

Identifying the Optimal Numerical Scheme within the WRF Model for Precipitations Leading to Floods and Its Uncertainties

S. Koohi¹, A. Azizan^{2*}, and M.S. Najafi³

Abstract

Providing an accurate depiction of precipitation structure and ensuring precise and dependable forecasts of precipitation are crucial, yet considerably challenging, elements for hydrological and hydraulic simulations. Moreover, the selection of schemes within the WRF numerical system significantly influences forecasting outcomes. This research primarily aims to assess the sensitivity of WRF numerical system to the physical parameterization of convection, boundary layer, and microphysics segments. It seeks to identify the optimal configuration for the study area to accurately simulate heavy rainfall events leading to floods and to evaluate the model's performance in predicting rainfall at 6, 12, and 24-hour time steps. The WRF model is established using two nested domains with a scaling ratio of 1 to 3. Findings indicated that alterations in the convection and boundary layer configurations result in the most substantial differences between simulated and observed precipitation. Hence, selecting appropriate physical parameterization for convection and boundary layer outweighs the significance of microphysics. Evaluation across various time steps suggested that the model's daily predictions can be utilized with higher confidence levels. Additionally, for the Poldokhtar basin, the combination of WDM5, Grell 3D, and Asymmetrical Convective Model v2 schemes respectively for microphysics, convection, and boundary layer sections, exhibited superior performance in precipitation simulation. Based on the results, this configuration is advisable for future studies aiming to simulate and predict heavy rainfall-induced floods.

Keywords: WRF Numerical System, Physical Parameterization, Precipitation, Uncertainty.

Received: March 20, 2024

Accepted: May 28, 2024

تعیین مناسب‌ترین طرح‌واره فیزیکی مدل عددی پیش‌بینی WRF و عدم قطعیت ناشی از آن برای شبیه‌سازی بارش‌های سیلابی

سکینه کوهی^۱، اصغر عزیزیان^{۲*} و محمد سعید نجفی^۳

چکیده

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 است. علاوه بر این، انتخاب طرح‌واره‌ها برای سامانه عددی WRF از تأثیر قابل‌توجهی بر نتایج پیش‌بینی برخوردار است. هدف اصلی از انجام این مطالعه حساسیت‌سنجی سامانه عددی WRF نسبت به پارامترسازی فیزیکی بخش‌های همرفت، لایه مرزی و میکروفیزیک و معرفی پیکربندی برتر برای منطقه مطالعاتی و شبیه‌سازی بارش‌های سنگین منتج به سیلاب و همچنین بررسی عملکرد مدل در پیش‌بینی بارش در گام‌های زمانی ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعته است. از دو دامنه تودرتو با نسبت ریزمقیاس شدن ۱ به ۳ برای تنظیم مدل WRF استفاده شده است. نتایج نشان داد که دامنه تغییرات خروجی‌های مدل نسبت به ایجاد تغییر در پیکربندی بخش‌های همرفت و لایه مرزی دارای بیشترین اختلاف در بارش شبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر مشاهده‌ای است. بنابراین پارامترسازی فیزیکی مناسب برای بخش‌های همرفت و لایه مرزی از اهمیت بیشتری نسبت به بخش میکروفیزیک برخوردار است. همچنین، ارزیابی عملکرد مدل در گام‌های زمانی مختلف حاکی از آن است که می‌توان از پیش‌بینی‌های این مدل در گام زمانی روزانه با حاشیه اطمینان بالاتری بهره برد. همچنین، در محدوده حوضه پلدختر، پیکربندی متشکل از طرح‌واره‌های WDM5، Grell 3D و Asymmetrical Convective Model v2 برای بخش‌های میکروفیزیک، همرفت و لایه مرزی را می‌توان به عنوان پیکربندی برتر و دارای بهترین کارایی در شبیه‌سازی بارش معرفی نمود. بنابراین برای انجام مطالعات آتی با هدف شبیه‌سازی و پیش‌بینی بارش‌های سنگین و منتج به سیلاب استفاده از پیکربندی مذکور توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی: سامانه عددی WRF، پارامترسازی فیزیکی، بارش، عدم قطعیت.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۲/۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۳/۸

1- Ph.D. Student, Water Engineering Department., Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2- Associate Professor, Water Engineering Department., Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. Email: azizian@eng.ikiu.ac.ir

3- Assistant Professor, Water Resources Research (WRR) Department, Water Research Institute (WRI), Ministry of Energy, Tehran, Iran. Email: m.s.najafi@ut.ac.ir

*- Corresponding Author

Doi: [10.22034/IWRR.2024.453356.2754](https://doi.org/10.22034/IWRR.2024.453356.2754)

۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۳- استادیار پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۴۰۳ امکان‌پذیر است.



