جغرافیا و پایداری محیط، شمارهٔ ۱۸، بهار ۱۳۹۵
صص. ۸۰-۶۷

مقایسهٔ روش‌های بهینه‌سازی روزنبرک، ژنتیک، URS و SCE-UA جهت تعیین پارامترهای مدل سیم‌هاید برای شبیه‌سازی دبی جریان

محمد گلشن* - دکتری مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران
اباذر اسمعلی عوری - دانشیار مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشگاه محقّق اردبیلی، اردبیل، ایران
هانیه اسدی - دکتری مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران

وصول: ۱۳۹۴/۱۰/۱۱ **پذیرش:** ۱۳۹۵/۳/۴

چکیده

بهینه‌سازی پارامترهای مدل‌های هیدرولوژیکی بارش – رواناب، برای واسنجی این مدل‌ها حائز اهمّیّت است. هدف از واسنجی مدل، تعیین ارزش بهینهٔ پارامترهای مدل است تا بهترین تناسب بین دبی جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده به دست آید. انتخاب روش مناسب، نقش مهمّی در واسنجی پارامترهای مدل‌های هیدرولوژیکی دارد. در این پژوهش، کارایی تکنیک‌های بهینه‌سازی برای واسنجی مدل مفهومی بارش - رواناب سیم‌هاید در حوضهٔ آبخیز خرم‌آباد با مساحت ۲۴۶۷ کیلومترمربع برای شبیه‌سازی دبی جریان، مورد بررسی قرار گرفته است. این تکنیک‌ها شامل الگوریتم‌های ژنتیک، تکامل رقابتی جوامع، نمونه‌گیری تصادفی یکنواخت و الگوریتم روزنبرک هستند. نتایج نشان داد که تغییر الگوریتم‌های بهینه‌سازی در دقّت واسنجی مدل مفهومی تأثیر قابل توجّهی دارد. به طوری که ارزش تابع نش ساتکلیف برای الگوریتم‌های مورد استفاده به ترتیب ۰/۷۳، ۰/۷۲، ۰/۷۰ و ۰/۷۵ به دست آمد. الگوریتم روزنبرک در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها از دقّت بیشتری برخوردار است؛ بنابراین مدل هیدرولوژیکی سیم‌هاید با استفاده از الگوریتم روزنبرک برای شبیه‌سازی دبی جریان دورهٔ زمانی ۲۰۰۸-۲۰۰۴ واسنجی و برای دورهٔ زمانی ۲۰۱۰-۲۰۰۹ صحّت‌سنجی شد. ضرایب آماری NS، RMSE و R برای دورهٔ واسنجی به ترتیب ۰/۷۳، ۰/۶۶ و ۰/۸۶ و برای دورهٔ صحّت‌سنجی به ترتیب ۰/۶۸، ۰/۸۰ و ۰/۸۳ به دست آمد. نتایج نشان داد که الگوریتم‌های بهینه‌سازی در مدل سیم‌هاید دقّت بالایی برای تعیین مقادیر بهینهٔ پارامترهای مدل دارند و مدل برای شبیه‌سازی رواناب منطقهٔ مورد مطالعه از کارایی مناسبی برخوردار است؛ بنابراین با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی و انتخاب تکنیک بهینه‌سازی مناسب، می‌توان با دقّت بالاتری دبی جریان حوضه‌های آبخیز را شبیه‌سازی کرد.

واژگان کلیدی: رواناب، شبیه‌سازی، خرم‌آباد، مدل‌های هیدرولوژیکی.

---

*. نویسندهٔ مسئول: ۰۹۱۴۴۵۳۸۶۲۳
E-mail: Golshan.mohammasd@yahoo.com

مقدّمه

کشورها و مناطق جغرافیایی زیادی در سراسر جهان اطّلاعات جامعی از خصوصیّات حوضه‌های آبخیز ندارند. این وضعیّت، منجر به تدوین تعدادی از روش‌ها برای منطقه‌ای‌کردن مدل‌های هیدرولوژیکی شده است. حوضهٔ آبخیز خرم‌آباد، در قسمت غربی کشور واقع شده و دارای مورفولوژی کلّی کم‌عارضه، کم‌ارتفاع و دارای چشم‌اندازهای نسبتاً یکنواخت است. اندازه‌گیری مستقیم پارامترها در سطح منطقه نیازمند صرف هزینه و زمان زیاد است. همچنین در بسیاری از حوضه‌های آبخیز که نیازمند برنامه‌ریزی منابع آب هستند، ایستگاه‌های هیدرومتری به منظور اندازه‌گیری دبی جریان وجود ندارد، یا آمار ثبت‌شده در ایستگاه‌های اندازه‌گیری دارای نقص هستند لذا به روش‌هایی نیاز است که به کمک آنها بتوان میزان رواناب حاصل از بارندگی را برای یک منطقه شبیه‌سازی کرد (زرین و همکاران، ۱۳۹۱). در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های نوین بهینه‌سازی نظیر الگوریتم ژنتیک[1] و الگوریتم تکامل رقابتی جامع[2] جهت واسنجی مدل‌های ریاضی و یافتن پارامترهای اصلی این مدل‌ها بر اساس اندازه‌گیری‌های دقیق میدانی بسیار متداول شده است (موحد و کمان بدست، ۱۳۸۸) که با به‌کارگیری این تکنیک‌ها در نرم‌افزار RRL[3] قابلیّت زیادی به کارایی مدل‌های بارش رواناب افزوده شده است.

روش‌های غیرمستقیم متعدّدی برای شبیه‌سازی سیستم‌های طبیعی، برآورد دقیق‌تر و جامع‌تر و اعمال محاسبات پیچیده‌تر با استفاده از رایانه ابداع شده است؛ یکی از این روش‌ها، مدل‌سازی یا شبیه‌سازی هیدرولوژیکی است (روحانی و فراهانی مقدم، ۱۳۹۲). به طوری که از مدل‌های هیدرولوژیکی به عنوان ابزاری مهم برای ارزیابی فرایندهای هیدرولوژیکی می‌توان نام برد. فرآیند شبیه‌سازی به عملکرد فرایند یا سیستم واقعی در طول زمان وابسته است که صرف‌نظر از اینکه به صورت دستی یا اتوماتیک انجام شود، به ویژگی‌های عملکرد سیستم واقعی مربوط می‌شود. نتایج حاصل از مطالعات قبلی با مدل‌های هیدرولوژیکی نشان داده است که مشکلات مربوط به واسنجی مدل‌های مفهومی بارش رواناب باید با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی حل شوند (جونستون و پیلگریم[4]، ۱۹۷۶؛ سروشیان و گوپتا[5]، ۱۹۸۵)؛ بنابراین تکنیک‌های مختلف بهینه‌سازی در این راستا ارائه شده است. هنوز هم مشکلاتی در راستای واسنجی مدل‌های مفهومی وجود دارد. این مشکلات وابسته به: ۱. منحصر به فرد نبودن مجموعه پارامترهای بهینه‌شده (زیرا وابستگی داخلی بین پارامترهای مدل‌های مفهومی وجود دارد)، ۲. تأثیرات بر روی تخمین پارامترها به استفاده از توابع هدف مربوط هستند (کوپر[6] و همکاران، ۱۹۹۷). با توجّه به مطالب ذکرشده، انجام مدل‌سازی به عنوان یک پایه در تصمیم‌گیری مهندسی الزامی است. اینکه بدانیم در منطقه‌ای با شرایط خاصّ هیدرولوژیکی و اقلیمی، از یک بارش معیّن چه مقدار رواناب تولید خواهد شد مبنای طراحی تمامی پروژه‌های آبی است. طراحی سدها، کانال‌های آبیاری، زهکشی‌ها، شبکه‌های توزیع و انتقال، مخازن، مجراهای انتقال آب، طراحی الگوی کشت، دورنمای طرح توسعه و... همگی گوشه‌ای از مطالعات هستند که پیش‌نیاز همهٔ آنها، مطالعات بیلان آبی است (جباری و همکاران، ۱۳۹۱).

