تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۱، شماره ۹، آذر ماه ۱۳۹۹ (ص ۲۲۹۱-۲۲۷۵) DOI: 10.22059/ijswr.2020.302208.668602

Improving the Performance of Global Rainfall Forecasting Systems in Different Climate Areas of Iran Using Quantile Mapping Method

SETAREH AMINI[1], ASGHAR AZIZIAN[1*], PEYMAN DANESHKAR ARASTEH[1]
1. Water Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.
(Received: May. 12, 2020- Revised: July. 11, 2020, Accepted: July. 21, 2020)

ABSTRACT

Precipitation is one of the main components of flood, drought and water resources warning studies, hence, its quantitative prediction is of the great importance. The increasing development of computing and satellite technologies and remote sensing in recent years has led to the development of several meteorological forecasting models, of which the TIGGE database with a large number of powerful forecasting models, is the most important. The aim of this study was to evaluate the performance of all available numerical models in the database to predict daily precipitation in 38 synoptic stations located in different climates of Iran. In addition, removing biases from raw datasets using Quantile Mapping (QM) method is another objective of this study. Results showed that in humid, semi-humid, Mediterranean and Arid climate zones (mostly includes the southwest, northwest and northeast parts of Iran), most of the prediction models are highly correlated with ground observations, while in semi-arid and extra-arid regions the correlation coefficient (CC) between the forecasted and observed datasets is very low. For example, the CC and RMSE values obtained from ECMWF and METEO centers in most parts of the country are higher than 0.6 and lower than 4 mm/day, respectively, while the performance of CMA and CPTEC models is not remarkable and leads to the weak results. Also, evaluation of the corrected precipitation values by QM method indicates that there is a significant improvement in the performance of most prediction systems. Findings in extra-arid, arid, and Mediterranean zones demonstrate an increase in CC value, averagely about 20%. Moreover, the results depicted that by removing biases from the raw datasets, the performance of numerical weather prediction (NWP) models in estimating the low and high precipitation events is improved and this issue further increases the applicability of precipitation forecasting systems in flood warning systems and water resources management.

Keywords: Flood, Prediction, Rainfall, Remote Sensing, Weather Models.

* Corresponding Author Email: Azizian@eng.ikiu.ac.ir

بهبود عملکرد سامانه‌های پیش‌بینی بارش جهانی در اقلیم‌های مختلف ایران با روش تصحیح اریبی نگاشت چندک

ستاره امینی[۱]، اصغر عزیزیان*[۱]، پیمان دانش‌کار آراسته[۱]

۱ .گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۲/۲۳- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۴/۲۱- تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۴/۳۱)

چکیده

از آنجائی که بارش به‌عنوان یکی از اجزاء اصلی مطالعات هشدار سیل، خشکسالی و منابع آب به‌شمار می‌آید، پیش‌بینی کمی آن از درجه اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. گسترش و پیشرفت روزافزون محاسبات رایانه‌ای و فناوری‌های ماهواره‌ای و سنجش از دور در سال‌های اخیر منجر به توسعه مدل‌های پیش‌بینی هواشناسی متعددی شده است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به پایگاه اطلاعاتی TIGGE اشاره نمود که در برگیرنده تعدادی زیادی از مدل‌های پیش‌بینی قدرتمند است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی عملکرد تمامی مدل‌های عددی قابل‌دسترس در پایگاه مذکور جهت پیش‌بینی بارش روزانه در ۳۸ ایستگاه سینوپتیک کشور ایران که در اقلیم‌های مختلف واقع شده‌اند، به انجام رسیده است. همچنین بررسی اثر تصحیح اریبی به روش نگاشت چندک (QM) بر عملکرد مدل‌های پیش‌بینی بارش از دیگر اهداف اصلی این تحقیق به‌شمار می‌آید. نتایج بدست آمده نشان داد که عمده مدل‌های پیش‌بینی در اقلیم‌های مرطوب، نیمه مرطوب، مدیترانه‌ای و خشک (که بیشتر مناطق جنوب غربی تا شمال غربی و شمال شرقی کشور را شامل می‌شوند) دارای بیشترین میزان همبستگی با داده‌های زمینی هستند ولی که در اقلیم‌های نیمه‌خشک و خیلی خشک مقدار شاخص CC به‌مراتب کمتر است. مقدار شاخص‌های آماری CC و RMSE بدست آمده از دو مرکز ECMWF و METEO در اکثر مناطق کشور به ترتیب بالای ۰/۶ و کمتر از ۴ میلیمتر در روز است و این در حالی است که دو مدل CMA و CPTEC از کارایی چندان مناسبی برخوردار نمی‌باشند. همچنین ارزیابی مقادیر بارش تصحیح‌شده با روش QM بیانگر بهبود چشمگیر شاخص‌های آماری بدست آمده از بسیاری از مراکز پیش‌بینی است. طبق محاسبات صورت گرفته، مقدار شاخص CC در اقلیم‌های خیلی خشک، خشک و مدیترانه‌ای به‌طور متوسط افزایشی در حدود ۲۰ درصد دارد. نکته مهم دیگر آنکه با حذف اریب از داده‌ها عملکرد مدل‌های عددی هواشناسی در پیش‌بینی مقادیر کم و بالای بارش بهبود یافته و همین مسئله قابلیت کاربرد سامانه‌های پیش‌بینی بارش در سیستم‌های هشدار سیل و مدیریت منابع آب را بیش از پیش افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: باران، سنجش از دور، پیش‌بینی، مدل‌های هواشناسی، سیلاب

مقدمه

توسعه روزافزون جوامع بشری، تغییرات کاربری اراضی ناشی از اقدامات انسانی و اثرات تغییر اقلیم سبب شکل‌گیری سیلاب‌هایی شده است که عمدتاً منجر به خسارات جانی و مالی زیادی می‌شوند. یکی از عوامل بسیار مهم در شکل‌گیری سیلاب‌های مذکور، میزان بارش باران می‌باشد و لذا پیش‌بینی آن می‌تواند زمینه لازم برای مدیریت، کنترل و کاهش خسارات ناشی از سیل گردد (Tomasella *et al.*, 2019). با گسترش چشم‌گیر فناوری‌های رایانه‌ای و ماهواره‌ای در دهه‌های اخیر، مدل‌های عددی متعددی نیز در زمینه پیش‌بینی آب و هوا توسط مراکز تحقیقاتی مختلف دنیا توسعه داده شده است که هدف اصلی عمده آنها پیش‌بینی مقادیر بارش است (Taraphdar *et al.*, 2016). این مدل‌های عددی با استفاده از روابط ریاضی مبتنی بر قوانین دینامیکی شاره و ترمودینامیک اقدام به پیش‌بینی وضعیت آینده جو می‌نمایند. از آنجائی که این مدل‌ها دارای پارامترها، شرایط اولیه و مرزی متفاوتی هستند، از این‌رو عدم تعیین صحیح هرکدام از موارد فوق می‌تواند عدم قطعیت زیادی را ایجاد نماید. یکی از کاربردهای مهم داده‌های بارش پیش‌بینی‌شده، پیش‌بینی سیلاب و رواناب در زمان‌های آینده (نزدیک و میان‌مدت) است. مدل‌های عددی هواشناسی بر اساس ساختاری که دارا هستند مقدار بارش را در سه بازه زمانی مختلف عبارتند از: زمان نزدیک به واقع (کوتاه مدت)، میان مدت و بلند مدت، برآورد می‌نمایند. از مهمترین

* نویسنده مسئول: Azizian@eng.ikiu.ac.ir

سامانه‌های پیش‌بینی موجود در سطح جهان می‌توان به مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت وضع هوا(ECMWF[1]) و مراکز ملی پیش‌بینی محیطی آمریکا (NCEP[2]) اشاره نمود. پیش‌بینی‌های صورت گرفته توسط سامانه‌های مذکور با در نظر گرفتن شرایط اولیه مختلف تولید می‌شوند و در مقایسه با پیش‌بینی‌های هواشناسی قطعی (Deterministic) تک مقداری نه‌تنها رخدادهای احتمالی را پیش‌بینی می‌کنند بلکه مقادیر عدم‌قطعیت را نیز ارائه می‌دهند (Park *et al*., 2008). علی‌رغم این قابلیت، وجود نقصان در سیستم‌های پیش‌بینی، وجود خطاهای سیستماتیک وابسته و مستقل از مکان در پیش‌بینی‌ها و همچنین مقدار اریبی بین بارش‌های سبک و سنگین، لزوم اعمال فرآیند پس‌پردازش (Post-processing) بر روی داده‌های خام را ضروری می‌نماید. برای پس‌پردازش داده‌ها روش‌های مختلفی اعم از تکنیک تشابه و ریزمقیاس دینامیکی وجود دارد ولی در این بین روش آماری نسبت به سایر روش‌ها برتری دارد (Wood and Schaake, 2008). تا به حال در مطالعات متعددی، روش نگاشت چندک(QM[3]) به‌عنوان یکی از روش‌های آماری قابل‌قبول به‌منظور پس‌پردازش نتایج حاصل از مدل‌های پیش‌بینی عددی و اصلاح خطای اریبی آن‌ها مطرح شده است.

پژوهش‌های مختلفی در زمینه پس‌پردازش خروجی مدل‌های پیش‌بینی عددی بارش در سراسر جهان صورت گرفته است که از مهمترین آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. Piani *et al*. (2010) با استفاده از یک روش آماری به اصلاح اریبی مقادیر بارش حاصل از مدل پیش‌بینی DMI[4] پرداختند و به این نتیجه رسیدند که شاخص‌های ارزیابی و جدولی بهبود قابل‌توجهی پیدا کردند. Liu anf Fan (2014) نیز به بررسی تأثیر روش پس‌پردازش مدل میانگین‌گیری بیزین BMA[5] بر داده‌های پیش‌بینی بارش چهار مدل پایگاه TIGGE[6] پرداختند و نشان دادند که شاخص‌های پیش‌بینی نسبت به قبل از اصلاح نتایج بهتری ارائه می‌دهند و همچنین دو مدل ECMWF و UKMO[7] نسبت به دو مدل CMA[8] و NCEP به‌طور قابل‌توجهی بهبود یافتند. Tao *et al*. (2014) با ارزیابی روش پس‌بردازش آماری Ensemble Pre-Processor (EPP) در اصلاح بارش پیش‌بینی‌شده پنج مدل پایگاه TIGGE در حوضه رودخانه Huai به این نتیجه رسیدند که این روش از کارایی مناسبی در کاهش مقادیر اریبی، خطای میانگین مربعات و شاخص‌های احتمالاتی مانند امتیاز Brier دارد. همچنین این محققین دریافتند که عملکرد دو مدل JMA[9] و ECMWF قبل و پس از پس‌پردازش نسبت به سایر مدل‌ها دارای عملکرد بهتری می‌باشند. Hamill *et al*. (2017) نیز در پژوهشی به بررسی کارایی الگوریتم پس‌پردازش نگاشت چندک بر عملکرد بارش مدل‌های عددی گروهی سازمان هواشناسی ملی آمریکا (NWP[10]) پرداخت. نتایج حاصل از ارزیابی دو مرکز NCEP و CMC[11] بیانگر بهبود شاخص‌های عملکرد، اعتمادپذیری و کاهش خطای اریبی پیش‌بینی ضمن حفظ وضوح و جزئیات مکانی است. در مطالعه‌ای دیگر نیز Hamill *et al*. (2017) دو روش پس‌پردازش Quantile Mapping و Rank-Weighted Best-Member Dressing را برای رفع خطای سیستماتیک بر داده‌های بارش پیش‌بینی‌شده توسط پایگاه‌های GEFFS[12]، CMC و ECMWF استفاده نمودند و دریافتند که استفاده همزمان از دو روش مذکور به‌طور چشمگیری باعث افزایش سطح اعتمادپذیری و توانایی مدل‌های پیش‌بینی می‌گردد. Javanmard Ghasab *et al*. (2016) به بهبود عملکرد داده‌های پیش‌بینی بارش چهار مدل عددی CMC، ECMWF، NCEP و UKMO در چند ایستگاه هواشناسی واقع در حوضه کارون بزرگ پرداختند و از روش تصحیح اریبی چندک استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که شاخص‌های ارزیابی مثل شاخص همبستگی و نش-ساتکلیف در برخی مدل‌ها افزایش نسبی یافته‌اند. همچنین Aminyavari *et al*. (2018) از دو روش نگاشت چندک و مدل میانگین‌گیری بیزین برای اصلاح اریبی و پس‌پردازش بارش پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌های عددی CMA[13]، ECMWF، NCEP و UKMO در سطح حوضه بشار پرداختند. نتایج بیانگر افزایش دقت مدل‌ها بر اساس شاخص‌های آماری (مانند CC و ME) و احتمالاتی (مانند: BSS[14]) در بیشتر ایستگاه‌ها است.

