



Uncertainty of Flood Forecasts via Ensemble Precipitation Forecasts of Seven NWP Models for Spring 2019 Golestan Flood

A. Saedi¹, B. Saghafian^{2*}, and S. Moazami³

Abstract

Nowadays, much effort has been made in improving meteorological forecasts. In this regard, ensemble forecasting systems have been developed to reduce forecast uncertainties. In this study, the performance of ensemble precipitation forecasts of seven numerical models in 2019 Gorganroud floods was studied. Initially, the precipitation forecasts of the seven numerical models were bias-corrected via gamma quantile mapping method. Then ensemble streamflow forecasts were obtained by ensemble precipitation of seven models using the GR4J conceptual rainfall-runoff model. Moreover, four optimization methods were used to determine optimal GR4J model parameters in calibration phase. Based on the optimized parameters, ensemble streamflow forecasts were performed with precipitation forecasts inputs while uncertainty of the models was analyzed based on inputs to the hydrological model. The results showed that the bias correction had a great impact on the improvement of flood forecast in the study basin such that the uncertainty bands of the ECMWF, NCMRWF and UKMO models well covered the observed flood values. P-factor and R-factor values of the ECMWF model was 0.5 and 0.96, respectively; however, the upper and lower bands of ECMWF model was symmetrical. The NCEP and CMA models had poorer performance in flood forecast compared with other models so that their P-factor values were 0.2 and 0.15, respectively. The JMA model overestimated the 2019 flood. Although the ECCC model bands covered 65% of the observed flood values, the gap between the upper and lower bands was quite high. Overall, the results of a number of NWP models in the study basin were satisfactory and their application is generally recommended for flood warning systems.

Keywords: Ensemble Forecasting, Bias Correction, Flood Forecasting, Uncertainty Analysis, Golestan.

Received: January 18, 2020

Accepted: May 9, 2020

تحلیل عدم قطعیت پیش‌بینی سیل با پیش‌بینی گروهی بارش ۷ مدل عددی برای سیل گلستان در بهار ۱۳۹۸

عادلہ ساعدی^۱، بهرام ثقفیان^{۲*} و صابر معظمی^۳

چکیده

امروزه پیشرفت‌های زیادی در زمینه بهبود پیش‌بینی‌های هواشناسی صورت گرفته است. در همین راستا سیستم پیش‌بینی گروهی برای کاهش عدم قطعیت‌های پیش‌بینی ایجاد شده است. در این تحقیق، عملکرد هفت مدل عددی پیش‌بینی گروهی بارش در پیش‌بینی سیل ابتدای سال ۱۳۹۸ در زیرحوضه سالیان از حوضه آبریز گرگانرود، بررسی شد. در ابتدا، پیش‌بینی‌های گروهی بارش با روش نگاشت گاما تصحیح آریبی شدند. سپس پیش‌بینی‌های گروهی جریان با پیش‌بینی بارش هفت مدل به کمک مدل بارش-رواناب مفهومی GR4J بدست آمد. هم‌چنین جهت محاسبه پارامترهای بهینه برای واسنجی مدل GR4J، چهار روش بهینه‌سازی استفاده شد و براساس پارامترهای بهینه بدست آمده، پیش‌بینی‌های گروهی جریان با پیش‌بینی‌های بارش انجام شد و در انتها عدم قطعیت مدل‌های عددی براساس ورودی به مدل هیدرولوژیکی بررسی گردید. نتایج تحقیق نشان داد که تصحیح آریبی تاثیر زیادی در بهبود پیش‌بینی سیل در حوضه سالیان دارد و باندهای عدم قطعیت مدل‌های ECMWF، NCMRWF و UKMO مقادیر سیل مشاهداتی را بخوبی پوشش دادند، بطوریکه مقدار P-factor و R-factor مدل ECMWF بترتیب برابر با ۰/۵ و ۰/۹۶ بود اگرچه باندهای بالا و پایین این مدل تقارن خوبی نداشتند. مدل‌های NCEP و CMA نسبت به سایر مدل‌ها، مهارت کمتری در پیش‌بینی سیل داشتند و مقدار P-factor آنها بترتیب برابر با ۰/۲ و ۰/۱۵ بود. مدل JMA سیل گرگان را خیلی دست بالا برآورد نمود. مدل ECCC با اینکه ۶۵ درصد مقادیر سیل مشاهداتی را پوشش داده بود ولی فاصله بین باندهای بالا و پایین آن زیاد بود. در مجموع نتایج برخی مدل‌ها برای این حوضه رضایت‌بخش بود و استفاده از آنها برای سیستم هشدار سیل توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی: پیش‌بینی گروهی، تصحیح آریبی، پیش‌بینی سیل، تحلیل عدم قطعیت، گلستان.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۱۰/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۲/۲۰

1- Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: b.saghafian@gmail.com

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran.

*- Corresponding Author

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر، اسلامشهر، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

۵ مرکز با ضرایب وزنی یکسان ایجاد شد. بارش‌ها به سه کلاس کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی شدند و نتایج نشان داد که نمرات ارزیابی بترتیب از بارش کم تا سنگین کاهش یافت و معیار ضرایب وزنی یکسان نیاز به بررسی بیشتری دارد. (Alfieri et al. (2014)، سیستم هشدار سیل اروپا (EFAS) را که از خروجی مدل‌های ECMWF و DWD^۵ استفاده می‌کند ارزیابی کردند و نتایج نشان داد که عملکرد مدل‌ها بطور قابل توجهی برای حوضه‌هایی با مساحت کمتر از ۳۰۰ کیلومتر مربع به‌واسطه دست‌پایین‌گرفتن رواناب در نواحی کوهستانی کاهش می‌یابد. (Bennett et al. (2014) یک سیستم پیوسته پیش‌بینی گروهی هیدرولوژیکی (SCHEF) برای ۹ حوضه استرالیا با پیش‌بینی‌های NWP ایجاد کردند. پس‌پردازش پیش‌بینی‌های NWP با روش BJP^۶ صورت گرفت و برای مدلسازی هیدرولوژیکی از مدل بارش رواناب GR4H^۷ استفاده شد. نتایج نشان داد که SCHEF بخوبی جریان رودخانه را بخصوص برای افق زمانی ۱ تا ۶ روز پیش‌بینی می‌کند. (Zomerdijsk (2015) به بررسی توسعه سیستم پیش‌بینی سیلاب گروهی در Quzhou در شرق چین برای افق زمانی ۱ تا ۱۰ روز و ارزیابی پیش‌بینی سیلاب با پیش‌بینی‌های بارش از چهار مرکز هواشناسی شامل NCEP، ECMWF، UKMO^۹ و CMA^{۱۰} می‌پردازد و مدل هیدرولوژیکی یکپارچه GR4J^{۱۱} برای پیش‌بینی سیلاب بکار برد. پیش‌بینی‌های گروهی بارش با روش نگاشت چندک اصلاح شدند و نتایج نشان داد همه مدل‌ها توانایی خوبی در پیش‌بینی سیلاب دارند ولی مدل ECMWF دارای بهترین مهارت و مدل CMA کمترین مهارت را کسب کرد. (Thiemig et al. (2015) به بررسی توانایی سیستم پیش‌بینی سیلاب آفریقا (AFFS) براساس پیش‌بینی‌های ECMWF پرداختند و نتایج نشان داد AFFS تا ۷۰ درصد سیلاب‌ها را بدرستی پیش‌بینی کرده است. (Matsueda and Nakazaw (2015) با ساخت سیستم هشدار سریع از چهار مدل پیش‌بینی عددی گروهی عملیاتی UKMO، NCEP، ECMWF و JMA^{۱۲} از پایگاه داده TIGGE، احتمال پیش‌بینی وقوع حوادث شدید آب و هوایی در هر مدل را بررسی کردند. مطالعات موردی متعدد در خصوص این سیستم نشان داده که این محصولات با موفقیت رویدادهای شدید، از جمله موج گرمای روسیه در سال ۲۰۱۰، سیل پاکستان در سال ۲۰۱۰ و طوفان سندی در سال ۲۰۱۲ پیش‌بینی کردند. (Cai et al. (2019) تحلیل عدم قطعیت بر روی پیش‌بینی‌های بارش چهار مرکز از پایگاه داده TIGGE در حوضه رودخانه هائوی در چین برای فصل سیلابی انجام دادند. آن‌ها یک مدل جدید با کمک احتمالات فازی و تئوری بیزین برپایه GPDF^{۱۳} برای تحلیل عدم قطعیت پیشنهاد دادند و نتیجه گرفتند که این مدل جدید دارای دقت، قابلیت اطمینان و تیزی بالایی است و عدم قطعیت‌ها با افزایش افق زمانی افزایش می‌یابد و توزیع احتمالاتی بارش تا ۳ روز دقت قابل

