DOI: 10.22059/ijswr.2019.258701.667923 تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۰، شماره ۷، آذر ۱۳۹۸ (ص ۱۷۶۹-۱۷۵۹)

Performance Evaluation of AWBM, Sacramento and SimHyd models in Runoff Simulation of the Amameh Watershed using Automatic Calibration Optimization Method of Genetic Algorithm

MOHAMMAD REZA MOHAMMADI VAND[1], SHAHAB ARAGHINEJAD[2], KUMARS EBRAHIMIAND[3] AND FERESHTEH MODARESI[4*]

1. MSc Student, Irrigation and Reclamation Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2. Associate Professor, Irrigation and Reclamation Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
3. Professor, Irrigation and Reclamation Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
4. Ph.D. Graduated Student, Irrigation and Reclamation Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(Received: June. 14, 2018- Revised: Feb. 7, 2019- Accepted: March. 9, 2019)

ABSTRACT

One of the valid methods for simulation of the complex and non-linear process of rainfall-runoff is to use hydrological models. The purpose of this paper is to investigate the performance of three conceptual and lumped rainfall-runoff models; AWBM, Sacramento and SimHyd for simulating daily runoff at the outlet of the Amameh watershed using automatic calibration optimization genetic algorithm. Similar to other hydrological models, the range of parameters' variations is high in all three models and due to the difficulty of calibrating with trial and error-based methods, in this paper, the use of automatic calibration optimization methods for the hydrological models investigated. Preparation of required maps carried out by the GIS software version 10.4.1. Daily rainfall, potential evapotranspiration and observation runoff data of 2001-2005 used for calibration and 2006- 2007 data for simulations verificasion. The evaluation criteria including Nash-Sutcliff coefficient (NSE), coefficient of determination (R^2) and root mean square error (RMSE) used to evaluate the proposed models. The statistical and graphical results of calibration and verification steps showed that SimHyd model performed better than the other two models with Nash-Sutcliff coefficient of 0.575 and 0.731, determination coefficient of 0.61 and 0.80 and the root mean square error of 1.033 and 0.829 respectively in the calibration and verification periods, using the automatic calibration optimization of the genetic algorithm and good graphical matching with the observational values. Also, AWBM and Sacramento models have satisfactory and desirable graphical and statistical results in the selected watershed and emphasize the good performance of automatic calibration optimization of the genetic algorithm.

Keywords: AWBM, Sacramento, SimHyd , Genetic algorithm ,Hydrological models.

*Corresponding Author Email: FModaresi@ut.ac.ir

ارزیابی عملکرد مدل‌های AWBM، Sacramento و SimHyd در شبیه‌سازی رواناب حوضه امامه با استفاده از بهینه‌ساز واسنجی خودکار الگوریتم ژنتیک

محمدرضا محمدی‌وند[۱]، شهاب عراقی‌نژاد[۲]، کیومرث ابراهیمی[۳]، فرشته مدرسی[*۴]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳. استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۴. دانش آموخته دکتری گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۲۴- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۱/۱۸- تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۱۲/۱۸)

چکیده

یکی از روش‌های معتبر در شبیه‌سازی فرآیند پیچیده و غیرخطی بارش–رواناب استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی است. هدف مقاله حاضر بررسی کارایی سه مدل بارش-رواناب یکپارچه و مفهومی AWBM، Sacramento و SimHyd در شبیه-سازی رواناب روزانه در خروجی حوضه آبریز معرف امامه با کاربرد بهینه‌ساز واسنجی خودکار الگوریتم ژنتیک است. مشابه سایر مدل‌های هیدرولوژیکی، در هر سه مدل مذکور محدوده تغییر پارامترها زیاد است و با توجه به دشواری واسنجی با روش‌های متداول مبتنی بر سعی و خطا، در این مقاله کاربرد روش‌های بهینه‌سازی به منظور واسنجی خودکار مدل‌های هیدرولوژیکی بررسی شد. تهیه نقشه‌های مورد نیاز در محیط نرم‌افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی نسخه ۱۰,۴,۱ انجام گرفت و داده‌های بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل و رواناب مشاهداتی روزانه سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۰۱ برای واسنجی و سال‌های ۲۰۰۶-۲۰۰۷ برای صحت‌سنجی در امر شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. معیارهای ارزیابی شامل ضریب نش-ساتکلیف (NSE)، ضریب تبیین (R^2) و ضریب مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) برای ارزیابی مدل‌ها استفاده شد. نتایج آماری و گرافیکی واسنجی و صحت‌سنجی حاکی از عملکرد بهتر مدل SimHyd نسبت به دو مدل دیگر با داشتن ضریب نش‌ساتکلیف ۰/۵۷۵ و ۰/۷۳۱، تبیین ۰/۶۱ و ۰/۸۰ و مجذور میانگین مربعات خطا ۱/۰۳۳ و ۰/۸۲۹ به ترتیب در دوره واسنجی و صحت‌سنجی با کاربرد بهینه‌ساز واسنجی خودکار الگوریتم ژنتیک و انطباق گرافیکی خوب با مقادیر مشاهداتی است. همچنین مدل‌های AWBM و Sacramento نیز نتایج آماری و گرافیکی رضایت‌بخش و مطلوب در حوضه منتخب داشته و کارایی خوب بهینه‌ساز واسنجی خودکار الگوریتم ژنتیک را مورد تأکید قرار می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: AWBM، Sacramento، SimHyd، الگوریتم ژنتیک، مدل‌های هیدرولوژیکی.

مقدمه

تأکید زیادی بر مدل‌سازی رفتار قابل شناسایی بارش–رواناب در مقیاس یک حوضه آبریز به جای فرآیندهای هیدرولوژیکی کوچک‌مقیاس که توسط آن بارندگی منجر به ایجاد جریان‌های آبی می‌شود، وجود دارد. به منظور افزایش جذابیت فیزیکی، ساختار مدل‌های به کار برده شده در AWBM[۱]، Sacramento و SimHyd[۲] مفهوم دقیقی از فرآیندهای یک حوضه‌ی آبریز بزرگ‌مقیاس را در خود جای داده‌اند.

شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب در حوضه‌های آبریز، اهمیت خاصی در مدیریت منابع آب و مهندسی رودخانه دارد. به دلیل تعدد عوامل هیدرولوژیکی مؤثر در حوضه‌های آبریز، عکس-العمل اغلب حوضه‌ها در برابر نزولات جوی، پیچیده و متفاوت است. بارش، تنها منبع تأمین آب حوضه‌های آبریز است که از نظر زمان و محدوده اثرگذاری بر حوضه‌ها، به گونه‌های مختلف عمل می‌کند لذا وجود اطلاعات دقیق و کنترل شده بارش می‌تواند در فرآیند شبیه‌سازی رواناب به عنوان اولین متغیر، مورد بهره‌برداری

* نویسنده مسئول: FModaresi@ut.ac.ir

1. Australian Water Balance Model
2. Simple Hydrology

قرار گیرد. مدل‌های زیادی برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب توسط محققین ارائه شده است که عموماً بر پایه روش‌های متداول آماری استوارند.