1- Genetic Algorithm
2- Shuffled Complex Evolution
3- Rainfall Runoff Library
4- Johnston & Pilgrim
5- Sorooshian & Gupta
6- Cooper

در همین راستا، در این پژوهش از الگوریتم‌های مختلف برای شبیه‌سازی دبی جریان در مدل سیم‌هاید[1] استفاده شد و بیشتر به کارایی الگوریتم‌ها در شبیه‌سازی دبی جریان رودخانه پرداخته شده است. این مدل، یک مدل مفهومی با توزیع مکانی یکپارچه است که در دهه‌های اخیر در بعضی از مناطق کشور مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج شبیه‌سازی، قابل قبول ارزیابی شده است. در مطالعه‌ای در حوضهٔ آبریز نازلوچای استان آذربایجان غربی (بهمنش و همکاران، ۱۳۹۲) از مدل سیم‌هاید با الگوریتم بهینه‌سازی جست‌وجو الگو و مدل AWBM[2] با الگوریتم بهینه‌سازی تکامل رقابتی به منظور شبیه‌سازی دبی جریان استفاده شد. نتایج نشان داد که هر دو الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده، از کارایی مناسبی برخوردار هستند و نتایج حاصل از مدل سیم‌هاید نسبت به مدل AWBM از دقّت بیشتری برخوردار است. در تحقیقی روحانی و فراهانی مقدم (۱۳۹۲) با استفاده از الگوریتم ژنتیک در مدل‌های سیم‌هاید و تانک مدل[3] رواناب حوضهٔ آبخیز چهل‌چای را شبیه‌سازی کرده‌اند. نتایج نشان داد که الگوریتم ژنتیک در شبیه‌سازی رواناب از قابلیّت مناسبی برخوردار است و مدل سیم‌هاید نسبت به مدل تانک از عملکرد بالاتری برخوردار است. همچنین در مطالعه‌ای، بگسترا و بنجیو[4] (۲۰۱۲) از الگوریتم بهینه‌سازی نمونه‌گیری تصادفی یکنواخت[5] برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل سیم‌هاید استفاده کرده‌اند؛ که دقّت این الگوریتم، در بهینه‌سازی پارامترهای مدل، قابل قبول ارزیابی شد. در تحقیقی فرانچین[6] و همکاران (۲۰۱۵) برای شبیه‌سازی مقدار دبی جریان از الگوریتم‌های بهینه‌سازی جست‌وجو الگو[7]، ژنتیک، تکامل رقابتی جامع و مدل ADM[8] استفاده کرده‌اند. نتایج نشان داد که الگوریتم تکامل رقابتی در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها از کارایی مناسب‌تری برخوردار است. در تحقیقی سولوماتین[9] (۱۹۹۹) جهت بررسی مشکلات بهینه‌سازی پارامترهای مدل‌های هیدرولوژیکی یکپارچه از الگوریتم‌های جستجوی تصادفی کنترل‌شده[10]، ژنتیک، پوشش خوشه‌ای تطبیقی[11]، چند شروعه[12]، تکاملی[13]، خوشه‌ای و روزنبرک[14] استفاده کرده‌اند. نتایج نشان داد که الگوریتم پوشش خوشه‌ای تطبیقی از کارایی بیشتری برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل برخوردار است.

در منابع مختلف، روش‌های بهینه‌سازی متفاوتی پیشنهاد شده است و توافق عمومی در انتخاب مناسب‌ترین الگوریتم وجود ندارد. هدف از این پژوهش، ارزیابی کارایی چندین الگوریتم بهینه‌سازی با استفاده از مدل بارش رواناب سیم‌هاید است. روش‌های دستی بهینه‌سازی پارامترهای مدل، نیاز به صرف زمان و هزینهٔ زیادی دارند و از طرفی نتایج حاصل از کاربران مختلف با استفاده از روش دستی با یکدیگر تفاوت زیادی دارند لذا استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی از اهمّیّت بالایی برخوردار است که با انتخاب مناسب‌ترین الگوریتم بهینه‌سازی می‌توان با صرف کمترین زمان و هزینه، نتیجهٔ قابل قبول را به دست آورد.

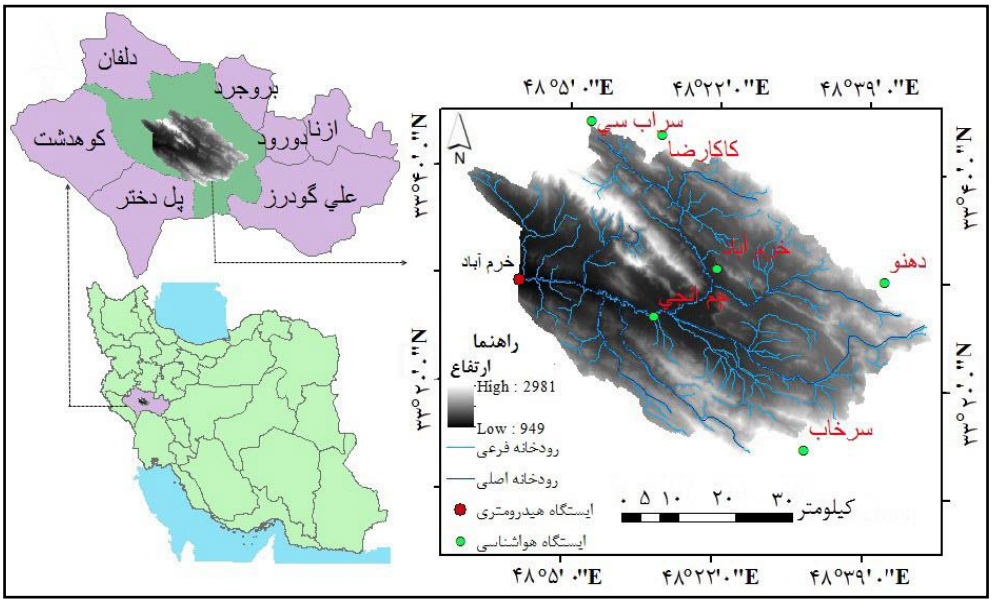
1- SIMHYD (Simpel Hydrology)
2- Allometric Diet Breadth Model
3- Tank Model
4- Bergstra & Bengio
5- Uniform Random Sampling
6- Franchin
7- Pattern Search
8- American Development Model
9- Solomatin
10- Controlled Random Search
11- Adaptive Cluster Covering
12- Multi Start
13- Evolution
14- Rosenbrock

مواد و روش‌ها

حوضهٔ آبخیز خرم‌آباد با مساحت ۲۴۶۷ کیلومترمربع و با محیط ۳۳۹ کیلومتر یکی از زیرحوضه‌های حوضهٔ آبخیز کرخه است که در مرکز استان لرستان واقع شده است (شکل ۱). این حوضه، در محدودهٔ جغرافیایی ۴۷/۹۰ تا ۴۵/۷۵ درجهٔ طول شرقی و ۳۳/۲۰ تا ۳۳/۷۵ درجهٔ عرض شمالی قرار گرفته است. حداقل ارتفاع از سطح دریا ۹۴۹ متر و حداکثر ارتفاع از سطح دریا ۲۹۸۱ متر بوده و با میانگین بارش سالیانه ۴۳۰ میلی‌متر دارای اقلیم نیمه‌خشک است.