پیش‌بینی‌های هواشناسی نقش مهمی در کاربردهای هیدرولوژیکی ایفا می‌کنند. پیش‌بینی احتمال وقوع سیل، فرصتی برای مدیران بحران جهت برنامه‌ریزی برای کاهش خسارات سیل فراهم کرده و به آنها این اجازه را می‌دهد که توزیع آب را مدیریت کنند و آسیب‌های احتمالی را کاهش دهند. بنابراین مدیران نیازمند شاخصی از عدم قطعیت پیش‌بینی هستند تا ریسک‌های مرتبط با تصمیمات مدیریتی را بررسی کنند. امروزه پیشرفت‌های زیادی در جهت بهبود پیش‌بینی‌های هواشناسی صورت گرفته است که یکی از موارد پیشرفت، پیش‌بینی‌های عددی هستند. پیش‌بینی عددی هواشناسی (NWP)^۱ مقادیری هستند که با حل معادلات حاکم بر جو به کمک روش‌های عددی سه‌بعدی برای مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف تولید می‌شوند. بهبود پیش‌بینی‌های عددی بارش هدف اصلی مراکز پیش‌بینی و یک چالش اساسی برای جوامع تحقیقاتی آب و هواشناسی است. ضعف مدل‌های NWP در توصیف دقیق فرآیندهای جو و همچنین خطاهای تصادفی اجتناب‌ناپذیر در حل معادلات عددی باعث می‌شود مدل‌های NWP در پیش‌بینی‌های جوی دارای عدم قطعیت باشند. از آنجایی که داده‌های مدل‌های عددی هواشناسی جهت پیش‌بینی جریان به مدل هیدرولوژیکی وارد می‌شوند، نتیجه جریان شبیه‌سازی شده نیز تحت تأثیر دقت این داده‌ها قرار می‌گیرد. بنابراین نتایج مدل NWP عدم قطعیت قابل توجهی را به مدل هیدرولوژیکی تحمیل می‌کنند. با درک محدودیت‌های پیش‌بینی قطعی در حالت‌های جو و با تغییر در شرایط اولیه، روش‌های پیش‌بینی گروهی برای بهبود توانایی پیش‌بینی‌های عددی و احتمالاتی ایجاد شدند. مقصود از پیش‌بینی‌های گروهی، پیش‌بینی‌های منفرد متعدد که با پارامترسازی فیزیکی مختلف و یا شرایط اولیه متفاوت ایجاد شده‌اند، است (Swinbank et al., 2016). یکی از مسائل مهم در استفاده از پیش‌بینی‌های گروهی بارش در مدل هیدرولوژیکی، پرداختن به عدم قطعیت ورودی است. تحقیقات گسترده‌ای درخصوص کاربرد پیش‌بینی‌های گروهی در کاربردهای هیدرولوژیکی انجام شده است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌گردد. (Thirel et al. (2008) توانایی‌های دو سیستم پیش‌بینی گروهی ECMWF^۲ و PEARP^۳ برای پیش‌بینی گروهی جریان رودخانه برای کل فرانسه را بررسی کردند و نتایج نشان داد که پیش‌بینی گروهی جریان براساس داده PEARP برای سیلاب و حوضه‌های کوچک بهتر و براساس داده ECMWF برای حوضه‌های بزرگ و جریان‌های کم، مهارت بهتری دارد. (He et al. (2010) با استفاده از داده‌های هواشناسی TIGGE^۴ یک سیستم هشدار سیل برای بالادست حوضه رودخانه هائوی چین ایجاد کردند. هم‌چنین یک گروه بزرگ (Grand ensemble) از این

۲- روش انجام کار و مطالعه موردی

۲-۱- مشخصات حوضه تحقیق و داده‌های پیش‌بینی

رودخانه اصلی حوضه سالیان، سالیان تپه یا حبیب ایشان است. این رودخانه از به هم پیوستن رودخانه‌های قره‌سوی رامیان، سیاه‌جوب، زرین‌گل و کبول‌وال تشکیل و در مجاورت روستای حبیب ایشان بعد از سد گرگان به گرگان‌رود می‌ریزد. حوضه آبریز این رودخانه تا ایستگاه هیدرومتری باغه سالیان در حدود ۱۸۰۰ کیلومتر مربع است. ۱۱ ایستگاه باران‌سنجی سازمان هواشناسی که مشخصات و جانمایی آن‌ها در حوضه براساس مختصات UTM در شکل ۱ آمده، برای بارش، ایستگاه هیدرومتری باغه سالیان برای مقادیر دبی مشاهداتی و ایستگاه سینوپتیکی علی‌آباد کنترل برای دما انتخاب شدند. هم‌چنین داده‌های بارش ۱۱ ایستگاه باران‌سنجی و ایستگاه هیدرومتری سالیان با آزمون آماری من-کندال برای وجود روند در داده‌ها بررسی شدند و نتایج نشان داد مقادیر p-value در تمامی ایستگاه‌ها بالاتر از ۰/۰۵ بدست آمد که نشان از عدم وجود روند در داده‌های مشاهداتی دارد و مقدار شیب sens در تمامی ایستگاه‌ها تقریباً صفر بود. آزمون غیرپارامتری pettitt برای تست همگنی یازده ایستگاه باران‌سنجی نیز اجرا شد و تغییر قابل توجهی در سری‌های زمانی بارش مشاهده نشد.

داده‌های پیش‌بینی گروهی بارش از هفت مرکز ECMWF, UKMO, NCEP, JMA, ECCC, NCMRWF و CMA در پایگاه داده TIGGE برای حوضه سالیان با رزولوشن ۵۰ کیلومتر استخراج شدند که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ آمده است.

چون مقادیر پیش‌بینی در مرکز نقطه شبکه‌های پیش‌بینی قرار دارد و فاصله این نقاط از هم ۵۰ کیلومتر است و با مختصات مکانی ایستگاه‌های باران‌سنجی متفاوت است، لذا برای یک ارزیابی درست از پیش‌بینی‌های عددی، نیاز است این داده‌ها به محل ایستگاه‌های مشاهداتی زمینی درون‌یابی شوند. روش‌های مختلفی برای درون‌یابی وجود دارد ولی براساس تجربه موفق تحقیقات مشابه (Ye et al., 2016; Aminyavari et al., 2018) از روش درون‌یابی معکوس فاصله وزنی (IDW^{۱۷}) استفاده شد. روش IDW یک روش درون‌یابی غیرخطی است که از میانگین وزنی مقادیر پیش‌بینی در نزدیکی ایستگاه موردنظر استفاده می‌کند. وزن مرکز هر سلول و مقدار بارش پیش‌بینی شده در محل ایستگاه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$z(x) = \frac{\sum w_i z_i}{\sum w_i}, \quad w_i = \frac{1}{d^n} \quad (1)$$

که w وزن مرکز هر سلول نسبت به محل ایستگاه، d فاصله مرکز هر سلول نسبت به محل ایستگاه و z مقدار پیش‌بینی بارش در مرکز هر سلول و n توان درون‌یابی است که عدد ۲ انتخاب شد.

قبولی برای تحلیل ریسک سیلاب دارد. در ارزیابی پیش‌بینی‌های گروهی بارش پایگاه داده TIGGE برای ایران، Aminyavari et al. (2018) پیش‌بینی‌های سه مرکز ECMWF, UKMO و NCEP از پایگاه داده TIGGE در هشت گروه بارشی متفاوت ایران بررسی کردند و نتایج نشان داد ECMWF در بیشتر مناطق، UKMO در مناطق کوهستانی و NCEP در حاشیه خلیج فارس عملکرد بهتری دارند. (Javanmard et al. 2018) به ارزیابی داده‌های بارش پیش‌بینی شده مدل‌های عددی جهانی پایگاه TIGGE و بهبود آن‌ها با استفاده از روش نگاشت چندک در حوضه کارون پرداختند. در ارزیابی داده‌های خام مدل عددی ECMWF بهترین و مدل CMC بدترین عملکرد نسبت به دیگر مدل‌ها داشتند. هم‌چنین ارزیابی داده‌های تصحیح‌اریبی شده، نشان از بهبود شاخص‌های ارزیابی نسبت به قبل از استفاده این روش دارد. (Aminyavari et al. 2018) داده‌های پیش‌بینی پایگاه داده TIGGE در حوضه بشار با ترکیب دو روش نگاشت چندک و مدل میانگین‌گیری بیزین پس‌پردازش کردند و نتیجه گرفتند که مهارت مدل‌های پیش‌بینی برای حوضه بشار افزایش یافته و هیستوگرام VR بدست آمده از هر مدل، توزیع یکنواختی داشت. هم‌چنین پیش‌بینی ترکیبی BMA مهارت بالاتری نسبت به مدل‌های منفرد دارد. (Aminyavari et al. 2019) عملکرد سه مدل عددی ECMWF, UKMO و NCEP و تخمین‌های ماهواره‌ای GPM^{۱۴} برای سه واقعه سیلابی شدید بهار ۲۰۱۹ در کل ایران بررسی کردند و نتایج نشان داد به لحاظ مقدار بارندگی، تخمین‌های ماهواره و به لحاظ توزیع مکانی مدل UKMO تخمین‌های بارش بهتری نسبت به بقیه داشتند. هم‌چنین عملکرد مدل NCEP با افزایش آستانه بارشی، کاهش یافت و در مجموع مدل ECMWF وقایع بارشی در آستانه‌های مختلف ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌متر در روز را با POD بهتر و نسبت هشدار اشتباه کمتری تخمین زده است. در این تحقیق پیش‌بینی‌های گروهی بارش هفت مرکز ECMWF, UKMO, NCEP, ECCC, JMA, NCMRWF^{۱۶} و CMA از پایگاه داده TIGGE برای حوضه سالیان استخراج و با روش نگاشت چندک گاما تصحیح‌اریبی گردید. سپس، پیش‌بینی‌های گروهی بارش تصحیح‌اریبی شده به عنوان ورودی وارد مدل بارش-رواناب G4RJ شدند و تحلیل عدم‌قطعیت بر روی پیش‌بینی‌های گروهی سیل حوضه آبریز سالیان انجام شد. به لحاظ نوآوری، تاکنون تحقیقی در خصوص تصحیح‌اریبی پیش‌بینی‌های گروهی بارش هفت مدل عددی با روش نگاشت چندک گاما و تحلیل عدم‌قطعیت بر روی پیش‌بینی‌های گروهی سیل برای حوضه آبریز سالیان در سال ۱۳۹۸ انجام نشده است.

