



Evaluation of the WRF local and regional IFS numerical model in precipitation estimation

Sakine Koohi¹ | Asghar Azizian² | Mohammad Saeid Najafi³

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. E-mail: sakine.koohi3731@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. E-mail: azizian@eng.ikiu.ac.ir

3. Department of Water Resources Research, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran. E-mail: m.s.najafi@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: May. 2, 2024

Revised: July. 25, 2024

Accepted: Sep. 18, 2024

Published online: Jan. 2025

Keywords:

Precipitation,
Bias Correction,
IFS Numerical System,
Weather Numerical Modeling,
WRF model.

ABSTRACT

In recent years, numerous numerical models have been developed to simulate atmospheric variables such as precipitation. This study aims to assess the efficacy of the Weather Research and Forecasting (WRF) model and the Integrated Forecast System (IFS) numerical system in simulating precipitation within the Poldokhtar Basin. The findings revealed that the WRF model exhibited a stronger correlation with observed precipitation values in the 6-hour time step (The average CC of WRF for the events of 2016 and 2018 is equal to 0.49 and for the IFS system in 2016, 0.43, in 2018, 0.15), whereas the IFS system demonstrated a higher correlation with observational data over longer time steps (The average CC in the 24-hour time step in 2016 and 2018 for the WRF model is 0.72 and 0.60, respectively, and for the IFS system, it is 0.75 and 0.70, respectively). Based on the NRMSE error-index, the average NRMSE in time steps of 6, 12, and 24 hours for the WRF model is 0.98, 0.86, and 0.67 mm (2016), 0.97, 0.72, and 0.75 mm (2018), respectively and for IFS numerical system is 1.01, 0.80 and 0.66 mm (2016) and 1.20, 0.76 and 0.79 mm (2018) respectively. Additionally, in the 24-hour time step, the results from the IFS numerical system closely resembled those obtained from the WRF model. Thus, the model's daily predictions can be utilized with higher confidence levels. It is imperative to note that the implementation of bias correction techniques is essential for mitigating the output errors in numerical weather forecasting models.

Cite this article: Koohi, S., Azizian, A., & Najafi, M. S. (2025). Evaluation of the WRF local and regional IFS numerical model in precipitation estimation, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55 (11), 2017-2033. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.376017.669704>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.376017.669704>





EXTENDED ABSTRACT

Introduction:

Numerical Weather Prediction (NWP) models play a crucial role in flood forecasting systems by providing dependable forecasts of precipitation. Numerous global, regional, and local models have been developed by various organizations and institutions to meet this need. These models primarily aim to predict climatic variables, particularly the precipitation. Based on physical processes, boundary conditions, initial conditions, and spatiotemporal resolutions, they typically fall into three categories: global, regional, and local models. Among these, the WRF numerical meteorological model is widely utilized in numerical weather forecasting and atmospheric simulations worldwide. However, its reliance on the Linux operating system and lack of a graphical user interface poses implementation challenges. However, recent advancements in research infrastructure have led to the development of systems that provide outputs from some numerical models. This study sought to compare the forecasting performance of the WRF local model and the IFS regional model in predicting rainfall at 6, 12, and 24-hour intervals within the Poldokhtar basin.

Methods:

This study focuses on the Poldokhtar Basin, situated within the geographical coordinates of 47° 55 min to 48° 43 min east longitude and 33° 7 min to 33° 55 min north latitude. Precipitation data from seven synoptic stations within and around this basin were utilized to assess the performance of the WRF numerical meteorological model and IFS numerical system outputs. The WRF modeling system was employed for precipitation simulation, utilizing two nested domains with a scaling ratio of 1 - 3. The primary domain, covering a spatial resolution of 15 km, was supplemented by a subdomain of 5 km. The boundary and initial conditions for the WRF model were sourced from FNL data. Additionally, data from the IFS system, with a spatial resolution of approximately 8 km and a time step of 6 hours, were obtained from the <https://rda.ucar.edu/datasets/ds113.1/>. The non-parametric quantile mapping (QM) method was employed for bias-corrected precipitation in both models. Quantitative evaluation of predicted precipitation values compared to observed values was conducted using indices such as the correlation coefficient (CC), mean absolute error (MAE), normalized RMSE (NRMSE), false alarm rate (FAR), and probability of detection (POD).

Results and Discussion:

These findings indicate that the IFS database exhibits a stronger correlation with the observed values over longer time steps. Specifically, in the 6-hour time step, for IFS and WRF the average correlation coefficients for the 2016 event were 0.43 and 0.49, respectively, and 0.15 and 0.49 for the 2018 event. For the 12-hour time step, the correlation levels for the same events (2016 and 2018) were 0.62 and 0.65 for the WRF model, and 0.61 and 0.68 for the IFS database. Furthermore, both the WRF model and the IFS database demonstrated relatively higher errors in simulating 6-hour rainfall among the studied time steps. However, there was a noticeable trend of error reduction with increasing time steps, suggesting that the predictions from these models can be used with greater confidence in daily time steps. Evaluation of the efficiency of the WRF model and the IFS numerical database in distinguishing between rainy and non-rainy periods, based on POD and FAR tabular indices across different time steps, indicated acceptable performance in all three-time intervals. Analysis of spatial precipitation changes in the 2018 event at 6 and 12-hour time steps revealed that the simulations of the WRF numerical model closely resembled the observed values in terms of both the magnitude and spatial distribution of precipitation within the study area.

Conclusions:

The comparison of performance between local and regional meteorological forecasting numerical models is of significant importance in the estimation of meteorological variables, particularly precipitation. As the purpose of meteorological modeling is to predict precipitation at sub-daily time intervals, utilization of the WRF numerical model is recommended. The adaptability and open-source nature of this model enable it to be tailored to specific regions and variables, thereby enhancing its ability to accurately predict precipitation at smaller time intervals. Conversely, for simulating precipitation variations within a 24-hour time step, the IFS numerical system presents a viable solution for many research endeavors.

Author Contributions

Conceptualization, Koohi S. and Azizian A.; methodology, Koohi S. and Azizian A. and Najafi MS.; software, Koohi S. and Najafi MS.; Koohi S. and Azizian A. and Najafi MS.; validation, Koohi S. and Azizian A. and Najafi MS.; writing—original draft preparation, Koohi S.; writing—review and editing, Koohi S. and Azizian A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank the reviewers and editor for their critical comments that helped to improve the paper.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

ارزیابی عملکرد مدل عددی پیش‌بینی بارش محلی WRF و منطقه‌ای IFS در تخمین بارش

سکینه کوهی^۱ | اصغر عزیزیان^۲ | محمد سعید نجفی^۳

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. رایانامه: sakine.koochi3731@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. رایانامه: azizian@eng.ikiu.ac.ir
۳. پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، موسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران. رایانامه: m.s.najafi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	امروزه مدل‌های عددی بسیاری به منظور شبیه‌سازی تغییرات مؤلفه‌های جوی همچون بارش توسعه داده شده‌اند. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کارایی عملکرد مدل Weather Research and Forecasting (WRF) و سامانه عددی Integrated Forecast System (IFS) در شبیه‌سازی بارش در حوضه پلدختر انجام شده است. نتایج نشان داد که مقادیر بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF در گام زمانی ۶ ساعته از همبستگی بیشتری با مقادیر مشاهداتی برخوردار می‌باشد (متوسط شاخص همبستگی WRF برای رخدادهای ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ برابر با ۰/۴۹ و برای سامانه IFS در رخدادهای ۲۰۱۶، ۰/۴۳، در رخدادهای ۲۰۱۸، ۰/۱۵). در حالی که سامانه IFS در گام‌های زمانی بزرگتر دارای همبستگی بیشتری با داده‌های مشاهداتی است (متوسط شاخص همبستگی در گام زمانی ۲۴ ساعته در رخدادهای ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ برای مدل WRF به ترتیب ۰/۷۲ و ۰/۶۰ و برای سامانه IFS، به ترتیب ۰/۷۵ و ۰/۷۰ می‌باشد). براساس شاخص خطای NRMSE، متوسط مقدار خطا در گام‌های زمانی ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعته برای مدل WRF به ترتیب ۰/۹۸، ۰/۸۶ و ۰/۶۷ میلی‌متر (رخداد ۲۰۱۶)، ۰/۹۷، ۰/۷۲ و ۰/۷۵ میلی‌متر (رخداد ۲۰۱۸) و برای سامانه عددی IFS به ترتیب ۱/۰۱، ۰/۸۰ و ۰/۶۶ میلی‌متر (رخداد ۲۰۱۶) و ۱/۲۰، ۰/۷۶ و ۰/۷۹ میلی‌متر (رخداد ۲۰۱۸) می‌باشد. همچنین در گام زمانی ۲۴ ساعته نتایج حاصل از سامانه عددی IFS نیز تقریباً مشابه نتایج حاصل از اجرای مدل WRF می‌باشد. بنابراین، می‌توان از پیش‌بینی‌های این مدل‌ها در گام زمانی روزانه بهره برد. البته ذکر این نکته نیز ضروری است که کاربرد روش تصحیح اریبی با هدف کاهش خطای خروجی مدل‌های عددی پیش‌بینی جوی ضروری است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲/۱۳	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۵/۴	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۲۸	
تاریخ انتشار: بهمن ۱۴۰۳	
واژه‌های کلیدی: بارش، تصحیح اریبی، سامانه عددی IFS، مدلسازی عددی آب و هوا، مدل WRF.	

