معروف می‌باشند. اگر چه این الگوریتم‌ها دستیابی به بهینه مطلق

[1] نویسنده مسئول: محسن پور رضا بیلندی Mohsen.pourreza@birjand.ac.ir

[Downloaded from mail.jircsa.ir on 2026-09-27]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.4.4.8]

را تضمین نمی‌نمایند، اما می‌توان با اطمینان بالایی به کسب جواب نزدیک به بهینه امیدوار بود. الگوریتم‌های بهینه-سازی مجموعه ذرات (PSO[۲])، تکامل تصادفی جوامع (SCE[۳])، ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی مجموعه ذرات و ژنتیک (H-GA&PSO[۴]) و جهش ترکیبی قورباغه از این دسته روش‌های بهینه‌سازی می‌باشند که تاکنون در بسیاری از تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Zhang et al., 2008). از جمله در تحقیقی برای اولین بار روش سیمپلکس NM[۵] با GA و PSO به ترتیب ترکیب گردید (Fan et al., 2006). در تحقیقی دیگر ترکیب GA و PSO برای استفاده در تابع چندنمایی استفاده شد. در تحقیق مذکور الگوریتم ژنتیک شناور استفاده گردید که در آن مکانیزم جهش با PSO تعیین شد. سپس سیاست نخبه‌گرا به منظور بالا بردن روند تکامل به کار گرفته شد (Kao & Zahara, 2007). الگوریتم SFLA نیز برای اولین بار در مسایل بهینه‌سازی منابع آب مورد استفاده قرار گرفت که در حقیقت به عنوان روشی جهت تعیین قطر بهینه لوله‌ها در طراحی و توسعه شبکه توزیع آب شهری استفاده گردید (Eusuff et al., 2006). در ایران نیز می‌توان کاربرد الگوریتم‌های مذکور را در واسنجی مدل ها یافت که از جمله آنها واسنجی خودکار مدل بارش-رواناب NAM می‌باشد که با استفاده از الگوریتم SCE واسنجی گردید (Qaderi et al., 2006). نتایج کاربرد و مقایسه پنج الگوریتم بهینه سازی SCE، GA، PSO، DE[۶] و AIS[۷] در واسنجی یک مدل هیدرولوژیکی نشان داد در بیش از ۲۰۰۰ بار اجرا مدل الگوریتم GA جواب بهتری داده است. اما زمانی که تعداد اجرای مدل کمتر از ۲۰۰۰ بار بود، الگوریتم PSO نتایج بهتری ارائه داد. در نتیجه با توجه به مقایسه طول زمان محاسبات، الگوریتم PSO به دیگر روش‌ها ترجیح داده شد (Vrugt et al., 2003). در تحقیقی پارامترهای یک مدل بارش-رواناب به کمک الگوریتم‌های فراکاوشی جفت‌گیری زنبور عسل و GA واسنجی گردید و نتایج حاصل از دو روش بهینه‌سازی با یکدیگر مقایسه شد (Borhani & Frahmandfar, 2011).

در مورد کاربرد روش شماره منحنی در تخمین رواناب، رواناب حاصل از باران در مقابل تغییرات شاخص CN بسیار حساس است و بدست آوردن مدل منطقه‌ای اهمیت ویژه دارد (Bales & Beston, 1981)، اما به دلیل نبود بانک اطلاعات هیدرولوژی جامع و به روز در بخش‌های غربی و غربی شمال ایران، با بررسی‌های فراوان، این نتیجه حاصل شد که با توجه به تشابهات اقلیمی حوضه مالال کاهلو در کشور شیلی با بخش‌های غربی و غربی شمال کشور، از داده‌های حوضه مالال کاهلو به عنوان حوضه معرف در مطالعه حاضر برای برآورد میزان رواناب استفاده شود و نظر به این که مسئله برآورد رواناب حاصل از بارش‌های جوی و درک کمی از فرآیندهای مختلف تولید آن، یکی از مسائل مهم اساسی و بنیادی در هیدرولوژی است، بنابرین دستیابی به میزان کمی آن حائز اهمیت می‌باشد. در پژوهشی روش شماره منحنی را برای حوضه‌های آبخیز ایالت ماهار شترای هند مورد مطالعه قرار دادند و مشاهده نمودند که مقادیر محاسباتی شماره منحنی برای شرایط خشک بسیار بیشتر از مقادیر محاسبه شده شماره منحنی بر اساس جداول ارائه شده در روش شماره منحنی ((SCS_CN می‌باشد (Mane et al, 1994). در حوضه آبریز امامه برای اصلاح معادله SCS با استفاده از داده‌های بارندگی و دبی مشاهداتی مقدار ضریب شاخص حداکثر برابر ۰/۰۴ بدست آورده شد (نساجی زواره، ۱۳۷۸). در تحقیق دیگری ضمن بررسی مدل جدید محاسبه نگهداشت حوضه، نواقص مدل بارش- رواناب حوضه را در روش SCS معرفی کرده، و در ادامه این نتیجه دریافت شد که مدل جدید بخوبی قابلیت کاربرد در برآورد رواناب سطحی را دارد. مقادیر حداکثر نگهداشت واقعی و نگهداشت اولیه به ترتیب ۲/۵۴ میلی‌متر و ۰/۵ میلی‌متر و مقدار حداکثر نگهداشت حوضه برابر با ۲/۵۹ میلی‌متر بدست آمد (شاه محمدی، ۱۳۹۲).

