

مقایسه کارکرد مدل های مفهومی در شبیه سازی هیدرولوژیک رودخانه

مهدی شیخ گودرزی^۱؛ بهمن جباریان امیری^{۲*} و حسین آذر نیوند^۳

۱ - دانش آموخته دکتری محیط زیست، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲ - دانشیار، گروه محیط زیست، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳ - استاد، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

(تاریخ دریافت ۹۵/۱۱/۲۲ - تاریخ پذیرش ۹۶/۰۱/۲۹)

چکیده:

مدل های هیدرولوژیک بارش-رواناب ابزارهای مهمی در پروژه های منابع آبی هستند. به طور کلی کارایی این گروه مدل ها وابسته به انتخاب مناسب پارامترهای مدل است. براین اساس روش های متعددی برای برآورد پارامترهای هیدرولوژیک ابداع شده اند. تحقیق حاضر با هدف مقایسه عملکرد مدل های هیدرولوژیک مفهومی TANK، SIMHYD و AWBM که از قابلیت برآورد غیر مستقیم پارامترهای مدل بهره می برند، در شبیه سازی جریان دبی حوزه آبخیز بابلرود واقع در استان مازندران شکل گرفت. فرآیند کالیبراسیون خودکار این مدل ها با کاربرد الگوریتم جستجوی تکاملی ژنتیک و استفاده از توابع هدف NSE و RMSE به عنوان عوامل تعیین کننده سطح خطا و آستانه های توقف شبیه سازی طراحی شد. در این روال داده های هواشناسی و آب شناسی دما، تبخیر و تعرق، بارش و دبی در مقیاس روزانه از سازمانهای مربوطه تهیه و پس از اعتبارسنجی مقدماتی و ترمیم گپ های موجود به بخشهای تعادل سنجی، آموزش و تست تقسیم بندی شدند. براساس نتایج حاصل، نمایه NSE برای گام آموزش و تست مدل TANK (۰/۵۹ تا ۰/۷۲)، و نمایه RMSE برای گام آموزش مدل SIMHYD (۰/۸۳) و گام تست مدل TANK (۰/۱۵) را برترین شبیه ساز معرفی می کند. مطابق با نتایج نمایه های تحلیلی مشخصه های جریان، به طور کلی شبیه سازی های انجام شده در مقادیر دبی کم آبی (به استثنای مدل TANK)، دبی متوسط و دبی پرآبی جریان با تطابق قابل قبولی انجام شده است. این در صورتی است که شبیه سازی شیب منحنی تداوم جریان که به نوعی بیانگر شدت تغییرات است (به استثنای مدل TANK در گام آموزش)، نتایج قابل قبولی ارائه نکرد. لیکن با توجه به ضعف و قوت های مطرح شده، مدل های مذکور پس از انجام تست های مقدماتی در شرایط متفاوت اقلیمی کشور، می توانند به عنوان شبیه سازی های قابل قبول جهت مدیریت منابع آبی خصوصا در حوزه های فاقد اطلاعات آماری مورد استفاده قرار گیرند.

کلیدواژگان: بارش-رواناب، شبیه سازی دبی، مدل هیدرولوژیک مفهومی، بهینه سازی خودکار، حوزه آبخیز بابلرود.

۱. مقدمه

در تحقیق حاضر اقدام به استفاده از مدل های موجود در بسته نرم افزاری *RRL* شامل *TANK*، *SIMHYD* و *AWBM* جهت شبیه سازی فرآیند بارش-رواناب حوضه بابل رود واقع در استان مازندران گردید.

۲. مواد و روش ها

۱.۱. معرفی منطقه مورد مطالعه

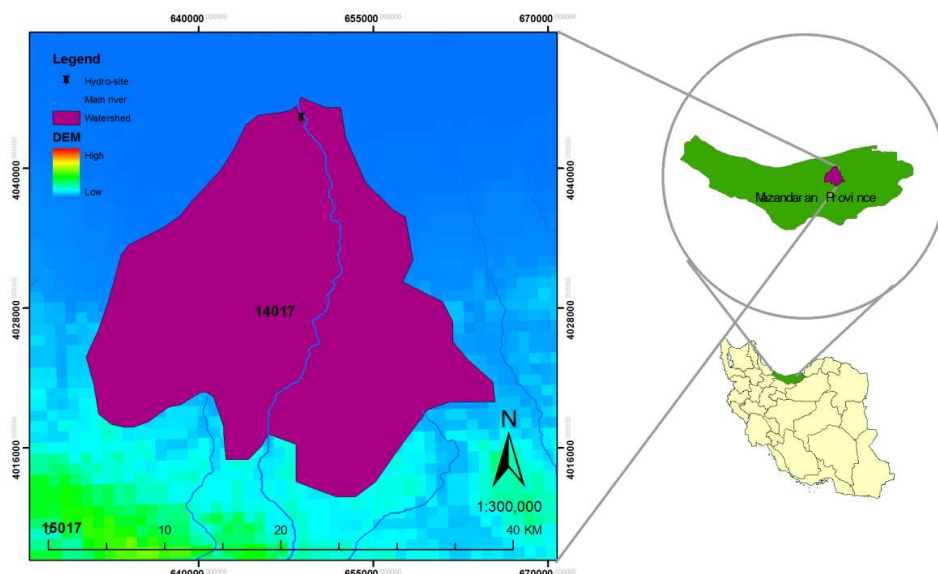
به طور کلی انتخاب حوزه آبخیز مورد مطالعه در تحقیق حاضر با هدف بررسی قابلیت مدلسازی فرآیندهای هیدرولوژیک موثر بر پدیده بارش-رواناب در مقیاس مکانی بزرگ صورت گرفت. براساس نظر *Beven & Binley* (2014) سطح حوزه آبخیز از مهمترین عواملی است که بر شدت فرآیندها تاثیر داشته و رفتار هیدرولوژیکی شدیداً تحت تاثیر اثر مقیاس است. بر این اساس، حوزه آبخیز بابلرود (۱۷-۱۴) با وسعت تقریبی ۵۰۰ هکتار به نمایندگی از حوزه های آبخیز بزرگ^۵ در محدوده اکولوژیک جنوب حوزه آبریز دریای مازندران و واقع در استان مازندران (شکل ۱).