استناد: کوهی، سکینه؛ عزیزیان، اصغر؛ و نجفی، محمد سعید (۱۴۰۳) ارزیابی عملکرد مدل عددی پیش‌بینی بارش محلی WRF و منطقه‌ای IFS در تخمین بارش،

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۵ (۱۱)، ۲۰۳۳-۲۰۱۷. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.376017.669704>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.376017.669704>

مقدمه

در سال‌های اخیر سیلاب به یکی از بزرگترین مخاطرات زیست‌محیطی بدل شده است که می‌تواند منجر به میزان قابل‌توجهی از خسارات اجتماعی و اقتصادی شود، چنانکه تقریباً یک سوم خسارات اقتصادی و بیش از نیمی از تلفات انسانی مربوط به وقایع طبیعی به سیلاب اختصاص دارد (Abidin et al., 2015; Wu et al., 2017). از آنجایی که دقت در پیش‌بینی سیلاب به طور قابل‌توجهی تحت تاثیر میزان مهارت در تعیین مقدار و توزیع مکانی بارش قرار دارد، یک مدل پیش‌بینی عددی آب و هوا (NWP^۱) جزئی ضروری از سیستم پیش‌بینی سیلاب برای ارائه پیش‌بینی‌های قابل اعتماد به‌شمار می‌رود (Frnda et al., 2022; Kirkwood et al., 2021). طی اجرای مدل‌های عددی از داده‌های مختلف تاثیرگذار بر فرآیند بارش با تفکیک‌های مکانی مختلف برای پیش‌بینی مقدار بارش استفاده می‌گردد (Toride et al., 2019). در این زمینه مدل‌های جهانی، منطقه‌ای و محلی بسیار زیادی توسط سازمان‌ها و نهادهای مختلف در سطح جهان توسعه داده شده است. یکی از اهداف اصلی مدل‌های عددی هواشناسی، پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی از جمله بارش است. این مدل‌ها براساس اصول پایستگی جرم، تکانه، انرژی و حل معادلات ترمودینامیک و دینامیک توسط روش‌های عددی به شبیه‌سازی متغیرهای جوی در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف می‌پردازند (Trenberth, 1992).

مدل‌های عددی پیش‌بینی هواشناسی براساس فرآیندهای فیزیکی مورد استفاده برای مدلسازی، شرایط مرزی، شرایط اولیه و قدرت تفکیک مکانی و زمانی در سه گروه قرار می‌گیرند: مدل‌های جهانی، مدل‌های منطقه‌ای و مدل‌های محلی. قدرت تفکیک مکانی در مدل‌های جهانی در حدود ۳۰ کیلومتر است، بنابراین برای استفاده از آن‌ها نیاز به انجام درون‌یابی و یا برون‌یابی می‌باشد. در مدل‌های منطقه‌ای و محلی قدرت تفکیک مکانی حتی کمتر از ۵ کیلومتر نیز است، این مدل‌ها در مقایسه با مدل‌های جهانی قادر به شبیه‌سازی فرآیندهای کوچک‌مقیاس‌تر می‌باشند. مطالعات و پژوهش‌های مختلفی در سراسر جهان در خصوص کاربرد مدل‌های عددی پیش‌بینی آب و هوا به انجام رسیده است. به عنوان مثال، هدایتی‌دزفولی و آزادی (۱۳۸۹) به ارزیابی خروجی‌های مدل منطقه‌ای پیش‌بینی عددی MM5^۲ در مناطق مختلف کشور ایران پرداختند. در این تحقیق به بررسی عملکرد مدل منطقه‌ای در ارائه پیش‌بینی‌های تا ۷۲ ساعته پرداخته شد. نتایج نشان داد که این مدل از عملکرد خوبی در پیش‌بینی بارش‌های روزانه بسیار کم و یا زیاد برخوردار است، بطورکلی در مقادیر کم بارش در جنوب کشور و همچنین بارش‌های زیاد در شمال و مناطق مرتفع دقت مدل MM5^۲ بیشتر می‌باشد. تقوی و همکاران (۱۳۹۲) با ارزیابی پیش‌بینی‌های ۲۴ و ۴۸ ساعته مدل عددی WRF-ARW^۳ بر اساس روش‌های ارزیابی دودویی در ایران و طی یک دوره ۱ ماهه نشان دادند که پیش‌بینی‌های مدل در بسیاری از مناطق موقعیت نوارهای بارش را به خوبی نشان می‌دهد. همچنین فرض اولیه مبنی بر پیش‌بینی درست مدت زمان بارش نیز تایید شد و مشخص گردید که هیچ‌گونه اختلاف فازی بین داده‌های روزانه مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده در منطقه وجود ندارد. علاوه بر این مشخص شد که در روزهای اوج فعالیت‌های سامانه جوی، پیش‌بینی‌های ۲۴ ساعته دارای امتیاز بیشتری در تخمین مقدار مشاهده‌ای بوده‌اند.

همچنین، Challa & Dasari (2015) به بررسی روندهای بارش منطقه‌ای در قاره اروپا و طی یک دوره ۶۰ ساله با استفاده از داده‌های منطقه‌ای WRF و با قدرت تفکیک مکانی ۲۵ کیلومتر پرداختند. این محققین برای ارزیابی نتایج از مشاهدات روزانه و در مقیاس ۰/۲۵ درجه استفاده نمودند. نتایج نشان داد که خروجی‌های مدل در تخمین بارش‌های کمتر از ۱۵۰۰ میلی‌متر و بیش از ۱۵۰۰ میلی‌متر به ترتیب مقداری کمتر و بیشتر از مقدار واقعی است. Hamill et al. (2017) پیش‌بینی‌های بارش احتمالاتی ۶ و ۱۲ ساعته از پیش‌بینی‌های گروهی GEFS^۴، GEPS^۵، GFS^۶، GDPS^۷ را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاکی از بهبود عملکرد تمام مدل‌های عددی فوق پس از اعمال الگوریتم پس‌پردازش شامل بهبود شاخص‌های عملکرد و کاهش خطای اریبی می‌باشد. Saedi et al. (2020) عملکرد بارش

1. Numerical Weather Forecasting
2. PSU/NCAR mesoscale model
3. Advanced Research WRF (Weather Research and Forecasting)
4. Global Ensemble Forecast System
5. Global Ensemble Prediction System
6. Global Forecast System
7. Global Deterministic Prediction System



پیش‌بینی شده توسط مدل‌های عددی $ECMWF^1$ ، $NCEP^2$ ، $UKMO$ ، JMA^3 و CMA^4 در مقیاس‌های ۶ تا ۲۴ ساعته را در شمال غرب ایران مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که دو مدل $ECMWF$ و $UKMO$ در تخمین مقدار بارش و مدل $NCEP$ در تشخیص وقوع یا عدم‌وقوع بارش از عملکرد قابل‌قبولی برخوردار بوده‌اند. همچنین مشخص شد که پیش‌بینی‌های با گام زمانی کمتر از ۲۴ ساعت نسبت به پیش‌بینی‌های ۲۴ ساعته ضعیف‌تر می‌باشند. امینی و همکاران (۱۳۹۹) عملکرد ۵ مدل عددی هواشناسی از پایگاه $TIGGE^5$ را در پیش‌بینی بارش طی گام‌های زمانی ۱ ساعته تا ۱ روزه و در اقلیم‌های مختلف کشور ایران مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که قابلیت برخی از مدل‌ها در پیش‌بینی بارش حداکثر تا افق زمانی ۳ روزه می‌باشد. *Tri et al. (2022)* به بررسی تاثیر کاربرد داده‌های بارش سیستم IFS^6 و تاثیر اعمال روش‌های تصحیح اریبی در بهبود کیفیت پیش‌بینی‌های سیلاب در مرکز ویتنام پرداختند. نتایج نشان داد که انجام تصحیح اریبی بر روی داده‌های IFS منجر به کاهش قابل‌توجه خطای آن در پیش‌بینی بارش می‌شود. بررسی مطالعات انجام شده در این زمینه حاکی از آن است که ارائه پیش‌بینی‌ها در قدرت تفکیک مکانی بالا توسط مدل‌های منطقه‌ای و محلی منجر شده است تا معمولاً از خروجی آن‌ها برای اعلام پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت (۱ تا ۳ روز) استفاده شود. مدل هواشناسی عددی WRF به عنوان یکی از پرکاربردترین مدل‌ها در زمینه پیش‌بینی عددی وضع هوا و شبیه‌سازی جو به شدت مورد استقبال بسیاری از کشورهای دنیا قرار گرفته است. ولی با توجه به این موضوع که این مدل در سیستم عامل لینوکس اجرا می‌شود و کاربری گرافیکی ندارد، پیکربندی و اجرای آن با مشکلات فراوانی روبرو است. علاوه‌براین با توجه به حجم بالای محاسبات، مساله توان سخت‌افزاری و پردازشی موجود برای اجرای مدل عددی محلی WRF از اهمیت بالایی برخوردار است، که ممکن است تهیه آن برای محققین هزینه‌بر باشد. از سوی دیگر، در سال‌های اخیر با توسعه پایگاه‌های تحقیقاتی، سامانه‌هایی توسعه داده شده است که به ارائه خروجی برخی از مدل‌های عددی می‌پردازند. در این سامانه‌ها، مدل‌ها از قبل اجرا و با استفاده از یک رویکرد تکراری سعی شده است تا خروجی آن‌ها از بیشترین انطباق با مشاهدات جمع‌آوری شده از سراسر جهان برخوردار باشد. مدل منطقه‌ای IFS از جمله این مدل‌ها می‌باشد که نتایج آن در گام زمانی ۶ ساعته برای تمامی بخش‌های مختلف دنیا در دسترس عموم قرار دارد. لازم بذکر است که یکی از دلایل استفاده از واژه محلی برای مدل WRF با توجه به اینکه از نظر قدرت تفکیک مکانی مشابه با خروجی‌های پایگاه IFS است، امکان تنظیم مدل، شرایط ورودی، شرایط مرزی و طرح‌واره‌های آن با توجه به منطقه و هدف مدلسازی می‌باشد؛ درحالی‌که در مدل IFS خروجی مدل‌های از پیش اجرا شده ارائه می‌شود. لذا با توجه به توضیحات فوق و با توجه به اهمیت ارائه پیش‌بینی‌های قابل‌اعتماد از بارش در مقیاس‌های زمانی کوتاه و میان‌مدت (چندساعت تا چند روز آینده) برای پیش‌بینی سیلاب (*Emmanouil et al., 2021*)، مقایسه عملکرد مدل‌های عددی پیش‌بینی هواشناسی محلی و منطقه‌ای در تخمین متغیرهای هواشناسی همچون بارش از اهمیت بالایی برخوردار است. در همین راستا هدف از انجام این پژوهش، مقایسه عملکرد مدل محلی WRF و مدل منطقه‌ای IFS در پیش‌بینی بارش در گام‌های زمانی ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعته در حوضه پلدختر واقع در استان لرستان می‌باشد.