[1]Evolutionary Optimization Methods
[2]Particle Swarm Optimization
[3]Shuffled Complex Evolution
[4]Hybrid Genetic Algorithm and PSO
[5]Nelder-Mead
[6] Differential Evaluation
[7]ArtificialImmune Systems

[Downloaded from mail.jircsa.ir on 2026-09-27]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.4.4.8]

در پژوهشی دیگر به بررسی فرضیه نسبت بین تلفات اولیه و حداکثر نگهداشت در مناطقی از ایالت متحده پرداخته شد. نتایج تحقیقات حاکی از آن بود که دامنه تغییرات ضریب شاخص حداکثر ذخیره در این مناطق بین ۰/۰۰۰۵ تا ۰/۴۹۱ متغیر بوده و با در نظر گرفتن مقدار میانگین مقادیر بدست آمده (۰/۰۵) برای نسبت مذکور محاسبات دقیق‌تر و اختلاف بین رواناب برآورد شده و مشاهداتی کمتر است (Woodward & Hawkins, 2002). در مطالعه‌ای دیگر که شماره منحنی تغییرات مکانی و زمان نفوذ و سایر تلفات را در نظر نگرفته و تنها مجموع تلفات یک بارش را لحاظ می‌کند، پیشنهاد نمودند که مسائلی نظیر حساسیت مقادیر به تغییرات شماره منحنی، شرایط رطوبت پیشین و تأثیر تغییرات مکانی و زمانی بایستی با انجام پژوهش‌های بیشتر مورد بررسی و اصلاح قرار گیرد (Ponc & Hawkins, 1996). همچنین محققان در مطالعات خود بیان کردند که ضریب نگهداشت اولیه (λ=0.2s) مدل SCS_CN نمی‌تواند برآورد درستی از رواناب را ارائه نماید (Hawkins et al, 2002). در پژوهشی دیگر پیشنهاد شد که حداکثر پتانسیل نگهداشت شامل جذب اولیه نمی‌شود و سپس معادله نفوذ بر پایه روش CN گسترش داده شد (Hejelmfet, 1980).

روش نفوذ (Mockus, 1949) بر مبنای معادله هورتون (Horton, 1993) بود و مفهوم خود را متناسب با CN انتخاب کرد (Mishra & Singh, 2004). در مطالعاتشان جزئیاتی از روش (Mockus, 1949) را گرفتند و متذکر شدند همه نفوذ به روش (Mockus, 1949) تخمین زده می‌شود و لازم است فقط فاز نفوذ یکنواخت در نظر گرفته شود. سپس روش CN و معادله نفوذ هورتون را ترکیب کردند و فاز نفوذ یکنواخت را در نظر گرفتند. این روش برای حوادث باران شدید و حوضه‌های کوچک، شبیه‌سازی شده است (Mishra & Singh, 2004). معادله شرط ایجاد رواناب، معادله ($P>I_a+F_c$) می‌باشد که در آن I_a فاز مربوط به تلفات و F_c فاز مربوط به نفوذ ثابت است. F در واقع شامل دو بخش F_d (نفوذ نهایی پس از شروع رواناب) و F_c (نفوذ نهایی پس از شروع رواناب) است.

$$F = F_c + F_d \qquad (۱)$$

نفوذ در چرخه آب از طریق ایجاد ارتباط رواناب سطحی و تغذیه آب‌های زیرزمینی، آبیاری و کشاورزی از نقش اساسی در فرآیندهای بارش و رواناب برخوردار است.

این مطالعه قصد دارد با واسنجی پارامترهای سه مدل مختلف SCS (مدل شماره منحنی)، مدل Mishra و Singh (2004) و مدل اصلاحی CN ارائه شده در تحقیق Zhou و همکاران (2014)، مقایسه‌ای بین نتایج این سه روش انجام دهد. برای این منظور استفاده از الگوریتم فراکاوشی PSO با توابع هدف مختلف به همراه معیارهای ارزیابی KGE (از جمله جدیدترین معیارهای مورد استفاده در ارزیابی مدل‌های هیدرولوژیکی)، ناش- ساتکلیف (NS)، ضریب همبستگی (R2) و میانگین مربعات خطا (RMSE) مورد بررسی قرار گرفت.