مدل‌های مفهومی از تعدادی پارامتر برخوردارند که چکیده-ای از ویژگی‌های حوضه آبریز را در خود می‌گنجانند. بیشتر پارامترهای مؤثر در بارش-رواناب از کمیت‌های قابل اندازه‌گیری حوضه به دست نمی‌آیند و لازم است از راه واسنجی[1] مدل برآورد شوند. واسنجی دستی مدل‌های هیدرولوژیکی از اوایل دهه ۱۹۶۰ میلادی مورد توجه قرار گرفته است، ولی به دلیل وقت‌گیری و پیچیدگی این فرآیند، از اواخر دهه مذکور بحث واسنجی خودکار مدل‌های هیدرولوژیکی با استفاده از الگوریتم‌ها مورد توجه قرار گرفت. در اوایل استفاده از روش واسنجی خودکار[2]، نتایج چندان موفقیت‌آمیز و رضایت‌بخش نبود. ظهور و پیدایش الگوریتم‌های الهام گرفته از طبیعت سبب تحولی بزرگ در بحث واسنجی خودکار مدل‌های هیدرولوژیکی شد به طوری که امروزه به دلیل عملکرد خوب این روش‌ها، به طور گسترده‌ای توسط محققین علوم آب مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در سال‌های اخیر، رشد سریع محاسبات رایانه‌ای به روش-های بهینه‌سازی خودکار کمک شایانی کرده است. این نوع روش-های واسنجی هدفمند بوده و امروزه با پیشرفت تکنولوژی در عرصه رایانه کاربرد آن‌ها آسان شده است. در دو دهه اخیر با مطالعات بسیاری عملکرد روش‌های بهینه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

Wang (1991) روش الگوریتم ژنتیک را جهت کالیبراسیون پارامترهای مدل‌های مفهومی بارش-رواناب به کار برد. Sharifi and Boyd (1994) مدل‌های بارش-رواناب سه پارامتری AWBM و SFB را در استرالیا مورد مقایسه قرار داده و نتیجه گرفتند که مدل AWBM در شبیه‌سازی رواناب عملکرد بهتری نشان می-دهد. Mizumura (1995) رواناب به دست آمده از مدل ساده TANK را با به کارگیری منحنی‌های پسروی مورد مطالعه قرار داد و عملکرد مدل را رضایت‌بخش عنوان نمود. Cooper *et al.* (1997) عملکرد سه روش الگوریتم ژنتیک[3]، الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت[4] و الگوریتم تکامل رقابتی جامع[5] را در یک مدل تانک ساده که فقط شامل دو مخزن بود، مورد بررسی قرار دادند. Sharifi, (1997) با مقایسه سه مدل SDI، AWBM و SFB در هشت حوضه در استرالیا نشان داد که اگر رواناب به دو بخش رواناب سطحی و جریان پایه تقسیم شود، عملکرد مدل AWBM بهتر از مدل‌های دیگر خواهد بود. Yu and Yong, (2000) به بررسی عملکرد مدل بارش-رواناب HBV پرداخته و جهت واسنجی پارامترهای مدل از تابع فازی چند هدفه استفاده نمودند. آن‌ها عملکرد این روش را برای حوضه‌هایی که در آن‌ها توزیع زمانی جریان به شدت ناهمگن است، قابل قبول ارزیابی نمودند.

در ایران نیز، Khazaei *et al.* (2009) به ارزیابی واسنجی خودکار مدل بارش-رواناب مفهومی ARNO با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند. نتایج حاصل حاکی از موفقیت این روش در واسنجی خودکار مدل مفهومی بارش-رواناب ARNO برای شبیه-سازی جریان روزانه حوضه پاتاوه بود.

Garmeh *et al.* (2015) نیز به مطالعه واسنجی خودکار مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS با استفاده از الگوریتم فراکاوشی بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) در حوضه آبریز سد کارده مشهد پرداختند. مدل مذکور در دو سناریو تک رخداده و سه رخداده و با توابع هدف RMSE و Nash مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج واسنجی در هر یک از رخدادها و در سناریوهای مختلف نتوانست پارامترهای منحصر به فردی را برای حوضه ارائه دهد. نتایج واسنجی در رخدادهای مختلف با معیار عملکردهای متفاوت ارزیابی شد و نشان داد اگر چه هر دو تابع RMSE و Nash سعی در حداقل کردن خطا نقاط پیک دارند، ولی به طور کلی عملکرد تابع Nash نسبت به تابع RMSE بهتر بوده است و دبی‌های به دست آمده در اکثر موارد دقیق‌تر برآورد شده است. نتایج واسنجی تحقیق نشان داد که با بهبود نقاط پیک مقدار تابع RMSE بدتر می‌شود و بالعکس، که این امر حاکی از آن است که اگر چه تابع RMSE سعی در حداقل کردن خطای نقاط پیک را دارد، ولی در مواردی از این نقطه‌نظر به خوبی عمل نکرده و مدل می‌تواند جواب‌های با خطای پیک کم را به دست آورد که در آن مقدار تابع RMSE مناسب نباشد.

با توجه با دامنه وسیع کاربرد مدل‌های هیدرولوژیکی، بررسی کارایی مدل‌ها برای اهداف مختلف مدیریتی ضروری است. مدل‌هایی که با توجه به نقص و کمبود آمار طولانی مدت و دقیق بتوانند نتایج مطلوب و قابل قبولی را ارائه دهند و به عنوان ابزاری کارآمد در خدمت مدیران حوضه‌های آبریز باشند. در مقاله حاضر، کارایی مدل‌های یکپارچه و مفهومی بارش-رواناب AWBM، Sacramento و SimHyd با استفاده از بهینه‌ساز واسنجی خودکار الگوریتم ژنتیک مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. با استفاده از امکان واسنجی خودکار این مدل‌ها، واسنجی آن‌ها برای حوضه امامه می‌تواند به سرعت و بدون نیاز به دانش و تجربه زیاد در مدل‌ها و پارامترهای آن‌ها، انجام شود.

1. Calibration
2. Automatic calibration
3. Genetic Algorithm (GA)
4. Simulated annealing
5. Shuffled Complex Evolution (SCE-UA)

کاربرد موفقیت‌آمیز الگوریتم‌های الهام گرفته از طبیعت در مسائل بسیار پیچیده مهندسی آن‌چنان دلگرم کننده بوده است که سامانه‌های طبیعی به عنوان منبع اساسی ایده‌های مدل‌سازی مورد پذیرش و توجه خاص قرار گرفته است. در مقاله حاضر، کارایی بهینه‌ساز واسنجی الگوریتم ژنتیک در واسنجی مدل‌های مجموعه برنامه‌های بارش-رواناب[1] مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