دیگر توسعه مدل WRF و طرح‌واره‌های مختلف منجر شده است تا انتخاب ترکیب بهینه از طرح‌واره‌ها برای محققین روز به روز دشوارتر شود.

مطالعات و پژوهش‌های مختلفی نیز در سراسر جهان با هدف تعیین حساسیت مدل WRF نسبت به طرح‌واره‌های مختلف انجام شده است. به عنوان مثال، (Kaewmesri et al., 2017) به تحلیل حساسیت مدل WRF نسبت به ۵ طرح‌واره مختلف از لایه میکروفیزیک (شامل: WSM6 و WSM5، WSM3، Lin، Kessler) در پیش‌بینی بارش حدی نسبت به مقادیر بارش ایستگاه‌های هواشناسی و همچنین پایگاه TRMM پرداختند. نتایج نشان داد که طرح‌واره Lin و همچنین میانگین‌گیری گروهی از عملکرد بهتری در شبیه‌سازی بارش نسبت به مقادیر مشاهداتی و داده‌های TRMM برخوردار هستند. (Moradian et al., 2020) با توسعه یک سامانه همدادی چندفیزیکی به بررسی عملکرد مدل WRF در شبیه‌سازی بارش در مناطق مرکزی ایران پرداختند. این سامانه با ۸۴ عضو متشکل از دو طرح‌واره لایه مرزی، شش طرح‌واره همرفتی و هفت طرح‌واره میکروفیزیک و با تشکیل سه دامنه تو در تو در توان تفکیک مکانی ۴، ۱۲ و ۳۶ کیلومتر اجرا شد. براساس نتایج تفکیک افقی ۴ کیلومتر به عنوان تفکیک افقی بهینه با در نظر گرفتن حجم و زمان محاسبات معرفی شد. همچنین، این مدل دارای مهارت قابل قبولی در شبیه‌سازی عدم رخداد بارش و بارش‌های بین ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر است. (Moradi et al., 2020) با بررسی تأثیر پارامترسازی فیزیکی در مدل عددی WRF برای شبیه‌سازی بارش‌های زمستانی در محدوده شمال غرب ایران نشان دادند که پیکربندی متشکل از طرح‌واره‌های Lin، Eta-similarity، MYJ، RRTM و Dudhia از عملکرد بهتری در پیش‌بینی بارش‌های زمستانه برخوردار بوده است. همچنین، (Gómez et al., 2021) به بررسی عملکرد طرح‌واره‌های فیزیکی مختلف در شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی شامل فشار متوسط سطح دریا، جهت و سرعت باد در اقیانوس آرام جنوبی پرداختند. بررسی ۳۶ ترکیب مختلف از طرح‌واره‌های فیزیکی نشان داد لایه همرفت، لایه مرزی و سطحی از نقشی اساسی در توصیف مسیر و شدت متغیرهای هواشناسی مذکور برخوردار هستند، درحالی‌که لایه میکروفیزیک تأثیر کمتری در شبیه‌سازی این متغیرها دارد. از سوی دیگر، لایه‌های مربوط به تابش امواج بلند و کوتاه نقش قابل توجهی در تخمین متغیرهای هواشناسی نداشتند. (Umer et al., 2021) عملکرد سامانه عددی پیش‌بینی آب و هوا (WRF) را در شبیه‌سازی یک رخداد بارش با استفاده از ۲۴ ترکیب مختلف از طرح‌واره لایه‌های میکروفیزیک، همرفت و لایه مرزی در حوضه کامپالا را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که کارایی مدل در تولید بارش‌های استوایی با شدت بالا به ترکیب‌های انتخابی برای پارامترسازی فیزیکی مدل وابسته است. (Vemuri et

در دهه‌های اخیر فراوانی وقوع سیلاب به دلایلی از جمله تغییرات اقلیمی، مدیریت ضعیف حوضه‌ها، تغییر کاربری اراضی، گسترش شهرنشینی، انجام فعالیت‌های اقتصادی در مناطق مستعد سیلاب و جنگل‌زدایی افزایش یافته است (Rincon et al., 2022). لازم به ذکر است که انجام اقدامات سازه‌ای یا غیرسازه‌ای همچون پیش‌بینی سیلاب برای کاهش خسارات ناشی از سیلاب ضروری است. از سوی دیگر متغیرهای هواشناسی از جمله بارش باران نیز یکی از عوامل مهم در شکل‌گیری سیلاب بشمار می‌رود که پیش‌بینی آن می‌تواند منجر به انجام پیش‌بینی (نزدیک و میان‌مدت) از میزان سیلاب شده و در نتیجه زمینه لازم را برای مدیریت، کنترل و کاهش خسارات ناشی از سیل فراهم آورد (Tomasella et al., 2018).