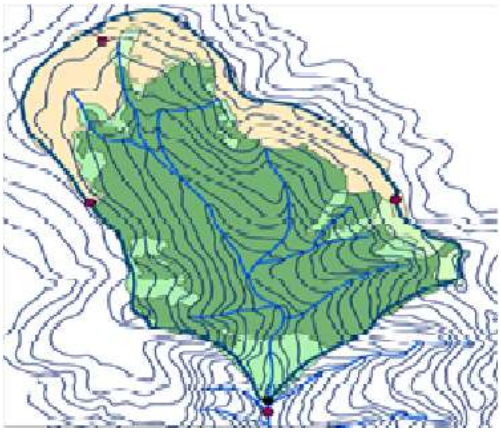
مواد و روش‌ها

حوضه مورد مطالعه واقع در جنوب شیلی (رشته کوه‌های آند)، با مختصات ۳۸°۲۵/۵′ تا ۳۸°۲۷ جنوبی و ۷۱°۳۲/۵ تا ۷۱°۳۵ شرقی، دارای مساحت ۵/۹۳ کیلومتر مربع جزء حوضه‌های کوچک به حساب آمده و بنابراین حائز شرایط گفته شده در تحقیق Zhou و همکاران (2014) می‌باشد که میزان نفوذ را با روش CN اصلاح شده برای حوضه کوچکی در چین شبیه‌سازی کردند و به این نتیجه رسیدند که روش CN اصلاح شده برای حوضه‌های کوچک بسیار مناسب می‌باشد. محدوده ارتفاعات حوضه بین ۱۰۸۰ تا ۱۸۵۶ متر از سطح دریا با شیب متوسط ۴۰ درصد بوده که درصد بالایی از حوضه دارای پوشش جنگلی (به ویژه درختان بامبو) می‌باشد. به دلیل تلفات برگاب پوشش متراکم گیاهی، به طور متوسط تنها ۸۰٪ بارندگی کل به کف پوشش جنگلی می‌رسد. خاک منطقه، جوان و از توسعه کمی برخوردار است و دارای مواد آتش فشانی – خاکستر با نفوذپذیری بالا، تخلخل بالا (۸۰٪-۶۰٪) و چگالی حجمی پایین (۰/۴ تا ۰/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب) می‌باشد. این حوضه دارای اقلیم معتدل مرطوب بوده و دارای ارتفاعات برفی طی

[Downloaded from mail.jircsa.ir on 2026-09-27]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.4.4.8]

زمستان می‌باشد. مقدار بارش سالانه در محدوده ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ میلی‌متر و برخی مواقع حتی بیشتر از آن نیز گزارش شده است (Blime et al., 2007).

داده‌های هواشناسی مربوط به این حوضه از طریق مکاتبه با بخش هیدرولوژی موسسه ژئواکولوژی دانشگاه پاتسدام آلمان، به عنوان حوضه معرف (دارای بانک داده مناسب) مورد مطالعه اخذ شده است (Blume et al., 2007). به دلیل بالابودن بارش در این حوضه، از ۱۷ داده ساعتی روزانه پنج ایستگاه اندازه‌گیری بارش این حوضه استفاده گردید. بارش در قسمت بالایی حوضه آبریز از ماه ژوئن تا نوامبر به صورت برف بوده و بارش‌ها از سال ۲۰۰۴ اندازه‌گیری شده‌اند. در خصوص استفاده از مدل SCS لازم به ذکر است که به طور کلی مدل‌های ذوب برف، بسیار محدود می‌باشند و از آنجایی که کشور ایران به جز در بخش‌های اندکی در زمره کشورهای برف خیز محسوب نمی‌شود، لذا در مطالعه حاضر از مدل SCS استفاده شده که پارامترهای مربوط به ذوب برف را در نظر نمی‌گیرد. موقعیت حوضه مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): حوضه آبریز مالال کاهلو واقع در جنوب شیلی (Malalcahuello cachment)

الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات (PSO)

