

## بررسی کارایی توابع هدف مبتنی بر منحنی تداوم جریان و معیارهای ارزیابی آماری در واسنجی مدل‌های هیدرولوژیک

ابوالحسن فتح‌آبادی<sup>۱\*</sup> و وحید آنامرادی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، <sup>۲</sup> فارغ‌التحصیل کارشناسی مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۶

### چکیده

در مدل‌های هیدرولوژیک به‌منظور مدل‌سازی بهتر فرایند بارش رواناب نیاز است تا مدل با استفاده از داده‌های مشاهداتی واسنجی شود. در فرایند واسنجی مدل‌های هیدرولوژیک، علاوه بر کیفیت داده‌های مشاهدات و الگوریتم بهینه‌سازی تابع هدف نیز بر کارایی مدل موثر است. در اغلب پژوهش‌ها، معیارهای آماری مثل NSE و RMSE به‌عنوان تابع هدف در فرایند واسنجی مدل‌های هیدرولوژیک استفاده می‌شوند. با توجه به ساختار مدل و روابط مورد استفاده در هر یک از معیارهای ارزیابی، هر یک از آن‌ها در شبیه‌سازی بخشی از هیدروگراف کارایی مناسبی دارند. یکی از پارامترهای مهم هر حوضه که به نوعی نشان‌دهنده عکس‌العمل حوضه برای مقادیر دبی مختلف می‌باشد، منحنی تداوم جریان است. در این پژوهش، اقدام به بررسی و مقایسه کارایی توابع هدف مبتنی بر منحنی تداوم جریان و توابع هدف آماری در بهینه‌سازی پارامترهای مدل هیدرولوژیک HBV در حوضه زیارت استان گلستان شد. پس از وارد کردن داده‌های ورودی به مدل، با استفاده از الگوریتم DDS مدل برای هر تابع هدف به تعداد ۱۰۰ مرتبه بهینه شد. پس از بهینه‌سازی پارامترهای مدل، این پارامترها به مدل معرفی و مقادیر دبی برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی برآورد شد. نتایج نشان داد، معیارهایی مانند NSE و KGE در برآورد داده‌های پیک، معیارهایی از قبیل RMSE و MAE در برآورد داده‌های متوسط و معیارهای مبتنی بر منحنی تداوم جریان در برآورد دبی‌های کمینه عملکرد بهتری داشته‌اند. در شبیه‌سازی بخش‌های مختلف هیدروگراف دبی روزه روش مبتنی بر منحنی تداوم جریان بهترین عملکرد را داشت، معیارهای RMSE و MAE در رتبه بعدی قرار داشته و معیارهای NSE و KGE عملکرد مناسبی نداشتند.

**واژه‌های کلیدی:** اعتبارسنجی، بهینه‌سازی، دبی‌های کمینه، دبی‌های بیشینه، مدل HBV

### مقدمه

(۲۰۱۱). تمام مدل‌های هیدرولوژیک دارای پارامترهایی ثابت هستند که نمی‌توان به‌صورت مستقیم آن‌ها را اندازه‌گیری کرد و باید با استفاده از روش‌های مناسب بهینه شوند. فرایند یافتن پارامترهای مدل با توجه به داده‌های مشاهداتی واسنجی نامیده می‌شود (Tolson و Shoemaker

به‌منظور فهم فرایندهای هیدرولوژیک و مدیریت منابع آب، مدل‌های هیدرولوژیک استفاده گسترده‌ای در سطح جهان پیدا کرده‌اند. میزان اطمینان به مدل هیدرولوژیک بستگی به توان آن در شبیه‌سازی مقادیر دبی مشاهداتی دارد (Westerberg و همکاران،

(۲۰۰۸) شاخص ناش حجمی را ارائه دادند. یکی دیگر از نقص‌های این شاخص استفاده از مقادیر میانگین داده‌های مشاهداتی است که منجر به بیش برآوردی برای متغیرهای فصلی مثل رواناب در حوضه‌های برفی می‌شود (Gupta و همکاران، ۲۰۰۹). به‌طور مشابه، معیار RMSE بر روی داده‌های پیک سیلابی تاکید بیشتری داشته، عملکرد مناسبی در واسنجی داده‌های کمینه ندارد (Madsen، ۲۰۰۰؛ Bekele و Nicklo، ۲۰۰۷). در نتیجه، برای دوره‌های با دبی کمینه، مدل تمایل به بیش برآوردی دارد. به‌علاوه، عملکرد خوب مدل در دوره‌های با داده‌های پیک بر روی عملکرد کلی مدل تاثیر گذاشته، به نوعی اثر عملکرد بد مدل در دوره‌های کم را می‌پوشاند (Zhang و همکاران، ۲۰۱۱). در پژوهش Vis و همکاران (۲۰۱۵) از شاخص‌های ناش، ناش لگاریتمی، Lindstrom، MARE، Spearman، Volume Error و ترکیبی از آن‌ها به‌عنوان تابع هدف در بهینه‌سازی پارامترهای مدل HBV استفاده کردند. نتایج نشان داد، تمام رویکردهای مورد استفاده تمایل به بیش برآوردی داده‌های دبی کمینه و کم‌برآوردی داده‌های دبی متوسط و بیشینه داشته‌اند.

در یک حوضه، قسمت‌های مختلف هیدروگراف منعکس کننده فرایندها و پاسخ‌های متفاوت حوضه (مثل منحنی خشکیدگی جریان در طول دوره‌های خشک) تحت شرایط مختلف هستند و با تحلیل دقیق هیدروگراف و انتخاب مناسب پارامترها فرایندهای مختلف حوضه قابل مدل‌سازی هستند (Carrillo و همکاران، ۲۰۱۱). به‌منظور ارزیابی بخش‌های مختلف هیدروگراف، van Werkhoven و همکاران (۲۰۰۹) و Zhang و همکاران (۲۰۱۲) معیارهای آماری و هیدرولوژیکی را در فرایند واسنجی وارد کردند. آن‌ها شاخص‌های آماری را برای جریان پایه و پیک و شاخص‌های هیدرولوژیکی را برای جریان‌های میانی و بیلان آبی بلندمدت استفاده کردند. خصوصیت مهم حوضه که به نوعی نشان‌دهنده پاسخ دینامیکی حوضه است و فرایندهای مختلف حوضه در شکل آن انعکاس پیدا کرده است، منحنی تداوم جریان (FDC) می‌باشد. در واقع منحنی تداوم جریان شاخصی از توان حوضه در تولید دبی‌ها با بزرگی‌های مختلف است و وابسته به

(۲۰۰۷). روش‌های واسنجی به دو دسته خودکار و واسنجی تقسیم می‌شوند. در روش‌های بهینه‌سازی خودکار یک الگوریتم جستجو در فضای پارامترهای به‌صورت سیستماتیک به جستجو پرداخته و مقادیری از پارامترها که به ازای آن‌ها اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی کمینه می‌شود را پیدا می‌کند (Madsen، ۲۰۰۳). Gupta و همکاران (۱۹۹۸) و Singh و Woolhiser (۲۰۰۲) بیان کردند که در بهینه‌سازی خودکار سه مسئله مهم که بر کارایی آن موثر است، شامل: (۱) داده‌های واسنجی، (۲) تعریف تابع هدف که نشان‌دهنده تفاوت بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است و (۳) الگوریتم بهینه‌سازی، هستند.

در میان شاخص‌های مختلف میانگین مربعات خطا و ضریب ناش-ساتکلیف (Nash و Sutcliffe، ۱۹۷۰) بیشترین استفاده را به‌عنوان تابع هدف، در بین هیدرولوژیست‌ها داشته‌اند (Gupta و همکاران، ۲۰۰۹). مقدار شاخص ناش-ساتکلیف بین منفی بی‌نهایت تا یک است. هر قدر مقدار این شاخص به یک نزدیک‌تر باشد، نشان از عملکرد بهتر مدل دارد. اگر چه محاسبه این شاخص‌ها ساده بوده، عمومیت زیادی در بین هیدرولوژیست‌ها دارد، اما بسیاری از محققین این شاخص را مورد نقد قرار داده‌اند (Krause و همکاران، ۲۰۰۵؛ Gupta و Schaeffli، ۲۰۰۷؛ Smith و همکاران، ۲۰۰۸؛ Gupta و Kling، ۲۰۱۱). Gupta و همکاران (۲۰۰۹) شاخص ناش-ساتکلیف را به بخش‌های مختلف (تغییرات نسبی، اریبی و همبستگی خطی) تجزیه کردند و نتیجه گرفتند که با بیشینه مقدار ناش-ساتکلیف میزان تغییرات کم برآورد شده، مقادیر دبی پیک کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌شوند و در نهایت شاخص Kling Gupta Efficiency (KGE) را برای جلوگیری از اثرات متقابل آن اجزا ارائه دادند (این اثرات متقابل باعث می‌شود تا مقدار تغییرات کم برآورد شوند). همچنین، این اصلاح باعث از بین رفتن اثرات ناشی از تقسیم متوسط جریان بر انحراف معیار که باعث سخت شدن مقایسه این شاخص در حوضه‌های مختلف می‌شود، شد. در پژوهش Mathevet و همکاران (۲۰۰۶) یک نسخه حدی این شاخص ارائه شد و Criss و Winston

بیشتری برخوردار هستند. یکی از مهمترین مراحل مدل‌سازی که بر کارایی مدل تاثیر زیادی دارد، فرایند واسنجی است. در فرایند واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی، چنانچه تابع هدف مناسبی انتخاب نشود، عملکرد مدل مناسب نبوده و نمی‌توان به نتایج آن اطمینان کرد. Shafii و Tolson (۲۰۱۵) بیان کردند که عملکرد مدل حساسیت بیشتری به تابع هدف در مقایسه با الگوریتم بهینه‌سازی دارد. با توجه به معایب توابع هدف معمول مثل ناش و غیره، در این پژوهش اقدام به بررسی کارایی شاخص‌های مبتنی بر منحنی تداوم جریان در بهینه‌سازی پارامترهای مدل HBV در حوضه زیارت گرگان شد.

