

**Web site:**

<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

Email:

iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

Vol. 13
No. 1 (49)

Received:
2023-01-06

Accepted:
2023-04-17

Pages: 93-110



Uncertainty Evaluation due to TIGGE Global System Precipitation Data for Flood Forecasting

Soudabeh Behiyan Motlagh¹, Afshin Honarbakhsh^{2*} and Asghar Azizian³

- 1) PhD Student in Watershed Management, Department of Natural Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord
 - 2) Associate Professor, Department of Natural Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord
 - 3) Associate Professor, Water Sciences and Engineering Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin
- *Corresponding Author Email: afshin.honarbaksh@gmail.com

Abstract:

Background and Aim: The occurrence of frequent floods in Iran necessitates a flood forecasting and warning system with a suitable lead time. The use of numerical rainfall forecasting models in flood forecasting and warning is one of the important measures taken by researchers in most parts of the world. The TIGGE database includes mid-term precipitation forecasts simulated by global forecast centers. The purpose of this research is to evaluate the efficiency and the degree of uncertainty caused by the rainfall forecasts of four numerical models of the TIGGE database (including CPTEC, ECCC, ECMWF, and KMA) for simulating floods with the HEC-HMS hydrological model.

Methods: In this research, the precipitation data of seven meteorological stations were used to evaluate the uncertainty of discharge from TIGGE database precipitation prediction models in the Poldokhtar watershed. Also, three flood events on March 24, 2017, April 6, 2018, and April 15, 2018, were studied. At first, precipitation forecasts were extracted from four centers CPTEC, ECCC, ECMWF, and KMA. Due to the existence of systematic error in the forecasts, a bias correction was done on them, and to correct the bias, the Delta method was used. Processed and raw forecasts of four rainfall forecasting models were entered into the HEC-HMS model for flood forecasting, and in the next step, the flow uncertainty assessment of the HEC-HMS model was performed in all members of the four rainfall forecasting models. In this research, 5 factors P, R, S, T, and RD were used for uncertainty analysis.

Results: The results indicate the significant superiority of the ECMWF model in predicting precipitation events. The use of all 4 rainfall sources led to an acceptable simulation of the flood peak flow in three different events. Also, the predicted peak discharge time had little difference from the observed data. According to the results of the uncertainty analysis, the ECMWF model was considered the best model based on P, R, S, T, and RD factors. The KMA model performed well in severe and very severe floods. The group prediction system of TIGGE models also had an acceptable performance in all events. Also, the hydrological-meteorological prediction model predicted the time of flood occurrence and the probability of occurrence well.

Conclusion: The intended research investigates flood forecasting and warning in the Poldokhtar watershed using the meteorological-hydrological system, based on meteorological forecasts of the TIGGE database and flood simulation using the HEC-HMS hydrological model. The final product of this system is probable discharge and flood forecast. The results reveal the success of the TIGGE database in flood forecasting. The ECMWF model excelled in predicting peak discharge. The upper and lower band calculation method was used to determine the uncertainty, which showed the uncertainty well. This system displayed the time of peak discharge well and with a small time delay, which indicates its good performance. The predicted rainfall from the four centers used in this study (ECMWF, ECCC, CPTEC, and KMA) have significant differences. To reduce these differences, we used a multi-model group forecasting system that had encouraging results.

Keywords: Ensemble prediction system, Flood warning, HEC-HMS model, Numerical precipitation prediction models, TIGGE database



ارزیابی عدم قطعیت ناشی از داده‌های بارش میان مدت سامانه جهانی TIGGE جهت پیش‌بینی سیلاب

سودابه بهیمان مطلق^۱، افشین هنربخش^{۲*} و اصغر عزیزبان^۳

۱) دانشجوی دکتری آبخیزداری، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

۲) دانشیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

۳) دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

ایمیل نویسنده مسئول: afshin.honarbaksh@gmail.com

چکیده:

زمینه و هدف: وقوع سیلاب‌های مکرر در ایران، لزوم یک سامانه پیش‌بینی و هشدار سیل با زمان پیش‌هشدار مناسب را ضروری می‌نماید. استفاده از مدل‌های عددی پیش‌بینی بارش در پیش‌بینی و هشدار سیل از جمله اقدامات مهمی است که توسط محققان در اکثر نقاط جهان به کار برده می‌شود. پایگاه داده TIGGE دربرگیرنده پیش‌بینی‌های میان‌مدت بارش شبیه‌سازی شده توسط مراکز پیش‌بینی جهانی است. هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی کارایی و میزان عدم قطعیت ناشی از پیش‌بینی‌های بارش چهار مدل عددی پایگاه داده TIGGE (شامل ECMWF, ECCO, CPTEC و KMA) برای شبیه‌سازی سیلاب با مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS است.

روش پژوهش: در این تحقیق جهت ارزیابی عدم قطعیت دبی حاصل از مدل‌های پیش‌بینی بارش پایگاه داده TIGGE در حوضه آبخیز پلدختر، از آمار بارش هفت ایستگاه هواشناسی استفاده شد. همچنین سه رویداد سیل ۲۴ اسفند ۱۳۹۷، ۶ فروردین ۱۳۹۸ و ۱۵ فروردین ۱۳۹۸ مورد مطالعه قرار گرفت. در ابتدا پیش‌بینی‌های بارش از چهار مرکز ECMWF, ECCO, CPTEC و KMA استخراج گردید. به دلیل وجود خطای سیستماتیک در داده‌های مورد نظر، تصحیح آریبی روی آن‌ها صورت گرفت و به منظور تصحیح آریبی، از روش Delta استفاده شد. پیش‌بینی‌های پردازش شده و خام چهار مدل پیش‌بینی بارش، جهت پیش‌بینی سیلاب وارد مدل HEC-HMS شده و در مرحله بعد، ارزیابی عدم قطعیت جریان حاصل از مدل HEC-HMS در تمام اعضای چهار مدل پیش‌بینی بارش انجام شد. در تحقیق حاضر برای تحلیل عدم قطعیت از ۵ فاکتور R , P , S , T و RD استفاده گردید. در نهایت احتمال هشدار سیل پیش‌بینی شد.

یافته‌ها: نتایج حاصله حاکی از برتری قابل توجه مدل ECMWF در پیش‌بینی رویدادهای بارش است. استفاده از هر ۴ منبع بارشی، منجر به شبیه‌سازی قابل قبول دبی اوج سیلاب در سه رخداد مختلف شد. همچنین زمان وقوع دبی اوج پیش‌بینی شده اختلاف کمی با داده مشاهده‌ای داشت. با توجه به نتایج تحلیل عدم قطعیت، مدل ECMWF بر اساس فاکتورهای R , P , S , T و RD به‌عنوان بهترین مدل در نظر گرفته شد. مدل KMA در سیلاب‌های شدید و بسیار شدید عملکرد مناسبی داشت. سیستم پیش‌بینی گروهی مدل‌های TIGGE نیز در همه وقایع، عملکرد قابل قبولی داشت. همچنین مدل پیش‌بینی هواشناسی-هیدرولوژیکی زمان وقوع سیل و احتمال وقوع را به‌خوبی پیش‌بینی نمود.

نتایج: تحقیق مورد نظر، پیش‌بینی و هشدار سیل در حوزه آبخیز پلدختر را با استفاده از سیستم هواشناسی-هیدرولوژیکی، بر پایه پیش‌بینی‌های هواشناسی پایگاه داده TIGGE و شبیه‌سازی سیل با استفاده از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS مورد بررسی قرار می‌دهد. محصول نهایی این سیستم، دبی احتمالی و پیش‌بینی سیل است. نتایج حاصله نشان‌دهنده موفقیت پایگاه داده TIGGE در پیش‌بینی سیل است. مدل ECMWF در پیش‌بینی دبی اوج برتری داشت. از روش محاسبه باند بالا و پایین جهت تعیین عدم قطعیت استفاده شد که عدم قطعیت را به‌خوبی نشان داد. این سیستم زمان دبی اوج را به‌خوبی و با تأخیر زمانی اندک نمایش داد که بیانگر عملکرد خوب آن است. بارش پیش‌بینی شده حاصل از چهار مرکز مورد استفاده در این مطالعه (ECMWF, ECCO, CPTEC, KMA) تفاوت‌های قابل توجهی دارند، برای کاهش این تفاوت‌ها از سیستم پیش‌بینی گروهی چند مدلی استفاده نمودیم که نتایج دلگرم‌کننده‌ای داشت.

کلید واژه ها: مدل‌های عددی پیش‌بینی بارش، سیستم پیش‌بینی گروهی، تصحیح آریبی، سامانه پیش‌بینی و هشدار سیل



مقدمه

سیلاب‌های مخرب و شدیدی در مناطق مختلف ایران، در سال‌های اخیر، رخ داده است. به دلیل قرارگرفتن در منطقه آب و هوایی نیمه‌خشک، ایران در طول سال مورد هجوم سیلاب‌های مکرر قرار می‌گیرد. سیلاب‌های سال ۱۳۹۸ بی‌سابقه بود و به‌طور هم‌زمان در چندین نقطه ایران رخ داد که خسارات جانی و مالی فراوانی را در پی داشت. کارشناسان مربوطه راه‌حل‌های متفاوتی را اجرا نمودند. تحقیقات نشان داد که استفاده از روش‌های غیر سازهای نظیر سامانه‌های پیش‌بینی و هشدار سیل در کنار روش‌های سازهای خسارات سیل را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. استفاده از مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا (NWP^۱) جهت کاربرد در سامانه پیش‌بینی و هشدار سیل یکی از راه‌حلهایی است که توسط کارشناسان این حوضه معرفی شده است (Collischonn et al., 2007). این مدل‌ها اجازه پیش‌بینی‌های هواشناسی را از یک روز تا دو هفته می‌دهند و محدودیت‌هایی که در استفاده از سیستم‌های پیش‌بینی فعلی وجود دارد را تا حد زیادی کاهش می‌دهند (Bauer et al., 2015).

پایگاه داده TIGGE بخشی از پروژه THORPEX است که در سال ۲۰۰۳ توسط سازمان جهانی هواشناسی (WMO)، جهت شتاب بخشیدن به بهبود دقت پیش‌بینی‌ها ایجاد گردید. این پایگاه داده از ۱۲ مدل پیش‌بینی عددی گروهی مراکز بین‌المللی استفاده کرده است که پیش‌بینی‌های هواشناسی را از یک روز تا دو هفته انجام می‌دهند. این امر موجب توجه جامعه علمی به پیش‌بینی‌های سیلاب صورت گرفته با مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا شده است.

مطالعات متعددی برای ارزیابی بارش حاصل از مدل‌های عددی پایگاه داده TIGGE انجام شده است. لورت^۲ و همکاران (۲۰۱۶) پیش‌بینی‌های هفت پایگاه داده هواشناسی TIGGE در مقایسه با محصول بارش ماهواره‌ای TMPA و TRMM در غرب آفریقا، ارزیابی نمودند. بارش ماهواره‌ای TMPA و TRMM به‌عنوان بارش مشاهده‌شده در دوره ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲، در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که مدل‌های ECMWF و UKMO عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها داشتند. مطالعه دیگری روی بارش‌های سیل‌آسای ۲۰۱۹ در ایران توسط امین‌یاوری^۳ و همکاران (۲۰۱۹) صورت گرفت در این پژوهش برآورد بارش مدل‌های عددی پایگاه داده TIGGE و بارش ماهواره‌ای IMERG مقایسه شد. نتایج حاکی از برتری مدل‌های عددی بود و مدل ECMWF در همه آستانه‌های بارش پیش‌بینی‌های قابل قبولی داشت.