با توجه به توضیحات فوق، مشاهده می‌شود که استفاده از روش‌های پس‌پردازش مانند اصلاح اریبی به روش نگاشت چندک تأثیر مثبت و بسزایی در کاهش خطای سامانه‌های پیش‌بینی موجود دارد. بررسی تحقیقات صورت گرفته در زمینه ارزیابی و اصلاح سامانه‌های پیش‌بینی در سطح کشور حاکی از آن است تاکنون مطالعات نسبتاً اندکی در این زمینه صورت گرفته و در

1 . European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
2 . National Centers for Environmental Prediction
3 . Quantile Mapping
4 . Danish Meteorological Institute
5 . Bayesian Model Averaging
6 . THORPEX Interactive Grand Global Ensemble
7 . United Kingdom Met Office
8 . China Meteorological Administration
9 . Japan Meteorological Agency
10 . Numerical Weather Prediction
11 . Canadian Meteorological Center
12 . Global Ensemble Forecast System
13 . China Meteorological Administration
14 . Brier Skill Score

صورت وجود نیز تنها به یک حوضه و یا مدل‌های مشخصی محدوده بوده است. آنچه که تاکنون کمتر بدان پرداخته شده است، ارزیابی و اصلاح اریبی تمامی سامانه‌های موجود در پایگاه TIGGE با در نظر گرفتن اثر نوع اقلیم است. لذا پژوهش حاضر با هدف ارزیابی داده‌های بارش روزانه بدست آمده از نه مرکز مختلف (شامل NCEP, Meteo France, KMA, JMA, ECMWF, CMA, CPTEC[۲], ECCC[۱] و UKMO) پیش‌بینی بارش در اقلیم-های مختلف ایران به انجام رسیده است. همچنین تصحیح اریبی سامانه‌های مزبور با استفاده از روش نگاشت چندک از دیگر اهداف این تحقیق بشمار می‌آید.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه

کشور ایران با وسعت ۱۶۴۸۰۰۰ کیلومتر مربع در نیمه جنوبی آسیا با موقعیت جغرافیایی ۴۰-۲۵ درجه شمالی و ۶۴-۴۴ درجه شرقی قرار دارد. کمترین و بیشترین ارتفاعات به‌طور تقریبی به ترتیب ۲۵- متر در دریای خزر و ۵۶۷۱ متر قله دماوند می‌باشند. همچنین مقدار متوسط بارش در سطح کشور به‌طور سالیانه ۲۵۰ میلیمتر است و پوشش گیاهی در بیشتر مناطق (مرکز، جنوب و شرق) بسیار کم است. به‌طور کلی از دید توپوگرافی، کشور تنوع قابل‌توجهی دارد؛ وجود دو رشته کوه البرز (در شمال غرب تا شمال شرق) و زاگرس (از شمال غرب تا جنوب شرق امتداد داشته و ایران را به دو بخش تقسیم کرده است) و منطقه مرکزی که از چندین حوزه آبریز بسته یا درون‌ریز تشکیل شده و از شرق با دو کویر لوت و مرکزی احاطه شده است. همین تنوع توپوگرافی موجب به وجود آمدن اقلیم‌های متنوع و به دنبال آن تغییر الگوی دما و بارش در سطح کشور شده است. به‌منظور دستیابی به هدف پژوهش و بررسی کارائی مراکز پیش‌بینی بارش جهانی در اقلیم‌های مختلف ایران نیاز به یک سیستم طبقه‌بندی مناسب است. در حال حاضر روش‌های اقلیمی مختلفی وجود دارد که هر کدام بر اساس یک معیار مشخص به طبقه‌بندی اقلیمی یک منطقه می‌پردازند. روش De Martonne با در نظر گرفتن کمیت‌هایی همچون بارش و دما، یکی از پرکاربردترین روش‌های طبقه‌بندی اقلیمی است که توسط Rahimi *et al*. (2013) برای کشور ایران اصلاح و تعدیل شده است. در این روش، اقلیم‌های موجود در سطح ایران به هشت دسته کلی عبارتند از: خیلی خشک (Extra-Arid, A1.1)، خشک (Arid, A1.2)، شبه خشک (Semi-Arid, A2)، مدیترانه‌ای (Mediterranean, A3)، شبه مرطوب (Semi-Humid, A4)، مرطوب (Humid, A5)، خیلی مرطوب نوع A (Per-Humid A, A6)، خیلی مرطوب نوع B (Per-Humid B, A7) تقسیم می‌شوند (شکل ۱).

مشخصات مدل‌های پیش‌بینی و داده‌های مورداستفاده در پژوهش

در این تحقیق از مجموعه داده‌های بارش روزانه نه مرکز پیش‌بینی جهانی موجود در پایگاه TIGGE در بازه زمانی ۲۰۱۶-۲۰۱۴ استفاده شده است. مراکز پیش‌بینی بارش موجود در پایگاه مذکور شامل: CMA (اداره هواشناسی چین)، CPTEC (مرکز برزیلی برای پیش‌بینی آب و هوا و مطالعات اقلیمی)، ECCC (محیط و تغییر اقلیم کانادا)، ECMWF (مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت وضع هوا)، JMA (اداره هواشناسی ژاپن)، KMA (اداره هواشناسی کره)، Meteo France (هواشناسی فرانسه)، NCEP (مرکز ملی پیش‌بینی محیطی آمریکا) و UKMO (دفتر هواشناسی انگلستان) می‌باشند و از طریق تارنمای https://apps.ecmwf.int/datasets/data/tigge قابل دسترسی هستند. همچنین به‌منظور بررسی راستی آزمایی عملکرد هر کدام از مراکز مزبور از اطلاعات بارش روزانه ۳۸ ایستگاه سینوپتیک (http://irimo.ir/far/wd/2703) موجود در اقلیم‌های مختلف کشور به‌عنوان داده مشاهداتی و مبنا استفاده شده است. شکل (۱) پراکندگی ایستگاه‌های منتخب و موقعیت آن‌ها در طبقه‌بندی اقلیمی را نشان می‌دهد. در جدول (۱) نیز به‌طور مختصر مشخصات و جزئیات مربوط به هر کدام از مدل‌های پیش‌بینی ارائه شده است (Su *et al*., 2014, Taraphdar *et al*., 2016). لازم به ذکر است، اگرچه هر یک از مدل‌های عددی دارای قدرت تفکیک متفاوتی می‌باشند اما در پایگاه TIGGE با روش درون یابی Bilinear داده‌های بارش با توان تفکیک مکانی ۰/۵ × ۰/۵ درجه در اختیار کاربران قرارگرفته است. همچنین با توجه به اینکه داده‌های بدست آمده از مدل‌های مذکور عمدتاً به فرمت GRIB2 می‌باشند، از پلاگین Temporal/ Spectral Profile در محیط نرم-افزار کوانتوم GIS (QGIS) نسبت به تبدیل آن‌ها به فرمت متنی و اکسلی استفاده شده است.

تصحیح اریبی به روش نگاشت چندک (QM)

داده‌های خام خروجی مدل‌های پیش‌بینی عددی هواشناسی دارای خطای سیستماتیک در میانگین و گستره پیش‌بینی‌ها هستند، لذا نسبت به اصلاح آن باید اقداماتی صورت گیرد. اگرچه تاکنون روش‌های مختلف برای حذف اریب از داده‌ها توسط محققین ارائه شده است، اما به علت اثربخشی زیاد و محاسبات

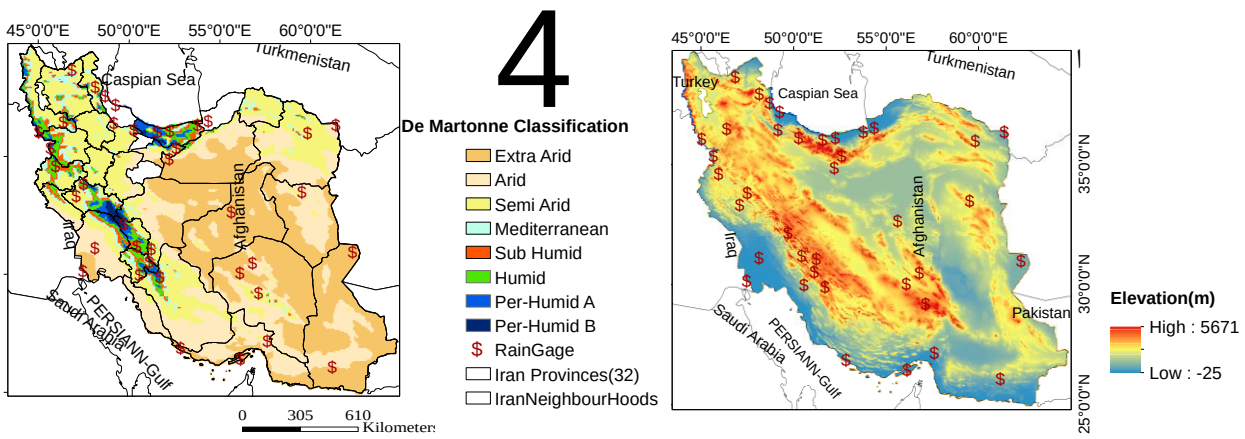
۱ . Environment and Climate Change Canada

۲ . Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

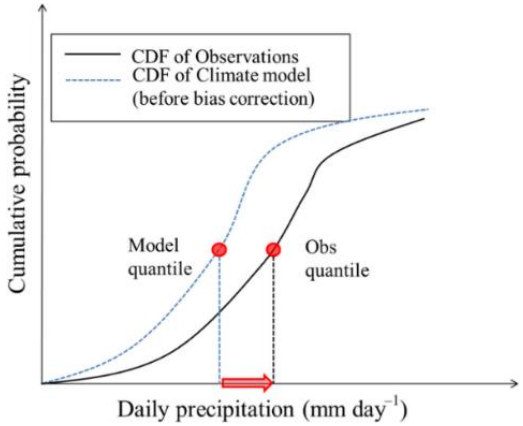
کم، نگاشت چندک به‌عنوان یکی از روش‌های کارآمد به‌منظور تصحیح اریبی در بسیاری از مطالعات مطرح شده است (Gupta *et al.*, 2019). نگاشت چندک روشی ناپارامتریک است و برای کلیه توزیع‌های احتمالاتی بارش بدون هیچ‌گونه پیش‌فرضی برای توزیع آن‌ها کاربرد دارد (Themeßl *et al.*, 2012). روش نگاشت چندک به نام‌های نگاشت احتمالاتی (Probability Mapping) و نگاشت توزیعی (Distribution Mapping) نیز شناخته می‌شود (Gupta *et al.*, 2019). با توجه به توضیحات فوق، در پژوهش حاضر از روش نگاشت چندک به‌منظور اصلاح اریبی داده‌های بارش روزانه پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌های پیش‌بینی پایگاه TIGGE در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ استفاده شده‌است. روند محاسبات در این روش به این‌گونه است که ابتدا چندک هر عضو از مدل پیش‌بینی عددی برای هر روز با توجه به تابع توزیع تجمعی پیش‌بینی (CDF) محاسبه می‌شود، سپس این چندک با چندک متناظر مقدار مشاهداتی در تابع توزیع تجمعی مشاهداتی روزانه، جایگزین می‌شود (شکل ۲).