تاکنون روش‌های مختلفی با هدف ارائه پیش‌بینی از مقدار بارش توسعه یافته است. در دهه‌های اخیر مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا با استقبال قابل توجه محققین برای پیش‌بینی مقدار بارش مواجه شده‌اند. یکی از اهداف اصلی از توسعه مدل‌های عددی هواشناسی، پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی همچون بارش است و می‌توان از خروجی آن‌ها برای مقاصد از جمله پیش‌بینی سیل استفاده نمود. استفاده از مدل‌های عددی پیش‌بینی هواشناسی برای پیش‌بینی بارش می‌تواند زمان پیش‌هشدار مربوط به سیلاب‌های خطرناک و آسیب‌زا را نیز افزایش دهد (Anderson et al., 2002; Cloke and Pappenberger, 2009). این مدل‌ها مبتنی بر اصول پایستگی جرم، تکانه، انرژی و حل معادلات ترمودینامیک و دینامیک توسط روش‌های عددی هستند که به شبیه‌سازی متغیرهای جوی در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف می‌پردازند (Trenberth, 1992). مدل عددی پیش‌بینی هواشناسی WRF¹ از اولین مدل‌های پیش‌بینی جوی محلی است که علاوه بر ارائه پیش‌بینی‌های کاربردی، نیازهای تحقیقاتی محققان را نیز برآورده می‌سازد. این مدل حاصل تلاش گروهی از دانشمندان در مؤسسات تحقیقاتی و دانشگاه‌های مختلف است (Michalakes et al., 2001; Skamarock et al., 2005). هدف اصلی مدل، ارائه پیش‌بینی‌های جوی در توان تفکیک ۱ تا ۱۰ کیلومتر است، هرچند می‌تواند در توان تفکیک مکانی پایین‌تر نیز مورد اجرا قرار بگیرد. برای شبیه‌سازی اتمسفر و فرآیندهای جوی در مدل WRF، اتمسفر به ۵ بخش شامل همرفت، میکروفیزیک، تابش، سطح و لایه مرزی جو تقسیم شده است. پارامترسازی هرکدام از این بخش‌ها توسط معادلات متفاوتی قابل انجام است. به عبارت بهتر برای هر کدام از بخش‌ها، معادلات متفاوتی توسعه داده شده و با نام طرح‌واره در اختیار قرار دارد. لازم بذکر است که انواع این طرح‌واره‌ها ساختار و پیچیدگی‌های ویژه خود را دارند و می‌توانند تأثیر بزرگی بر شبیه‌سازی‌ها داشته باشند. از طرف

بررسی مطالعات انجام شده در این زمینه حاکی از آن است که انتخاب بهینه طرح‌واره‌ها در مدل WRF برای یک شبیه‌سازی مناسب، به شدت به هدف مدل‌سازی (متغیر مورد مدل‌سازی) و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد نظر وابسته است. در مطالعات متعددی حساسیت مدل WRF نسبت به پارامترسازی‌های فیزیکی مختلف ارزیابی شده و نشان داده شده است که هیچ ترکیب بهینه‌ای برای تمامی رخدادهای و مناطق وجود ندارد. این امر می‌تواند ناشی از پیچیدگی ساختارهای جوی و شرایط متغیر اقلیمی باشد. از سوی دیگر، با توجه به تعداد بالای طرح‌واره‌های ارائه شده برای هر بخش، ترکیب‌های مختلفی از آن‌ها برای تنظیم مدل امکان‌پذیر است. همچنین این نکته لازم بذکر است که در کمتر تحقیقی ارزیابی نسبتاً جامعی بر پیکربندی‌های مختلف WRF انجام شده است. با توجه به زمان بالای اجرای مدل WRF، تعیین ترکیب بهینه از طرح‌واره‌های مذکور به منظور رسیدن به بهترین نتیجه حائز اهمیت است. از همین روی، بررسی عملکرد ترکیب‌های مختلف از طرح‌واره‌های فیزیکی در شبیه‌سازی بارش و تعیین ترکیب بهینه از طرح‌واره‌های فیزیکی از اهمیت بالایی در مطالعات مبتنی بر سامانه عددی WRF برخوردار است. به همین دلیل، مطالعات در این زمینه، نیازمند تمرکز بر ترکیب مناسب از طرح‌واره‌ها برای یک منطقه و متغیر خاص هستند. در همین راستا، هدف از انجام این پژوهش، تعیین پیکربندی فیزیکی مناسب برای کاربرد مدل WRF در محدوده غرب کشور ایران (حوضه سیل‌خیز پلدختر) با هدف پیش‌بینی بارش‌های سنگین منتج به سیل است. این تمرکز محلی می‌تواند منجر به بهبود دقت در شبیه‌سازی‌ها و ارائه توصیه‌های کاربردی برای مدیریت سیلاب در این منطقه شود. بنابراین، نتایج این تحقیق می‌تواند به عنوان یک راهنمای عملی برای استفاده از مدل WRF در شبیه‌سازی و پیش‌بینی بارش‌های شدید و سیلابی در مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