با توجه به اهمیت انتخاب تابع هدف، در این مطالعه عملکرد مدل-ها با توابع هدف زیر مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه برای واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی و همچنین مقایسه نتایج حاصل از اجرای مدل‌ها با اعمال تغییرات مورد نظر، از سه ضریب نش-ساتکلیف[2](رابطه ۱)، ضریب تبیین[3] (رابطه ۲) و یک معیار خطا (مجذور میانگین مربعات خطا)[4] (رابطه ۳) استفاده شده است. اولین تابع، ضریب نش– ساتکلیف می‌باشد که مقدار آن از منفی بی‌نهایت تا یک متغیر است. در صورتی‌که مقدار آن برابر با صفر یا کمتر از آن شود، بیانگر این است که میانگین دبی مشاهداتی بهتر از مقادیر دبی شبیه‌سازی شده توسط مدل است و اگر مقدار آن برابر با یک شود تطابق کامل بین مقادیر دبی مشاهداتی و دبی شبیه‌سازی شده برقرار می‌باشد (رابطه ۱). دومین معیار ضریب تبیین بوده که نشان می‌دهد بین مقادیر دبی مشاهداتی و دبی شبیه‌سازی چه درجه‌ای از همبستگی وجود دارد (رابطه ۲). سومین معیار ارزیابی در این تحقیق مجذور میانگین مربعات خطا بوده که از جمله معیارهای ارزیابی خطا می‌باشد و کمتر شدن آن به منزله اختلاف حداقل بین داده‌های دبی شبیه-سازی شده و دبی مشاهداتی است و نشان از عملکرد بهتر مدل دارد (رابطه ۳).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T}(Q_{obs}^{t} - Q_{sim}^{t})^2}{\sum_{t=1}^{T}(Q_{obs}^{t} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{t=1}^{T}(Q_{obs}^{t} - \overline{Q_{obs}})(Q_{sim}^{t} - \overline{Q_{sim}}))^2}{\sum_{t=1}^{T}(Q_{obs}^{t} - \overline{Q_{obs}})^2 \cdot \sum_{t=1}^{T}(Q_{sim}^{t} - \overline{Q_{sim}})^2} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\sum_{t=1}^{T}\frac{(Q_{sim}^{t} - Q_{obs}^{t})^2}{T}} \quad \text{(رابطه ۳)}$$

در روابط فوق، Q_{obs}^{t}= دبی مشاهداتی در زمان t، Q_{sim}^{t}= دبی شبیه‌سازی شده در زمان t، $\overline{Q_{obs}}$= متوسط دبی‌های مشاهداتی در کل دوره شبیه‌سازی، $\overline{Q_{sim}}$= متوسط دبی‌های شبیه‌سازی شده در کل دوره مشاهداتی و T = تعداد کل دوره‌های مشاهداتی (گام-های زمانی) است.

معرفی منطقه مطالعاتی

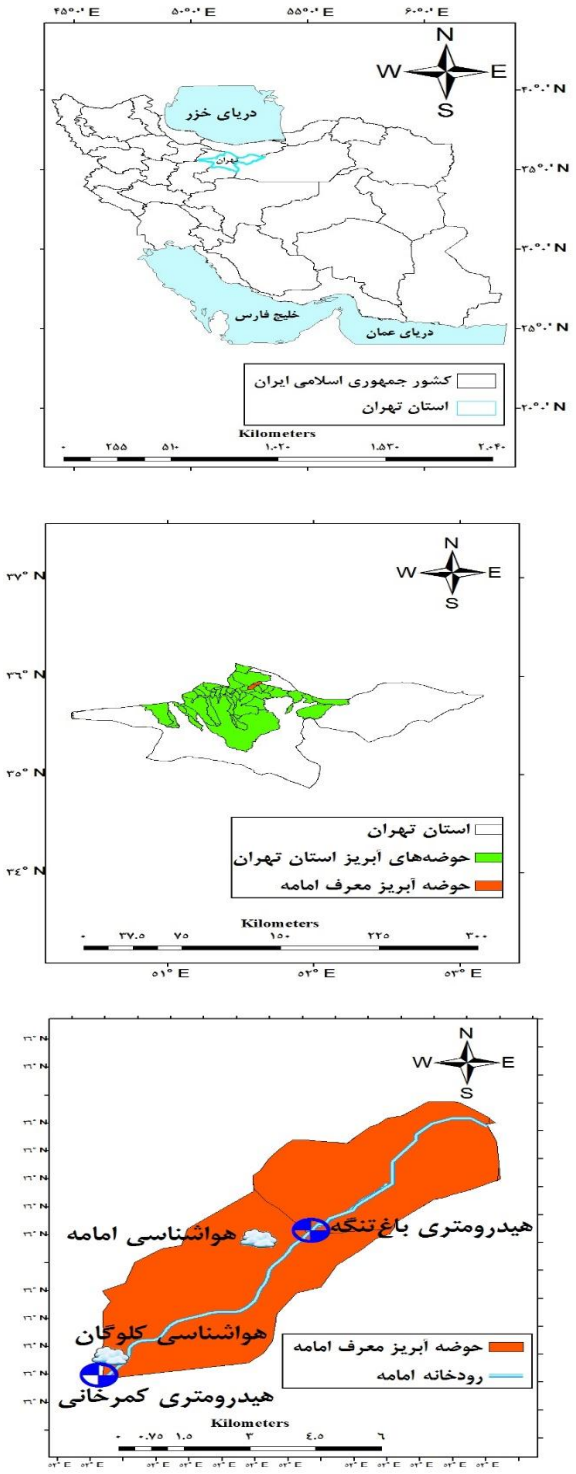
حوضه آبریز امامه یک حوضه معرف در استان تهران و از زیرحوضه‌های سد لتیان که به منظور مدل‌سازی جریان آب در این مطالعه انتخاب شده است (شکل ۱). این حوضه در طول‌های جغرافیایی $35^0 51' 00''$ تا $35^0 57' 00''$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $51^0 32' 00''$ تا $51^0 39' 00''$ شمالی واقع شده است. حوضه مذکور از شمال به ارتفاعات جنوبی دره لار، از غرب به ارتفاعات اوشان کوه و ارتفاعات شرقی رودخانه جاجرود، از شرق به ارتفاعات راحت‌آباد و کوسا و از جنوب به رودخانه جاجرود و دهکده کمرخانی محدود شده است. این حوضه آبریز یکی از سرشاخه‌های رودخانه جاجرود است و پس از عبور از روستاهای امامه و کلوکان در پایین‌دست روستای کلوکان (پس از عبور از ایستگاه آب‌سنجی کمرخانی) به شاخه اصلی رودخانه جاجرود می‌پیوندد. بیشترین ارتفاع حوضه در بخش شمالی ۳۸۵۰ متر و کمترین آن در محل خروجی ۱۷۵۰ متر است.

به منظور اجرای این تحقیق، از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی امامه و کلوگان و ایستگاه‌های آب‌سنجی کمرخانی در خروجی حوضه و باغ‌تنگه به دلیل موقعیت ایستگاه‌ها و همچنین وجود داده‌های کافی استفاده شد. در این تحقیق از هفت سال داده از سال ۲۰۰۱ تا سال ۲۰۰۷ استفاده شده که پنج سال جهت واسنجی مدل‌ها یعنی از سال ۲۰۰۱ تا سال ۲۰۰۵ و دو سال از سال ۲۰۰۶ تا سال ۲۰۰۷ جهت فرآیند صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفته است. پس از جمع‌آوری بانک داده‌ها، پیش‌پردازش داده‌ها از قبیل مرتبط بودن، کفایت و درستی اجرا شد. برای شبیه‌سازی جریان رودخانه (Q) از متغیرهای هواشناسی از قبیل داده‌های میانگین بارندگی روزانه (P)، داده‌های میانگین روزانه تبخیر و تعرق پتانسیل(ETP) و همچنین داده‌های دبی مشاهداتی روزانه استفاده شد. برخی از مشخصات فیزیکی حوضه در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- برخی از مشخصات فیزیوگرافی حوضه آبریز امامه در محل ایستگاه کمرخانی

پارامتر	واحد اندازه‌گیری	مقدار
مساحت	کیلومتر مربع	۳۷/۲
محیط	کیلومتر	۳۱
طول آبراهه اصلی	کیلومتر	۱۳
ضریب شکل	بدون واحد	۱/۴۲
شیب متوسط رودخانه	درصد	۹/۲
ارتفاع متوسط	متر	۲۶۵۰
طول مستطیل معادل	کیلومتر	۱۲/۱۴
عرض مستطیل معادل	کیلومتر	۳/۰۶
قطر دایره معادل	کیلومتر	۶/۸۸۴
شیب متوسط حوضه	درصد	۵۴/۳

