

## بررسی کارایی الگوریتم بهینه‌ساز واسنجی خودکار تکامل رقابتی جامع در شبیه‌سازی رواناب حوضه معرف امامه

محمد رضا محمدی‌وند<sup>۱\*</sup>، شهاب عراقی‌نژاد<sup>۲</sup>، کی‌ومرث ابراهیمی<sup>۳</sup>، فرشته مدرسی<sup>۴</sup>  
<sup>۱\*</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب دانشگاه تهران، *Mohammadi.Vand@ut.ac.ir*  
<sup>۲</sup> - دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران، *d@ut.ac.irAraghineja*  
<sup>۳</sup> - استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران، *EbrahimiK@ut.ac.ir*  
<sup>۴</sup> - دکتری مهندسی منابع آب دانشگاه تهران، *FModaresi@alumni.ut.ac.ir*

### چکیده

یکی از روش‌هایی که در زمینه‌های مختلف علمی استفاده شده و می‌تواند فرایند پیچیده و غیرخطی بارش-رواناب را شبیه‌سازی کند، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی است. هدف مقاله حاضر به بررسی کارایی الگوریتم بهینه‌ساز واسنجی خودکار تکامل رقابتی جامع در واسنجی پارامترهای دو مدل یکپارچه و مفهومی بارش-رواناب AWBM و SimHyd در شبیه‌سازی رواناب با تمرکز بر حوضه معرف امامه می‌پردازد. در هر دو مدل مذکور محدوده تغییر پارامترها زیاد است، در نتیجه با توجه به دشواری واسنجی با روش‌های مبتنی بر سعی و خطا، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی به منظور واسنجی خودکار مدل‌های هیدرولوژیکی مطرح است. عملکرد مناسب مدل به نحوه واسنجی پارامترهای آن به منظور تطابق هر چه بیشتر بین نتایج شبیه‌سازی شده به وسیله مدل با داده‌های مشاهداتی بستگی دارد. مدل‌های AWBM و SimHyd در نرم‌افزار RRL (RainfallRunoff Library) برای تخمین رابطه پویای بارش-رواناب انتخاب شده‌اند. آماده‌سازی داده‌ها در محیط نرم‌افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی نسخه 10.4.1 انجام شد. در این مطالعه با داده‌هایی نظیر بارش روزانه، تبخیر روزانه و جریان مشاهداتی روزانه، رواناب روزانه خروجی از حوضه شبیه‌سازی شد. معیارهای ارزیابی شامل ضریب نش-ساتکلیف (NSE)، ضریب تعیین ( $R^2$ ) و ضریب جذر میانگین مربعات خطا مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این تحقیق گویای نتایج مناسب و رضایت‌بخش هر دو مدل هیدرولوژیکی با استفاده از روش بهینه‌ساز واسنجی خودکار با ضریب نش-ساتکلیف و ضریب تعیین بالای ۰/۵ و ضریب جذر میانگین مربعات خطا کمتر از ۱/۱ در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی است، همچنین نتایج، کارایی بهتر مدل AWBM نسبت به مدل SimHyd در منطقه مطالعاتی تحقیق را مطرح می‌سازد.

**واژه‌های کلیدی:** مدل‌های هیدرولوژیکی، بهینه‌ساز واسنجی خودکار، الگوریتم تکامل رقابتی جامع، AWBM، SimHyd.

## مقدمه

بهره‌برداری و استفاده مطلوب از منابع آب و مدیریت بهینه آن مستلزم شناخت بهتر ساختار مدل‌های هیدرولوژیکی است. به منظور افزایش جذابیت فیزیکی، ساختار مدل‌های به کار برده شده در AWBM<sup>۱</sup> و SimHyd<sup>۲</sup> مفهوم دقیقی از فرایندهای یک حوضه آبریز بزرگ مقیاس را در خود می‌گنجانند.