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** در این پژوهش، اقدام به اجرای مدل HBV در حوضه زیارت گرگان در استان گلستان در محل ایستگاه نهارخوران شد. این حوضه با مساحت ۷۷/۹ کیلومتر مربع در جنوب شهر گرگان در موقعیت  $51^{\circ} 23' 54''$  تا  $54^{\circ} 11' 31''$  طول شرقی و  $36^{\circ} 36' 36''$  تا  $36^{\circ} 43' 59''$  عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱). این حوضه دارای میانگین متوسط بارش برابر با  $531/25$  میلی‌متر در سال و میانگین درجه حرارت برابر با  $13/7$  درجه سانتی‌گراد است (Nosrati و Jalali, ۲۰۱۷). جهت رودخانه اصلی از جنوب به شمال است و مرتفع‌ترین نقاط حوضه در قسمت‌های جنوبی (بیشینه ارتفاع  $3027$ ) قرار گرفته‌اند. بیشتر سطح حوضه مورد مطالعه دارای پوشش جنگلی است. در این پژوهش، از داده‌های هیدرومتری و هواشناسی روزانه ایستگاه‌های نهارخوران و زیارت استفاده شد. چهار سال داده‌های مربوط به سال‌های آبی  $1381-1380$  تا  $1384-1383$  برای آموزش و سه سال داده‌های مربوط به سال‌های آبی  $1385-1384$  تا  $1387-1386$  به‌عنوان اعتبارسنجی استفاده شد.

### روش پژوهش

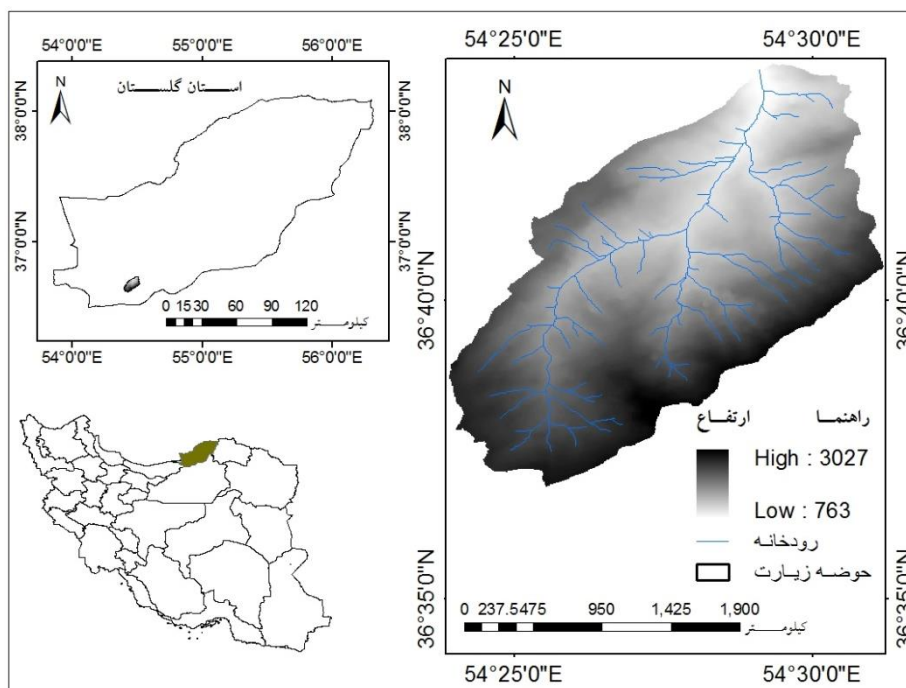
**مدل Hydrologiska Byrans Vattenavdelning:** مدل HBV یک مدل بارش-رواناب یکپارچه مفهومی برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژی حوزه آبخیز است که به‌وسیله موسسه مطالعات هیدرولوژی و

توزیع عمودی رطوبت خاک در داخل حوضه و بخش‌های مختلف رواناب در داخل حوضه است (Yilmaz و همکاران، ۲۰۰۸). شیب تند منحنی تداوم جریان، نشان از عکس‌العمل سریع حوضه نسبت به بارش ورودی و شیب کم آن نشان از عکس‌العمل کند حوضه و ذخیره بیشتر حوضه است (Yadav و همکاران، ۲۰۰۷). در پژوهش‌های Yilmaz و همکاران (۲۰۰۸)، Pokhrel و همکاران (۲۰۱۲) و Pfanerstill و همکاران (۲۰۱۴) برای تعیین فرایندهای تغییرات عمودی رطوبت خاک، بیلان کلی آب و غیره از شاخص‌های مبتنی بر منحنی تداوم جریان استفاده کردند. با استفاده از منحنی تداوم جریان به‌عنوان تابع هدف به نوعی واسنجی بر اساس فرایندهای غالب حوضه که در قسمت‌های مختلف هیدروگراف تاثیر دارند صورت می‌گیرد. Westerberg و همکاران (۲۰۱۱) با توجه به معایب معیار ناش-ساتکلیف اقدام به بهینه‌سازی پارامترهای مدل‌های WASMOD و TOPMODEL با استفاده از دو رویکرد مبتنی بر منحنی تداوم جریان کردند. در روش اول، مقادیر دبی مشاهداتی به ۲۰ دسته تقسیم شدند و به ازای این مقادیر دبی، احتمال تجاوز محاسبه و با انتقال این مقادیر احتمال به منحنی تداوم جریان دبی برآوردی، مقادیر دبی معادل به‌دست آمدند. در روش دوم، تقسیم‌بندی دبی به گونه‌ای بود که حجم یکسانی رواناب به ازای مقادیر دبی به‌دست آید.

در اغلب حوزه‌های آبخیز کشور، با توجه به طول دوره آماری، داده‌های کافی برای پروژه‌های مختلف در دسترس نیست، در این شرایط راهکار عملی استفاده از مدل‌ها برای شبیه‌سازی فرایند بارش رواناب و تولید سری داده‌های جریان است. در این حالت، با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل، خصوصیات دبی حوضه مورد نظر استخراج می‌شود. معمولاً مدل‌ها قادر نیستند فرایند مورد نظر را با صحت کامل و بدون خطا مدل‌سازی کنند و بسته به کیفیت داده‌های ورودی، ساختار مدل، فرایند واسنجی مدل و غیره، فرایند مورد نظر را با درجات مختلف صحت مدل‌سازی می‌کنند. در این حالت، هر قدر عملکرد مدل در شبیه‌سازی داده‌های دبی دقیق‌تر باشد، خصوصیات استخراج شده برای داده‌های دبی از قابلیت اطمینان

اصلی: ۱) بخش ذوب و تجمع برف، ۲) بخش رطوبت خاک و بارش موثر و ۳) بخش رواناب، است. در بخش ذوب و تجمع برف در هر گام زمانی با توجه به دمای مشاهداتی و دمای آستانه  $T$ ، بارش دریافتی یا به صورت باران یا به صورت برف در نظر گرفته می‌شود. تا زمانی که دما کمتر از دمای آستانه باشد، برف تجمع کرده، هیچ‌گونه روانابی تشکیل نمی‌شود.

هواشناسی سوئد (Swedish Meteorological and Hydrological Institute) برای پیش‌بینی مقدار رواناب سامانه‌های تولید انرژی، در سال ۱۹۷۰ ارائه شده است. اطلاعات ورودی این مدل، علاوه بر کم بودن، در دسترس نیز هستند. همچنین، در شرایط آب و هوایی متفاوت، این مدل قابلیت استفاده دارد (Siebert و Vis، ۲۰۱۲). این مدل شامل سه بخش



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

برای تعیین دبی خروجی از دو مخزن استفاده می‌شود. اولین مخزن نزدیک سطح خاک بوده، برای محاسبه رواناب سطحی و زیرقشری استفاده می‌شود و دومین مخزن در عمق بیشتر قرار گرفته، برای شبیه‌سازی جریان پایه استفاده می‌شود. آن قسمت از آب باران و ذوب برف که بیشتر از ظرفیت نگهداری آب خاک است، وارد مخزن اول می‌شود. هر دو مخزن در ارتباط با هم بوده، با توجه به ذخیره آب هر مخزن، آستانه ارتفاع در مخزن و ضرایب خشکیدگی بخش مختلف رواناب محاسبه می‌شود (AghaKouchak و Habib، ۲۰۱۰). ورودی‌های مدل HBV شامل داده‌های بارش، دما و تبخیر و تعرق پتانسیل هستند و در مجموع مدل دارای ۱۳ پارامتر است که نیاز است تا با روش مناسب این پارامترها بهینه شوند.