1. RRL
2. Nash-Sutcliffe
3. Coefficient of determination
4. Root Mean Square Error



شکل۱- موقعیت حوضه معرف امامه استان تهران و ایستگاه‌هایش در کشور جمهوری اسلامی ایران

الگوریتم بهینه‌سازی واسنجی خودکار مدل‌های مفهومی

هدف نهایی از یک از 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 (Xtrain) به تابع f را نشان می‌دهد. بیشتر مواقع الگوریتم یادگیری تابع f را از طریق بهینه‌سازی یک معیار آموزش با توجه به مجموعه‌ای از پارامترهای (θ) ایجاد می‌کند. الگوریتم‌های یادگیری اغلب خود دارای هشدارهایی به نام حد پارامترها (λ) هستند و الگوریتم یادگیری واقعی بعد از انتخاب λ به دست می‌آید که می‌توان با Aλ نشان داد و برای یک مجموعه یادگیری به صورت f=Aλ(Xtrain) است (Bergstra and Bengio, 2012). پیدا کردن حداکثر یا حداقل از یک تابع هدف، روش‌های مختلفی دارد. مهم‌ترین موضوع در بهینه‌سازی رابطه

$\min f(x,\theta)=f(x,\theta^{o})\ \theta\in S$ است (Cooper *et al.*, 1997)

که $f(x,\theta)$ یک تابع هدف است، x متغیرهای ورودی و θ^{o} مجموعه (مجموعه‌هایی) از مقادیر پارامترها است که در آن تابع فرضی یک مقدار حداقل خاص در داخل بازه‌ای از مقادیر قابل قبول پارامترها (S) است.

الگوریتم‌های مختلفی برای بهینه‌سازی واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی وجود دارند که در این پژوهش کارایی الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی پارامترهای واسنجی سه مدل AWBM، Sacramento و SimHyd مورد بررسی قرار گرفته است که این الگوریتم در زیر شرح داده شده است.

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش جستجو براساس مکانیسم انتخاب و ژنتیک طبیعی است که بقای مصنوعی اصلح را با عملگرهای ژنتیکی به دست آمده از طبیعت ترکیب می‌کند (Podger, 2004). الگوریتم ژنتیک در میان مجموعه‌ای از نقاط جستجو می‌کند و به جای استفاده از مقادیر واقعی هر پارامتر با کدهایی از مجموعه پارامترها کار می‌کند و از قوانین احتمال انتقال استفاده می‌کند. بر مبنای نتایج این ارزیابی‌ها، فرآیند جستجو به سمت پاسخ‌های بهینه هدایت می‌شود (Rouhani and Farahi Moghadam, 2014). در این پژوهش تعداد ۱۰۰ نمونه تصادفی به عنوان نقاط کنترلی به مدل معرفی 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 بازه‌ی 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.

تابع هدف بکار رفته در تحقیق حاضر برای بهینه‌سازی هر یک از مدل‌های هیدرولوژیکی به صورت زیر است (رابطه ۴) :

$$Max\left[1-\frac{\sum_{t=1}^{T}(Q_{obs}^{t}-Q_{sim}^{t})^{2}}{\sum_{t=1}^{T}(Q_{obs}^{t}-\overline{Q_{obs}})^{2}}\right] \qquad \text{(رابطه ۴)}$$

قرار گرفتن پارامترهای مدل در محدوده قابل قبول :St

مدل هیدرولوژیکی AWBM

مدل موازنه آب استرالیایی یک مدل کامپیوتری است که اولین بار در سال ۱۹۹۳ برای شبیه‌سازی بارش–رواناب توسط بوتون[1] ارائه شد. مدل AWBM براساس تئوری جریان از سطوح جزئی اشباع که مشابه تئوری جریان سطحی اشباع است، توسعه یافته و برتری‌های آن بر سایر مدل‌های شبیه‌سازی بارش–رواناب عبارت‌اند از: ۱- داده‌های مورد نیاز مدل به آسانی در دسترس هستند، ۲- مدل سه پارامتره است و در رودخانه‌های فصلی که آب‌پایه ندارند، مدل یک پارامتره می‌شود، ۳- ساختار مدل به نسبت ساده است، ۴- مدل رواناب را در زمان‌های مختلف از مناطق مختلف محاسبه می‌کند. این مدل از سری زمانی داده‌های بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل و رواناب مشاهداتی همگی در گام زمانی روزانه برای شبیه‌سازی و محاسبات استفاده می‌کند و دارای هشت پارامتر جهت واسنجی بوده و قابلیت شبیه‌سازی رواناب را به صورت روزانه و ماهانه دارد. مدل AWBM از ظرفیت‌های مخازن ذخیره سطحی (C_1، C_2 و C_3) با مساحت‌های (A_1، A_2 و A_3) برای شبیه‌سازی سطوح رواناب استفاده می‌کند و بیلان آبی هر سطح ذخیره‌ای را مستقل از بقیه در گام‌های زمانی روزانه محاسبه می‌کند. معادله بیلان آبی هر سطح به صورتی است که بارش به ذخیره سطحی اضافه شده و تبخیر و تعرق از آن کم می‌شود. بنابراین معادله بیلان آبی در حالتی که n تعداد ذخیره در حوضه باشد به صورت رابطه (۵) می‌باشد:

$$store_{n+1} = store_n + Rain - Evap(n = 1,2,3,\dots) \quad \text{(رابطه ۵)}$$

که در آن، اگر میزان رطوبت ذخیره منفی شود، صفر در نظر گرفته می‌شود و اگر رطوبت ذخیره بیش از ظرفیت مخزن شود، رطوبت مازاد به رواناب تبدیل شده و رطوبت ذخیره معادل ظرفیت مخزن باقی می‌ماند. برای استفاده از مدل ابتدا پارامترهای بهینه مدل در هر حوضه مشخص می‌شوند، سپس ارزیابی مدل در پیش‌بینی رفتار حوضه‌ها با استفاده از پارامترهای بهینه شده انجام می‌شود و درنهایت رواناب خروجی شبیه‌سازی شده حوضه به دست می‌آید. در شکل (۲) نمایی از ساختار مدل هیدرولوژیکی AWBM نمایش داده شده است.

مدل هیدرولوژیکی Sacramento

مدل Sacramento یک مدل یکپارچه و مفهومی بارش–رواناب با ۱۷ پارامتر است که توسط برناش و فرال[2] در سال ۱۹۹۳ ارائه و توسط سیستم آب و هوای ملی[3] برای پیش‌بینی سیلاب در ایالات متحده توسعه پیدا کرده است (Podger, 2004). این مدل یکی از مدل‌های سیستم آب و هوای ملی است که برای تبدیل ورودی بارش به خروجی جریان آبراهه‌ای است. این مدل از سری زمانی داده‌های بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل و رواناب مشاهداتی همگی در گام زمانی روزانه برای شبیه‌سازی و محاسبات استفاده می‌کند و قابلیت شبیه‌سازی رواناب را به صورت روزانه و ماهانه دارد. مدل هیدرولوژیکی Sacramento از رطوبت موجود در خاک جهت شبیه‌سازی بیلان آبی در حوضه آبریز استفاده می‌کند. ذخیره رطوبتی موجود در خاک به وسیله بارش افزوده می‌شود و به وسیله تبخیر و جریان خروجی آب از سطح ذخیره کاهش می‌یابد. مقدار ذخیره رطوبتی خاک، به وسیله مقدار بارشی ذخیره شده در خاک، تبخیر و تعرق پتانسیل واقعی و مقدار آبی که به صورت عمودی و جانبی از محل ذخیره رطوبتی جابه‌جا می‌شود، تعیین می‌گردد. بارش مازاد بر ظرفیت رطوبتی خاک به شکل رواناب درآمده و توسط هیدروگراف واحد و دیگر روش‌ها نمایش داده می‌شود. در شکل (۳) نمایی از ساختار مدل هیدرولوژیکی Sacramento نمایش داده شده است.