مدل‌های مفهومی از تعدادی پارامتر برخوردارند که چکیده‌ای از ویژگی‌های حوضه آبریز را در خود می‌گنجانند. بیشتر این پارامترها از کمیت‌های قابل اندازه‌گیری حوضه به دست نمی‌آیند و لازم است از راه واسنجی مدل برآورد شوند. واسنجی دستی مدل‌های هیدرولوژیکی از اوایل دهه ۱۹۶۰ میلادی مورد توجه قرار گرفته است، ولی به دلیل وقت‌گیر بودن 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، نتایج چندان موفقیت‌آمیز و رضایت‌بخش نبود. ظهور و پیدایش الگوریتم‌های الهام گرفته شده از طبیعت سبب تحولی در بحث واسنجی خودکار مدل‌های هیدرولوژیکی شد به طوری که امروزه به دلیل عملکرد خوب این روش‌ها، به طور گسترده‌ای به‌وسیله محققین علوم آب مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در سال‌های اخیر، رشد سریع محاسبات رایانه‌ای به روش‌های بهینه‌سازی خودکار کمک شایانی کرده است. این نوع روش‌های واسنجی هدفمند بوده، 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، به طور نمونه در تحقیقی مدل تانک با استفاده از الگوریتم‌های تکامل رقابتی جامع<sup>۳</sup> (SCE)، الگوریتم ژنتیک<sup>۴</sup> (GA) و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده<sup>۵</sup> (SA) واسنجی شد و نتایج این تحقیق نشان داد روش SCE نسبت به دو روش دیگر بهتر است. همچنین تحقیقی دیگر بیانگر عملکرد بهتر روش SCE نسبت به روش چند شروعه پاول<sup>۶</sup> برای واسنجی مدل تانک است. مطالعات بررسی کارایی روش‌های بهینه‌سازی مدل تانک در دو کشور ژاپن و اندونزی نشان داد که الگوریتم مارکودرات<sup>۷</sup> برای تعیین پارامترهای این مدل موثر و کارآمد است. علاوه بر این، روش اصلاح شده جست‌وجوگر هارمونی<sup>۸</sup> بر الگوریتم‌های جست‌وجوگر هارمونی پاول و الگوریتم ژنتیک برای واسنجی خودکار مدل تانک در کره ارجحیت دارد. اگر چه در منابع مختلف روش‌های مختلف بهینه‌یابی فراگیر<sup>۹</sup> و موضعی<sup>۱۰</sup> برای واسنجی مدل‌های مفهومی بارش- رواناب پیشنهاد شده است، اما هیچ توافق عمومی برای تعیین روش مناسب‌تر وجود ندارد.

گرمه‌ای و همکاران (۱۳۹۳)، به مطالعه واسنجی خودکار مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS با استفاده از الگوریتم فراکوشی بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) در حوضه آبریز سد کارده پرداختند. مدل مذکور در دو سناریو تک رخ داده و سه رخ داده و با توابع هدف RMSE و NASH مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج واسنجی در هر یک از رخ داده‌ها و در سناریوهای مختلف نتوانست پارامترهای منحصر به فردی را برای حوضه ارائه دهد. در ادامه نتایج واسنجی در رخ داده‌های مختلف با معیار عملکردهای متفاوت ارزیابی شد و نشان داد اگر چه هر دو تابع RMSE و NASH سعی در کمینه‌کردن خطا نقاط پیک دارند، ولی به طور کلی عملکرد تابع NASH نسبت به تابع RMSE بهتر بوده است و دبی‌های به دست آمده در بیشتر موارد بیشتر برآورد شده است. نتایج واسنجی نشان داد که با بهبود نقاط پیک مقدار تابع RMSE بدتر می‌شود و بالعکس، که این امر حاکی از این واقعیت است که اگر چه تابع RMSE سعی در کمینه‌کردن خطای نقاط پیک دارد، ولی در مواردی از این نقطه نظر به خوبی عمل نکرده و مدل می‌تواند جواب‌های با خطای پیک کم را به دست آورد که در آن مقدار تابع RMSE مناسب نباشد.

- 1 Australian Water Balance Model
- 2 Simple Hydrology
- 3 Shuffled Complex Evolution (SCE-UA)
- 4 Genetic Algorithm
- 5 Simulated Annealing
- 6 Multi-start Powell method
- 7 Marquardt
- 8 Harmony Search
- 9 Global method
- 10 Local method

در مقاله حاضر، کارایی مدل‌های یکپارچه و مفهومی بارش- رواناب AWBM و SimHyd با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز واسنجی خودکار تکامل رقابتی جامع با تمرکز بر مطالعه موردی حوضه امامه مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. با استفاده از امکان واسنجی خودکار این مدل‌ها، واسنجی آن‌ها برای حوضه مورد مطالعه می‌تواند به سرعت و بدون نیاز به دانش و تجربه زیاد در مدل‌ها و پارامترهای آن‌ها، انجام شود.