جدول ۱- مشخصات مراکز پیش‌بینی موجود در پایگاه TIGGE

Center	Country	Base Time (UTC)	Horizontal resolution archived (degree)	Forecast length (days)
CMA	China	۰۰/۰۶/۱۲	۰/۵۶× ۰/۵۶	۱۰
CPTEC	Brazil	۰۰/۱۲	۰/۵۵× ۰/۵۵	۱۵
ECCC	Canada	۰۰/۱۲	۰/۳۵× ۰/۳۵	۱۶
ECMWF	Europe	۰۰/۱۲	~۰/۲۸ ~۰/۵۶	۱۰-۰ ۱۵-۱۰
JMA	Japan	۰۰/۱۲	۱/۲۵× ۱/۲۵	۱۱
KMA	Korea	۰۰/۱۲	۰/۳۵× ۰/۳۵	۱۰
Meteo France	France	۰۶/۱۸	۰/۷۳× ۰/۷۳	۳-۵
NCEP	United State	۰۰/۰۶/۱۲/۱۸	۱/۰× ۱/۰	۱۶
UKMO	United Kingdom	۰۰/۰۶/۱۲/۱۸	۰/۸۳× ۰/۵۶	۱۵



شکل ۱- نقشه تغییرات الف) ارتفاعی، ب) اقلیمی ایران و توزیع ایستگاه‌های سینوپتیک مورداستفاده در پژوهش



شکل ۲- نمایش روش اصلاح اریبی نگاشت چندک (Kim *et al.*, 2016)

رابطه (۱) تابع توزیع معکوس که به نام تابع چندک نیز شناخته می‌شود، چگونگی کار را نشان می‌دهد.

(رابطه۱)

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

در رابطه فوق، BC_{fcst}: مقدار پیش‌بینی تصحیح‌شده، Fcst: مقدار پیش‌بینی خام (قبل از اصلاح)، CDF_{obs}^{-1}: تابع توزیع تجمعی داده‌های مشاهداتی و Q_n: چندک مقدار پیش‌بینی در CDF_{fcst} است.

روش‌های ارزیابی

برای ارزیابی مدل‌های عددی پیش‌بینی بارش در پژوهش حاضر از سه دسته شاخص آماری مختلف استفاده بعمل آمده است. شاخص‌های گروه اول شاخص‌های پیوسته آماری متشکل از CC و RMSE و RBias هستند. شاخص‌های گروه دوم که به شاخص‌های جدولی (Contingency table) معروف هستند شامل POD، FAR و Bias می‌باشند و شاخص‌های گروه سوم که از نوع ارزیابی احتمالاتی هستند شامل نمره بریر (BS) و نمره مهارت بریر (BSS) می‌باشند. در جدول (۲) معادلات و خصوصیات شاخص‌های آماری مذکور ارائه شده است.

طبق روابط ارائه‌شده در جدول (۲) شاخص‌های گروه اول بر اساس مقدار بارش برآوردی تعیین می‌شوند، در حالی که شاخص‌های گروه دوم بر اساس رخداد یا عدم رخداد بارش تعیین می‌شوند. برای اطلاعات بیشتر از شاخص‌های جدولی خوانندگان به (Ebert *et al.*, 1996) ارجاع داده می‌شوند. شاخص Bias معمولاً به‌عنوان یک نسبت برای تائید جداول احتمالی استفاده می‌شود و درواقع نسبت برآوردهای صحیح به مشاهدات صحیح است. اگر مقدار این شاخص بزرگتر و کوچکتر از یک باشد نشان‌دهنده این است که مرکز پیش‌بینی بارش موردنظر تعداد روزهای بارانی را به ترتیب بیشتر و کمتر تخمین زده است و اگر مقدار آن معادل یک باشد، نشانگر عدم وجود خطا است (Wilks, 2006). شاخص POD، نشان‌دهنده نسبت شناسایی صحیح بارش پیش‌بینی عددی به تعداد کل رخدادهای بارش مشاهده‌شده در ایستگاه زمینی است. محدوده عددی این شاخص بین صفر و ۱ است که هرچه به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، توانائی مرکز پیش‌بینی بارش در پیش‌بینی وقوع بارندگی صحیح است. شاخص FAR نیز برای بررسی عملکرد پایگاه بارشی در تشخیص‌های اشتباه مورد استفاده قرار می‌گیرد. محدوده عددی این شاخص نیز بین صفر و ۱ است با این وجود که این شاخص هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، عملکرد مرکز پیش‌بینی عددی بهتر خواهد بود.

جدول ۲- شاخص‌های آماری، جدولی و احتمالاتی مورداستفاده در پژوهش

No	Measure	Equation	Perfect/No Skill
1	Root Mean Square Error	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(R_{obs} - R_{sat})^2}$	0/±∞
2	Correlation Coefficient	$CC = \frac{\sum_{i=1}^{n}(R_{obs} - \bar{R}_{obs})(R_{sat} - \bar{R}_{sat})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(R_{obs} - \bar{R}_{obs})^2 \sum_{i=1}^{n}(R_{sat} - \bar{R}_{sat})^2}}$	1/0
3	Relative Bias	$RBias = \frac{\sum_{i=1}^{n}(R_{sat} - R_{obs})}{\sum_{i=1}^{n} R_{obs}} \times 100$	1/ ±∞
4	Bias	$\frac{Hit + FalseAlarm}{Hit + Miss}$	Underestimate < 1 , 1> Overestimate
5	Probability of Detection	$POD = \frac{Hit}{Hit + Miss}$	1/0
6	False Alarm Ratio	$FAR = \frac{False\,Alarm}{Hit + False\,Alarm}$	0/1
7	Brier Score	$BS = \frac{1}{n}\sum(P_f - P_o)^2$	0/1

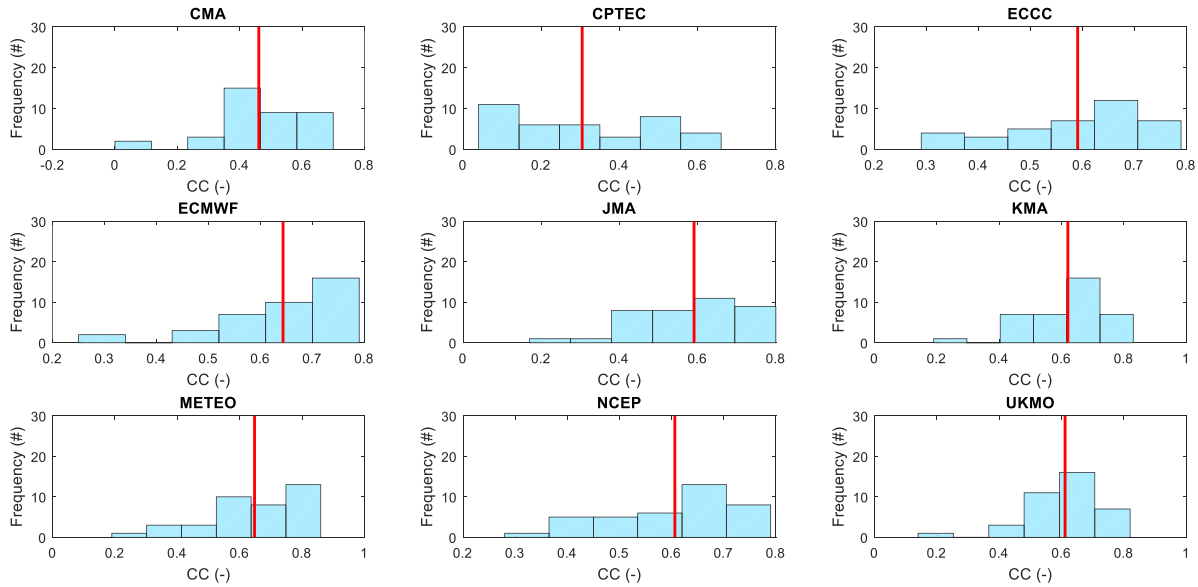
در جدول (۲)، R_{ob}: مقادیر بارش مشاهده‌ای ثبت‌شده در ایستگاه‌های زمینی، R_{Sat}: مقادیر بارش بدست آمده از مرکز پیش‌بینی بارش عددی،n: تعداد داده‌های بارش در طول بازه زمانی، $\bar{R}_{obs}$: میانگین مقادیر بارش مشاهداتی، $\bar{R}_{sat}$: میانگین مقادیر بارش بدست آمده از مرکز پیش‌بینی بارش عددی، P_f: احتمال پیش‌بینی‌شده و P_o: بیانگر مشاهده است، اگر رویداد رخ

داده باشد، P_o: برابر یک و در غیر اینصورت صفر می‌باشد.

نتایج و بحث

ارزیابی عملکرد مراکز پیش‌بینی عددی پایگاه TIGGE در تخمین بارش روزانه

به‌منظور ارزیابی هرچه بهتر پیش‌بینی‌های بارش هر کدام از مدل‌های عددی پایگاه TIGGE و همچنین بررسی تأثیر اقلیم، در این پژوهش از شاخص‌های آماری (مانند: CC، RMSE، Bias) و شاخص‌های جدولی (مانند: POD، FAR و BS) استفاده گردید، که نتایج آن در شکل‌های (۳ تا ۷) و به‌صورت توزیع فراوانی و مکانی نشان داده شده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که پیش‌بینی‌های صورت گرفته توسط مرکز ECMWF و METEO با دارا بودن ضریب CC معادل ۰/۶ در بیش از ۶۸ درصد ایستگاه‌های موردمطالعه، از بیشترین همبستگی با داده‌های مشاهداتی در سطح ایران برخوردار می‌باشند (شکل ۳). برتری مدل ECMWF را می‌توان به دلیل استفاده این مرکز از سیستم یکپارچه جهانی IFS به‌عنوان مدل سطح زمین دانست، همچنین محاسبات اولیه رطوبت خاک در مدل METEO با استفاده از تحلیل‌های مدل ECMWF بدست می‌آید که نتایج نزدیک به هم این دو مدل را نیز می‌توان به این عامل نسبت داد. همچنین بررسی توزیع مکانی (شکل ۴) مقادیر شاخص مذکور نشان می‌دهد که هر دو مدل در نواحی واقع در محدوده دریای خزر و خلیج‌فارس از همبستگی به‌مراتب کمتری با داده‌های زمینی برخوردار می‌باشند که علت اصلی این امر را می‌توان به تأثیر جریانات همرفتی میان‌مقیاس و نیز تبادل رطوبت بین نواحی ساحلی و دریا مرتبط دانست. جهت افزایش دقت پیش‌بینی مراکز مذکور بایستی معادلات عددی مدل‌های هواشناسی مورداستفاده در این مراکز اصلاح گردد تا بهتر بتوان بیلان آب و انرژی بین خشکی و دریا را برقرار نمود. نکته قابل‌توجه دیگری که از شکل‌های مذکور می‌توان استنباط نمود، عملکرد قابل‌توجه پیش‌بینی‌های مرکز ECMWF در مناطق مرکزی ایران که دارای اقلیم خشک و خیلی خشک (ایستگاه‌های واقع در استان‌های کرمان، یزد و سیستان و بلوچستان) هستند، است. بر خلاف دو مرکز فوق، پیش‌بینی‌های صورت گرفته توسط دو مرکز پیش‌بینی بارش CMA و CPTEC از کمترین میزان همبستگی با داده‌های مشاهداتی در مقیاس روزانه برخوردار می‌باشند، که این ضعف را می‌توان به دلیل ساختار این دو مدل یعنی شبیه‌سازی نکردن عدم‌قطعیت مدل دانست. محاسبات صورت گرفته نشان می‌دهد که تنها در حدود ۱۸ درصد ایستگاه‌های موردمطالعه در سطح کشور، پیش‌بینی‌های مراکز مذکور دارای ضریب CC بالاتر از ۰/۶ می‌باشند و در بیشتر ایستگاه‌ها مقدار این ضریب همواره کمتر از ۰/۳ است. کارایی پیش‌بینی‌های فوق در بخش‌های شمالی، مرکزی، شرقی، جنوب شرقی و جنوب کشور نسبت به دیگر مناطق به‌مراتب ضعیف‌تر است.