مدل هیدرولوژیکی SimHyd

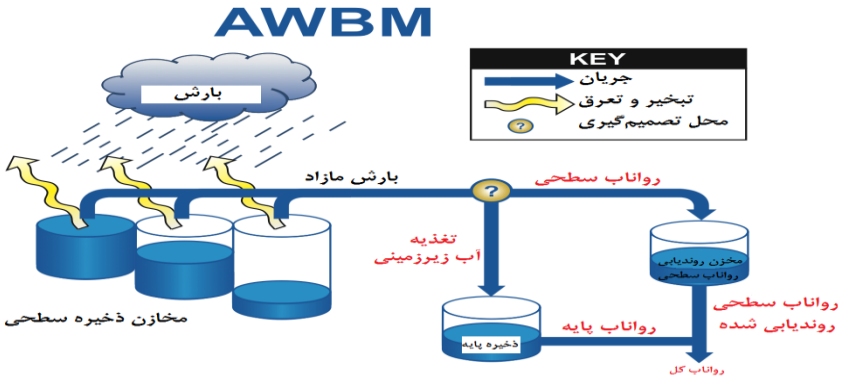
SimHyd یک مدل یکپارچه و مفهومی بارش–رواناب با گام زمانی روزانه است که دبی روزانه و ماهانه را از سری زمانی داده‌های بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه شبیه‌سازی می‌کند. SimHyd نسخه ساده شده مدل‌های مفهومی بارش–رواناب HYDROLOG که در سال ۱۹۷۲ توسط پرتر[4] توسعه داده شد و همچنین مدل اخیرتر MODHYDROLOG که در

سال ۱۹۹۱ توسط چیو می‌باشد و توسط مرکز تحقیقات هیدرولوژی حوضه آبریز استرالیا ارائه شده است (Chiew *et al*., 2002). در مدل هیدرولوژیکی SimHyd، بارش روزانه ابتدا به برگ‌های درختان و پوشش گیاهی برخورد کرده و سپس از محل برگاب هم مقداری تبخیر می‌شود. مقدار اضافی در محدوده ظرفیت نفوذ قرار گرفته و آب مازاد بر ظرفیت نفوذ به صورت رواناب سطحی در سطح زمین در امتداد شیب جاری می‌شود. بنابراین، جریان سطحی فقط از نواحی اشباع شده و نواحی نفوذناپذیر ایجاد می‌شود. بارش نفوذ یافته به خاک، با توجه به تابع رطوبت خاک، آب را به رودخانه (جریان زیر قشری و رواناب مازاد اشباع)، مخزن آب زیرزمینی (تغذیه) و ذخیره رطوبت خاک انتقال می‌دهد. پارامترهای مورد استفاده برای واسنجی مدل زیاد نیستند و شامل هفت پارامتر ضریب جریان پایه، آستانه

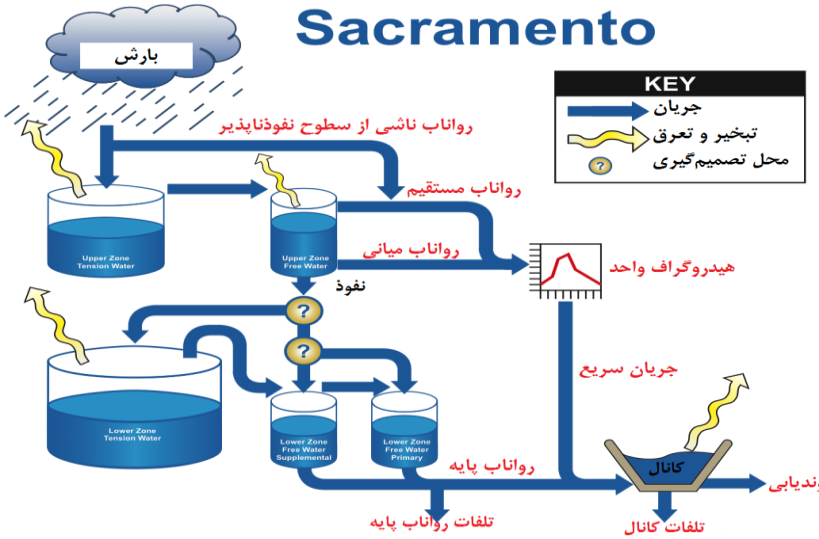
1. Walter Boughton
2. Burnash and Ferral
3. National Weather Service River Forecast System (NWSRFS)
4. Porter

نفوذناپذیری، ضریب نفوذ، شکل نفوذ، ضریب جریان میانی، نسبت نفوذپذیری، ظرفیت ذخیره برگاب بارش، ضریب ذخیره، ظرفیت ذخیره رطوبتی خاک.

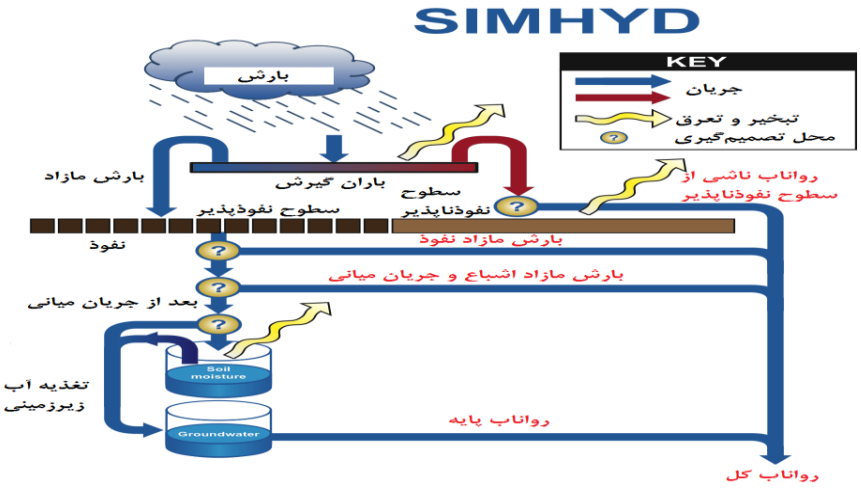
در شکل (۴) نمایی از ساختار مدل هیدرولوژیکی SimHyd نمایش داده شده است.



