

شبیه‌سازی رواناب حوضه معرف امامه با کاربرد بهینه‌ساز واسنجی خودکار الگوریتم جستجو الگو در مدل بیلان آب AWBM

محمد رضا محمدی‌وند^{۱*}، شهاب عراقی‌نژاد^۲، کیومرث ابراهیمی^۳، فرشته مدرسی^۴

^{۱*} - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب دانشگاه تهران، Mohammadi.Vand@ut.ac.ir

^۲ - دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران، Araghinejad@ut.ac.ir

^۳ - استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران، EbrahimiK@ut.ac.ir

^۴ - دکتری مهندسی منابع آب دانشگاه تهران، FModaresi@alumni.ut.ac.ir

چکیده

یکی از پیچیده‌ترین فرآیندهای هیدرولوژیکی فرآیند بارش-رواناب است که از پارامترهای مختلف فیزیکی و هیدرولوژیکی تأثیر می‌پذیرد. هدف مقاله حاضر به بررسی کارایی الگوریتم بهینه‌ساز واسنجی خودکار جستجو الگو در واسنجی پارامترهای مدل بیلان آب AWBM در شبیه‌سازی رواناب با تمرکز بر حوضه معرف امامه می‌پردازد. در مدل مورد استفاده محدوده تغییر پارامترها زیاد است، در نتیجه با توجه به دشواری واسنجی با روش‌های مبتنی بر سعی و خطا و 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 توسط مدل با داده‌های مشاهداتی بستگی دارد. مدل AWBM در نرم‌افزار (Rainfall Runoff Library) RRL برای تخمین روابط بارش-رواناب حوضه مورد مطالعه انتخاب شده است. آماده‌سازی داده‌ها در محیط نرم‌افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی نسخه GIS 10.4.1 انجام شد. جهت شبیه‌سازی از داده‌های هفت ساله بارش، تبخیر و رواناب مشاهداتی در گام زمانی روزانه استفاده شد. ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از ضریب نش-ساتکلیف (NSE)، ضریب تبیین (R^2) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) صورت گرفته است. نتایج این تحقیق گویای نتایج رضایت‌بخش مدل با استفاده از بهینه‌ساز واسنجی خودکار با ضریب نش-ساتکلیف ۰/۵۱۹ و ۰/۶۶۱، ضریب تعیین ۰/۷۶۸ و ۰/۸۷۴ و RMSE برابر ۱/۰۹۹ و ۰/۸۸۳ به ترتیب برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی در حوضه منتخب است، همچنین نتایج حاصل بیانگر روند قادر به وصول مقادیر مطلوب پارامترهای مدل‌های مفهومی و یکپارچه تحقیق است.

واژه های کلیدی: مدل بیلان آب، بهینه‌ساز واسنجی خودکار، الگوریتم جستجو الگو، AWBM.

مقدمه

بیلان، ترازنامه بین داشته‌ها و برداشته‌هاست و بیلان آبی به کلیه آب‌هایی که در یک زمان معین وارد یک محدوده خاص می‌گردد و در این ناحیه یا به مصرف می‌رسد یا ذخیره شده و یا به صورت مختلف از محدوده خارج می‌گردد، اطلاق می‌شود. محدود بودن توان منابع آب در کشورمان، حفاظت، حراست و بهره‌برداری بهینه از آن را به منظور تامین نیازهای آبی آیندگان طلب می‌کند و دستیابی به این اهداف جز با استفاده از مدل‌های بیلان منابع آب و ارزیابی پتانسیل آن‌ها امکان‌پذیر نیست. مدل‌های هیدرولوژیکی 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 توسط محققین علوم آب مورد استفاده قرار می‌گیرند.