بررسی وضعیت اقلیم منطقه با روش دومارتن معرف آب و هوای معتدل و مرطوب است. مهمترین رودخانه این حوزه رود بابلرود است. بررسی وضعیت کاربری و پوشش اراضی در حوزه بیان کننده وجود مناطق شهری، جنگلی (گونه های درختی بید، توسکا، توت، انجیر، تبریزی و اوجا)، مراتع، کشاورزی (باغات، کشت آبی و دیم) و اراضی فاقد پوشش (بایر) است. ویژگی های فیزیکی و اکولوژیک این منطقه نیز در جدول (۱) ارائه شده است.

محیط زیست و منابع آبی در سرتاسر جهان هیچ گاه به اندازه عصر حاضر مورد تهدید قرار نگرفته اند. افزایش خطر احتمالی سیلاب و کاهش چشمگیر در تنوع زیستی در اثر تخریب و توسعه در اکوسیستم های رودخانه ای، همه از این موارد هستند. وظیفه کشف و شناسایی پاسخهای مناسب برای این تهدیدات در عصر حاضر، به طور کلی بر عهده متخصصان هیدرولوژیک است (*Bormann et al.*, 2009). طی سالیان اخیر، هیدرولوژیست ها ابزارهای زیادی چون مدل های تجربی^۱، مفهومی^۲ (مفهومی)، توزیعی^۳ و مدل های آماری تحلیل منطقه ای^۴ را برای پیش بینی فرآیندهای هیدرولوژیک توسعه داده اند (*Ekenberg*, 2016). کاربرد هر کدام از این ابزارها می تواند تحت چهارچوب و شرایط ویژه ای به اهداف و تصمیم گیری های مدیران در مدیریت بحران های طبیعی کمک شایانی نماید. بر این اساس، تمایل به کاربرد مدل های هیدرولوژیک در پروژه های منابع آب و افزایش توجه به افزایش کارایی مدل های بارش-رواناب به طور روز افزونی در حال افزایش می باشد.

با توجه به دامنه وسیع مدل های هیدرولوژیکی موجود، بررسی کارایی مدل ها برای اهداف مختلف مدیریتی ضروری میباشد. مدلی که با توجه به نقص و کمبود آمار طولانی مدت و دقیق بتواند نتایج قابل قبولی ارائه دهند، می توانند به عنوان ابزاری کارآمد در خدمت مدیرحوزه آبخیز باشند. از این رو

- 1- Tentative Models
- 2- Conceptual (Lumped) Model
- 3- Distributed
- 4- Statistical-Regional Based Model



شکل ۱- محدوده مطالعاتی

جدول ۱- ویژگی های فیزیکی و اکولوژیک حوزه آبخیز مطالعاتی

نام حوزه	استان	شیب % متوسط حوزه	ارتفاع	سال ساخت	مختصات		شماره حوزه
					UTM-X	UTM-Y	
بابلرود	مازندران	۲/۹۸	۱۳۴	۱۳۲۸	-۱۴۸۲۳۶	۱۳۵۰۰۲۷	۱۴-۰۱۷
دوره آماری	بارش		دبی		دما		شماره حوزه
	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	
۱۳۸۶-۱۳۸۹	۱/۷۲	۵/۳۷	۱/۳۷	۲/۰۶	۱۵/۶۰	۶/۹۰	۱۴-۰۱۷
۱۳۸۹-۱۳۹۰	۱/۷۸	۴/۶۶	۱/۸۳	۱/۸۹	۱۵/۳۸	۶/۷۷	
شماره حوزه	مساحت (هکتار)	% کشاورزی	% مناطق شهری	% جنگل	% مراتع	% اراضی بایر	% پهله آبی
۱۴-۰۱۷	۵۴۲	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۵۰	۰/۴۹	۰/۰۰	۰/۰۰

۲.۲ مدل های هیدرولوژیک

۱.۲.۲ کالیبراسیون

سازي انتخاب و به عنوان مبنای تصمیم گیری جهت انتخاب سری های شبیه سازی شده بهینه مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین جهت بررسی کارایی و ارزیابی یک فضای توصیفی تحلیلی از مدلسازی انجام گرفته، از مشخصه های جریان میانگین رواناب ویژه سالیانه ($MASR^2$)، شیب منحنی تداوم جریان ($mFDC^3$)، آماره دبی کم آبی نرمال شده (NLF^4)، آماره دبی پر آبی نرمال شده (NHF^5)، آماره ضریب

در تحقیق حاضر از مدل های SIMHYD، AWBM و مدل TANK استفاده شد. کالیبراسیون پارامترهای مربوط به مدل های هیدرولوژیک مفهومی مورد بررسی بر مبنای الگوریتم ژنتیک (GA^1) انجام شد. در این روال توابع هدف مجذور میانگین مربعات (RMSE) و ناش ساتکلیف (NSE) نیز به عنوان معیار تنظیم کننده سطح خطا در فرآیند بهینه

- 2- Mean Annual Specific Runoff
- 3- Slope of Flow Duration-Curve
- 4- Normalized Low-Flow Statistic
- 5- Normalized High-Flow Statistic

- 1- Genetic Algorithm

$$NSE = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \right) \quad \text{معادله (۱)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{c_i} - Q_{o_i})^2}$$

معادله (۲)

۲.۲.۲. پیش پردازش و آماده‌سازی اطلاعات

مورد نیاز

داده‌های هواشناسی و هیدرومتریک مورد استفاده در تحقیق حاضر به ترتیب عبارتند از مقادیر روزانه بارش^۴ (P)، تبخیر و تعرق واقعی^۵ (ET_A)، و دبی یا رواناب سطحی^۶ (Q) می‌باشند. در این چهارچوب پس از اعتبارسنجی مقدماتی و با توجه به افزایش کیفیت ثبت داده‌های محیطی طی سالهای اخیر، تلاش گردید از همپوشانی زمانی داده‌های ایستگاه بابلرود بین سالهای ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۰ استفاده شود. لازم به توضیح است که مقادیر بارش و دبی از اطلاعات ایستگاه‌های سنجش وزارت نیرو استخراج گردیدند. این داده‌ها پس از بررسی مقدماتی کیفیت و ترمیم گپ‌های موجود، تبدیل واحد شده (استاندارد سازی بر مبنای مساحت حوزه و تغییر مقادیر دبی از m³/s به mm/d و در نهایت محاسبه مقادیر تبخیر و تعرق واقعی نیز به کمک اطلاعات دمای هوای ثبت شده توسط سنجنده‌های سازمان هواشناسی کشور مطابق با معادلات (۳ و ۴) انجام گرفت (FAO, 1998; Allen et al., 1998; Heryansyah, 2001; Verstraeten et al., 2005).

$$ET_0 = 0.0135 (T + 17.78) \times RS \quad \text{معادله (۳)}$$

تغییرات جریان (CV^۱) و نمایه هیدروگراف (HF^۲) استفاده شد (Viglione et al., 2013; USGS, 2008).