استفاده از پیش‌بینی‌های گروهی در مدل‌های عددی عدم قطعیت را نسبت به پیش‌بینی‌های منفرد کاهش قابل‌ملاحظه‌ای می‌دهد و پیش‌بینی اولیه را بهبود می‌بخشد (Cloke and

(Pappenberger, 2008). در این راستا مطالعه‌ای توسط رولین^۴ (۲۰۰۷) در دو حوضه در بلژیک انجام شد. آن‌ها سیستم پیش‌بینی هیدرولوژیکی که بر پایه داده‌های پیش‌بینی گروهی ECMWF بود، بررسی نمودند. دوره زمانی مورداستفاده در این پژوهش از نوامبر ۲۰۰۰ تا ژانویه ۲۰۰۶ بود. نتایج حاصله بیانگر مهارت پیش‌بینی‌های گروهی بود. همچنین کریشن‌مورتی^۵ و همکاران (۲۰۰۹) مدل‌های عددی پیش‌بینی گروهی و منفرد بارش پایگاه داده TIGGE در مناطق مستعد سیل در چین را مقایسه نمودند. نتایج حاکی از برتری مدل‌های عددی پیش‌بینی گروهی بود.

پیش‌بینی سیلاب با استفاده از خروجی مدل‌های هیدرولوژیکی بر پایه مدل‌های عددی از گزینه‌های مورد استفاده در مطالعات سیلاب است. در این زمینه تحقیقات گسترده‌ای صورت گرفته که می‌توان به مطالعه بائو^۶ و همکاران (۲۰۱۱) اشاره نمود. در این مطالعه، جهت پیش‌بینی سیل از پیش‌بینی‌های گروهی مراکز (ECMWF, CMA, CMC, NCEP, UKMO) پایگاه داده TIGGE استفاده نمودند. آن‌ها از مدل هیدرولوژیکی Grid-Xinanjiang برای پیش‌بینی سیل استفاده نمودند. نتایج دبی نهایی حاکی از نویدبخش بودن ارتباط مدل Grid-Xinanjiang و پایگاه داده TIGGE در پیش‌بینی سیل بود.

باوجود استفاده از مدل‌های عددی گروهی به‌منظور کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی سیل، عدم قطعیت‌هایی مشاهده می‌گردد. جهت تحلیل عدم قطعیت روش‌های متداول بسیاری وجود دارد ولی تحلیل عدم قطعیت پیش‌بینی سیل بر اساس دبی‌های خروجی از مدل هیدرولوژیکی که به‌صورت گروهی است نیز از روش‌های مهم در این زمینه است. در این روش باندهای بالا و پایین عدم قطعیت از خروجی‌های مدل پیش‌بینی جریان استخراج می‌گردد. ساعدی^۷ و همکاران (۲۰۲۰) از روش مورد نظر در پژوهش خود استفاده نمودند. در این مطالعه عدم قطعیت پیش‌بینی سیل با استفاده از پیش‌بینی گروهی هفت مدل عددی پایگاه داده TIGGE بررسی گردید. تحلیل عدم قطعیت مدل‌های عددی بر اساس ورودی به مدل هیدرولوژیکی GR4J بود. نتایج نشان داد، مدل ECCO بر اساس P-Factor بهترین عملکرد را داشت درحالی‌که پهنای باند عدم قطعیت زیادی داشت.

سیستم پیش‌بینی و هشدار سیل متعددی در حال حاضر در جهان مورداستفاده قرار می‌گیرد از جمله این سیستم‌ها، سرویس پیش‌بینی گروهی هیدرولوژیکی (HEFS) در ایالات‌متحده و سیستم هشدار سیل اروپا (EFAS) است. این سیستم‌ها جهت پیش‌بینی و هشدار سیل از مدل‌های عددی گروهی استفاده نموده است. سیستم‌های پیش‌بینی و هشدار سیل در مقیاس‌های جهانی (Alfieri et al., 2013)، قاره‌ای (Hopson and Thieme et al., 2015) و حوضه‌ای (Thieme et al., 2015)

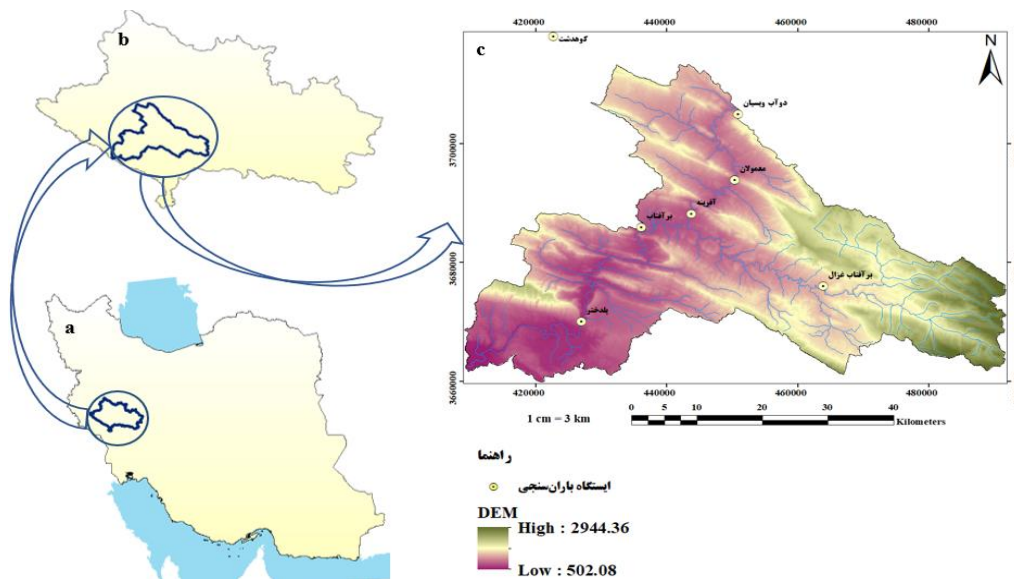
مواد و روش‌ها محدوده مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه، حوزه آبخیز پلدختر از زیر حوضه‌های آبریز کرخه است. این حوضه در استان لرستان و موقعیت ۳۳ درجه و ۷ دقیقه و ۳۳ درجه و ۵۵ دقیقه عرض جغرافیایی شمالی تا ۴۷ درجه و ۵۵ دقیقه و ۴۸ درجه و ۴۳ دقیقه طول جغرافیایی شرقی قرار دارد. بر اساس طبقه‌بندی دومارتن اقلیم حوضه پلدختر نیمه‌خشک محسوب می‌شود. مساحت حوضه مورد مطالعه ۲۰۷۳ کیلومتر مربع است. اکثر کاربری اراضی این حوضه آبخیز، جنگل‌های پراکنده و مرتع است. بخش وسیعی از حوضه از سازند زمین‌شناسی پابده - گورپی و میشان تشکیل شده است. این سازندها از مارن تشکیل شده‌اند. شیب زیاد حوضه و مارن موجود در سازند زمین‌شناسی، منطقه را مستعد فرسایش نموده است. رودخانه این حوضه کشکان رود است که از ارتفاعات گرین در شمال شهرستان الشتر سرچشمه می‌گیرد. این رودخانه در ۲۵ کیلومتری شهر پلدختر در پایین‌تر از روستای چم مهر با رودخانه سیمره تلاقی پیدا کرده و پس از سرازیر شدن رودخانه زال به آن، رودخانه کرخه را تشکیل می‌دهند. از اطلاعات هفت ایستگاه هواشناسی در این مطالعه استفاده گردید. موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده در حوضه در شکل ۱ درج شده است.

داده‌های پیش‌بینی بارش از چهار مرکز ECCC، CPTEC، ECMWF و KMA در پایگاه داده TIGGE برای حوضه پلدختر با تفکیک مکانی مختلف استخراج شدند که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

(Webser, 2010) قابل اجرا هستند. از جمله مطالعات موردی که در این زمینه انجام شده، مطالعه هی^۱ و همکاران (۲۰۰۹) است. آن‌ها یک سیستم هشدار سیل متشکل از چهار مدل عددی پیش‌بینی بارش (JMA، ECMWF، NCEP، UKMO) طراحی نمودند. در تحقیق مورد نظر، احتمال وقوع رویدادهای آب و هوایی شدید بر اساس تابع چگالی احتمال اقلیم‌شناختی در هر مدل پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد که پیش‌بینی‌های گروهی TIGGE برای پیش‌بینی رویدادهای سیل مناسب هستند. همچنین آیزل^۲ و همکاران (۲۰۱۹) یک سیستم پیش‌بینی سیلاب برای روسیه طراحی نمودند. در این پژوهش از مدل عددی ERA-Interim جهت پیش‌بینی بارش و از مدل هیدرولوژیکی GR4J برای شبیه‌سازی سیلاب استفاده شد. سیستم طراحی شده مورد نظر، موفق به پیش‌بینی قابل قبول دبی گردید ولی نتوانست حجم سیل را به درستی پیش‌بینی نماید.

تاکنون در تحقیقات انجام شده، از روش Delta جهت تصحیح ارزیابی مدل‌های عددی گروهی استفاده نشده است همچنین از ترکیب مدل‌های پیش‌بینی گروهی و مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS، به منظور طراحی مدل هواشناسی-هیدرولوژیکی و کاربرد آن در سامانه پیش‌بینی و هشدار سیل مطالعه‌ای صورت نگرفته است. هدف از این پژوهش استفاده از ۴ مدل عددی گروهی موجود در پایگاه داده TIGGE برای پیش‌بینی و هشدار سیل است. برای این منظور، مدل‌های گروهی بارش ECCC، CPTEC، ECMWF و KMA با استفاده از روش Delta تصحیح ارزیابی شدند. سپس پیش‌بینی گروهی بارش به عنوان ورودی مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS در نظر گرفته شدند. همچنین روی پیش‌بینی‌های گروهی جریان، تحلیل عدم قطعیت صورت گرفت.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه، a: موقعیت حوضه در ایران، b: موقعیت حوضه در استان لرستان، c: تغییرات ارتفاعی حوضه پلدختر

جدول ۱. مشخصات مدل‌های پیش‌بینی عددی بارش در پایگاه داده TIGGE

مرکز	تعداد اعضای گروه	وضوح داده خروجی	طول پیش‌بینی (روز)	پیش‌بینی‌ها در روز
CPTEC	15	$0.94^0 \times 0.94^0$	15 day	00/12
ECCC	21	$0.9^0 \times 0.9^0$	16 day	00/12
EMCWF	51	0.75×0.75	15 day	00/12
KMA	17	$1.00^0 \times 1.00^0$	10 day	00/12

مشخصات سیل تحقیق

کشور ایران در منطقه نیمه‌خشک واقع گردیده که در بسیاری از موارد باران به‌صورت متمرکز و سیلابی نازل می‌شود و هر ساله در معرض وقوع سیل قرار دارد. در بهار ۱۳۹۸، سیل‌های بزرگی در مناطق مختلف کشور به‌طور هم‌زمان رخ داد. این رویدادهای سیل از اواخر اسفند ۱۳۹۷ تا اوایل اردیبهشت ۱۳۹۸ اتفاق افتاد. سامانه بارشی اول موجب وقوع سیل در اسفند ۱۳۹۷ شد و بیشتر شمال شرق کشور را درگیر نمود. سامانه بارشی دوم و سوم در فروردین ۱۳۹۸ رخدادهای سیل مهیبی را در غرب و جنوب غرب کشور به وجود آورد. طی این رویداد، ایستگاه هیدرومتری پلدختر دبی بیش از ۵۰۰۰ متر مکعب بر ثانیه را ثبت نمود. سیل خسارت گسترده‌ای به مردم و زیرساخت‌ها وارد کرد و در عین حال باعث سرریز شدن بیشتر سدها گردید (گزارش سیلاب‌های ۱۳۹۸). طبق نظر کارشناسان دلایل بسیاری در وقوع سیل وجود داشته است و از مهم‌ترین عوامل می‌توان به بارش‌های شدید ناشی از تغییر اقلیم، مدیریت نامناسب منابع طبیعی و توسعه شهری اشاره نمود.

پس پردازش بارش پیش‌بینی‌شده

داده‌های خام خروجی مدل‌های پیش‌بینی عددی هواشناسی دارای خطای سیستماتیک هستند بنابراین جهت اصلاح آن باید اقداماتی صورت گیرد. روش تصحیح اریبی که در این مطالعه از آن‌ها استفاده شد، روش Delta است. در ادامه توضیحات بیشتری در رابطه با این مدل ارائه شده است. به دلیل اختلاف وضوح در مراکز مورد استفاده پایگاه داده TIGGE و همچنین مختصات مکانی متفاوت ایستگاه‌های باران‌سنجی، به‌منظور دقت در ارزیابی نیاز به درون‌یابی وجود دارد. در این مطالعه از روش درون‌یابی تیسن استفاده گردید. روش پلی‌گون تیسن به‌عنوان یکی از روش‌های درون‌یابی است که در آن ارزش یک نقطه را به کلیه نقاطی که در مساحت منطقه‌ای آن قرار می‌گیرند، نسبت می‌دهد.