وانگ (۱۹۹۱)، روش الگوریتم ژنتیک را جهت کالیبراسیون پارامترهای مدل‌های مفهومی بارش-رواناب به کار برد. شریفی و بوید (۱۹۹۴)، 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 می‌دهد. میزومورا (۱۹۹۵)، رواناب به دست آمده از مدل ساده TANK را با به کارگیری منحنی‌های پسروری مورد مطالعه قرار داد و عملکرد مدل را رضایت‌بخش عنوان نمود. کوپر و همکاران (۱۹۹۷)، عملکرد سه روش الگوریتم ژنتیک^۱، الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت^۲ و الگوریتم تکامل رقابتی جامع^۳ را در یک مدل تانک ساده که فقط شامل دو مخزن بود، مورد بررسی قرار دادند. شریفی (۱۹۹۷)، 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. یو و یانگ (۲۰۰۰)، 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 مقاله حاضر، رواناب روزانه حوضه معرف امامه با کاربرد بهینه‌ساز واسنجی خودکار جستجو الگو^۴ در مدل بیلان آب AWBM مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد. با استفاده از امکان واسنجی خودکار این مدل، واسنجی آن برای حوضه مورد مطالعه می‌تواند به سرعت و بدون نیاز به دانش و تجربه زیاد در مدل و پارامترهای آن، انجام شود.

مواد و روش‌ها

الگوریتم جستجو الگو

الگوریتم جستجو الگو از ساده‌ترین روش‌های جستجو در بهینه‌سازی می‌باشد. از مزایای این روش می‌توان به سریع بودن آن و از معایب آن، می‌توان به یافتن نقاط بهینه ناحیه‌ای با جای نقاط بهینه سراسری اشاره نمود. این مشکل به خصوص در شرایطی که درجه غیرخطی بودن متغیرهای وابسته و مستقل زیاد باشد، بیشتر است. مشکل مربوط به نقاط بهینه موضعی را می‌توان با شروع جستجو از چند نقطه در ابتدای فرآیند جستجو حل کرد. روش جستجو در این روش طی مراحل زیر صورت می‌گیرد:

- گام ۱: شروع با مقدار اولیه و افزایش جستجو برای هر یک از پارامترها،
- گام ۲: ارزیابی تابع هدف برای افزایش و کاهش تدریجی در مقدار فعلی،
- گام ۳: اگر مقدار تابع هدف در یک جهت بهبود یابد، مقدار پارامتر برای آن قرار داده می‌شود،
- گام ۴: تعیین هر یک از پارامترها در جهت بهینه و ارزیابی تابع هدف،
- گام ۵: تکرار مراحل ۱ تا ۴ به طوری که هیچ‌گونه بهبودی در پارامترها ایجاد نگردد.

1 Genetic Algorithm (GA)

2 Simulated annealing

3 Shuffled Complex Evolution (SCE-UA)

4 Pattern Search

چنانچه یک پارامتر به مرزهای ناحیه مورد جستجو نزدیک گردد، مقدار پارامتر با توجه به مقدار مرزی محدود می‌گردد (لوپس و تروست، ۲۰۰۰).

توابع هدف

در این مطالعه برای واسنجی مدل از سه ضریب نش-ساتکلیف^۱ (رابطه ۱)، ضریب تبیین^۲ (رابطه ۲) و یک معیار خطا (جذر میانگین مربعات خطا)^۳ (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 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 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 می‌باشد و کمتر شدن آن به منزله اختلاف حداقل بین داده‌های دبی شبیه‌سازی شده و دبی مشاهداتی است و نشان از عملکرد بهتر مدل دارد (رابطه ۳).

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

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

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

در روابط فوق، Q_{obs}^t = دبی مشاهداتی در زمان t ، Q_{sim}^t = دبی شبیه‌سازی شده در زمان t ، \bar{Q}_{obs} = متوسط دبی‌های مشاهداتی در کل دوره شبیه‌سازی، \bar{Q}_{sim} = متوسط دبی‌های شبیه‌سازی شده در کل دوره مشاهداتی و T = تعداد کل دوره‌های مشاهداتی (گام‌های زمانی) است.