پیش از اجرای آنالیز، داده‌های مورد استفاده به دو بخش آموزش (معادل ۷۰٪) و تست (معادل ۳۰٪) تقسیم بندی شدند. لازم به توضیح است که در هر گام، مقایسه با معیارهای اولیه خطا در بخش کوچکی معادل ۱۰٪ داده‌های ابتدایی ورودی به مدلسازی حذف (گرم کردن مدل^۳)، و در سنجش کلی مورد اعمال قرار نگرفت. توابع هدف مورد استفاده در تحقیق حاضر عبارتند از: نمایه ناش ساتکلیف (NASH) و خطای مجذور میانگین مربعات (RMSE). انتخاب این نمایه‌ها بر مبنای نتایج حاصل و پیشنهادات سایر پژوهشگران در موقعیت‌های مختلف انجام شده است (Nash & Sutcliffe, 1970; Gooijer & Hyndman, 2006; Armstrong, 1992; Willmott & Collopy, 2005). توابع هدف مذکور به عنوان عامل تعیین کننده سطح خطا در طی گام‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی تحقیق حاضر اعمال و بهینه سازی الگوریتم‌های جستجو را تا رسیدن به آستانه مطلوب مدیریت می‌کنند (طی تعداد تکرارهای در نظر گرفته شده). بر این اساس، فرمول توابع هدف مورد بررسی بصورت ذیل ارائه می‌گردد (معادلات ۱ و ۲؛ که در آن Q_{obs} و Q_{sim} به ترتیب جریان رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده و $\overline{Q_{obs}}$ میانگین جریان مشاهده شده در N نمونه در طی دوره زمانی مورد مطالعه می‌باشد).

4- Rainfall
5- Actual Evapotranspiration
6- Discharge

1 - Coefficient of Variation
2-HF, Hydrograph Flashiness
3-Warm-up

$$Ev = Kc \times ET_0 \quad \text{معادله (۴)}$$

که در آن Ev ، RS ، T ، ET_0 و Kc به ترتیب معادل مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل، میانگین دما، مقادیر تابش خورشیدی^۱، تبخیر و تعرق واقعی و ضرایب گیاهی است.

۳. نتایج

مدلسازی بارش-رواناب در تحقیق حاضر طی دو گام آموزش و تست و با کاربرد مدل های مفهومی $AWBM$ ، $SIMHYD$ و $TANK$ انجام شد. پارامترهای مربوط به مدل های مذکور نیز طی فرآیند کالیبراسیون (با کاربرد الگوریتم جستجوی ژنتیک و توابع هدف NSE و $RMSE$) بهینه سازی شدند. ویژگی های توصیفی و تحلیلی مربوط به جریانهای شبیه سازی شده و مشخصات پارامترهای بهینه سازی شده طی بخش های ذیل ارائه می گردد.

۱.۳. مدل $AWBM$

شکل (۲) نتایج شبیه سازی دبی و منحنی تداوم جریان مربوط به مدل $AWBM$ (در طی گام های آموزش و تست) را نمایش می دهد. همچنین مشخصات پارامترهای بهینه سازی شده نیز در جدول (۲) ارائه شده است. بر اساس این نتایج، پارامترهای C_1 ، C_2 ، C_3 که به ترتیب مرتبط با ظرفیت نگهداشت اول تا سوم هستند بیشترین دامنه تغییر را دارند. نزدیک ترین مقادیر آستانه ای بهینه سازی شده مربوط به آستانه پایینی پارامتر ظرفیت نگهداشت اول (C_1) و آستانه بالایی پارامتر ضریب بازگشت جریان سطحی روزانه ($KSurf$) می باشد. بررسی نمودارهای دبی بیانگر تطابق عمومی خوب میان سری های

مشاهداتی و شبیه سازی شده می باشد. نتایج بررسی منحنی تداوم جریان نیز (به استثنای آستانه های پرآبی تا مقادیر میانه گام تست) نتایج قابل قبولی ارائه داد. براساس این نمودارها (شکل ۲)، مقادیر پیکهای پرآبی، کم آبی و شیب عمومی منحنی تداوم جریان به طور مناسبی شبیه سازی شده است. لیکن مقادیر دارای خطای بالا که بلحاظ بصری قابل تشخیص باشد نیز با دوایر قرمز رنگ مشخص شده است.