مدل سیم‌هاید

نرم‌افزار RRL دارای ۵ مدل بارش رواناب شامل AWBM، سیم‌هاید، اسکرامنتو[1]، اسمار[2] و مدل تانک است. مدل سیم‌هاید، یک مدل مفهومی بارش رواناب با گام زمانی روزانه است که مقدار جریان روزانه را با توجّه به بارش و اطّلاعات تبخیر و تعرّق پتانسیل شبیه‌سازی می‌کند. اطّلاعات ورودی به مدل طبق راهنمای پودگر[3] ۲۰۰۴ وارد مدل شد. مدل سیم‌هاید نسخهٔ ساده‌شدهٔ مدل مفهومی بارش - رواناب هیدرولوژی[4] در سال ۱۹۷۲ و مدهیدرولوژی[5] در سال ۱۹۹۱ است (چیو[6] و همکاران، ۲۰۰۲). پارامترهای مورد استفاده برای واسنجی مدل زیاد نیستند و شامل ۷ پارامتر ضریب جریان پایه، ضریب نفوذ، ضریب رواناب سطحی، کسر نفوذ، ظرفیّت ذخیرهٔ قطع بارش، ضریب تغذیه و ظرفیّت ذخیرهٔ رطوبت خاک است. به طور کلّی، در مدل‌های بارش رواناب مانند مدل سیم‌هاید روابط مختلفی برای شبیه‌سازی هر بخش از فرایندهای هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد که در نهایت با تلفیق نتایج حاصله خروجی مدل ارائه می‌شود. رابطه‌های مورد استفاده در مدل سیم‌هاید در جدول ۱ شرح داده شده است (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۱).



شکل ۱. موقعیّت منطقه و ایستگاه‌های مورد مطالعه

1- Scramento
2- SMAR
3- Podger
4- Hydrology Model
5- ModHydrology Model
6- Chiew

جدول ۱. روابط مورد استفاده در مدل مفهومی سیم‌هاید

پارامترهای مدل	
IMAX=lesser of {INSC, PET}	INT= lesser of {IMAX, RA.IN}
INR=RAIN-INT	RMO=lesser of {COEFF exp (-SQ*SMS/SMSC), INR}
IRUN= INR-RMO	SROUN=SUB*SMS/SMSC*RMO
SMF= RMO-SRUN-REC	REC=CRAK*SMS/SMSC*(RMO-SRUN)
POT= PET-INT	ET= lesser of {10*SMS/SMSC, POT}
BAS= K*GW	RUNOFF= IRUN+SRUN+BAS

در این رابطه‌ها، PET تبخیر و تعرّق پتانسیل، INSC ظرفیّت ذخیرهٔ قطع بارش برحسب میلی‌متر، COEFF حداکثر ضریب نفوذ برحسب میلی‌متر، SQ کسر نفوذ، SMSC ظرفیّت ذخیرهٔ رطوبت خاک برحسب میلی‌متر، SUB ضریب تغذیه، CRAK ضریب رواناب سطحی و K ضریب جریان پایه است.

داده‌های ورودی

در این پژوهش، از آمار روزانه بارش میانگین ایستگاه‌های داخل حوضه، رواناب مشاهداتی ایستگاه هیدرومتری خرم‌آباد و تبخیر و تعرّق به دست آمده از رابطهٔ هارگریوز سامانی، برای شبیه‌سازی مدل استفاده شد. با توجّه به ایستگاه هیدرومتری واقع در خروجی حوضهٔ آبخیز دوره زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ برای انجام شبیه‌سازی انتخاب شد. محدودهٔ تغییرات داده‌های مشاهداتی ورودی مدل با میانگین، انحراف معیار و مدّت‌زمان در جدول ۲ آورده شده است. به طوری که سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۳ برای دورهٔ آموزش مدل در نظر گرفته شد و سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۸ برای واسنجی مدل و سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ برای صحّت‌سنجی مدل انتخاب شد.

الگوریتم‌های بهینه‌سازی مدل‌های مفهومی

هدف نهایی از یک الگوریتم یادگیری معمولی (A) پیدا کردن یک تابع F است که افت مورد انتظار را به حداقل برساند. در واقع، الگوریتم یادگیری، تابعی است که مجموعه‌ای از داده‌ها[1] به تابع f را نشان می‌دهد. بیشتر مواقع الگوریتم یادگیری تابع f را از طریق بهینه‌سازی یک معیار آموزش با توجّه به مجموعه‌ای از پارامترهای (θ) ایجاد می‌کند. الگوریتم‌های یادگیری اغلب خود دارای هشدارهایی به نام حدّ پارامترها (λ) هستند و الگوریتم یادگیری واقعی بعد از انتخاب λ به دست می‌آید که می‌توان با $A\lambda$ نشان داد و برای یک مجموعه یادگیری به صورت $f = A\lambda(Xtrin)$ است (بگسترا و بنجیو، ۲۰۱۲). پیدا کردن حداکثر یا حداقل از یک تابع، روش‌های مختلفی دارد. مهم‌ترین موضوع در بهینه‌سازی رابطهٔ ۱ است (کوپر و همکاران، ۱۹۹۷) که f (x, θ) یک تابع هدف است، x متغیّرهای ورودی و θ° مجموعه (مجموعه‌هایی) از مقادیر پارامترها است که در آن تابع فرضی یک مقدار حداقل خاص f (x, e′) در داخل بازه‌ای از مقادیر قابل قبول پارامترها (S) است.

جدول ۲. مشخّصات اطّلاعات ورودی به مدل

متغیّر	شروع	پایان	مدّت (روز)	مجموع (میلی‌متر)	میانگین (میلی‌متر)	انحراف معیار
تبخیر	۲۰۰۱/۰۹/۲۳	۲۰۱۰/۱۲/۳۱	۳۳۸۷	۹۸۲۱/۳	۲/۹	۱/۸۲۴
بارش	۲۰۰۱/۰۹/۲۳	۲۰۱۰/۱۲/۳۱	۳۳۸۷	۴۱۳۶/۰۹	۱/۲۲۱	۴/۷۵۱
دبی مشاهداتی	۲۰۰۱/۰۹/۲۳	۲۰۱۰/۱۲/۳۱	۳۳۸۷	۱۰۹۱/۳۵	۰/۳۲۲	۰/۴۰۷

$$\min f(x,\theta) = f(x,\theta^{\circ})\ \theta \in S$$ رابطهٔ ۱

1- Xtrain

الگوریتم‌های مختلفی برای بهینه‌سازی واسنجی مدل وجود دارند که می‌توان الگوریتم‌های نمونه‌گیری تصادفی یکنواخت، جست‌وجو الگو، جست‌وجو الگو چند شروعه[1]، جست‌وجو روزنبرک، جست‌وجو چند شروعهٔ روزنبرک، الگوریتم ژنتیک و تکامل رقابتی جامع را نام برد. در این پژوهش، کارایی ۴ الگوریتم در بهینه‌سازی پارامترهای واسنجی مدل سیم‌هاید مورد بررسی قرار گرفته است که این الگوریتم‌ها در زیر شرح داده شده است.