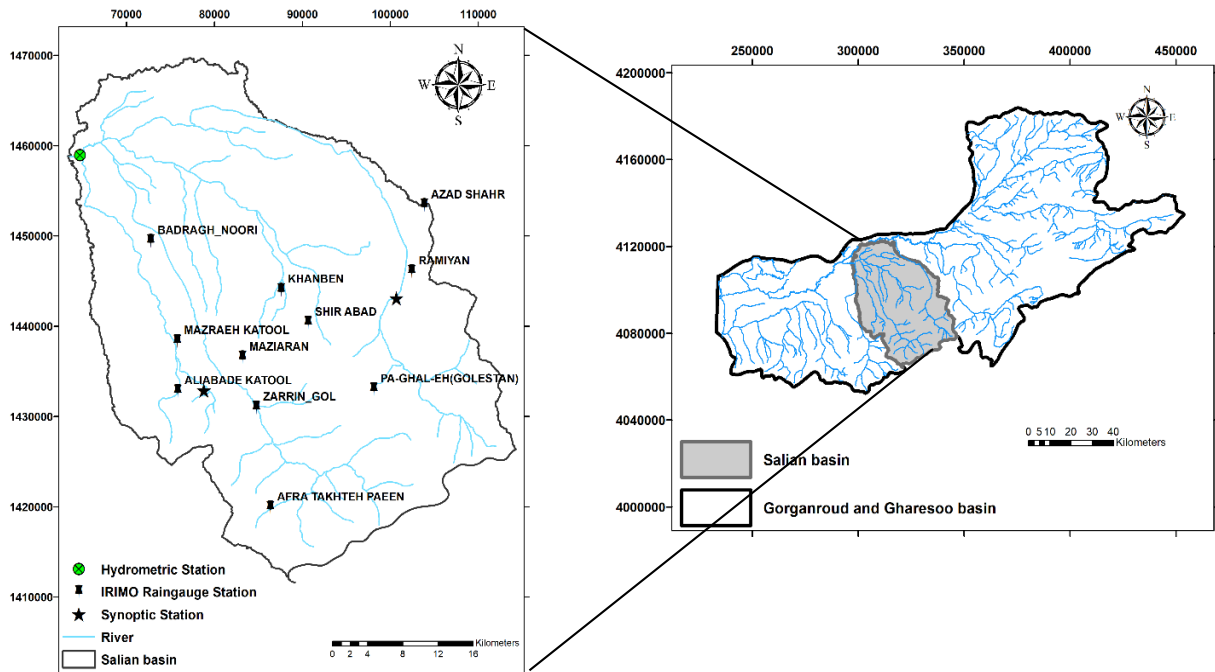


Fig. 1- Layout of rain gauge of Research Basin
 شکل ۱- جانمایی ایستگاه‌های باران‌سنجی در حوضه تحقیق

Table1- Specifications of seven NWP models in TIGGE database
 جدول ۱- مشخصات هفت مدل NWP در پایگاه داده TIGGE

Center	Base Time (UTC)	No. of Ensemble Members	Horizontal Resolution Archived	Forecast Length (day)	Initial Perturbation Method
ECMWF	00/12	50	N320(~0.28°)N160(~0.56°)	0-10 10-15	EDA-SVINI
NCEP	00/06/12/18	20	1.0°×1.0°	0-16	BV-ETR
UKMO	00/12	17	0.83°×0.56°	0-15	ETKF
CMA	00/12	14	0.56°×0.56°	0-10	BV
JMA	00/12	26	1.25°×1.25°	0-11	SV
ECCC	00/12	20	1°×1°	0-16	EKF
NCMRWF	00/06/12/18	11	0.25°×0.25°	0-10	ETKF

مهم‌ترین عوامل، فرسایش خاک در اثر بهره‌برداری بی‌رویه از جنگل‌ها و بارش ممتد باران و رها ساختن آب از پشت سدها، سبب جاری شدن سیل در آستانه نوروز ۱۳۹۸ در دو استان شمالی ایران شد. در این تحقیق اکثر زیرحوضه‌های گرگان‌رود مورد بررسی قرار گرفت و بهترین زیر حوضه به لحاظ داده‌های آماری موجود و نتایج واسنجی، زیر حوضه سالیان بود که برای ارزیابی عملکرد مدل‌های عددی در پیش‌بینی سیل این حوضه انتخاب شد. شکل ۲ هیدروگراف سیل مورد مطالعه این حوضه را نشان می‌دهد. زمان شروع این هیدروگراف ۲۶ اسفند ۱۳۹۷ می‌باشد. پیک این سیلاب با مقدار ۷۵/۶ مترمکعب بر ثانیه در تاریخ اول فروردین ۹۸ ایجاد شد که این مقدار پیک به مدت ۶ ساعت (۸ صبح تا ۱۴ بعدازظهر) تداوم داشت. حجم سیلاب ایجاد شده

در این تحقیق هر چهار گرید پوینت در اطراف یک ایستگاه انتخاب شده و براساس فاصله قطری که با ایستگاه موردنظر دارند وزنی به آنها داده شد و در رابطه بالا قرار گرفتند و مقدار بارش پیش‌بینی شده در ایستگاه منتخب محاسبه گردید. این مرحله برای هر ۷ مدل در طول سال‌های موردبررسی برای هر روز با تمام عضوهای پیش‌بینی گروهی انجام شد.

۲-۱-۱- مشخصات سیل تحقیق

در تاریخ ۲۶ اسفند ۱۳۹۷ بر اثر بارندگی‌های شدید در استان‌های شمالی ایران، از جمله گلستان و مازندران و خراسان شمالی، سیل جاری شد. عوامل زیادی در ایجاد سیل مورد بحث دخیل بوده ولی از

۷۵/۳۲ میلیون مکعب بود. براساس گزارش آب منطقه‌ای گلستان مقدار حجم بارش در این حوضه در حدود ۲۵۰ میلی‌متر بود که در بررسی آماری انجام شده طی پنجاه سال اخیر در این حوضه چنین سیلابی سابقه نداشته است.

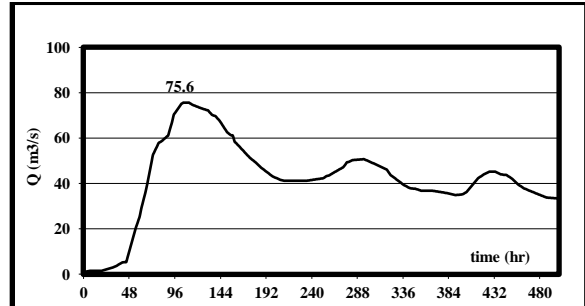


Fig. 2- Flood hydrograph of Research Basin

شکل ۲- هیدروگراف سیل حوضه تحقیق

۲-۲- تصحیح آریبی با روش نگاشت چندک گاما

بیشتر پیش‌بینی‌های گروهی بارش دارای خطای آریبی هستند و تصحیح آنها لازم است. آریبی بر دو نوع است آریبی غیر شرطی یا سیستماتیک و آریبی شرطی. منظور از آریبی سیستماتیک اختلاف بین میانگین پیش‌بینی‌ها و مشاهدات در دوره مورد بررسی است و کاربرد نقشی در ایجاد آن ندارد ولی آریبی شرطی براساس حدآستانه‌هایی که توسط خود کاربر اعمال شده ایجاد می‌گردد. در تصحیح آریبی، هدف اصلاح خطاهای آریبی سیستماتیک است. نگاشت چندک گاما یک نوع تصحیح آریبی آماری است که توسط Piani et al. (2010) ابداع شد. فرض اولیه این روش بر این امر استوار است که داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی هر دو از توزیع آماری گاما پیروی می‌کنند. لازم به ذکر است بارش در بیشتر موارد صفر است و مواقعی که صفر نیست توزیع آن دارای چولگی بالایی است. بنابراین برای این نوع داده‌ها نمی‌توان توزیع نرمال برازش داد. بهترین توزیع برای توصیف این حالت تابع توزیع گاما است (liu et al., 2014). برای اجرای تصحیح آریبی ابتدا تابع توزیع تجمعی (CDF) مشاهدات و پیش‌بینی‌ها براساس تابع توزیع گاما استخراج شده، سپس براساس رابطه زیر، چندک‌هایی (Q_n) از CDF پیش‌بینی استخراج و مقادیر بارش جدید از CDF مشاهداتی براساس چندک‌های بدست آمده محاسبه می‌گردد:

$$BC_{fcst} = CDF_{obs}^{-1}(CDF_{fcst}(Fcst)) = CDF_{obs}^{-1}(Q_n) \quad (2)$$

برای اجرای روش نگاشت چندک گاما از پکیج hyfo (Xu, 2015) نرم‌افزار R کمک گرفته شد. دوره آموزش داده‌ها برای تصحیح آریبی از اول مهر تا ۱۵ اسفند ۱۳۹۷ در نظر گرفته شد و داده‌های پیش‌بینی از ۱۵ اسفند ۱۳۹۷ تا ۱۵ فروردین ۱۳۹۸ براساس تابع برازش داده شده در دوره آموزش، تصحیح آریبی شدند. این کار برای هر عضو

