نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و ششم، شماره سوم، ۱۳۹۸
۱۹۳-۲۰۶
http://jwsc.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/jwsc.2019.15457.3069

روش‌های ترکیبی چندگانه مدل‌سازی برای تجزیه‌وتحلیل شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: زیرحوضه آبریز قره‌سو، استان کرمانشاه)

***محسن پوررضا بیلندی[۱]، هادی معماریان خلیل‌آباد[۲]، علی شهیدی[۱] و سمیرا رهنما[۳]**

[۱]دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، [۲]دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، [۳]دانشجوی دکتری منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۵/۱۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۲/۱۵

چکیده

سابقه و هدف: مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژیکی نمایش ساده‌شده‌ای از سیستم هیدرولوژی واقعی هستند که به مطالعه درباره کارکرد حوضه در واکنش به ورودی‌های گوناگون و فهم بهتر از فرآیندهای هیدرولوژی کمک می‌کنند. این روش‌ها با شبیه‌سازی فرآیند بارش- رواناب قادر به تخمین میزان رواناب حوضه‌های آبریز فاقد ایستگاه اندازه‌گیری با کم‌ترین زمان و هزینه ممکن می‌باشند. ولی این روش‌ها علی‌رغم توانمندی‌های بالا، دارای خطا می‌باشند. یکی از مهم‌ترین مسائل در بین پژوهشگران، برطرف نمودن این خطاها است. کاربرد روش ترکیبی، یکی از مهم‌ترین رویکردهای مورد استفاده جهت بهبود نتایج می‌باشد. در این پژوهش برای تجزیه‌وتحلیل شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی از چهار روش ترکیبی چندگانه (روش میانگین مدل ساده (SMA)، روش میانگین وزنی (WAM)، روش ترکیبی چند مدل یکپارچه (MMSE)، روش ترکیبی چند مدل یکپارچه تغییریافته (M3SE)) در زیرحوضه آبریز قره‌سو واقع در استان کرمانشاه استفاده شده است.

مواد و روش‌ها: زیرحوضه آبریز قره‌سو با مساحت ۵۳۵٤ کیلومترمربع در شمال‌غربی حوضه کرخه و در غرب ایران واقع شده است. در این پژوهش داده‌های پایه مورداستفاده شامل داده‌های دما، بارش و رواناب مشاهده‌ای به‌صورت روزانه طی دوره آماری ۲۰۰۸ -۱۹۹۷ از ایستگاه‌های منتخب منطقه است. ۷۰ درصد داده‌ها برای دوره واسنجی (۲۰۰۵ -۱۹۹۷) و ۳۰ درصد باقی‌مانده برای صحت‌سنجی (۲۰۰۸ -۲۰۰٦) بکار گرفته شد. بدین منظور، از مدل‌های موجود در بسته نرم‌افزاری RRL چون Simhyd، AWBM، Sacramento و TANK و مدل‌های SCS-Milc و Hymod کدنویسی شده در زبان برنامه‌نویسی MATLAB استفاده شد. پس از حصول نتایج، به منظور بهبود نتایج از چهار روش ترکیبی SMA، WAM، MMSE و M3SE استفاده شد. در نهایت با استفاده از شاخص‌های ارزیابی ریشه میانگین مربعات خطای نرمال(NRMSE) و نش- ساتکلیف (NS) عملکرد هر کدام از روش‌ها بررسی شد.

* مسئول مکاتبه: mohsen.pourreza@birjand.ac.ir

یافته‌ها: در پژوهش حاضر تمامی مدل‌های شبیه‌سازی‌شده نتایج قابل‌قبولی را ارائه می‌دهند. نتایج مربوط به روش‌های ترکیبی نشان داد که به‌طورکلی روش‌ها موجب بهبود نتایج شبیه‌سازی شده‌اند. هم‌چنین بیش‌ترین میزان بهبود به‌ترتیب در روش‌های M3SE و MMSE به‌دست آمد. مقدار شاخص‌های ارزیابی NS و NRMSE در روش M3SE به‌ترتیب ۰/۸۰ و ۰/۹۷ در دوره واسنجی و در دوره صحت‌سنجی ۰/۸۷ و ۰/۵۳ به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری: روش‌های ترکیبی چندگانه به‌طور مشخص نتایج شبیه‌سازی دبی جریان توسط هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی را بهبود بخشیدند. هر چند روش M3SE به‌دلیل داشتن فرآیندی که در آن تأثیر تصحیح خطا دیده شده است، نتایج بهتری نسبت به بقیه ارائه داده است. در نهایت در بدترین حالت می‌توان انتظار داشت خروجی مدل ترکیبی M3SE برابر یا بهتر از بهترین شبیه‌سازی از بین مدل‌های هیدرولوژی به‌کار رفته باشد.

واژه‌های کلیدی: بسته RRL، روش‌های ترکیبی، شبیه‌سازی بارش- رواناب، قره‌سو

مقدمه

درک و پیش‌بینی فرآیندهای تولید و انتقال رواناب به خروجی حوضه یکی از اساسی‌ترین مباحث در علم هیدرولوژی محسوب می‌گردد (۲۳). روش‌های غیرمستقیم متعددی برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز با پیشرفت در علوم زمین ارائه شده است. یکی از این روش‌ها استفاده از مدل‌های رایانه‌ای است (۲۲). مدل‌های زیادی از اوایل دهه ۱۹۶۰ توسعه داده شده است تا فرآیندهای بارش- رواناب را شبیه‌سازی کنند. مدل‌های هیدرولوژیکی قادر به شبیه‌سازی فرآیندهای سطح زمین به‌منظور بهبود مدیریت منابع آب می‌باشند (٦). در واقع، مدل‌های هیدرولوژیکی نمایش ساده‌شده‌ای از سیستم‌های واقعی‌اند که به مطالعه کارکرد حوضه در واکنش به ورودی‌های گوناگون می‌پردازند و به فهم بهتر فرآیندهای هیدرولوژیکی کمک می‌کنند و امکان شبیه‌سازی فرآیندهای بارش- رواناب حوضه را با حداقل زمان و هزینه فراهم می‌سازند (۱۲، ۱۳، ۲۰، ۲۱ و ۲۵). با توجه تنوع مدل‌های بارش- رواناب در دسترس، انتخاب مدل بارش- رواناب مناسب برای حوضه از نظر بهره‌وری برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب مهم است. از این‌رو انتخاب مدلی که بتواند در عین سادگی ساختار و با استفاده از حداقل اطلاعات ورودی و با کم‌ترین زمان و هزینه ممکن نتایج قابل‌قبولی را در حوضه‌های آبریز بدون ایستگاه ارائه کند، می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در خدمت مدیریت حوضه آبریز باشد (۲۸). از طرفی، امروزه بسیاری از هیدرولوژیست‌ها برای توسعه مدل‌های جدید هیدرولوژی و یا بهبود مدل‌های موجود تلاش می‌کنند.