الگوریتم نمونه‌گیری تصادفی یکنواخت

این روش، نسبت به بقیهٔ روش‌ها از کاربرد کمتری برخوردار است و می‌تواند به عنوان مرجعی برای مقایسهٔ راه‌حل‌های بهینه‌سازی یک مشکل مورد استفاده قرار گیرد (زابینسکی[2]، ۲۰۰۹: ۸). این روش، اساس بسیاری از برنامه‌های علوم کامپیوتر، آمار و مهندسی است (سکوت ویتر[3]، ۱۹۸۵). برای استفاده از این الگوریتم، به منظور بهینه‌سازی پارامترهای مدل، در قسمت پارامترهای ورودی، مقادیر حداقل و حداکثر برای پارامترها تعیین شد. الگوریتم مورد استفاده در مرحلهٔ اوّل، از بین بازهٔ پارامترهای ورودی، برای هر پارامتر مقادیری را تعیین می‌کند که این مقادیر در اجرای اوّلیّه به عنوان ارزش پارامتر ثابت نشده‌اند و بعد از تکرار مدل و نزدیک شدن به هدف، این مقادیر ثابت شده‌اند. در این الگوریتم، برای واسنجی مدل در قسمت بهینه‌سازی پارامترها تنها تعداد نقاط کنترلی برای مدل باید تعیین شود که در این پژوهش، مطابق با سایر الگوریتم‌ها تعداد ۱۰۰ نقطه به عنوان نقطهٔ کنترلی به مدل معرّفی شد. بعد از واسنجی مدل، نتایج مقادیر بهینه برای هر نقطهٔ کنترلی ذخیره شد تا با نتایج سایر الگوریتم‌ها مقایسه و بهترین مقدار از بین مقادیر تعیین‌شده توسّط الگوریتم‌های مختلف انتخاب شود.

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش جستجو بر اساس مکانیسم انتخاب و ژنتیک طبیعی است که بقای مصنوعی اصلح را با عملگرهای ژنتیکیِ به دست آمده از طبیعت ترکیب می‌کند (پودگر، ۲۰۰۴). الگوریتم ژنتیک در میان مجموعه‌ای از نقاط جست‌وجو می‌کند و به جای استفاده از مقادیر واقعی هر پارامتر با کدهایی از مجموعهٔ پارامترها کار می‌کند و از قوانین احتمال انتقال استفاده می‌کند. بر مبنای نتایج این ارزیابی‌ها، فرایند جست‌وجو به سمت پاسخ‌های بهینه هدایت می‌شود (روحانی و فراهانی مقدم، ۱۳۹۲). در این پژوهش، تعداد ۱۰۰ نمونهٔ تصادفی به عنوان نقاط کنترلی به مدل معرّفی شد و مقدار حداکثر ۲۰ تکرار برای هر نمونه تصادفی تعیین شد. برای استفاده از این الگوریتم لازم است که حداکثر جهش نیز برای نمونه‌ها انتخاب شود که در این تحقیق، مطابق نتایج روحانی و فراهانی مقدم (۱۳۹۲) بازهٔ ۰/۰۱ تا ۰/۱ به عنوان مقادیر حداکثر جهش انتخاب شد. بعد از تکرار و آزمون مدل، نتایج مقادیر بهینه برای پارامترهای ورودی با استفاده از این الگوریتم تعیین شد.

الگوریتم تکامل رقابتی جامع

الگوریتم SCE رویکردی قوی و مؤثّر برای واسنجی اتوماتیک برای مشکلات زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرد

1- Multi Start Pattern Search
2- Zabinsky
3- Scott Vitter

(سروشیان و همکاران، ۱۹۹۳؛ دوان[1]، ۱۹۹۲؛ وانگ[2]، ۱۹۹۱؛ هولاند[3]، ۱۹۷۵). برای به دست آوردن نقطهٔ بهینه‌سازی، این روش مفاهیم مختلف را مورد استفاده قرار می‌دهد و با ترکیب این مفاهیم، الگوریتم تکامل رقابتی جامع را به عنوان یک روش قدرتمند، مؤثّر و قابل انعطاف معرّفی کرده است (اسلامی و همکاران، ۲۰۰۴). در این تحقیق حداکثر تعداد تکرار نمونه‌ها مانند روش الگوریتم ژنتیک ۲۰ تکرار انتخاب شد. برای کنترل پارامترها مقادیر آلفا و بتا در بازه بین ۱ تا ۵ و فاکتور T بین ۰/۱ تا ۲ برای تکرارهای مختلف استفاده شد. با توجّه به معیارهای کنترلی مقادیر پارامترها برای هر تکرار تعیین شده‌اند.

الگوریتم روزنبرک

روش روزنبرک یک روش جست‌وجو شعاعی است. این الگوریتم متعلّق به یک کلاس بزرگ از روش‌ها است که سعی می‌کند از سیستم‌های غیر خطّی اجتناب کند و آنها را با توالی از سیستم‌های خطّی جایگزین کند (کومار[4] و همکاران، ۲۰۱۵). این الگوریتم، بیشتر از اطّلاعات نزدیک در بازهٔ منحنی پاسخ استفاده می‌کند. در این الگوریتم نیز مقادیر آلفا و بتا برای تکرارهای مختلف بین ۱ تا ۵ انتخاب شد. حداکثر تعداد تکرار نیز برای نمونه‌ها ۲۰ تکرار انتخاب شد. در این الگوریتم، برای بهینه‌سازی پارامترها لازم است که مقدار اوّلیّهٔ پارامترها مشخّص شود که در این پژوهش، از مقدار پیش‌فرض مدل برای پارامترها استفاده شد. اندازهٔ گام اوّلیّه نیز بین ۰/۰۱ تا ۱ انتخاب شد.

بهینه‌سازی پارامترهای مدل

در مدل‌های هیدرولوژیکی پارامترهای مختلف برای شبیه‌سازی فرایند هیدرولوژیکی در سطح حوضهٔ آبخیز وجود دارند که مقدار بهینهٔ این پارامترها، باید مشخّص شوند. در این پژوهش، با توجّه به معایب روش دستی و هدف تحقیق، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ذکرشده برای بهینه‌سازی مقدار پارامترهای مدل استفاده شد. به طوری که با واردکردن اطّلاعات مورد نیاز و با استفاده از الگوریتم مورد نظر، اقدام به واسنجی و تعیین مقدار بهینهٔ پارامترهای مدل شد و این فرایند برای همهٔ الگوریتم‌های مورد نظر انجام شد. با تعیین مقادیر پارامترها با استفاده از الگوریتم‌های مورد نظر، کارایی مدل مورد ارزیابی قرار گرفت و مناسب‌ترین الگوریتم برای شبیه‌سازی دبی جریان در مدل سیم‌هاید و حوضهٔ آبخیز خرم‌آباد تعیین شد.