پیش‌بینی گروهی برای هر مدل عددی جداگانه انجام شد. به عبارتی عمل تصحیح آریبی براساس ستون سوم جدول ۱ (تعداد اعضای پیش‌بینی گروهی)، ۱۵۸ بار ($50+20+17+14+26+20+11$) برای هر روز اجرا گردید.

۲-۳- شبیه‌سازی جریان

برای پیش‌بینی جریان رودخانه باغه سالیان در سال‌های مورد بررسی از مدل بارش-رواناب یکپارچه پیوسته مفهومی GR4J استفاده و اجرای این مدل در پکیج airGR در R انجام شد (Coron et al., 2016). این مدل براساس تحقیقات معتبر (Thiemig et al., 2011; Defrance et al., 2014; Zomerdijk, 2015; Thibout et al., 2017; Wijayarathne and Coulibaly, 2020) در زمینه پیش‌بینی سیل انتخاب شد. ورودی‌های اصلی این مدل بارش، دما و پتانسیل تبخیر و تعرق هستند که باید بصورت میانگین درحوضه وارد مدل شوند. برای محاسبه مقادیر میانگین ورودی‌های موردنیاز در سطح حوضه سالیان، از روش چندضلعی‌های تیسن استفاده شد. ابتدا مقادیر بارش مشاهداتی و پیش‌بینی‌های هر هفت مدل در ۱۱ ایستگاه منتخب این حوضه با روش چندضلعی‌های تیسن درون‌یابی شدند. این کار برای هر عضو پیش‌بینی گروهی برای ۱۱ ایستگاه بصورت جداگانه انجام شد. بعد از آماده‌سازی داده‌های بارش، دبی و پتانسیل تبخیر و تعرق حوضه سالیان، براساس روزهای مشترک این مقادیر باهم ادغام شدند که ۵۱۷۰ روز از تاریخ ۱۱ دی ۱۳۸۰ تا ۳۱ مرداد ۱۳۹۶ برای محاسبه پارامترهای بهینه در دسترس قرار گرفت. برای راه‌اندازی مدل GR4J یک دوره warm up قبل از دوره واسنجی به مدت یکسال در نظر گرفته شد. بدین منظور از تاریخ ۱۱ دی ۱۳۸۰ تا ۱۵ دی ۱۳۸۱ (برخی روزها فاقد داده آماری بودند) به عنوان دوره warm up، از ۱۶ دی ۱۳۸۱ تا ۱۴ اردیبهشت ۱۳۹۳ به عنوان دوره واسنجی و از ۱۵ اردیبهشت ۱۳۹۳ تا ۳۱ مرداد ۱۳۹۶ دوره اعتبارسنجی انتخاب شدند. سپس از پارامترهای بهینه بدست آمده مدل برای پیش‌بینی سیل با پیش‌بینی‌های عددی بارش هفت مرکز از تاریخ ۲۶ اسفند ۱۳۹۷ تا ۱۵ فروردین ۱۳۹۸ استفاده شد. مدل GR4J دارای ۴ پارامتر برای اجرای پیش‌بینی جریان است که باید بهینه این پارامترها در دوره واسنجی محاسبه و در دوره اعتبارسنجی آزمایش شوند. پارامتر X_1 بیانگر حداکثر ظرفیت خاک حوضه است. ظرفیت خاک مانند مخزنی است که از بارش پر و با پتانسیل تبخیر و تعرق خالی می‌گردد. پارامتر X_2 تأثیر آب زیرزمینی بر مخزن روندیابی را نشان می‌دهد که اگر عددی مثبت بدست آید بیانگر ورود آب زیرزمینی به داخل مخزن روندیابی است و عدد منفی بیانگر کاهش ارتفاع مخزن روندیابی و ورود به داخل آب زیرزمینی است. عدد منفی نشان می‌دهد بخشی از بارندگی در این حوضه وارد آب زیرزمینی می‌گردد. پارامتر X_3 بیانگر ظرفیت مخزن

روندیابی است و پارامتر X_4 مقدار زمان پایه هیدروگراف واحد برای روندیابی است. در این تحقیق برای محاسبه پارامترهای بهینه در دوره واسنجی از چهار روش بهینه سازی استفاده شد که شامل الگوریتم بهینه سازی میشل (که در مدل GR4J موجود است)، الگوریتم تکامل دیفرانسیلی یا DE^{18} ، الگوریتم ارتقاء یافته ازدحام ذرات یا PSO^{19} و الگوریتم زنجیره های $MA-LS^{20}$ می باشد.

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_i) \quad , \quad s_i = |h_i - 0.5| \quad , \quad h_i = \frac{X_u - X_{obs}}{X_u - X_l} \quad (5)$$

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i) \quad (6)$$

$$t_i = \left(\frac{|(X_u - X_{obs})^3 + (X_l - X_{obs})^3|}{(X_u - X_l)^3} \right)^{\frac{1}{3}}$$

در انتها نیز از متوسط دامنه انحراف نسبی (RD) (Xiong et al., 2010) برای محاسبه عددی اختلاف واقعی بین مسیر متشکل از نقاط میانی باندهای پیش بینی و هیدروگراف مشاهداتی استفاده شد. RD از رابطه ۷ محاسبه می گردد:

$$RD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (rd_i) \quad , \quad rd_i = \frac{\frac{1}{2}(X_u + X_l) - X_{obs}}{X_{obs}} \quad (7)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج واسنجی مدل GR4J

برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل بارش و رواناب GR4J و محاسبه پارامترهای بهینه، از داده های مشاهداتی روزانه حوضه سالیان شامل دبی، بارش و دما در بین سال های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۶ استفاده و پارامترهای بهینه از ۴ روش بهینه سازی محاسبه گردید. شاخص RMSE برای معیار هدف بهینه سازی استفاده شد. پارامترهای بهینه برای هر ۴ حالت براساس جدول ۲ بدست آمدند. همانطور که در جدول مشخص است در تمامی روش ها پارامترهای تقریباً یکسانی محاسبه شد.

دبی های شبیه سازی شده با پارامترهای بهینه براساس معیارهای RMSE، نسبت اریبی دبی های شبیه سازی شده و مشاهداتی در میانگین و انحراف معیار، شاخص نش-ساتکلیف و مقدار ضریب همبستگی R^2 برای دو حالت واسنجی و اعتبارسنجی ارزیابی گردید که در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که واضح است نتایج نسبتاً خوبی در حالت اعتبارسنجی بدست آمد.

۲-۴- تحلیل عدم قطعیت

از روش های مهم تحلیل عدم قطعیت، محاسبه باندهای بالا و پایین عدم قطعیت خروجی مدل براساس تغییر در سناریوهای ورودی و سپس محاسبه دو معیار P-factor و R-factor است و یکی از مزایای پیش بینی گروهی بارش، ایجاد سناریوهای مختلف ورودی به مدل پیش بینی جریان است و به راحتی می توان این دو باند را از بین خروجی ها استخراج کرد. در این تحقیق عضوهای پیش بینی گروهی که بیشترین و کمترین پیش بینی سیل را انجام دادند به عنوان باندهای بالا و پایین انتخاب شدند. P-factor معیاری است که بیان می کند چند درصد مشاهدات در داخل باندهای عدم قطعیت قرار گرفتند و مقدار ایده آل آن زمانی است که تمامی مشاهدات در داخل این دو باند قرار گیرند یعنی مقدار این معیار برابر با یک باشد. R-factor معیاری است از تقسیم میانگین فاصله باندهای بالا و پایین عدم قطعیت بر انحراف معیار داده های مشاهداتی نرمال شده بدست می آید. این معیار از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$R - Factor = \frac{\bar{d}_x}{s} \quad (3)$$

که S انحراف معیار داده های مشاهداتی و \bar{d}_x عرض متوسط باندهای عدم قطعیت است و از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\bar{d}_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_u - X_l) \quad (4)$$

که X_u داده های باند بالا و X_l داده های باند پایین و N تعداد متغیرهای مشاهداتی است. نمره ایده آل این معیار مقدار صفر است و هرچه این مقدار بیشتر باشد نشان دهنده بالا بودن عدم قطعیت مدل است. همچنین برای ارزیابی نامتقارنی باندهای پیش بینی نسبت به

Table 2- Optimized parameters obtained in four optimization methods

جدول ۲- پارامترهای بهینه بدست آمده در چهار روش بهینه سازی

Optimization algorithms	X1 (mm)	X2 (mm/d)	X3 (mm)	X4 (d)
airGR	391.937	-19.52	122.983	2.48
DE	387.927	-19.802	123.833	2.484
PSO	388.205	-19.763	123.727	2.482
MA-LS	387.258	-19.769	123.594	2.509

را ثبت کردند که با توجه به میانگین دبی مشاهداتی ۱/۹۵ میلی‌متر در روز عملکرد بسیار خوبی دارد و بالعکس مدل JMA بعد از تصحیح اریبی، محدوده خطاهای پیش‌بینی خیلی گسترده شده و بین ۰/۵ تا ۳ میلیمتر متغیر بود.