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 ۱). این حوضه در طول‌های جغرافیایی $32^{\circ}51'00''$ تا $39^{\circ}51'00''$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $51^{\circ}35'00''$ تا $57^{\circ}35'00''$ 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. 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

1 Nash-Sutcliffe

2 Coefficient of Determination

3 Root Mean Square Error

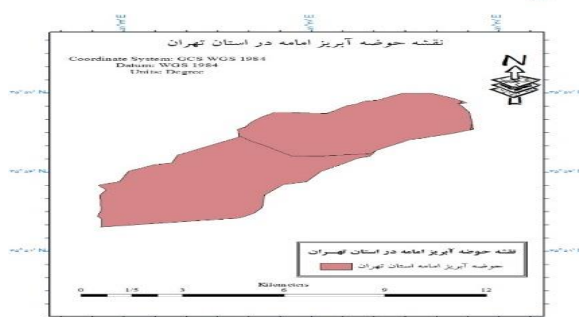
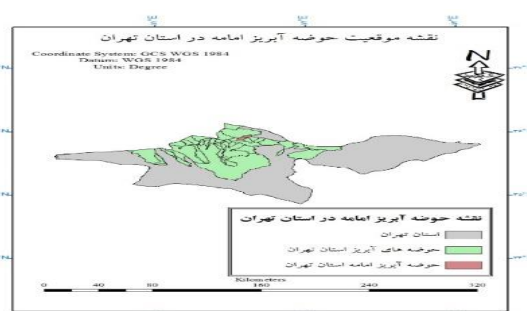
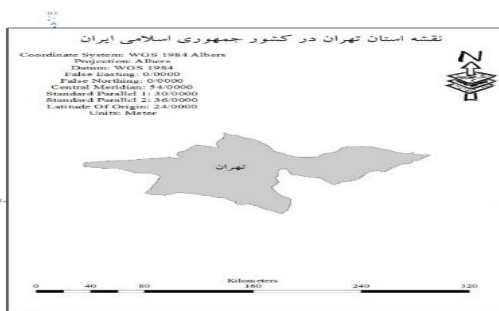
تعرق پتانسیل (PET) و همچنین داده‌های دبی مشاهداتی روزانه استفاده شد. تعداد ۷ سال داده ۲۰۰۱-۲۰۰۷ یعنی ۲۵۵۶ داده بارش روزانه، ۲۵۵۶ داده تبخیر روزانه و ۲۵۵۶ داده رواناب مشاهداتی روزانه در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته که پنج سال (۱۸۲۶ داده روزانه) جهت واسنجی مدل‌ها و دو سال (۷۳۰ داده روزانه) جهت صحت‌سنجی 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.