## مواد و روش‌ها

### الگوریتم تکامل رقابتی جامع

روش SCE-UA یک الگوریتم جست‌وجو سراسری قوی است که از بهترین ویژگی‌های الگوریتم‌های مختلف از جمله الگوریتم ژنتیک استفاده می‌کند و مفهوم ترکیب جوامع را معرفی می‌کند. مشابه بیشتر روش‌های بهینه‌سازی شروع روش شامل تولید یک سری اعداد تصادفی از درون فضای تصمیم به عنوان جمعیت اولیه است. این جمعیت به چندین جامعه تقسیم می‌شود که هر کدام براساس ابعاد مسئله دارای تعداد نقاط خاصی است. هر جامعه براساس فرایندهای تولید مثل که از شکل هندسی پیچیده‌ای استفاده می‌کنند جست‌وجو را در جهت‌های مناسب آغاز می‌کند. در دوره‌های تناوب تکامل، تمام جوامع مجدداً بر زده می‌شوند و جمعیت دیگر با خصوصیات بهتر به وجود می‌آید و در نهایت جمعیت به دست آمده مجدداً در یک سری از جوامع دسته‌بندی می‌شود. با ادامه جست‌وجو جمعیت به سمت همسایگی بهینه سراسری حرکت می‌کند.

### توابع هدف

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<sup>(۱)</sup> (رابطه ۱)، ضریب تعیین<sup>(۲)</sup> (رابطه ۲) و یک معیار خطا (جذر میانگین مربعات خطا)<sup>(۳)</sup> (رابطه ۳) استفاده شده است. اولین تابع، ضریب نش- ساتکلیف می‌باشد که مقدار آن از منفی بی‌نهایت تا یک متغیر است. در صورتی که مقدار آن برابر با صفر یا کمتر از آن شود، بیانگر این است که میانگین دبی مشاهداتی بهتر از مقادیر دبی شبیه‌سازی شده به وسیله مدل است و اگر مقدار آن برابر با یک شود تطابق کامل بین مقادیر دبی مشاهداتی و دبی شبیه‌سازی شده برقرار است (رابطه ۱). دومین معیار ضریب تعیین 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 جذر میانگین مربعات خطا بوده که از جمله معیارهای ارزیابی خطا است و کمتر شدن آن به منزله اختلاف کمینه بین داده‌های دبی شبیه‌سازی شده و دبی مشاهداتی است و نشان از عملکرد بهتر مدل دارد (رابطه ۳).

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

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

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

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 (گام‌های زمانی) است.

1 Nash-Sutcliffe  
2 Coefficient of Determination  
3 Root Mean Square Error

### منطقه مطالعات

حوضه آبریز امامه یک حوضه معرف و از زیرحوضه‌های سد لتیان که به منظور مدل‌سازی جریان آب در این مطالعه انتخاب شده است (شکل ۲). این حوضه در طول‌های جغرافیایی "۳۲°۵۱'۰۰" تا "۳۹°۵۱'۰۰" شرقی و عرض‌های جغرافیایی "۵۱°۳۵'۰۰" تا "۵۷°۳۵'۰۰" 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 کلوکان و ایستگاه‌های آب‌سنجی کمرخانی در خروجی حوضه و باغ‌تنگه به دلیل موقعیت ایستگاه‌ها و همچنین وجود داده‌های کافی استفاده شد. پس از جمع‌آوری بانک داده‌ها، پیش‌پردازش داده‌ها از قبیل مرتبط بودن، کفایت و درستی اجرا شد. برای پیش‌بینی جریان رودخانه (Q) از متغیرهای هواشناسی از قبیل داده‌های میانگین بارندگی روزانه (P)، داده‌های میانگین روزانه دما (T)، داده‌های میانگین روزانه تبخیر و تعرق (ET) و همچنین داده‌های دبی مشاهداتی روزانه استفاده شد. تعداد هفت سال داده ۲۰۰۷-۲۰۰۱ یعنی ۲۵۵۶ داده بارش روزانه، ۲۵۵۶ داده تبخیر روزانه و ۲۵۵۶ داده رواناب مشاهداتی روزانه در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته که پنج سال (۱۸۲۶ داده روزانه) برای واسنجی مدل‌ها و دو سال (۷۳۰ داده روزانه) برای صحت‌سنجی مدل‌ها به کار گرفته شده‌اند. برخی از مشخصات فیزیکی حوضه در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین مشخصات آماری داده‌های مورد بررسی در گام زمانی روزانه در جدول ۲ آورده شده است.

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

مساحت حوضه (Km <sup>2</sup> )	محیط حوضه (Km)	طول آبراهه اصلی (Km)	ضریب شکل	شیب متوسط رودخانه (%)	ارتفاع متوسط (m)
۳۷/۲	۳۱	۱۳	۱/۴۲	۹/۲	۲۶۵۰
طول مستطیل معادل (Km)	عرض مستطیل معادل (Km)	شیب متوسط حوضه (%)	قطر دایره معادل (Km)	طول آبراهه اصلی (Km)	
۱۲/۱۴	۳/۰۶	۵۴/۳	۶/۸۸۴	۱۲/۹۴	