۳-۳- نتایج تحلیل عدم قطعیت

در این بخش باندهای بالا و پایین پیش‌بینی گروهی جریان هر مدل عددی براساس بیشترین و کمترین عضو پیش‌بینی رسم شدند. همچنین مقادیر P-factor و R-factor برای بررسی عدم قطعیت‌های هر مدل در داخل این شکل‌ها قرار داده شده است. در شکل ۵، باندهای بالا و پایین مدل CMA، پایین‌تر از مشاهدات قرار داشتند و تنها ۱۵ درصد مشاهدات در بین باندهای عدم قطعیت قرار گرفتند گرچه نسبت به سایر مدل‌ها R-factor بهتری داشت. براساس شکل ۶، باندهای بالا و پایین مدل ECMWF بخوبی مشاهدات را احاطه کردند بطوریکه ۵۰ درصد مشاهدات در بین این دو باند قرار داشتند. همچنین پهنای عدم قطعیت این مدل کمتر از بیشتر مدل‌ها بود که نشان از عملکرد بهتر این مدل دارد. در شکل ۷ گرچه ۵۵ درصد مشاهدات در بین باندهای بالا و پایین مدل JMA قرار داشتند اما پهنای عدم قطعیت این مدل خیلی زیاد است. در شکل ۸، تنها ۲۰ درصد مشاهدات داخل باندهای بالا و پایین مدل NCEP بودند با اینکه پهنای بین این دو باند نسبتاً کم بود. در شکل ۹، ۵۵ درصد مشاهدات در بین باندهای بالا و پایین مدل UKMO قرار داشتند و پهنای عدم قطعیت این مدل نسبتاً خوب بود. در شکل ۱۰، گرچه ۶۵ درصد مشاهدات در بین باندهای بالا و پایین مدل ECCO قرار داشتند ولی فاصله بین این دو باند از همه مدل‌ها بیشتر بود. در شکل ۱۱، مدل NCMRWF هند، عملکرد بسیار خوبی در تحلیل عدم قطعیت داشت و ۶۵ درصد مشاهدات بین باندهای بالا و پایین بود با اینکه این دو باند فاصله نسبتاً کمی از هم داشتند.

نتایج ارزیابی عدم قطعیت با سه شاخص دیگر در جدول ۴ آمده است. براساس معیارهای ارزیابی نامتقارنی باندهای پیش‌بینی شامل S و T، مدل‌های UKMO و NCMRWF کمترین نامتقارنی نسبت به مشاهدات را داشتند و دو مدل NCEP و CMA ضعیف‌ترین عملکرد را در این بخش نشان دادند. براساس شاخص دامنه نسبی RD، مدل NCMRWF بهترین و مدل NCEP ضعیف‌ترین نمرات را کسب کرد. مدل ECMWF گرچه براساس RD، اختلاف کمی با مشاهدات نسبت به مدل‌های دیگر دارد، ولی باندهای پیش‌بینی آن تا حد زیادی نسبت به مشاهدات نامتقارن است.

شکل ۳ مقادیر دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای مدل GR4J را برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهد. همانطور که در شکل‌ها مشخص است در بیشتر سال‌ها دبی اوج بخوبی مدل شدند. همچنین مقادیر بارش، نمودار پراکندگی، تابع فرکانس تجمعی و تغییرات ماهانه بارش و دبی در این شکل‌ها نشان داده شده است. نمودار پراکندگی این دو شکل نیز بیان می‌کند که همبستگی نسبتاً خوبی بین دبی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در دبی‌های بالا وجود دارد. البته به دلیل وجود اعداد تکراری در دبی‌های کم مشاهداتی، نقاط در بخشی از نمودار پراکندگی بصورت قائم درآمده است. در دوره اعتبارسنجی نیز نتایج شبیه‌سازی دقت کافی را دارد و سیل شدید بهار ۱۳۹۵ در این منطقه بخوبی شبیه‌سازی شد. از تابع فرکانس تجمعی که تعداد احتمالات متجاوز از یک آستانه مشخص را بیان می‌کند نیز استفاده شد که براساس شکل مقادیر شبیه‌سازی شده با مشاهدات همخوانی دارد. همچنین تغییرات دبی ماهانه شبیه‌سازی شده مطابقت خوبی با مقادیر مشاهداتی در هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی دارد. پس از واسنجی مدل GR4J برای حوضه سالیان، از پیش‌بینی‌های بارش گروهی هفت مدل در دو حالت خام و تصحیح اریبی شده به عنوان داده‌های ورودی بارش به این مدل بارش-رواناب در یک بازه زمانی بیست روزه (۲۶ اسفند ۹۷ تا ۱۵ فروردین ۹۸) استفاده گردید. لازم به ذکر است که هر عضو پیش‌بینی برای هر مدل عددی به عنوان یک ورودی بارش جداگانه وارد مدل GR4J شد و یک هیدروگراف سیل از آن به دست آمد.

۳-۲- نتایج پیش‌بینی گروهی جریان هفت مدل عددی بارش

در این بخش ابتدا تمامی پیش‌بینی‌های عددی بارش با تمام گروه‌های پیش‌بینی هفت مدل با روش نگاشت چندک گاما تصحیح اریبی شدند. ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش استفاده شد و ۳۰ درصد باقیمانده براساس تابع برازش شده در دوره آموزش تصحیح اریبی شدند. براساس پارامترهای بهینه بدست آمده در بخش قبل، پیش‌بینی جریان با ورودی مدل‌های پیش‌بینی عددی بارش در دو حالت خام و تصحیح اریبی شده انجام شد. شکل ۴ نتایج ارزیابی پیش‌بینی‌های گروهی جریان برای هفت مدل عددی با معیار RMSE را نشان می‌دهد. چون هر مدل عددی، پیش‌بینی‌های مختلفی براساس عضوهای پیش‌بینی گروهی داشتند از نمودار جعبه‌ای برای نمایش محدوده نتایج استفاده شد. براساس این شکل تمامی مدل‌ها بعد از تصحیح اریبی بهبود قابل توجهی یافتند. براساس شکل ۴، مدل ECMWF با ۵۰ عضو پیش‌بینی گروهی، با اینکه بیشترین پیش‌بینی جریان را نسبت به سایر مدل‌ها دارد ولی کمترین تغییرات بین نتایج ارزیابی در این مدل مشاهده شد و تقریباً تمامی ۵۰ عضو پیش‌بینی مقدار خطای ۰/۴ تا ۰/۶ میلی‌متر

Table 3- Streamflow simulation results with observational data on calibration and validation periods

جدول ۳- نتایج شبیه‌سازی جریان با داده‌های مشاهداتی در دوره واسنجی و اعتبارسنجی

	RMSE (mm/day)	BIAS _{sd}	BIAS _{mean}	NSC	R ²
Calibration	0.17	0.93	0.8	0.76	0.83
Validation	0.20	0.51	0.5	0.53	0.55