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

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

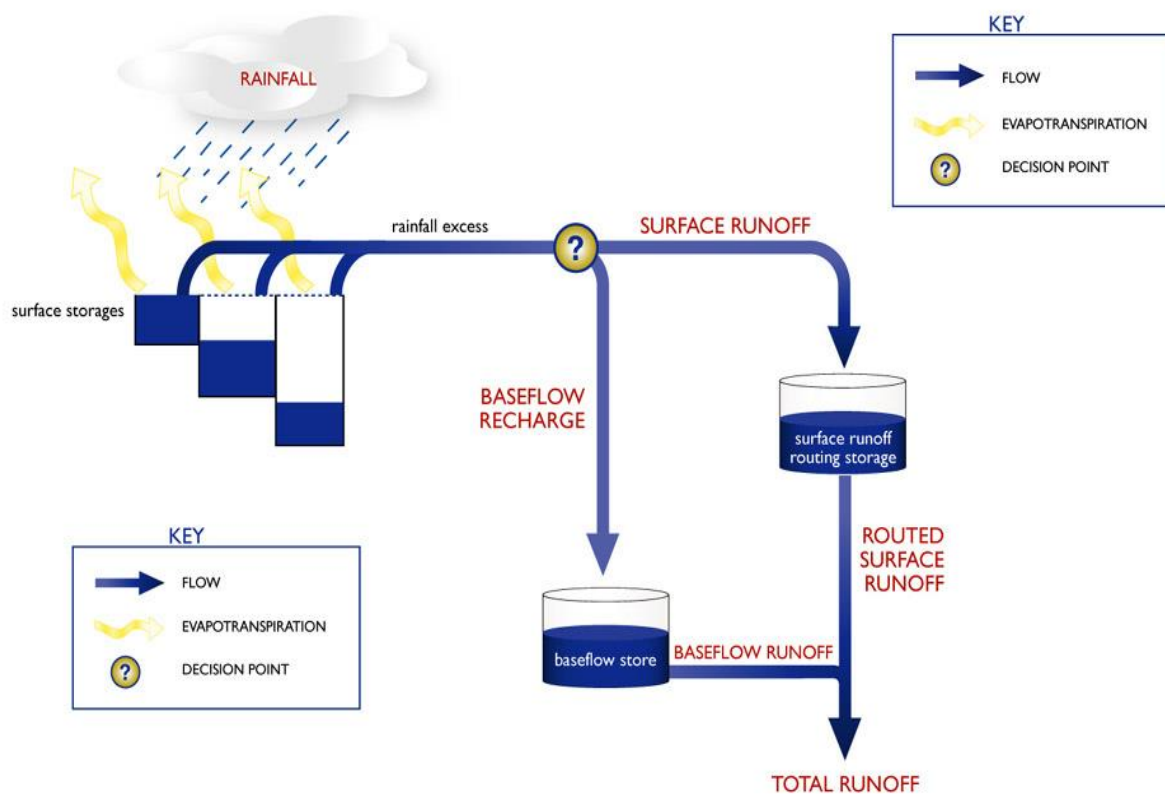
متغیر مورد نظر	مجموع	میانگین	انحراف معیار	چولگی
بارش (mm)	۴۵۸۱/۱۵۰	۱/۷۹۲	۵/۲۹۴	۵/۶۳۵
تبخیر (mm)	۷۶۵۰/۹۵۰	۲/۹۹۳	۲/۹۳۲	۰/۵۴۷
رواناب (mm)	۳۲۳۲/۴۶۸	۱/۲۶۵	۱/۵۴۹	۲/۳۴۴



شکل ۱- موقعیت حوضه معرف امامه در استان تهران.

معرفی مدل بیلان آب AWBM

مدل بیلان آب استرالیایی یک مدل کامپیوتری است که اولین بار در سال ۱۹۹۳ برای شبیه‌سازی 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 برتری‌های آن بر سایر مدل‌های شبیه‌سازی بارش-رواناب عبارتند از: ۱- داده‌های مورد نیاز مدل به آسانی در دسترس هستند، ۲- مدل سه پارامتری است و در رودخانه‌های فصلی که آب پایه ندارند، مدل یک پارامتره می‌شود، ۳- ساختار مدل به نسبت ساده است، ۴- مدل رواناب را در زمان‌های مختلف از مناطق مختلف محاسبه می‌کند. مدل AWBM از ظرفیت‌های 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. در زیر شماتیکی از ساختار مدل بیلان آب AWBM نمایش داده شده است (شکل ۲).

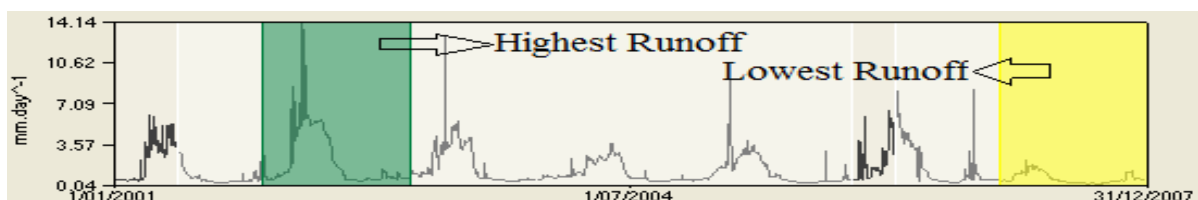


شکل ۲- شماتیکی از ساختار مدل بیلان آب AWBM.