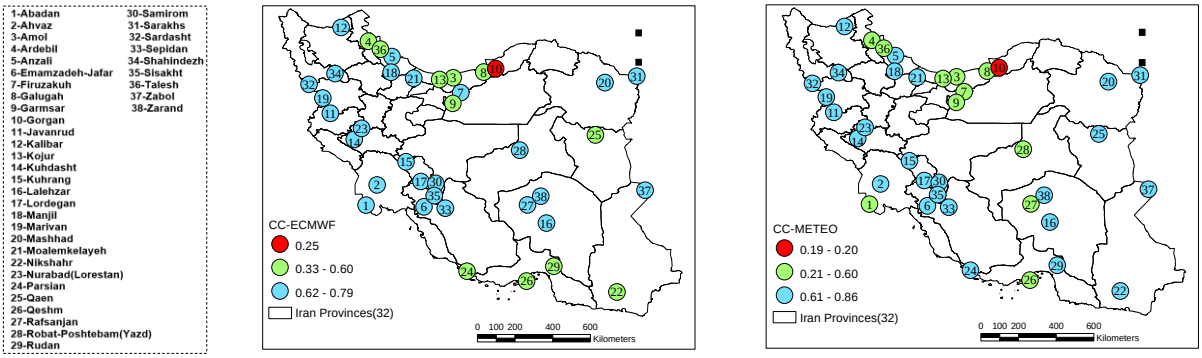


شکل ۳- توزیع فراوانی شاخص همبستگی (CC) در سطح کشور برای مراکز موجود در پایگاه TIGGE
(خط قرمز رنگ نشان‌دهنده متوسط مقدار شاخص CC است)

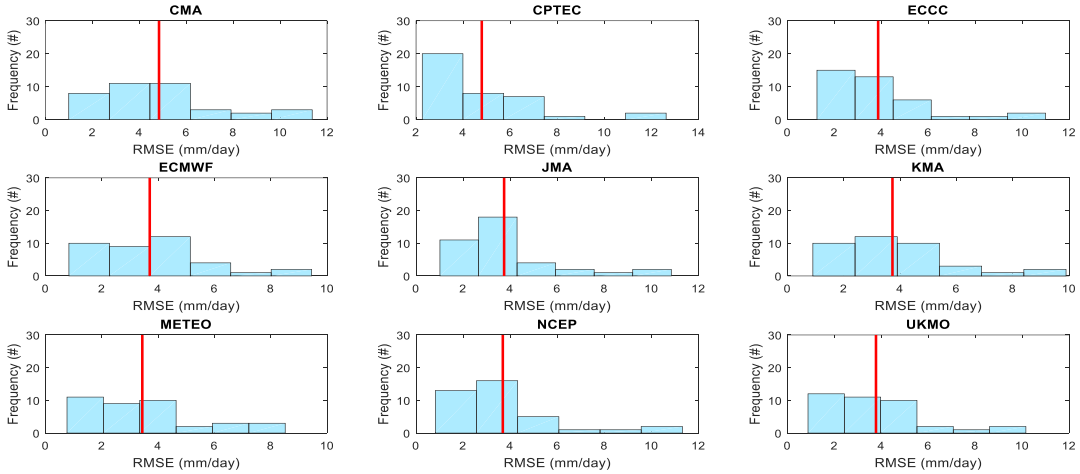
همچنین توانائی مراکز پیش‌بینی UKMO و KMA اگرچه نسبت به دو مرکز METEO و ECMWF کمتر است اما نسبت به دیگر مدل‌های عددی پیش‌بینی بارش بالاتر بوده، به‌طوری‌که در بیش از ۶۰ درصد ایستگاه‌های موردمطالعه ضریب همبستگی بین

مقدار بارش روزانه پیش‌بینی شده با داده‌های زمینی بالاتر از ۰/۶ است. مدل UKMO و KMA نیز هر دو از مدل سطح زمین GloSea5-GC2 برای پیش‌بینی‌های خود استفاده می‌کنند. نتایج مشابه این دو مدل نیز به این علت است که از سال ۲۰۱۱ مدل KMA پیش‌بینی‌های عملیاتی خود را با استفاده از مدل یکپارچه (UM) و سیستم پیش/پس‌پردازش اعمال‌شده توسط اداره هواشناسی انگلیس تولید می‌کند(Kay and Kim, 2014).

بررسی توزیع فراوانی شاخص RMSE (شکل ۵) نیز حاکی از آن است که پیش‌بینی‌های صورت گرفته توسط مراکز ECMWF، NCEP، CPTEC و JMA از خطای کمتری نسبت به داده‌های زمینی برخوردار می‌باشند. مقدار این شاخص در بخش های شرقی، مرکزی و جنوب شرقی کشور به‌مراتب کمتر است (شکل ۶). محاسبات صورت گرفته نشان می‌دهد که متوسط این شاخص در عمده مراکز پیش‌بینی کمتر از ۴ میلی‌متر در روز است. به‌عنوان مثال، برای مدل‌های NCEP و JMA به ترتیب بیش از ۷۴ و ۷۶ درصد از ایستگاه‌های موردبررسی دارای شاخص RMSE کمتر از ۴ میلیمتر در روز هستند.

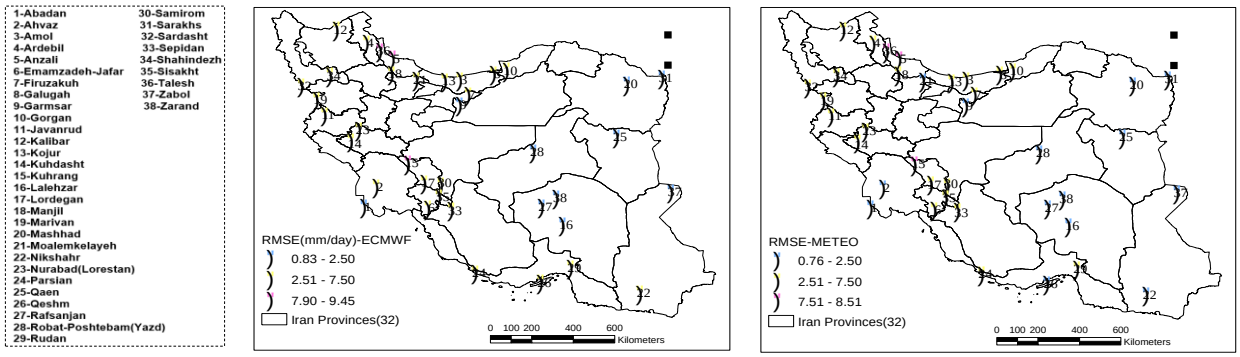


شکل ۴- توزیع مکانی شاخص همبستگی (CC) بین داده‌های زمینی و دو مدل عددی ECMWF و METEO در سطح کشور



شکل ۵- توزیع فراوانی شاخص آماری RMSE در سطح کشور برای مراکز موجود در پایگاه TIGGE

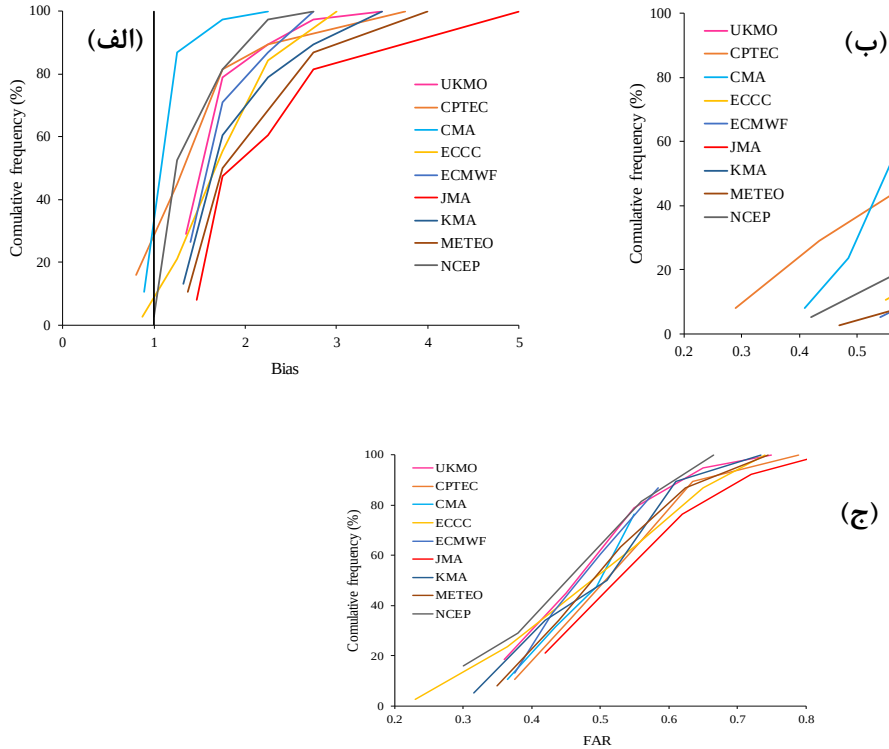
(خط قرمزرنگ نشان‌دهنده متوسط مقدار شاخص RMSE است)



شکل ۶- توزیع مکانی شاخص آماری RMSE دو مدل عددی ECMWF و METEO در سطح کشور

همچنین از میان مدل‌های مختلف، خروجی‌های حاصل از مراکز METEO، KMA، UKMO و ECMWF نسبت به دیگر مراکز از خطای به‌مراتب کمتری برخوردار می‌باشند. در شکل (۶) نیز به‌عنوان نمونه، توزیع مکانی شاخص RMSE تنها برای دو مرکز پیش‌بینی ECMWF و METEO نشان داده شده است. در شکل (۷) نیز توزیع تجمعی شاخص‌های جدولی Bias، POD و FAR برای مراکز مذکور نشان داده شده است. بررسی نتایج بدست آمده بر اساس شاخص Bias حاکی از آن است که تمامی مراکز پیش‌بینی پایگاه TIGGE تمایل به بیش‌برآوردی تعداد روزهای بارانی دارند و در این بین پیش‌بینی‌های صورت گرفته توسط سه مرکز JMA، METEO و KMA نسبت به دیگر مراکز تمایل به بیش‌برآوردی زیادی در تعداد روزهای بارانی دارند. همان‌طور که (Yamaguchi and Majumdar, 2010) نیز در پژوهش خود ذکر کردند تمایل به بیش‌برآوردی در مدل JMA به دلیل ساختار مدل آشفتگی آن‌که از روش بردارهای منفرد (SVs) استفاده کرده و به اشتباه بردارهای منفرد مرطوب را به کار می‌گیرند، است.و این در حالی است که پیش‌بینی‌های انجام‌شده توسط دو مرکز CMA و NCEP دارای کمترین مقدار بیش-برآوردی می‌باشند. مقدار متوسط شاخص Bias در سطح کشور برای سه مرکز JMA، METEO و KMA به ترتیب معادل ۲/۴۶، ۲/۲۵ و ۲/۰۲ و برای سه مرکز CMA و NCEP به ترتیب در حدود ۱/۲۶ و ۱/۵۹ است. لازم به ذکر است که مقدار شاخص Bias در مناطق واقع در حاشیه دریای خزر و خلیج‌فارس نسبت به دیگر مناطق بیشتر بوده و این به معنی پیش‌بینی تعداد روزهای بارانی زیاد در این مناطق است.