از آن‌جایی‌که روش‌های ترکیبی مدل‌های بارش- رواناب، به‌طور متوسط بهتر از هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی‌شده بوده و قابل‌اعتمادتر می‌باشد بنابراین در سال‌های اخیر استفاده از این مدل‌ها مورد توجه هیدرولوژیست‌ها قرار گرفته است (۱۱). هر چند در واقع، ایده ترکیب نتایج مدل‌های چندگانه پیش‌بینی به بیش از ۳۰ سال پیش که در اقتصادسنجی و آمار مورد استفاده قرار گرفت، برمی‌گردد (۲، ٤ و ۱۹). کاربرد این روش‌های ترکیبی در منابع آب در مطالعات معدودی بررسی شده است. تامپسون (۱۹۷٦) مفهوم مدل‌های ترکیبی را در پیش‌بینی آب‌وهوا استفاده کرد. نتایج مطالعه ایشان نشان داد که

میانگین مربعات خطای پیش‌بینی‌شده توسط خروجی دو مدل ترکیبی کم‌تر از هر یک از مدل‌های پیش‌بینی می‌باشد (۲۶). مطالعه انجام‌شده توسط کلمن (۱۹۸۹) نشان داد که مفهوم مدل‌های ترکیبی در زمینه‌های مختلفی چون علم مدیریت تا مباحث پیش‌بینی آب‌وهوا قابل‌استفاده می‌باشد (۳). فریدریش و اسمیت (۱۹۸۹) یک روش رگرسیون خطی را برای ترکیب دو روش جهت پیش‌بینی طولانی‌مدت دمای سطح اقیانوس آرام ارائه دادند (۸). کریشنامورتی و همکاران (۱۹۹۹) روش مدل‌های ترکیبی را با استفاده از تعدادی از پیش‌بینی‌ها در شرایط و مدل‌های مختلف هواشناسی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها روش MMSE[1] را با روش ساده متوسط‌گیری (SMA)[2] مقایسه کردند. نتایج این مطالعه و مطالعات دیگر نشان داد که روش‌های ترکیبی نتایج بهتری نسبت به هر یک از روش‌های پیش‌بینی دارند (۱٤، ۱۵، ۱٦، ۱۸ و ۲۷). شمس‌الدین و همکاران (۱۹۹۷) اولین روش مدل ترکیبی را در زمینه بارش- رواناب اجرا کردند. آن‌ها سه روش ترکیب مدل، روش SMA، روش میانگین وزنی (WAM)[3] و روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN) را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها این روش را برای ترکیب نتایج حاصل از پنج مدل بارش- رواناب برای ۱۱ حوضه مورد استفاده قرار دادند. در همه این موارد، شبیه‌سازی مدل‌های ترکیبی بهتر از هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی بود (۲٤).

اعجمی و همکاران (۲۰۰٦) چهار روش ترکیب SMA، WAM، MMSE و M3SE[4] برای پیش‌بینی جریان استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از مدل‌های ترکیبی شبیه‌سازی دقت بالاتری نسبت به هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی‌شده دارد (۱). لیائو و لی (۲۰۱۲) چهار روش ترکیبی را در شبیه‌سازی رواناب رودخانه تیئور در شمال‌شرقی چین به‌کار بردند. نتایج آن‌ها نشان داد که شبیه‌سازی با مدل‌های ترکیبی به‌طورکلی بهتر از هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی‌شده می‌باشد (۱۷). نظر به تعداد بالای مدل‌های هیدرولوژیکی و تخمین‌های متفاوت مدل‌های بارش- رواناب که هر یک دارای قابلیت‌ها و ضعف‌هایی هستند، می‌توان از این روش‌های ترکیبی به‌عنوان ابزارهایی جهت استفاده از مزایای هر مدل استفاده کرد تا دقت تخمین رواناب را با دقت بالاتری انجام دهد. در نهایت پیش‌بینی دقیق‌تر رواناب به برنامه‌ریزی واقع‌بینانه‌تر منابع آب حوضه آبریز منتهی می‌شود. بنابراین، هدف اصلی از این پژوهش، بهبود نتایج شبیه‌سازی دبی جریان و ارزیابی عملکرد روش‌های ترکیبی مختلف در بهبود شبیه‌سازی جریان در زیرحوضه آبریز قره‌سو می‌باشد.

مواد و روش‌ها

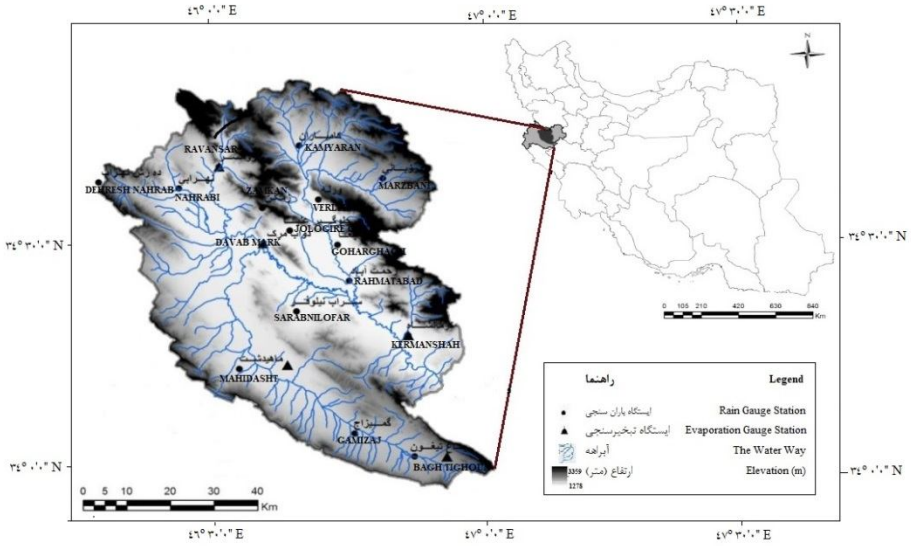
معرفی منطقه مورد مطالعه: حوضه آبریز کرخه به مساحت ۵۰۷٦٤ کیلومترمربع در غرب کشور، در مناطق میانی و جنوب‌غربی رشته‌کوه‌های زاگرس بین طول جغرافیایی ٤٦ درجه و ٦ دقیقه و ٤۹ درجه و ۱۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۵۸ دقیقه و ۳٤ درجه و ۵٦ دقیقه شمالی قرار گرفته است. زیرحوضه قره‌سو در شمال‌غربی حوضه کرخه و در غرب ایران در استان کرمانشاه واقع شده است. این زیرحوضه دارای مساحتی حدود ۵۳۵٤ کیلومترمربع و حداکثر و حداقل ارتفاع آن به‌ترتیب ۳۳٤٦ و ۱۱۸۰ متر می‌باشد. متوسط بارش سالانه این حوضه بسیار متغیر و بین ۳۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر است. سه رودخانه اصلی مرک، قره‌سو و رازآور در این حوضه جریان دارند. شکل ۱ موقعیت حوضه آبریز قره‌سو و ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی را نشان می‌دهد.