۲.۳. مدل $SIMHYD$

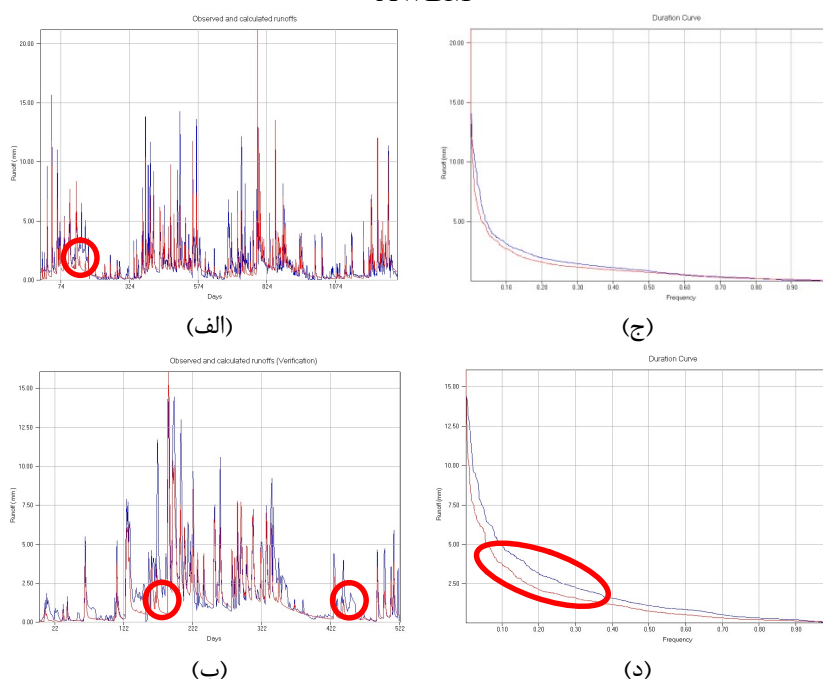
شکل (۳) نتایج شبیه سازی دبی و منحنی تداوم جریان مربوط به مدل $SIMHYD$ (در طی گام های آموزش و تست) را نمایش می دهد. همچنین مشخصات پارامترهای بهینه سازی شده نیز در جدول (۳) ارائه شده است. بر اساس این نتایج، پارامترهای ظرفیت نفوذ و ظرفیت ذخیره رطوبتی خاک بیشترین دامنه تغییر را دارند. نزدیک ترین مقادیر آستانه ای بهینه سازی شده مربوط به آستانه پایینی ضریب جریان ورودی و آستانه بالایی پارامتر تغذیه می باشد. بررسی نمودارهای دبی بیانگر تطابق عمومی خوب میان سری های مشاهداتی و شبیه سازی شده می باشد. نتایج بررسی منحنی تداوم جریان نیز (به استثنای اکثر مقادیر گام تست) نتایج قابل قبولی ارائه داد. براساس این نمودارها (شکل ۳)، مقادیر پیکهای پرآبی، کم آبی و شیب عمومی منحنی تداوم جریان به طور مناسبی شبیه سازی شده است. لیکن مقادیر دارای خطای بالا که بلحاظ بصری قابل تشخیص باشد نیز با دوایر قرمز رنگ مشخص شده است.

۳.۳. مدل TANK

ارتفاع بالایی (H11) و پایینی رواناب سطحی تانک اول (H12) بیشترین دامنه تغییر را دارند. نزدیک ترین مقادیر آستانه ای بهینه سازی شده مربوط به آستانه پایینی ضریب رواناب پایه تانک چهارم (a41) و آستانه بالایی پارامتر سطح آب مخزن در تانک دوم (C2) می باشد. بررسی نمودارهای دبی بیانگر تطابق عمومی خوب میان سری های مشاهداتی و

شکل (۴) نتایج شبیه سازی دبی و منحنی تداوم جریان مربوط به مدل TANK (در طی گام های آموزش و تست) را نمایش می دهد. همچنین مشخصات پارامترهای بهینه سازی شده نیز در جدول (۴) ارائه شده است. بر اساس این نتایج، پارامترهای

AWBM

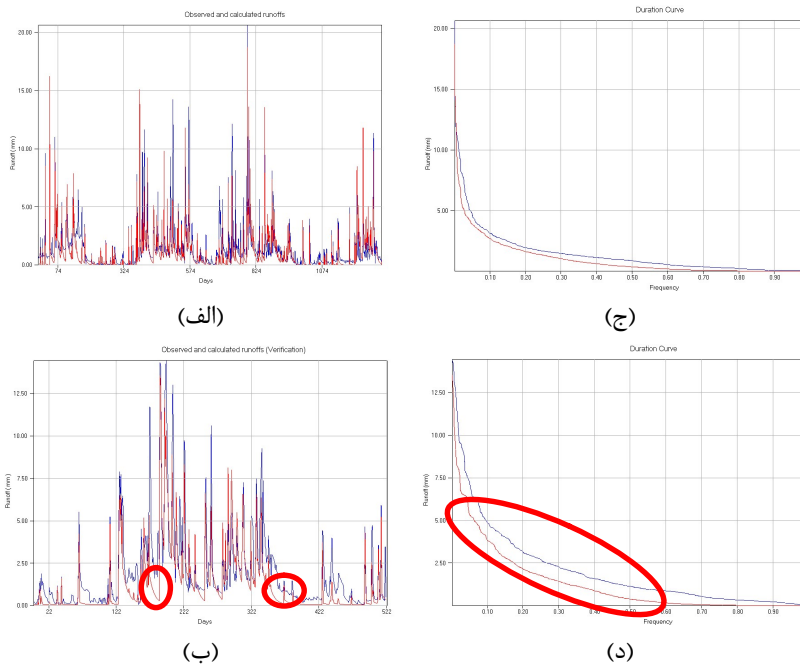


شکل ۲- نتایج حاصل از مدل AWBM (الف مقادیر دبی مشاهداتی و شبیه سازی گام آموزش؛ ب مقادیر دبی مشاهداتی و شبیه سازی گام تست؛ ج منحنی تداوم جریان گام آموزش؛ د منحنی تداوم جریان گام تست)

جدول ۲- نتایج بهینه سازی پارامترهای مدل AWBM

پارامتر	مقدار اولیه	محدوده تغییر پارامتر	مقادیر بهینه	توصیف
A1	۰/۱۳	۱/۰۰	۰/۱۳	ذخیره سطحی اول
A2	۰/۴۳	۱/۰۰	۰/۴۳	ذخیره سطحی دوم
BFI	۰/۴۵	۱/۰۰	۰/۴۸	شاخص جریان پایه
C1	۷/۰۰	۵۰/۰۰	۰/۰۵	ظرفیت نگهداشت سطحی اول
C2	۷۰/۰۰	۲۰۰/۰۰	۰/۱۶	ظرفیت نگهداشت سطحی دوم
C3	۱۵۰/۰۰	۵۰۰/۰۰	۱۷۶/۱۲	ظرفیت نگهداشت سطحی سوم
KBase	۰/۹۵	۱/۰۰	۰/۴۳	ضریب بازگشت جریان پایه روزانه
KSurf	۰/۳۵	۱/۰۰	۰/۹۷	ضریب بازگشت جریان سطحی روزانه