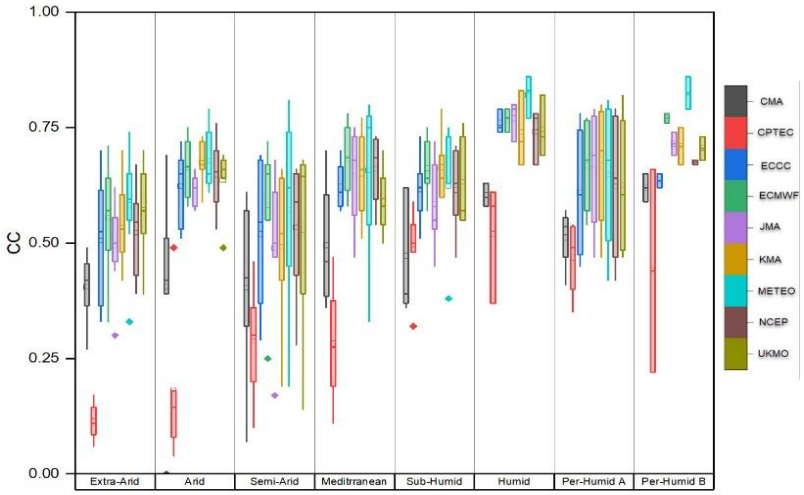
ارزیابی نتایج بر اساس شاخص POD نیز نشان می‌دهد که مراکز پیش‌بینی METEO، JMA، ECMWF و KMA با تشخیص صحیح تعداد روزهای بارانی از عملکرد به‌مراتب بهتری نسبت به دیگر مراکز برخوردار می‌باشند. برخلاف مراکز مذکور، عملکرد دو مرکز پیش‌بینی CMA و CPTEC در تشخیص صحیح تعداد روزهای بارانی بسیار پائین بوده بطوری‌که در بهترین حالت تنها قادر به شناسایی حداکثر ۶۰ درصد تعداد روزهای بارانی هستند و لذا به نظر می‌رسد از این منظر برای کاربرد در سامانه-های هشدار سیلاب نمی‌توانند به‌عنوان گزینه‌ی مناسبی مورد استفاده قرار گیرند. در نهایت تحلیل‌های صورت گرفته بر اساس شاخص FAR گویای این مطلب است که سه منبع NCEP، UKMO و ECMWF با دارا بودن کمترین تشخیص‌های غلط از عملکرد بالایی در پیش‌بینی روزهای بارانی برخوردار هستند و این در حالی است که سه منبع JMA، CPTEC و ECCC دارای خطاهای زیادی در پیش‌بینی رخدادهای بارشی هستند. بنابراین در استفاده از مدل‌های مذکور توصیه می‌گردد به‌هیچ‌وجه از پیش‌بینی‌های خام استفاده نشده و با رفع خطای اریبی، عملکرد آنها ارتقا یابد.



شکل ۷- توزیع تجمعی مقدار شاخص‌های Bias (الف)، POD (ب) و FAR (ج) برای هر کدام از مدل‌های عددی پیش‌بینی بارش پایگاه TIGGE در سطح کشور در مقیاس روزانه

ارزیابی تأثیر شرایط اقلیمی بر عملکرد مراکز عددی پیش‌بینی بارش

در این بخش به بررسی مقدار شاخص‌های آماری CC و RMSE و نیز شاخص‌های جدولی POD، FAR و Brier در اقلیم‌های مختلف ایران پرداخته شده است. ارزیابی نتایج بدست آمده بر اساس شاخص CC نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌های مراکز عددی پایگاه TIGGE در اقلیم‌های مرطوب، نیمه مرطوب، مدیترانه‌ای و خشک دارای بیشترین همبستگی با داده‌های زمینی هستند و این در حالی است که در اقلیم‌های نیمه‌خشک (Semi-Arid) و خیلی خشک (Extra-Arid) مقدار شاخص CC به‌مراتب کمتر است (شکل ۸). از بین مدل‌های پیش‌بینی مختلف نیز نتایج بدست آمده از دو مرکز ECMWF و METEO در بیشتر اقلیم‌های موردبررسی دارای ضریب همبستگی حدود ۰/۶ به بالاتر است و این بدین معنی است که فارغ از نوع اقلیم بخش‌های مختلف ایران می‌توان از پیش‌بینی‌های دو مرکز مذکور با حاشیه اطمینان بالاتری استفاده نمود. هرچند ذکر این نکته ضرویست است که با توجه به همبستگی بالا بین نتایج این مراکز با داده‌های مشاهداتی، می‌توان با اعمال روش‌های حذف اریب مقدار خطای آنها را کاهش و در مطالعات مختلف به‌ویژه شبیه‌سازی و هشدار سیلاب استفاده نمود. برخلاف عملکرد قابل‌قبول مراکز مذکور، نتایج بدست آمده از دو مرکز CMA و CPTEC حاکی از همبستگی ضعیف بین داده‌های بارش پیش‌بینی شده و مشاهداتی در تمامی اقلیم‌های ایران است و لذا توصیه می‌گردد از نتایج این مراکز در سطح ایران استفاده نشود.



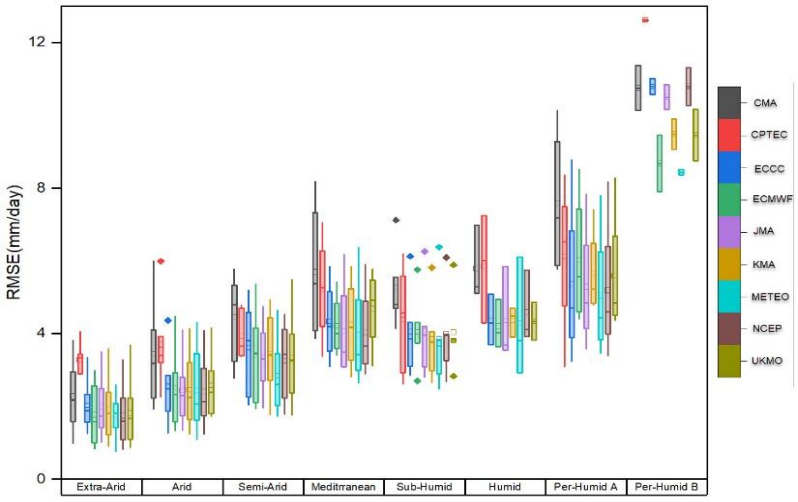
شکل ۸- نمودار جعبه‌ای مقدار شاخص CC هر کدام از مراکز پیش‌بینی بارش پایگاه TIGGE در اقلیم‌های مختلف ایران

ارزیابی نتایج بر اساس شاخص RMSE نیز حاکی از آن است که مقدار خطا در برآورد بارش در اقلیم‌های مدیترانه‌ای و مرطوب (شامل تمامی اقلیم‌های نیمه مرطوب، مرطوب، مرطوب نوع A و B) نسبت به دیگر اقلیم‌ها بالا است و این در حالی است که در اقلیم‌های خشک، نیمه‌خشک و خیلی خشک با توجه به مقدار کم بارش‌ها، مقدار شاخص RMSE همواره کمتر از ۳/۵ میلیمتر در روز است (شکل ۹). از میان مراکز مذکور، عملکرد دو مرکز پیش‌بینی CMA و CPTEC بسیار پائین بوده و با خطای نسبتاً زیادی اقدام به پیش‌بینی مقدار بارش می‌نمایند. همچنین بررسی تغییرات مکانی شاخص RMSE در اقلیم‌های مختلف ایران مؤید این مطلب است که در مناطق واقع در حاشیه دریای خزر و رشته‌های کوه‌های زاگرس مقدار خطا در برآورد بارش نسبت به دیگر مناطق بالا است که علت اصلی آن را نیز می‌توان به میزان بالای رطوبت هوا در محدوده دریای خزر مرتبط دانست. برای مناطق واقع در محدوده رشته‌کوه‌های زاگرس نیز یکی از علل اصلی خطا در پیش‌بینی بارش، سهم آب ناشی از بارش برف است که در بسیاری از مدل‌های هواشناسی تحت عنوان کمیتی به نام Precipitation گزارش می‌شود. به عبارت دیگر در مناطق کوهستانی، بخشی از کمیت Precipitation ناشی از بارش برف بوده و با کسر از آن از کمیت Precipitation می‌توان مقدار صحیح بارش (Rainfall) را بدست آورد. از آنجائی که استخراج عمق و پوشش برف در زمان‌های مختلف کار نسبتاً دشواری است، در این پژوهش فرض بر این است که مقدار متغیر Precipitation معادل مقدار بارش است.

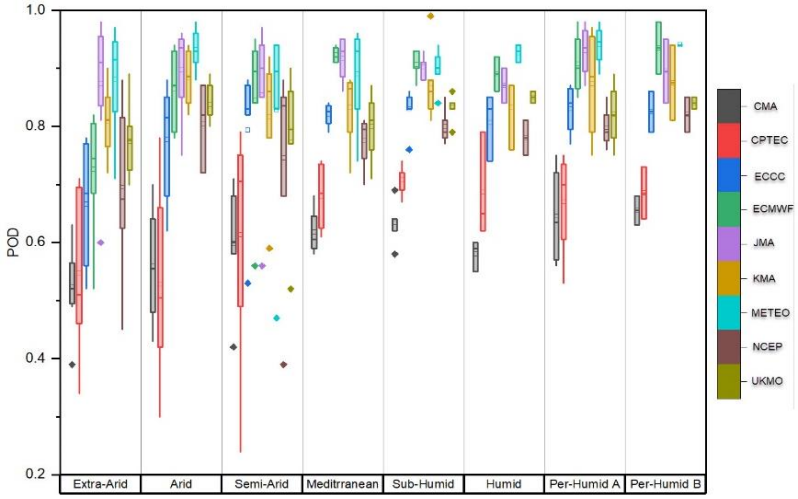
مقایسه توانایی مراکز مختلف از منظر قابلیت پیش‌بینی و تشخیص روزهای بارانی نشان می‌دهد که پایگاه‌های METEO، KMA، JMA و ECMWF تقریباً در تمامی اقلیم‌های ایران از عملکرد خوبی برخوردار بوده به‌طوری که مقدار شاخص POD

همواره بالاتر از ۰/۸ است (شکل ۱۰). اگرچه مرکز پیش‌بینی عددی ECMWF در تمامی اقلیم‌ها دارای شاخص POD بالایی است و از آن می‌توان به‌منظور پیش‌بینی روزهای بارانی در اکثر مناطق کشور استفاده نمود، اما در اقلیم خیلی خشک (Extra-Arid) که شامل بخش‌های مرکزی، جنوب شرقی و شرقی ایران است، از عملکرد به‌مراتب پایین‌تری برخوردار است. نکته مهمی دیگری که از شکل (۱۰) می‌توان برداشت نمود این است که با فاصله گرفتن از اقلیم‌های خشک و حرکت به سمت اقلیم‌های مرطوب، میزان دقت در پیش‌بینی صحیح روزهای بارانی افزایش می‌یابد. برخلاف مراکز مذکور، عملکرد دو مرکز پیش‌بینی CMA و CPTEC با توجه به پائین بودن شاخص POD در بخش‌های زیادی از ایران، چندان رضایت‌بخش نبوده و در تشخیص روزهای بارانی با خطای زیادی روبرو می‌باشند و لذا برای اقلیم‌های ایران استفاده از این مراکز پیش‌بینی توصیه نمی‌شود.