آب حاصل از ذوب برف و باران وارد بخش خاک شده، با توجه به رطوبت خاک و همچنین، بیشینه قابلیت ذخیره رطوبت به وسیله خاک، مقدار روانابی که در سطح خاک جریان پیدا می‌کند، محاسبه می‌شود. در این بخش، چنانچه ذخیره آب خاک از صفر تا حد LP (که این پارامتر با توجه به داده‌های مشاهداتی بهینه می‌شود) باشد، تبخیر واقعی به صورت تابعی خطی از تبخیر پتانسیل در نظر گرفته می‌شود و چنانچه ارتفاع آب بیشتر از حد LP باشد، تبخیر واقعی برابر با تبخیر پتانسیل در نظر گرفته می‌شود. آن قسمت از بارش که در سطح خاک جریان ندارد به ذخیره آب خاک اضافه می‌شود. در بخش رواناب، خروجی اصلی مدل یعنی جریان خروجی حوضه که خود شامل سه بخش جریان سطحی، زیرسطحی و جریان پایه است، محاسبه می‌شود. در این قسمت

مشاهداتی که  $Q_{i-1} < Q_0 < Q_i$  می‌باشد و  $y$  مقدار احتمال مربوط به دبی  $Q_0$  است.

۴- مدل برای مجموعه پارامترها اجرا کرده، منحنی تداوم جریان برای داده‌های برآوردی ترسیم می‌شود و در نهایت، مقادیر دبی برای احتمال تجاوز به دست آمده در گام قبل محاسبه می‌شود.

۵- برای مقادیر دبی به دست آمده در گام‌های سوم و چهارم، جمع مربعات خطا حساب شده، به عنوان معیار ارزیابی نهایی در نظر گرفته می‌شود. برای معیار  $BiasFHV$  نیز این مراحل اجرا شد.

برای بررسی کارایی هر یک از معیارهای ارزیابی با استفاده از الگوریتم DDS (Tolson و Shoemaker، ۲۰۰۷) که به منظور اطمینان از دستیابی به جواب بهینه سراسری تعداد تکرارهای آن برابر با ۵۰۰۰ قرار داده شده بود، پارامترهای مدل HBV با در نظر گرفتن هر یک از معیارهای ارزیابی به تعداد ۱۰۰ مرتبه (این تعداد تکرار به این دلیل در نظر گرفته شد که معمولاً فرایند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی یک فرایند تصادفی است، بنابراین، برای مقایسه بهتر نیاز است تا عملکرد معیارها در تعداد تکرار زیاد بررسی شوند (Pool و همکاران، ۲۰۱۸؛ Vis و همکاران، ۲۰۱۵))، بهینه شد.

سپس، هر سری پارامترهای بهینه شده در مدل قرار داده و مقادیر دبی برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی شبیه‌سازی شد. به منظور بررسی کارایی هر یک از معیارهای ارزیابی در ابتدا مقادیر دبی مشاهداتی با استفاده از مقادیر منحنی تداوم جریان و مقادیر احتمال تجاوز به پنج قسمت جریان‌های سیلابی بزرگ (احتمال تجاوز کمتر از پنج درصد)، جریان‌های سیلابی (احتمال تجاوز بین پنج تا ۲۰ درصد)، جریان‌های متوسط (احتمال تجاوز ۲۰ تا ۷۰ درصد)، جریان‌های کم آبی (احتمال تجاوز ۷۰ تا ۹۵ درصد) و جریان‌های کم آبی شدید (احتمال تجاوز بیشتر از ۹۵ درصد) تقسیم‌بندی شدند (Pfannerstill و همکاران، ۲۰۱۴). در گام بعد، در هر پنج قسمت مقادیر دبی مشاهداتی و ۱۰۰ سری دبی شبیه‌سازی شده با هم مقایسه شده، مقادیر شاخص‌های RMSE و BIAS محاسبه شد.

**توابع هدف:** در واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی، هدف پیدا کردن مقادیری از پارامترها است که به ازای آن‌ها بیشترین شباهت بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده وجود داشته باشد. به منظور کمی کردن این شباهت از معیارهای ارزیابی مختلف استفاده می‌شود که معیارهای ارزیابی که در این پژوهش استفاده شد، شامل معیارهای آماری و شاخص‌های جریان هستند که در جدول ۱ ارائه شده‌اند. شاخص‌های آماری تفاوت بین مقادیر مشاهداتی و برآوردی را بر اساس فرضیات خصوصیات آماری باقی‌مانده‌ها اندازه‌گیری می‌کنند و قادر به تعیین کیفیت شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی حوضه، نیستند (van Werkhoven و همکاران، ۲۰۰۹). برای اجرای روش مبتنی بر منحنی تداوم جریان (روش FDC) مراحل کار به صورت زیر است:

۱- ترسیم منحنی تداوم جریان برای داده‌های مشاهداتی: به منظور ترسیم منحنی تداوم جریان مقادیر دبی‌های مشاهداتی  $q_i, i = 1, 2, \dots, n$  به صورت نزولی مرتب می‌شوند. به این ترتیب، چنانچه اندیس  $i$  نشان‌دهنده مرتبه هر دبی باشد،  $q_1$  نشان‌دهنده بزرگ‌ترین و  $q_n$  نشان‌دهنده کوچک‌ترین دبی مشاهداتی هستند. سپس، با استفاده رابطه (۱) (ویبول) احتمال تجاوز برای هر دبی محاسبه می‌شود.

$$p_i = P(Q > q_i) = \frac{i}{n+1} \quad (1)$$

که در آن،  $p_i$  احتمال آن‌که تمام دبی‌ها بزرگ‌تر از مقدار دبی  $q_i$  باشد، است. منحنی تداوم جریان با رسم مقادیر  $q_i$  در برابر احتمالات مربوطه  $p_i$  به دست می‌آید.

۲- تعیین مقادیر دبی بیشینه و کمینه مشاهداتی و تقسیم فاصله بین مقادیر دبی کمینه و بیشینه به ۵۰ طبقه مساوی

۳- مقادیر دبی‌های کمینه و بیشینه کنار گذاشته شده، برای ۴۹ فاصله مساوی که در قسمت قبل تعیین شد، با استفاده از منحنی تداوم جریان احتمال تجاوز محاسبه شد. در این قسمت، برای محاسبه مقادیر احتمال تجاوز از رابطه (۲) استفاده شد.

$$p = p_{i-1} + \frac{p_i - p_{i-1}}{\ln(Q_{i-1}) - \ln(Q_i)} \times (\ln(Q_{i-1}) - Q_0) \quad (2)$$

که در آن،  $Q_i$  مقدار دبی نام،  $p_i$  و  $p_{i-1}$  احتمال تجاوز مربوط به دبی‌های  $Q_i$  و  $Q_{i-1}$  و  $Q_0$  مقدار دبی

جدول ۱- روابط مربوط به معیارهای ارزیابی مختلف

معادله	محدوده
$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{S,t} - Q_{O,t})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{O,t} - \bar{Q}_O)^2}$	$-\infty - 1$
$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Q_{S,t} - Q_{O,t})^2}{n}}$	$0 - \infty$
$RSR = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_{S,t} - Q_{O,t})^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_{O,t} - \bar{Q}_O)^2}}$	$0 - \infty$
$\log RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((\log_{10}(Q_{S,t}) - \log_{10}(Q_{O,t}))^2)}$	$0 - \infty$
$MSEL = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (\log_{10}(Q_{S,t}) - \log_{10}(Q_{O,t}))^2$	$0 - \infty$
$TRMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left( \frac{(1 + Q_{S,t})^{0.3} - 1}{0.3} - \frac{(1 + Q_{O,t})^{0.3} - 1}{0.3} \right)^2}$	$0 - \infty$
$KGE2 = \sqrt{(1-r)^2 + (\gamma-1)^2 + (\beta-1)^2}$ $a = \sigma_s / \sigma_o, \beta = \mu_s / \mu_o$	$0 - 1$
$KGE2 = \sqrt{(1-r)^2 + (\gamma-1)^2 + (\beta-1)^2}$ $\gamma = (\sigma_s / \mu_s) / (\sigma_o / \mu_o), \beta = \mu_s / \mu_o$	$0 - 1$
$r^2 = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_{S,t} - \bar{Q}_O)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_{O,t} - \bar{Q}_O)^2}}$	$0 - 1$
$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_{S,t} - Q_{O,t})$	$-\infty - \infty$
$GK = 1 - 5 \left( \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{O,t} - Q_{S,t})}{\sum_{t=1}^T Q_{O,t}} - (1 - r(Q_O - Q_S)) \right)$	$0 - 1$
$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  Q_{S,t} - Q_{O,t} $	$0 - \infty$
$BiasFHV = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{S,high,t} - Q_{O,high,t})^2}{\sum_{t=1}^n Q_{O,high,t}}$	$0 - \infty$
$\log NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (\log(Q_{S,t}) - \log(Q_{O,t}))^2}{\sum_{t=1}^n (\log(Q_{O,t}) - \log(\bar{Q}_O))^2}$	$-\infty - 1$