براساس پژوهش انجام شده در سازمان هواشناسی کشور در سال ۱۳۹۷، استان لرستان پس از استان‌های گیلان، کهگیلویه و بویراحمد و ایلام چهارمین استان پر بارش کشور بوده است (NDMO, 2018). حوضه پلدختر به عنوان حوضه مورد مطالعه در این پژوهش انتخاب شده است. موقعیت جغرافیایی این حوضه در عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۷ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۵۵ دقیقه شمالی و طول ۴۷ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۴۳ دقیقه شرقی واقع شده است. مساحت حوضه مورد مطالعه ۲۰۳۶ کیلومتر مربع است و محدوده تغییرات ارتفاعی در سطح حوضه ۵۲۷ تا ۲۹۸۰ متر است. در این مطالعه از اطلاعات ثبت شده در ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در داخل و خارج از مرز این حوضه

al. (2022) با تحلیل حساسیت عملکرد مدل در شبیه‌سازی جهت و سرعت باد مربوط به سه رویداد شدید آب و هوایی شامل طوفان سیاره، یک سیستم کم فشار و یک جبهه سرد نشان دادند که ترکیب بهینه‌ای از طرح‌واره‌های فیزیکی برای شبیه‌سازی دقیق همه رخدادهای وجود ندارد و مدل از حساسیت بالایی نسبت به ترکیب‌های مختلف از پارامترهای فیزیکی برخوردار است. همچنین کاربرد ترکیب صحیحی از طرح‌واره‌ها به شدت به نوع رخداد مورد شبیه‌سازی وابسته است. همچنین Alizadeh et al. (2022) با کاربرد روشی مبتنی بر استفاده از یک منحنی سیگموئیدی به تصحیح پیش‌بینی‌های ۶، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ساعته بارش مدل WRF در تهران و گلستان پرداختند. نتایج نشان داد که روش توسعه یافته با بهبود پیش‌بینی‌های WRF همراه بوده است. Samal and Jha (2022) با بررسی سه رویکرد مختلف برای تصحیح اریبی خروجی‌های مدل عددی WRF نشان دادند که روش نگاشت چندک به‌طور قابل‌توجهی بر کاهش اریبی داده‌ها مؤثر است. Mekawy et al. (2023) به بررسی تأثیر طرح‌واره‌های مختلف لایه میکروفیزیک بر الگوی بارش شدیدی که مارس ۲۰۲۰ مصر را تحت تأثیر قرار داد، پرداختند. در این تحقیق عملکرد ۶ طرح میکروفیزیک شامل Lin, WSM6, Goddard, Thompson, Morrison و NSSL2C نسبت به ۴ پایگاه سنجش از دوری (CMORPH, PERSIANN, PERSIANN-CCS و ERA5) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که طرح‌واره‌های Lin و Thompson به ترتیب دارای برترین و ضعیف‌ترین عملکرد در پیش‌بینی بارش هستند. Yazdanpanah et al. (2023) با ارزیابی مدل برای پیش‌بینی ۴ رخداد بارش شدید در حوضه ابوالعباس واقع در استان خوزستان و براساس سه طرح‌واره (Lin, WSM6 و Thompson) برای لایه میکروفیزیک نشان دادند که هر سه طرح‌واره‌ی مذکور از عملکرد مشابهی در شبیه‌سازی بارش در منطقه مطالعاتی برخوردار بوده‌اند. Najafi et al. (2023) با حساسیت‌سنجی مدل WRF نسبت به طرح‌واره‌های مختلف خردفیزیک، لایه مرزی، تابش طول موج کوتاه و بلند، لایه سطحی و همرفت در پیش‌بینی بارش در یک منطقه خشک و نیمه‌خشک (استان اصفهان) نشان دادند که مهم‌ترین طرح‌واره در پیش‌بینی بارش، تعیین طرح‌واره مناسب برای لایه میکروفیزیک است. هرچند انتخاب طرح‌واره‌های مناسب برای بخش‌های تابش طول موج کوتاه و بلند و لایه سطحی نیز می‌تواند دقت پیش‌بینی بارش را در دامنه دوم افزایش دهد. در تحقیق مذکور طرح‌واره‌های Revised TiedTKE, NSSL, RRTMG, Dudhia, Monin-Obokhovt و BouLac به عنوان طرح‌واره‌های برتر به ترتیب برای لایه سطحی، طول موج کوتاه و بلند، میکروفیزیک، همرفت و لایه مرزی در منطقه مطالعاتی معرفی شدند.