روش تصحیح اریبی Delta

روش Delta شامل افزودن تغییرات بین میانگین مشاهداتی و شبیه‌سازی، به بارش مشاهده‌ای روزانه است (Räty et al., 2014)؛ بنابراین، تصحیح اریبی ضریبی به جای افزایشی، هنگام استفاده از

روش دلتا برای بارش که مربوط به اعمال تغییر نسبی بارش شبیه‌سازی شده در مشاهدات است، رایج‌تر است (Maraun and Widmann, 2018), (Beyer et al., 2020))

$$P_{frc}^{BC}(t) = P_{obs}(t) \cdot \left[\frac{\mu_{m(frc)} P_{frc}(t)}{\mu_{m(contr)} P_{contr}(t)} \right] \quad (1)$$

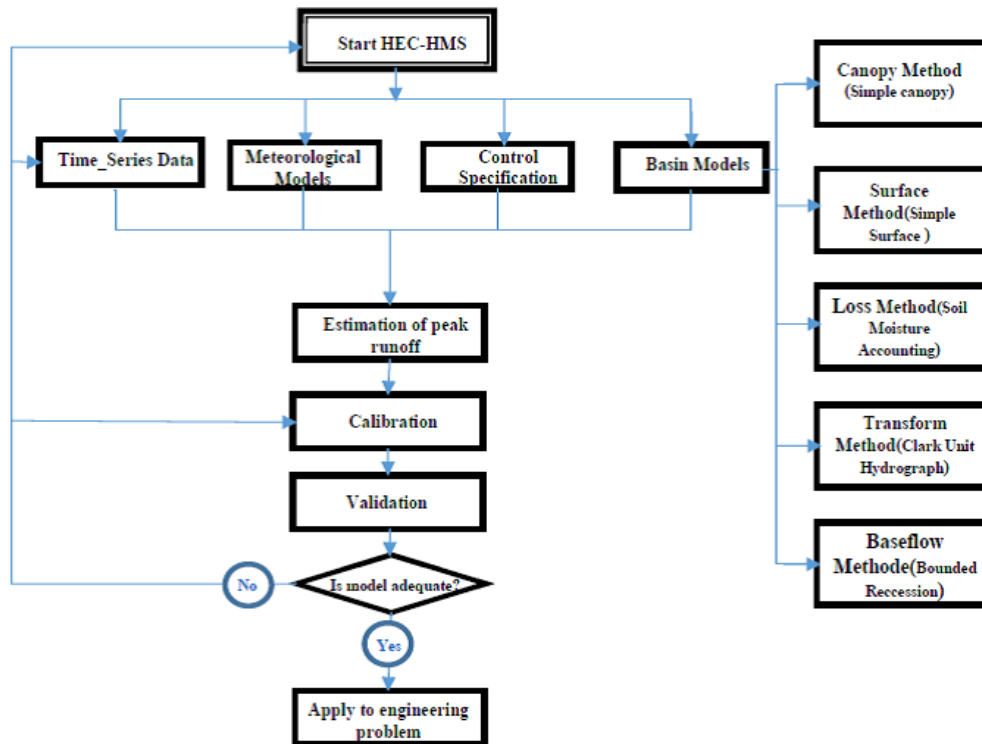
در رابطه فوق، P بارش، $contr$ سری زمانی شبیه‌سازی‌شده حاصل از مدل‌های عددی TIGGE در طول دوره کنترل، obs سری زمانی مشاهده‌ای در طول دوره کنترل، frc سری زمانی پیش‌بینی‌شده که باید تصحیح گردد، BC آخرین سری زمانی که تصحیح اریبی شده است. t مرحله زمانی و μ_m میانگین است.

جهت پیش‌بینی بارش، خطاهای شبیه‌سازی‌شده توسط مدل‌های عددی TIGGE و با استفاده از اجزای کنترل و سری‌های زمانی مشاهده‌ای تصحیح می‌گردند که معمولاً به‌صورت روزانه با استفاده از تصحیح اریبی Delta و با روش تصحیح ضریبی انجام می‌شوند. در روش Delta، سری‌های زمانی مشاهده‌ای به‌عنوان خط مبنا استفاده می‌شوند که آن را به روشی قوی برای تصحیح مقادیر میانگین تبدیل می‌کند. باین‌وجود، انحراف معیار (واریانس)، فرکانس‌ها و شدت‌های مرطوب اصلاح نمی‌شوند. طبق تعریف، روش Delta به‌طور کامل سری‌های زمانی شبیه‌سازی‌شده مدل‌های عددی TIGGE را در طول کالیبراسیون، تنظیم می‌کند اما تغییرات بالقوه آینده در دینامیک و تنوع آب‌وهوا به دلیل ماهیت انتقال ساده آن در نظر گرفته نمی‌شود (Mendez et al., 2020).

برای اجرای روش Delta از پکیج hyfo در نرم‌افزار R کمک گرفته شد. دوره کنترل داده‌ها برای تصحیح اریبی از اول شهریور تا ۳۰ بهمن ۹۷ در نظر گرفته شد و داده‌های پیش‌بینی از ۱۰ اسفند ۱۳۹۷ تا اول اردیبهشت ۱۳۹۸ بر اساس تابع برازش داده‌شده در دوره کنترل تصحیح اریبی شدند. این عمل برای همه اعضای مراکز EMCWF، ECCC، CPTEC و KMA جداگانه انجام گردید. به‌بیان‌دیگر تصحیح اریبی به ازای هر روز، ۱۰۸ بار اجرا شد.

شبیه‌سازی جریان

جهت پیش‌بینی جریان در حوضه پلدختر در سال‌های مورد بررسی از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS استفاده شد. جزئیات مدل مورد نظر به صورت شکل ۲ تشریح شده است.



شکل ۲. روندنمای فرآیند محاسبات در مدل HEC-HMS

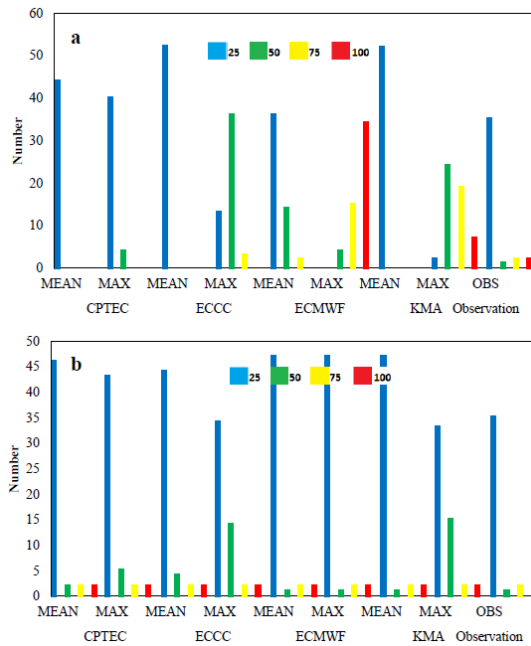
در مرحله بهینه‌سازی پارامترهای مدل هیدرولوژیکی از بهینه‌سازی خودکار و تابع ریشه میانگین مربعات خطا در مدل HEC-HMS استفاده شد. با استفاده از پارامترهای بهینه‌شده در روش تلفات (SMA)، انتقال و روندیابی، واسنجی انجام شد. در مرحله اعتبارسنجی، مدل موردنظر با ۳۰ درصد داده‌های بارش، دبی و تبخیر و تعرق اجرا گردید. جهت ارزیابی دقت مدل از شاخص‌های ضریب همبستگی پیرسون (R)، مجذور ضریب همبستگی پیرسون (R)، میانگین خطای اریبی (MBE)، شاخص NRMSE، شاخص Nash Sutcliff، شاخص Kling Gupta استفاده شد.

داده‌های بارش، دبی و تبخیر و تعرق حوضه پلدختر از تاریخ ۱۰ دی ۱۳۹۴ تا ۳۰ بهمن ۱۳۹۷ جهت بهینه‌سازی پارامترهای مدل HEC-HMS مورد استفاده قرار گرفت؛ بنابراین از ۱۰ دی ۱۳۹۴ تا ۱۰ تیر ۱۳۹۶ به‌عنوان دوره واسنجی و از ۱۲ تیر ۱۳۹۶ تا ۳۰ بهمن ۱۳۹۷ جهت دوره اعتبارسنجی انتخاب گردید. ۳ رویداد در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت که عبارت‌اند از: رویداد اول از ۱۰ اسفند تا اول فروردین، رویداد دوم از دوم فروردین تا ۱۱ فروردین و رویداد سوم از ۱۲ فروردین تا اول اردیبهشت.

$$R - Factor = \frac{\bar{d}_x}{S} \quad (2)$$

در رابطه فوق S انحراف معیار داده‌های مشاهداتی و \bar{d}_x عرض متوسط باندهای عدم قطعیت است که از رابطه زیر قابل محاسبه است (Saedi et al., 2020):

روش تحلیل عدم قطعیت از روش‌های مهم تحلیل عدم قطعیت، تعیین باندهای بالا و پایین عدم قطعیت خروجی مدل و سپس محاسبه دو معیار R-



شکل ۳. (a) مقایسه تعداد وقایع پیش‌بینی‌شده بارشی حاصل از مدل‌های CPTEC, ECCC, ECMWF و KMA قبل از تصحیح اریبی (b) مقایسه تعداد وقایع پیش‌بینی‌شده بارشی حاصل از مدل‌های CPTEC, ECCC, ECMWF و KMA بعد از تصحیح اریبی

در دوره آماری موردبررسی (۱۰ اسفند ۱۳۹۷ تا اول اردیبهشت ۱۳۹۸) تعداد ۳۵ بارش در آستانه ۲۵ میلی‌متر، یک بارش در آستانه ۵۰ میلی‌متر و ۲ بارش در آستانه‌های ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌متر در ایستگاه‌های باران‌سنجی ثبت‌شده بود. در میانگین بیش‌بینی‌های بارش مراکز CPTEC و KMA بیشترین تعداد بارش ثبت‌شده در ایستگاه باران‌سنجی در آستانه ۲۵ میلی‌متر را صحیح پیش‌بینی نمودند. در مورد بارش‌های شدید، میانگین و ماکزیمم پیش‌بینی‌های مرکز ECMWF و ماکزیمم پیش‌بینی‌های مرکز KMA، بیش‌بینی صحیحی داشتند. ماکزیمم پیش‌بینی‌های مرکز ECMWF، فقط بارش در آستانه ۱۰۰ میلی‌متر را پیش‌بینی نمود. با توجه به شکل ۳، مرکز CPTEC فقط قادر به پیش‌بینی بارش‌های سبک بود. کلوک و پاپنبرگر^۱ (۲۰۰۹) با بیان اینکه یکی از مشکلات اساسی در استفاده از مدل‌های عددی گروهی در رخدادهای سیل عملکرد خوبی ندارند نتایج حاصل را تأیید نمود. مرکز KMA نیز فقط در پیش‌بینی‌های ماکزیمم بارش‌های آستانه ۷۵ میلی‌متر را پیش‌بینی نمود. قابلیت مرکز ECMWF، هم در تشخیص بارش‌های سبک و هم بارش سنگین نسبت به سایر مراکز دیگر عملکرد مطلوب‌تری داشت. شکل ۳-b تعداد پیش‌بینی‌ها را پس از تصحیح اریبی نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳-b نمایان است تعداد پیش‌بینی‌های صحیح در همه مراکز افزایش یافته است. تشخیص صحیح بارش‌های سنگین و سبک در همه مراکز بهبود یافته است ولی مرکز ECMWF و CPTEC بارش‌های ۲۵ میلی‌متر را بهتر پیش‌بینی نمودند.

$$\bar{d}_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_u - X_l) \quad (3)$$