$Q_{S,t}$  مقدار دبی شبیه‌سازی شده در زمان  $t$ ،  $Q_{O,t}$  مقدار دبی مشاهداتی در زمان  $t$  و  $\bar{Q}_O$  متوسط دبی مشاهداتی

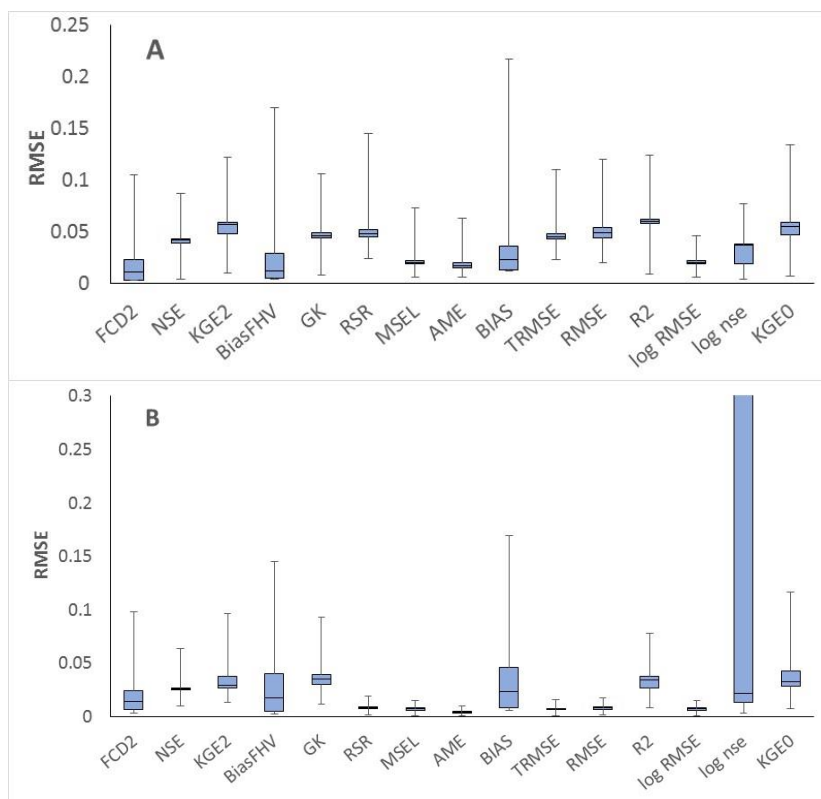
### نتایج و بحث

در نمودارهای شکل ۲، صدک‌های مختلف مقادیر RMSE برای بخش‌های مختلف جریان با استفاده از ۱۰۰ سری خروجی مدل برای هر معیار ارزیابی ارائه شده است (قابل ذکر است که در نمودارهای باکس ویسکر با توجه به آن که مقادیر کمینه و بیشینه

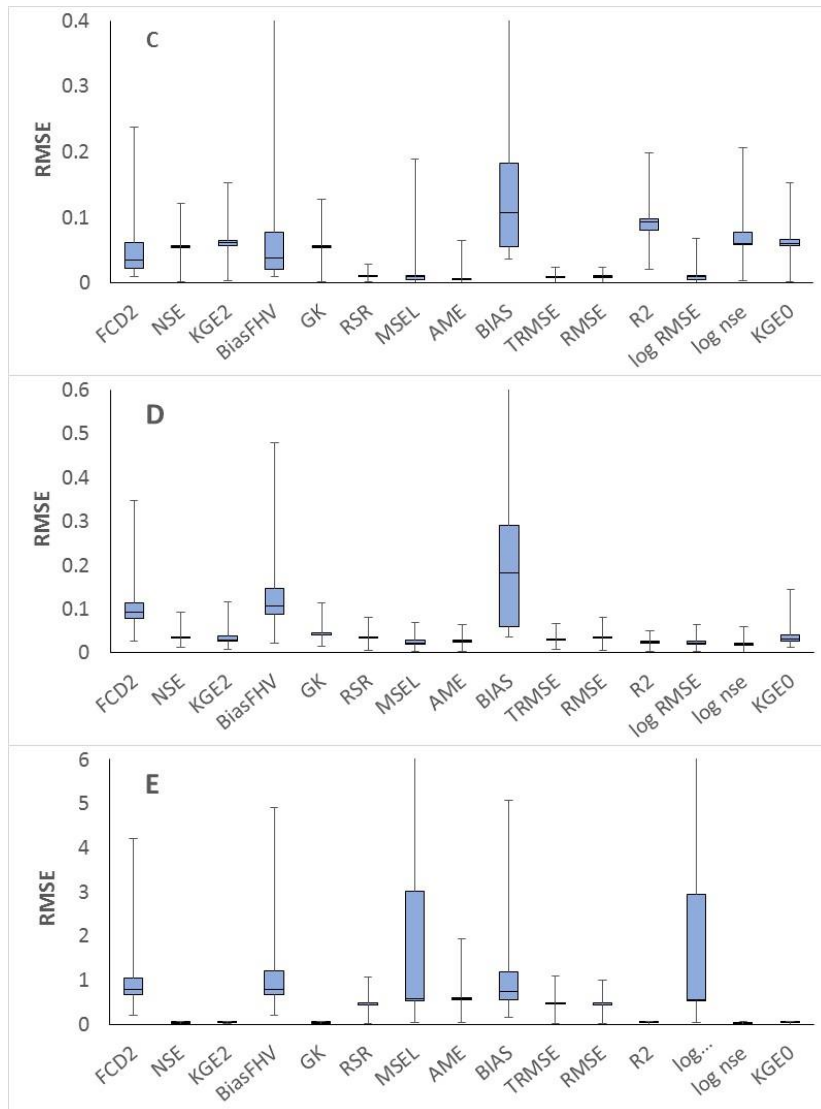
RMSE برخی توابع هدف تفاوت زیادی با صدک‌ها داشتند، به‌منظور وضوح و نمایش بهتر صدک‌ها از مقادیر صدک‌های ۰/۰۲۵ و ۰/۹۷۵ که معمولاً برای برآورد دامنه عدم قطعیت ۹۵ درصدی استفاده می‌شود به جای مقادیر کمینه و بیشینه استفاده شد).

دبی‌ها بیشترین مقادیر تغییرات صدک‌های مختلف به‌ترتیب مربوط به معیارهای  $\log NSE$ ،  $BIAS$  و  $BiasFHV$  هستند. در این قسمت، با توجه به مقادیر صدک‌های مختلف و همچنین، تغییرات صدک‌های مختلف بهترین عملکرد با استفاده از تابع هدف  $MAE$  به‌دست آمده است. برای جریان‌های متوسط (نمودار C شکل ۲) کمترین مقادیر صدک‌های مختلف به‌ترتیب برای معیارهای  $MAE$ ،  $MSEL$  و  $\log RMSE$  به‌دست آمده است. در این قسمت، کمترین تفاوت در شبیه‌سازی‌های مختلف مربوط به توابع هدف  $RMSE$ ،  $TRMSE$  و  $RSR$  است. در نهایت، برای دبی‌های متوسط می‌توان بیان داشت، معیارهای  $RMSE$ ،  $TRMSE$ ،  $RSR$ ،  $E$ ،  $MSEL$  و  $\log RMSE$  بهترین عملکرد را دارند. با توجه به نمودار D شکل ۲، ملاحظه می‌شود، برای جریان‌های سیلابی کمترین مقادیر صدک‌ها به‌ترتیب مربوط به توابع هدف  $\log NSE$ ،  $R2$  و  $\log RMSE$  هستند.