PSO، یک الگوریتم محاسبه‌ای تکاملی الهام گرفته از طبیعت و بر اساس تکرار می‌باشد. منبع الهام این الگوریتم، رفتار اجتماعی حیوانات، همانند حرکت دسته جمعی پرندگان و ماهی‌ها بود. از این جهت که PSO نیز با یک ماتریس جمعیت تصادفی اولیه، شروع می‌شود، شبیه بسیاری از الگوریتم‌های تکاملی دیگر همچون الگوریتم ژنتیک پیوسته و الگوریتم رقابت استعماری است. بر خلاف الگوریتم ژنتیک، PSO هیچ عملگر تکاملی همانند جهش و تزویج ندارد. از این جهت می‌شود گفت که الگوریتم رقابت استعماری شباهت بیشتری به PSO دارد. PSO از تعداد مشخصی از ذرات تشکیل می‌شود که به طور تصادفی، مقدار اولیه می‌گیرند. برای هر ذره دو مقدار وضعیت و سرعت، تعریف می‌شود که به ترتیب با یک بردار مکان و یک بردار سرعت، مدل می‌شوند. این ذرات، به صورت تکرار شونده‌ای در فضای n بعدی مسئله حرکت می‌کنند تا با محاسبهٔ مقدار بهینگی به عنوان یک ملاک سنجش، گزینه‌های ممکن جدید را جستجو کنند. یک حافظه به ذخیره بهترین موقعیت هر ذره در گذشته و یک حافظه به ذخیره بهترین موقعیت پیش آمده در میان همهٔ ذرات، اختصاص می‌یابد. با تجربهٔ حاصل از این حافظه‌ها، ذرات تصمیم می‌گیرند که در نوبت بعدی، چگونه حرکت کنند. در هر بار تکرار، همهٔ ذرات در فضای n بعدی مسئله حرکت می‌کنند تا بالاخره نقطهٔ بهینهٔ عام پیدا شود. ذرات، سرعت‌هایشان و موقعیت‌شان را بر حسب بهترین جواب‌های مطلق و محلی بروز می‌کنند (رابطه ۲):

$$p_{m,n}^{new} = p_{m,n}^{old} + v_{m,n}^{new} \quad (۲)$$

[Downloaded from mail.jircsa.ir on 2026-09-27]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.4.4.8]

که در آن $v_{m,n}$ سرعت ذره و $p_{m,n}$ متغیرهای ذره می‌باشند. الگوریتم PSO، بردار سرعت هر ذره را بروز کرده و سپس مقدار سرعت جدید را به موقعیت و یا مقدار ذره می‌افزاید. بروز کردن‌های سرعت، تحت تأثیر هر دو مقدار بهترین جواب محلی و بهترین جواب مطلق قرار می‌گیرند. بهترین جواب محلی و بهترین جواب مطلق، بهترین جواب‌هایی هستند که تا لحظه جاری اجرای الگوریتم، به ترتیب توسط یک ذره و در کل جمعیت به دست آمده‌اند. مزیت اصلی PSO این است که پیاده‌سازی این الگوریتم ساده بوده و نیاز به تعیین پارامترهای کمی دارد. همچنین PSO قادر به بهینه‌سازی توابع هزینه‌ی پیچیده با تعداد زیاد مینیمم محلی است.

مدل‌های بارش- رواناب مورد استفاده

۱- مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS): سازمان حفاظت خاک آمریکا در سال ۱۹۷۲ روابطی را برای تخمین ارتفاع رواناب (پس از محاسبه تلفات) ارائه کرد که برای حوضه‌هایی که در آن‌ها داده‌های اندازه‌گیری دبی رواناب وجود ندارد به کار می‌رود. با ترکیب معادلات (۳) و (۴) که فرض‌های اساسی رابطه SCS می‌باشند، ارتفاع رواناب از رابطه (۵) بدست می‌آید. در این مدل فرض شده است مقدار ضریب λ (ارائه شده در رابطه ۶) برابر ۰/۲ می‌باشد.

$$\frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{P}+\mathrm{I_a}}=\frac{\mathrm{F}}{\mathrm{S}} \qquad (۳)$$

$$P = I_a + F + Q \qquad (۴)$$

$$\mathrm{Q}=\frac{(\mathrm{p}-0.2\mathrm{s})^2}{(\mathrm{p}-\mathrm{i}+\mathrm{s})} \qquad (۵)$$

$$I_a=\lambda \times \mathrm{s} \qquad (۶)$$

در روابط بالا:

Q ارتفاع رواناب بر حسب میلی‌متر، P بارش بر حسب میلی‌متر و S حداکثر پتانسیل نگهداشت ویژه بر حسب میلی‌متر بوده و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathrm{S}=\frac{25400}{\mathrm{CN}}-254 \qquad (۷)$$

CN نیزشماره منحنی خاک بوده و بر حسب وضعیت رطوبتی خاک تعیین می‌شود. همچنین i تلفات بارش بر حسب میلی‌متر، λ سرعت تلفات اولیه می‌باشد.