1- Multi Model Super Ensemble (MMSE)
2- Simple Model Average
3- Weighted Average Method
4- Modified Multi Model Super Ensemble (M3SE)

داده‌های موردنیاز مدل‌سازی: در این پژوهش، ابتدا داده‌های موردنیاز جهت شبیه‌سازی مدل بارش- رواناب حوضه آبریز قره‌سو شامل بارندگی، تبخیر- تعرق پتانسیل و رواناب مشاهده‌ای موجود در حوضه طی دوره آماری ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۸ به‌صورت روزانه، به‌منظور شبیه‌سازی بارش- رواناب به‌عنوان داده‌های ورودی جمع‌آوری گردید. در این راستا جهت محاسبه تبخیروتعرق پتانسیل روزانه حوضه از روش بلانی کریدل (رابطه ۱) استفاده گردید (۵).

$$ET = a + b[P(0.46T + 8.13)] \qquad (۱)$$

که در آن، T دمای هوا بر حسب درجه سانتی‌گراد و P درصد کل ساعات روز برای دوره مورد استفاده (روزانه یا ماهانه) از درصد کل ساعات سال می‌باشد که در این مطالعه عدد ۰/۲۳ برای آن لحاظ شده است. a و b ضرایب اقلیمی هستند که با توجه به شرایط اقلیمی حوضه به‌ترتیب معادل ۲- و ۱/٤٥ در نظر گرفته شده است (۷). در این پژوهش از دو دوره واسنجی (۱۹۹۷-۲۰۰۵) و صحت‌سنجی (۲۰۰٦-۲۰۰۸) استفاده و پارامترهای مدل بهینه گردید. خصوصیات آماری پارامترهای مورداستفاده در این پژوهش در جدول ۱ آمده است.



شکل ۱- موقعیت زیرحوضه آبریز قره‌سو.

Figure 1. The location of the Gharesou sub-basin.

جدول ۱- خصوصیات آماری متغیرهای مورد استفاده در مقیاس روزانه.

Table 1. Statistical characteristics of the used variable on a daily scale.

انحراف از معیار Standard Deviation	میانگین Average	بیشینه Maximum	کمینه Minimum	متغیر Variable
4.18	1.20	61.67	0.00	بارش (میلی‌متر بر روز) Rainfall (mm/day)
2.34	4.11	8.71	-1.02	تبخیروتعرق پتانسیل (میلی‌متر بر روز) Evapotranspiration potential (mm/day)
26.64	13.39	519.0	0.02	رواناب مشاهده‌ای (مترمکعب بر ثانیه) The observed runoff (m^3/s)

داده‌ها با استفاده از مدل‌های موجود در بسته نرم‌افزاری RRL (Simhyd، AWBM، Sacramento و TANK) (۱۰) و مدل‌های SCS-Milc (۹) و Hymod که در محیط برنامه‌نویسی MATLAB کدنویسی‌شده است، شبیه‌سازی گردید. در نهایت، به‌منظور بهبود نتایج شبیه‌سازی از روش‌های ترکیبی (رابطه‌های ۲ تا ۵) استفاده شد. جدول ۲ نشان‌دهنده مشخصات مدل‌های بارش- رواناب مورداستفاده در این پژوهش می‌باشد.

جدول ۲- مشخصات مدل‌های بارش- رواناب مورد استفاده در این پژوهش.

Table 2. Specifications of rainfall-runoff models used in this research.

مدل Model	تعداد پارامتر Number of parameters	نوع مدل Model type	روش بهینه‌سازی Optimization method
AWBM	8	یکپارچه Lumped	الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)[1] PSO Algorithm
Sacramento	16	یکپارچه Lumped	الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) PSO Algorithm
Simhyd	7	یکپارچه Lumped	الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) PSO Algorithm
TANK	15	یکپارچه Lumped	الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) PSO Algorithm
SCS-Milc	9	یکپارچه Lumped	الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) PSO Algorithm
Hymod	5	یکپارچه Lumped	الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) PSO Algorithm

روش‌های ترکیبی

۱- روش میانگین مدل ساده (SMA): روش SMA یک روش ساده ترکیب مدل‌های مختلف می‌باشد که توسط جورجی‌کاکس و همکاران (۲۰۰٤) مورداستفاده قرار گرفت و به‌وسیله رابطه ۲ بیان می‌شود (۱۱).

$$(Q_{SMA})_t = \bar{Q}_{obs} + \sum_{i=1}^{N} \frac{(Q_{sim})_{i.t} - (\bar{Q}_{sim})_i}{N} \quad (۲)$$

که در آن، $(Q_{SMA})_t$ جریان دبی شبیه‌سازی‌شده ترکیبی از روش SMA و در زمان t، $\bar{Q}_{obs}$ میانگین جریان دبی مشاهداتی، $(Q_{sim})_{i.t}$ جریان دبی مدل شبیه‌سازی‌شده در زمان t و مدل i ام، $(\bar{Q}_{sim})_i$ میانگین جریان دبی مدل‌های شبیه‌سازی‌شده و N تعداد مدل‌های مورد بررسی می‌باشد.