با توجه به نمودار A در شکل ۲، ملاحظه می‌شود، برای جریان‌های کم آبی شدید، کمترین مقادیر صدک‌های ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۵ مربوط به توابع هدف  $FDC$  و  $BiasFHV$  هستند. کمترین تغییرات در مقادیر جریان‌های شبیه‌سازی شده در ۱۰۰ اجرا و نتیجتاً کمترین تفاوت در صدک‌های مقادیر  $RMSE$  به‌ترتیب مربوط به توابع هدف  $MSEL$ ،  $NSE$ ،  $\log RMSE$  و  $GK$  هستند. در این بخش از جریان‌ها بدترین عملکرد به‌ترتیب مربوط به زمانی بود که تابع هدف معیارهای  $R2$ ،  $KGE2$  و  $KGE0$  بودند. در این قسمت، اگر چه معیارهای  $FDC$  و  $BiasFHV$  عملکرد بهتری در برآورد مقادیر دبی‌های کمینه شدید داشته‌اند، اما تفاوت عملکرد آن در اجراهای مختلف و نتیجتاً اختلاف بین صدک‌های مختلف زیاد است. برای جریان‌های کم آبی با توجه به نمودار B شکل ۲، ملاحظه می‌شود، کمترین مقادیر صدک‌ها به‌ترتیب مربوط به معیارهای  $MAE$ ،  $RMSE$ ،  $\log RMSE$ ،  $TRMSE$ ،  $MSEL$  و  $RSR$  می‌باشند. برای این



شکل ۲- صدک‌های مختلف مقادیر RMSE برای بخش‌های مختلف جریان



ادامه شکل ۲- صدک‌های مختلف مقادیر RMSE برای بخش‌های مختلف جریان

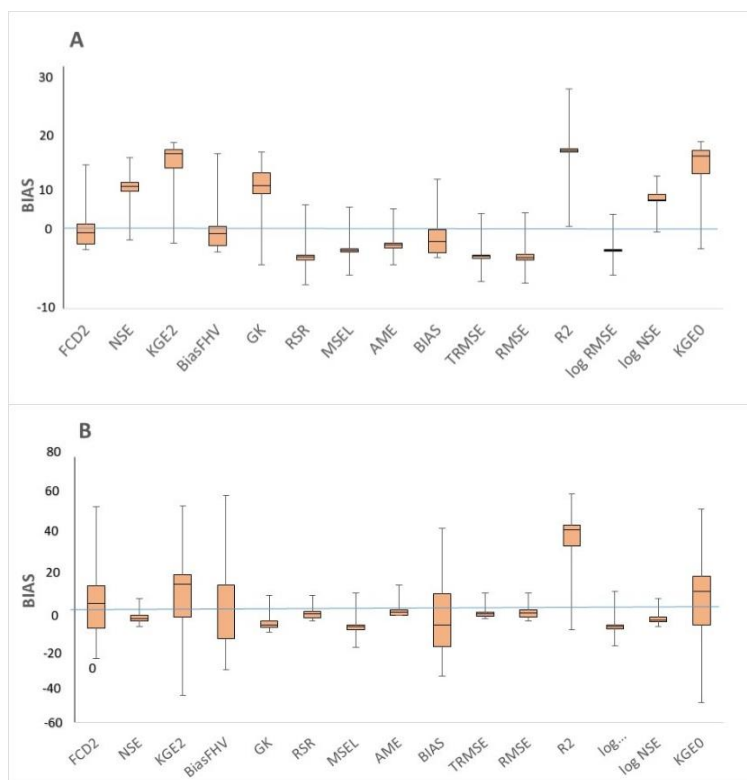
FDC هستند. معیار RMSE مقدار بزرگی خطا را نشان می‌دهد و هیچ‌گونه اطلاعی در مورد توزیع مقادیر خطا ارائه نمی‌دهد. بدین‌منظور، علاوه‌بر مقادیر RMSE برای بخش‌های مختلف جریان مقادیر اریبی (Bias) نیز بررسی شد که نتایج آن به‌صورت نمودارهای شکل ۳ است. برای محاسبه اریبی مقادیر دبی برآوردی از مقادیر دبی مشاهداتی کم می‌شود، در این حالت، اگر مقادیر دبی برآوردی بزرگ‌تر از دبی مشاهداتی بود، مقدار اریبی منفی و در حالتی که دبی برآوردی کوچک‌تر از دبی مشاهداتی بود، مقدار اریبی مثبت به‌دست می‌آید. برای جریان‌های کم‌آبی شدید با توجه به نمودار A شکل ۳، ملاحظه می‌شود، مقادیر صدک‌های اریبی مربوط به توابع هدف FDC، BiasFHV، BIAS و MAE کمترین اختلاف را با

برای جریان‌های سیلابی کمترین اختلاف بین صدک‌های مختلف به‌ترتیب مربوط به مدل بهینه شده با معیارهای TRMSE، RSR و RMSE هستند. بیشترین اختلاف بین صدک‌های مختلف به‌ترتیب مربوط به توابع هدف BIAS، BiasFHV و FDC می‌باشند. در مجموع، برای دبی‌های سیلابی بهترین عملکرد مربوط مدل بهینه شده با معیارهای log NSE، R2 و log RMSE هستند. برای داده‌های سیلابی بزرگ توابع هدف NSE، KGE2، GK، log NSE و KGE0 و R2 به‌ترتیب دارای کمترین مقدار صدک‌های مختلف و همچنین، کمترین اختلاف صدک‌های مختلف بودند. برای جریان‌های سیلابی شدید بدترین عملکرد نیز به‌ترتیب مربوط به توابع هدف log RMSE، BiasFHV، BIAS، MSEL و

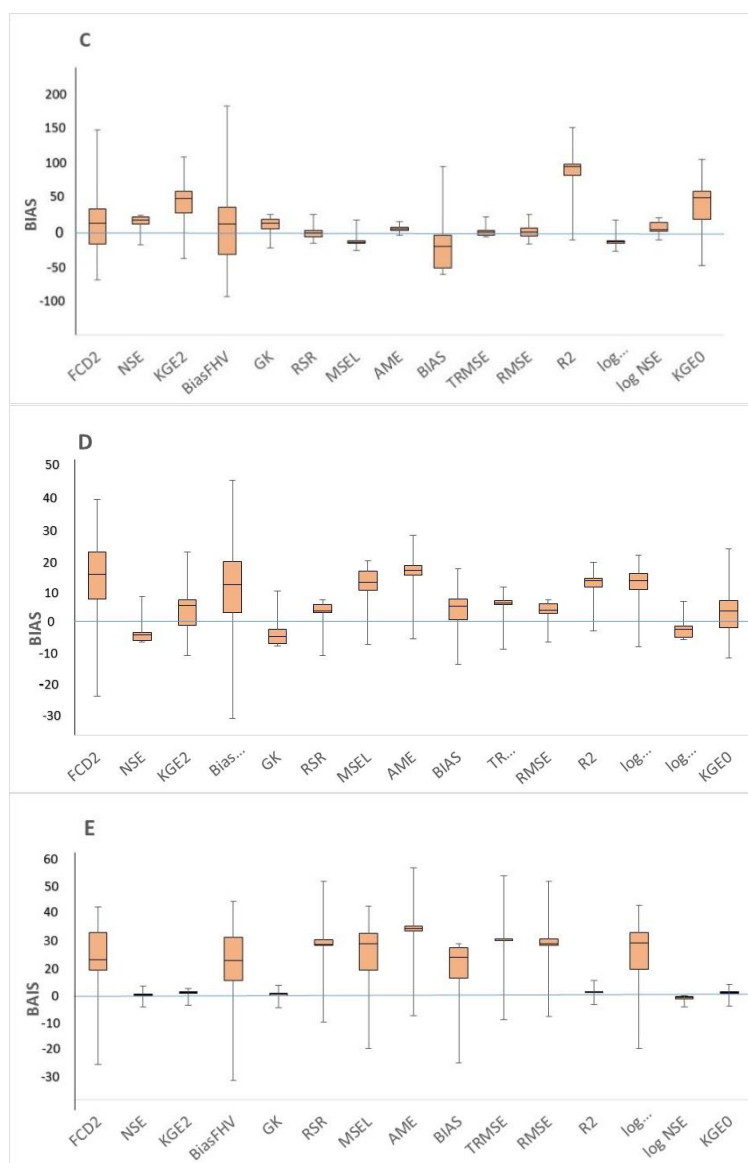


کم آبی و کم آبی شدید، عملکرد معیارهای مختلف برای جریان‌های متوسط بهتر شده به طوری که برای جریان‌های متوسط (نمودار C شکل) مقدار میانه مربوط به تابع هدف MAE برابر با صفر به دست آمده، مقدار میانه مربوط به تابع هدف  $\log NSE$ ،  $BiasFHV$ ،  $FDC$ ،  $TRMSE$  نیز اختلاف کمی با صفر دارند و یک حالت تعادلی بین توابع هدفی که کم یا بیش برآوردی داشته‌اند، وجود دارد. برای این دبی‌ها بدترین عملکرد مربوط به مدل HBV بهینه شده با معیارهای  $R2$ ،  $KGE0$  و  $KGE2$  است. در مجموع، برای دبی‌های متوسط می‌توان بیان داشت، بهترین عملکرد مدل مربوط به زمانی است که معیار ارزیابی MAE به عنوان تابع هدف استفاده شد. برای دبی‌های سیلابی با توجه به نمودار D در شکل ۳، مشاهده می‌شود، صدک‌های مربوط به تابع هدف  $\log NSE$ ،  $NSE$ ،  $BIAS$ ،  $KGE0$  و  $KGE2$  اختلاف کمتری نسبت به معیارهای دیگر با مقدار صفر دارند. برای دبی‌های سیلابی بیشترین اختلاف بین صدک‌های مختلف مربوط به توابع هدف  $BiasFHV$  و  $FDC$  است.