۲- مدل (Mishra & Sing, 2004): رابطه اساسی این روش به صورت زیر بوده که در آن فرض می‌شود ضریب λ مقدار ثابت نبوده و به عنوان پارامتر واسنجی وارد الگوریتم بهینه‌سازی می‌شود:

$$Q=\frac{\left(p-\lambda*\mathrm{S}\right)^2}{\left(p+\left(1-\lambda\right)\right)} \qquad (۸)$$

باقی پارامترهای مدل (Mishra & Sing, 2004) نیز مانند مدل اولیه SCS می‌باشد.

۳- روش اصلاحی CN

این روش از محاسبه رواناب سطحی حاصل از بارندگی در یک حوضه کشاورزی کوچک بر اساس معادله بیلان آب به دست آمده است که تاثیر تغییرات زمانی پارامترهای شماره منحنی و نسبت تلفات اولیه به صورت تابعی از عمق بارش نیز لحاظ شده است. چنانچه فرض شود تلفات بارش شامل تلفات اولیه و ثانویه می‌باشد می‌توان با ترکیب روابط (۹) و (۱۰) که فرضیه‌های جدید مدل ویرایش یافته SCS می‌باشد رابطه اساسی آن را (رابطه ۱۱) بدست آورد.

$$P = I_a + F + Q \qquad (۹)$$

$$\frac{Q}{P+I_a}=\frac{F-F_c}{S} \qquad (۱۰)$$

[Downloaded from mail.jircsa.ir on 2026-09-27]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.4.4.8]

$$Q = \frac{(p - i) * (p - i - fc)}{p - i + s} \qquad (۱۱)$$

که در آن :F_c مقدار نفوذ ثابت بر حسب میلی‌متر بر ساعت می‌باشد.

با استفاده از داده‌های ۱۷ واقعه بارش (P) و رواناب مشاهداتی (Q_O) حوضه مورد مطالعه که در جدول (۱) ارائه شده (۶) و با کدنویسی روابط در زبان متلب، مقادیر رواناب شبیه‌سازی شده، (Q_s) با استفاده از برنامه کامپیوتری برای هر یک از مقادیر بارش محاسبه گردید، سپس مدل‌های مذکور با الگوریتم PSO لینک شده و با استفاده از توابع هدف R^2، RMSE، KGE و NS مقادیر پارامترهای واسنجی تعیین گردید.

جدول (۱): مقادیربارش و رواناب مشاهده‌ای حوضه مورد مطالعه

تاریخ	*P* (mm)	*Q* (mm)
۲۰۰۴/۰۱/۲۸	۲۷/۳۷	۰/۴۶
۲۰۰۴/۰۲/۱۵	۵۷/۵۵	۱/۱۵
۲۰۰۴/۰۳/۰۱	۴۳/۹۳	۱/۰۷
۲۰۰۴/۰۳/۰۵	۲۴/۷۰	۰/۴۰
۲۰۰۴/۰۳/۱۶	۱۲/۸۲	۰/۱۹
۲۰۰۴/۰۳/۲۸	۳۸/۷۹	۰/۳۷
۲۰۰۴/۰۳/۳۰	۵۲/۵۶	۱/۳۷
۲۰۰۴/۰۴/۰۳	۲۸/۳۶	۰/۴۸
۲۰۰۴/۰۴/۰۵	۸۱/۳۹	۴/۹۱
۲۰۰۴/۰۴/۱۷	۲۳/۸۲	۱/۵۶
۲۰۰۴/۰۵/۰۱	۸۵/۱۶	۸/۸۹
۲۰۰۴/۱۲/۰۳	۲۶/۲۰	۱/۱۴
۲۰۰۴/۱۲/۱۴	۴۰/۷۳	۱/۱۴
۲۰۰۴/۱۲/۲۳	۵۶/۰۱	۲/۸۵
۲۰۰۵/۰۱/۲۱	۳۵/۳۷	۰/۹۴
۲۰۰۵/۰۱/۲۸	۴۰/۷۷	۱/۴۱
۲۰۰۵/۰۳/۰۳	۵۲/۳۸	۱/۰۵

توابع هدف و معیارهای ارزیابی مدل

توابع هدف به کار رفته در مدل‌ها، در حقیقت همان معیارهای ارزیابی مدل نیز بوده که مقدار پارامترهای مدل را برآورد می‌کند. حدود تغییرات این پارامترها در جدول شماره (۲) ارائه شده است.