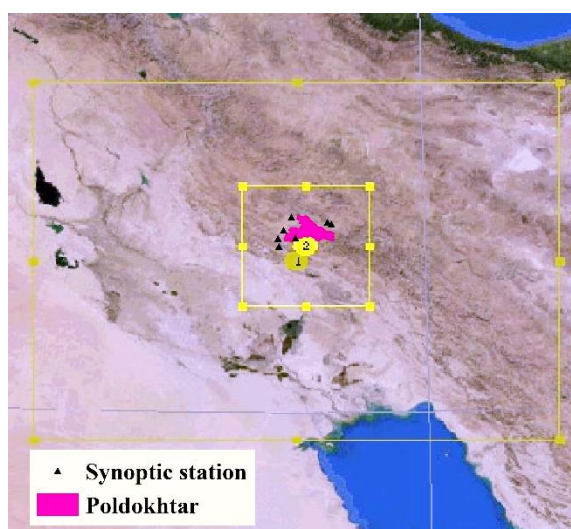
داده‌ها و روش‌ها

مدل‌های عددی بارش

مدل‌های عددی وضع هوا ابزاری هستند که در کنار سایر منابع همچون تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های سنجش از دوری و راداری از نقش بسزایی در ارتقا کیفیت پیش‌بینی‌ها برخوردار می‌باشند. همانطور که پیش‌تر نیز عنوان شد مقایسه عملکرد مدل محلی WRF و مدل منطقه‌ای IFS در پیش‌بینی بارش هدف اصلی این پژوهش می‌باشد. مدل عددی پیش‌بینی هواشناسی WRF از اولین مدل‌های پیش‌بینی جوی محلی است که هم به ارائه پیش‌بینی‌های کاربردی می‌پردازد و هم نیازهای تحقیقاتی محققان را برآورده می‌سازد. این مدل حاصل تلاش گروهی از دانشمندان در موسسات تحقیقاتی و دانشگاه‌های مختلف می‌باشد (*Michalakes et al., 2001; Skamarock et al., 2005*). هدف اصلی مدل، ارائه پیش‌بینی‌های جوی در توان تفکیک بالا (۱ تا ۱۰ کیلومتر) است. سامانه مدل‌سازی WRF شامل ۴ برنامه

1. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
2. National Centers for Environmental Prediction
3. Japan Meteorological Agency
4. China Meteorological Administration
5. THORPEX Interactive Grand Global Ensemble
6. Integrated Forecast System

اصلی است که عبارتند از: سیستم پیش‌پردازش WRF (WPS^۱)، WRFDA^۲، مدل ARW و ابزارهای گرافیکی پیش‌پردازش. سیستم پیش‌پردازشگر WRF (WPS) معمولاً برای شبیه‌سازی بهنگام مورد استفاده قرار می‌گیرد. توابع این بخش شامل: تعریف دامنه مدل، کدگذاری و استخراج میدان‌های جوی حاصل از پیش‌بینی‌های تحلیلی یک مدل دیگر، درون‌یابی میدان‌های جوی استخراج شده بر روی دامنه تعریف شده در گام اول می‌باشد. کاربرد برنامه WRFDA به صورت اختیاری است و می‌توان از آن برای استفاده از مشاهدات در درون‌یابی‌های ایجاد شده توسط WRF (WPS) استفاده نمود. همچنین یکی دیگر از کاربردهای برنامه WRFDA به روز نمودن شرایط اولیه در زمانی است که مدل در حالت چرخه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل ARW بخش کلیدی در سیستم مدل‌سازی WRF به شمار می‌رود که دارای چند برنامه برای مقداردهی اولیه است و به حل معادلات مکانی و زمانی می‌پردازد. ابزارهای گرافیکی مورد استفاده در این سیستم مدل‌سازی شامل RIP4، زبان دستوری گرافیکی NCAR، برنامه‌های تبدیل برای دیگر بسته‌های گرافیکی همچون GrADS^۳ و Vis5D می‌باشند که برای نمایش خروجی‌های مدل WRF مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مطالعه با در نظر گرفتن دو دامنه تودرتو برای تنظیم مدل عددی WRF صورت گرفته است. نسبت ریزمقیاس شدن دامنه‌ها نسبت به یکدیگر ۳ به ۱ بوده است، به این ترتیب تفکیک افقی دامنه اصلی (اول) ۱۵ کیلومتر و زیردامنه (دامنه دوم) ۵ کیلومتر در نظر گرفته شده است (شکل ۱). پیکربندی فیزیکی مورد استفاده شامل طرح‌واره میکروفیزیکی WDM5، طرح‌واره تابش موج بلند RRTM، طرح‌واره تابش موج کوتاه Dudhia، طرح‌واره لایه مرزی ACM2، طرح‌واره سطح زمین Noah MP، طرح‌واره همرفت Grell 3D می‌باشند. همچنین از داده‌های FNL به عنوان شرایط مرزی و اولیه بهره برده شده است.



شکل ۱. دامنه‌های محاسباتی در نظر گرفته شده برای مدل WRF

سیستم پیش‌بینی یکپارچه (IFS) مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت جو (ECMWF) از چند بخش تشکیل شده است که در هماهنگی با یکدیگر به ارائه پیش‌بینی‌های میان‌مدت و بلندمدت از پارامترهای هواشناسی در توان تفکیک بالا می‌پردازند، این بخش‌ها عبارتند از: مدل جوی که در رزولوشن‌های مختلف زمانی مورد اجرا قرار می‌گیرد (شامل: پیش‌بینی در رزولوشن بالا تا ۱۰ روز (HRES^۴)، ارائه پیش‌بینی‌های مجموعه‌ای تا ۱۵ روز (ENS^۵)، پیش‌بینی‌های ۱۶ تا ۴۶ روزه و پیش‌بینی‌های فصلی (SEAS5^۶))، مدل موج اقیانوس (ECWAM^۷)، مدل اقیانوس (NEMO^۸)، مدل سطح زمین (HTESSEL^۹) و یک سیستم تجزیه و تحلیل داده‌ها (4D-VAR^{۱۰}). سیستم

1. Weather Prediction Center
2. WRF Data Assimilation
3. Grid Analysis and Display System
4. High-Resolution Forecast
5. Ensemble Forecast
6. Seasonal Anomalies of Prediction System
7. ECMWF Ocean Wave Model
8. Dynamic Ocean Model
9. Hydrology Tiled ECMWF Scheme of Surface Exchanges over Land
10. 4 Dimensional Variational Data Assimilation System

4D-VAR با کاربرد یک روش بهینه‌سازی و استفاده از بازخوردهای مابین مشاهدات و داده‌های مدل IFS سعی در تنظیم دقیق شرایط اولیه دارد. در این سیستم برای تنظیم شرایط اولیه و تعیین مقدار متغیرها با کاربرد یک رویکرد افزایشی و تکراری در مجموعه‌ای از حلقه‌های تو در تو، دنباله‌ای از حالت‌های مختلف تشکیل می‌شود که دارای بیشترین انطباق با مشاهدات موجود می‌باشند (Park, 2021). داده‌های این پایگاه در قدرت تفکیک مکانی حدود ۸ کیلومتر برای سراسر جهان از سال ۲۰۱۶ در اختیار محققان قرار دارد. در این پژوهش برای دریافت داده‌های بارش سیستم IFS در گام زمانی ۶ ساعته از لینک <https://rda.ucar.edu/datasets/ds113.1/> استفاده شده است.

شاخص‌های ارزیابی

در این پژوهش برای ارزیابی کمی مقادیر بارش پیش‌بینی شده توسط مدل WRF و سامانه IFS نسبت به مقادیر مشاهداتی از شاخص‌های آماری: CC^1 ، MAE^2 و $NRMSE^3$ و جدولی شامل FAR^4 و POD^5 استفاده بعمل آمده است. در جدول ۱ روش محاسبه و مقدار بهینه هر یک از شاخص‌ها شرح داده شده است.