نتیجه‌گیری

در این قسمت بخشی از نتایج شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه آبریز معرف امامه با استفاده الگوریتم بهینه‌ساز واسنجی خودکار جستجو الگو در مدل بیلان آب AWBM ارائه شده است. جریان روزانه شبیه‌سازی شده توسط مدل مذکور با جریان مشاهداتی روزانه در ایستگاه‌های باغ‌تنگه و کمرخانی در دوره واسنجی و صحت‌سنجی مقایسه شده‌اند و نتایج در قالب گراف و

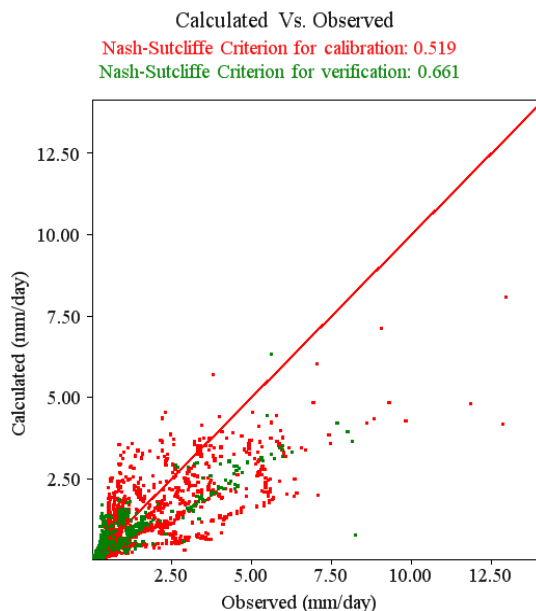
جدول ارائه شده است. نتایج تحقیق حاکی از نتایج مطلوب و موفقیت آمیز مدل با استفاده از الگوریتم بهینه ساز واسنجی خودکار جستجو الگو براساس معیارهای ارزیابی و توابع هدف پژوهش است. شکل ۳ هیدروگراف رواناب مشاهداتی روزانه حوضه معرف امامه استان تهران را طی سالهای ۲۰۰۱-۲۰۰۷ به همراه دوره‌هایی که رواناب حداقل و حداکثری در آن اتفاق افتاده را نشان می‌دهد.



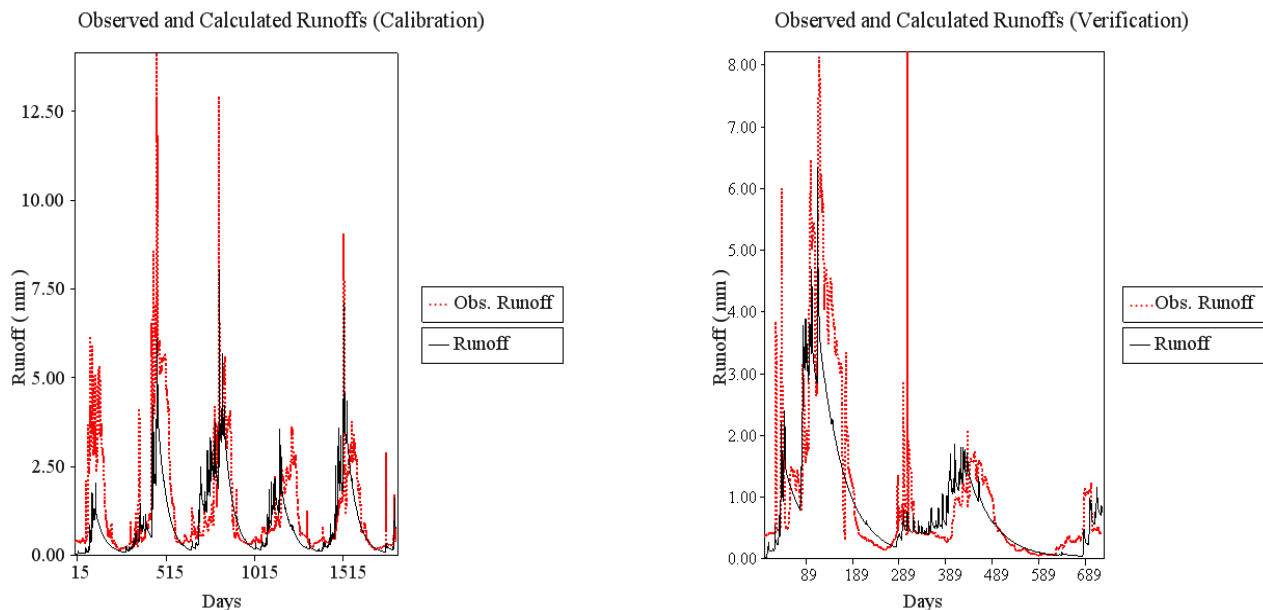
شکل ۳- هیدروگراف رواناب مشاهداتی روزانه حوضه معرف امامه در دوره شبیه‌سازی به همراه دوره رواناب حداقل و حداکثر.