جدول (۲): حدود تغییرات پارامترهای مدل بارش- رواناب

پارامتر	نماد اختصاری	کمینه	بیشینه
نفوذیکنواخت (نهایی)	Fc	Eps	۱۰۰
سرعت جذب اولیه	λ	Eps	۰/۳
شماره منحنی	CN	۱۰	۱۰۰

جهت سنجش و ارزیابی عملکرد مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق، از چهار معیارکلینگ گوپتا KGE (Gupta et al,2009)، ضریب ناش- ساتکلیف (NS)، ضریب همبستگی (R^2) و ریشه میانگین مجموع مربعات خطا (RMSE) استفاده گردیده که در روابط (۱۲) تا (۱۵) ارائه شده است. لازم به ذکر است معیار جدید کلینگ گوپتا KGE (Gupta et al., 2009) به عنوان معیار تغییر یافته ناش-ساتکلیف مورد استفاده محققین قرار گرفته است.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\sqrt{Q_{si}} - \sqrt{Q_{oi}}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(\sqrt{Q_{oi}} - \sqrt{\bar{Q}}\right)} \qquad (۱۲)$$

[Downloaded from mail.jircsa.ir on 2026-09-27]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.4.4.8]

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Q_{oi} - Q_{si})^2} \quad (۱۳)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(cc-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (۱۴)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{oi} - \bar{Q})^2} \quad (۱۵)$$

که در روابط فوق : Q_{oi} دبی مشاهداتی، Q_{si} دبی شبیه‌سازی شده، $\bar{Q}$ میانگین دبی مشاهداتی، cc ضریب همبستگی خطی بین Q_o و Q_s، α نسبت انحراف معیار Q_s بر Q_o، β نسبت میانگین Q_s بر Q_o می‌باشد.

نتایج و بحث

پارامترهای مدل‌های شماره منحنی SCS، روش اصلاحی CN، مدل Mishra و Sing (2004) به وسیله کدنویسی در متلب با کمک الگوریتم PSO پس از ۱۵۰ تکرار و همگرا شدن تابع هدف به یک مقدار ثابت، بهینه و تعیین گردید. مقادیر معیارهای ارزیابی برای هر کدام از توابع هدف جهت بررسی میزان دقت نتایج محاسبه گردید که در جداول (۳) تا (۵) ارائه شده‌اند.

جدول (۳): مقادیر بهینه پارامترهای مدل SCSبه ازای توابع هدف مختلف

معیارخطا / تابع هدف	R^2	RMSE	KGE	NS
R^2	۰/۸۴	۲/۹	-۰/۳۲	-۰/۹۲
RMSE	۰/۷۲	۱/۳۴	۰/۷۴	۰/۵۹
KGE	۰/۶۵	۱/۳۸	۰/۷۸	۰/۵۶
NS	۰/۷۲	۱/۳۴	۰/۷۴	۰/۵۹

جدول (۴): مقادیر بهینه پارامترهای مدل میشرا و سینگ به ازای توابع هدف مختلف

معیارخطا / تابع هدف	R^2	RMSE	KGE	NS
R^2	۰/۸۶	۲/۲۹	-۰/۱۹	-۰/۲۰
RMSE	۰/۸۴	۰/۸۷	۰/۸۵	۰/۸۳
KGE	۰/۸۳	۰/۸۹	۰/۹۱	۰/۸۱
NS	۰/۸۴	۰/۸۷	۰/۸۵	۰/۸۳

جدول (۵): مقادیر بهینه پارامترهای روش اصلاحی CN به ازای توابع هدف مختلف

معیارخطا / تابع هدف	R^2	RMSE	KGE	NS
R^2	۰/۹۲	۱/۷۴	۰/۰۸	۰/۳۱
RMSE	۰/۸۴	۰/۸۷	۰/۸۶	۰/۸۳
KGE	۰/۸۳	۰/۸۹	۰/۹۱	۰/۸۲
NS	۰/۸۴	۰/۸۷	۰/۸۶	۰/۸۳

در نهایت، مقادیر پارامترهای بهینه با متوسط گیری از مقادیر به دست آمده ناشی از توابع هدف KGE و E در جدول شماره (۶) ارائه شده است:

[Downloaded from mail.jircsa.ir on 2026-09-27]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.4.4.8]

جدول (۶): مقادیر بهینه پارامترهای مدل‌های مورد استفاده

مدل	λ	CN	F_c
SCS	-	۵۶	-
مدل میشرا و سینگ	۰/۰۳۳	۳۱/۵	-
روش اصلاحی CN	۰/۰۳۲	۳۱/۳	۰

ملاحظه می‌شود مقادیر پارامترهای λ و CN دو مدل تغییر یافته دوم و سوم یکسان بوده و به ترتیب مقادیر ۰/۰۳۳ و ۳۱ را به خود اختصاص داده‌اند. همان طور که قبلاً نیز بیان گردید دلیل آن صفر شدن مقدار Fc و در نتیجه هم ارز شدن روابط محاسبه رواناب با این دو روش می‌باشد. همچنین تفاوت بالای بین مقادیر شماره منحنی نیز در این تحقیق مشاهده می‌گردد که با توجه به نکات استخراج شده از نتایج توابع هدف، مقدار واسنجی شده ناشی از مدل دوم و سوم (حدود مقدار ۳۲) دارای اعتبار بیشتر می‌باشد.