SIMHYD



شکل ۳- نتایج حاصل از مدل SIMHYD (الف مقادیر دبی مشاهداتی و شبیه سازی گام آموزش؛ ب مقادیر دبی مشاهداتی و شبیه سازی گام تست؛ ج منحنی تداوم جریان گام آموزش؛ د منحنی تداوم جریان گام تست)

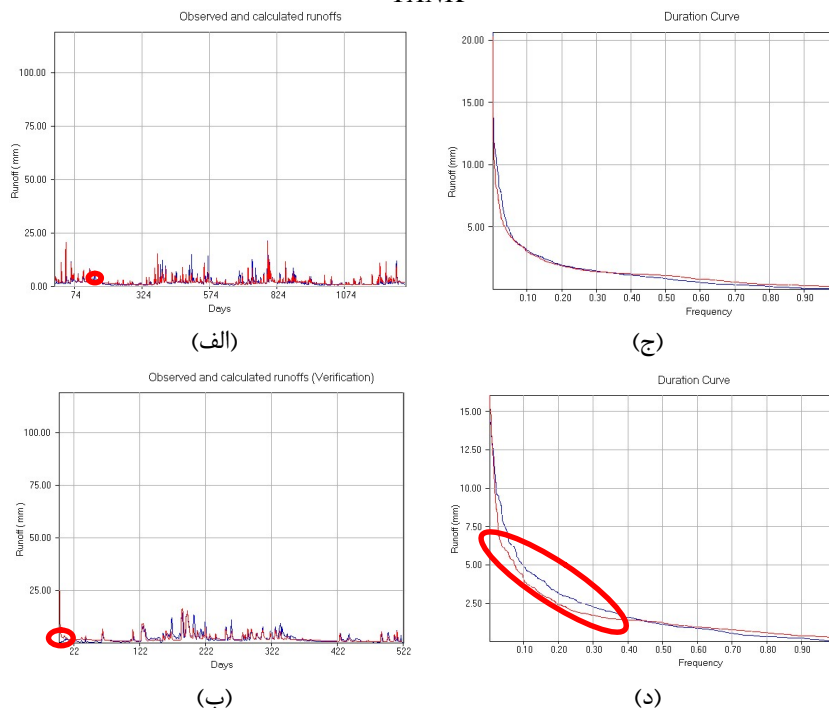
جدول ۳- نتایج بهینه سازی پارامترهای مدل SIMHYD

مقادیر بهینه	محدوده تغییر پارامتر		مقدار اولیه	پارامتر
۰/۲۸	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۳۰	ضریب جریان پایه
۰/۲۴	۰/۰۰	۵/۰۰	۱/۰۰	آستانه نفوذناپذیری
۱۲۸/۷۳	۰/۰۰	۴۰۰/۰۰	۲۰۰/۰۰	ضریب نفوذ
۰/۵۶	۰/۰۰	۱۰,۰۰	۳/۰۰	شکل نفوذ
۰/۰۱	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۱۰	ضریب جریان ورودی
۰/۸۴	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۰	سهم نفوذپذیر
۰/۰۹	۰/۰۰	۵,۰۰	۱/۵۰	ظرفیت ذخیره برگاب بارش
۰/۹۸	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۲۰	ضریب تغذیه
۲۱۶/۴۸	۱/۰۰	۵۰۰/۰۰	۳۲۰/۰۰	ظرفیت ذخیره رطوبتی خاک

لحاظ بصری قابل تشخیص باشد نیز با دواپر قرمز رنگ مشخص شده است.

شبیه سازی شده می باشد. نتایج بررسی منحنی تداوم جریان نیز (به استثنای آستانه های پرآبی گام تست) نتایج قابل قبولی ارائه داد. براساس این نمودارها (شکل ۴)، مقادیر پیکهای پرآبی، کم آبی و شیب عمومی منحنی تداوم جریان به طور مناسبی شبیه سازی شده است. لیکن مقادیر دارای خطای بالا که به

TANK



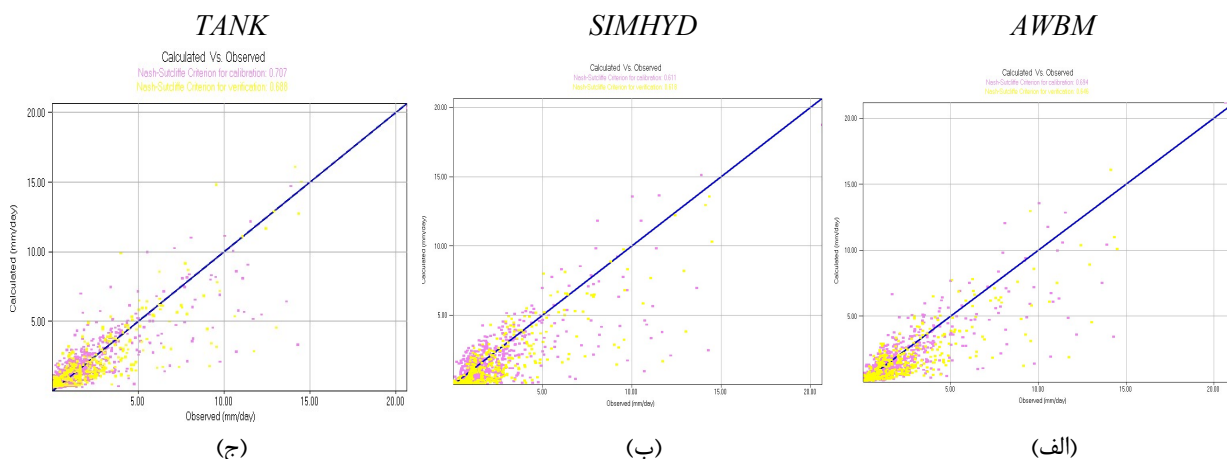
شکل ۴- نتایج حاصل از مدل TANK (الف مقادیر دبی مشاهداتی و شبیه سازی گام آموزش؛ ب مقادیر دبی مشاهداتی و شبیه سازی گام تست؛ ج منحنی تداوم جریان گام آموزش؛ د منحنی تداوم جریان گام تست)