در رابطه فوق X_u داده باند بالا و X_l داده‌های باند پایین و N تعداد متغیرهای مشاهداتی است. هر چه این فاکتور به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده عدم قطعیت پایین است. جهت ارزیابی عدم تقارن باندهای پیش‌بینی نسبت به مشاهدات از دو فاکتور T و S استفاده شد که معادلات آن‌ها مطابق ذیل است (Xiong et al., 2010):

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_i) \quad (4)$$

$$s_i = |h_i - 0.5| \quad (5)$$

$$h_i = \frac{(X_u - X_{obs})}{(X_u - X_l)} \quad (6)$$

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (7)$$

$$T = \left(\frac{(X_u - X_{obs})^3 + (X_l - X_{obs})^3}{(X_u - X_l)^3} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

جهت محاسبه اختلاف واقعی مسیر بین نقاط باندهای پیش‌بینی و هیدروگراف مشاهداتی از متوسط دامنه انحراف نسبی (RD) استفاده شد. رابطه RD مطابق ذیل است:

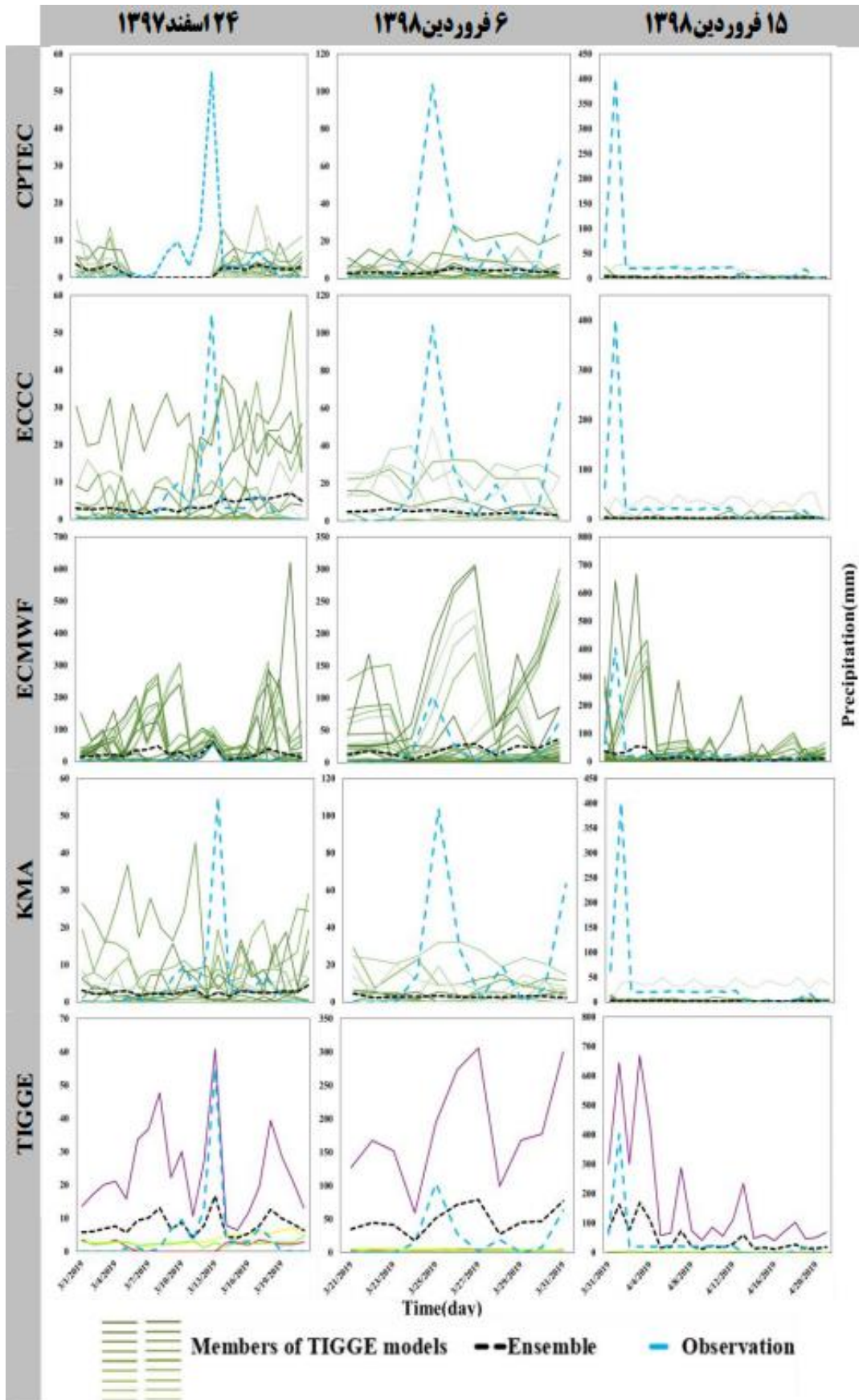
$$RD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (rd_i) \quad (9)$$

$$rd_i = \frac{|1/2(X_u + X_l) - X_{obs}|}{X_{obs}} \quad (10)$$

نتایج و بحث

محاسبه بارش با استفاده از مدل‌های گروهی

جهت پیش‌بینی سیلاب با دقت بالا نیاز به پیش‌بینی بارش دقیق است. بر این اساس ابتدا باید پیش‌بینی گروهی TIGGE ارزیابی شود. در این بخش مقایسه مدل‌های گروهی ECCC, ECMWF, KMA و CPTEC به منظور نشان دادن میزان اختلاف مدل‌ها با یکدیگر در پیش‌بینی بارش انجام شد. همچنین بارش چند مدلی گروهی با مقادیر مشاهده‌ای مقایسه شد. سه رویداد بارش جهت ارزیابی پیش‌بینی بارش TIGGE انتخاب گردید که یک واقعه در اسفند ۱۳۹۷ و دو واقعه دیگر در فروردین ۱۳۹۸ رخ داده است. شکل ۳ تعداد رخدادهای بارش تجمعی در طی ۱۰۲ روز را نمایش می‌دهد. شکل ۳-a تعداد بارش پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌های عددی قبل از تصحیح اریبی را نمایش می‌دهد و شکل ۳-b تعداد بارش‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌های عددی بعد از تصحیح اریبی را نمایش می‌دهد.



شکل ۳. مقایسه بارش پیش‌بینی‌شده (سه رویداد) مدل‌های گروهی ECMWF، KMA، ECCC و CPTEC.

نشان می‌دهد. این شاخص در مرحله واسنجی، اریبی مثبت یا بیش برآوردی و در مرحله اعتبارسنجی، اریبی منفی یا کم برآوردی را داشت. شاخص‌های $R, R^2, NSC, NRMSE$ و KGE ، دقت دبی شبیه‌سازی‌شده را بیان می‌کنند که این شاخص‌ها در مرحله واسنجی دقت بالاتری داشتند. شاخص $NRMSE$ ، مقایسه بین مدل‌های مختلف را تسهیل می‌کند. این شاخص، نرمال شده شاخص $RMSE$ است. شاخص NSC دقت پیش‌بینی را نسبت به مشاهدات بیان می‌کند. ایده‌آل این شاخص یک است. شاخص KGE برگرفته از شاخص NSC است که در مدل‌سازی هیدرولوژیکی، تجزیه و تحلیل همبستگی و اریبی را تسهیل می‌کند. ضریب همبستگی پیرسون، همبستگی پیش‌بینی‌ها را با مشاهدات بیان می‌کند. در کل مطابق جدول ۲ نتایج قابل قبولی در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی حاصل گردید.

جدول ۲. نتایج شبیه‌سازی جریان با داده‌های مشاهداتی در دوره واسنجی و اعتبارسنجی

مرحله	NRMSE	MBE	NSC	R2	R	KGE
Calibration	0.987	5.233	0.632	0.71	0.84	0.785
Validation	0.576	-3.67	0.543	0.61	0.74	0.526

شکل ۵ مقادیر دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده برای مدل HEC-HMS را در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهد. در اکثر موارد دبی اوج به‌خوبی نشان داده شد. در مرحله اعتبارسنجی زمان دبی اوج، به‌خوبی تشخیص داده‌شده است ولی مقدار آن کمتر از مقدار مشاهده‌ای است. پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل HEC-HMS برای حوضه پلدختر، از پیش‌بینی‌های بارش ۴ مدل پایگاه داده TIGGE در دو حالت خام و تصحیح اریبی شده به‌عنوان داده ورودی بارش به این مدل، استفاده شد.

محاسبه دبی مدل‌های پیش‌بینی گروهی قبل از تصحیح اریبی

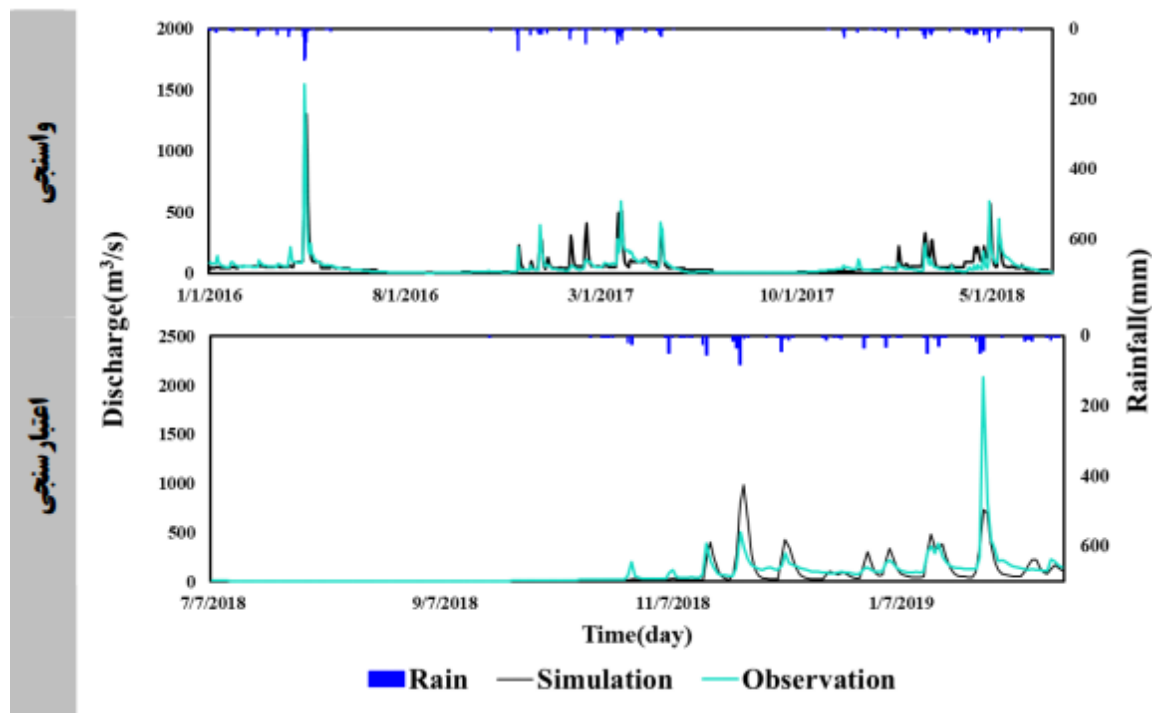
شکل ۶ دبی‌های پیش‌بینی‌شده چهار مدل پیش‌بینی گروهی متفاوت برای رویدادهای ۲۴ اسفند ۱۳۹۷، ۶ فروردین ۱۳۹۸ و ۱۵ فروردین ۱۳۹۸ قبل از تصحیح اریبی را نشان می‌دهد. در رویداد ۲۴ اسفند ۱۳۹۷ دبی اوج توسط مدل‌های ECMWF، ECCC و KMA پیش‌بینی شد ولی مدل عددی CPTEC موفق به پیش‌بینی دبی اوج نشد. دبی اوج پیش‌بینی‌شده توسط مدل KMA و ECMWF دارای کم برآوردی است و زودتر از زمان وقوع پیش‌بینی‌شده است. مدل عددی ECCC زمان وقوع را تا حدودی صحیح پیش‌بینی نمود و این مدل نیز در تشخیص دبی اوج دارای کم برآوردی است. در مدل عددی KMA عضو شماره ۲۰ و در مدل عددی ECCC عضو شماره ۱۷ پیش‌بینی متفاوتی با دیگر اعضا داشتند.