شکل ۲- ساختار مدل هیدرولوژیکی AWBM (Podger, 2004)



شکل ۳- ساختار مدل هیدرولوژیکی Sacramento (Podger, 2004)



شکل ۴- ساختار مدل هیدرولوژیکی SimHyd (Podger, 2004)

نتایج و بحث

در این قسمت به ارائه نتایج تحقیق پرداخته شده است. پس از بررسی داده‌های تحقیق، مدل‌های AWBM، Sacramento و SimHyd در منطقه مطالعاتی مورد نظر اجرا شده و نتایج شبیه‌سازی بارش–رواناب توسط بهینه‌ساز واسنجی خودکار الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج ارزیابی کارایی الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده، در جدول‌های (۲ و ۳) ذکر شده است. نتایج نشان می‌دهد که دقت تابع هدف در الگوریتم مورد مطالعه قابل قبول است. به منظور ارزیابی دقیق‌تر الگوریتم مورد استفاده، منحنی تداوم جریان برای مدل‌های تحقیق ارائه شده که همگی بیان کننده کارایی مناسب الگوریتم مورد استفاده برای شبیه‌سازی رواناب در منطقه مطالعاتی است.

نتایج مدل‌ها با رواناب مشاهداتی روزانه مورد مقایسه قرار گرفته و هیدروگراف خروجی هر یک از مدل‌ها به صورت جداگانه ارائه شده است. همچنین نتایج به دست آمده از مدل‌های مورد مطالعه در حوضه معرف امامه استان تهران با توجه به توابع هدف تحقیق در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب در جدول (۲) و جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۲- مقادیر توابع هدف در مرحله واسنجی

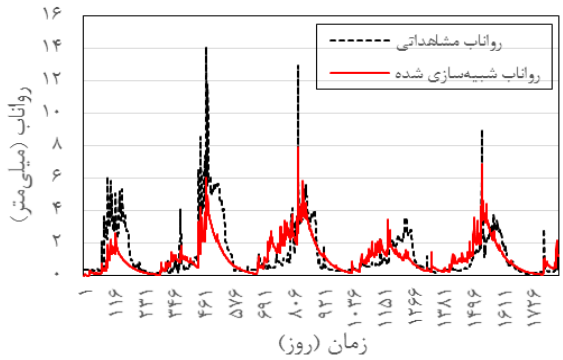
مدل	نش-ساتکلیف	تبیین	مجذور میانگین مربعات خطا
AWBM	۰/۵۵۳	۰/۵۸	۱/۰۵۵۳
Sacramento	۰/۴۴۴	۰/۴۷	۱/۱۸۰
SimHyd	۰/۵۷۵	۰/۶۱	۱/۰۳۳

جدول ۳- مقادیر توابع هدف در مرحله صحت‌سنجی

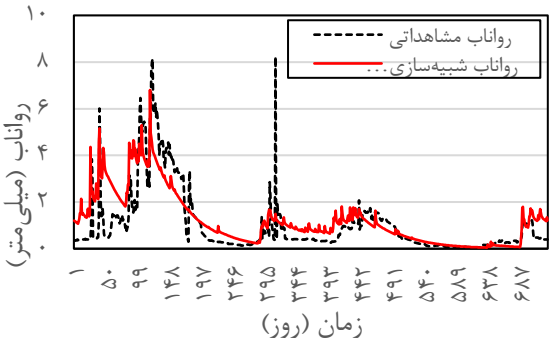
مدل	نش-ساتکلیف	تبیین	مجذور میانگین مربعات خطا
AWBM	۰/۷۱۲	۰/۷۷	۰/۸۸۴
Sacramento	۰/۵۶۴	۰/۶۰	۰/۹۶۰
SimHyd	۰/۷۳۱	۰/۸۰	۰/۸۲۹

نتایج اجرای مدل‌های هیدرولوژیکی بارش–رواناب AWBM، Sacramento و SimHyd با استفاده از بهینه‌ساز واسنجی خودکار الگوریتم ژنتیک در قالب هیدروگراف رواناب

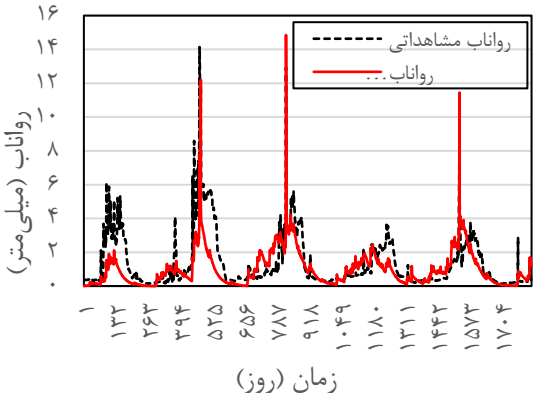
هیدروگراف رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای مرحله‌های واسنجی و صحت‌سنجی برای مدل AWBM به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶)، برای مدل Sacramento به ترتیب در شکل‌های (۷) و (۸) و برای مدل SimHyd به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) آورده شده است.



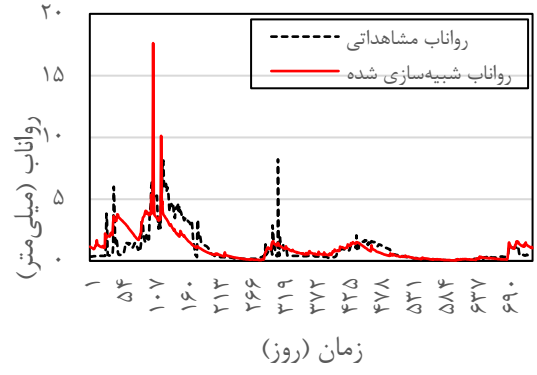
شکل ۵- هیدروگراف رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل هیدرولوژیکی AWBM برای مرحله واسنجی



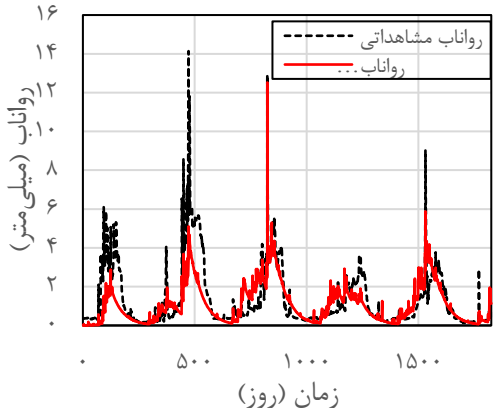
شکل ۶- هیدروگراف رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل هیدرولوژیکی AWBM برای مرحله صحت‌سنجی



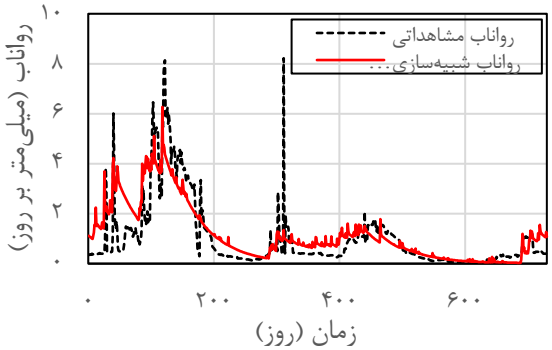
شکل ۷- هیدروگراف رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل هیدرولوژیکی Sacramento برای مرحله واسنجی



شکل ۸- هیدروگراف رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل هیدرولوژیکی Sacramento برای مرحله صحت‌سنجی