ایستگاه هیدرومتری پلدختر واقع در خروجی حوضه و اعلام وقوع خسارت ناشی از سیلاب در منطقه است. در جدول ۱ مقدار بارش بیشینه بارش و دبی روزانه در رخدادهاى مورد مطالعه ارائه شده است. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و تغییرات ارتفاعی حوضه پلدختر به همراه موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک نشان داده شده است.

برای ارزیابی خروجی‌های عددی هواشناسی استفاده شده است. لازم بذکر است که ۴ رخداد بارشی منتج به سیلاب در حوضه پلدختر (شامل: ۰۰:۰۰ ۲۰۱۸/۱۱/۲۳، ۰۰:۰۰ ۲۰۱۶/۰۴/۱۶ تا ۰۰:۰۰ ۲۰۱۶/۰۴/۱۲ تا ۱۸:۰۰ ۲۰۱۹/۰۳/۲۷ تا ۰۰:۰۰ ۲۰۱۹/۰۳/۲۴، ۱۸:۰۰ ۲۰۱۸/۱۱/۲۶ و ۰۰:۰۰ ۲۰۱۹/۰۳/۳۱ تا ۰۰:۰۰ ۲۰۱۹/۰۴/۰۲) مبنای ارزیابی کارایی مدل WRF در این مطالعه قرار گرفتند. ملاک انتخاب وقایع بارشی منتج به سیلاب، اعلام وقوع سیلاب، ثبت مقدار دبی اوج ساعتی در

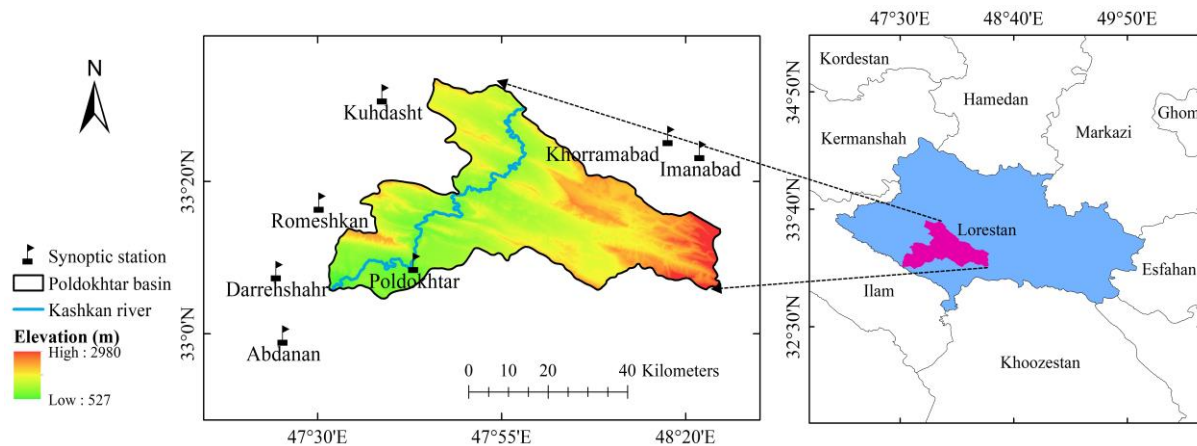


Fig. 1- The study area and the location of synoptic stations studied in this research

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه در این پژوهش

Table 1- The peak of discharge and precipitation in the studied events

جدول ۱- بیشینه بارش و دبی در رخدادهاى مورد مطالعه

Station	2016	2018	2019_1	2019_2
Pr_Imanabad [mm]	96.5	25.5	117.0	91.4
Pr_Abdanan [mm]	130.0	23.0	51.2	77.7
Pr_Romeshkan [mm]	99.8	25.5	50.2	90.7
Pr_Khorramabad [mm]	94.0	28.3	66.0	85.4
Pr_Poldokhtar [mm]	73.3	24.0	74.6	78.1
Pr_Kuhdasht [mm]	76.4	24.8	57.5	84.3
Pr_Darrehshahr [mm]	69.1	23.7	47.0	64.9
Qpeak_Poldokhtar [m ³ /s]	1784	698	2597	6126