۲- روش میانگین وزنی (WAM): یکی دیگر از روش‌های مدل ترکیبی است که به‌طور خاص برای مدل‌سازی بارش- رواناب توسط شمس‌الدین (۱۹۹۷) توسعه پیدا کرد (۲٤). این روش مبتنی بر میانگین وزنی شبیه‌سازی‌ها می‌باشد. وزن هر کدام از مدل‌های شبیه‌سازی براساس یک بهینه‌سازی خطی تعیین می‌شود. مقدار تابع هدف مربعات خطا و ضرایب باید دارای مقدار مثبت و مجموع آن‌ها واحد شود. رابطه ۳ نشان‌دهنده این روش می‌باشد.

1- Particle Swarm Optimization (PSO)

$$(Q_{WAM})_t = \sum_{i=1}^{N} X_i\,(Q_{sim})_{i.t} \qquad (۳)$$

$$\text{S.t.}\begin{cases} X_i > 0 \\ \sum X_i = 1.\, i = 1 \ldots N \end{cases}$$

که در آن، $(Q_{WAM})_t$ جریان دبی شبیه‌سازی‌شده ترکیبی از روش WAM و در زمان t، $(Q_{sim})_{i.t}$ جریان دبی مدل شبیه‌سازی شده در زمان t و مدل i ام و X_i وزن مدل‌ها (رابطه ٤) می‌باشد.

$$X_i = \frac{[\sum_{t=1}^{T}((Q_{sim})_t - (Q_{obs})_t)^2]^{-1}}{\sum_{i=1}^{N}[\sum_{t=1}^{T}((Q_{sim})_t - (Q_{obs})_t)^2]^{-1}} \qquad (٤)$$

که در آن، وزن مدل‌ها مثبت و مجموعشان واحد است. در این روش به‌منظور تعیین ضرایب از دستور lsqlin در محیط برنامه‌نویسی MATLAB استفاده شد.

۳- روش ترکیبی چند مدل یکپارچه (MMSE): این روش توسط کریشنامورتی و همکاران (۱۹۹۹) برای پیش‌بینی تغییرات مؤلفه‌های اقلیمی مورداستفاده قرار گرفت (١٤). در این روش مقدار انحراف از مقادیر مشاهداتی براساس مقدار ثابت میانگین مشاهدات و مقدار انحراف از معیار براساس اختلاف مقادیر شبیه‌سازی از میانگین بهبود پیدا می‌کند، که با استفاده از رابطه ۵ بیان می‌شود.

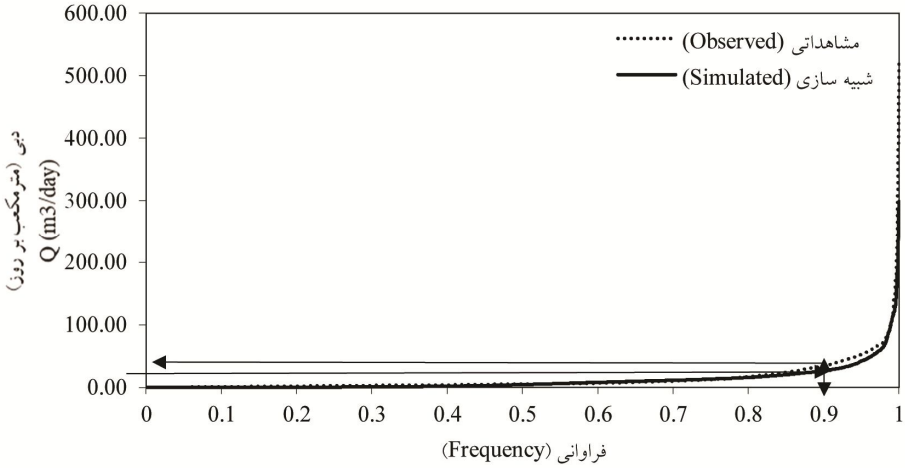
$$(Q_{MMSE})_t = \bar{Q}_{obs} + \sum_{i=1}^{N} X_i[(Q_{sim})_{i.t} - (\bar{Q}_{sim})_i] \quad (۵)$$

$$X_i.\, i = 1.2. \ldots . N$$

که در آن، $(Q_{MMSE})_t$ جریان دبی شبیه‌سازی‌شده ترکیبی از روش $MMSE$ و در زمان t می‌باشد. در این روش مقدار وزن هر کدام از مدل‌های شبیه‌سازی متفاوت از روش WAM بوده بر اساس یک رابطه رگرسیونی چندگانه خطی به‌دست می‌آید. در این رابطه رگرسیونی مقادیر دبی مشاهداتی به‌عنوان متغیر وابسته و مقادیر شبیه‌سازی‌شده توسط مدل‌های شبیه‌سازی به‌عنوان متغیر مستقل فرض می‌شود. مقادیر وزن‌ها در این روش‌ها می‌توانند دارای هر مقدار صحیحی باشند و الزامی برای مجموع واحد آن‌ها وجود ندارد. در این پژوهش از دستور regress در محیط برنامه‌نویسی MATLAB جهت تعیین این وزن‌ها استفاده شد.

٤- روش ترکیبی چند مدل یکپارچه تغییریافته (M3SE): این روش مشابه روش MMSE می‌باشد با این تفاوت که پیش از کاربرد رابطه ۵ باید یک اصلاح فراوانی انجام شود. نکته اساسی این روش بهبود شبیه‌سازی‌ها از طریق نگاشت فراوانی می‌باشد. چگونگی اعمال این اصلاحیه در هر کدام از شبیه‌سازی بدین شکل می‌باشد که ابتدا فراوانی مقادیر دبی شبیه‌سازی‌شده در هر کدام از مدل‌های بارش-رواناب در کنار مقادیر دبی مشاهداتی در نظر گرفته می‌شود. در ادامه مقادیر هم احتمال باید دارای مقدار یکسان باشند. به‌عنوان مثال مقدار دبی در اولین گام زمانی یکی از مدل‌های شبیه‌سازی دارای یک مقدار فراوانی تجمعی می‌باشد. مقدار متناظر این فراوانی دارای یک مقدار دبی خواهد بود که باید جایگزین دبی در اولین گام زمانی مدل شبیه‌سازی موردنظر شود. این کار برای تمام مدل‌ها و برای تک‌تک گام‌های زمانی اعمال خواهد شد. چگونگی اعمال این اصلاحیه در شکل ۲ ارائه شده است، که تغییرات فراوانی را نسبت به دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده نشان می‌دهد. به این صورت که بعد از محاسبه متوسط مقادیر شبیه‌سازی‌شده از مجموع مدل‌ها، مقادیر مشاهداتی اصلاح‌شده به‌دست می‌آید. به‌طور مثال در شکل ۲ مقدار جریان شبیه‌سازی‌شده برابر با ۳۰ m^3/s دارای فراوانی وقوع ۰/۹ می‌باشد.