جدول ۴- نتایج بهینه سازی پارامترهای مدل TANK

پارامتر	مقدار اولیه	محدوده تغییر پارامتر	مقادیر بهینه	توصیف
H11	۰/۰۰	۵۰۰/۰۰	۵۹/۸۰	ارتفاع بالایی رواناب سطحی تانک اول
a11	۰/۲۰	۱/۰۰	۰/۲۶	ضریب رواناب اول سطحی تانک اول
a12	۰/۲۰	۱/۰۰	۰/۲۳	ضریب رواناب دوم سطحی تانک اول
a21	۰/۲۰	۱/۰۰	۰/۸۱	ضریب رواناب میانی دوم
a31	۰/۲۰	۱/۰۰	۰/۶۴	ضریب رواناب زیرپایه تانک سوم
a41	۰/۲۰	۱/۰۰	۰/۰۲	ضریب رواناب پایه تانک چهارم
alpha	۰/۱۰	۵۰/۰۰	۰/۰۳	ضریب رواناب مربوط به خروجی هر تانک
b1	۰/۲۰	۱/۰۰	۰/۲۸	ضریب نفوذ تانک اول به دوم
b2	۰/۲۰	۱/۰۰	۰/۰۵	ضریب نفوذ تانک دوم به سوم
b3	۰/۲۰	۱/۰۰	۰/۰۹	ضریب نفوذ تانک سوم به چهارم
C1	۲۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۹۹/۰۲	سطح آب مخزن در تانک اول
C2	۲۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۹۹/۸۵	سطح آب مخزن در تانک دوم
C3	۲۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۴۷/۵۲	سطح آب مخزن در تانک سوم
C4	۲۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۵۴/۴۹	سطح آب مخزن در تانک چهارم
H12	۰/۰۰	۳۰۰/۰۰	۰/۲۲	ارتفاع پایینی رواناب سطحی تانک اول
H21	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۵۱/۳۷	ارتفاع رواناب سطحی تانک دوم
H31	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۷/۲۸	ارتفاع رواناب سطحی تانک سوم
H41	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۳/۴۳	ارتفاع رواناب سطحی تانک چهارم

نقاط متعددی در حاشیه بالایی و پایینی محور قطری دیده می شود که نشان از داده های پرت و عدم توانایی مدل ها در شبیه سازی مقادیر عمدتاً پر آبی است.

همچنین شکل (۵) نیز پراکنش نقاط دبی شبیه سازی شده در برابر نقاط مشاهداتی را در اسکترپلاتهای سه گانه ای نشان می دهد. مطابق این نمودارها، پراکنش نقاط به طور عمومی حول محور قطری بوده لیکن



شکل ۵- پراکنش داده های دبی شبیه سازی شده و مشاهداتی برای گام های آموزش و تست (الف مدل AWBM؛ ب مدل SIMHYD؛ ج مدل TANK)

مطابق با نتایج ارزیابی نمایه میانگین رواناب ویژه سالیانه از شبیه سازی انجام شده توسط مدل های مفهومی در گام آموزش، برترین و ضعیف ترین شبیه سازی به ترتیب برای مدل TANK (با $+6\%$ اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) و SIMHYD (با -28% اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) بدست آمد. براساس نتایج گام تست، برترین و ضعیف ترین شبیه سازی نیز به ترتیب برای مدل TANK (با -7% اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) و SIMHYD (با -35% اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) بدست آمد. مطابق با نتایج ارزیابی نمایه شیب منحنی تداوم جریاناز شبیه سازی انجام شده در گام آموزش، برترین و ضعیف ترین شبیه سازی به ترتیب برای مدل TANK (با -4% اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) و AWBM (با -34% اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) بدست آمد. براساس نتایج گام تست، برترین و ضعیف ترین شبیه سازی نیز به ترتیب برای

۴.۳. صحت شبیه سازی

بررسی صحت شبیه سازی انجام شده (عملکرد مدل های مفهومی مورد استفاده) نیز با استفاده از معیارهای خطای NSE و RMSE (توابع هدف) و همچنین مشخصه های تحلیلی وضعیت جریان انجام شد. نتایج این ارزیابی در جدول (۵) ارائه شده است. بر اساس نتایج نمایه NSE برترین شبیه سازی عمومی در گام آموزش و تست برای مدل TANK (0.72 و 0.84) بدست آمد. دامنه تغییرات این نمایه برای کلیه مدل ها نیز برای گام های آموزش و تست به ترتیب (0.59 تا 0.72) و (0.71 تا 0.84) بدست آمد. مطابق نتایج نمایه RMSE نیز برترین شبیه سازی عمومی در گام آموزش برای مدل SIMHYD (0.15) و در گام تست برای مدل TANK (0.15) بدست آمد. دامنه تغییرات این نمایه برای کلیه مدل ها نیز برای گام های آموزش و تست به ترتیب (0.83 تا 1.09) و (0.15 تا 0.32) بدست آمد.

نسبت به مقدار مشاهداتی) بدست آمد. مطابق با نتایج ارزیابی نمایه ضریب تغییرات جریان از شبیه سازی انجام شده در گام آموزش، برترین و ضعیف ترین شبیه سازی به ترتیب برای مدل AWBM (با ۲٪ اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) و SIMHYD (با ۲۴٪ اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) بدست آمد. براساس نتایج گام تست، برترین و ضعیف ترین شبیه سازی نیز به ترتیب برای مدل AWBM (با ۵٪ اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) و SIMHYD (با ۲۶٪ اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) بدست آمد.

همچنین مطابق با نتایج ارزیابی نمایه هیدروگراف از شبیه سازی انجام شده در گام آموزش، برترین و ضعیف ترین شبیه سازی به ترتیب برای مدل TANK (با ۲٪ اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) و SIMHYD (با ۳۳٪ اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) بدست آمد. براساس نتایج گام تست، برترین و ضعیف ترین شبیه سازی نیز به ترتیب برای مدل AWBM (با ۸٪ اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) و SIMHYD (با ۲۰٪ اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) بدست آمد.

مدل TANK (با ۴۲٪ اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) و SIMHYD (با ۵۳٪ اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) بدست آمد.

مطابق با نتایج ارزیابی نمایه دبی کم آبی نرمال شده از شبیه سازی انجام شده در گام آموزش، برترین و ضعیف ترین شبیه سازی به ترتیب برای مدل SIMHYD (با اختلاف ناچیز نسبت به مقدار مشاهداتی) و TANK (با ۴۳۳٪ اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) بدست آمد. براساس نتایج گام تست، برترین و ضعیف ترین شبیه سازی نیز به ترتیب برای مدل SIMHYD (با اختلاف ناچیز نسبت به مقدار مشاهداتی) و TANK (با ۳۰۰٪ اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) بدست آمد.