نتایج حاصله بر اساس شکل ۴ بیانگر ناتوانی مرکز CPTEC در پیش‌بینی بارش‌های سنگین است. درحالی‌که این مدل در تشخیص بارش‌های سبک عملکرد قابل قبولی ارائه نمود. پراکندگی پیش‌بینی‌های اعضای مدل عددی ECCC زیاد است با این حال توانست تا حدودی بارش‌های سنگین را پیش‌بینی نماید. مدل عددی ECMWF در هر سه رویداد بارش دارای بیش برآوردی است ولی توانست هم بارش‌های سبک و هم سنگین را به‌خوبی پیش‌بینی نماید. پیش‌بینی‌های اعضای مدل عددی KMA دارای پراکندگی است و همچنین در تشخیص بارش‌های سنگین عملکرد مناسبی نداشت. در بخش TIGGE شکل ۴ میانگین اعضای مدل‌های پیش‌بینی بارش در پایگاه داده TIGGE به نمایش گذاشته‌شده است. در این بخش، سیستم پیش‌بینی گروهی چند مدلی اجرا شد به عبارتی میانگین بارش ۴ مدل گروهی در این بخش ترسیم‌شده است. با توجه به این شکل میانگین مدل عددی ECMWF نسبت به سایر مدل‌ها برتری قابل‌توجه داشت و توانست در رویداد ۲۴ اسفند ۱۳۹۷ را با دقت قابل‌قبول پیش‌بینی نماید. در رویداد ۶ فروردین ۱۳۹۸ و ۱۵ فروردین ۱۳۹۸ میانگین مدل عددی ECMWF رویداد را با تأخیر زمانی و کم‌برآوردی تشخیص داد.

محاسبه پارامترهای بهینه حاصل از مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل HEC-HMS

پس از مرحله تصحیح اریبی بارش‌های پیش‌بینی‌شده ۴ مدل عددی، با استفاده از بهینه‌سازی خودکار و تابع ریشه میانگین مربعات خطای موجود در مدل HEC-HMS پارامترهای مدل، بهینه‌سازی شد. در گام بعد واسنجی و سپس اعتبارسنجی مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS صورت گرفت. به‌منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS از داده‌های مشاهداتی روزانه حوضه پلدختر شامل دبی، بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل طی سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۷ استفاده گردید. در ۳ رویداد، ۲۴ اسفند ۱۳۹۷، ۶ فروردین ۱۳۹۸ و ۱۵ فروردین ۱۳۹۸، بارش پیش‌بینی‌شده خام و تصحیح شده تمام اعضای مدل‌های CPTEC، ECCC، ECMWF و KMA وارد مدل گردید و جریان پیش‌بینی‌شده حاصل گردید. جهت ارزیابی عدم قطعیت مدل هیدرولوژیکی، از فاکتورهای R, P, S, T و RD استفاده گردید. در نهایت احتمال هشدار سیل سیستم هواشناسی - هیدرولوژیکی با استفاده از سیستم پیش‌بینی گروهی چند مدلی بررسی شد.

دبی‌های شبیه‌سازی‌شده با پارامترهای بهینه بر اساس معیارهای $NRMSE$ ، شاخص نش ساتکلیف (NSC)، ضریب همبستگی R^2 ، همبستگی پیرسون (R)، میانگین خطای اریبی (MBE) و ضریب KGE در حالت واسنجی و اعتبارسنجی ارزیابی گردید که در جدول ۲ درج گردیده است. شاخص MBE ، اریبی دبی پیش‌بینی‌شده نسبت به دبی مشاهده‌ای را



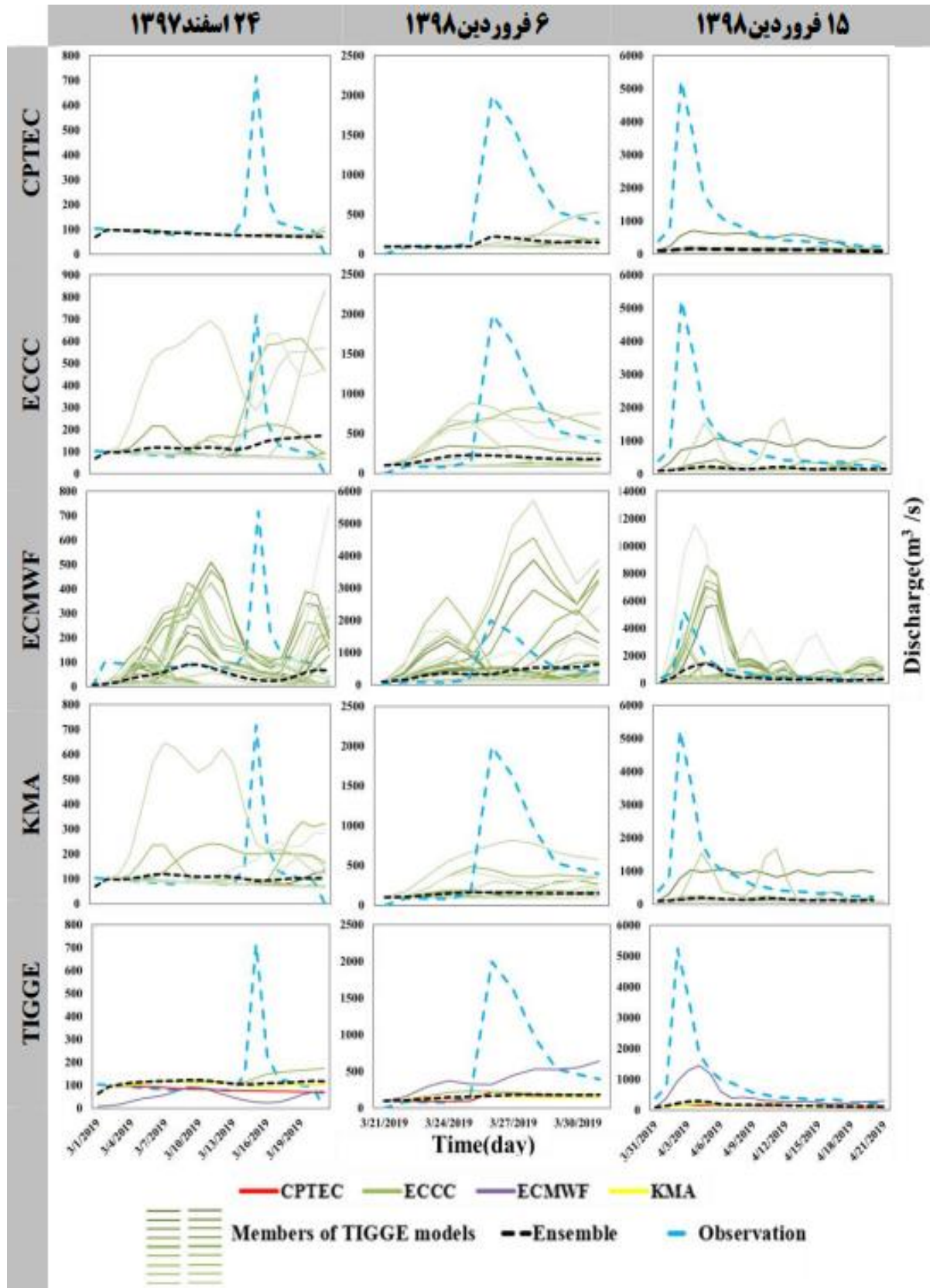
شکل ۴. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل HEC-HMS

دبی اوج دارای کم برآوردی بود. پیش‌بینی‌های مراکز ECCC و KMA نیز در پیش‌بینی دبی اوج کم برآوردی داشتند.

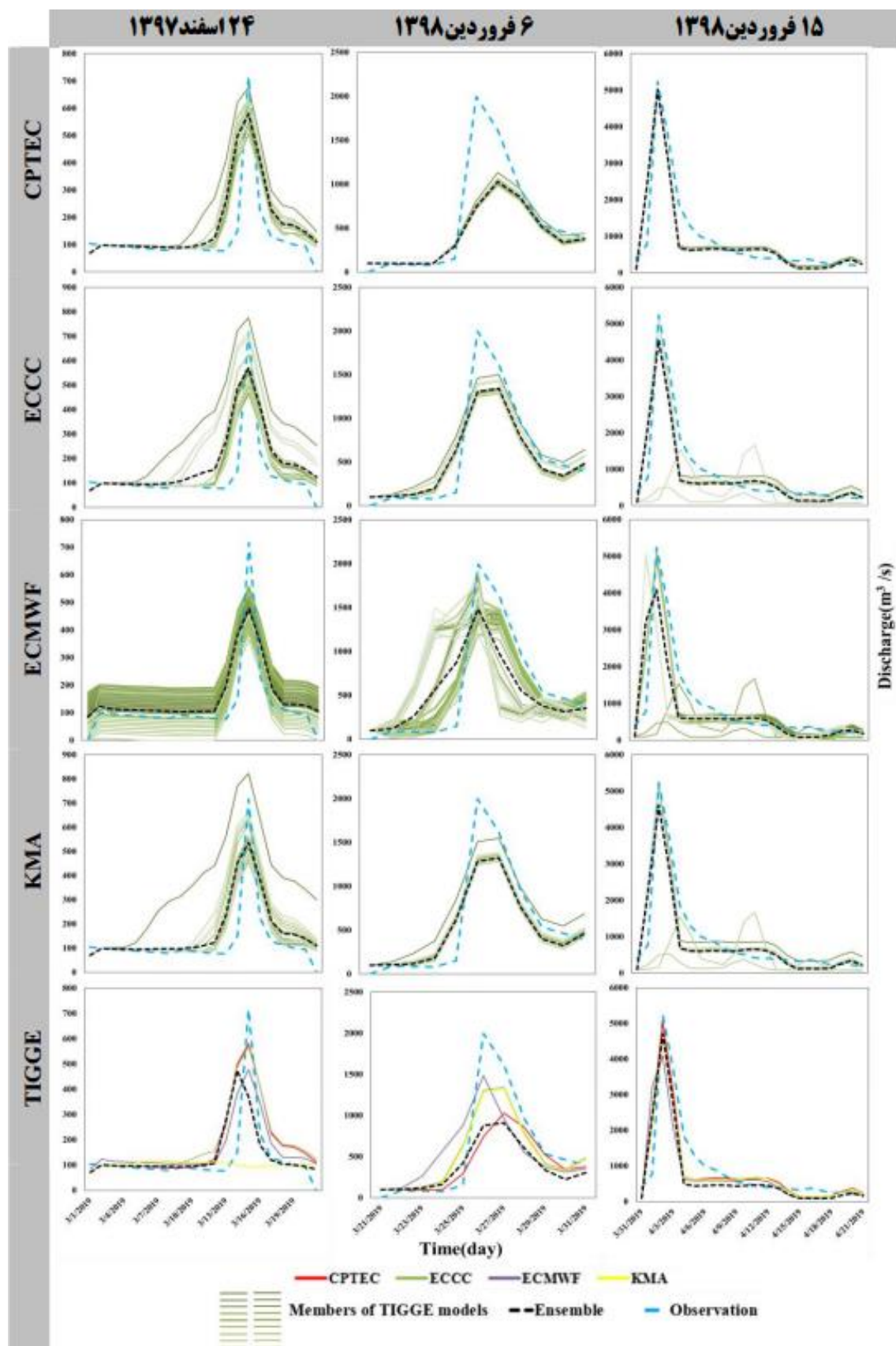
محاسبه دبی مدل‌های پیش‌بینی گروهی بعد از تصحیح اریبی پیش‌بینی‌های مدل‌های عددی، مطابق شکل ۶ دارای خطاهایی در پیش‌بینی بود بنابراین جهت کاهش خطاهای سیستماتیک مدل‌های عددی از روش تصحیح اریبی Delta استفاده گردید. این روش تصحیح اریبی در هر سه رویداد سیل عملکرد بسیار خوبی داشت و دبی‌های اوج را تا ۹۰ درصد تصحیح نمود (شکل ۷). در رویداد ۶ فروردین ۱۳۹۸ تصحیح اریبی Delta زمان را به‌خوبی تشخیص داد ولی دبی اوج را با کم‌برآوردی پیش‌بینی نمود. پیش‌بینی‌های مراکز ECCC و KMA پس از تصحیح اریبی، عملکرد مشابهی داشتند. توانایی این دو مدل عددی پس از تصحیح اریبی در تشخیص زمان وقوع و دبی اوج بهبود یافت ولی دبی اوج را نتوانستند پیش‌بینی نمایند. در رویدادهای ۲۶ اسفند ۱۳۹۷ و ۱۵ فروردین ۱۳۹۸ مطابق شکل ۷ قسمت TIGGE، پس از تصحیح اریبی عملکرد همه مدل‌ها بهبود یافت همچنین عملکرد مشابهی داشتند. مدل‌های گروهی پایگاه داده TIGGE در پیش‌بینی و هشدار سیل در این مطالعه، عملکرد خوبی داشتند که مطابق مطالعه بارتولمز و تودینی^{۱۱} (۲۰۰۵) و ایی^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۶) است.