بااین‌حال، فراوانی ۰/۹ در منحنی مقادیر مشاهداتی دارای مقادیر مشاهداتی ٤٠ m^3/s می‌باشد. بنابراین می‌توان مقدار دبی ۳۰ m^3/s در منحنی شبیه‌سازی‌شده با مقدار دبی ٤٠ m^3/s در منحنی مشاهداتی جایگزین می‌گردد.



شکل ۲- منحنی فراوانی مورد استفاده در تصحیح خطای روش M3SE.

Figure 2. Frequency curve used to correct the error of M3SE method.

در نهایت، بعد از به‌دست آوردن سری‌های منتج شده از روش‌های ترکیبی به‌منظور ارزیابی دقت این روش‌ها، عملکرد آن‌ها با استفاده از شاخص‌های ارزیابی ضریب نش- ساتکلیف (NS)[1] و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE)[2] بررسی شد (رابطه‌های ٦ و ۷).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{sim.i} - Q_{obs.i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs.i} - \bar{Q}_{obs.i})^2} \qquad (٦)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{Q}_{obs.i}} \qquad (۷)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Q_{sim.i} - Q_{obs.i})^2} \qquad (۸)$$

که در آن‌ها، $Q_{sim.i}$ جریان دبی مدل شبیه‌سازی‌شده، $Q_{obs.i}$ جریان دبی مشاهده‌شده، $\bar{Q}_{sim.i}$ میانگین جریان دبی شبیه‌سازی‌شده، $\bar{Q}_{obs.i}$ میانگین جریان دبی مشاهداتی، i گام‌های زمانی و n تعداد کل گام‌های زمانی استفاده شده می‌باشد.

نتایج و بحث

به‌منظور شبیه‌سازی جریان در حوضه قره‌سو، ابتدا دوره ۲۰۰۵-۱۹۹۷ برای واسنجی مدل و سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۰٦ برای اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد. جدول ۳ نتایج هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی جریان در این حوضه را نشان می‌دهد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود با توجه به شاخص‌های ارزیابی NRMSE و NS تمامی مدل‌های شبیه‌سازی‌شده نتایج قابل‌قبولی را ارائه می‌دهند.

1- Nash- Sutcliffe
2- Normal Root Mean Square Error

جدول ۳- معیارهای آماری دقت مدل‌های مختلف شبیه‌سازی جریان روزانه طی دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی.

Table 3. Statistical criteria for evaluating the accuracy of various models in simulating daily flow during calibration and verification periods.

مدل Model	واسنجی Calibration		صحت‌سنجی Validation	
	ریشه میانگین مربعات خطای نرمال NRMSE	نش- ساتکلیف NS	ریشه میانگین مربعات خطای نرمال NRMSE	نش- ساتکلیف NS
AWBM	1.18	0.69	0.92	0.61
Sacramento	1.21	0.64	0.99	0.69
Simhyd	1.32	0.63	0.76	0.72
TANK	1.21	0.69	0.84	0.60
SCS-Milc	1.27	0.65	0.68	0.56
Hymod	1.14	0.72	0.76	0.72

بعد از به‌دست آوردن مقادیر دبی شبیه‌سازی‌شده از هر یک از مدل‌های مختلف شبیه‌سازی‌شده، با استفاده از چهار روش ترکیبی SMA، WAM، MMSE و M3SE شبیه‌سازی دبی، اصلاح و نتایج برای دو قسمت واسنجی و صحت‌سنجی ارائه گردید. در جدول ٤ وزن هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی در روش‌های مختلف ترکیبی ارائه شده است. در دو روش ترکیبی MMSE و M3SE مدل ورودی Hymod با عملکرد بالاتر دارای وزن بیش‌تری می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که این وزن‌ها براساس عملکرد مدل‌های ورودی تخمین زده می‌شوند. حال آن‌که این امکان نیز وجود دارد که علی‌رغم دقت مناسب خروجی روش‌های ترکیبی، وزن‌های بدست آمده ارتباط مشخصی با عملکرد ورودی نداشته باشند. این‌امر به‌دلیل برازش رگرسیون چندگانه خطی روی متغیرهای با همبستگی بالا ایجاد می‌شود، که شیوه محاسبه وزن‌ها در اکثر روش‌های ترکیبی بر پایه رگرسیون خطی چندگانه می‌باشد.

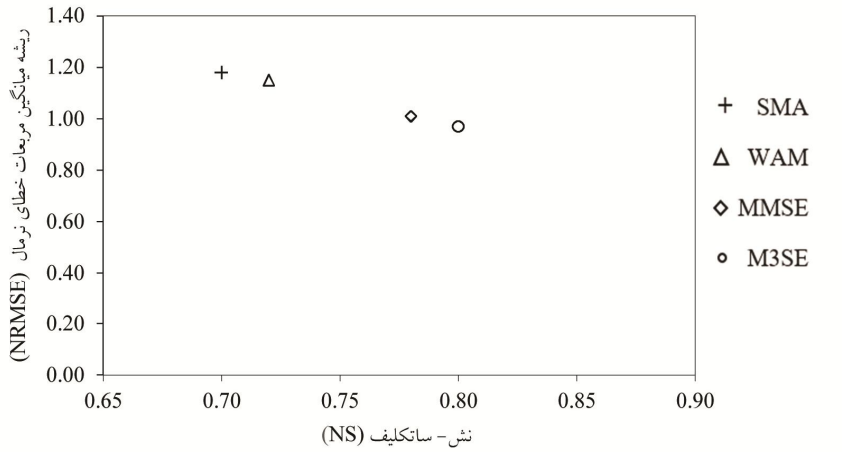
جدول ٤- وزن هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی در روش‌های مختلف ترکیبی.

Table 4. The weight of each simulation model in different combination methods.