جدول ۱. شاخص‌های آماری و جدولی مورد استفاده در این پژوهش

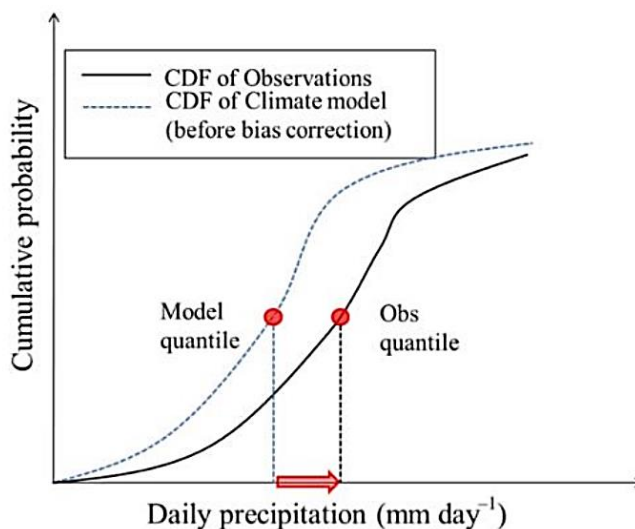
منبع	مقدار بهینه	فرمول	شاخص
(Pearson, 1896)	۱	$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}}$	آماری
(Hyndman and Koehler, 2006)	.	$NRMSE = \frac{RMSE}{\sigma_o}$	
(Stanski et al., 1989)	.	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n S_i - O_i }{n}$	جدولی
(Panofsky and Brier, 1965)	.	$FAR = \frac{C}{A + C}$	
(Panofsky and Brier, 1965)	۱	$POD = \frac{A}{A + B}$	

O_i : مقادیر مشاهداتی، S_i : مقادیر شبیه‌سازی، n : تعداد داده‌ها، \bar{O} : میانگین مقادیر مشاهداتی، \bar{S} : میانگین مقادیر شبیه‌سازی، σ_o : انحراف از معیار مقادیر مشاهداتی می‌باشد. همچنین A : مجموع مواقعی است که رخداد بارش توسط ایستگاه سینوپتیک ثبت و مدل آن را پیش‌بینی نموده است، B : مجموع مواقعی که رخداد بارش توسط ایستگاه سینوپتیک ثبت شده ولی مدل آن را پیش‌بینی ننموده است، C : مجموع مواقعی که بارشی توسط ایستگاه ثبت نشده ولی مدل، بارش پیش‌بینی نموده است.

تصحیح اریبی داده‌های بارش

خروجی مدل‌های پیش‌بینی جوی معمولاً دارای اریبی سیستماتیک نسبت به مقادیر مشاهداتی می‌باشند که ممکن است کاربرد مستقیم آن‌ها، نتایج تحقیقات را تحت تاثیر قرار داده و سبب تحمیل خطا بر نتایج شوند (Maurer & Hidalgo, 2010). به همین دلیل بهتر است تا این داده‌ها پیش از استفاده و با هدف کاهش خطا مورد تصحیح اریبی قرار بگیرند. روش‌های مختلفی به منظور تصحیح اریبی

این داده‌ها توسعه داده شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به روش ناپارامتری نگاشت چندک (Q_M^1) اشاره نمود. در این روش تابع توزیع تجمعی (CDF^2) خروجی مدل‌ها با استفاده از یک تابع انتقال تجربی با تابع توزیع تجمعی مقادیر مشاهداتی مطابقت داده خواهد شد (شکل ۲). طی روش نگاشت چندک مقادیر داده‌های مربوط به چندک‌های مختلف از خروجی مدل‌های اقلیمی جایگزین چندک متناظر از داده‌های مشاهداتی می‌شود. عدم محدودیت برای داده‌های مورد استفاده از منظر پیروی از توزیع آماری خاص از جمله مزایای این روش ناپارامتری به شمار می‌رود که به شکل موثری توانایی تصحیح اریبی مقادیر حدی، میانگین و انحراف از معیار را دارد (Ali et al., 2019; Cannon et al., 2015).



شکل ۲. روش تصحیح اریبی نگاشت چندک (Kim et al., 2016)

منطقه مورد مطالعه

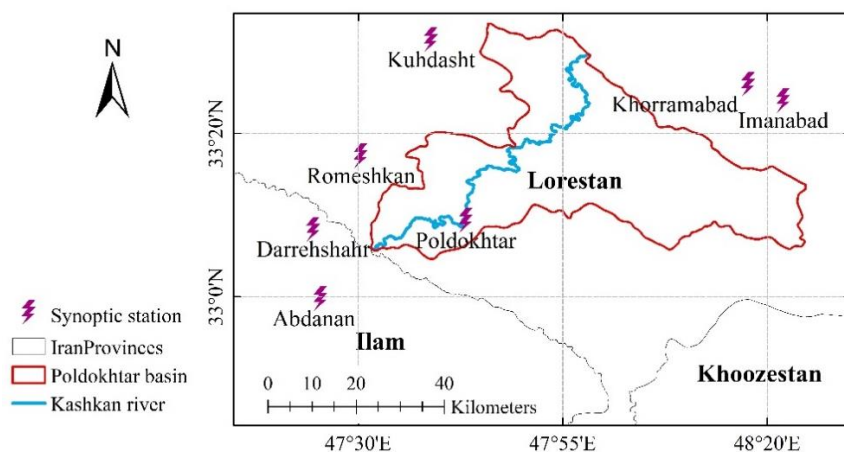
منطقه مطالعاتی این تحقیق، حوضه آبخیز پلدختر است. حوضه پلدختر با وسعت ۲۰۳۶ کیلومترمربع در استان لرستان واقع شده است. این رودخانه پس از عبور از میان شهرهای معمولان و پلدختر، در محل پل گاو میشان به رودخانه سیمره می‌پیوندد. موقعیت جغرافیایی این حوضه بین مختصات ۴۷ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۴۳ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۷ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۵۵ دقیقه عرض شمالی می‌باشد. در این مطالعه از مقادیر بارش ثبت شده در ۷ ایستگاه سینوپتیک واقع در داخل و خارج از مرز این حوضه برای ارزیابی خروجی مدل عددی هواشناسی WRF و سامانه عددی IFS استفاده شده است. تاریخ رخدادهای منتخب برای این پژوهش عبارتند از ۲۰۱۶/۰۴/۱۲ تا ۲۰۱۶/۰۴/۱۶ و ۰۰:۰۰ تا ۲۰۱۸/۱۱/۲۳ و ۰۰:۰۰ تا ۲۰۱۸/۱۱/۲۶. ملاک انتخاب رخدادهای مورد مطالعه، اعلام وقوع سیل براساس داده‌های ثبت شده و ثبت داده دبی ساعتی در رودخانه پلدختر است. همچنین سعی شد تا از نظر بیشینه بارش مشاهداتی، تنوع در رخدادهای در نظر گرفته شود به طوری که بیشینه بارش مشاهداتی در ایستگاه‌های سینوپتیک به ازای رخداد ۲۰۱۶ بیش از ۳۰ میلی‌متر و به ازای رخداد ۲۰۱۸ به ۳۰ میلی‌متر محدود شده است. در شکل ۳ موقعیت جغرافیایی حوضه پلدختر به همراه موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک نشان داده شده است.

نتایج و بحث

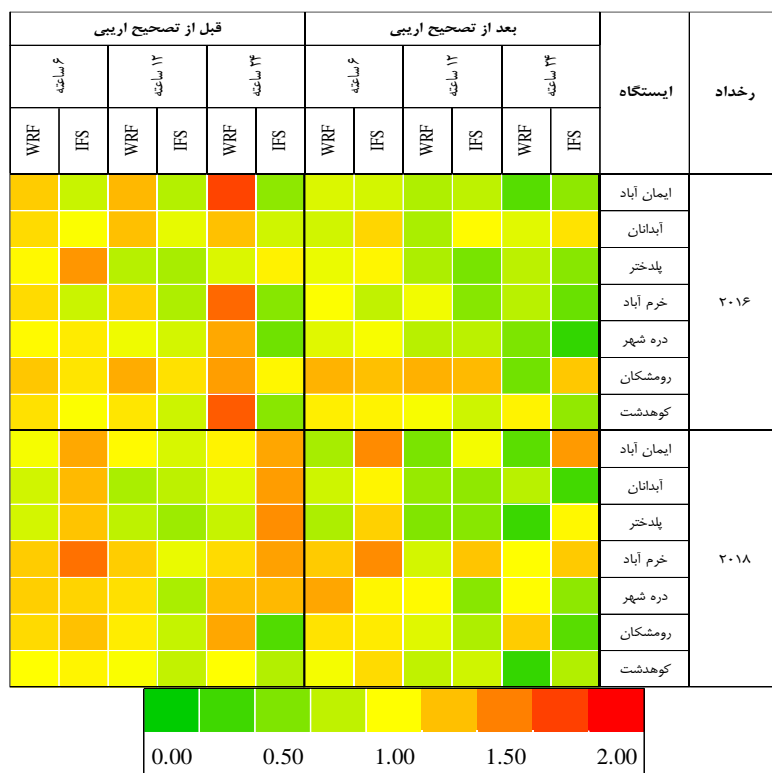
تأثیر تصحیح اریبی بر عملکرد مدل WRF و سامانه IFS در شبیه‌سازی بارش