در رابطه با رویداد سیل ۶ فروردین ۱۳۹۸، مطابق با شکل ۶ همه مدل‌های عددی توانستند دبی اوج و زمان وقوع آن را پیش‌بینی نمایند ولی خطاهایی نیز در این پیش‌بینی‌ها وجود داشت. در میانگین اعضا، مدل عددی ECMWF برتری قابل‌توجهی نسبت به سایر مدل‌ها داشت. پیش‌بینی‌های ۵۰ عضو مدل ECMWF در سه بخش قرار داشتند. یک بخش پیش‌بینی دبی اوج قبل از وقوع رویداد بود، بخش دوم پیش‌بینی دبی اوج با تأخیر زمانی بود و بخش سوم پیش‌بینی دبی اوج، از لحاظ زمانی صحیح ولی با بیش برآوردی همراه بود. پیش‌بینی‌های مدل CPTEC دارای کم برآوردی است. در مرکز ECCC، چهار عضو از مدل توانستند دبی اوج را بیش از ۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه پیش‌بینی نمایند. مدل CPTEC در این رویداد، زمان وقوع دبی اوج را به‌خوبی تشخیص داد درحالی‌که مقدار دبی اوج را با کم‌برآوردی پیش‌بینی نمود. دبی اوج بیش از ۲۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه است در حالی که مدل CPTEC، دبی اوج کمتر از ۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه را پیش‌بینی نمود.

در رویداد ۱۵ فروردین ۱۳۹۸، مدل ECMWF در پیش‌بینی دبی اوج و زمان وقوع آن عملکرد فوق‌العاده‌ای نسبت به مدل‌های عددی دیگر و همچنین دو واقعه پیشین داشت. مدل CPTEC در این رویداد نیز مانند رویدادهای قبل تشخیص مناسبی در مورد زمان وقوع داشت ولی در پیش‌بینی



شکل ۶. مقایسه دبی پیش‌بینی‌شده (رویدادهای ۲۶ اسفند ۱۳۹۷، ۶ فروردین ۱۳۹۸ و ۱۵ فروردین ۱۳۹۸) مدل‌های گروهی ECMWF, KMA, ECCC و CPTEC قبل از تصحیح ارببی.



شکل ۷. مقایسه دبی پیش‌بینی شده (رویدادهای ۲۶ اسفند ۱۳۹۷، ۶ فروردین ۱۳۹۸ و ۱۵ فروردین ۱۳۹۸) مدل‌های گروهی KMA, ECMWF, ECCC و CPTEC (بعد از تصحیح اریبی).

مدل ECCO کمترین کم برآوردی را داشت برخلاف آن مدل ECMWF پس از تصحیح آریبی بهترین عملکرد را داشت. بر اساس شاخص NSC بیشترین دقت را قبل از تصحیح آریبی مدل KMA و پس از تصحیح آریبی مدل ECCO داشت. در این رویداد بیشترین همبستگی مربوط به مدل CPTEC، قبل از تصحیح آریبی بود. این مدل فقط توانست دبی کم را پیش‌بینی نماید در حالی که دبی‌های شدید را نتوانست پیش‌بینی نماید. بعد از تصحیح آریبی بیشترین همبستگی با مشاهدات را مدل KMA داشت. بهترین عملکرد بر اساس شاخص KGE را مدل ECMWF قبل و بعد از تصحیح آریبی داشت (جدول ۳).

در رویداد ۱۵ فروردین ۱۳۹۸، مدل ECMWF بهترین عملکرد را با توجه به شاخص NRMSE داشت. مدل ECMWF قبل از تصحیح آریبی و مدل CPTEC پس از تصحیح آریبی، بر اساس شاخص‌های MBE و NSC بهترین عملکرد را داشتند. در این رویداد مدل ECMWF، قبل و بعد از تصحیح آریبی، بیشترین همبستگی را داشت. بر اساس شاخص KGE، مدل ECMWF، قبل از تصحیح آریبی و مدل‌های ECCO و CPTEC پس از تصحیح آریبی بهترین عملکرد را داشتند (جدول ۳).

در جدول ۳ نتایج ارزیابی جریان پیش‌بینی‌شده مدل‌های CPTEC، ECCO، ECMWF و KMA با شاخص‌های NRMSE، میانگین خطای آریبی (MBE)، شاخص Nash، Sutcliffe (NSC)، شاخص Kling Gupta، R^2 و R قبل و بعد از تصحیح آریبی، بررسی گردید. در رویداد ۲۴ اسفند ۱۳۹۷، با توجه به شاخص NRMSE در جدول (۳)، جریان پیش‌بینی‌شده توسط مدل ECMWF، قبل از تصحیح آریبی بیشترین اختلاف را با مشاهدات داشت این در حالی است که مدل ECCO کمترین اختلاف با مشاهدات را در قبل و بعد از تصحیح آریبی داشت. مدل ECMWF بر اساس شاخص MBE بیشترین کم برآوردی را داشت در حالی که پس از تصحیح آریبی نرمال‌ترین پیش‌بینی جریان را داشت. بر اساس شاخص NSC، پیش‌بینی‌های مدل ECMWF ضعیف‌ترین عملکرد را قبل از تصحیح آریبی داشت در حالی که پس از تصحیح بهترین عملکرد را داشت. مدل ECMWF و KMA بیشترین همبستگی با جریان مشاهده‌ای را داشتند. بر اساس شاخص KGE بیشترین آریبی و کمترین دقت را مدل ECMWF داشت ولی پس از تصحیح دقیق‌ترین عملکرد را نسبت به سایر مدل‌ها داشت. در رویداد ۶ فروردین ۱۳۹۸، کمترین اختلاف با مشاهدات مربوط به مدل ECMWF بود در حالی که پس از تصحیح آریبی عملکرد را مدل ECCO داشت. قبل از تصحیح آریبی

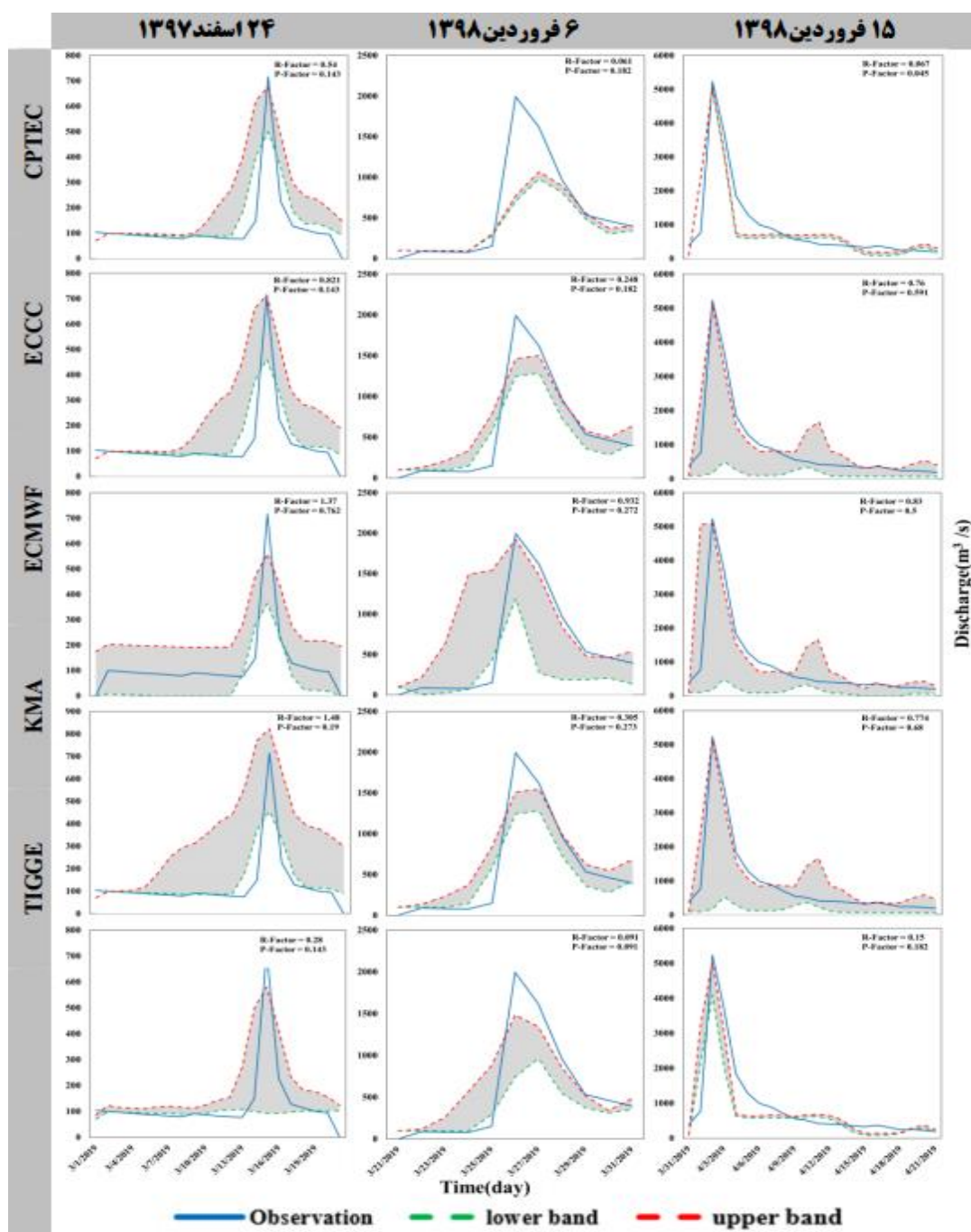
جدول ۱. نتایج ارزیابی جریان پیش‌بینی‌شده ۴ مدل عددی پایگاه داده TIGGE با شاخص‌های مختلف

		قبل از تصحیح آریبی				بعد از تصحیح آریبی			
		CPTEC	ECCO	ECMWF	KMA	CPTEC	ECCO	ECMWF	KMA
۲۴ اسفند ۱۳۹۷	NRMSE	1.151	1.087	1.31	1.122	0.85	0.876	0.689	0.78
	MBE	-45.6	-2.17	-79.5	-24.2	49.78	57.65	33.19	42.67
	NSC	-0.14	-0.02	-0.48	-0.08	0.378	0.341	0.592	0.477
	R^2	0.036	0.003	0.094	0.093	0.58	0.571	0.653	0.596
	R	-0.19	0.055	-0.31	-0.31	0.762	0.755	0.808	0.772
	KGE	-0.553	-0.242	-0.67	-0.61	0.541	0.485	0.596	0.587
۶ فروردین ۱۳۹۸	NRMSE	1.284	1.275	1.115	1.324	0.732	0.488	0.682	0.497
	MBE	-439	-397	-190	-436	-165	-47.1	-36.7	-62.7
	NSC	-0.341	-0.322	-0.011	-0.43	0.564	0.806	0.622	0.799
	R^2	0.914	0.262	0.077	0.327	0.781	0.886	0.662	0.888
	R	0.956	0.512	0.278	0.571	0.884	0.941	0.814	0.942
	KGE	-0.2	-0.26	-0.09	-0.299	0.409	0.654	0.574	0.64
۱۵ فروردین ۱۳۹۸	NRMSE	1.551	1.537	1.159	1.547	0.537	0.541	0.82	0.543
	MBE	-800	-763	-456	-785	-81.1	-129	-179	-133
	NSC	-0.42	-0.39	0.21	-0.407	0.83	0.828	0.604	0.827
	R^2	0.358	0.035	0.525	0.119	0.836	0.842	0.628	0.84
	R	0.599	0.187	0.725	0.344	0.914	0.918	0.793	0.917
	KGE	-0.37	-0.51	0.108	-0.45	0.867	0.786	0.674	0.792

با توجه به شکل ۸ نتایج، بیانگر آن است که مدل عددی پیش‌بینی دبی گروهی CPTEC در واقعه ۲۴ اسفند ۱۳۹۷، باند عدم قطعیت، ۱۴ درصد مشاهدات را در بر گرفت. چنانچه در رویدادهای ۶ فروردین ۱۳۹۸ و ۱۵ فروردین ۱۳۹۸ درصد مشاهداتی که در باند بالا و پایین قرار داشتند به ترتیب ۱۸ و ۴ بودند. برخلاف شاخص P-factor عملکرد R-factor در مدل CPTEC در هر ۳ رویداد، نسبت به مدل‌های دیگر برتری قابل توجهی داشت. به عبارتی دارای کمترین باند عدم قطعیت بود و در این بین بهترین نتیجه مربوط به رویداد ۱۵ فروردین ۱۳۹۸ بود.