در این تحقیق با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارش واقع در حوضه‌ای در جنوب شیلی، سه روش برآورد رواناب، شامل روش اصلاحی CN، مدل میشرا و سینگ و شماره منحنی ارزیابی گردید. پارامترهای این سه مدل با استفاده از الگوریتم فراکاوشی PSO با ۱۵۰ تکرار واسنجی گردید. با توجه به نتایج حاصل و مقایسه ضرایب همبستگی مدل‌های مورد استفاده، دو روش دوم (Mishra & Sing, 2004) و سوم (اصلاحی CN) با مقدار معیار کلینگ گوپتا (Gupta et al, 2009) KGE=0.91 نشان از توافق بالای بین رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دارد. همچنین تشابه نتایج دو تابع هدف RMSE و E و برتری آن‌ها به نسبت R^2 اثبات گردید. ضمن آنکه دو مدل دوم و سوم به دلیل ناچیز بودن تلفات ثانویه (f_c=0) دارای مقادیر معیارها برابر شده و در نتیجه مقادیر مشابهی برای پارامترهای مدل تعیین نمودند.

نتیجه‌گیری

مطابق نتایج به دست آمده از جداول (۳) تا (۵)، نکات زیر نتیجه می‌شوند:

- مقادیر نسبی تمام توابع هدف به کار رفته در مدل‌های دوم و سوم به نسبت مدل اولیه بهتر بوده و لذا کارایی آنها اثبات می‌گردد. به عنوان مثال کمترین مقدار معیار ریشه میانگین مجموع مربعات خطا در مدل اول ۱/۳۴ بوده که مربوط به توابع هدف ناش-ساتکلیف و ریشه میانگین مجموع مربعات خطا می‌باشد. در حالی که این معیار در دو مدل اخیر به ۰/۸۷ کاهش می‌یابد.
- تابع هدف R2 به عنوان ناکارآمدترین تابع با ارائه مقادیر معیارهای کمتر KGE، E و RMSE به نسبت باقی توابع هدف مشخص گردید. سه تابع دیگر در یک رتبه قرار گرفته و نتایج مناسبی را ارائه دادند.
- در هر یک از سه مدل، مقادیر معیارهای متناظر با دو تابع هدف RMSE و E با یکدیگر برابر می‌باشد که نشان از یکسان بودن رفتار این دو تابع به دلیل تشابه در رابطه آن‌ها دارد.
- در مدل دوم (Mishra & Sing, 2004) و سوم (مدل تغییر یافته CN) مقادیر معیار کاملاً یکسانی به ازاء تمامی توابع هدف وجود دارد. دلیل آن نیز می‌تواند مقدار ناچیز و نزدیک به صفر نفوذ ثابت FC باشد که باعث گردیده است روابط محاسبه رواناب آن‌ها عملاً برابر شود.

منابع

۱. شامحمدی، ش. (۱۳۹۲). معرفی مدل جدید بارش- رواناب؛ با نقدی بر مدل بارش- رواناب SCS-CN، ششمین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک کشور.

[Downloaded from mail.jircsa.ir on 2026-09-27]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.4.4.8]

۲. نساجی زواره، م. (۱۳۷۸). تعیین شماره منحنی حوزه آبرخیز کسیلیان به روش شماره منحنی، پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، ص ۱۹۵.