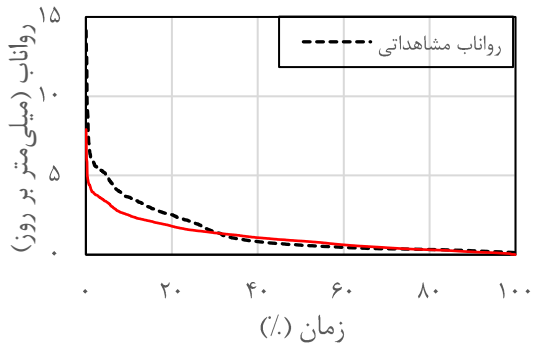
شکل ۹- هیدروگراف رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل هیدرولوژیکی SimHyd برای مرحله واسنجی



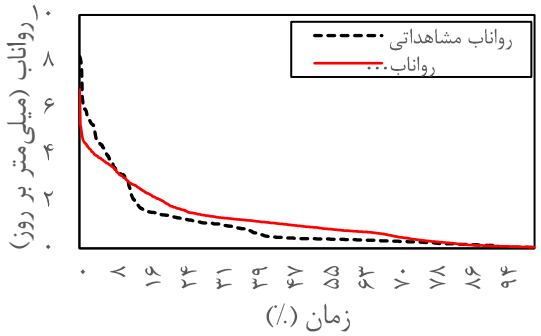
شکل ۱۰- هیدروگراف رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل هیدرولوژیکی SimHyd برای مرحله صحت‌سنجی

نتایج اجرای مدل‌های هیدرولوژیکی بارش-رواناب AWBM، Sacramento و SimHyd با استفاده از بهینه‌ساز واسنجی خودکار الگوریتم ژنتیک در قالب منحنی تداوم رواناب

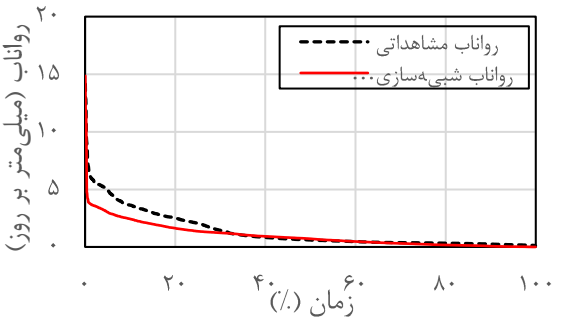
منحنی تداوم جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای مدل AWBM به ترتیب برای مرحله واسنجی و صحت‌سنجی در شکل-های (۱۱) و (۱۲)، برای مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل Sacramento به ترتیب در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) و برای مدل SimHyd به ترتیب در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) نشان داده شده است.



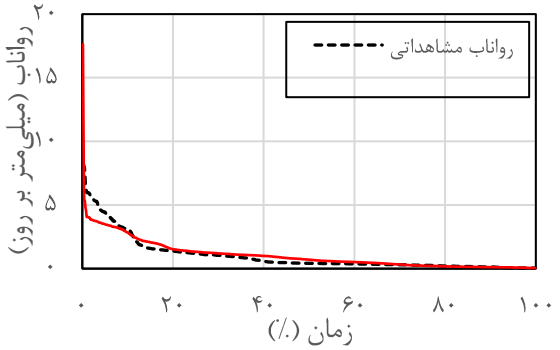
شکل ۱۱- منحنی تداوم رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل هیدرولوژیکی AWBM برای مرحله واسنجی



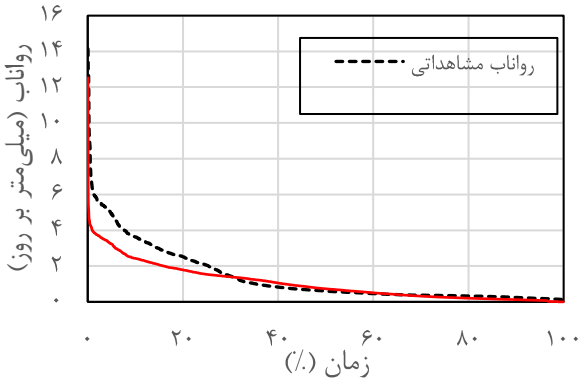
شکل ۱۲- منحنی تداوم رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل هیدرولوژیکی AWBM برای مرحله صحت‌سنجی



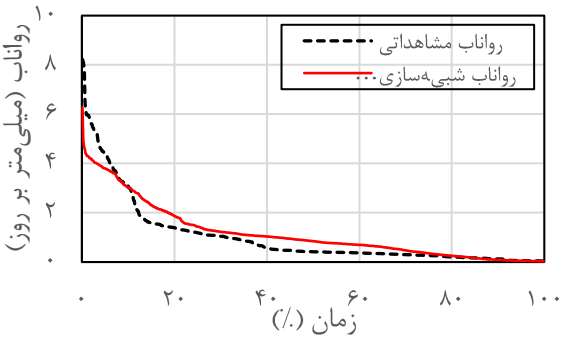
شکل ۱۳- منحنی تداوم رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل هیدرولوژیکی Sacramento برای مرحله واسنجی



شکل ۱۴- منحنی تداوم رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل هیدرولوژیکی Sacramento برای مرحله صحت‌سنجی



شکل ۱۵- منحنی تداوم رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل هیدرولوژیکی SimHyd برای مرحله واسنجی



شکل ۱۶- منحنی تداوم رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل هیدرولوژیکی SimHyd برای مرحله صحت‌سنجی

نتیجه‌گیری

مدل‌های هیدرولوژیکی تحقیق حاضر از نوع مدل‌های یکپارچه و مفهومی هستند که در دهه اخیر در داخل کشور به منظور شبیه‌سازی دبی جریان با گام زمانی روزانه مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعات انجام شده به صورت جداگانه از روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل‌ها استفاده کرده‌اند. در واقع کارایی مدل‌های بارش-رواناب به دقت واسنجی پارامترهای مدل‌ها بستگی دارد. مقادیر برخی از پارامترهای ورودی به مدل‌ها به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست و نیاز به صرف زمان و هزینه زیادی دارد؛ لذا بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی، بهترین راه حل برای حصول به مقادیر تقریب پارامترها است. واسنجی به روش سعی و خطا[1] زمان‌بر بوده و نیاز است که کاربر از تجربه بالایی در کارکرد مدل‌ها برخوردار باشد. استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز واسنجی خودکار با کمترین صرف هزینه و زمان، امکان حصول به مقادیر تقریبی پارامترها را فراهم می‌آورد و با داشتن آشنایی از مشخصات منطقه مطالعاتی می‌توان نتایج قابل قبولی به دست آورد.

با توجه به هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی حاصل از مدل‌های این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که این مدل‌ها مقادیر کمینه و متوسط جریان را به خوبی شبیه‌سازی کرده‌اند اما توانایی شبیه‌سازی مقادیر بیشینه جریان را در بعضی قسمت‌ها ندارند که دلیل این امر می‌تواند در بیش تخمین زدن مدل‌ها در میزان تبخیر و تعرق پتانسیل، ساختار یکپارچه و مفهومی آن‌ها و بعضاً نبود گسترش ابر بالای محل ایستگاه اندازه‌گیری بارش باشد. همچنین با توجه به در نظر نگرفتن پارامترهای مربوط به خصوصیات رودخانه اصلی، ضریب زبری، کاربری اراضی حوضه آبریز، خصوصیات زمین‌شناسی و دیگر مشخصات فیزیکی حوضه از این مدل‌ها نمی‌توان برای مطالعه و بررسی سیل در حوضه منتخب تحقیق استفاده نمود، بلکه تنها برای برآورد مقادیر کمینه و متوسط رواناب در زمینه مدیریت منابع آب استفاده کرد.