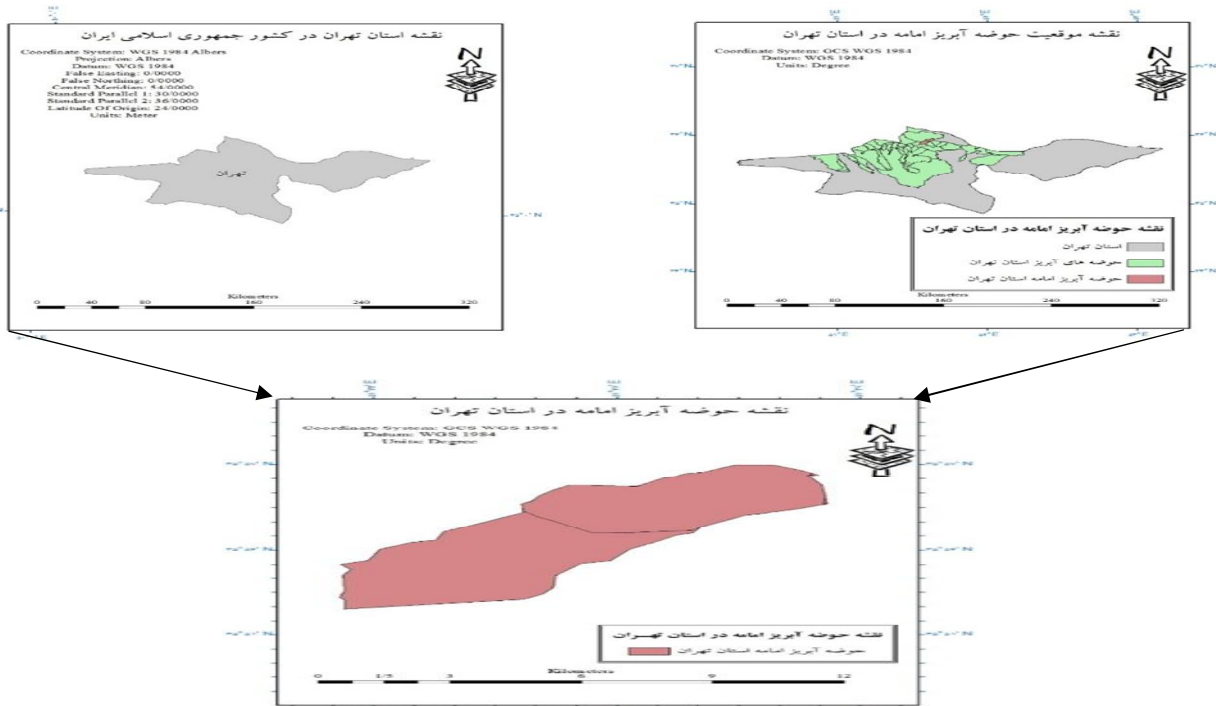
جدول ۲- مشخصات آماری داده‌های مورد بررسی در گام زمانی روزانه.

متغیر مورد نظر	مجموع	میانگین	انحراف معیار	چولگی
بارش (mm)	۴۵۸۱/۱۵۰	۱/۷۹۲	۵/۲۹۴	۵/۶۳۵
تبخیر و تعرق پتانسیل (mm)	۷۶۵۰/۹۵۰	۲/۹۹۳	۲/۹۳۲	۰/۵۴۷
رواناب (mm)	۳۲۳۲/۴۶۸	۱/۲۶۵	۱/۵۴۹	۲/۳۴۴

شکل ۱ هیدروگراف رواناب مشاهداتی روزانه حوضه معرف امامه استان تهران را طی سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۰۱ به همراه دوره‌هایی که رواناب کمینه و بیشینه در آن اتفاق افتاده را نشان می‌دهد.



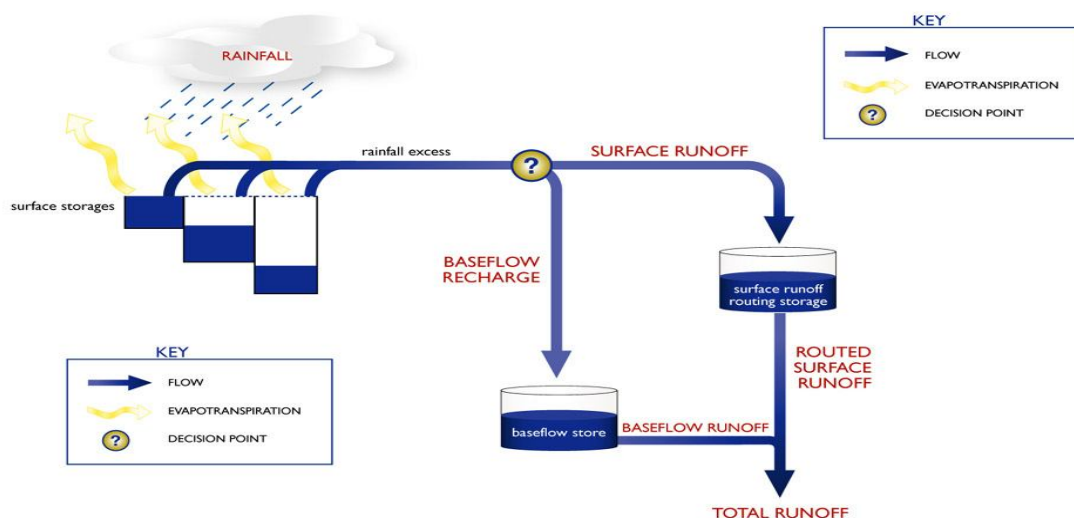
شکل ۱- هیدروگراف رواناب مشاهداتی روزانه حوضه امامه استان تهران در سال های تحقیق به همراه دوره رواناب کمینه و بیشینه.