محاسبه عدم قطعیت دبی سیلاب‌ها

در این مطالعه به منظور تحلیل عدم قطعیت، از روش محاسبه باند بالا و پایین و سپس محاسبه شاخص R-Factor و P-Factor استفاده شد. جهت تشخیص تقارن مدل‌های عددی گروهی پایگاه داده TIGGE، معیارهای نامتقارنی (T و S) و دامنه انحراف نسبی (RD) مورد استفاده قرار گرفتند. در شکل ۸ باندهای بالا و پایین عدم قطعیت با استفاده از خروجی‌های دبی پیش‌بینی گروهی پایگاه داده TIGGE در ۳ رویداد سیل برآورد شدند.



شکل ۸. باندهای عدم قطعیت پیش‌بینی دبی گروهی مدل‌های عددی CPTEC, ECCC, ECMWF, و KMA بعد از تصحیح اریبی

ضعیف‌ترین عملکرد را داشت. مدل KMA در رویداد ضعیف‌ترین عملکرد را بر اساس شاخص RD، داشت. در کل می‌توان گفت که مدل ECMWF در وقایع نسبتاً متوسط بهترین عملکرد را داشت و برخلاف آن مدل KMA در سیلاب‌های شدید و بسیار شدید حائز برترین رتبه گردید که با نتایج تحقیق تیرل^{۱۳} و همکاران (۲۰۰۸) همخوانی دارد. میانگین مدل‌های گروهی یعنی TIGGE نیز در همه وقایع عملکرد قابل قبولی داشت. اگر در میانگین‌گیری مدل‌های گروهی مدل‌های ضعیف حذف گردند عملکرد TIGGE چند برابر می‌گردد.

جدول ۴. نتایج ارزیابی عدم قطعیت مدل‌های عددی پایگاه داده TIGGE با معیارهای مختلف

ECCC	ECMWF	KMA	TIGGE
0.143	0.762	0.19	0.143
0.821	1.37	1.48	0.28
0.555	0.099	0.46	1.151
0.199	0.019	0.098	0.145
0.67	0.245	1.11	0.415
0.182	0.272	0.273	0.091
0.248	0.932	0.305	0.091
0.017	0.132	0.0904	0.492
0.0403	0.0135	0.033	0.054
0.56	1.423	0.63	0.54
0.591	0.045	0.68	0.182
0.76	0.83	0.774	0.15
0.245	0.33	0.196	2.38
0.011	0.012	0.0099	0.104
0.125	0.133	0.083	0.063

احتمال هشدار سیل با استفاده از سیستم هواشناسی - هیدرولوژیکی

احتمال هشدار سیل با استفاده از سیستم هواشناسی- هیدرولوژیکی و داده‌های دبی چند مدلی گروهی در شکل ۹ نمایش داده شده است. در این تصویر محور افقی نشان‌دهنده زمان پیش‌بینی برحسب روز و محور عمودی نشان‌دهنده دبی متوسط ۱۰۸ عضو است. رویداد مورد بررسی در ۴ درجه‌بندی: سطح هشدار پایین، سطح هشدار متوسط، سطح هشدار بالا و سطح هشدار شدید قرار گرفتند. زمان پیش هشدار برحسب روزانه در نظر گرفته شد. دبی‌های بیش از ۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه در سطح هشدار پایین، دبی‌های بیش از ۱۰۰۰ مترمکعب در سطح هشدار متوسط، دبی‌های بیش از ۲۰۰۰ مترمکعب در سطح هشدار بالا و دبی‌های بیش از ۳۰۰۰ مترمکعب در سطح هشدار شدید قرار گرفت. رویداد ۱۵ فروردین ۱۳۹۸ بیشترین دبی اوج و رویداد ۲۴ اسفند ۱۳۹۷، کمترین دبی اوج را نشان

نتایج شاخص P-factor در مدل گروهی ECCC، در وقایع ۲۴ اسفند ۱۳۹۷ و ۶ فروردین ۱۳۹۸، عملکردی مشابه مدل CPTEC داشت. لیکن در واقعه ۱۵ فروردین ۱۳۹۸ عملکرد خوبی ارائه داد و ۵۹ درصد دبی مشاهده‌ای را در باند عدم قطعیت جای داد. پهنای باند عدم قطعیت در این مدل گروهی در رویداد ۶ فروردین ۱۳۹۸، کمتر از دو واقعه دیگر بود. مدل ECMWF در دو واقعه ۲۴ اسفند ۱۳۹۷ و ۶ فروردین ۱۳۹۸، دربرگیرنده بیشترین مشاهدات (به ترتیب ۷۶ و ۲۷ درصد) در باند عدم قطعیت بود و همچنین بهترین عملکرد را در بین سایر مدل‌ها را داشت. درحالی‌که در رویداد ۱۵ فروردین ۱۳۹۸، کمترین تعداد مشاهدات (۴ درصد) در باند بالا و پایین قرار داشت. شاخص R-factor در این مدل نتایج ضعیفی داشت و نسبت به سایر مدل‌ها دارای پهنای باند عدم قطعیت بیشتری بود. باند عدم قطعیت مدل KMA، در واقعه ۱۵ فروردین ۱۳۹۸، نسبت به دو واقعه دیگر، دربرگیرنده بیشترین درصد مشاهدات (۶۸٪) بود. بیشترین پهنای باند عدم قطعیت مدل KMA را واقعه ۲۴ اسفند ۱۳۹۷ داشت و نسبت به مدل‌های دیگر در این رویداد ضعیف‌ترین عملکرد را داشت. میانگین دبی‌های پیش‌بینی گروهی که در اینجا با عنوان TIGGE بیان گردیده است، از لحاظ پهنای باند عدم قطعیت بهترین عملکرد را نسبت به مدل‌های گروهی داشت درحالی‌که P-factor مناسبی نداشت.

مقادیر شاخص‌های تقارن (T و S) و دامنه انحراف نسبی (RD) مدل‌های عددی گروهی ECMWF، ECCC، CPTEC و KMA در ۳ رویداد در جدول ۴ مشخص شده است. مقدار ایده‌آل شاخص‌های تقارن (T و S) صفر است. به عبارتی هر چه شاخص T و S به صفر نزدیک‌تر باشند نتایج مناسب‌تری را ارائه می‌دهند. مدل عددی گروهی CPTEC بیشترین نامتقارنی را در هر سه رویداد نسبت به سایر مدل‌ها داشت. مدل ECCC در واقعه ۶ فروردین ۱۳۹۸، بهترین تقارن با دبی مشاهده‌ای را نسبت به دو رویداد دیگر داشت. عملکرد شاخص تقارن در مدل ECMWF در سه رویداد مناسب بود ولی رویداد ۲۴ اسفند ۱۳۹۷ بهترین تقارن را با مشاهدات نسبت به سایر مدل‌ها داشت. مدل KMA در دو رویداد ۶ فروردین ۱۳۹۸ و ۱۵ فروردین ۱۳۹۸ بهترین عملکرد را از لحاظ تقارن با مشاهدات را داشت درحالی‌که مدل ECMWF در رویداد ۲۴ اسفند ۱۳۹۷ بهترین تقارن را داشت.

بهترین نمره شاخص دامنه انحراف نسبی (RD) را مدل CPTEC در رویدادهای ۶ فروردین ۱۳۹۸ و ۱۵ فروردین ۱۳۹۸ کسب کرد. مدل ECMWF در رویداد ۲۴ اسفند ۱۳۹۷ بهترین امتیاز شاخص RD و برخلاف آن در دو رویداد دیگر

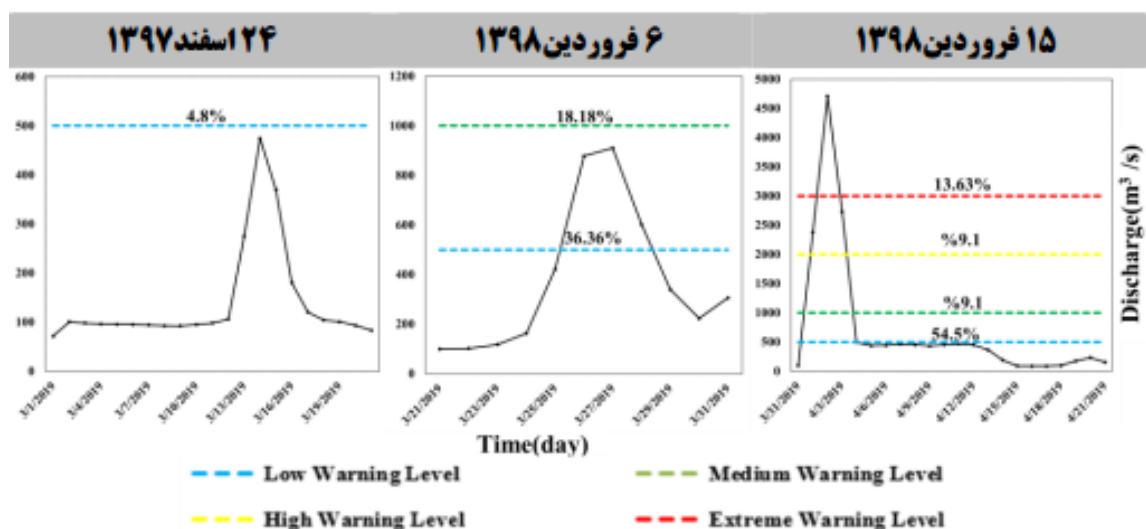
نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر یک مطالعه موردی جهت پیش‌بینی و هشدار سیل در حوزه آبخیز پلدختر واقع در استان لرستان است. سیستم هواشناسی-هیدرولوژیکی مورد استفاده در این مطالعه، بر پایه پیش‌بینی‌های هواشناسی پایگاه داده TIGGE و پیش‌بینی سیل با استفاده مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS است. محصول نهایی این سیستم دبی احتمالی و پیش‌بینی سیل است. نتایج حاصله نشان‌دهنده موفقیت پایگاه داده TIGGE در پیش‌بینی سیل است.

در این مطالعه سه رویداد سیل مخرب که در سال ۲۰۱۹ در حوزه پلدختر، رخ داده بود مورد بررسی قرار گرفت. جهت کاهش عدم قطعیت مدل‌های عددی پیش‌بینی بارش، ما از مدل‌های گروهی پایگاه داده TIGGE به جای مدل‌های عددی تکی استفاده نمودیم. استفاده از مدل‌های عددی گروهی احتمال پیش‌بینی صحیح را بالا برده و عدم قطعیت را کاهش می‌دهد؛ بنابراین هر چه تعداد اعضای مدل گروهی بیشتر باشد نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. نتایج بررسی بارش پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌های عددی گروهی، حاکی از برتری مدل گروهی ECMWF بود. این مدل در تشخیص بارش‌های سنگین و بارش‌های سبک موفق عمل کرد. ولی مدل CPTTEC فقط موفق به تشخیص بارش‌های سبک (آستانه ۲۵ میلی‌متر) شد. پس از تصحیح اریبی به روش Delta تمام مدل‌های گروهی موفق به پیش‌بینی صحیح بارش‌های سنگین شدند و اکثر بارش‌های سبک را نیز پیش‌بینی نمودند و در نهایت به منظور شبیه‌سازی سیلاب با استفاده از مدل HEC-HMS به‌عنوان داده‌های ورودی در نظر گرفته شدند.