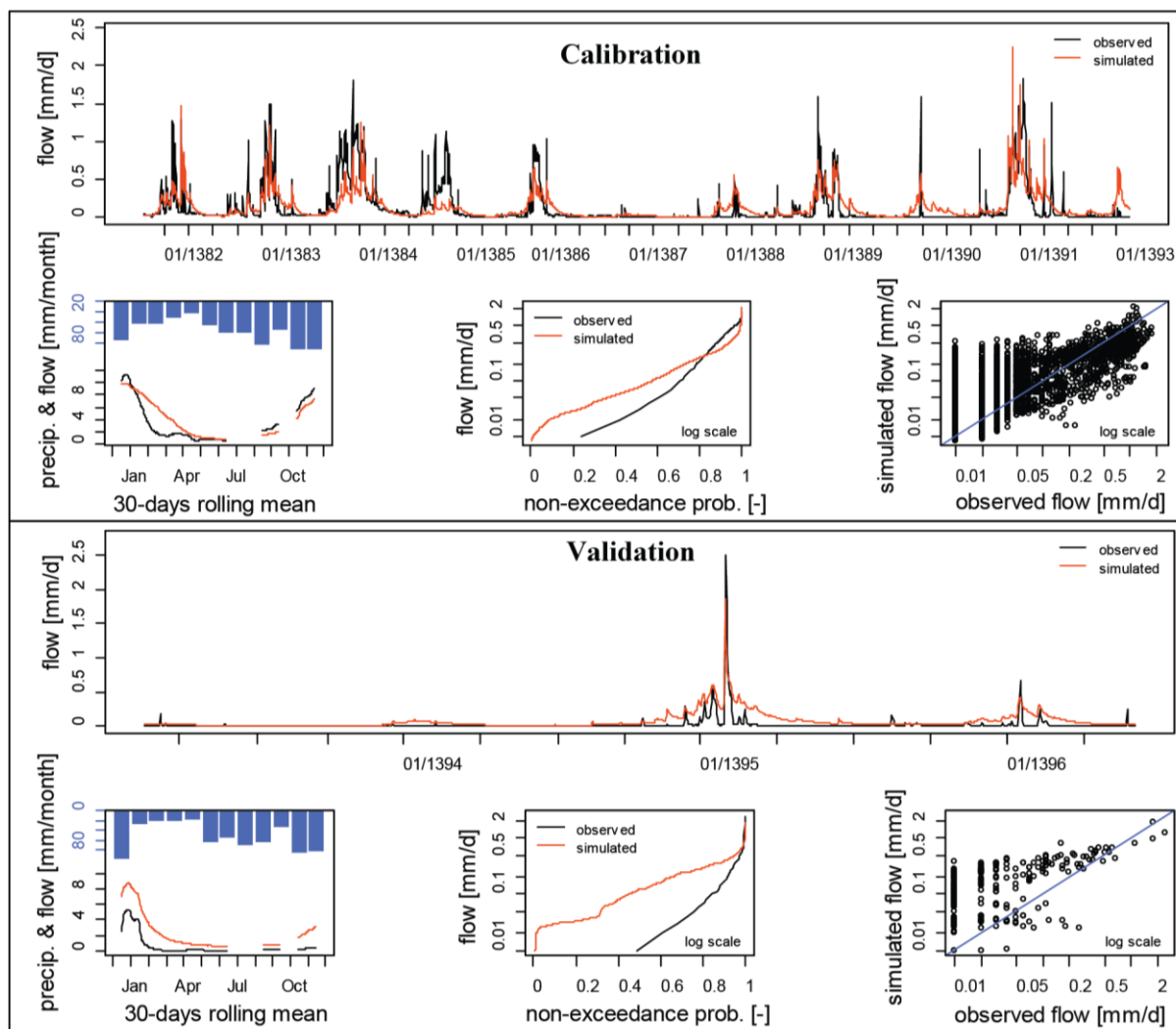


Fig. 3- Flow rate, flow regime, cumulative frequency function and scatter plot during the calibration and validation period

شکل ۳- دبی، رژیم جریان، تابع فرکانس تجمعی و نمودار پراکندگی در دوره واسنجی و اعتبارسنجی

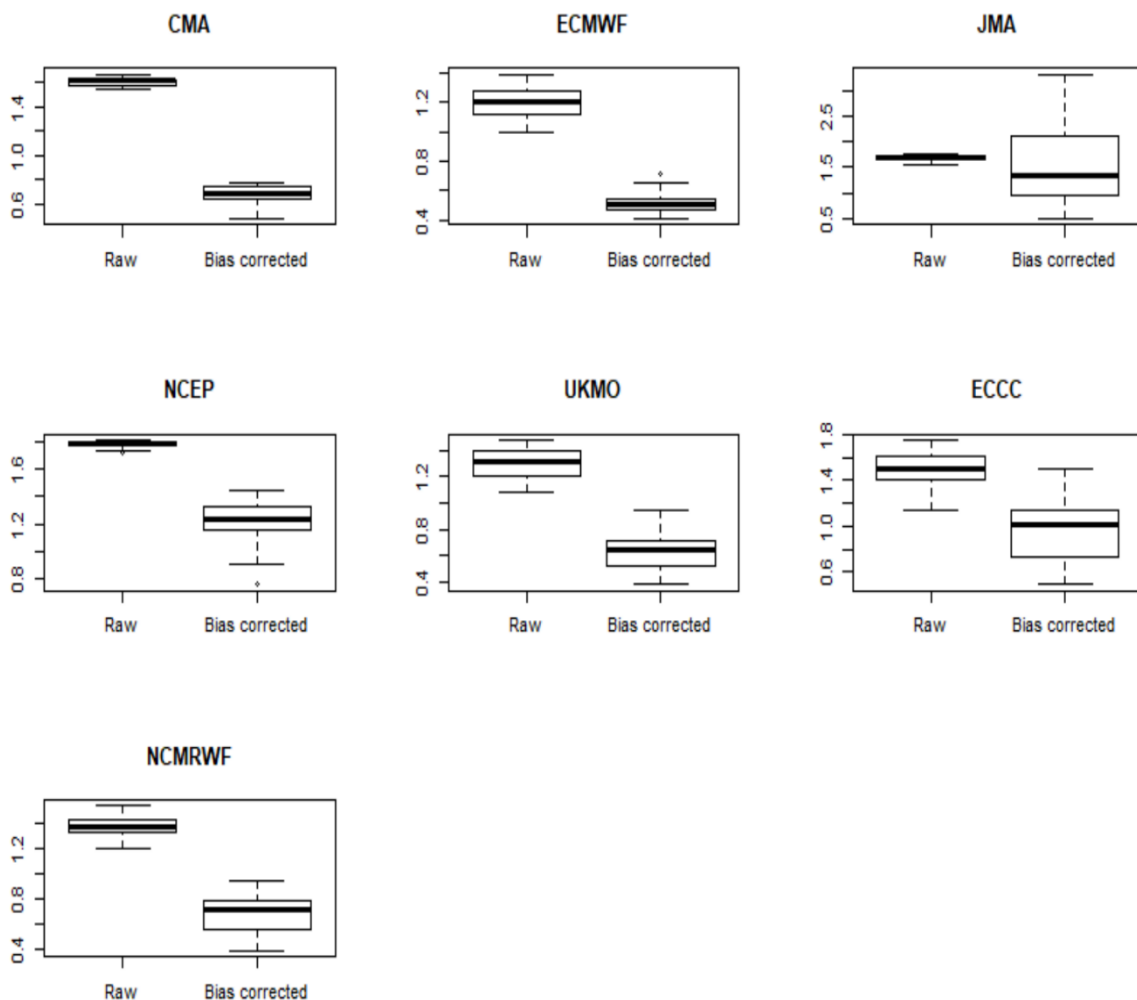


Fig. 4- RMSE boxplots for ensemble streamflow forecasts in two raw and bias-corrected precipitation modes
 شکل ۴- نمودارهای جعبه‌ای RMSE پیش‌بینی گروهی جریان در دو حالت خام و تصحیح‌اریبی شده بارش

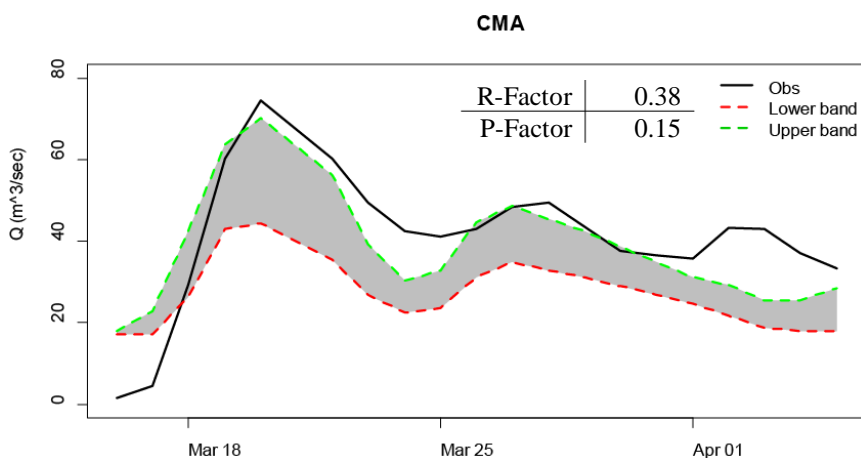


Fig. 5- Bands of uncertainty for ensemble streamflow forecast by CMA model in Bias-corrected mode
 شکل ۵- باندهای عدم قطعیت پیش‌بینی گروهی جریان مدل CMA در حالت تصحیح‌اریبی شده