شکل ۲- موقعیت حوضه معرف امامه در استان تهران.

### معرفی مدل AWBM

مدل تعادل آب استرالیایی یک مدل کامپیوتری است که اولین بار در سال ۱۹۹۳ برای شبیه سازی بارش-رواناب توسط بوتون ارائه شد. مدل AWBM براساس تئوری جریان از سطوح جزئی اشباع که مشابه تئوری جریان سطحی اشباع است، توسعه یافته و برتری های آن بر سایر مدل های شبیه سازی بارش - رواناب عبارتند از: ۱- داده های مورد نیاز مدل به آسانی در دسترس هستند، ۲- مدل سه پارامتری است و در رودخانه های فصلی که آب پایه ندارند، مدل یک پارامتره می شود، ۳- ساختار مدل به نسبت ساده است، ۴- مدل رواناب را در زمان های مختلف از مناطق مختلف محاسبه می کند. مدل AWBM از ظرفیت های ذخیره سطحی ( $C_1$ ,  $C_2$  و  $C_3$ ) با مساحت های ( $A_1$ ,  $A_2$  و  $A_3$ ) برای شبیه سازی سطوح رواناب استفاده می کند و بیلان آبی هر سطح ذخیره ای را مستقل از بقیه در گام های زمانی روزانه محاسبه می کند. در زیر شماتیکی از ساختار مدل هیدرولوژیکی AWBM نمایش داده شده است (شکل ۳).

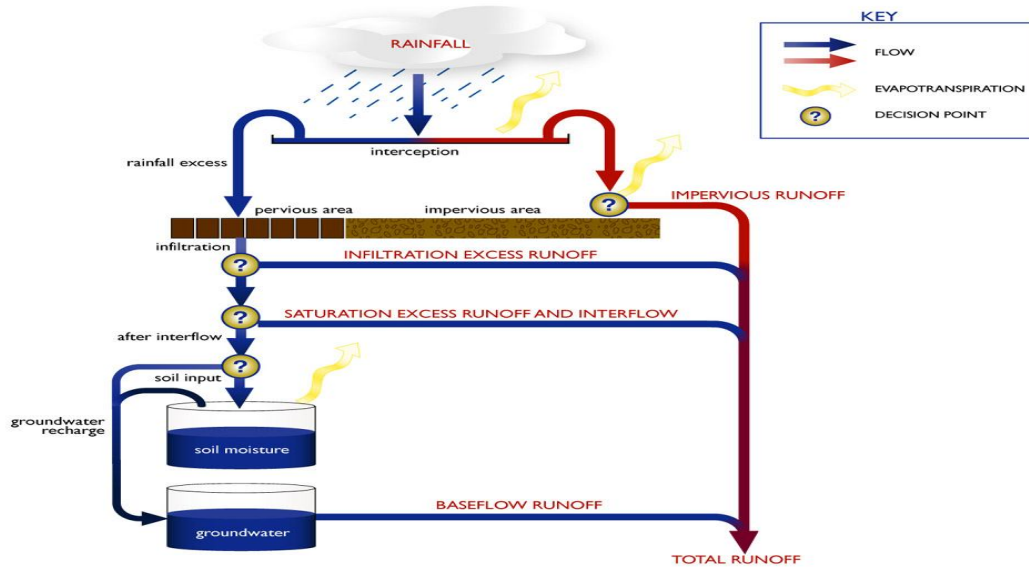


شکل ۳- ساختار مدل هیدرولوژیکی AWBM.