دادند. در رویداد ۲۴ اسفند ۱۳۹۷، فقط سطح هشدار پایین پیش‌بینی شد که احتمال پیش‌بینی سیل برای سطح هشدار پایین (دبی‌های بیشتر از ۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه)، با کمترین مقدار برابر با ۴/۵۷ درصد بوده که با توجه به این موضوع از سطح هشدار متوسط هم کمتر بود. در رویداد ۶ فروردین ۱۳۹۸، سطح هشدار پایین و متوسط پیش‌بینی شد. احتمال وقوع سطح هشدار پایین، ۳۶/۳۶ درصد بود بنابراین در بیش از یک‌سوم (۱/۳) مواقع در طول این رویداد دبی‌های عبوری از خروجی حوضه از آستانه سطح هشدار پایین عبور می‌کنند. در مورد سطح هشدار متوسط احتمال وقوع ۱۸/۱۸ درصد بود. از بین ۳ رویداد فقط در رویداد ۱۵ فروردین ۱۳۹۸ سطح هشدار شدید پیش‌بینی گردید. احتمال وقوع در این رویداد در سطح هشدار بالا و شدید به ترتیب ۹/۱ درصد و ۴/۵ درصد پیش‌بینی شد. نتایج نشان می‌دهد که زمان وقوع در هر ۳ رویداد به‌خوبی پیش‌بینی‌شده و اختلاف کمی با مشاهدات دارد در صورتی که مقدار دبی‌های اوج در رویدادها، اختلاف قابل‌ملاحظه‌ای با مشاهدات داشت. رویداد ۶ فروردین ۱۳۹۸ و ۱۵ فروردین ۱۳۹۸ تقریباً ۷۰۰ مترمکعب بر ثانیه با مقدار دبی مشاهده‌ای تفاوت داشت ولی رویداد ۲۴ اسفند ۱۳۹۷ اختلاف کمتری در حدود ۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه با دبی مشاهده‌ای داشت.

اطلاعات فوق کمک شایانی به مدیران دولتی و حوضه‌های مرتبط مقابله با سیل می‌کند با توجه به ساختار متفاوت مدل‌های گروهی بارش (سیستم‌های پیش‌بینی و مدل‌سازی) اختلافات زیادی در دبی‌های پیش‌بینی‌شده وجود دارد. با این حال نتایج قابل قبولی به دست آمد و نشان داد که در مقایسه با پیش‌بینی قطعی اطلاعات ارزشمندتری در مورد احتمال سیل را در اختیار کاربران قرار می‌دهد.



شکل ۹. احتمال هشدار سیل سیستم هواشناسی - هیدرولوژیکی با استفاده از سیستم پیش‌بینی گروهی چند مدلی

زمان وقوع دبی‌های پیش‌بینی‌شده در سیستم پیش‌بینی گروهی چند مدلی دقت بالایی داشته و نزدیک به زمان وقوع دبی‌های مشاهده‌ای است و دقت لازم را دارا می‌باشند. از لحاظ اندازه دبی اوج، حدود ۷۰۰ مترمکعب بر ثانیه با دبی مشاهده‌ای در رویدادهای شدید اختلاف دارد درحالی‌که در رویداد ۲۴ اسفند ۱۳۹۷ که رویداد متوسطی است اختلاف با دبی مشاهده‌ای تقریباً ۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه است. مدل‌های گروهی پایگاه داده TIGGE ممکن است از لحاظ پیش‌بینی سیل خطاهایی در مقدار و زمان وقوع سیل داشته باشند ولی باید این را در نظر داشته باشیم که این مراکز در هشدار سیل بسیار مفید عمل می‌کنند و نشانگر وقوع احتمالی رویداد سیل هستند (Roulin and Vannitsem, 2005). بارش پیش‌بینی‌شده از چهار مرکز مورد استفاده در این مطالعه (ECMWF, ECCC, CPTEC, KMA) تفاوت‌های قابل‌توجهی دارند، برای کاهش این تفاوت‌ها از سیستم پیش‌بینی گروهی چند مدلی استفاده نمودیم که نتایج مطلوبی داشت. در نهایت استفاده از سیستم هواشناسی - هیدرولوژیکی نتایج قابل‌قبولی را ارائه داد که می‌توان از آن در طراحی سیستم هشدار سیلاب استفاده کرد.

اکثر مدل‌ها موفق به پیش‌بینی سیل شدند درحالی‌که خطاهایی نیز داشتند. مدل ECMWF در پیش‌بینی دبی اوج تقریباً موفق عمل کرد. نتایج پس از تصحیح آریبی در اکثر مدل‌های گروهی رضایت‌بخش بود. درحالی‌که مدل‌های گروهی ECCC، KMA، CPTEC پس از تصحیح آریبی نتوانستند دبی اوج واقعه سیل ۶ فروردین ۱۳۹۸ را به خوبی تشخیص دهند. مطابق نتایج حاصل‌شده، از نظر عدم قطعیت در مدل‌های گروهی پایگاه داده TIGGE، مدل ECMWF در رخداد ۲۴ اسفند ۱۳۹۷ که رخداد تقریباً سبک محسوب می‌گردد، بهترین نتیجه را کسب نمود و مدل گروهی KMA در دو رخداد دیگر که رخدادهای شدیدی است، برتری قابل‌ملاحظه‌ای داشت. در مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS، از ۱۴ پارامتر کالیبره شده استفاده شد. جریان شبیه‌سازی‌شده با مدل HEC-HMS به دلیل استفاده از تعداد پارامترهای مناسب و همچنین مؤثر نتایج رضایت‌بخشی داشت. این مدل دبی اوج و زمان وقوع سیل‌های موردبررسی را به‌خوبی شبیه‌سازی نمود و اختلاف اندکی با دبی مشاهده‌ای داشت. این مدل به‌صورت یکپارچه و از لحاظ زمانی، پیوسته اجرا گردید.

Reference:

- Alfieri, L., Burek, P., Dutra, E., Krzeminski, B., Muraro, D., Thielen, J., & Pappenberger, F. (2013). GloFAS—global ensemble streamflow forecasting and flood early warning. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(3), 1161–1175.
- Aminyavari, S., Saghafian, B., & Sharifi, E. (2019). Assessment of precipitation estimation from the NWP models and satellite products for the spring 2019 severe floods in Iran. *Remote Sensing*, 11(23). <https://doi.org/10.3390/rs11232741>
- Ayzel, G., Varentsova, N., Erina, O., Sokolov, D., Kurochkina, L., & Moreydo, V. (2019). OpenForecast: The First Open-Source Operational Runoff Forecasting System in Russia. *Water (Switzerland)*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/w11081546>
- Bao, H. J., Zhao, L. N., He, Y., Li, Z. J., Wetterhall, F., Cloke, H. L., ... Manful, D. (2011). Coupling ensemble weather predictions based on TIGGE database with Grid-Xinanjiang model for flood forecast. *Advances in Geosciences*, 29(51509043), 61–67. <https://doi.org/10.5194/adgeo-29-61-2011>
- Bartholmes, J., & Todini, E. (2005). Coupling meteorological and hydrological models for flood forecasting. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9(4), 333–346.
- Bauer, P., Thorpe, A., & Brunet, G. (2015). The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, 525(7567), 47–55.
- Beyer, R., Krapp, M., & Manica, A. (2020). An empirical evaluation of bias correction methods for palaeoclimate simulations. *Climate of the Past*, 16(4), 1493–1508.
- Cai, C., Wang, J., & Li, Z. (2019). Assessment and modelling of uncertainty in precipitation forecasts from TIGGE using fuzzy probability and Bayesian theory. *Journal of Hydrology*, 577. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123995>
- Cloke, H. L., & Pappenberger, F. (2009). Ensemble flood forecasting: A review. *Journal of Hydrology*, 375(3–4), 613–626. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.005>
- Collischonn, W., Morelli Tucci, C. E., Clarke, R. T., Chou, S. C., Guilhon, L. G., Cataldi, M., & Allasia, D. (2007). Medium-range reservoir inflow predictions based on quantitative precipitation forecasts. *Journal of Hydrology*, 344(1–2), 112–122. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.06.025>
- He, Y., Wetterhall, F., Cloke, H. L., Pappenberger, F., Wilson, M., & Freer, J. (2009). Tracking the uncertainty in flood alerts driven by grand. *Meteorological Applications*, 101(February), 91–101. <https://doi.org/10.1002/met>
- Hopson, T. M., & Webster, P. J. (2010). A 1–10-day ensemble forecasting scheme for the major river basins of Bangladesh: Forecasting severe floods of 2003–07. *Journal of Hydrometeorology*, 11(3), 618–641.

- Krishnamurti, T. N., Sagadevan, A. D., Chakraborty, A., Mishra, A. K., & Simon, A. (2009). Improving multimodel weather forecast of monsoon rain over China using FSU superensemble. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26(5), 813–839.
- Louvet, S., Sultan, B., Janicot, S., Kamsu-Tamo, P. H., & Ndiaye, O. (2016). Evaluation of TIGGE precipitation forecasts over West Africa at intraseasonal timescale. *Climate Dynamics*, 47(1), 31–47.
- Maraun, D., & Widmann, M. (2018). *Statistical downscaling and bias correction for climate research*. Cambridge University Press.
- Mendez, M., Maathuis, B., Hein-Griggs, D., & Alvarado-Gamboa, L. F. (2020). Performance evaluation of bias correction methods for climate change monthly precipitation projections over Costa Rica. *Water (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020482>
- Räty, O., Räisänen, J., & Ylhäisi, J. S. (2014). Evaluation of delta change and bias correction methods for future daily precipitation: intermodel cross-validation using ENSEMBLES simulations. *Climate Dynamics*, 42(9), 2287–2303.
- Roulin, E. (2007). Skill and relative economic value of medium-range hydrological ensemble predictions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(2), 725–737. <https://doi.org/10.5194/hess-11-725-2007>
- Roulin, E., & Vannitsem, S. (2005). Skill of medium-range hydrological ensemble predictions. *Journal of Hydrometeorology*, 6(5), 729–744.
- Rousset, F., Habets, F., Martin, E., & Noilhan, J. (2007). Ensemble streamflow forecasts over France, *ECMWF Newsletter*, 111, 21–27.
- Saedi, A., Saghafian, B., & Moazami, S. (2020). Uncertainty of Flood Forecasts via Ensemble Precipitation Forecasts of Seven NWP Models for Spring 2019 Golestan Flood. *Iran-Water Resources Research*, 16(1). [in Persian]
- Thiemig, V., Bisselink, B., Pappenberger, F., & 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., & Habets, F. (2008). On the impact of short-range meteorological forecasts for ensemble streamflow predictions. *Journal of Hydrometeorology*, 9(6), 1301–1317. <https://doi.org/10.1175/2008JHM959.1>
- Xiong, L., Wan, M., Wei, X., & O'Conno, K. M. (2009). Indices for assessing the prediction bounds of hydrological models and application by generalized likelihood uncertainty estimation. *Hydrological Sciences Journal*, 54(5), 852–871. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.5.852>
- Ye, J., Shao, Y., & Li, Z. (2016). Flood Forecasting Based on TIGGE Precipitation Ensemble Forecast. *Advances in Meteorology*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/9129734>

یادداشت‌ها

¹ Numerical Weather Prediction² Louvet³ Aminyavari⁴ Roulin⁵ Krishnamurti⁶ Bao⁷ Saedi⁸ He⁹ Ayzel¹⁰ Cloke and Pappenberger¹¹ Bartholmes and Todini¹² Ye¹³ Thirel