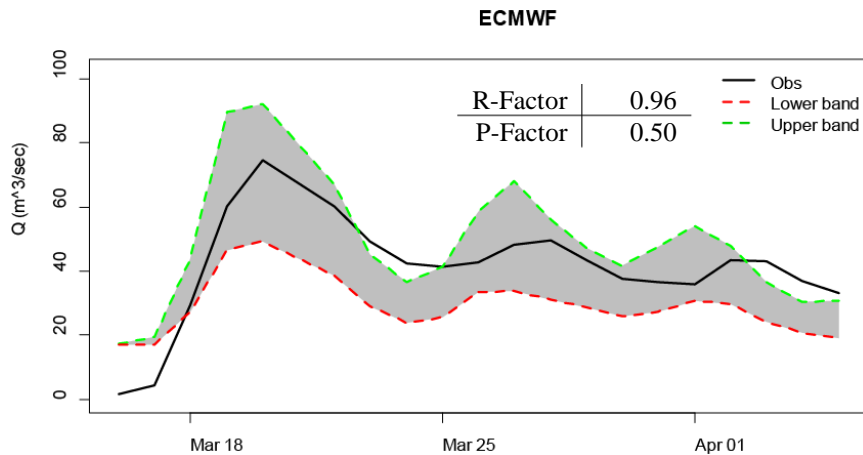


Fig. 6- Bands of uncertainty for ensemble streamflow forecast by ECMWF model in Bias-corrected mode
 شکل ۶- باندهای عدم قطعیت پیش‌بینی گروهی جریان مدل ECMWF در حالت تصحیح اریبی شده
 JMA

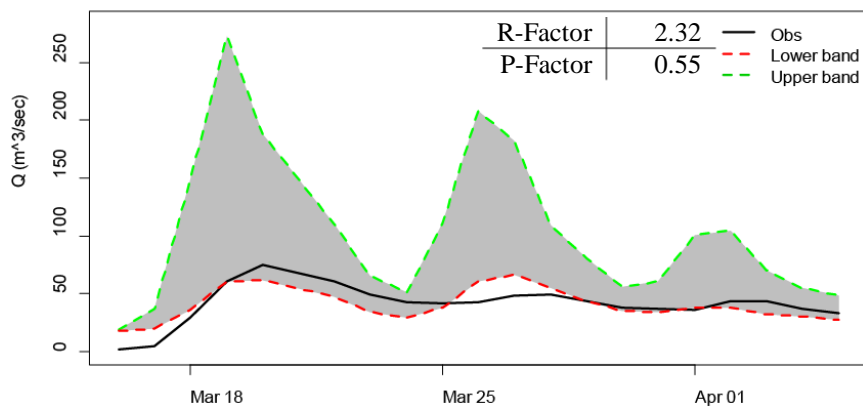


Fig. 7- Bands of uncertainty for ensemble streamflow forecast by JMA model in Bias-corrected mode
 شکل ۷- باندهای عدم قطعیت پیش‌بینی گروهی جریان مدل JMA در حالت تصحیح اریبی شده
 NCEP

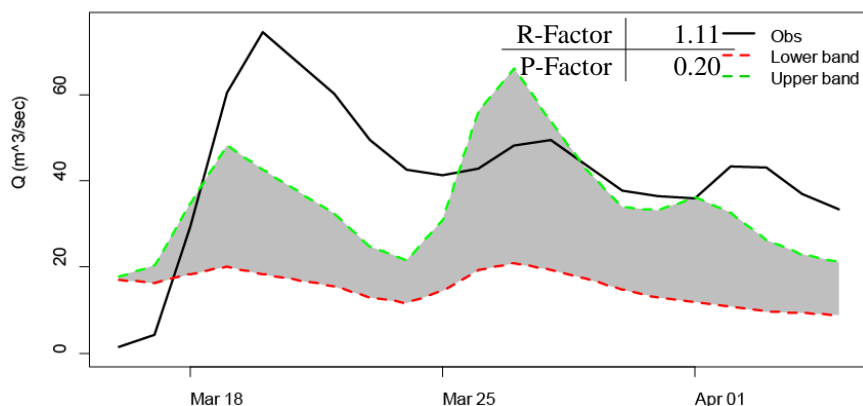


Fig. 8- Bands of uncertainty for ensemble streamflow forecast by NCEP model in Bias-corrected mode
 شکل ۸- باندهای عدم قطعیت پیش‌بینی گروهی جریان مدل NCEP در حالت تصحیح اریبی شده

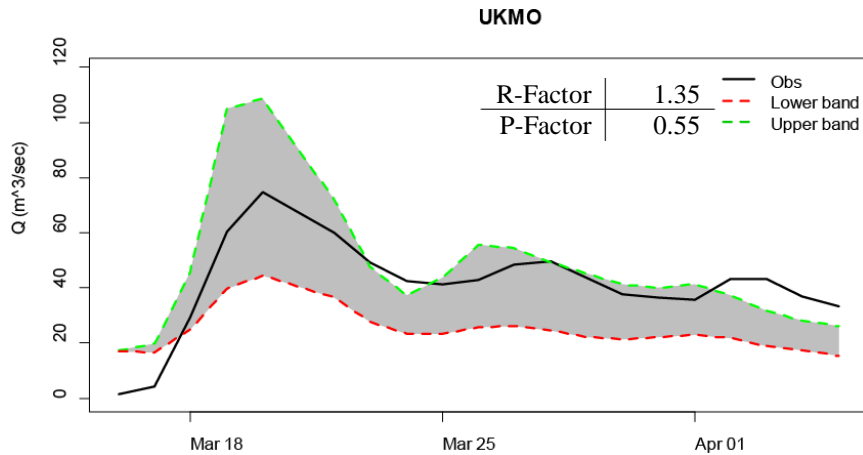


Fig. 9- Bands of uncertainty for ensemble streamflow forecast by UKMO model in Bias-corrected mode
 شکل ۹- باندهای عدم قطعیت پیش‌بینی گروهی جریان مدل UKMO در حالت تصحیح‌اریبی شده

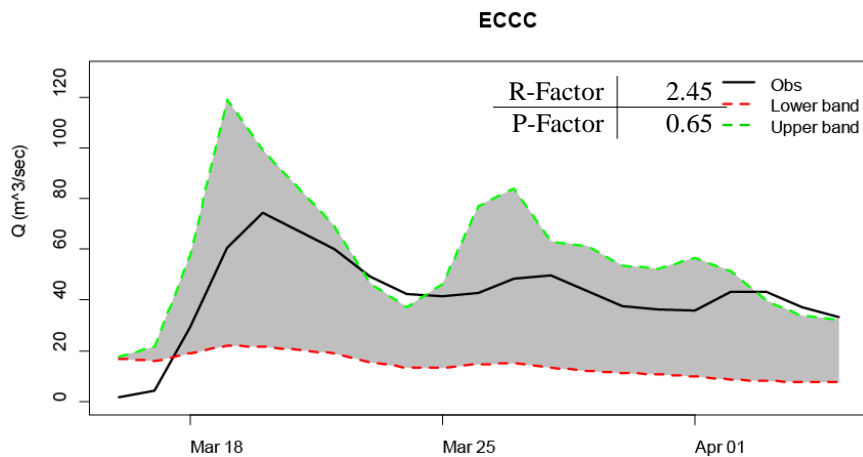


Fig. 10- Bands of uncertainty for ensemble streamflow forecast by ECCC model in Bias-corrected mode
 شکل ۱۰- باندهای عدم قطعیت پیش‌بینی گروهی جریان مدل ECCC در حالت تصحیح‌اریبی شده

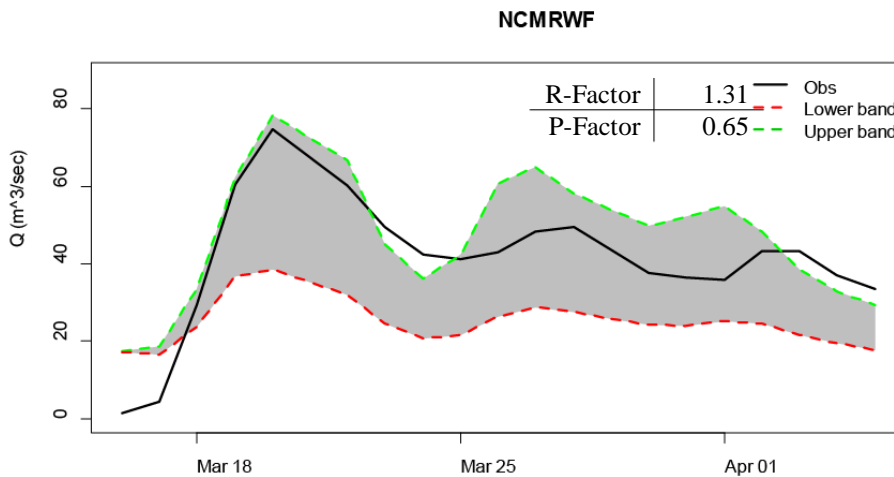


Fig. 11- Bands of uncertainty for ensemble streamflow forecast by NCMRWF model in Bias-corrected mode
 شکل ۱۱- باندهای عدم قطعیت پیش‌بینی گروهی جریان مدل NCMRWF در حالت تصحیح‌اریبی شده

Table 4- Uncertainty assessment results by different criteria

جدول ۴- نتایج ارزیابی عدم قطعیت با معیارهای مختلف

	P-factor	R-factor	S	T	RD
CMA	0.15	0.38	7.4	3.16	0.96
ECMWF	0.5	0.96	4.6	6.09	0.84
JMA	0.55	2.32	1.84	2.66	1.23
NCEP	0.2	1.11	5.16	6.74	1.06
UKMO	0.55	1.35	0.8	1.34	0.89
ECCC	0.65	2.45	4.34	5.81	0.92
NCMRWF	0.65	1.31	0.86	1.42	0.83

۳. مدل‌های ECMWF و UKMO بعد از تصحیح اریبی بهترین عملکرد و مدل NCEP بدترین عملکرد را داشت.
۴. مدل JMA بعد از تصحیح اریبی، مقادیر سیل حوضه را خیلی دست بالا تخمین زد.
۵. مدل‌های ECMWF، NCMRWF، UKMO و ECCC بخوبی باندهای بالا و پایین مشاهدات را پوشش دادند.
۶. باندهای پیش‌بینی مدل‌های NCMRWF و UKMO فواصل نسبتاً یکسانی نسبت به مشاهدات داشتند در حالی که نامتقارنی باندهای مدل ECMWF نسبت به این دو مدل خیلی زیاد بود.