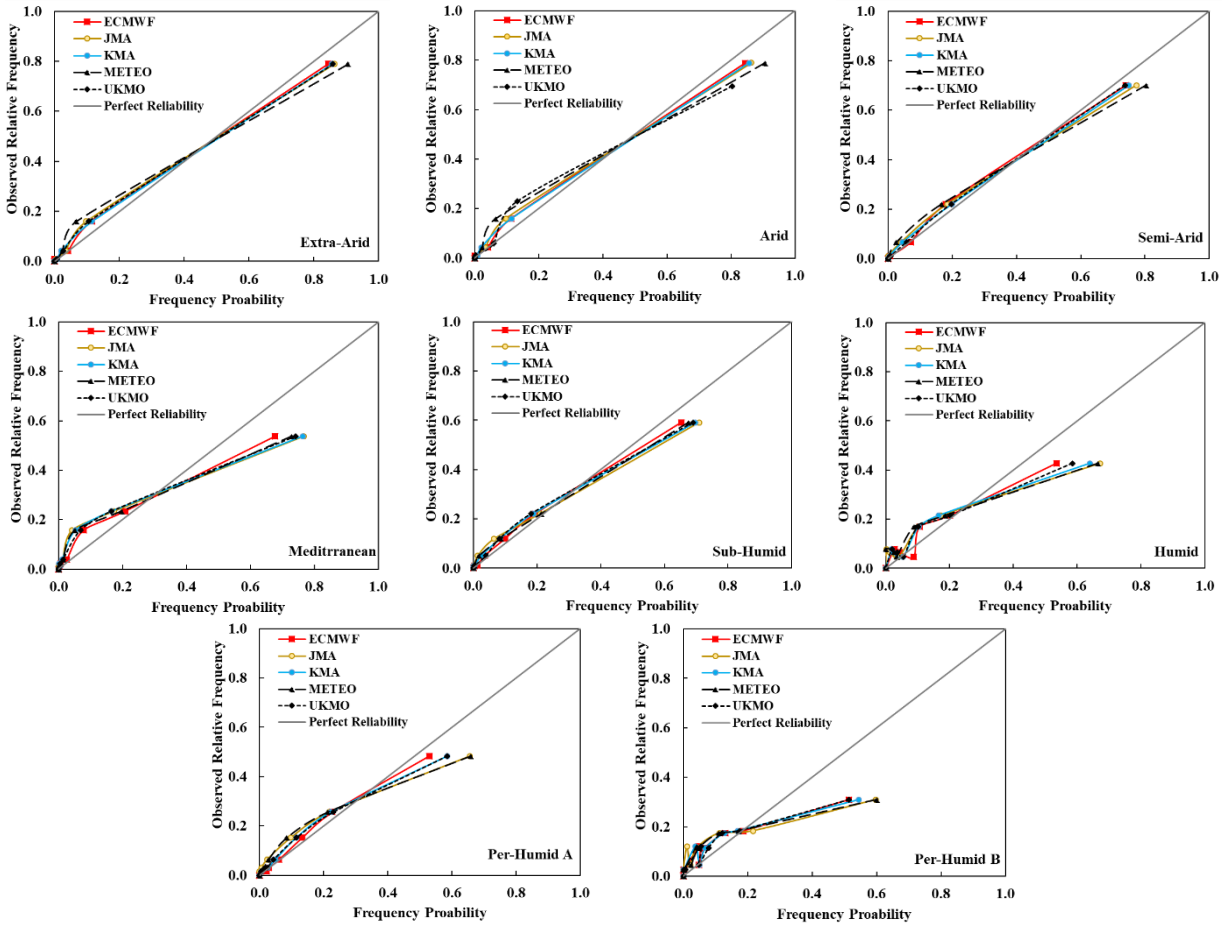
عملکرد مناسب مرکز ECMWF را به دلیل ساختار مدل است، تفکیک مکانی مدل جو آن در محاسبات صورت گرفته تا ۱۵ روز اول ۱۶ کیلومتر است و با مدل اقیانوس NEMO3.4.1 که دارای وضوح مکانی ۰/۲۵ درجه است جفت می‌شود. به‌طور کلی این مدل بسیاری از پارامترهای فیزیکی موجود در سطح زمین، جو و اقیانوس را در محاسبات خود وارد می‌کند. درحالی‌که تفکیک مکانی مدل جو CMA ۶۲ کیلومتر بوده و مدل اقیانوس آن MOM4 با تفکیک مکانی افقی ۱ درجه است؛ به‌طور کلی این مدل بسیاری از پارامترها فیزیکی را در محاسبات خود در نظر نمی‌گیرد، به‌عنوان مثال رطوبت خاک را مستقیماً اندازه نمی‌گیرد. بنابراین مطالب ذکرشده موجب تفاوت در پیش‌بینی‌ها شده است.



شکل ۹- مقدار شاخص RMSE هر کدام از مراکز پیش‌بینی بارش پایگاه TIGGE در اقلیم‌های مختلف ایران



شکل ۱۰- شاخص POD هر کدام از مراکز پیش‌بینی پایگاه TIGGE در اقلیم‌های مختلف ایران



شکل ۱۱- نمودار قابلیت اطمینان مراکز پیش‌بینی بارش پایگاه TIGGE در اقلیم‌های مختلف ایران

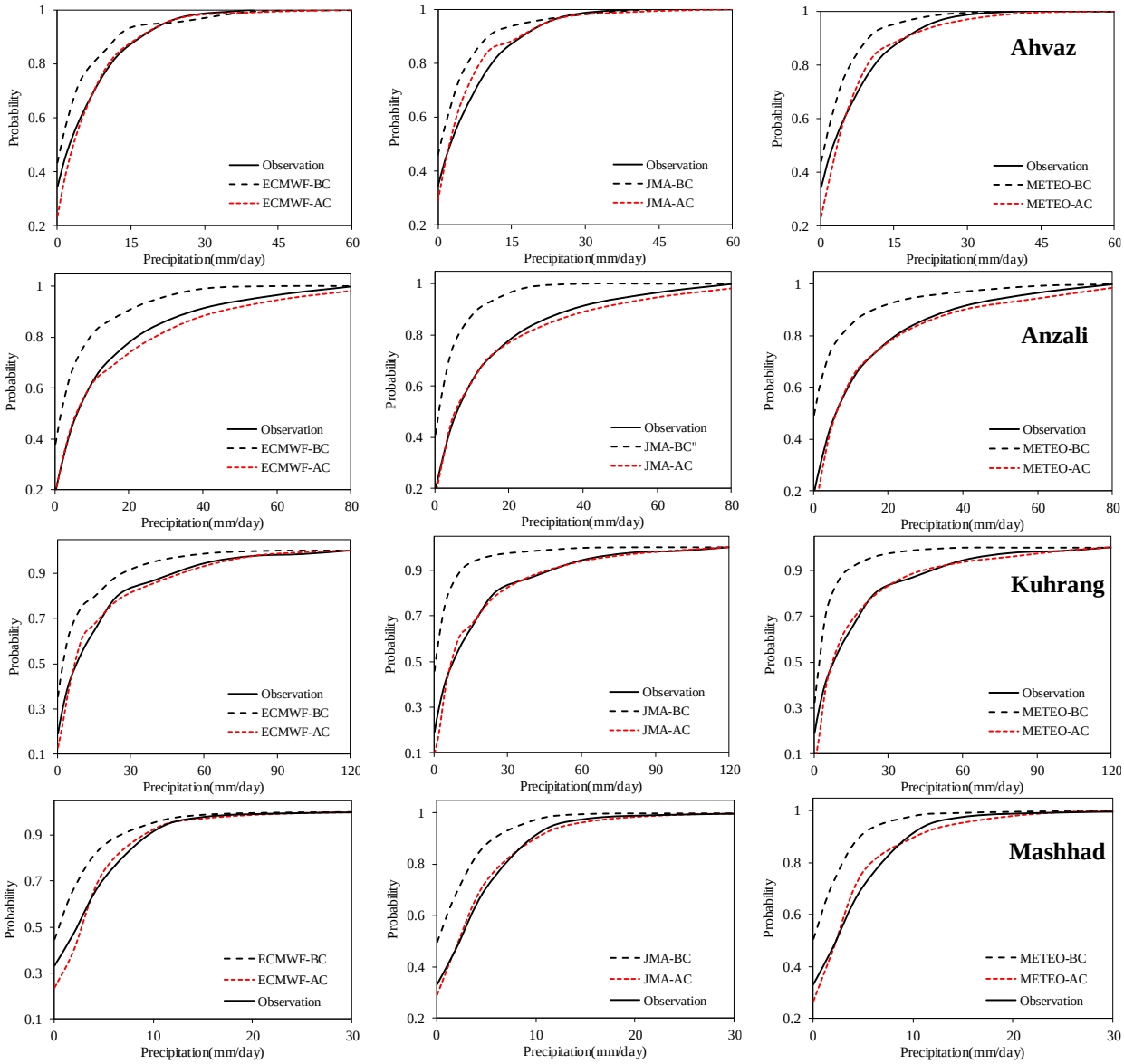
با توجه به دشوار بودن ارزیابی یک واقعه پیش‌بینی احتمالی، مجموعه‌ای از پیش‌بینی‌های احتمالی با مشاهدات مقایسه می‌شوند. برای این منظور از نمودار اطمینان‌پذیری استفاده می‌شود که در آن محور افقی و قائم به ترتیب نشان‌دهنده فراوانی پیش‌بینی شده توسط مراکز عددی و مشاهداتی است؛ برای بدست آوردن فراوانی نیز محدوده احتمالات پیش‌بینی به K دسته (در این پژوهش ۱۰ دسته) تقسیم شده و هر دسته که بیشترین فراوانی را داشته باشد از احتمال بیشتری برخوردار است. در این مطالعه فراوانی دسته اول یعنی آستانه ۲ میلیمتر در تمامی اقلیم‌ها دارای مقدار حداکثر بوده است. تحلیل نتایج بر اساس نمودار اطمینان‌پذیری حاکی از آن است که در اقلیم‌های مدیترانه‌ای، مرطوب نوع B و مرطوب بخش‌های قابل‌توجهی از نمودارهای شکل (۱۱) پائین خط نیمساز (Perfect reliability) قرار می‌گیرد و این نشان‌دهنده فرابرآوردی سامانه‌های پیش‌بینی بارش است. بر خلاف اقلیم‌های مذکور، فراوانی مقادیر بارش پیش‌بینی شده و مشاهداتی در اقلیم‌های خیلی خشک تا نیمه‌خشک و همچنین اقلیم نیمه مرطوب بسیار به یکدیگر نزدیک بوده و تنها در بارش‌های سبک (بارش‌های کمتر از ۲ میلی‌متر در روز) و سنگین (بارش‌های بالای ۲۰ میلی‌متر در روز) به ترتیب اندکی فروبرآوردی و فرابرآوردی مشاهده می‌شود.

ارزیابی عملکرد مراکز پیش‌بینی عددی پایگاه TIGGE پس از اصلاح اریبی

همان‌طور که پیشتر ذکر شد در پژوهش حاضر به‌منظور پس‌پردازش نتایج مدل‌های پیش‌بینی بارش از روش تصحیح اریبی نگاشت چندک استفاده بعمل آمده است. در شکل (۱۲) توزیع بارش تجمعی مشاهداتی، پیش‌بینی‌شده (قبل و پس از تصحیح اریبی) برای تعدادی از ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در اقلیم‌های مختلف ایران نشان داده شده است. در شکل‌های (۱۳) تا (۱۶) نیز تأثیر تصحیح اریبی بر مقادیر شاخص‌های آماری هر کدام از مراکز پیش‌بینی بارش در اقلیم‌های مختلف ارائه گردیده است. همان‌طور که در شکل (۱۲) نشان داده شده است، با حذف اریبی از داده‌های بارش پیش‌بینی شده توزیع تجمعی آنها تقریباً با توزیع تجمعی داده‌های مشاهداتی منطبق گردیده است و این در حالی است که قبل از اعمال تصحیح اریبی، اختلاف توزیع بارش‌های تجمعی بدست آمده از هر کدام از مراکز پیش‌بینی بارش و داده‌های مشاهداتی نسبتاً زیاد است. به‌عنوان مثال، اگرچه در ایستگاه

سینوپتیک انزلی توزیع بارش تجمعی پیش‌بینی‌شده توسط سه مرکز ECMWF، JMA و METEO اختلاف زیادی با توزیع بارش تجمعی بارش مشاهداتی دارد اما پس از حذف اریبی از داده‌ها عملکرد تمامی مدل‌های مذکور تا حد زیادی مشابه داده‌های زمینی شده است. بررسی شاخص آماری CC (شکل‌های ۱۳ و ۱۴) نیز حاکی از آن است که تصحیح اریبی داده‌ها اگرچه منجر به افزایش ضریب همبستگی بین داده‌های زمینی و پیش‌بینی گردیده است ولی این افزایش در اقلیم‌های خیلی خشک، نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای نسبت به دیگر اقلیم‌ها قابل‌توجه است.