روش‌های ترکیبی Combination methods	وزن مدل‌های شبیه‌سازی The weight of simulation models					
	AWBM	Sacramento	SimHyd	TANK	SCS-Milc	Hymod
WAM	8.54×10^{-26}	0.46	8.03×10^{-28}	0.15	0.39	1.54×10^{-27}
MMSE	-2.26×10^{7}	-2.26×10^{7}	-4.53×10^{7}	-1.13×10^{7}	-1.13×10^{7}	1.13×10^{8}
M3SE	-0.61	0.31	-0.21	0.16	0.50	0.77

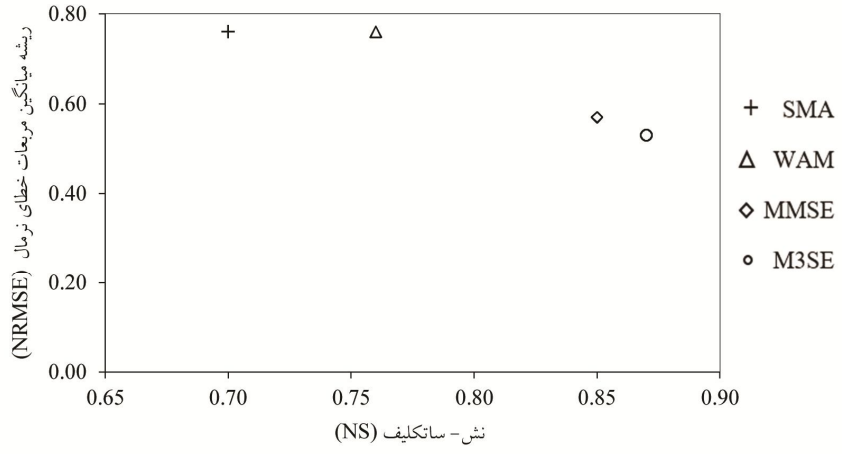
شکل ۳ پراکندگی مقادیر NRMSE در مقابل مقادیر NS هر یک از چهار روش ترکیبی را نشان می‌دهد، که در آن (الف) و (ب) به ترتیب نشان‌دهنده نتایج دوره واسنجی و صحت‌سنجی می‌باشد. دقیق‌ترین روش‌ها در گوشه پایین و سمت راست نمودار واقع شده‌اند. بنابراین می‌توان گفت که دقت دو روش

ترکیبی MMSE و M3SE در مقایسه با دو روش دیگر بهتر می‌باشد. از این حیث نتایج مطالعه پیش‌رو با نتایج اعجمی و همکاران (۲۰۰۶) کاملاً همسان می‌باشد(۱). در پژوهش ایشان نیز به ترکیب اصلاح فراوانی در کنار اصلاح واریانس داده‌ها (روش M3SE) در مقایسه با سایر روش‌های ترکیبی دارای نتایج بهتری می‌باشد. هر چند آن‌ها نیز در مطالعه خود به عملکرد بهتر روش MMSE نسبت به روش‌های SMA و WAM اشاره نمودند. با توجه به گستردگی بیش‌تر روش MMSE نسبت به M3SE، پژوهش‌های زیادی بر عملکرد بهتر این روش در میزان بهبود نتایج اشاره نمودند. کریشنامورتی و همکاران (۱۹۹۹)، مایرز و همکاران (۲۰۰۱)، یان و همکاران (۲۰۰۳) از جمله پژوهش‌هایی می‌باشند که بر عملکرد بهتر روش MMSE نسبت به سایر روش‌های ترکیبی اشاره نموده‌اند (۱٤، ۱۸ و ۲۷).



(الف- دوره واسنجی)

(A- Calibration period)



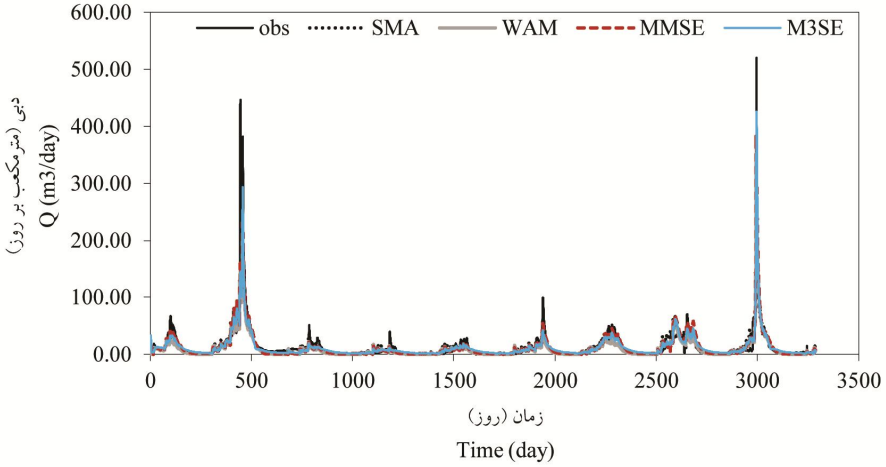
(ب- دوره صحت‌سنجی)

(B- Verification period)

شکل ۳- پراکندگی مقادیر NRMSE در مقابل مقادیر NS هر یک از روش‌های ترکیبی.

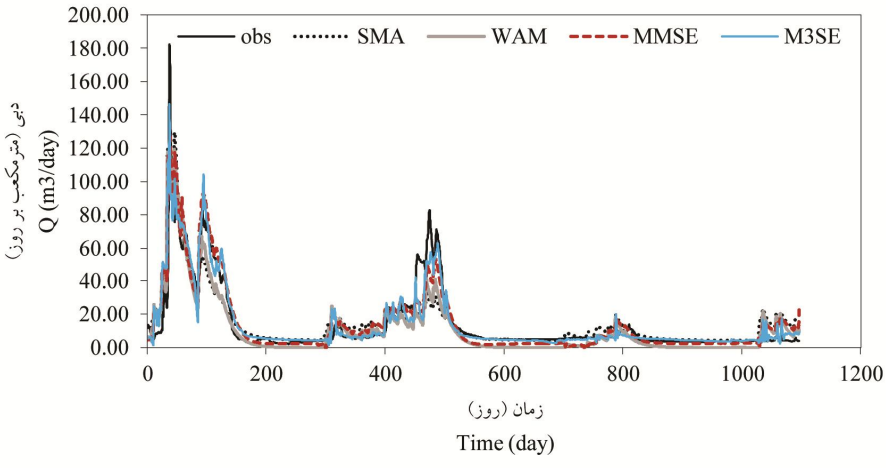
Figure 3. Dispersion of NRMSE values versus NS values of each combination methods.