مقدار صفر دارند. همچنین، مدل بهینه شده با اغلب معیارهای ارزیابی مقادیر دبی‌های کمینه را بالا برآورد کرده‌اند. با توجه به این نمودار، ملاحظه مشاهده بدترین عملکرد مربوط به توابع هدف  $R2$ ،  $KGE0$  و  $KGE2$  هستند و کمترین اختلاف بین صدک‌های مختلف برای تابع‌های  $\log RMSE$ ،  $MSEL$ ،  $RSR$  و  $TRMSE$  به دست آمد. با توجه به نمودار B می‌توان دید برای جریان‌های کم آبی میانه مقادیر صدک  $0/5$  مربوط به توابع هدف MAE،  $BiasFHV$  و  $FDC$  کمترین اختلاف را با صفر دارند. همانند دبی‌های کم آبی شدید برای اغلب معیارهای ارزیابی مقادیر صدک‌های مختلف دارای اریبی منفی بوده که به نوعی نشان می‌دهد، با استفاده از این معیارها مدل مقادیر این دبی‌ها را بزرگ‌تر از مقادیر دبی مشاهداتی برآورد کرده است. با توجه به این نمودار، ملاحظه می‌شود، از نظر اختلاف بین صدک‌های مختلف به غیر از معیارهای  $R2$ ،  $KGE0$ ،  $BIAS$ ،  $BiasFHV$ ،  $KGE2$  و  $FDC$  سایر معیارها عملکرد مناسبی داشته، اختلاف مقادیر شبیه‌سازی شده در اجراهای مختلف تفاوت کمتری با یکدیگر داشته‌اند. در مقایسه با جریان‌های



شکل ۳- مقادیر صدک‌های مختلف اریبی برای بخش‌های مختلف هیدروگراف



ادامه شکل ۳- مقادیر صدک‌های مختلف اریبی برای بخش‌های مختلف هیدروگراف

صدک‌های مختلف نیز مربوط به توابع هدف و FDC،  $\log RMSE$ ،  $\log NSE$ ،  $MSEL$ ،  $BiasFHV$  و  $BIAS$  هستند. همانند دبی‌های سیلابی برای دبی‌های سیلابی شدید نیز برای اغلب معیارهای ارزیابی، مدل تمایل به بیش برآزشی داشته، مقادیر دبی برآوردی بزرگ‌تر از مقادیر دبی مشاهداتی بوده‌اند.

با مقایسه نمودارهای شکل‌های ۲ و ۳، می‌توان مشاهده کرد، برای دبی‌های سیلابی شدید در مقایسه با مقادیر  $RMSE$ ، مقادیر اریبی آن‌ها بزرگ به دست آمده است، مشابه همین مسئله را در دبی‌های سیلابی برای توابع هدف  $MSEL$ ،  $MAE$ ،  $\log RMSE$  و  $R2$  و برای سه دسته دبی دیگر برای معیار  $R2$  مشاهده کرد. در مجموع، با در نظر گرفتن صدک‌های دو معیار

در مقایسه با دبی‌های کم آبی و کم آبی شدید که برای اغلب معیارهای مدل مقادیر دبی را بزرگ‌تر از مقادیر دبی مشاهداتی برآورده کرده بود، برای دبی‌های سیلابی، مدل برای اغلب معیارهای ارزیابی مقادیر دبی را کوچک‌تر از مقادیر مشاهداتی شبیه‌سازی کرده است. برای جریان‌های سیلابی بزرگ با توجه به نمودار E در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، صدک‌های مربوط به توابع هدف  $R2$ ،  $KGE2$ ،  $GK$ ،  $NSE$  و  $R2$  دارای کمترین اختلاف با مقدار صفر هستند. مقادیر صدک‌های مربوط به توابع هدف  $TRMSE$ ،  $MAE$ ،  $MSEL$ ،  $RMSE$ ،  $\log RMSE$  و  $MSEL$  دارای بیشترین اختلاف با مقدار صفر هستند و بدترین عملکرد را به خود اختصاص داده‌اند. بیشترین اختلاف بین

NSE عملکرد بهتری داشت. در پژوهش Houshmand و همکاران (۲۰۱۷) در واسنجی مدل SWAT با استفاده الگوریتم SUFI-2 و در نظر گرفتن توابع هدف R2، NSE، RSR، KGE و PBIAS، بدترین عملکرد برای تابع هدف PBIAS به دست آمد و عملکرد مدل برای سایر توابع هدف مشابه یکدیگر بود. با توجه به نتایج این پژوهش، به نوعی می توان بیان داشت، استفاده از توابع هدف مبتنی بر منحنی تداوم جریان برای دبی های کمینه مناسب بوده، ساختارهای مختلف ضریب NSE، KGE برای دبی های بیشینه عملکرد بهتری داشته اند و برای دبی میانی نیز ساختارهای مختلف RMSE عملکرد بهتری داشته اند. در این پژوهش، در مجموع مدل با معیار logNSE عملکرد بهتری در مقایسه با معیار NSE داشته است و همچنین، تغییرات نتایج در حالت استفاده از معیار logNSE کمتر بوده است. در پژوهش Krause و همکاران (۲۰۰۵) نیز استفاده logNSE باعث بهبود عملکرد مدل در برآورد دبی های کمینه نسبت به شاخص NSE شده بود. در حالی که در پژوهش Vis و همکاران (۲۰۱۵) مدل HBV بهینه شده با معیار NSE نسبت به مدل بهینه شده با logNSE عملکرد بهتری داشته و نتایج آن تغییرات کمتری داشته است. در نمودارهای شکل ۴، مقادیر متوسط دبی برآوردی با استفاده از متوسط ۱۰۰ شبیه سازی به همراه مقادیر دبی مشاهداتی ارائه شده است. با توجه به هیدروگراف های این شکل مشاهده می شود، در حالی که مدل با توابع هدف NSE و KGE2 بهینه شده است، عملکرد مدل به خصوص برای داده های کمینه مناسب نبوده است. در این حالت، مدل برای بسیاری از داده های کمینه و متوسط دارای بیش برآوردی بوده است. همچنین، با استفاده از این دو تابع هدف، مدل نتوانسته است شاخه خشکیدگی را به خوبی مدل سازی کند. با توجه به هیدروگراف های شکل ۴، مشاهده می شود، در حالی که معیارهای RMSE و RSR به عنوان توابع هدف انتخاب شده اند، هیدروگراف های مدل سازی شده شبیه یکدیگر هستند. هیدروگراف مشاهداتی با استفاده از این دو معیار در شبیه سازی دبی های متوسط کارایی خوبی داشته، اما در شبیه سازی داده های کمینه و بیشینه عملکرد

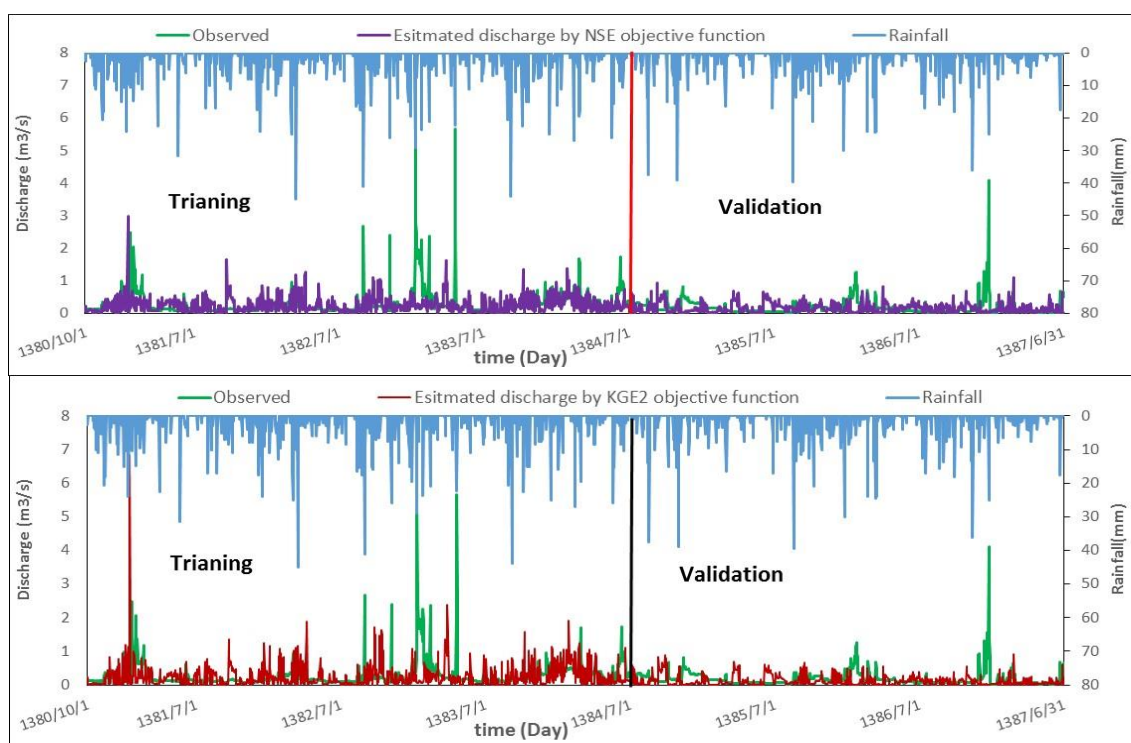
RMSE و BIAS برای بخش های مختلف جریان، می توان بیان داشت که برای دبی های کمینه معیارهای مبتنی بر منحنی تداوم جریان یعنی توابع هدف FDC و BiasFHV عملکرد بهتری داشتند، برای دبی های کم آبی شدید نیز مدل بهینه شده با توابع هدف FDC، BiasFHV، MAE و RSR بهترین عملکرد را داشته، برای دبی های متوسط توابع هدف MAE، TRMSE، RSR و TRMSE نسبت به سایر معیارها عملکرد بهتری داشته اند. در پژوهش Chdalawada و Babovic (۲۰۱۹) نیز مدل بهینه شده با شاخص MAE بهترین عملکرد را برای داده های دبی متوسط داشت. برای دبی های سیلابی مدل بهینه شده با توابع هدف NSE و logNSE نسبت به سایر توابع هدف عملکرد بهتری داشته اند و برای دبی های سیلابی شدید تمام معیارهایی که در آن ها تابع هدف بیشینه می شود، یعنی توابع هدف NSE، KGE2، GK، R2، logNSE و KGE0 بهترین عملکرد را داشته اند. در پژوهش Chdalawada و Babovic (۲۰۱۹) نیز این شاخص ها عملکردی مشابه هم داشتند. در پژوهش Paul و Negahban-Azar (۲۰۱۸) در بهینه سازی پارامترهای مدل SWAT توابع هدف KGE و PBIAS به ترتیب بهترین و بدترین عملکرد را به خود اختصاص دادند و عملکرد توابع هدف R2، NSE و RSR مشابه یکدیگر بودند. در پژوهش Price و همکاران (۲۰۱۲) مدل بهینه شده با معیار NSE عملکرد بهتری در شبیه سازی داده های پیک نسبت به مدل بهینه شده با معیار MAE داشت. همچنین، نتایج مدل بهینه شده با تابع هدف NSE تغییرات کمتری نسبت حالتی که با تابع هدف MAE بهینه شده بود، داشت. در پژوهشی، Krause و همکاران (۲۰۰۵) مشاهده کردند، شاخص های NSE و R2 عملکرد بهتر برای داده های پیک داشته اند. در پژوهشی Pechlivandis و همکاران (۲۰۱۲) مشاهده کردند که مدل بهینه شده با معیارهای NSE و KGE عملکرد بهتری برای داده های پیک داشته، در حالی که مدل بهینه شده با توابع هدف مبتنی بر منحنی تداوم جریان و شاخص آنتروپی عملکرد بهتری در شبیه سازی داده های کمینه داشته است. در پژوهش Mizukami و همکاران (۲۰۱۹) در پیش بینی دبی های پیک معیار KGE نسبت به معیار