معیارهای واسنجی و صحّت‌سنجی مدل‌ها

تعدادی از پارامترهای مدل هیدرولوژی را نمی‌توان به طور مستقیم از طریق اندازه‌گیری و تخمین مشخّصات حوضه به دست آورد، به همین دلیل، برای برآورد این پارامترها مدل، مورد واسنجی قرار می‌گیرد (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۱). توابع هدف زیادی برای واسنجی مدل می‌توان استفاده کرد که در این پژوهش، جهت ارزیابی کارایی مدل از ضرایب آماری نش ساتکلیف (NS[5])، ضریب همبستگی (R) و ریشهٔ مجموع مربعات خطا (RMSE[6]) استفاده شد. این ضرایب، به منظور تعیین میزان تطابق بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی است. ضریب همبستگی نشان می‌دهد که خطّ رگرسیونی بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌شده

1- Duan
2- Wang
3- Holland
4- Kumar
5- Nash Sutcliffe
6- Root Mean Square Error

تا چه میزان به بیشترین مقدار هماهنگی بین این دو سری مقادیر نزدیک است و از صفر تا ۱ متغیّر است (رابطهٔ ۲). راندمان (NS) به عنوان تابع هدف در هنگام واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. مقدار آن از منفی بی‌نهایت تا ۱ متغیّر است و نشان می‌دهد که خطّ رگرسیونی بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌شده تا چه مقدار به خطّ رگرسیونی با شیب ۱ (خطّ اریب با شیب ۱:۱) نزدیک است (رابطهٔ ۳). با استفاده از نمایهٔ ریشهٔ مجموع مربعات خطا (رابطهٔ ۴)، شبیه‌سازی که دارای کمترین ریشهٔ مجموع مربعات خطا باشد از دقّت بیشتری برخوردار است. روابط مربوط به محاسبهٔ این پارامترها به شرح زیر است:

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs}-\overline{Q}_{obs})(Q_{sim}-\overline{Q}_{sim})}{\left[\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs}-\overline{Q}_{obs})^2\right]^{0.5}\left[\sum_{i=1}^{n}(Q_{sim}-\overline{Q}_{sim})^2\right]^{0.5}}}$$ رابطهٔ ۲

$$NS = 1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs}-Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs}-\overline{Q}_{obs})^2}$$ رابطهٔ ۳

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(o_i-p_i)^2}{n}}$$ رابطهٔ ۴

در این رابطه‌ها، Q_{Obs} دبی مشاهده‌ای، Q_{Sim} دبی شبیه‌سازی‌شده، $\overline{Q}_{Obs}$ میانگین دبی مشاهده‌ای، $\overline{Q}_{Sim}$ میانگین دبی شبیه‌سازی‌شده برحسب مترمکعب بر ثانیه است. همچنین SSE تغییرات مربوط به داخل گروه‌ها یا واریانس خطا است که از رابطهٔ زیر به دست می‌آید (گاسمن[1] و همکاران، ۲۰۰۷).

نتایج

الگوریتم‌های بهینه‌سازی پارامترهای مدل مفهومی، برای تخمین بهینه به طور تصادفی نقطهٔ آغاز را انتخاب می‌کنند و نمونه‌برداری تصادفی در نتایج مدل مؤثّر خواهد بود. در این پژوهش، از الگوریتم‌های مختلفی برای واسنجی مدل استفاده شد. نتایج حاصل از به‌کارگیری هریک از الگوریتم‌ها شرح داده شده است. در الگوریتم تکامل رقابتی جامع و ژنتیک، بهترین ارزش جهش معادل با ۰/۱ به دست آمد. در الگوریتم تکامل رقابتی جامع، ارزش ضرایب آلفا و بتا به ترتیب ۱/۲ و ۰/۵ به دست آمد. همچنین در الگوریتم روزنبرک ضرایب آلفا، بتا و فاصلهٔ اوّلیّه به ترتیب ۱/۴، ۰/۷ و ۰/۰۵ تعیین شد. بازهٔ مقادیر مورد استفاده برای بهینه‌سازی پارامترهای مختلف مدل یکسان هستند که با استفاده از الگوریتم‌های مختلف، مقادیر بهینه برای هر پارامتر تعیین شد. مقادیر بهینهٔ تعیین‌شده برای پارامترهای مدل در جدول ۳ آورده شده است.

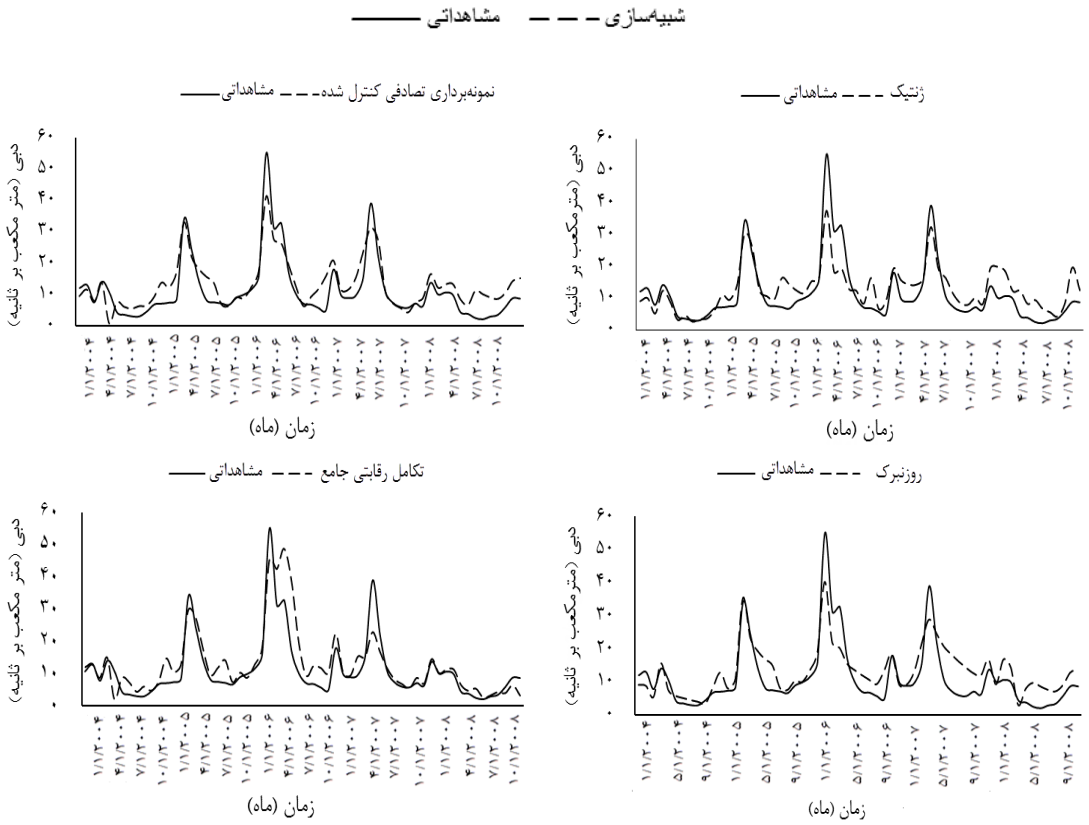
ضریب نش ساتکلیف به عنوان تابع هدف برای ارزیابی نتایج بهینه‌سازی پارامترهای مدل، مورد استفاده قرار گرفت. نتایج ارزیابی کارایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی مورد استفاده، در جدول ۴ ذکر شده است. نتایج نشان می‌دهد که دقّت تابع هدف در الگوریتم‌های مورد مطالعه قابل قبول است. به منظور مقایسهٔ بهتر بین الگوریتم‌های مورد استفاده، منحنی تغییرات دبی جریان برای الگوریتم‌های مختلف در شکل ۲ نشان داده شده

1- Gassman

است که بیان‌کنندهٔ کارایی مناسب الگوریتم‌های مورد استفاده برای شبیه‌سازی رواناب در منطقهٔ مورد مطالعه است.