### معرفی مدل SimHyd

SimHyd یک مدل مفهومی روزانه بارش-رواناب است که دبی روزانه را از داده‌های بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل برآورد می‌کند. SimHyd نسخه ساده شده مدل‌های مفهومی بارش-رواناب HYDROLOG که در سال ۱۹۷۲ به‌وسیله پرت<sup>۱</sup> توسعه داده شده و همچنین مدل اخیرتر MODHYDROLOG که در سال ۱۹۹۱ به‌وسیله چویو<sup>۲</sup> توسعه داده شده، است. ساختار مدل ساده یکپارچه و مفهومی بارش-رواناب روزانه SimHyd در شکل ۴ نمایش داده شده است. در مدل هیدرولوژیکی SimHyd، بارش روزانه ابتدا به برگ‌های درختان و پوشش گیاهی برخورد کرده و سپس از محل برگاب هم مقداری تبخیر می‌شود. سپس 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. رطوبتی که نفوذ می‌کند به ظرفیت رطوبتی موجود در خاک برمی‌گردد که آب ناشی از باران را به قسمت‌های جریان میانی، ذخیره آب زیرزمینی و ظرفیت رطوبتی موجود در خاک تقسیم می‌کند. در نهایت مدل رواناب را از سه منبع مختلف برآورد می‌کند: رواناب مازاد نفوذ، رواناب مازاد جریان میانی و دبی پایه.

1 Porter  
2 Chiew



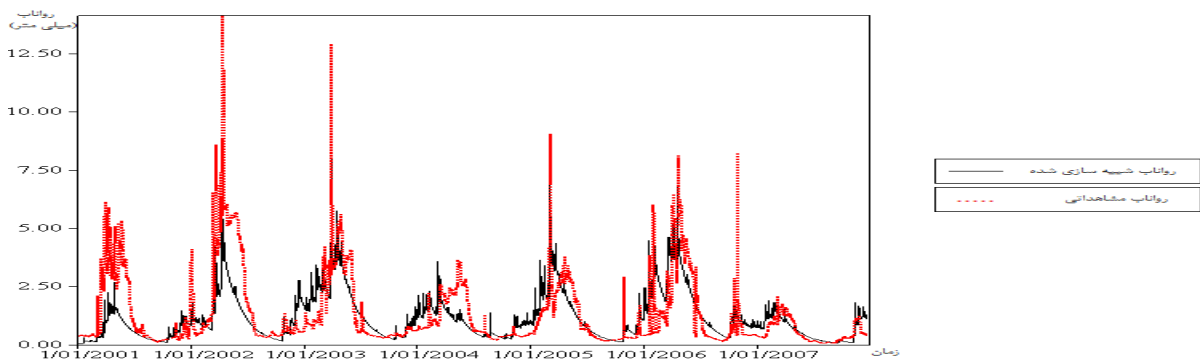
شکل ۴- ساختار مدل هیدرولوژیکی SimHyd.

### نتیجه گیری

در این قسمت بخشی از نتایج شبیه سازی بارش-رواناب حوضه آبریز معرف امامه استان تهران با استفاده الگوریتم بهینه ساز واسنجی خودکار تکامل رقابتی جامع در مدل های هیدرولوژیکی AWBM، SimHyd ارائه شده که شامل هیدروگراف های مربوط به رواناب مشاهداتی و شبیه سازی شده برای دوره واسنجی و صحت سنجی، جداول مربوط به مقادیر عددی توابع هدف تحقیق در دو دوره واسنجی و صحت سنجی، جداول مربوط به مقادیر کمی پارامترهای مدل ها برای دوره واسنجی و بخش مربوط به تحلیل و بررسی نتایج پژوهش حاضر، است. جریان روزانه شبیه سازی شده به وسیله مدل های مذکور با جریان مشاهداتی روزانه در ایستگاه های باغ تنگه و کمرخانی در دوره واسنجی و صحت سنجی مقایسه شده اند و نتایج هر یک از مدل ها به صورت جداگانه ارائه گشته است.