مطابق با نتایج ارزیابی نمایه دبی پرآبی نرمال شده از شبیه سازی انجام شده در گام آموزش، برترین و ضعیف ترین شبیه سازی به ترتیب برای مدل AWBM (با ۶٪ اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) و SIMHYD (با ۱۶٪ اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) بدست آمد. براساس نتایج گام تست، برترین و ضعیف ترین شبیه سازی نیز به ترتیب برای مدل AWBM (با ۴٪ اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) و SIMHYD (با ۲۵٪ اختلاف

جدول ۵- ارزیابی عملکرد شبیه سازی مدل های مفهومی برای گام های آموزش و تست

مدل هیدرولوژیک	گام کالیبراسیون	معیار ارزیابی		مشخصه های جریان											
		RMSE	NSE	MASR		mFDC		%۹۵nq		%۵۰nq		CV		HF	
TANK	آموزش	۱/۰۹	۰/۷۲	۵۱۶/۱۸	۵۴۷/۵۴	۳/۹۰	۳/۷۳	۰/۰۳	۰/۰۰	۳/۳۱	۳/۰۲	۱/۳۷	۱/۱۵	۰/۴۲	۰/۴۱
SIMHYD		۰/۸۳	۰/۶۰		۳۶۹/۱۹		۲/۷۱				۳/۸۷		۱/۷۰		۰/۵۶
AWBM		۰/۹۹	۰/۵۹		۴۲۷/۷۳		۲/۵۸				۳/۵۰		۱/۴۰		۰/۳۹
TANK	تست	۰/۱۵	۰/۸۴	۶۵۶/۲۲	۶۰۹/۲۹	۷/۲۲	۴/۱۵	۰/۰۵	۰/۰۰	۳/۵۱	۳/۲۳	۱/۲۹	۱/۱۸	۰/۲۵	۰/۲۱
SIMHYD		۰/۱۷	۰/۷۱		۴۲۳/۸۸		۳/۳۸				۴/۳۹		۱/۶۳		۰/۳۰
AWBM		۰/۳۲	۰/۸۰		۵۱۷/۸۳		۳/۹۵				۳/۶۴		۱/۳۵		۰/۲۳

۴. بحث و نتیجه گیری

تحقیق حاضر با هدف مقایسه عملکرد مدل های هیدرولوژیک مفهومی در شبیه سازی جریان دبی حوزه آبخیز بابلرود واقع در استان مازندران شکل گرفت. بر این اساس و با در نظر گرفتن توانایی مدل های مفهومی در شبیه سازی فرآیندهای هیدرولوژیک خصوصا در حوزه های آبخیز فاقد اطلاعات آماری، مدل های مفهومی TANK، SIMHYD و AWBM جهت شبیه سازی پدیده بارش-رواناب انتخاب شدند.

فرآیند کالیبراسیون این مدل ها با کاربرد الگوریتم جستجوی تکاملی ژنتیک و استفاده از توابع هدف NSE و RMSE به عنوان عوامل تعیین کننده سطح خطا و آستانه های توقف شبیه سازی (ارزیابی صحت مدل سازی) شکل گرفت (Chai & Draxler, 2014). با توجه به این نکته که نمایه NSE معمولا با ترسیم گرافیکی نتایج مشاهداتی تطابق بیشتری داشته، لیکن نمایه RMSE نیز معیاری کارا از میزان خطای شبیه سازی است. همچنین بررسی وضعیت جریانهای دبی شبیه سازی شده نیز به کمک نمایه های تحلیلی جریان MSAR، mFDC، NLF، NHF، CV و HF انجام شد. در این روال داده های هواشناسی و آب شناسی دما، تبخیر و تعرق، بارش و دبی در مقیاس روزانه از سازمانهای مربوطه تهیه و پس از اعتبارسنجی مقدماتی و ترمیم گپ های موجود به دو بخش آموزش (۷۰٪) و تست (۳۰٪) تقسیم بندی شدند. بر این اساس، حدود ۱۰٪ از داده های ابتدایی هر گام (آموزش و تست) به عنوان تعادل سنجی (گرم کردن مدل) انتخاب و شبیه سازی بارش-رواناب انجام گرفت. لازم به توضیح است که منطقه مورد مطالعه در تحقیق حاضر برمبنای

کاملترین پایگاه داده کمی و کیفی داده های اقلیم-شناسی و آب شناسی در حوزه های آبخیز استانهای شمالی کشور که حاصل از انجام یک پیش مطالعه (Sheikh Goodarzi, 2013) می باشد، انتخاب گردید. حوزه آبخیز بابلرود که جزوه حوزه های با مساحت بیش از ۵۰۰ هکتار می باشد، حوزه ای کم شیب (شیب متوسط زیر ۳٪)، کم ارتفاع (ارتفاع متوسط ۱۳۴ متر از سطح دریاهای آزاد) و واجد ایستگاه های اندازه گیری جریان قدیمی است (قدمت بیش از ۶۵ سال) که بیش از ۹۹٪ از سطح زیر پوشش این حوزه را جنگل و مراتع در بر گرفته اند. بر اساس نتایج حاصل، نمایه NSE برای گام آموزش و تست مدل TANK (۰/۵۹ تا ۰/۷۲)، و نمایه RMSE برای گام آموزش مدل SIMHYD (۰/۸۳) و گام تست مدل TANK (۰/۱۵) را برترین شبیه ساز معرفی می کند.