نتایج اجرای مدل بیلان آب AWBM با استفاده از بهینه‌ساز واسنجی خودکار جستجو الگو

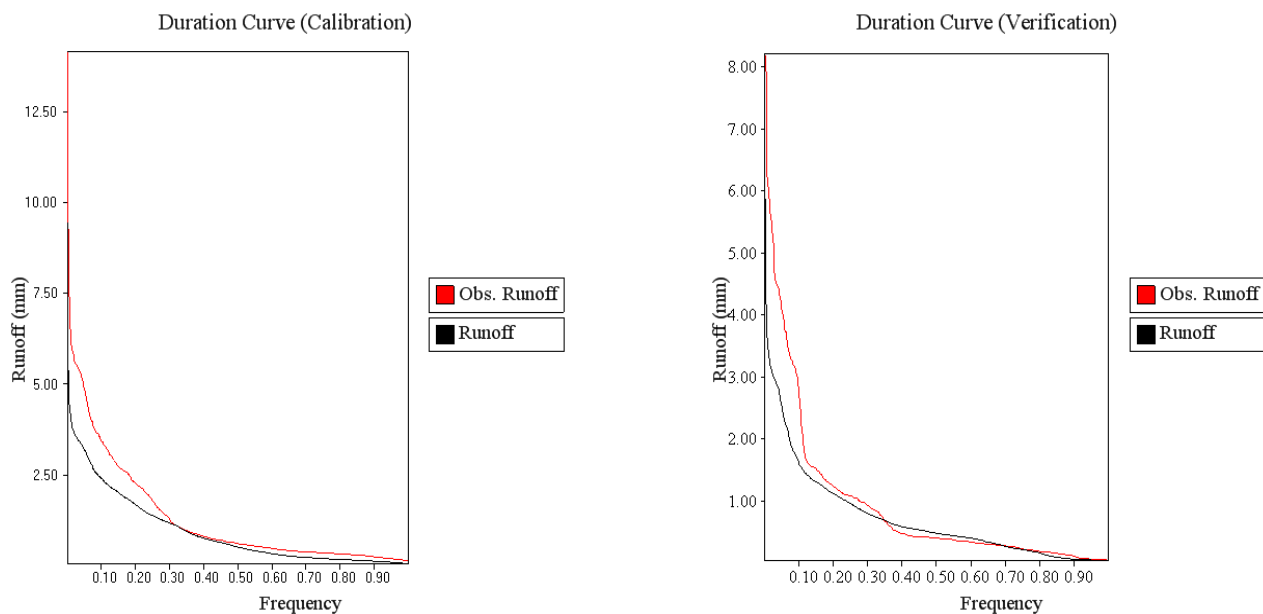
گراف پراکندگی مقادیر رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای مدل هیدرولوژیکی بارش-رواناب AWBM در شکل ۴ ارائه شده است. همچنین هیدروگراف رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب از چپ به راست در شکل ۵ آورده شده است. همچنین منحنی تداوم جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب از چپ به راست در شکل ۶ ارائه گشته‌اند. در انتها هیدروگراف کلی رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در شکل ۷ نمایش داده شده است.