در مجموع دو مدل NCMRWF و UKMO براساس شاخص‌های ارزیابی عدم قطعیت، بهترین نمرات را کسب کردند.

در مجموع براساس تحلیل عدم قطعیت به ترتیب مدل‌های NCMRWF، UKMO، ECMWF، ECCC، CMA، JMA و NCEP قرار می‌گیرند.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Numerical Weather Prediction
- 2- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
- 3- Prévision d'Ensemble Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle
- 4- THORPEX Interactive Grand Global Ensemble
- 5- Deutscher Wetterdienst
- 6- Generalized Probability Density Function
- 7- Global Precipitation Measurement
- 8- Environment and Climate Change Canada
- 9- National Centre for Medium Range Weather Forecasting
- 10- Inverse Distance Weighting
- 11- Differential Evolution
- 12- Particle Swarm Optimization
- 13- Memetic Algorithm-Local Search

۵- مراجع

- Alfieri L, Pappenberger F, Wetterhall F, Haiden T, Richardson D, and Salamon P (2014) Evaluation of ensemble streamflow predictions in Europe. *Journal of Hydrology* 517:913-922
- Aminyavari S, Saghafian B, and Delavar M (2018) Evaluation of TIGGE ensemble forecasts of precipitation in distinct climate regions in Iran. *Advances in Atmospheric Sciences* 35(4):457-468
- Aminyavari S, Saghafian B, and Delavar M (2018) Post-processing numerical precipitation forecasting models output of TIGGE database using Bayesian Model Averaging (BMA). *Iran-Water Resources Research* 14(4):239-252 (In Persian)
- Aminyavari S, Saghafian B, and Sharifi E (2019) Assessment of precipitation estimation from the NWP models and satellite products for the spring

۴- جمع‌بندی

در این تحقیق براساس اهمیت سیلاب‌هاب گلستان در اواخر سال ۱۳۹۷، حوضه‌های مختلف این استان مورد بررسی قرار گرفت و براساس نتایج واسنجی و اعتبارسنجی، حوضه سالیان انتخاب گردید. ۱۱ ایستگاه باران‌سنجی سازمان هواشناسی در این حوضه انتخاب و مقادیر پیش‌بینی‌های بارش گروهی هفت مدل عددی ECMWF، UKMO، NCEP، JMA، ECCC، NCMRWF و CMA با روش IDW به داخل ایستگاه‌ها درون‌یابی شدند. سپس با کمک نگاشت چندک گاما، پیش‌بینی‌های چهار مدل عددی بارش تصحیح اریبی انجام شد. در ادامه پیش‌بینی جریان رودخانه با مدل مفهومی بارش- رواناب GR4J انجام شد. در ابتدا پارامترهای بهینه مدل با محدوده اعمال شده با چهار روش بهینه‌سازی محاسبه و با معیار هدف مجذور میانگین مربعات خطا و براساس داده‌های مشاهداتی بارش و دبی در طول ۱۷ سال این حوضه بدست آمد. سپس با کمک پارامترهای بهینه، شبیه‌سازی جریان با ورودی‌های مختلف بارش پیش‌بینی شده از هفت مدل شامل پیش‌بینی‌های گروهی خام، تصحیح اریبی شده انجام و با هم مقایسه شدند و در انتها تحلیل عدم قطعیت بر روی پیش‌بینی‌های سیل خروجی صورت گرفت. نتیجه‌گیری که از پیش‌بینی سیل حوضه سالیان می‌توان گرفت به شرح زیر است:

۱. پارامترهای بهینه بدست آمده مدل GR4J از چهار روش بهینه‌سازی مورد استفاده تقریباً یکسان بودند.
۲. پیش‌بینی جریان مدل‌های عددی در حالت خام قابل قبول نبودند ولی بعد از تصحیح اریبی با روش نگاشت چندک گاما، بهبود قابل توجهی داشتند.

- Piani C, Haerter JO, and Coppola E (2010) Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theoretical and Applied Climatology* 99(1-2):187-192
- Swinbank R, Kyouda M, Buchanan P, Froude L, Hamill TM, Hewson TD, Keller JH, Matsueda M, Methven J, Pappenberger F, ... and Yamaguchi M (2016) The TIGGE project and its achievements. *Bulletin of the American Meteorological Society* 97(1):49-67
- Thiboult A, Anctil F, and Ramos MH (2017) How does the quantification of uncertainties affect the quality and value of flood early warning systems?. *Journal of Hydrology* 551:365-73
- Thiemig V, De Roo A, and Gadain H (2011) Current status on flood forecasting and early warning in Africa. *Intl. J. River Basin Management* 9(1):63-78
- Thiemig V, Bisselink B, Pappenberger F, and Thielen J (2015) A Pan-African medium-range ensemble flood forecast system. *Hydrology and Earth System Sciences* 19(8):3365-3385
- Thirel G, Rousset-Regimbeau F, Martin E, and Habets F (2008) On the impact of short-range meteorological forecasts for ensemble streamflow predictions. *Journal of Hydrometeorology* 9(6):1301-1317
- Xiong L, Wan MI, Wei X, O'connor KM (2009) Indices for assessing the prediction bounds of hydrological models and application by generalised likelihood uncertainty estimation/Indices pour évaluer les bornes de prévision de modèles hydrologiques et mise en œuvre pour une estimation d'incertitude par vraisemblance généralisée. *Hydrological Sciences Journal* 54(5):852-71
- Xu Y (2015) Hyfo: hydrology and climate forecasting R package for data analysis and visualization.
- Wijayarathne DB and Coulibaly P (2020) Identification of hydrological models for operational flood forecasting in St. John's, Newfoundland, Canada. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 27:100646
- Ye J, Shao Y, Li Z (2016) Flood forecasting based on TIGGE precipitation ensemble forecast. *Advances in Meteorology* 1-9
- Zomerdijk L (2015) Performance of multi-model ensemble combinations for flood forecasting. University of Twente
- 2019 severe floods in Iran. *Remote Sensing* 11(23):2741-2760
- Bennett JC, Robertson DE, Shrestha DL, Wang QJ, Enever D, Hapuarachchi P, and Tuteja NK (2014) A System for Continuous Hydrological Ensemble Forecasting (SCHEF) to lead times of 9 days. *Journal of Hydrology* 519:2832-2846
- Cai C, Wang J, and Li Z (2019) Assessment and modelling of uncertainty in precipitation forecasts from TIGGE using fuzzy probability and Bayesian theory. *Journal of Hydrology* 577:123995
- Coron L, Perrin C, and Michel C (2016) airGR: Suite of GR hydrological models for precipitation-runoff modelling. R Package Version 1.0.1 (<http://webgr.irstea.fr/modeles/?lang=en>)
- Defrance D, Javelle P, Organde D, Ecrepont S, Andréassian V (2017) Using damage reports to assess different versions of a hydrological early warning system. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union* 11:4365-4401
- Giordani A, Zappa M, and Rotach MW (2020) Estimating ensemble flood forecasts' uncertainty: A novel "Peak-Box" approach for detecting multiple peak-flow events. *Atmosphere* 11(1):2
- He Y, Wetterhall F, Bao H, Cloke H, Li Z, Pappenberger F, Hu Y, Manful D, Huang Y (2010) Ensemble forecasting using TIGGE for the July–September 2008 floods in the Upper Huai catchment: A case study. *Atmospheric Science Letters* 11(2):132-138
- Javanmard GM, Delavar M, and Morid S (2018) Medium-term forecast evaluation of TIGGE numerical weather prediction models for karun basin. *Iran-Water Resources Research* 14(3):1-12 (In Persian)
- Liu Y, Duan Q, Zhao L, Ye A, Tao Y, Miao C, Mu X, and Schaake JC (2013) Evaluating the predictive skill of post-processed NCEP GFS ensemble precipitation forecasts in China's Huai river basin. *Hydrological Processes* 27(1):57-74
- Matsueda M and Nakazawa T (2015) Early warning products for severe weather events derived from operational medium-range ensemble forecasts. *Meteorological Applications* 22(2):213-222