هم‌چنین مقایسه رفتار بین رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده با هر یک از روش‌های ترکیبی در شکل ٤ نشان داده شده است، که در آن (الف) و (ب) به‌ترتیب نشان‌دهنده نتایج دوره واسنجی و صحت‌سنجی می‌باشد. نتایج بیانگر این است که دو روش MMSE و M3SE بهتر از دو روش دیگر ترکیبی توانسته‌اند روند جریان را با واقعیت شبیه‌سازی نمایند. تکنیک خاصی که در روش M3SE جهت حذف خطا وجود دارد، نشان‌دهنده این واقعیت است که باعث تولید مقادیر منفی جریان در برخی از نقاط هیدروگراف نمی‌شود. در صورتی‌که در روش MMSE ممکن است در طول دوره‌هایی با جریان کم در برخی نقاط مقادیر منفی جریان تولید گردد.



(الف- دوره واسنجی)

(A- Calibration period)



(ب- دوره صحت‌سنجی)

(B- Verification period)

شکل ٤- شبیه‌سازی جریان با استفاده از روش‌های ترکیبی برای دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی

Figure 4. The simulated flow using combination methods for two calibration and calibration periods.

نتیجه‌گیری کلی

امروزه با توجه به افزایش رواناب در سطح حوضه‌ها و پیامدهای حاصل از آن‌ها، نیاز به مدل‌های هیدرولوژیکی جهت کنترل این جریان‌ها افزایش‌یافته است. از طرفی با توجه به دامنه وسیع مدل‌های هیدرولوژیکی موجود، بررسی کارایی مدل‌ها برای اهداف مختلف مدیریتی ضروری است. مدل‌هایی که در عین ساختار و با حداقل ورودی، نتایج قابل‌قبولی ارائه دهند، می‌توانند به‌عنوان ابزاری کارآمد در خدمت مدیریت حوضه آبریز باشند. از این‌رو هدف از این پژوهش، ارزیابی عملکرد چهار روش ترکیبی چندگانه برای تجزیه‌وتحلیل شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی حوضه آبریز قره‌سو کرمانشاه می‌باشد. بدین‌منظور از مدل‌های موجود در بسته نرم‌افزاری RRL چون Simhyd، AWBM، Sacramento و TANK و مدل‌های SCS-Milc و Hymod کدنویسی‌شده در زبان برنامه‌نویسی MATLAB استفاده گردید. در نهایت، به‌منظور بهبود نتایج شبیه‌سازی از چهار روش ترکیبی SMA، WAM، MMSE و M3SE استفاده شد.

در تمامی مدل‌ها، شبیه‌سازی به‌صورت خودکار و در دوره زمانی واسنجی نه‌ساله (۲۰۰۵-۱۹۹۷) و صحت‌سنجی سه‌ساله (۲۰۰۸-۲۰۰۶) صورت گرفت. ارزیابی دقت مدل‌ها با شاخص‌های آماری ضریب نش- ساتکلیف (NS) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE) نشان از موفقیت‌آمیز بودن مدل‌ها در شبیه‌سازی رواناب روزانه می‌باشد. با توجه به نتایج می‌توان دریافت که همه روش‌های ترکیبی دارای بهبود در نتایج هر یک از مدل‌های شبیه‌سازی‌شده می‌باشند. ولی دو روش MMSE و M3SE بهبود بیش‌تری نسبت به دو روش دیگر می‌باشند. روش‌های MMSE و M3SE که مرحله تصحیح خطا را شامل می‌شوند به‌نحو قابل‌ملاحظه‌ای بهتر از روش‌های دیگر شبیه‌سازی را انجام می‌دهند که شامل این مرحله نمی‌باشند. پس به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت که خروجی دو روش ترکیبی اخیر، در بدترین حالت معادل با دقت بهترین مدل شبیه‌سازی می‌باشند.

سپاسگزاری

این پژوهش در قالب طرح پژوهشی به شماره ابلاغیه ۱۲۰٤/د/۱۳۹۷ مورخ ۱۳۹۷/۰۱/۲۹ و با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه بیرجند انجام شده است که بدین‌وسیله سپاسگزاری می‌شود.

منابع

1. Ajami, N.K., Duan, Q., Gan, X., and Sorooshian, S. 2006. Multimodel combination techniques for analysis of hydrological simulations: application to distributed model intercomparison project results. J. Hydrometeorol. 7: 4. 755-768.
2. Bates, J.M., and Granger, C.W.J. 1969. The combination of forecasts. J. Oper. Res. Soc. 20: 4. 451-468.
3. Clemen, R.T. 1989. Combining forecasts: A review and annotated bibliography. Inter. J. Forecast. 5: 4. 559-583.
4. Dickinson, J.P. 1973. Some statistical results in the combination of forecast. J. Oper. Res. Soc. 24: 2. 253-260.
5. Dinpashoh, Y. 2006. Study of reference crop evapotranspiration in I.R. of Iran. J. Agric. Water Manage. 84: 1-2. 123-129.
6. Dovonec, E. 2000. A physically base distributed hydrologic model, M.Sc. Thesis, the Pennsylvania State University.
7. Farahmand Rad, M. 2016. Multi-objective calibration of conceptual hydrological model based on geomorphological instantaneous unit hydrograph (GIUH) using AMALGAM algorithm, M.Sc. Thesis, Graduate University of Advanced Technology. 116p. (In Persian)