به‌عنوان تابع هدف باعث بهبود عملکرد مدل نسبت به حالتی که معیار NSE به‌عنوان تابع هدف انتخاب شده بود، شد. با توجه به هیدروگراف‌های شکل ۴، مشاهده می‌شود، در حالت استفاده از معیار ارزیابی MAE به‌عنوان تابع هدف، مدل عملکرد مناسبی در برآورد مقادیر متوسط و بیشینه نداشته است و تغییرات کمی نسبت به نواسانات بارش داشته و به نوعی بیشتر جزء رواناب پایه در بهینه‌سازی اعمال شده است.

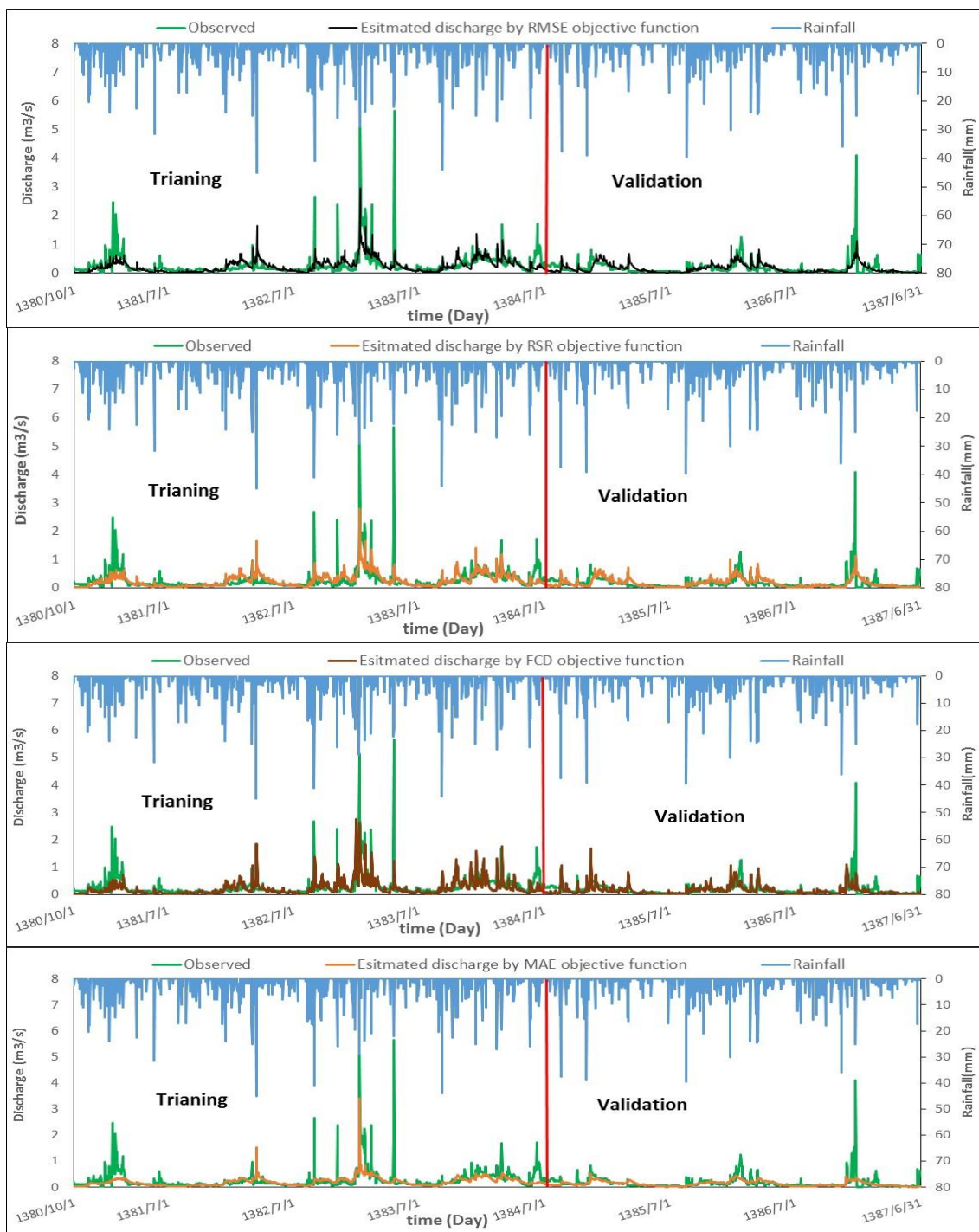
### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اقدام به بررسی کارایی توابع هدف آماری و مبتنی بر منحنی تداوم جریان در بهینه‌سازی پارامترهای مدل یکپارچه HBV در حوضه زیارت استان گلستان شد. بدین منظور، با استفاده از الگوریتم DDS با در نظر گرفتن هر یک از توابع هدف پارامترهای مدل HBV به تعداد ۱۰۰ مرتبه بهینه‌سازی و به ازای هر سری پارامترهای بهینه شده مقادیر خروجی برای داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی به‌دست آمد. نتایج نشان مدل بهینه شده با توابع هدف SFDCE، MSE، BiasFLV، PBIAS و MRE عملکرد مناسبی در شبیه‌سازی مقادیر دبی مشاهداتی نداشتند.

مناسبی نداشته است. با استفاده از این دو شاخص، شاخه خشکیدگی به‌خوبی مدل‌سازی شده است و همچنین، هیدروگراف شبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر بارش کوچک عکس‌العمل کمی نشان داده است، به نوعی در این حالت مقادیر آب پایه سهم بیشتری نسبت مقادیر دبی سطحی در رواناب خروجی داشته است. در حالت استفاده از منحنی تداوم جریان (FDC) به‌عنوان تابع هدف، مدل در شبیه‌سازی دبی‌های کمینه و متوسط عملکرد خوبی داشته، اما در برآورد برخی دبی‌های پیک عملکرد مناسبی نداشته است. این مسئله، به‌خصوص برای سال شروع هیدروگراف (سال آبی ۱۳۸۰-۱۳۸۱) و سال انتهایی (سال آبی ۱۳۸۶-۱۳۸۷) مشاهده شد. در مقایسه با هیدروگراف شبیه‌سازی شده با توابع هدف RMSE و RSR در حالت استفاده از منحنی تداوم جریان به‌عنوان تابع هدف، دبی‌های پیک بهتر شبیه شده و سهم آب سطحی در رواناب خروجی حوضه بیشتر در هیدروگراف خروجی در نظر گرفته شده است. در حالت استفاده از منحنی تداوم جریان به‌عنوان تابع هدف نیز شیب منحنی تداوم جریان به خوبی مدل‌سازی شده است. در پژوهش Westerberg و همکاران (۲۰۱۱) نیز استفاده از منحنی تداوم جریان



شکل ۴- هیدروگراف مقادیر دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده



ادامه شکل ۴- هیدروگراف مقادیر دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده

در این بین به نوعی می‌توان گفت در حالی که منحنی تداوم جریان به‌عنوان تابع هدف انتخاب شده بود، عملکرد مدل نسبت به سایر توابع هدف به‌خصوص در شبیه‌سازی داده‌های دبی کمینه بهتر شده بود. یکی از مشکلات این تابع هدف، تغییرات زیاد مقادیر شبیه‌سازی شده در اجراهای مختلف است. معمولاً در بهینه‌سازی مدل‌های هیدرولوژیک با توجه

همچنین، شاخص‌هایی مانند NSE، KGE و ساختارهای مختلف آن‌ها که در اغلب پژوهش‌ها به‌عنوان تابع هدف استفاده می‌شوند، عملکرد مناسبی به‌خصوص برای مقادیر دبی کمینه و متوسط ندارند. از سوی دیگر معیارها ارزیابی مانند RMSE، MAE عملکرد مناسب‌تری به‌خصوص در شبیه‌سازی داده‌های متوسط و شیب شاخه خشکیدگی داشته‌اند.