۲-۲- سامانه عددی WRF

مدل WRF از هسته‌های دینامیکی چندگانه، سیستم داده‌گذاری سه‌بعدی و متغیر برای داده‌ها تشکیل شده است که امکان انجام محاسبات موازی و توسعه سیستم را فراهم می‌آورد. این مدل برای اجرای شبیه‌سازی پهنگام و در توان تفکیک بالا به مجموعه‌ای از مؤلفه‌های فیزیکی و پارامتره نمودن لایه مرزی نیازمند است. پس از تنظیم مدل برای منطقه مورد مطالعه می‌توان به پیش‌بینی پارامتر بارش در توان تفکیک مکانی بالا پرداخت. مطالعات و پژوهش‌های مختلفی در سراسر جهان جهت تعیین حساسیت مدل WRF نسبت به بخش‌های مختلف انجام شده است. براساس این مطالعات، اغلب سه بخش خردفیزیکی، لایه مرزی و همرفت بیشترین تأثیر را در شبیه‌سازی بارش داشته‌اند (Jankov et al., 2011; Madala et al., 2014; Pennelly et al., 2014). از سوی دیگر هر یک از این سه بخش خود شامل طرح‌واره‌های مختلفی برای پارامترسازی هستند. بررسی مطالعات انجام شده در زمینه شبیه‌سازی بارش توسط مدل WRF نشان داد که تعدادی از طرح‌واره‌های موجود، از کاربرد و تأثیرگذاری بیشتری برای شبیه‌سازی بارش برخوردار هستند که مبنای این مطالعه نیز قرار گرفتند (Deng et al., 2023; Garcia et al., 2023; Kaewmesri et al., 2017; Moradian et al., 2020; Umer et al., 2021; Yazdanpanah Gharaei et al., 2023). مجموع ۱۱ طرح‌واره برای بخش خردفیزیکی، ۴ طرح‌واره برای لایه همرفت و ۳ طرح‌واره برای لایه مرزی در این مطالعه در نظر گرفته شد که در جدول ۲ ارائه شده است.

بنابراین ۱۳۲ پیکربندی مختلف از طرح‌واره‌ها برای اجرای مدل WRF مورد بررسی قرار گرفت. این نکته لازم بذکر است که برخی از طرح‌واره‌ها با یکدیگر تناسب نداشته و در صورت انتخاب با یکدیگر، خروجی توسط مدل WRF تولید نمی‌شود. در این تحقیق نیز پس از بررسی ۱۳۲ پیکربندی فوق مشخص شد که ۸۷ پیکربندی از موارد مورد بررسی منجر به شبیه‌سازی بارش می‌شوند. بررسی عملکرد پیکربندی‌های مختلف با در نظر گرفتن دو دامنه تودرتو برای مدل‌سازی صورت گرفته است. نسبت ریزمقیاس شدن دامنه‌ها نسبت به یکدیگر ۳ به ۱ بوده است، به این ترتیب تفکیک افقی دامنه اصلی

Table 2- Selected schemas for the WRF's physical schemes model and their abbreviations in this study
جدول ۲- طرح‌واره‌های منتخب برای سه بخش از مدل WRF به همراه نام اختصاری آن‌ها در این مطالعه

Row	Microphysics	Cumulus convection	Boundary layer
1	Kessler (K)	Kain-Fritsch (KF)	YSU scheme (YSU)
2	Lin (L)	Betts-Miller-Janjic (BMJ)	ACM2
3	WSM 3-class (WSM3)	Grell-Freitas (GF)	Bougeault and Lacarrere (BL)
4	WSM 5-class (WSM5)	Grell 3D ensemble (G3D)	
5	Eta Ferrier (EF)		
6	WSM 6-class (WSM6)		
7	Morrison 2 moment (M2)		
8	Thompson (T)		
9	SBU_YLIN (SBUY)		
10	WDM 5-class (WDM5)		
11	WDM 6-class (WDM6)		

(اول) ۱۵ کیلومتر و زیردامنه (دامنه دوم) ۵ کیلومتر در نظر گرفته شده است. لازم بذکر است که مبنای انتخاب دامنه‌های محاسباتی در این تحقیق، پوشش مناسب منطقه مطالعاتی و شرایط مرزی، استفاده بهینه از داده‌های جوی معتبر و مدیریت زمان و منابع محاسباتی بوده است. همچنین، از داده‌های FNL به عنوان شرایط مرزی و اولیه بهره برده شده است. مجموعه داده‌های FNL یک مجموعه مهمی از اطلاعات است که توسط مرکز ملی پیش‌بینی هواشناسی NCEP در ایالات متحده آمریکا تولید می‌شوند. این داده‌ها به‌طور معمول به عنوان "Final Analysis" یا FNL شناخته می‌شوند که به معنای آن است

بنابراین ۱۳۲ پیکربندی مختلف از طرح‌واره‌ها برای اجرای مدل WRF مورد بررسی قرار گرفت. این نکته لازم بذکر است که برخی از طرح‌واره‌ها با یکدیگر تناسب نداشته و در صورت انتخاب با یکدیگر، خروجی توسط مدل WRF تولید نمی‌شود. در این تحقیق نیز پس از بررسی ۱۳۲ پیکربندی فوق مشخص شد که ۸۷ پیکربندی از موارد مورد بررسی منجر به شبیه‌سازی بارش می‌شوند. بررسی عملکرد پیکربندی‌های مختلف با در نظر گرفتن دو دامنه تودرتو برای مدل‌سازی صورت گرفته است. نسبت ریزمقیاس شدن دامنه‌ها نسبت به یکدیگر ۳ به ۱ بوده است، به این ترتیب تفکیک افقی دامنه اصلی

توان تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه و با گام زمانی ۶ ساعته در دسترس قرار دارند. در شکل ۲ نمایی از دامنه‌های محاسباتی در نظر گرفته شده برای مدل WRF در این مطالعه نشان داده شده است.