در این بخش به بررسی کاربرد روش تصحیح اریبی نگاشت چندک بر کاهش خطای خروجی‌های مدل WRF و IFS در گام‌های زمانی ۱۲ و ۲۴ ساعته پرداخته شده است. به همین منظور مقدار شاخص NRMSE برای قبل و بعد از تصحیح اریبی در سطح ایستگاه‌های مورد مطالعه و نمودار ماتریسی تغییرات آن در شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که کاربرد روش نگاشت چندک و تصحیح خروجی‌های WRF و IFS با کاهش مقدار شاخص خطای NRMSE همراه بوده است که به معنای بهبود عملکرد خروجی این

مدل‌ها در هر ۳ گام زمانی می‌باشد. به‌عنوان مثال، در رخداد ۲۰۱۶ مقدار متوسط شاخص NRMSE در سطح ایستگاه‌های مطالعاتی برای خروجی‌های مدل WRF در گام‌های زمانی ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعته پیش از تصحیح اریبی به ترتیب ۱/۱۳، ۱/۱۲ و ۱/۴۰ می‌باشد و با کاربرد تصحیح اریبی به ۰/۹۸، ۰/۸۶ و ۰/۶۷ کاهش یافته است. همچنین کاربرد روش نگاشت چندک برای تصحیح اریبی خروجی‌های IFS در گام‌های زمانی ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعته (رخداد ۲۰۱۶) منجر به کاهش مقدار شاخص خطای NRMSE به ۱/۰۱، ۰/۸۰ و ۰/۶۶ شده است، درحالی‌که پیش از تصحیح اریبی مقدار متوسط شاخص NRMSE در سطح ایستگاه‌های مطالعاتی در گام‌های زمانی مورد مطالعه معادل ۱/۰۵، ۰/۹۲ و ۰/۸۱ بوده است. در همین راستا، Heredia et al. (2018) با ارزیابی دو روش برای تصحیح اریبی داده‌های بارش مدل WRF در مرکز اکوادور نشان دادند روش مبتنی بر انطباق توزیع تجمعی داده‌ها الگوهای مکانی تغییرات بارش را بهتر حفظ می‌نماید.



شکل ۳. موقعیت جغرافیایی و موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه در این پژوهش

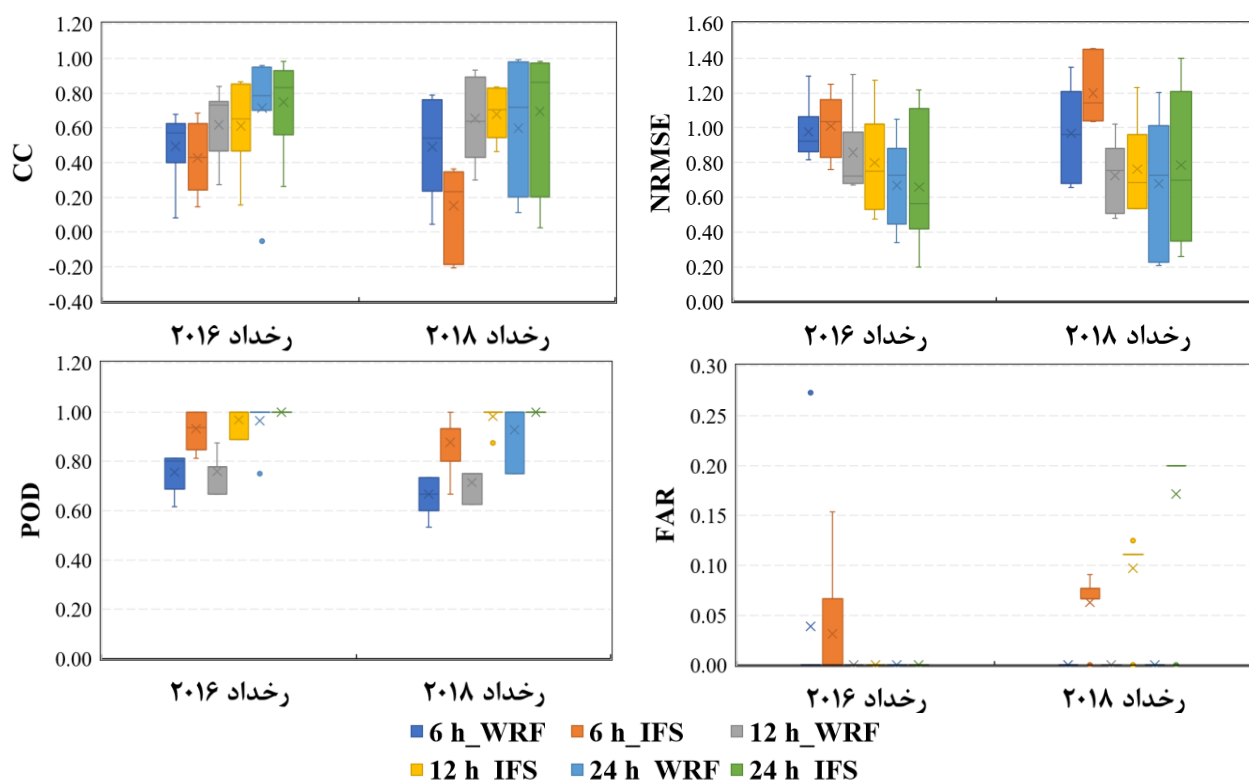


شکل ۴. نمودار ماتریسی تغییرات شاخص NRMSE قبل و بعد از تصحیح اریبی داده‌های WRF و IFS در گام‌های زمانی ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعته

بررسی عملکرد مدل WRF و سامانه IFS در شبیه‌سازی بارش

در این بخش به بررسی عملکرد مدل WRF و سامانه IFS در شبیه‌سازی بارش در گام‌های زمانی ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعته پرداخته شده است. به همین منظور نمودار جعبه‌ای تغییرات شاخص‌های CC، NRMSE، POD و FAR در گام‌های زمانی ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعته ایستگاه‌های

مورد مطالعه برای رخدادهای ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ در شکل ۵ نشان داده شده است. بررسی تغییرات مقدار شاخص همبستگی بین مقادیر بارش پایگاه IFS و بارش شبیه‌سازی توسط مدل عددی WRF با داده‌های مشاهداتی در سطح ایستگاه‌های مورد مطالعه در گام زمانی ۶ ساعته نشان می‌دهد، متوسط شاخص همبستگی در رخداد بارش ۲۰۱۶ به ترتیب برابر است با ۰/۴۳ و ۰/۴۹ و در رخداد ۲۰۱۸ به ترتیب معادل است با ۰/۱۵ و ۰/۴۹. در گام زمانی ۱۲ ساعته میزان همبستگی در رخدادهای مذکور (۲۰۱۶ و ۲۰۱۸) برای مدل WRF، ۰/۶۲ و ۰/۶۵ و برای پایگاه IFS معادل است با ۰/۶۱ و ۰/۶۸. همچنین میزان متوسط شاخص همبستگی بین مقادیر بارش ۲۴ ساعته شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF با داده‌های مشاهداتی در سطح ایستگاه‌های مورد مطالعه برای رخدادهای ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ به ترتیب به ۰/۷۲ و ۰/۶۰ و برای پایگاه IFS به ۰/۷۵ و ۰/۷۰ افزایش یافته است. براساس نتایج مشخص است که در گام زمانی ۶ ساعته تنظیم مدل عددی WRF از عملکرد بهتری در شبیه‌سازی بارش برخوردار بوده است، درحالی‌که در گام‌های زمانی بزرگتر مقادیر ارائه شده توسط پایگاه IFS دارای همبستگی بیشتری با مقادیر مشاهداتی می‌باشد.



شکل ۵. نمودار جعبه‌ای تغییرات شاخص‌های CC، NRMSE، POD و FAR برای شبیه‌سازی بارش در گام‌های زمانی ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعته

ارزیابی نتایج براساس شاخص NRMSE نیز حاکی از آن است دامنه تغییرات مقدار خطا در برآورد بارش توسط پایگاه IFS در گام‌های زمانی ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعته بیش از بارش شبیه‌سازی توسط مدل عددی WRF می‌باشد. با توجه به نتایج مشخص است که از میان گام‌های زمانی مورد مطالعه، مدل WRF و پایگاه IFS با خطای نسبتاً بیشتری اقدام به شبیه‌سازی بارش‌های ۶ ساعته می‌نمایند. بنابراین روند کاهش خطا با افزایش گام زمانی، داده‌های این پایگاه و مدل WRF مشهود می‌باشد، این بدین معنی است که می‌توان از پیش‌بینی این مدل‌ها در گام زمانی روزانه با حاشیه اطمینان بالاتری استفاده نمود. ارزیابی کارایی مدل WRF و پایگاه عددی IFS در شناسایی زمان‌های بارانی از غیربارانی براساس شاخص‌های جدولی POD و FAR در گام‌های زمانی مختلف حاکی از کارایی قابل قبول عملکرد آن‌ها در تشخیص زمان‌های بارانی از غیربارانی در هر سه گام زمانی است. به طوری که براساس شاخص نرخ هشدار اشتباه (FAR) در رخداد ۲۰۱۶ در گام‌های زمانی ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعته، پایگاه IFS به طور متوسط به ترتیب در ۹۶ (FAR=۰/۰۴)، ۱۰۰ درصد (FAR=۰/۰۰) و ۱۰۰ درصد (FAR=۰/۰۰) و در رخداد ۲۰۱۸ به ترتیب در ۹۳ (FAR=۰/۰۷)، ۸۹ درصد (FAR=۰/۱۱) و ۸۰ درصد (FAR=۰/۲۰) از مواقع، زمان‌هایی که براساس آمار ثبت شده در ایستگاه دارای بارش می‌باشد را به درستی گزارش نموده است. همچنین برای شبیه‌سازی‌های مدل عددی WRF در رخدادهای ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ مقدار شاخص نرخ هشدار اشتباه در گام‌های زمانی ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعته به ۰/۰۰، ۰/۰۳، ۰/۰۰،