می‌توان ضعف‌های این رویکرد در شبیه‌سازی برخی قسمت‌های هیدروگراف را برطرف کرد. نتایج نشان داد، بسته به نوع تابع هدف عملکرد مدل در شبیه‌سازی برخی از مقادیر دبی بهتر بوده است و به نوعی می‌توان بیان داشت، در حالت بهینه‌سازی پارامترهای مدل با استفاده معیارهای تک هدفه نمی‌توان انتظار داشت که مدل تمام بخش‌های هیدروگراف را به خوبی مدل‌سازی کند و لازم است تا بسته به هدف پژوهش، تابع هدف مناسب انتخاب شود.

به این مسئله که الگوریتم‌های بهینه‌سازی حالت تصادفی دارند، مدل به تعداد چند مرتبه اجرا و بهترین مجموعه پارامترها که مدل بهترین عملکرد را دارد، به مجموعه پارامترهای نهایی انتخاب می‌شوند. در این حالت، برای تابع هدف FDC با اجرا مدل به تعداد چند مرتبه و مقایسه نتایج آن‌ها می‌توان بهترین مجموعه پارامترهای بهینه شده را انتخاب کرد و به نوعی اثر تغییرات زیاد مقادیر برآوردی در اجراهای مختلف را از بین برد. همچنین، با استفاده از روش منحنی تداوم با انتخاب تعداد متفاوتی نقاط مشاهداتی در قسمت‌های مختلف منحنی تداوم جریان به نوعی

### منابع مورد استفاده

1. AghaKouchak, A. and E. Habib. 2010. Application of a conceptual hydrologic model in teaching hydrologic processes. *International Journal of Engineering Education*, 26: 963–973.
2. Bekele, E.G. and J.W. Nicklow. 2007. Multi-objective automatic calibration of SWAT using NSGA-II. *Journal of Hydrology*, 341(3): 165–176.
3. Carrillo, G., P.A. Troch, M. Sivapalan, T. Wagener, C. Harman and K. Sawicz. 2011. Catchment classification: hydrological analysis of catchment behavior through process-based modeling along a climate gradient. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15: 3411–3430.
4. Chadalawada, J. and V. Babovic. 2019. Review and comparison of performance indices for automatic model induction. *Journal of Hydroinformatics*, 21(1): 13–31.
5. Criss, R.E. and W.E. Winston. 2008. Do Nash values have value? Discussion and alternate proposals. *Hydrological Processes*, 22: 2723–2725.
6. Gupta, H.V., H. Kling, K.K. Yilmaz and G.F. Martinez. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377: 80–91.
7. Gupta, H., S. Sorooshian and P. Yapo. 1998. Toward improved calibration of hydrologic models: multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resources Research*, 4: 751–763.
8. Gupta, H.V. and H. Kling. 2011. On typical range, sensitivity and normalization of Mean Squared Error and Nash-Sutcliffe Efficiency type metrics. *Water Resources Research*, 47(10): 1-3.
9. Krause, P., D.P. Boyle and F. Bäse. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geoscience*, 5: 89–97.
10. Madsen, H. 2000. Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology*, 235(3): 276–288.
11. Madsen, H. 2003. Parameter estimation in distributed hydrological catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives. *Advances in Water Resources*, 26(2): 205-216.
12. Mathevet, T., C. Michel, V. Andreassian and C. Perrin. 2006. A bounded version of the Nash-Sutcliffe criterion for better model assessment on large sets of basins. *IAHS Publication*, 567 pages.
13. Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10: 282–290.
14. Nosrati, K. and S. Jalali. 2017. Estimating uncertainty and sediment yield contribution of forest roads in Ziarat Drainage Basin, Gorgan Province using geochemical tracers. *Journal of Range and Watershed Management*, 69(3): 753-764 (in Persian).
15. Pfanterstill, M., B. Guse and N. Fohrer. 2014. Smart low flow signature metrics for an improved overall performance evaluation of hydrological models. *Journal of Hydrology*, 510: 447-458.
16. Pool, S., M. Vis and J. Seibert. 2018. Evaluating model performance: towards a nonparametric variant of the Kling-Gupta efficiency. *Hydrological Sciences Journal*, 2018: 1941-1953.
17. Price, K., S.T. Purucker, S.R. Kraemer and J.E. Babendreier. 2012. Tradeoffs among watershed model calibration targets for parameter estimation. *Water Resources Research*, 48(10): W10542.
18. Siebert, J. and M.J.P. Vis. 2012. Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment runoff model software package. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16: 3315-3325.

19. Shafii, M. and B.A. Tolson. 2015. Optimizing hydrological consistency by incorporating hydrological signatures into model calibration objectives. *Water Resources Research*, 51: 3796–3814.
20. Schaefli, B. and H.V. Gupta. 2007. Do Nash values have value? *Hydrological Process*, 21(15): 2075–2080.
21. Tolson, B.A. and C.A. Shoemaker. 2007. Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. *Water Resources Research*, 43: W01413. doi: 10.1029/2005WR004723.
22. Van Werkhoven, K. and T. Wagener, P. Reed and Y. Tang. 2009. Sensitivity-guided reduction of parametric dimensionality for multi-objective calibration of watershed models. *Advances in Water Resources*, 32(8): 1154–1169.
23. Vis, M., R. Knight, S. Pool, W. Wolfeand and J. Seibert. 2015. Model calibration criteria for estimating ecological flow characteristics. *Water*, 7: 2358–2381.
24. Westerberg, I.K., J.L. Guerro, P.M. Younger, K.J. Beven, J. Seibert, S. Halldin and C.Y. Xu. 2011. Calibration of hydrological models using flow-duration curves. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15: 2205–2227.
25. Yadav, M., T. Wagener and H. Gupta. 2007. Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins. *Advances in Water Resources*, 30: 1756–1774.
26. Yilmaz, K.K., H.V. Gupta and T. Wagener. 2008. A process-based diagnostic approach to model evaluation: application to the NWS distributed hydrologic model. *Water Resources Research*, 44: W09417.
27. Zhang, H., G.H. Huang, D. Wang and X. Zhang. 2011. Multi-period calibration of a semi-distributed hydrological model based on hydroclimatic clustering. *Advances in Water Resources*, 34(10): 1292–1303.

## Evaluation the efficiency of flow duration curve based and statistical criteria objective functions in calibrating hydrological model

Aboalhasan Fathabadi<sup>\*1</sup> and Vahid Anamoradi<sup>2</sup>

Assistant Professor, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Iran and  
<sup>2</sup>BSc, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Iran

Received: 06 July 2020

Accepted: 18 January 2021

### Abstract

In hydrological models, in order to better model the runoff process, it is necessary to calibrate the model using observational data. In the process of calibration of hydrological models, in addition to the quality of observation data and the optimization algorithm, the objective function also affects the efficiency of the model. In most studies, statistical criteria such as NSE and RMSE are used as objective functions in the calibration process of hydrological models. Given the structure of the model and the relationships used in each of the evaluation criteria, each of them has good performance in simulating a part of the hydrograph. One of the important parameters of each basin, which is a kind of basin reaction indicator for different discharge values, is the Flow Continuity Curve (FDC). In this study, the efficiency of objective functions based on flow continuity curve and statistical objective functions in optimizing the parameters of the HBV hydrological model in Ziyarat Watershed of Golestan Province was investigated and compared. After introducing input data to model using DDS algorithm, model was calibrated 100 times for each objective function. When model was calibrated, using optimized parameter sets model output for calibration and validation period was obtained. Results showed that criteria such as NSE and KGE have better performance in predicting high flows, criteria such as RMSE and AME predicted moderate flow discharge better and criteria based on FDC had better performance in predicting low flows. In prediction different parts of hydrograph FDC objective function has the best performance, RMSE and MAE were in sound order and NSE and KGE did not have suitable performance.

**Keywords:** Flow duration curve, HBV model, High flow, Low flow, Optimizing

---

\* Corresponding author: fathbabadi@ut.ac.ir