8.Fraedrich, K., and Smith, N.R. 1989. Combining predictive schemes in long-range forecasting. J. Clim. 2: 3. 291-294.
9.Geetha, K., Mishra, S.K., Eldho, T.I., Rastogi, A.K., and Pandey, R.P. 2008. SCS-CN-based continuous simulation model for hydrologic forecasting. Water Resources Management, 22: 2. 165-190.
10.Geoff, P. 2004. CRC for Catchment Hydrology, Australia, 100p.
11.Georgakakos, K.P., Seo, D.J., Gupta, H., Schake, J., and Butts, M.B. 2004. Characterizing streamflow simulation uncertainty through multi model ensembles. J. Hydrol. 298: 1-4. 222-241.
12.Ghorbani, K., and Salarijazi, M. 2016. Estimation of monthly discharge using climatological and physiographic parameters of ungauged basin. J. Water Soil Cons. 23: 3. 207-224. (In Persian)
13.Jabbari, A., Bahmanesh, J., and Hessari, B. 2017. Modelling the daily runoff of Nazloo Chai watershed at the west side of Urmia Lake. J. Water Soil Cons. 23: 6. 123-141. (In Persian)
14.Krishnamurti, T.N., Kishtawal, C.M., LaRow, T., Bachiochi, D., Zhang, Z., Williford, C.E., Gadgil, S., and Surendran, S. 1999. Improved skill of weather and seasonal climate forecasts from multimodel superensemble. J. Sci. 285: 5433. 1548-1550.
15.Krishnamurti, T.N., Kishtawal, C.M., Shin, D.W., and Williford, C.E. 2000a. Improving tropical precipitation forecasts from a multi-analysis superensemble. J. Clim. 13: 23. 4217-4227.
16.Krishnamurti, T.N., Kishtawal, C.M., Zhang, Z., LaRow, T., Bachiochi, D., and Willi Ford, C.E. 2000b. Multimodel ensemble forecasts for weather and seasonal climate. J. Clim. 13: 23. 4196-4216.
17.Liao, W., and Lei, X. 2012. Multi-model Combination Techniques for Flood Forecasting from the Distributed Hydrological Model EasyDHM. Computational Intelligence and Intelligent Systems, 316: 1. 396-402.
18.Mayers, M., Krishnamurti, T.N., Depradine, C., and Moseley, L. 2001. Numerical weather prediction over the eastern Caribbean using Florida State University (FSU) global and regional spectral models and multi-model/multi-analysis superensemble. J. Meteorol. Atm. Physic. 78: 1-2. 75-88.
19.Newbold, P., and Granger, C.W.J. 1974. Experience with forecasting univariate time series and the combination of forecasts. J. Royal Stat. Soc. 137: 2. 131-146.
20.Pourreza Bilondi, M., Akhoond Ali, A.M., Ghahraman, B., and Telvari, A. 2015. Uncertainty Analysis a single event distributed rainfall-runoff model with using two different Markov Chain Monte Carlo methods. J. Water Soil Cons. 21: 5. 1-26. (In Persian)
21.Pourreza Bilondi, M., Khashei Siuki, A., and Sadeghi Tabas, S. 2015. Daily rainfall-runoff modeling with Least Square Support Vector Machine (LS-SVM). J. Water Soil Cons. 21: 6. 293-304. (In Persian)
22.Rouhani, H., and Farahi Moghadam, M. 2014. Application of the genetic algorithm technique for optimization of the Hydrologic TANK and SIMHHYD Models' Parameters. J. Range Water. Manage. 66: 4. 521-533. (In Persian)
23.Salmani, H. 2011. Optimization of Effective Parameters in Precipitation-Runoff in Semi Distributed Model SWAT (Case study of Gozoghli Sub-Basin, Gorgan River Basin, Gorgan Province). Master's Thesis. Department of natural resources. University of Tehran. 158p. (In Persian)
24.Shamseldin, A.Y., O'Connor, K.M., and Liang, G.C. 1997. Methods for combining the outputs of different rainfall-runoff models. J. Hydrol. 197: 1-4. 203-229.
25.Spruill, C.A., Workman, S.R., and Taraba, J.L. 2000.Simulation of daily and monthly stream discharge from small watershed using the SWAT model. J. Soil Water Div. ASAE. 43: 6. 1431-1440.

26. Thompson, P.D. 1976. How to improve accuracy by combining independent forecasts. J. Month. Weather Rev. 105: 2. 228-229.
27. Yun, W.T., Stefanova, L., and Krishnamurti, T.N. 2003. Improvement of the multimodel superensemble technique for seasonal forecasts. J. Clim. 16: 22. 3834-3840.
28. Zarrin, H., Moghadamnia, A.R., Namdorost, J., and Mosaedi, A. 2013. Simulation of outflow runoff in watersheds without statistics using rainfall- runoff AWBM model (Case study: Sistan and Baluchestan province). J. Water Soil Cons. 20: 2. 195-208. (In Persian)

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 26(3), 2019
http://jwsc.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/jwsc.2019.15457.3069

Multimodel combination techniques for analysis of Hydrological simulations (Case study: Gharesou sub-basin, Kermanshah province)

***M. Pourreza-Bilondi[1], H. Memarian Khalilabad[2], A. Shahidi[1] and S. Rahnama[3]**

[1]Associate Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran, [2]Associate Prof., Dept. of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environmental, University of Birjand, Birjand, Iran, [3]Ph.D. Student of Water Resources, Dept. of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

Received: 08.04.2018; Accepted: 03.06.2019

Abstract

Background and Objectives: The hydrological simulation models represent a simplified representation of the real hydrologic system that helps to study the functioning of the basin in response to various inputs and better understanding of hydrological processes. These methods are able to estimate the runoff values of ungauged catchments with the lowest possible time and costs using the simulation of rainfall-runoff process. Despite high efficiency, these models have uncertainty. One of the most important issues among researchers is the elimination of these uncertainties. The application of the combination technique is one of the most important approaches to improve results of simulations. In this study, four models including the simple combination models (SMA), Weighted Average Method (WAM), Multi Model Super Ensemble (MMSE) and Modified Multi Model Super Ensemble (M3SE) were used analyze the hydrological simulations, in the Gharesou catchment, located in Kermanshah province.

Materials and Methods: The Gharesou catchment, with nearly 5354 km^2 area, is located in the northwestern parts of Karkheh basin and the western parts of Iran. In this study, the baseline daily data including observed temperature, rainfall and runoff during the period of 1997-2008 were gathered from selected stations in the study area. 70 percent of the data was used for the calibration period (1997-2005) and the remaining 30 percent for validation (2006-2008). To this end, the models in the RRL package such as Simhyd, AWBM, Sacramento and TANK and the SCS-Milc and Hymod models, which are coded in the Matlab programming language, were used. Then, four combination methods including SMA, WAM, MMSE and M3SE were used to improve the results. Finally, the performance of each method was evaluated using normalized root mean square error (NRMSE) and Nash-Sutcliff (NS).

Results: In the present study, all simulated models provide acceptable results. The results of the combination methods showed that the application of these methods led to improve the simulation results. Also, the most improvement of results was achieved by M3SE and MMSE, respectively. For the M3SE method, the value of the NS and NRMSE evaluation criteria were 0.80 and 0.97 in the calibration period and 0.87 and 0.53 in the validation period, respectively.

Conclusion: As resultant it can be expressed that Multiple Combination techniques improved the results of simulated flow by each simulation model obviously. It also may be resulted that recent technique (M3SE) is more efficient than other due to incorporating the bias correction step. Finally it is observed that multimodel simulation generated by M3SE can be better at least comparable to the best-calibrated single-model simulations.

Keywords: Combination techniques, Gharesou, Rainfall-runoff simulation, RRL package

* Corresponding Author; Email: mohsen.pourreza@birjand.ac.ir