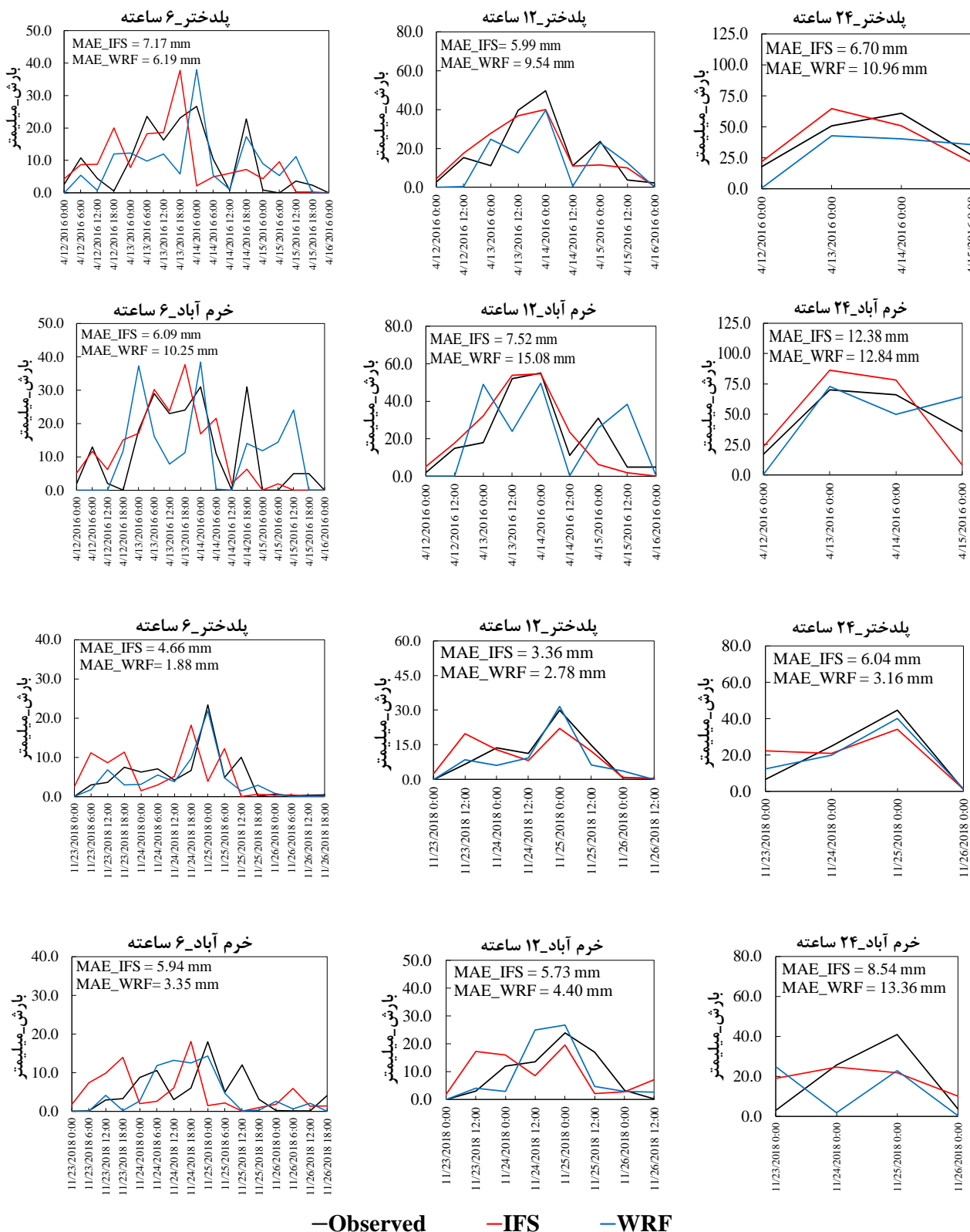
۰/۰۰ و ۰/۰۰، ۰/۰۰، ۰/۰۰ محدود شده است. در همین راستا، در تحقیقی که خان‌سالاری و همکاران (۱۴۰۰) در آن به بررسی عملکرد مدل عددی WRF در پیش‌بینی بارش در شهرستان چالدران پرداختند، نشان داده شد که نرخ هشدار اشتباه مدل در حالت بیشینه به ۰/۵۸ محدود شده است. همچنین حداقل شاخص POD در رخداد ۲۰۱۶ برای سامانه IFS و WRF در هر سه گام زمانی مورد مطالعه به ترتیب ۰/۸۸ و ۰/۶۷ و در رخداد ۲۰۱۸، ۰/۶۷ و ۰/۶۰ می‌باشد و نشان‌دهنده آن است که سامانه IFS و مدل عددی WRF همواره در بیش از ۶۷ و ۶۰ درصد مواقع، زمان‌های بارندگی را درست گزارش نموده است.

در شکل ۶ سری زمانی بارش پایگاه IFS و مدل عددی WRF به همراه سری زمانی بارش مشاهداتی و شاخص MAE نشان داده شده است. با توجه به تعداد بالای خروجی‌ها در این بخش به ارائه نتایج ایستگاه‌های خرم‌آباد و پلدختر در گام‌های زمانی ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعته اکتفا شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در گام زمانی ۶ ساعته مدل WRF از عملکرد بهتری در شبیه‌سازی بارش در ایستگاه‌های سینوپتیک برخوردار است. همچنین با افزایش گام زمانی، مقادیر بارش دریافتی از پایگاه IFS نیز دارای عملکرد نسبتاً قابل‌قبولی در شبیه‌سازی بارش می‌باشند. به عنوان مثال، در ایستگاه پلدختر در رخداد ۲۰۱۶، مقدار شاخص خطای MAE (گام زمانی ۶ ساعته) برای پایگاه IFS و مدل WRF به ترتیب ۷/۱۷ و ۶/۱۹ میلی‌متر تخمین زده شده است. در حالی که در گام زمانی ۱۲ ساعته مقدار شاخص برابر است با ۵/۹۹ و ۹/۵۴ میلی‌متر و در گام زمانی ۲۴ ساعته مقدار شاخص ۶/۷۰ و ۱۰/۹۶ میلی‌متر تخمین زده شده است. همچنین در رخداد ۲۰۱۸ (ایستگاه پلدختر)، مقدار شاخص MAE در گام زمانی ۶ ساعته برای پایگاه IFS و خروجی‌های مدل WRF به ترتیب ۴/۶۶ و ۱/۸۸، در گام زمانی ۱۲ ساعته ۳/۳۶، ۲/۷۸ و در گام زمانی ۲۴ ساعته ۶/۰۴ و ۳/۱۶ میلی‌متر تخمین زده شده است. بنابراین با افزایش گام زمانی از خطای خروجی‌های پایگاه IFS نسبت به مقادیر مشاهداتی کاسته شده (در مقایسه با اجرای مدل عددی WRF) و این خروجی‌ها نیز از عملکرد نسبتاً مشابهی با اجرای مدل عددی WRF برخوردار می‌باشد. در همین راستا، Saedi et al. (2020) با ارزیابی کارایی مدل‌های عددی در پیش‌بینی بارش در گام‌های زمانی ۶ تا ۲۴ ساعته نشان دادند که علی‌رغم عملکرد قابل‌قبول این مدل‌ها در تشخیص وقوع یا عدم‌وقوع بارش، ولی پیش‌بینی‌های با گام زمانی کوچکتر از ۲۴ ساعت ضعیف‌تر از پیش‌بینی‌های ۲۴ ساعته می‌باشند.