مطابق با نتایج نمایه های تحلیلی مشخصه های جریان نیز برترین شبیه سازی انجام شده از میانگین رواناب ویژه سالیانه به ترتیب برای گام های آموزش و تست توسط مدل TANK (با ۰/۶+ و ۰/۷-) اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) بدست آمد. برترین شبیه سازی انجام شده از شیب منحنی تداوم جریان به ترتیب برای گام های آموزش و تست توسط مدل TANK (با ۰/۴- و ۰/۴۲-) اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) بدست آمد. برترین شبیه سازی انجام شده از دبی کمی آبی نرمال شده به ترتیب برای گام های آموزش و تست توسط مدل SIMHYD (با اختلاف ناچیز نسبت به مقدار مشاهداتی) بدست آمد. برترین شبیه سازی انجام شده از دبی پراپی نرمال شده به ترتیب برای گام های آموزش و تست توسط مدل AWBM (با ۰/۶+ و ۰/۴+ اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی)

تغییرات است مدل ها (به استثنای مدل TANK در گام آموزش) نتایج قابل قبولی ارائه نکردند. لیکن با توجه به نتایج حاصل، مدل های مذکور پس از انجام تست های مقدماتی در شرایط متفاوت اقلیمی کشور، می توانند به عنوان شبیه سازهایی قابل قبول جهت مدیریت منابع آبی خصوصا در حوزه های فاقد اطلاعات آماری مورد استفاده قرار گیرند. همچنین در صورت فراهمی اطلاعات موجود، می توان با ارتقای بدنه مدل های مورد مطالعه از حالت یکپارچه به توزیعی و همچنین با در نظر گرفتن خصوصیات اکولوژیک و هیدرولوژیک منطقه مطالعاتی، کارایی شبیه سازی را به طور موثرتری ارتقا بخشید.

بدست آمد. برترین شبیه سازی انجام شده از ضریب تغییرات جریان به ترتیب برای گام های آموزش و تست توسط مدل AWBM (با $+0.2\%$ و $+0.5\%$ اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) بدست آمد. همچنین، برترین شبیه سازی انجام شده از هیدروگراف نیز به ترتیب برای گام های آموزش و تست توسط مدل TANK (با -0.2% اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) و مدل AWBM (با -0.8% اختلاف نسبت به مقدار مشاهداتی) بدست آمد. به طور کلی شبیه سازی های انجام شده در مقادیر کمی کم آبی (به استثنای مدل TANK)، متوسط و پرآبی جریان با تطابق قابل قبولی انجام شده است. این در صورتی است که شیب منحنی تداوم جریان که به نوعی بیانگر شدت

References:

Allen, R.G, Pereira, L.S, Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.

Beven, K., Binley, A., 2014. GLUE: 20 years on. *HYDROLOGICAL PROCESSES* Hydrol.Process. 28,5897–5918.

Bormann, B., Breuer, L., Giertz, S., Huisman, J.A., Viney, N.R., 2009. Uncertainties in Environmental Modelling and Consequences for Policy Making Part of the series NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Chapter: Spatially explicit versus lumped models in catchment hydrology – experiences from two case studies, 3-26.

Chai, T., Draxler, R. R., 2014. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Journal of Geoscience, Model Development* 7, 1247–1250.

Collopy, F., Armstrong, J. S., 1992. Rule-based forecasting: development and validation of an expert Systems approach to combining time series extrapolations. *Management Science* 38, 1394–1414.

Duan, Q., 2003. Global optimization for watershed model calibration. In: *Calibration of Watershed Models* (ed. by Q. Duan, H. V. Gupta, S. Sorooshian, A. N. Rousseau & R. Turcotte), 89–104. *Water Science and Application* 6, Am. Geophys. Union, Washington DC, USA.

Ekenberg, M., 2016. Using a lumped conceptual hydrological model for five different catchments in Sweden. Master's thesis Physical Geography and Quaternary Geology, University of Stockholm.

FAO. 1996. Irrigation and Drainage paper, Guideline for predicting Crop water Requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 154p.

Goldberg, D. E., 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison Wesley, Boston, USA.

- Goodarzi M. R., Zahabiyoun, B., Massah Bavani, A. R., Kamal .A. R., 2012. Performance comparison of three hydrological models SWAT, IHACRES and SIMHYD for the runoff simulation of Gharesou basin. *Water and Irrigation Management*, 2(1). Spring 2012.(In Persian).
- Gooijer, J. G D., Hyndman, R. J., 2006. 25 Years of Time Series Forecasting. *International journal of forecasting* 22, 443-473.
- Goswami, M., o'Connor, K, M., 2007. Comparative assessment of six automatic optimization techniques for calibration of a conceptual rainfall-runoff model, *Hydrological Sciences Journal*52:3, 432-449.
- Heryansyah, A., 2001. Application of tank model on runoff and water quality for land uses management in Cidanau watershed. Master's Thesis. Bogor Agricultural University. Bogor. Indonesia.
- Holland, J. H., 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. The University of Michigan Press, Ann Arbor, USA.
- Li,Cz., Hao, W., Jia, L., Yan, Dh.,Yu, Fl., Zhang,Lu., 2010. Effect of calibration data series length on performance and optimal parameters of hydrological model. *Water Science and Engineering* 3(4), 378-393.
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part 1, A discussion of principles. *J. Hydrol* 10, 282-290.
- Podger, G., 2005. *Rainfall Runoff Library (RRL). Catchment Modeling Toolkit* prepared by the © CRC for Catchment Hydrology, Australia. Pp: 110.
- Sheikh Goodarzi, M., 2013. *General review of ecosystem based hydrological modeling technics*. PhD Seminar, Department of Environment, University of Tehran, Iran. 59p.
- USGS. 2008. *Calculating Flow-Duration and Low-Flow Frequency Statistics at Streamflow-Gaging Stations*. U.S. Department of the Interior, Scientific investigation report 2008-5126.
- Verstraeten, W.W., Muys, B., Feyen, J., Veroustraete, F., Minnaert, M., Meiresonne, L., De Schrijver, A., 2005. Comparative analysis of the actual evapotranspiration of Flemish forest and cropland, using the soil water balance model WAVE. *Hydrol Earth Syst Sci* 9, 225-241.
- Viglione, A., Parajka, J., Rogger, M., Salinas, J. L., Laaha, G., Sivapalan, M., Bl'oschl, G., 2013. Comparative assessment of predictions in ungauged basins – Part 3: Runoff signatures in Austria. *Journal of Hydrol. Earth Syst. Sci* 17, 2263-2279.
- Willmott , C., Matsuura, K., 2005. Advantages of the Mean Absolute Error (MAE) over the Root Mean Square Error (RMSE) in assessing average model performance, *Clim. Res*30, 79-82.