### نتایج اجرای مدل هیدرولوژیکی بارش-رواناب AWBM

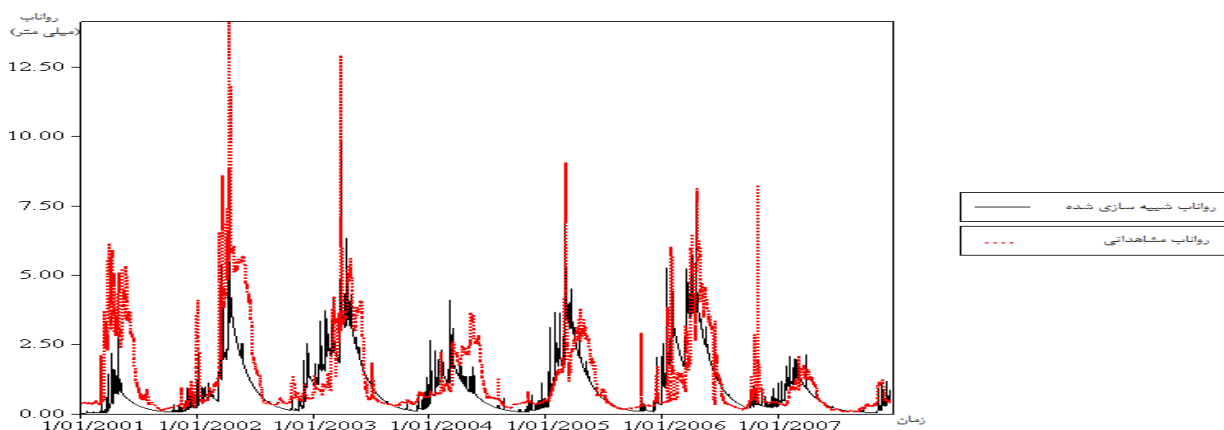
هیدروگراف اجرایی مدل هیدرولوژیکی بارش-رواناب AWBM با استفاده از الگوریتم بهینه ساز واسنجی خودکار تکامل رقابتی جامع برای دوره واسنجی و صحت سنجی در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۵- هیدروگراف شبیه سازی شده و مشاهده ای برای دوره واسنجی و صحت سنجی مدل هیدرولوژیکی AWBM.

### نتایج اجرای مدل هیدرولوژیکی بارش-رواناب SimHyd

هیدروگراف اجرایی مدل هیدرولوژیکی بارش-رواناب SimHyd با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز واسنجی خودکار تکامل رقابتی جامع برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۶- هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی مدل هیدرولوژیکی SimHyd.

مقادیر کمی توابع هدف برای دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی اجرای مدل‌های AWBM و SimHyd با استفاده از بهینه‌ساز واسنجی خودکار تکامل رقابتی جامع در جداول ۳ و ۴ آورده شده است. همچنین مقادیر کمی پارامترهای مدل‌های مذکور در مرحله واسنجی در جداول ۵ و ۶ ارائه گشته است.

جدول ۳- نتایج اجرای مدل‌های هیدرولوژیکی در دوره واسنجی با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز واسنجی خودکار تکامل رقابتی جامع.

مدل	RMSE	R <sup>2</sup>	NSE
AWBM	۱/۰۶۵	۰/۵۸	۰/۵۴۸
SIMHYD	۱/۱۰۷	۰/۶۰	۰/۵۱۱

جدول ۴- نتایج اجرای مدل‌های هیدرولوژیکی در دوره صحت‌سنجی با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز واسنجی خودکار تکامل رقابتی جامع.

مدل	RMSE	R <sup>2</sup>	NSE
AWBM	۰/۸۸۸	۰/۷۶	۰/۶۹۴
SIMHYD	۰/۹۰۱	۰/۷۴	۰/۶۳۸

جدول ۵- مقادیر کمی پارامترهای مدل AWBM برای مرحله واسنجی.

پارامتر	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	BFI	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	K <sub>Base</sub>	K <sub>Surf</sub>
مقدار	۰/۱۳۴	۰/۴۳۳	۰/۰۷۰	۱۳/۹	۰	۲۰۸/۲	۰/۲۷۵	۰/۹۲۸



جدول ۶- مقادیر کمی پارامترهای مدل SimHyd برای مرحله واسنجی.

مقدار	پارامتر
۰/۰۱۹	Baseflow Coeff.
۰/۶	Impervious Threshold
۱۳۲	Infiltration Coeff.
۰/۴	Infiltration Shape
۰/۰۶۶	Interflow Coeff.
۰/۹۹	Perv. Fraction
۴/۲	RISC
۰/۲۵۸	Recharge Coeff.
۱۵۲	SMSC

با توجه به هیدروگرافهای شبیه‌سازی شده و مشاهداتی حاصل از مدل‌های این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که این مدل‌ها توانایی شبیه‌سازی مقادیر بیشینه جریان را ندارند اما مقادیر کمینه و متوسط جریان را به خوبی شبیه‌سازی کرده‌اند. عموماً اگر شاخص نش-ساتکلیف بیشتر از ۰/۷۵ باشد مدل عالی و کامل، و اگر بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۵ باشد رضایت بخش و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد غیر قابل قبول فرض می‌شود (Huang و Zhou, ۲۰۰۹). بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که مدل AWBM با ضریب نش-ساتکلیف ۰/۵۴۸ و ۰/۶۹۴ و ضریب تعیین ۰/۵۸ و ۰/۷۶ به ترتیب در دوره واسنجی و صحت‌سنجی عملکرد بهتری نسبت به مدل SimHyd با ضریب نش-ساتکلیف ۰/۵۱۱ و ۰/۶۳۸ و ضریب تعیین ۰/۶۰ و ۰/۷۴ به ترتیب در دوره واسنجی و صحت‌سنجی از لحاظ کارایی در حوضه منتخب داشته است. همچنین به طور واضح مشخص است که با بیشتر شدن مقدار عددی دو ضریب نش-ساتکلیف و تعیین، مقدار عددی ضریب جذر میانگین مربعات خطا کمتر می‌شود. در انتها می‌توان نتیجه گرفت این مدل‌ها می‌توانند شبیه‌سازی مناسب و رضایت‌بخشی در شرایط منطقه و کشور 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 تکامل رقابتی جامع عملکرد مناسب و رضایت‌بخشی در حوضه منتخب تحقیق را داشته است.