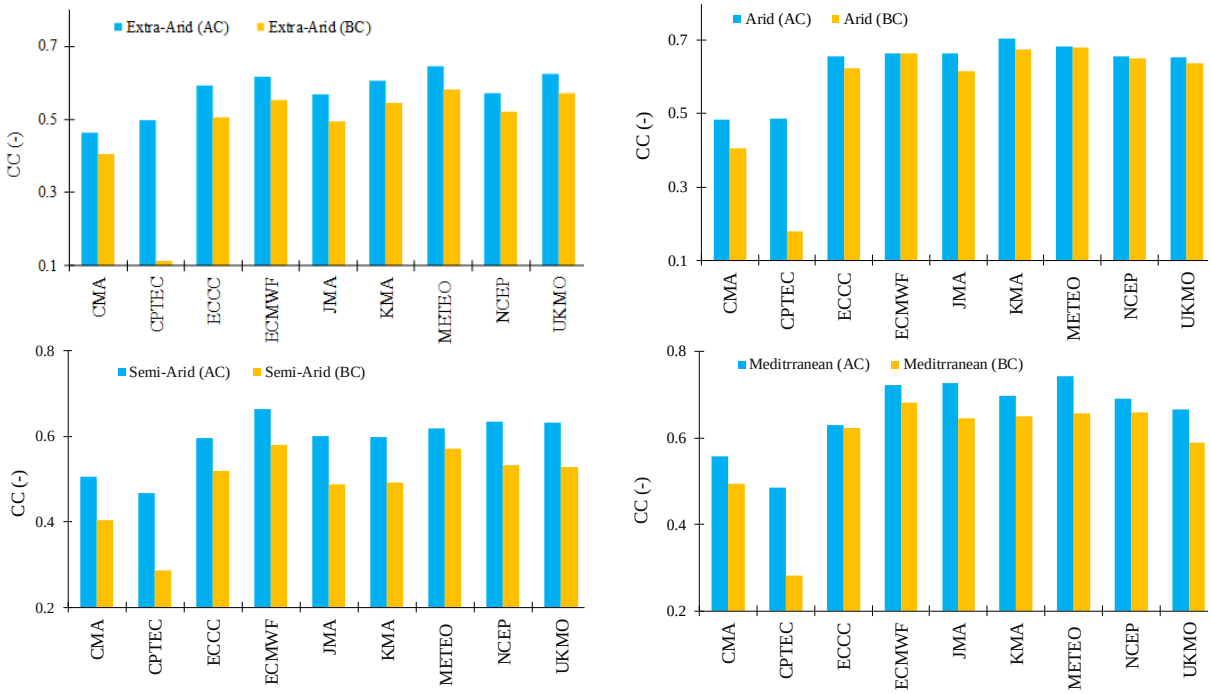
طبق محاسبات انجام‌شده در اقلیم‌های خیلی خشک، نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای مقدار متوسط شاخص CC به ترتیب در حدود ۴۸/۶، ۲۳/۵ و ۲۳/۲ درصد افزایش یافته است. همچنین یافته‌ها نشان داد که در اقلیم‌های مذکور چهار مدل پیش‌بینی CPTEC، CMA، JMA و KMA بیشترین بهبود از نظر میزان ضریب همبستگی با داده‌های مشاهداتی داشته‌اند. برای اقلیم‌های نیمه مرطوب تا مرطوب نوع B نیز مقدار افزایش شاخص CC همواره کمتر از ۱۰ درصد است.



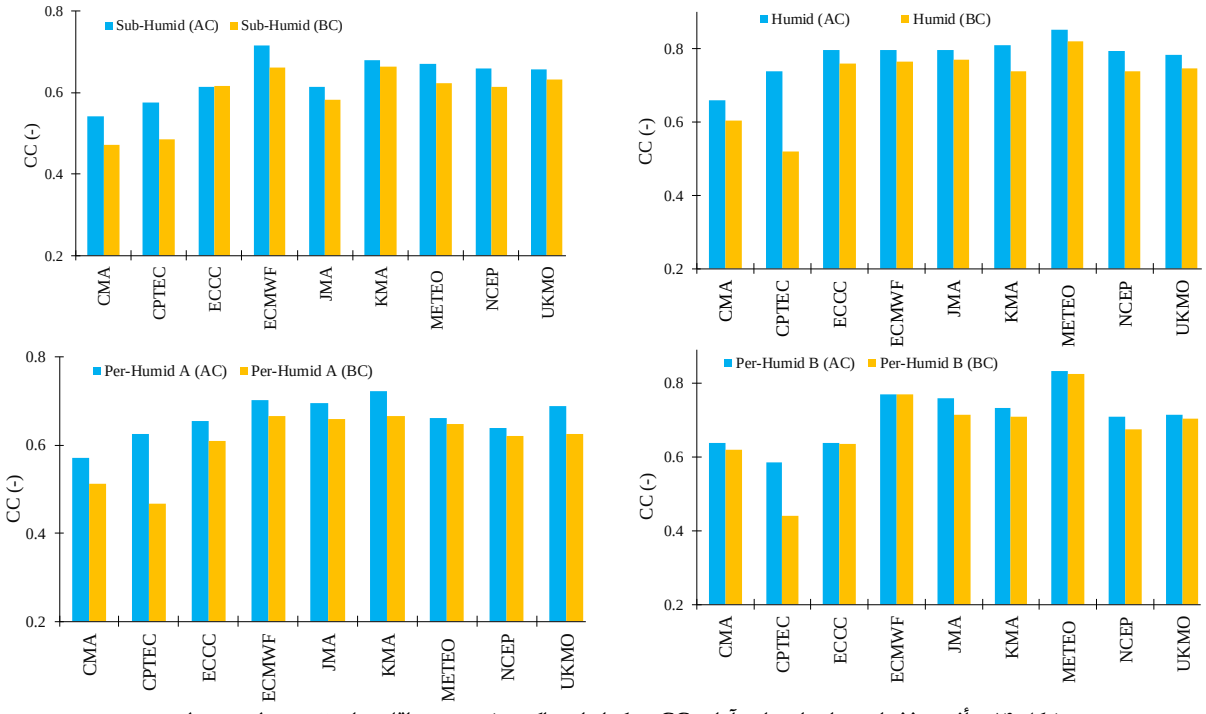
شکل ۱۲- توزیع بارش تجمعی مشاهداتی و پیش‌بینی (قبل و پس از تصحیح اریبی) بدست‌آمده از مراکز مختلف در ایستگاه‌های سینوپتیک اهواز، انزلی، کوهرنگ و مشهد

تحلیل نتایج بر اساس شاخص RBias نیز نشان داد که حذف اریبی از داده‌ها تا حد بسیار زیادی خطای فرابرآوردی و فروآوردی هر کدام از مراکز پیش‌بینی بارش را کاهش می‌دهد (جدول ۳). به‌عنوان مثال، در اقلیم خیلی خشک متوسط شاخص RBias بدست آمده از مدل‌های مختلف در حدود ۵۱/۲ درصد است و این در حالی است که پس از تصحیح اریبی مقدار متوسط

شاخص RBias به حداکثر ۶/۷- درصد محدود می‌گردد و این بدین معنی است که داده‌ها تقریباً فاقد فرابرآوردی یا فروبرآوردی هستند. در اقلیم‌های مرطوب و مرطوب نوع B نیز تمامی مراکز پیش‌بینی در حالت خام دارای کم‌برآوردی زیادی می‌باشند که با حذف خطا از داده‌های پیش‌بینی شده، مقدار متوسط RBias در محدوده قابل‌قبول ۱۰ ± (توصیه‌شده توسط Yang and Luo, 2014) قرار می‌گیرد.



شکل ۱۳- تأثیر حذف اریبی از داده‌ها بر آماره CC هر کدام از مراکز پیش‌بینی در اقلیم‌های خیلی خشک، خشک، نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای



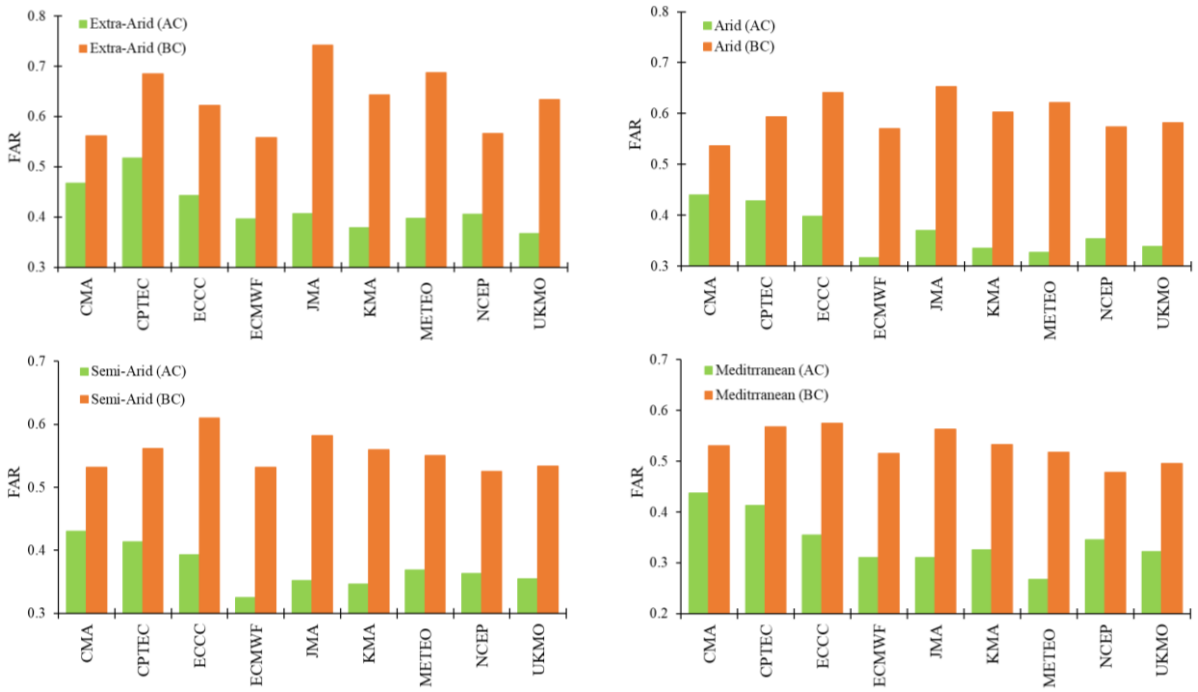
شکل ۱۴- تأثیر حذف اریبی از داده‌ها بر آماره CC هر کدام از مراکز پیش‌بینی در اقلیم‌های نیمه مرطوب، مرطوب، مرطوب تیپ A مرطوب تیپ B

جدول ۳- مقدار شاخص جدولی RBias قبل و پس از حذف اریبی از داده‌ها

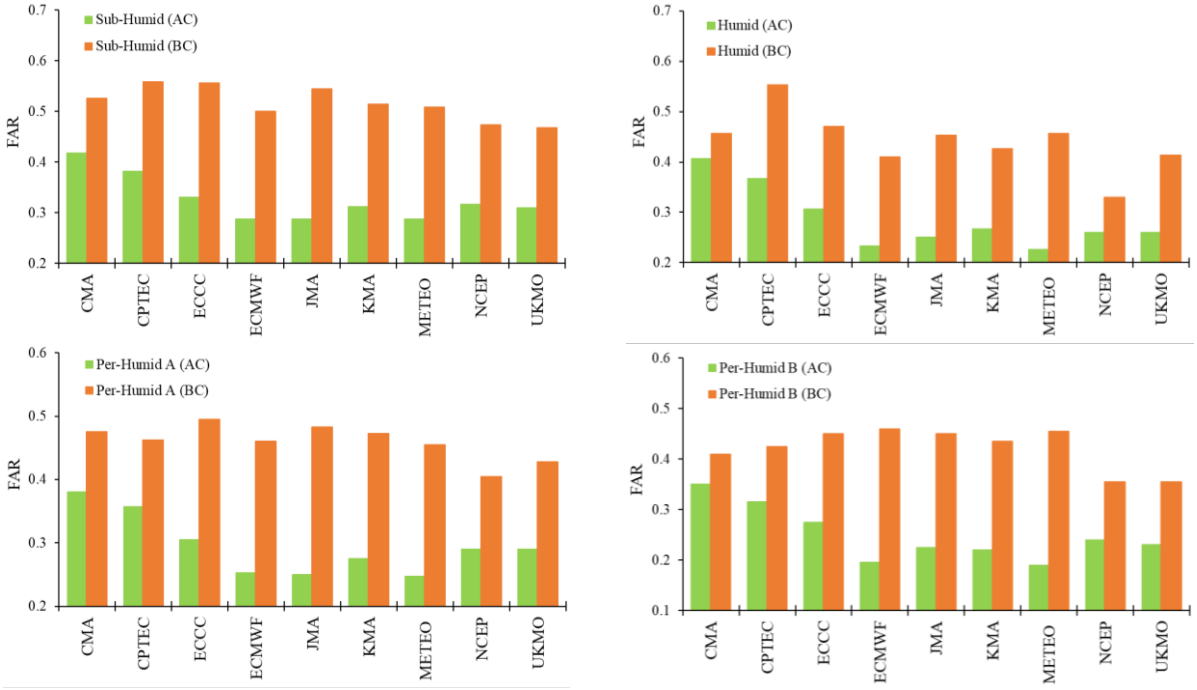
Per-humid B		Per-humid A		Humid		Sub-humid		Mediterranean		Semi-arid		Arid		Extra-arid		Model
AC	BC	AC	BC	AC	BC	AC	BC	AC	BC	AC	BC	AC	BC	AC	BC	
-۷	-۳۶	-۵	۶۱	-۹	-۵	-۳	۳۴	۰/۶	۲۱	-۲	۵۰	-۴	۱۲	-۸	۳۷	CMA
-۱۰	-۷۷	-۹	-۴۵	-۱۱	-۵۲	-۳	-۳۰	۲/۱	-۴۵	-۶	-۲	-۱۷	-۱۲	-۱۴	۳۶	CPTEC
-۱	-۵۳	۰/۷	۱	۰/۴	-۲۰	۰/۵	۲	۱/۶	-۱۸	۰/۲	۵۴	۰/۶	۴۴	-۶	۴۱	ECCC
۱	-۲۶	۰/۹	۹۵	۰/۷	-۲	۰/۳	۴۹	۱/۲	۲۵	۰/۲	۵۵	۰/۳	۴۲	-۵	۱۹	ECMWF
-۱	-۵۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶	-۳۷	۰/۳	۵	-۱	-۱۲	۰/۱	۳۶	-۱	۵۲	-۶	۱۱۱	JMA
۰/۲	-۲۸	۰/۱	۶۴	-۲	-۳۰	۰/۶	۱۷	۱/۵	-۱۵	۰/۰	۴۰	۰/۰	۴۶	-۵	۶۴	KMA
۰/۲	-۳۶	۰/۸	۶	۰/۳	-۲۹	۰/۱	۱۹	۱/۰	۴	۰/۱	۱۳	-۱	۵۶	-۵	۹۲	METEO
-۴	-۶۱	۰/۱	-۱۱	-۳	-۳۸	۰/۴	۰/۲	۱/۲	-۳۰	۰/۵	۲۶	۰/۱	۳۱	-۷	۱۰	NCEP
-۳	-۳۴	-۲	۲۲	۱/۲	-۲۱	۰/۶	۸	۰/۵	-۱۰	۰/۵	۳۱	۰/۱	۴۴	-۵	۵۰	UKMO