که از تمام اطلاعات هواشناسی در اختیار NCEP استفاده می‌شود تا تصویر جامعی از وضعیت جوی در یک مکان و زمان خاص ارائه شود. این مجموعه داده یکی از منابع اصلی برای تحقیقات هواشناسی و مطالعات مرتبط با علوم زمین به‌شمار می‌رود که در پیش‌بینی تغییرات جوی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این داده‌ها از سال ۲۰۱۵ به بعد با

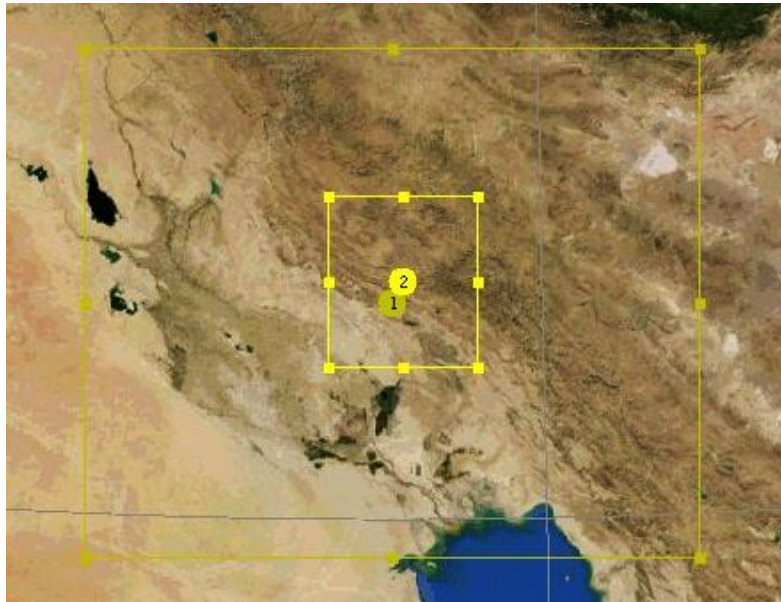


Fig. 2- The computational domains for the WRF model in this study
شکل ۲- دامنه‌های محاسباتی در نظر گرفته شده برای مدل WRF در این مطالعه

و جدولی شامل FAR و POD استفاده بعمل آمده است. در جدول ۳ روش محاسبه هر یک از شاخص‌ها شرح داده شده است.

۲-۳- شاخص‌های ارزیابی

در این پژوهش برای ارزیابی مقادیر بارش پیش‌بینی شده نسبت به مقادیر مشاهداتی از شاخص‌های آماری: CC, RMSE و NRMSE

Table 3- Statistical and tabular metrics used in this research

جدول ۳- شاخص‌های آماری و جدولی مورد استفاده در این پژوهش

Index	Equation	Optimal value	Reference
Statistical metrics	$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) (S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}}$	1	(Pearson, 1896)
	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}$	0	(Hyndman and Koehler, 2006)

Index	Equation	Optimal value	Reference
	$NRMSE = \frac{RMSE}{\sigma_0}$	0	(Stanski et al., 1989)
	$ARE = \frac{S_i - O_i}{O_i} \times 100$	0	(Stanski et al., 1989)
Tabular metrics	$FAR = \frac{C}{A + C}$	0	(Panofsky and Brier, 1965)
	$POD = \frac{A}{A + B}$	1	(Panofsky and Brier, 1965)

$$D_{(S,S_0)} = \sqrt{\frac{(CC - CC_0)^2 + (NRMSE - NRMSE_0)^2 + (POD - POD_0)^2 + (FAR - FAR_0)^2}{1 + D_{(S,S_0)}}} \quad (1)$$

$$Similarity = \frac{1}{1 + D_{(S,S_0)}} \quad (2)$$

در نهایت مقادیر شاخص شباهت از بزرگ به کوچک مرتب شد و اجراهای مربوط به چارک اول (۲۲ اجرای با مقدار شاخص شباهت بزرگتر) به عنوان شبیه‌سازی‌های برتر از سایر اجراها تفکیک شدند. در نهایت باند عدم قطعیت و میانگین شبیه‌سازی‌های برتر براساس خروجی‌های مربوط به ۲۲ اجرای برتر محاسبه شد.