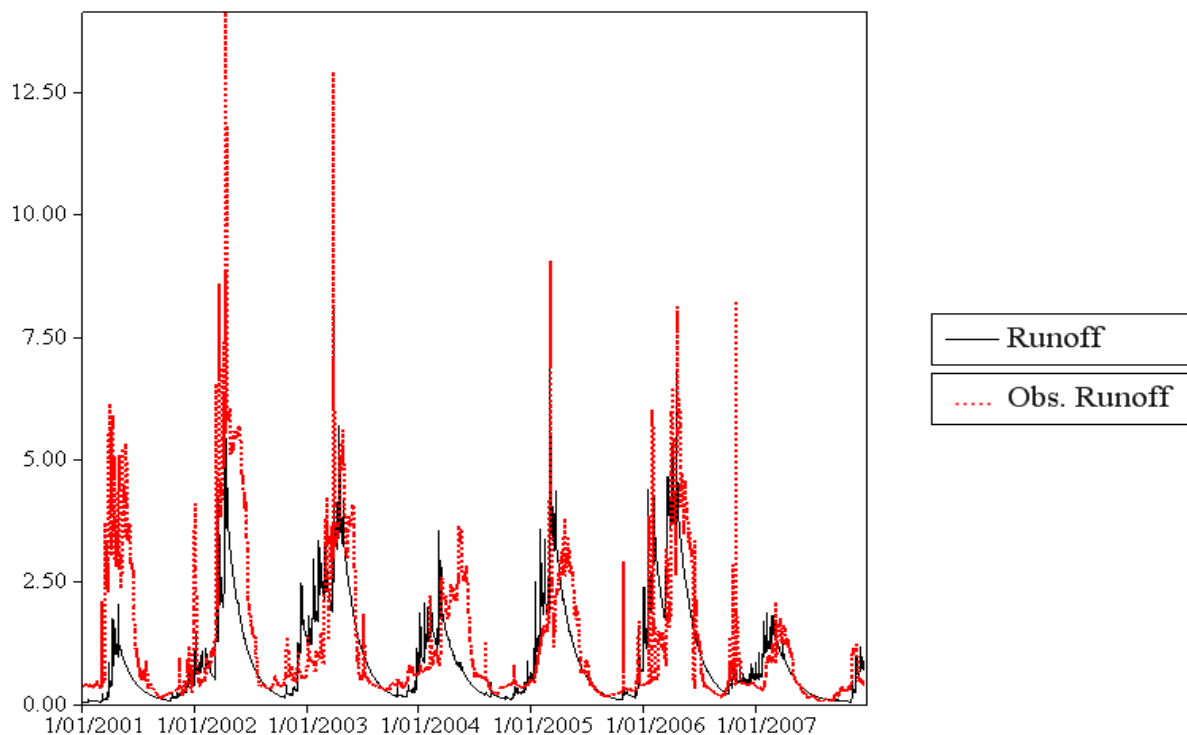
شکل ۴- گراف پراکندگی رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی مدل بیلان آب AWBM.



شکل ۵- هیدروگراف رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل بیلان آب AWBM برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب از چپ به راست.



شکل ۶- منحنی تداوم رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل بیلان آب AWBM برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب از چپ به راست.



شکل ۷- هیدروگراف رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل بیلان آب AWBM.