بررسی تغییرات شاخص جدولی FAR نیز مؤید این مطلب است که با تصحیح اریبی داده‌های پیش‌بینی‌شده، تعداد روزهایی که به‌اشتباه توسط مدل بارش پیش‌بینی شده است تا حدود بسیار زیادی کاهش یافته است (شکل ۱۵ و ۱۶). محاسبات بعمل آمده حاکی از کاهش حداقل ۵۰ درصدی شاخص FAR بدست آمده از مراکز پیش‌بینی بارش پایگاه TIGGE در تمامی اقلیم‌های ایران است. همچنین حذف اریب از داده‌ها در اقلیم‌های مرطوب نوع B و خشک منجر به بیشترین مقدار کاهش شاخص FAR (به ترتیب در حدود ۷۷ و ۶۵ درصد) گردیده است.

به‌طور کلی می‌توان چنین عنوان نمود که اعمال تصحیح اریبی برای بهبود نتایج مدل‌های پیش‌بینی به‌ویژه در اقلیم‌های خیلی خشک تا مدیترانه‌ای (که بخش عمده‌ای از حوضه‌های ایران را تشکیل می‌دهد) تا چه اندازه می‌تواند منجر به بهبود نتایج شود. لذا توصیه می‌شود به هنگام استفاده از چنین داده‌هایی در مطالعات هشدار سیلاب و هشدار هواشناسی از داده‌های خام تا حد امکان استفاده نگردد و با حذف اریب، توانائی آنها را در تخمین صحیح مقدار بارش، عدم اعلام هشدارهای غلط و عدم برآوردهای بالا و پائین افزایش داد.



شکل ۱۵- تأثیر حذف اریبی از داده‌ها بر آماره جدولی FAR هر کدام از مراکز پیش‌بینی بارش در اقلیم‌های خیلی خشک، خشک، نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای



شکل ۱۶- تأثیر حذف اریبی از داده‌ها بر آماره جدولی FAR هر کدام از مراکز پیش‌بینی بارش در اقلیم‌های نیمه مرطوب، مرطوب، مرطوب تیپ A و مرطوب تیپ B

نتیجه‌گیری

با توسعه روزافزون فناوری‌های ماهواره‌ای و افزایش توان محاسباتی رایانه‌ها در سال‌های اخیر، مدل‌های عددی متعددی در زمینه پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی توسط مراکز تحقیقاتی مختلف دنیا توسعه داده شده است که یکی از هدف اصلی آنها پیش‌بینی مقادیر بارش است. هر کدام از مدل‌های عددی پیش-بینی با توجه به ساختار مدل، معادلات به کار رفته و چگونگی حل آنها و شرایط مرزی و اولیه مورد استفاده منجر به نتایج متفاوتی می‌شوند و لذا ضرویست تا کارایی آنها بررسی شده و در صورت لزوم تصحیح گردند. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کارایی نه مدل پیش‌بینی مربوط به پایگاه TIGGE در مقیاس روزانه و در اقلیم‌های مختلف ایران به انجام رسیده است. همچنین بررسی میزان بهبود عملکرد مدل‌های مذکور با استفاده از روش تصحیح اریبی نگاشت چندک از دیگر اهداف مهم این تحقیق به شمار می‌آید. نتایج بدست آمده نشان داد که عمده مدل‌های پیش‌بینی در اقلیم‌های مرطوب، نیمه مرطوب، مدیترانه‌ای و خشک (که بیشتر مناطق جنوب غربی تا شمال غربی و شمال شرقی کشور را شامل می‌شوند) دارای بیشترین میزان همبستگی با داده‌های زمینی هستند و این در حالی است که در اقلیم‌های نیمه‌خشک و خیلی خشک مقدار شاخص CC به‌مراتب کمتر است. از میان مدل‌های مختلف موجود در پایگاه TIGGE دو مدل ECMWF و METEO در بیشتر مناطق کشور حتی مناطق خیلی خشک و خشک نیز دارای مقدار شاخص CC بالای ۰/۶ می‌باشند. بر خلاف مدل‌های مزبور، داده‌های بارش پیش‌بینی شده توسط دو مرکز CMA و CPTEC از کمترین مقدار همبستگی با داده‌های مشاهداتی برخوردار هستند. همچنین یافته‌های پژوهش حاکی از وجود خطای قابل‌توجه و فروبرآوردی زیاد در مقدار بارش در نواحی حاشیه دریای خزر و مناطق کوهستانی است که از علل اصلی آن عدم لحاظ نمودن جریانات همرفتی و میان‌مقیاس از سمت دریا به خشکی و نیز اصلاح اثر ارتفاع بر مقدار بارش است. از طرفی دیگر تعداد کم ایستگاه‌های زمینی مورد استفاده جهت کاربرد در فرآیند داده‌گواری (Data assimilation) توسط مدل‌های هواشناسی در سطح ایران یکی دیگر از عوامل ایجاد خطا در برآورد صحیح بارش به‌ویژه در مناطق پربارش است. در نهایت اعمال روش اصلاح اریبی نگاشت چندک (QM) نشانگر بهبود چشمگیر پیش‌بینی‌ها بوده و تطابق تابع توزیع باش تجمعی پیش‌بینی‌شده بر مشاهداتی در بسیاری از ایستگاه‌ها بیانگر این امر است. همچنین افزایش شاخص همبستگی در همه اقلیم‌ها و نزدیکی مقادیر شاخص Bias به عدد یک حاکی از رفع خطای فرابرآوردی و فروبرآوردی در مدل‌های پیش‌بینی است. به‌طور کلی مطالعه حاضر نشان داد مدل‌های ECMWF، METEO و JMA در پیش‌بینی بارش روزانه در اکثر مناطق کشور به‌خوبی عمل کرده و از مقادیر بارش پیش‌بینی شده این پایگاه‌ها پس از اصلاح اریبی با اطمینان بیشتری می‌توان در مطالعات مختلف اعم از شبیه‌سازی و هشدار سیلاب استفاده نمود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

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

Ebert, E. E., Manton M. J., Arkin, P. A., Allam, R. J., Holpin, C. E. and Gruber A. (1996). Results from the GPCP Algorithm Intercomparison Programme. Bulletin of the American Meteorological Society, 77(12), 2875–2887

Gupta, R., Bhattarai, R., and Mishra, A. (2019). Development of Climate Data Bias Corrector (CDBC) Tool and Its Application over the Agro-Ecological Zones of India. Journal of Water, 11(5), 1102.

Hamill, T. M., Engle, E., Myrick, D., Peroutka, M., Finan, C. and Scheuerer, M. (2017). The U.S. national blend of models for statistical post processing of probability of precipitation and deterministic precipitation amount. Monthly Weather Review, 145(9), 3441–3463.

Javanmard, M., Delavar, M., and Morid, S. (2016). Evaluation and uncertainty analysis of the results of the global weather forecast models to apply in flood warning systems (case study: Karoon River basin, Iran). Iran-Water Resources Research, 14(3), 1-14. (In Farsi)

Kay, J. K. and kim, H. M. (2014). Characteristics of initial perturbations in the ensemble prediction system of the Korea Meteorological Administration. A merican Meteorological Society, 29(3), 563-581.

Kim, K. B., Kwon, H. H. and Han, D. (2016). Precipitation ensembles conforming to natural variations derived from a regional climate model using a new bias correction scheme. Hydrology and Earth System Sciences, 20(5), 2019-2034.

Liu, Y. and Fan, K. (2014). An application of hybrid downscaling model to forecast summer precipitation at stations in China. Atmospheric Research, 143(45), 17–30 .

Park, Y., Buizza, R., Leutbecher, M. (2008). TIGGE: preliminary results on comparing and combining ensembles. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 134(637), 2029-2050.

Piani, C., Haerter, J. O., Coppola, E. (2010). Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. Springer, 99(29), 187-192.

Rahimi, J., Ebrahimpour, M. and Khalili, A. (2013). Spatial changes of extended De Martonne climatic zones affected by climate change in Iran. Theoretical and applied climatology, 112(3-4), 409-418.

Su, X., Yuan, H. L., Zhu, Y. J., Luo, Y. and Wang, Y. (2014). Evaluation of TIGGE ensemble predictions of Northern Hemisphere summer precipitation during 2008–2012. Journal of Geophysical Research, 119(12), 7292–7310.

Tao, Y., Duan, Q., Ye, A., Gong, W., Di, Z h., Xiao, M. and Hsu, K. (2014). An evaluation of post-processed TIGGE multimodel ensemble precipitation forecast in the Huai river basin. Journal of hydrology, 519(27), 2890-2905.

Taraphdar, S., Mukhopadhyay, P., RubyLeung, L., Kiranmayi, L. (2016). Prediction skill of tropical synoptic scale transients from ECMWF and NCEP Ensemble Prediction Systems. Math.Clim.WeatherForecast, 2(4), 26-42.

Themeßl, M. J., Gobiet, A., and Heinrich, G. (2012). Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. Climate Change, 112(), 449– 468.

Tomasella, J., Sene, G. A., Schneider, F. A., Oliveira, C. R., Rodrigues, D. F. L., Rodriguez, D. A., Rodrigues, P. MC., Negra˜o, A. C., Sueiro, M. G. and Chagas, S. G. (2019). Probabilistic flood forecasting in the Doce Basin in Brazil:effects of the basin scale and orientation and the spatial distribution of rainfall. Flood Risk Management, 12(1), 12452.

Yamaguchi, M. and Majumdar S. J. (2010). Using TIGGE data to diagnose initial perturbations and their growth for tropical cyclone ensemble forecasts. Monthly Weather Review, 138(9), 3634–3655.

Wood , A. and Schaake, J. (2008). Correcting errors in streamflow forecast ensemble mean and spread. Journal of Hydrometeorology, 9(1), 132-148.

Wilks, D. S. (2006). Statistical Methods in Atmospheric Sciences (2nd edition.). Elsevier Science & Technology Books: Amsterdam. The Netherlands