جدول ۳. بهینه‌سازی پارامترها با استفاده از الگوریتم‌های مختلف

پارامتر	حداقل	حداکثر	الگوریتم			
			GA	Rosenbrock	URS	SCE-UA
ضریب آب پایه	۰	۱	۰/۰۱۱	۰/۰۱۰۸	۰/۰۲۹	۰/۰۵۸
آستانهٔ نفوذناپذیری	۰	۵	۰/۸۰	۰/۰۲	۰/۸	۳/۰۷
ضریب نفوذ	۰	۴۰۰	۲۶۰/۳۹	۲۹۷/۵۲	۲۶۰	۲۳۲/۷
شکل نفوذ	۰	۱۰	۲/۱۱	۰/۰۰۱۴	۲/۱۱	۰/۹۲۴
ضریب جریان داخلی	۰	۱	۰/۰۱۹	۰/۰۹۳	۰/۰۱	۰/۰۰۰۵
منفذ	۰	۱	۰/۹۳	۰/۹۶	۰/۹۳	۰/۷۶
ظرفیّت گیرش بارندگی	۰	۵	۱/۳۷	۱/۲۴	۱/۱۹	۱/۴۲
ضریب تغذیه	۰	۱	۰/۴۶	۰/۴۹	۰/۴۸	۰/۴۱
ظرفیّت ذخیره رطوبت خاک	۱	۵۰۰	۱۵۱	۱۵۰	۱۵۴	۱۵۶

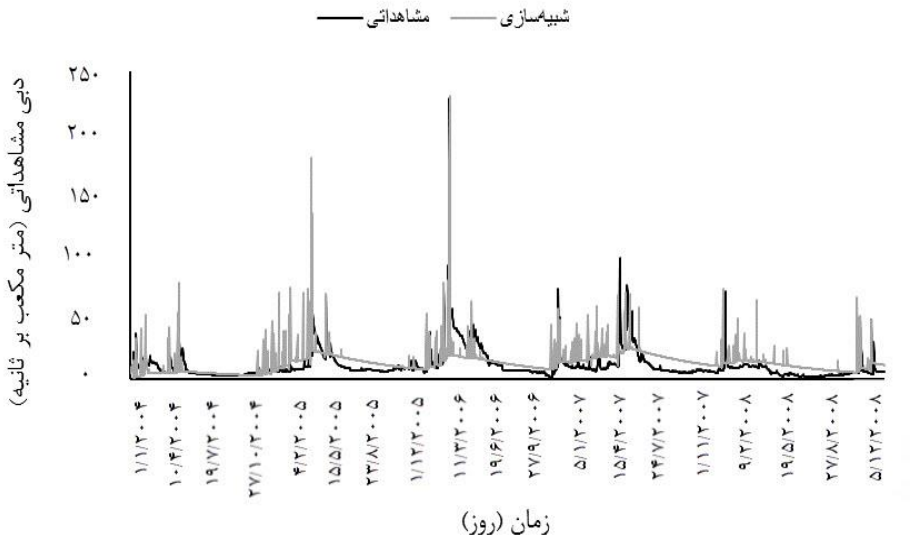


شکل ۲. منحنی تداوم جریان حاصل از الگوریتم‌های مورد استفاده

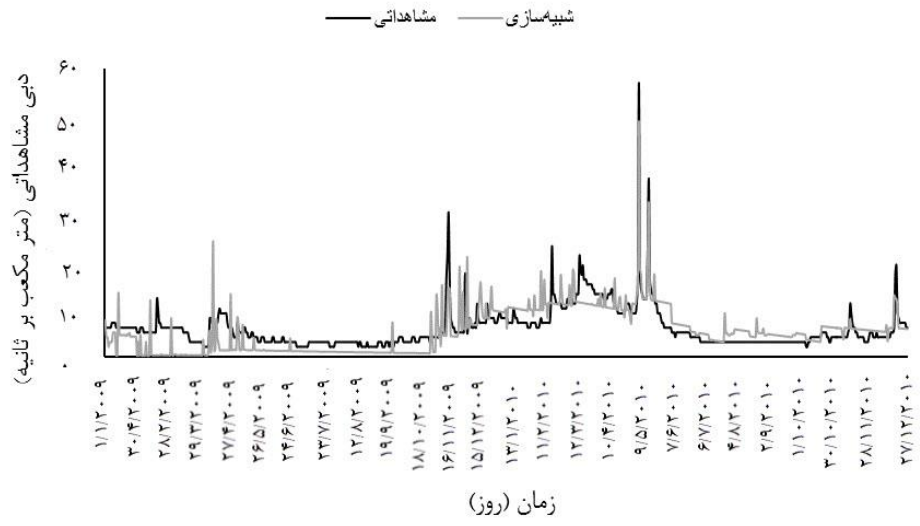
جدول ۴. ارزیابی کارایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی پارامترها

تابع هدف	دوره	الگوریتم‌های بهینه‌سازی			
		ژنتیک	روزنبرک	نمونه‌گیری تصادفی یکنواخت	تکامل رقابتی جامع
NS	واسنجی	۰/۷۳	۰/۷۵	۰/۷۰	۰/۷۲
	صحّت‌سنجی	۰/۷۱	۰/۶۵	۰/۶۷	۰/۶۵

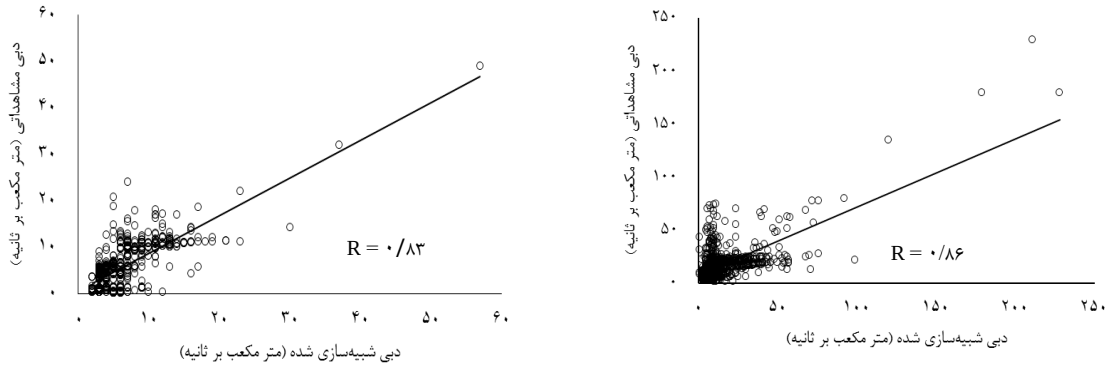
میانگین دبی شبیه‌سازی‌شده توسّط الگوریتم‌های جستجو تصادفی یکنواخت، تکامل رقابتی جامع، ژنتیک و روزنبرک به ترتیب برابر با ۱۳/۱، ۱۲/۹، ۱۳/۵ و ۱۲/۳ مترمکعب بر ثانیه است که نزدیک به دبی متوسّط مشاهداتی (۱۱/۵ مترمکعب بر ثانیه) هستند. در صورتی که دبی‌های اوج شبیه‌سازی‌شده با استفاده از الگوریتم روزنبرک نسبت به سایر الگوریتم‌ها از دقّت بالاتری برخوردار است (شکل ۲). با توجّه به کارایی الگوریتم‌های مورد استفاده (جدول ۴) از الگوریتم روزنبرک برای شبیه‌سازی رواناب منطقهٔ مورد مطالعه استفاده شد. دبی جریان مربوط به دورهٔ آماری ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۸ برای واسنجی مدل به صورت روزانه انتخاب شد که نتایج شبیه‌سازی مدل در شکل ۳ نشان داده شده است. جهت صحّت‌سنجی نتایج حاصله، مدل برای دورهٔ آماری ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۰ دوباره اجرا شد که نتایج به دست آمده در شکل ۴ در مقیاس زمانی روزانه نشان داده شده است. ارزیابی کارایی مدل با استفاده از ضرایب آماری NS، RMSE و R در جدول ۵ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۵ ضریب همبستگی بین مقادیر دبی شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی آورده شده است.