مقادیر کمی توابع هدف برای دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی اجرای مدل بیلان آب AWBM با استفاده از بهینه‌ساز واسنجی خودکار جستجو الگو در جدول ۳ آورده شده است. همچنین مقادیر کمی پارامترهای مدل مذکور در مرحله واسنجی در جدول ۴ ارائه گشته است.

جدول ۳- نتایج شبیه‌سازی مدل بیلان آب با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز واسنجی خودکار جستجو الگو.

مرحله	RMSE	R ²	NSE
واسنجی	۱/۰۹۹	۰/۷۶۸	۰/۵۱۹
صحت‌سنجی	۰/۸۸۳	۰/۸۷۴	۰/۶۶۱

جدول ۴- مقادیر کمی پارامترهای مدل بیلان آب AWBM برای مرحله واسنجی.

پارامتر	A ₁	A ₂	BFI	C ₁	C ₂	C ₃	K _{Base}	K _{Surf}
مقدار	۰/۱۳۴	۰/۴۳۳	۰/۹۲۸	۰	۱۱۴/۱	۱۹۶/۹	۰/۹۸۱	۰/۲۸۳

با توجه به نمودار پراکندگی و هیدروگرافهای شبیه‌سازی شده و مشاهداتی حاصل از مدل این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که این مدل توانایی شبیه‌سازی مقادیر بیشینه جریان را در بعضی قسمت‌های هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی نداشته اما مقادیر کمینه و متوسط جریان را به خوبی شبیه‌سازی کرده است. نتایج واسنجی مدل، همبستگی مناسب شبیه‌سازی مدل 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 رضایت بخش و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد غیر قابل قبول فرض می‌شود (Zhou and Huang, 2009). بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از شبیه‌سازی رواناب حوضه معرف امامه با استفاده از مدل بیلان آب AWBM رضایت‌بخش می‌باشد و از این مدل می‌توان برای برآورد مقادیر متوسط رواناب در زمینه مدیریت منابع آب استفاده کرد.

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.

فهرست منابع

منابع فارسی

- اکبرپور، م؛ رهنما، م؛ بارانی، غ، (۱۳۸۲)، "مقایسه شبکه عصبی مصنوعی و مدل HEC-HMS در فرآیند بارندگی-رواناب"، چهارمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز، صص ۱۰۳۲-۱۰۲۵.
- جهانگیر، ع؛ رائینی، م؛ ضیاءاحمدی، م، (۱۳۹۷)، "شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب با شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و مقایسه با مدل HEC-HMS در حوضه معرف کارده"، مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۲، شماره ۲، صص ۸۴-۷۲.
- 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، وح؛ صالحی، ک، (۱۳۸۷)، "مدل سازی بارش-رواناب با استفاده از شبکه عصبی فازی و مقایسه آن با روش های شبکه عصبی فازی"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، صص ۸-۱.

منابع انگلیسی

- 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.
- Audet, C & Dennis Jr, J.E., 2002. Analysis of generalized pattern searches. *SIAM Journal on Optimization*, 13(3): 889-903.
- 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.
- Franchini, M. and Galeati, G. 1997. Comparing several genetic algorithm schemes for calibration of conceptual rainfall-runoff models. *Hydrol. Sci. J.* 42(3):357-380.
- Hafezparast, M., Araghinejad, S., Fatemi, SE., Bressers, JTA., 2013. A Coceptual Rainfall-Runoff Model Using the Auto Calibrated NAM Models in the Sarisoo River, *Hydrology: Current Research* 4(1).
- Lin, GF. and Wang, C.M. 2007. A nonlinear rainfall-runoff model embedded with an calibration method - Part 2: The automated calibration method. *Journal of Hydrologt.* 341 (3-4):196-206.
- Lorrai, M., Secchi, H.M, (1995). "Neural nets for modeling rainfall-runoff transformation watercourses management. Vol 9, 299-313.
- 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.