3. Bales j. and Betson R.P. *(1981). The curve number as a hydrologic index, In: proceeding International Symposium on Rainfall_runoff Modeling*. mississippi state University: *371_386.* 11_Bhuyan S.J., Banasik W.J.
4. Blume T., Erwin Z., Bronstert A. *(2007). Rainfall–runoff response, event-based runoff coefficients and hydrograph separation.* Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques, 52 (5).
5. Borhani Darian A.R. and Farahmandfar Z. *(2011). Calibration of Rainfall-runoff models using MBO algorithm*. the Iranian Society of Irrigation and Water Engineering, *1 (4), 60-71*.
6. Eusuff M. and Lansey K. *(2003). Optimization of Water Distribution Network Design Using the Shuffled Frog Leaping Algorithm*. Journal of Water Resources Planning and Management, *129 (3), 210–225.*
7. Eusuff M., Lansey K. and Pasha F. *(2006). Shuffled frog-leaping algorithm: a memetic meta-heuristic for discrete optimization*. Engineering Optimization, vol. 38, no. 2, pp.129–154.
8. Fan S.K.S., Liang Y.C. and Zahara E. *(2006). A genetic algorithm and a particle swarm optimizer Hybridized with Nelder-Meat simplex search*. Computer and Industrial, Engineering, 50, pp, *401-425.*
9. Gupta H.V., Kling H., Yilmaz K.K., Martinez G.F. *(2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling*. Journal of Hydrology, *377 (1), 80-91*.
10. Hawkins R.H., Jiang D.E., Woodward A.T., Hjelmfelt J.A., Mullem and Q.D. Quan. *(2002). Runoff curve number method: Examination of the initial abstraction ratio*. Proceedings of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Las Vegas, Nevada, U.S. Geological Survey, Lakewood, Colorado, USA.
11. Hejelmfet J.A.T. *(1980). Curve number procedure as infiltration method* . J. Hydraul. Div., 106 (HY6), 1107-1111.
12. Horton R.E. *(1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle*. Trans. Am. Geophys. Union, *14 (1), 446-460.*
13. Kao Y.T. and Zahara E. *(2007). A hybrid genetic algorithm and a particle swarm optimization for multimodal functions*. Applied Soft Computing, *8 (2), pp, 849-857.*
14. Mane R.V., Atre A.A. and Bagnal G.R. *(1994). Runoff curve number for agricultural watersheds in Ahmednagar District, Maharashtra*, 8th ISCO Conference, India, *644-647.*
15. Mockus V. *(1949). Estimation of total (and peak rates of) surface runoff for individual storms. InterimSurvery Rep*. Grand (Neosho) River Watershed, Exhibit A of Appendix B. U.S. Dept. of Agriculture,Washington, DC.
16. Mishra S.K. and Singh V.P. *(2004). Validity and extension of the SCS-CN method for computing infiltration and rainfall-excess rates*. Hydrological Processes, *18 (17), 3323-3345.*
17. Ponc V.M. and Hawkins R.H. *(1996). Runoff curve number:has it reached maturity*, journal of hydrologic Engineering, *1 (1): 11-19.*
18. Qaderi K., Mohammad ValiSamani J., Eslami H.R. and Saghafian B. *(2006). Automatic calibration of a rainfall-runoff model using SCE optimization method*. Iran Water Resources Research, *2 (2): 39-52.*
19. 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 Resour Res 39 (8):1201. doi:10.1029/2002WR001642.
20. Woodward D.E. and Hawkins R.H. *(2002). Runoff curve number method,examination of the initial abstraction ratio*. Journal of Irrigation and Dranage Engineering, ASCE, *25 (7):121-128.*
21. Zhang X., Srinivasan R., Zhao K. and Van Liew M. *(2008). Evaluation of global optimization algorithms for parameter calibration of a computationally intensive hydrologic model*. Hydrological Process.
22. Zhou S.M., Warrington D.N., Lei T.W., Lei Q.X., & Zhang M.L. *(2014). Modified CN Method for Small Watershed Infiltration Simulation.* Journal of Hydrologic Engineering, *04014095.*

[Downloaded from mail.jircsa.ir on 2026-09-27]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.4.4.8]

Estimation of Runoff using Modified SCS Models

SaeidSarvari[1] MohsenPourrezaBilondi*[2] Zahra Zeraatkar[3]
[1]MSc Student, Department of Water Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran
[2]*Assistant Professor, Department of Water Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
[3]MSc Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, University of Birjand, Iran
Received: 2019/08
Accepted: 2020/01

Abstract

In recent decades, due to the importance of watershed management programs and the need for adequate information and correct estimation of rainfall and runoff, many conceptual models have been proposed. These models have parameters that must be estimated according to observational data. However, finding the optimal values for the parameters of simulation models has always faced uncertainty. One of the main methods for evaluating and predicting floods is the soil conservation methods provided by the Soil Conservation Service (SCS). This study aims to calibrate model parameters for three modified SCS models, i.e. 1- the Mishra and Singh model, 2- curve number model, and 3- modified curve number (MCN) model, in a basin in southern Chile using the evolutionary PSO algorithm. Comparison of the results was carried out using performance criteria such as Kling Gupta Efficiency (KGE), Nash-Sutcliff coefficient (NS), and mean square error (RMSE). Results revealed that simulated runoff is more efficient in MCN and Mishra and Singh models with KGE = 0.91 in rainfall-runoff simulations.

Keywords: Curve number, PSO evolutionary algorithm, Calibration, Rainfall-runoff modeling.

[Downloaded from mail.jircsa.ir on 2026-09-27]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1398.7.4.4.8]