شکل ۳. واسنجی مدل سیم‌هاید با الگوریتم بهینه‌سازی روزنبرک برای دورهٔ ۲۰۰۸-۲۰۰۴



شکل ۴. صحّت‌سنجی مدل سیم‌هاید با الگوریتم بهینه‌سازی روزنبرک برای دورهٔ ۲۰۱۰-۲۰۰۹



شکل ۵. خط همبستگی بین دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده الف: واسنجی ب: اعتبار سنجی

جدول ۵. ارزیابی کارایی مدل سیم‌هاید در دوره‌های شبیه‌سازی دبی جریان

دوره	طول دوره آماری	NS	RMSE	R
واسنجی	۱۸۲۷ (روز)	۰/۷۳	۰/۶۶	/۸۶.
صحت‌سنجی	۷۳۰ (روز)	۰/۶۸	۰/۸	۰/۸۳

بحث

بهینه‌سازی پارامترهای واسنجی در مدل‌های بارش رواناب برای شبیه‌سازی دبی جریان از اهمّیّت بالایی برخوردار است که در برخی از مدل‌ها مانند IHACRES[1] بهینه‌سازی پارامترها به صورت دستی انجام می‌شود و در مدل SWAT[2] این بهینه‌سازی با استفاده از یک نرم‌افزار دیگر (SWAT-Cup) انجام می‌شود. در صورتی که در مدل سیم‌هاید، بهینه‌سازی پارامترها با تعیین الگوریتم‌های مختلف انجام می‌شود. نتایج ارزیابی الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی نشان داد که الگوریتم‌های مورد استفاده از کارایی بالایی در بهینه‌سازی پارامترهای مدل مفهومی سیم‌هاید برخوردار هستند. مطابقت نتایج الگوریتم‌های ژنتیک و تکامل رقابتی جامع در مطالعات (کوپر و همکاران، ۱۹۹۷؛ فرانچین و همکاران، ۲۰۱۵) ذکر شده است. الگوریتم نمونه‌گیری تصادفی یکنواخت با تابع هدف ۰/۷۰ در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها از دقّت کمتری برخوردار است که در مطالعات زابینسکی (۲۰۰۹) به این موضوع اشاره شده است. بین الگوریتم‌های بهینه‌سازی روزنبرک، ژنتیک و تکامل رقابتی جامع اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد و در بین الگوریتم‌های ذکر شده الگوریتم روزنبرک با تابع هدف ۰/۷۵ از بیشترین کارایی برخوردار است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل سیم‌هاید با الگوریتم روزنبرک نشان داد که دبی خروجی از حوضه به خوبی شبیه‌سازی شده است و بین دبی شبیه‌سازی‌شده و دبی مشاهداتی انطباق خوبی وجود دارد. کارایی مدل سیم‌هاید برای شبیه‌سازی رواناب در حوضه‌های داخل کشور توسّط برخی از مطالعات جباری و همکاران (۱۳۹۱) و بهمنش و همکاران (۱۳۹۲) نیز بیان شده است. با توجّه به اینکه حوضهٔ آبخیز خرم‌آباد یک حوضهٔ کوهستانی است و بارش به صورت برف در این منطقه زیاد است، دبی جریان مشاهداتی در ماه‌های فصل بهار به صورت قابل توجّهی به وسیلهٔ ذوب برف افزایش پیدا می‌کند که باعث کاهش کارایی مدل در شبیه‌سازی رواناب این ماه‌ها می‌شود. این موضوع همچنین در مطالعهٔ انجام‌شده توسّط گلشن و همکاران (۱۳۹۴) با مدل SWAT در حوضهٔ آبخیز خرم‌آباد بیان شده است. به

1- Identification of Hydrographs and Components for Rainfall, Evapotranspiration and Stream Flow Data
2- Soil and Water Assessment Tools

منظور صحّت‌سنجی نتایج حاصل از دورهٔ واسنجی، مدل برای دورهٔ زمانی ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ با گام زمانی روزانه اجرا شد. نتایج نشان داد که دبی شبیه‌سازی‌شده برای دورهٔ صحّت‌سنجی با دبی مشاهداتی انطباق قابل قبولی را دارد. مقدار ضریب R^2 و NS برای این دوره به ترتیب ۰/۸۳ و ۰/۶۸ به دست آمد و مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی به خط یک به یک نزدیک می‌باشند. با توجّه به قابل قبول بودن کارایی مدل در دوره‌های واسنجی و صحّت‌سنجی با سطح اعتماد قابل قبولی می‌توان شبیه‌سازی مدل سیم‌هاید برای حوضهٔ خرم‌آباد را قبول کرد.