## قدردانی

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

## منابع

- رشیدی، ب، عراقی‌نژاد، ش، ابراهیمی، ک، (۱۳۹۶)، "افزایش دقت شبیه‌سازی رواناب با کاربرد مدل WAPABA"، تحقیقات آب و خاک ایران، صص ۹۴-۸۷.
- سلطانی، س، مرید، س، (۱۳۸۱)، "مقایسه مدل‌های تفهیمی با شبکه عصبی مصنوعی در شبیه‌سازی بارش-رواناب"، مجموعه مقالات ششمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز، صص ۱۰۸۵-۱۰۹۴.
- مدرسی، ف، عراقی‌نژاد، ش، ابراهیمی، ک، (۱۳۹۵)، "ارزیابی استراتژی‌های میانگین‌گیری وزنی رتبه‌ای در ترکیب مدل‌های پیش‌بینی کننده جریان (مطالعه موردی: رودخانه کرخه)"، مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، صص ۲۵-۱۵.
- میثاقی، ف، محمدی، ک، (۱۳۸۱)، "شبیه‌سازی بارش-رواناب و روندیابی رودخانه با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی"، مجموعه مقالات ششمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز، صص ۴۶۲-۴۵۵.
- نورانی، و، صالحی، ک، (۱۳۸۷)، "مدل‌سازی بارش-رواناب با استفاده از شبکه عصبی فازی و مقایسه آن با روش‌های شبکه عصبی فازی"، چهارمین

کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، صص ۸-۱.

- Araghinejad, S., 2006. Application of Artificial Neural Network Ensembles in Probabilistic Hydrological Forecasting, *Water Resources Research* 42 (3).
- Araghinejad, S., 2013. *Data-driven Modelling: Using MATLAB® in Water Resources and Environmental Engineering*, Springer Science & Business Media.
- Araghinejad, S., Karamouz, M., 2005. Long-Lead Streamflow Forecasting Using Artificial Neural Networks and Fuzzy Inference System, *Iran Water Resources Research* 1(2), 29-41.
- Bashar, K., 2012. Comparative Performance of Soil Moisture Accounting Approach in Continuous Hydrologic Simulation of the Blue Nile. *Nile Basin Water Science & Engineering Journal*, 5:2. 10p.
- Behmanesh, J., A. Jabari, M. Montaseri & H. Rezaei 2014. Comparing AWBM and SimHyd models in rainfall-runoff modeling (case study: Nazlou Chay catchment in west Azarbijan). 24th Year, 52(4). (In Persian).
- Boughton, W. 2002. *AWBM Catchment Water Balance Model, Calibration and Operation Manual*, 30p.
- Chang, C.T., Zhao, M.Y., Chau, K.W. and Wu, X.Y. 2006. Using genetic algorithm and TOPSIS for Xinanjiang model calibration with single procedure. *Journal of Hydrology*. 316(1-4):129-140.
- Chen, J & B.J, Adams. 2006. Integration of artificial neural networks with conceptual models in rainfall-runoff modelling. *J Hydrol* 318:232-249.
- Chiew F.H.S., M.C. Peel. & A.W. Western. 2002. Application and testing of the simple rainfall-runoff model SimHyd. In: *Mathematical Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publication, and Littleton. Colorado.
- Modaresi, F., Araghinejad, S., Ebrahimi, K., 2017. A Comparative Assessment of Artificial Neural Network, Generalized Regression Neural Network, Least-Square Support Vector Regression, and K-Nearest Neighbor Regression for Monthly Streamflow Forecasting in Linear and Nonlinear Conditions. *Water Resources Management* 31/260, no. 31 (2017):1-16.
- Moriasi. Arnold D.N., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, *Transactions of the American Society of Agriculture Engineers*, 50(3), 524-530.
- Zhou, Y., Zhu Y.M., 2007. Suspended sediment flux modeling with artificial neural network: An example of the Longchuanjiang in River the Upper Yangtze catchment, China. *Geomorphology* 84:11-125.