نتایج واسنجی مدل‌ها، همبستگی مناسب شبیه‌سازی مدل‌ها با داده‌های اندازه‌گیری شده رواناب رودخانه امامه در حوضه معرف امامه استان تهران را نشان می‌دهد. عموماً اگر شاخص نش-ساتکلیف بیشتر از ۰/۷۵ باشد مدل عالی و کامل، و اگر بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۵ باشد رضایت‌بخش و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد غیر قابل قبول فرض می‌شود (Zhou and Zhu, 2007). همچنین اگر ضریب نش-ساتکلیف بیشتر از ۰/۶۵ باشد نتایج واسنجی و صحت‌سنجی خیلی خوب، اگر بین ۰/۵ تا ۰/۶۵ باشد نتایج مناسب و اگر کمتر از ۰/۵ باشد، نتایج واسنجی و صحت-سنجی رضایت‌بخش است (Moriasi *et al.*, 2007). مقدار ضریب تبیین نیز حاکی از نتایج خوب در شبیه‌سازی می‌باشد. با مراجعه به نتایج حاصل از مدل‌ها مشخص می‌شود که روند شبیه‌سازی مدل‌ها با مقادیر مشاهداتی همخوانی دارند. نتایج در اکثر نقاط انطباق خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارند ولی در بعضی قسمت‌ها مدل‌ها قادر به شبیه‌سازی مقادیر بیشینه جریان نیستند.

بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که مدل SimHyd با ضریب نش-ساتکلیف ۰/۵۷۵ و ۰/۷۳۱ و ضریب تبیین ۰/۶۱ و ۰/۸۰ به ترتیب در دوره واسنجی و صحت‌سنجی بالاترین عملکرد، مدل AWBM با ضریب نش-ساتکلیف ۰/۵۵۳ و ۰/۷۱۲ و ضریب تبیین ۰/۵۸ و ۰/۷۷ به ترتیب در دوره واسنجی و صحت‌سنجی در جایگاه دوم و مدل Sacramento با داشتن ضریب نش-ساتکلیف ۰/۴۴۴ و ۰/۵۶۴ و ضریب تبیین ۰/۴۷ و ۰/۶۰ به ترتیب در دوره واسنجی و صحت‌سنجی کمترین میزان کارایی را از بین سه مدل پژوهش در حوضه منتخب داشته است. همچنین به طور واضح مشخص است که با حداکثر شدن دو ضریب نش-ساتکلیف و تبیین، ضریب مجذور میانگین مربعات خطا حداقل می‌شود و بر این اساس می‌توان گفت که مدل SimHyd عملکرد بهتری نسبت به دو مدل دیگر در منطقه مطالعاتی پژوهش داشته است که با نتایج Jabbari *et al.*, (2012) و Behmanesh *et al.* (2013) در ارزیابی این مدل در حوضه‌های داخلی کشور همخوانی دارد.

تفاوت در مقدار ضرایب نش-ساتکلیف و تبیین در دوره واسنجی و صحت‌سنجی به دلیل تغییراتی چون تغییر کاربری اراضی و تغییر شرایط آب و هوایی (ترسالی و خشک‌سالی)، دلیل احتمالاتی نقص داده‌ها و کیفیت پایین آن‌ها و وابستگی نتایج مدل‌ها به کیفیت داده‌های استفاده شده می‌باشد (Izadi *et al.*, 2013). در انتها می‌توان نتیجه گرفت این مدل‌ها می‌توانند

1. Trial and error

شبیه‌سازی مناسب و رضایت‌بخشی در شرایط کشور ما داشته باشند و قادرند با اطلاعات قابل دسترس پاسخ حوضه‌های فاقد آمار را محاسبه کنند و از قابلیت خوبی در تحقیق و مدیریت برخوردارند. همچنین بهینه‌ساز واسنجی خودکار الگوریتم ژنتیک عملکرد مطلوبی در حوضه منتخب تحقیق را براساس نتایج به دست آمده در حوضه منتخب از خود نشان داد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از دانشگاه تهران، شرکت مدیریت منابع آب ایران- دفتر مطالعات پایه، سازمان آب منطقه‌ای استان تهران و سازمان هواشناسی کشور به خاطر تأمین امکانات لازم جهت انجام این تحقیق و تهیه مقالات مربوطه تشکر و قدردانی می‌شود.

REFERENCES

Bergstra, J. and Bengio, Y (2012). Random Search for Hyper- parameter optimization, Machine Learning Research, 13, 281-305.

Chiew, F. H. S., Peel, M. C., Western, A. W. (2002). Application of testing of the simple rainfall-runoff model SimHyd, In: mathematical models of small watershed hydrology and applications, Water Resources Publication, Littleton, Colorado, USA, pp. 355-367.

Cooper, VA., Nguyen, VTV. and Nicell, JA. (1997). Evaluation of global optimization methods for conceptual rainfall-runoff model calibration. Journal of Water Science Technology, 36(5), 53–60.

Garmeh, R. and Farid Hosseini, A. R. (2015). Optimization of the Parameters of HEC-HMS Rainfall-Runoff model by the PSO Optimization Algorithm. Irainian journal of Soil and Water Research, 46(2), 255-264. (In Farsi)

Izadi, M., Ajdari, Kh., Akhavan, S. and Imam Gholizadeh, S. (2013). SWAT 2009 uses in flow simulation of Shirin Dareh River. Fifth Iranian National Water Resources Management Conference, Tehran, Iran. (In Farsi)

Khazaei, M. R., Zahabiyoun, B. and Saghafian, B. (2009). Automatic calibration of the ARNO conceptual rainfall- runoff model. Iranian Journal of Watershed Management Science, 3(8), 21-28. (In Farsi)

Mizumura, K. (1995). Runoff prediction by simple TANK model using recession curve. Journal of Hydraulic Engineering. 121(11), 812-818.

Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. and Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, Transactions of the ASABE, 50(3), 885-900.

Podger, G. (2004). Rainfall Runoff Library (RRL), user guide. CRC for Catchment Hydrology, Australia.

Rouhani, H and Farahi Moghadam, M. (2014). Application of the genetic algorithm technique for optimization of the hydrologic TANK and SimHyd model's parameters. Journal of Range and Watershed Management (Iranian Journal of Natural Resources). 66(4), 512-533. (In Farsi)

Sharifi, F. (1997). Evaluation of three continuous rainfall-runoff models, a new approach. Proceeding of the 8th International Conference on Rainwater Catchments Systems, Tehran, Iran. 10-14 April pp. 416-432.

Sharifi, F. and Boyd, M.J. (1994). A comparison of the SFB and AWBM rainfall-runoff models. 25th congress of the international association of hydrologeologists/International hydrology and water resourses symposium of the institution of engineers, Australia. Adelaide. 21-25 November, pp.491-495.

Wang, Q. J. (1991). The genetic algorithm and its application to calibrating conceptual rainfall-runoff models. Journal of Water resource research, 27(9), 2467-2471.

Yu, P. S. and Yang, T. C. (2000). Fuzzy multi-objective function for rainfall-runoff model calibration, Journal of . Hydrology 238(1-2), 1–14.

Zhou, Y. and Zhu Y.M. (2007). Suspended sediment flux ,modeling with artificial neural network: An example of the Longchuanjiang River in the Upper Yangtze catchment, China. Geomorphology 84:111-125.