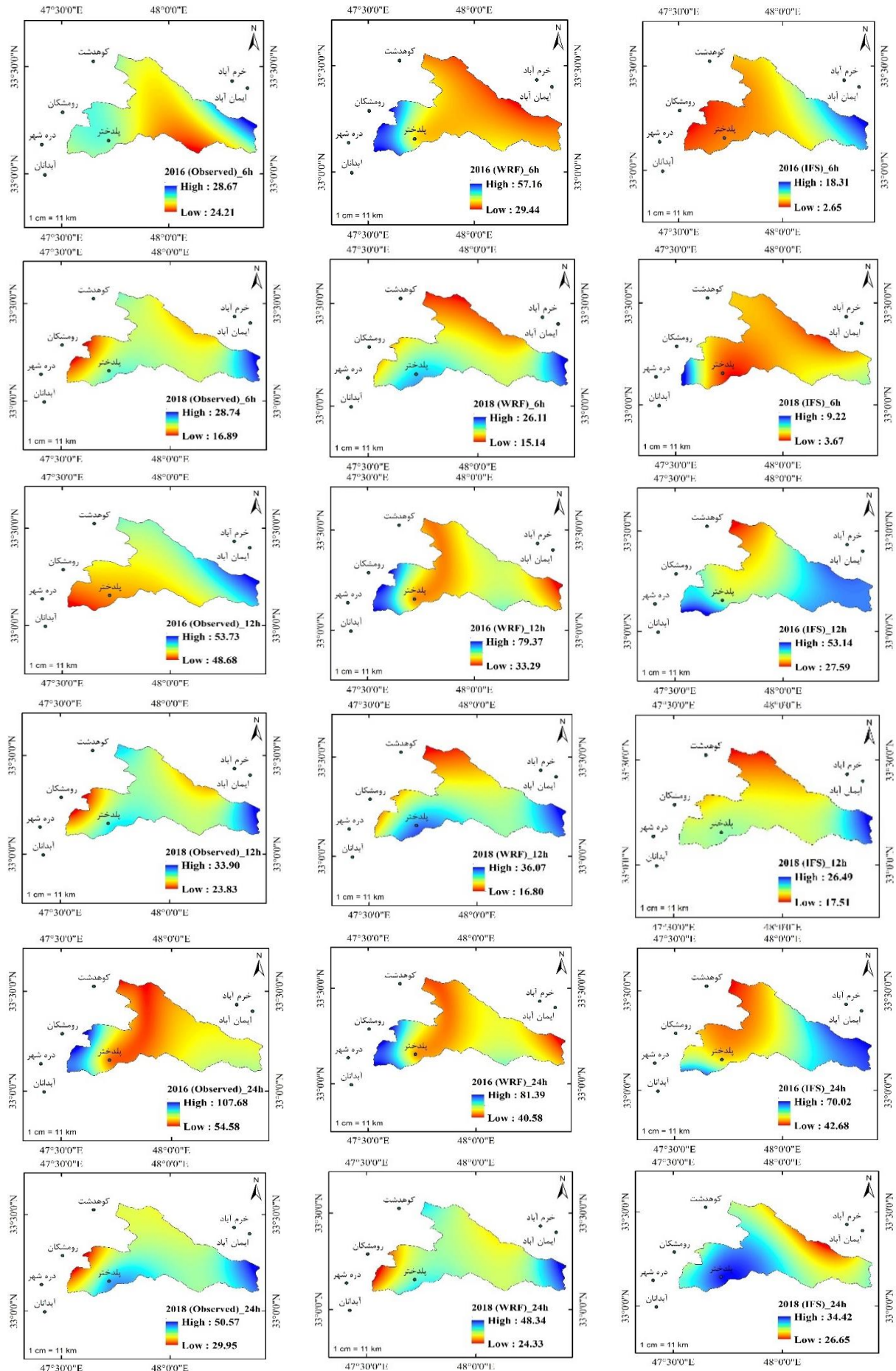
بررسی عملکرد مدل WRF و سامانه IFS در شبیه‌سازی تغییرات مکانی بارش

علاوه بر بررسی مقدار خطای مدل WRF و سامانه IFS در شبیه‌سازی سری زمانی بارش، در این بخش تغییرات مکانی بارش شبیه‌سازی نسبت به تغییرات مکانی بارش مشاهده‌ای در گام‌های زمانی ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعته مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج در شکل ۷ ارائه شده است. بررسی نتایج در گام‌های زمانی ۶ و ۱۲ ساعته نشان داد که در رخداد ۲۰۱۸ تغییرات مکانی بارش شبیه‌سازی شده توسط کاربرد مدل عددی WRF هم از نظر بازه تغییرات مقدار بارش در سطح منطقه مطالعاتی و هم از نظر تغییرات مکانی، از بیشترین شباهت با مقادیر مشاهداتی برخوردار است. به طوری که بازه تغییرات مقدار بارش در سطح منطقه مطالعاتی و هم از نظر تغییرات مکانی، از بیشترین شباهت با مقادیر مشاهداتی برخوردار است. به طوری که بازه تغییرات مقدار بارش در این رخداد برای گام‌های زمانی ۶ و ۱۲ ساعته به ترتیب معادل ۱۶/۸۹ تا ۲۸/۷۴ میلی‌متر و ۲۳/۸۳ تا ۳۳/۹۰ میلی‌متر است و بازه تغییرات بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF به ترتیب ۱۵/۱۴ تا ۲۶/۱۱ میلی‌متر و ۱۶/۸۰ تا ۳۶/۰۷ میلی‌متر تخمین زده شده است. همچنین با توجه به مقادیر مشاهداتی، بیشینه بارش در محدوده شرق و پلدختر رخ داده است که توسط مدل نیز به درستی شبیه‌سازی شده است. در رخداد ۲۰۱۶ (در گام‌های زمانی ۶ و ۱۲ ساعته) نمی‌توان هیچ یک از مدل‌های مورد بررسی را نسبت به یکدیگر در شبیه‌سازی تغییرات مکانی بارش برتر دانست از علت‌های آن می‌توان به عملکرد ضعیف‌تر مدل WRF و سامانه IFS در شبیه‌سازی بارش این رخداد نسبت به رخداد ۲۰۱۸ در تعداد بیشتری از ایستگاه‌ها ربط داد که بخشی از این عملکرد ضعیف می‌تواند ناشی از خطا در ثبت داده‌های مشاهداتی نیز باشد.

نتایج در گام زمانی ۲۴ ساعته حاکی از برتری خروجی‌های شبیه‌سازی شده توسط کاربرد مدل WRF نسبت به سامانه IFS می‌باشد. در رخداد ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ حداقل و حداکثر بارش در سطح حوضه به ترتیب معادل ۵۴/۵۸ تا ۱۰۷/۶۸ میلی‌متر و ۲۹/۹۵ تا ۵۰/۵۷ میلی‌متر بوده است که در اجرای مدل WRF به ترتیب ۴۰/۵۸ تا ۸۱/۳۹ میلی‌متر و ۲۴/۳۳ تا ۴۸/۳۴ میلی‌متر تخمین زده شده است. به طور کلی بررسی نتایج نشان داد که نمی‌توان سامانه عددی IFS را برای شبیه‌سازی تغییرات مکانی بارش مناسب دانست، در حالی که تنظیم و کاربرد مدل عددی WRF از عملکرد به مراتب بهتری در شبیه‌سازی تغییرات مکانی و بازه تغییرات بارش در سطح حوضه مطالعاتی برخوردار بوده است.



شکل ۶. سری زمانی بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط پایگاه IFS و مدل عددی WRF (ایستگاه‌های خرم‌آباد و دلختر، رخداد‌های بارش: ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸) در گام‌های زمانی ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعته



شکل ۷. تغییرات مکانی بارش در سطح حوضه مطالعاتی به ازای داده‌های پایگاه IFS و اجرای مدل عددی WRF

نتیجه‌گیری

توصیف دقیق ساختار بارش و پیش‌بینی صحیح و قابل‌اعتماد از مقدار بارندگی به عنوان یکی از ورودی‌های حیاتی برای مدلسازی و شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و بسیار چالش‌برانگیز می‌باشد. با گسترش فناوری‌های رایانه‌ای و ماهواره‌ای در دهه‌های اخیر، مدل‌های عددی متعددی در زمینه پیش‌بینی متغیرهای هواشناسی توسط مراکز تحقیقاتی مختلف دنیا توسعه داده شده است. یک مدل عددی از حالت و شرایط اولیه اتمسفر شروع نموده و با گذشت زمان به دنبال راه‌حلی برای حل معادلات مدل و فیزیک مدل است. حجم بالای محاسبات در مدل‌های عددی، اجرای آن‌ها در سیستم عامل لینوکس و نیاز به کاربرد سیستم‌های قدرتمند منجر شده است تا کاربرد برخی از مدل‌های عددی با مشکلاتی همراه باشد. در همین راستا، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی عملکرد مدل عددی WRF و خروجی‌های سامانه عددی IFS در شبیه‌سازی بارش در گام‌های زمانی ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعته به انجام رسیده است. بررسی نتایج نشان داد که کاربرد روش نگاشت چندک منجر به کاهش خطای خروجی مدل WRF و سامانه IFS در هر سه گام زمانی شده است. بنابراین توصیه می‌شود که پیش از استفاده از خروجی‌های سامانه IFS و مدل WRF تصحیح اریبی بر روی خروجی آن‌ها به منظور کاهش خطا انجام شود. نتایج به‌دست آمده نشان داد که در گام زمانی ۶ ساعته مدل عددی WRF نسبت به خروجی سامانه عددی IFS از کارایی مناسب‌تری در شبیه‌سازی بارش برخوردار می‌باشد. به‌عنوان مثال، مقدار متوسط شاخص هبستگی در رخدادهای بارش ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ به‌ترتیب برابر است با ۰/۴۹ و ۰/۴۹، درحالی‌که برای سامانه عددی IFS به‌ترتیب ۰/۴۳ و ۰/۱۵ است. علاوه‌براین، با توجه به نتایج مشخص است که عملکرد هر دو مدل مورد مطالعه (WRF و IFS) در شناسایی زمان‌های بارانی از غیربارانی قابل‌قبول می‌باشد، در تحقیقی مشابه نیز خان‌سالاری و همکاران (۱۴۰۰) با بررسی عملکرد مدل عددی WRF در شهرستان چالدران نشان دادند که عملکرد این مدل براساس شاخص‌های عددی FAR و POD مناسب می‌باشد. همچنین بررسی نتایج در گام‌های زمانی مختلف گویای این مطلب است که افزایش گام زمانی و تجمیع بارش‌ها، منجر به بهبود عملکرد نتایج مدل WRF و سامانه IFS در شبیه‌سازی بارش شده است، همچنین میزان دقت در پیش‌بینی صحیح زمان‌های بارانی افزایش یافته است. در همین راستا، Saedi et al. (2020) نیز نشان دادند که عملکرد سامانه‌های عددی در پیش‌بینی بارش در گام‌های زمانی کوچکتر از ۲۴ ساعته ضعیف‌تر است. علاوه‌براین، تقوی و همکاران (۱۳۹۲) با بررسی عملکرد مدل عددی WRF نشان دادند که عملکرد این مدل در پیش‌بینی‌های بارش ۲۴ ساعته بهتر از پیش‌بینی‌های بارش ۴۸ ساعته می‌باشد. همچنین ارزیابی کارایی مدل WRF و خروجی‌های سامانه IFS در شبیه‌سازی تغییرات مکانی بارش در سطح حوضه پلدختر نشان داد که نمی‌توان پایگاه IFS را به عنوان منبعی برای شبیه‌سازی تغییرات مکانی بارش مناسب دانست، درحالی‌که تغییرات مکانی بارش شبیه‌سازی توسط سامانه عددی WRF هم از نظر بازه تغییرات مقدار بارش در سطح منطقه مطالعاتی و هم از نظر تغییرات مکانی، از بیشترین شباهت با مقادیر مشاهداتی برخوردار است. به‌طوری‌که براساس مقادیر مشاهداتی بیشینه بارش در محدوده شمال‌شرق و پلدختر رخ داده است که توسط مدل WRF و بویژه در گام‌های زمانی ۱۲ و ۲۴ ساعته نیز به درستی شبیه‌سازی شده است. در یک جمع‌بندی کلی می‌توان چنین بیان نمود که چنانکه هدف از مدلسازی هواشناسی، پیش‌بینی بارش در گام‌های زمانی کوچکتر از روزانه می‌باشد، کاربرد مدل عددی WRF توصیه می‌شود. انعطاف‌پذیری این مدل و متن‌باز بودن آن منجر شده است تا برای منطقه و متغیر مورد مطالعه قابل‌تنظیم باشد. بنابراین می‌تواند با دقت بیشتری به پیش‌بینی بارش در گام‌های زمانی کوچکتر بپردازد. درحالی‌که برای شبیه‌سازی تغییرات بارش در گام زمانی ۲۴ ساعته، سامانه عددی IFS می‌تواند راه‌گشای بسیاری از مطالعات باشد.

"هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

مراجع

- امینی، ستاره؛ عزیزیان، اصغر و دانش‌کار آراسته، پیمان. (۱۳۹۹). تعیین مقیاس زمانی مناسب پیش‌بینی‌های کوتاه و میان مدت مدل‌های عددی هواشناسی جهانی در بخش‌های مختلف ایران. *تحقیقات منابع آب/ایران*. ۱۶(۴). ۱۹۰-۲۰۴.
- تقوی، فرحناز؛ نیستانی، ابوالفضل و قادر، سرمد. (۱۳۹۲). ارزیابی پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت بارش مدل عددی WRF در منطقه ایران در دوره یک‌ماهه. *فیزیک زمین و فضا*. ۳۹(۲). ۱۷۰-۱۴۵.
- خان‌سالاری، سکینه؛ فتاحی، ابراهیم؛ اسعدی‌اسکویی، ابراهیم و رهنما، مهدی. (۱۴۰۰). سامانه پیش‌بینی و هشدار بارش شدید در حوضه چالدران. *نشریه هواشناسی و علوم جو*. ۴(۱). ۱۵-۲۹.



هدایتی دزفولی، اکرم و آزادی، مجید. (۱۳۸۹). راستی‌آزمایی پیش‌بینی بارش مدل منطقه‌ای MM5 روی ایران. فیزیک زمین و فضا. ۳۶(۳).

REFERENCES

- Abidin, H. Z., Andreas, H., Gumilar, I., & Wibowo, I. R. R. (2015). On the correlation between urban development, land subsidence and flooding phenomena in Jakarta. *IAHS-AISH Proceedings and Reports*, 370, 15–20. <https://doi.org/10.5194/piahs-370-15-2015>
- Ali, S., Eum, H. I., Cho, J., Dan, L., Khan, F., Dairaku, K., Shrestha, M. L., Hwang, S., Nasim, W., Khan, I. A., & Fahad, S. (2019). Assessment of climate extremes in future projections downscaled by multiple statistical downscaling methods over Pakistan. *Atmospheric Research*, 222, 114–133.
- Amini, S., Azizian, A., & Daneshkar Arasteh, P. (2021). Determining the Appropriate Temporal Resolution of Short and mid-terms of Global Precipitation Forecasting Systems over Iran. *Iran-Water Resources Research*, 16(4), 190–204. (In Persian)
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 28(17), 6938–6959.
- Dasari, H. P., & Challa, V. S. (2015). A Study of Precipitation Climatology and Its Variability over Europe Using an Advanced Regional Model (WRF). *American Journal of Climate Change*, 4(1), 22–39. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2015.41003>
- Emmanouil, G., Vlachogiannis, D., & Sfetsos, A. (2021). Exploring the ability of the WRF-ARW atmospheric model to simulate different meteorological conditions in Greece. *Atmospheric Research*. Elsevier 247:105226.
- Frnda, J., Durica, M., Rozhon, J., Vojtekova, M., Nedoma, J., & Martinek, R. (2022). ECMWF short-term prediction accuracy improvement by deep learning. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11936-9>.
- Hamill, T. M., Engle, E., Myrick, D., Peroutka, M., Finan, C., & Scheuerer, M. (2017). The U. S. National Blend of Models for Statistical Postprocessing of Probability of Precipitation and Deterministic Precipitation Amount. *Monthly Weather Review*, 145(9), 3441–3463. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0331.1>
- Hedayati Dezfouli, A., & Azadi, M. (2011). Verification of MM5 forecast precipitation over Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 36(3). (In Persian)
- Heredia, M. B., Junquas, C., Prieur, C., & Condom, T. (2018). New Statistical Methods for Precipitation Bias Correction Applied to WRF Model Simulations in the Antisana Region, Ecuador. *Journal of Hydrometeorology*, 19(12), 2021–2040. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0032.1>
- Hyndman, R. J., & Koehler, A. B. (2006). Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting*, 22(4), 679–688.
- Khansalari, S., Fatahi, E., Oskouei, E. A., & Rahnama, M. (2021). Heavy precipitation forecasting and warning system in the Chaldoran basin. *Journal of Meteorology and Atmospheric Sciences*, 4(1), 15–29. (In Persian).
- Kim, K. B., Kwon, H. H., & 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, 2019–2034.
- Kirkwood, C., Economou, T., Odbert, H., & Pugeault, N. (2021). A framework for probabilistic weather forecast post-processing across models and lead times using machine learning. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 379(2194). <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0099>
- Maurer, E. P., & Hidalgo, H. G. (2010). Utility of daily vs. monthly large-scale climate data: An intercomparison of two statistical downscaling methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(2), 551–563.
- Michalakes, J., Chen, S., Dudhia, J., Hart, L., Klemp, J., Middlecoff, J., & Skamarock, W. (2001). Development of a next generation regional weather research and forecast model. *Developments In Teracomputing: Proceedings Of The Ninth Ecmwf Workshop On The Use Of High Performance Computing In Meteorology*, 269–276. https://doi.org/10.1142/9789812799685_0024
- Panofsky, H. A., & Brier, G. W. (1965). *Some Applications Of Statistics to Meteorology*. Earth and Mineral Sciences Continuing Education, College of Earth and Mineral Sciences.
- Park, S. (2021). IFS DOCUMENTATION – Cy47r3-PART II: DATA ASSIMILATION.
- Pearson, K. (1896). Mathematical Contributions to the Theory of Evolution.–On a Form of Spurious

- Correlation Which May Arise When Indices Are Used in the Measurement of Organs. *Proceedings of the Royal Society of London*, 60, 489–498.
- Saedi, A., Saghafian, B., Moazami, S., & Aminyavari, S. (2020). Performance evaluation of sub-daily ensemble precipitation forecasts. *Meteorological Applications*, 27(1), 1–16. <https://doi.org/10.1002/met.1872>
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., & Powers, G. J. (2005). A description of the advanced research WRF, Version 2, NCAR Tech, Note NCAR/TN-4681STR.
- Stanski, H. R., Wilson, L. J., & Burrows, W. R. (1989). *Survey of Common Verification Methods in Meteorology* (2nd ed.). World Meteorological Organization.
- Taghavi, F., Neyestani, A., & Ghader, S. (2013). Short range precipitation forecasts evaluation of WRF model over IRAN. *Journal of the Earth and Space Physics*, 39(2), 145–170. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2013.35196>. (In Persian)
- Toride, K., Iseri, Y., Duren, A. M., England, J. F., & Kavvas, M. L. (2019). Evaluation of physical parameterizations for atmospheric river induced precipitation and application to long-term reconstruction based on three reanalysis datasets in Western Oregon. *Science of the Total Environment*, 25(658), 570–581. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.214>
- Trenberth, K. E. (1992). *Climate System Modeling* (C. National Center for Atmospheric Research, Boulder (ed.)).
- Tri, D. Q., Thai, T. H., & Van Hoa, V. (2022). Bias-correction data of IFS rainfall forecasts for hydrological and hydraulic models to forecast flood events. *Arabian Journal of Geosciences*, 15. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10801-3>
- Wu, X. S., Wang, Z. L., Guo, S. L., Liao, W., Zeng, Z., & Chen, X. (2017). Scenario-based projections of future urban inundation within a coupled hydrodynamic model framework: a case study in Dongguan City, China. *Journal of Hydrology*, 547, 428–442.