نتیجه‌گیری

مدل سیم‌هاید از مدل‌های هیدرولوژیکی مفهومی است که در دههٔ اخیر در داخل کشور به منظور شبیه‌سازی دبی جریان با گام زمانی روزانه مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعات انجام‌شده به طور جداگانه از روش‌های متفاوتی برای بهینه‌سازی پارامترها استفاده کرده‌اند. در واقع کارایی مدل‌های بارش - رواناب به دقّت واسنجی پارامترهای مدل بستگی دارد. مقادیر بعضی از پارامترهای ورودی به مدل قابل اندازه‌گیری نیست و نیاز به صرف هزینهٔ زیاد دارد و امکان اندازه‌گیری این پارامترها برای تمام سطح حوضه وجود ندارد؛ لذا بهینه‌سازی پارامترهای مؤثّر در شبیه‌سازی، بهترین راه‌حل برای دستیابی به ارزش تقریبی پارامترها است. بهینه‌سازی دستی پارامترها دارای خطای زیاد می‌باشد و نیاز است که کاربر از تجربهٔ بالایی برخوردار باشد. استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی با کمترین صرف هزینه و زمان، امکان اندازه‌گیری پارامترهای مدل را فراهم می‌کند و با داشتن آشنایی از مشخّصات منطقهٔ مطالعاتی، می‌توان نتایج قابل قبولی به دست آورد؛ بنابراین انتخاب الگوریتم بهینه‌سازی حائز اهمّیّت فراوان است. در این مطالعه، کارایی ۴ الگوریتم بهینه‌سازی برای واسنجی پارامترهای مؤثّر در شبیه‌سازی دبی جریان حوضهٔ آبخیز خرم‌آباد مورد مقایسه قرار گرفت. الگوریتم‌های مورد استفاده اختلافاتی را نشان داده‌اند به طوری که الگوریتم روزنبرک در بین الگوریتم‌های بهینه‌سازی مورد استفاده از بیشترین دقّت برخوردار است؛ بنابراین برای شبیه‌سازی دوره‌های زمانی مورد نظر از این الگوریتم بهینه‌سازی استفاده شد و نتایج شبیه‌سازی مدل نشان داد که پارامترهای مورد استفاده در مدل سیم‌هاید در سطح اعتماد قابل قبولی برای حوضهٔ آبخیز خرم‌آباد مشخّص شده‌اند. با توجّه به اینکه مدل سیم‌هاید یک مدل یکپارچه است و به ورودی‌های کمتری نیاز دارد، این مدل می‌تواند به منظور شبیه‌سازی رواناب در اکثر حوضه‌های کشور مورد استفاده قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود برای بالا بردن اعتماد به مقادیر پارامترهای بهینه‌شده توسّط الگوریتم روزنبرک از سایر مدل‌های بارش - رواناب که دارای پارامترهای مشابه با مدل سیم‌هاید هستند استفاده شود.

منابع

بهمنش، جواد؛ جباری، آناهیتا؛ منتصری، مجید؛ رضایی، حسین (۱۳۹۲) مقایسهٔ مدل‌های AWBM و SimHyd در مدل‌سازی بارش - رواناب (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ آبریز نازلوچای استان آذربایجان غربی)، **جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی**، ۵۲ (۴)، صص. ۱۶۸-۱۵۵.

جباری، آناهیتا؛ بهمنش، جواد؛ جباری، امیر (۱۳۹۱) مدل‌بندی بیلان آبی روزانه حوضه‌های آبریز به روش SimHyd (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ آبریز نازلوچای ارومیه)، **سوّمین کنفرانس ملّی مدیریت منابع آب**، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

روحانی، حامد؛ فراهانی مقدم، محسن (۱۳۹۲) واسنجی خودکار دو مدل بارش - رواناب تانک و SimHyd با استفاده از

الگوریتم ژنتیک، **مرتع و آبخیزداری**، ۶۶ (۴)، صص. ۵۳۳-۵۲۱.

زرین، هدایت‌الله؛ مقدم‌نیا، علیرضا؛ نام‌درست، جواد؛ مساعدی، ابوالفضل (۱۳۹۱) شبیه‌سازی رواناب خروجی در حوضه‌های آبخیز بدون آمار با استفاده از مدل بارش - رواناب AWBM (مطالعهٔ موردی: استان سیستان و بلوچستان)، **پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک**، ۲۰ (۲)، صص. ۲۰۸-۱۹۵.

گلشن، محمد؛ اسمعلی عوری، اباذر؛ شاهدی، کاکا؛ جهانشاهی، افشین (۱۳۹۴) ارزیابی کارایی مدل‌های SWAT و IHACRES در شبیه‌سازی رواناب حوضهٔ آبخیز خرم‌آباد، **دانش آب‌وخاک تبریز**، ۲۶ (۲)، صص. ۴۲-۲۹.

گودرزی، محمد رضا؛ ذهبیون، باقر؛ مساح بوانی، علیرضا؛ کمال، علیرضا؛ (۱۳۹۱) مقایسهٔ عملکرد سه مدل هیدرولوژیکی SWAT، IHACRES و SimHyd در شبیه‌سازی رواناب، **مدیریت آب و آبیاری**، ۲ (۱)، صص ۴۰-۲۵.

موحد، اسماعیل؛ کمان بدست، امیر عباس (۱۳۸۸) بهینه‌سازی مدل انتقال رسوب با استفاده از روش الگوریتم SCE (مطالعهٔ موردی: رودخانهٔ کرخه)، **کنفرانس علوم آب، خاک و گیاه**، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول.

Bergstra, J., Bengio, Y. (2012) Random Search for Hyper-Parameter Optimization, **Machine Learning Research,** 13, pp. 281-305.

Chiew, F. H. S., Peel, M. C., Western, A. W. (2002) **Application and Testing of the Simple Rainfall-Runoff Model SIMHYD, In: Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications,** Water Resources Publication, Littleton, Colorado, USA, pp. 335-367.

Cooper, V. A., Nguyen, V. T. V., Nicell, J. A. (1997) Evaluation of Global Optimization Methods for Conceptual Rainfall-Runoff Model Calibration, **Water Science Technique,** 36 (5), pp. 53-60.

Duan, Q., Sorooshian, S., Gupta, H. V. (1992) Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models, **Water Resources Research**, 28 (4), pp. 1015-1031.

Eslami, H. R., Qaderi, k., Samani, J. M. V. (2004) Auto Calibration of Conceptual Rainfall-Runoff Model with Shuffeled Complex Evolution, **The First International Water Recourse Management Conference**, Tehran University, Iran.

Franchini, M., Galeati, G., Berra, S. (2015) Global Optimization Techniques for the Calibration of Conceptual Rainfall-Runoff Models, **Hydrological Sciences Journal**, 43 (3), pp. 443-458.

Gassman, P. W., Reyes, M., Green, C. H., Arnold, J. G. (2007) the Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Directions, **Transactions of the ASABE**, 50 (4), pp. 1212-1250.

Holland, J. H. (1975) **Adaptation in Natural and Artificial Systems**, University of Michigan Press, Ann Arbor.

Johnston, P. R., Pilgrim, D. H. (1976) Parameter Optimization for Watershed Models, **Water Recourse Research**, 12 (3), pp. 477-486.

Kumar, A., Singh, R., Pratysha. J., Chatterjee, Ch., Mishra, A. (2015) Identification of the Best Multi-Model Combination for Simulating River Discharge. **Hydrology**, 525, pp. 313-325.

Podger, G. (2004) **Rainfall Runoff Library,** User Guide. CRC for Catchment Hydrology, Australia.

Scott Vitter, J. (1985) Random Sampling with a Reservoir, **ACM Transactions on Mathematical Software**, 11 (1), pp. 37-57.

Solomatine, D. P. (1999) Two Strategies of Adaptive Cluster Covering with Descent and their Comparison to other Algorithms. **Global Optimization**, 14 (1), pp. 55-78.

Sorooshian, S., Duan, Q., Gupta, H. V. (1993) Calibration of Rainfall-Runoff Models: Application of Global Optimization to the Sacramento Soil Moisture Accounting Model, **Water Resources Research**, 29 (4), pp. 185-1194.

Sorooshian, S., Gupta, V. K. (1985) The Analysis of Structural Identify Ability: Theory and Application to Conceptual Rainfall-Runoff Models, **Water Recourse Research**, 21 (4), pp. 487-495.

Wang, Q. J. (1991) The Genetic Algorithms and Its Application to Calibrating Conceptual Rainfall-Runoff Models, **Water Resource Research**, 27 (9), pp. 2467-2471.

Zabinsky, Z. B. (2009) **Random Search Algorithms**, Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science.