۲-۴- تحلیل عدم قطعیت

در این پژوهش از روش ناپارامتری بوت‌استرپ^۳ برای تشکیل باند اطمینان و بررسی عدم قطعیت مدل عددی WRF استفاده شده است. از برتری‌های روش ناپارامتری نسبت روش‌های پارامتری، عدم نیاز به پیروی داده‌های اصلی از توزیع نرمال است. بوت‌استرپ از جمله روش‌های زیرمجموعه روش مونت‌کارلو و مبتنی بر تولید داده‌های تصادفی به شمار می‌رود (Dehghani, 2009; Efron and Tibshirani, 1993). Ader et al. (2008) روش بوت‌استرپ را برای کاربرد در ۲ موقعیت توصیه نمودند که هر دو مورد مذکور در پژوهش حاضر صدق می‌کند:

- ۱- در زمانی که توزیع جامعه اصلی ناشناخته است؛
 - ۲- در مواقعی که اندازه جامعه اصلی برای استنباط آماری ناکافی است؛
- مراحل تشکیل باند اطمینان به روش بوت‌استرپ به ترتیب زیر است: در گام اول تعداد N نمونه از مجموعه اصلی داده‌ها به‌طور تصادفی و همراه با جایگذاری انتخاب می‌شود. در گام بعدی برآوردگر بوت‌استرپ یا پارامتر تتا برای مجموعه نمونه‌های ایجاد شده، مورد محاسبه قرار

که در این معادلات O_i : مقادیر مشاهداتی، S_i : مقادیر شبیه‌سازی، n: تعداد داده‌ها، \bar{O} : میانگین مقادیر مشاهداتی، \bar{S} : میانگین مقادیر شبیه‌سازی، σ_0 : انحراف از معیار مقادیر مشاهداتی هستند. 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.

همانطور که پیش‌تر نیز عنوان شد در این پژوهش از ۸۷ پیکربندی مختلف برای اجرای مدل عددی WRF استفاده شده است. از آنجایی که تفکیک اجراهای برتر و همچنین پیکربندی منتخب از سایر اجراها صرفاً براساس یک آماره دشوار است، در پژوهش حاضر، از مفهومی به نام فاصله اقلیدسی^۲ استفاده شد. با استفاده از فاصله اقلیدسی کوتاه‌ترین فاصله بین دو نقطه در یک فضای چندبعدی قابل محاسبه است (Van Cooten et al., 2009). برای ارزیابی کمی و نسبتاً جامع از عملکرد مدل عددی WRF و پیکربندی‌های مختلف، دو شاخص آماری (NRMSE, CC) و دو شاخص جدولی (FAR, POD) مبنای محاسبه فاصله اقلیدسی قرار گرفت (S (CC, [NRMSE, POD, FAR]). به این ترتیب فاصله اقلیدسی بین هر بردار S شامل ۴ شاخص مذکور و بردار مربوط به مقدار بهینه‌ی شاخص‌ها [So (1,0,1,0)] با استفاده از رابطه (۳-۱) محاسبه شد. سپس مقدار شاخص شباهت براساس فاصله اقلیدسی و با استفاده از رابطه (۳-۲) مورد محاسبه قرار گرفته است. بدین ترتیب محدوده تغییرات شاخص شباهت بین صفر تا ۱ متغیر است و هرچه فاصله بین دو بردار کوچکتر و شاخص شباهت بزرگتر باشد به معنای شباهت بیشتر شبیه‌سازی‌ها با مقادیر مشاهداتی است.

می‌گیرد. سپس با تکرار B بار مراحل قبل، مجموعه‌ای شامل B عضو از مقادیر برآوردگرهای بوت‌استرپ موجود است. در نهایت، کران‌های بالا و پایین براساس چندک ۵ و ۹۵ درصد به عنوان فاصله اطمینان برآورد می‌شود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تحلیل حساسیت عملکرد مدل WRF نسبت به طرح‌واره‌های فیزیکی

در این پژوهش، در گام اول به تحلیل حساسیت عملکرد مدل عددی WRF نسبت به سه بخش میکروفیزیک، همرفت و لایه مرزی پرداخته شده است. انتخاب پیکربندی‌های مورد استفاده برای تحلیل حساسیت عملکرد مدل نسبت به هر بخش (میکروفیزیک، همرفت و لایه مرزی) به این صورت بوده است که طرح‌واره‌ی انتخابی برای بخش مورد نظر متغیر و طرح‌واره دو بخش دیگر ثابت در نظر گرفته شده است تا صرفاً تغییرات همان بخش بر عملکرد مدل بررسی شود. در شکل ۳ نمودار جعبه‌ای مقدار قدرمطلق خطای نسبی متعلق به کاربرد پیکربندی‌های مختلف به تفکیک هر بخش (میکروفیزیک، لایه مرزی و همرفت) برای هر رخداد و ایستگاه مورد مطالعه ارائه شده است. همانطور که مشخص است دامنه تغییرات خروجی‌های مربوط به ایجاد تغییر در پیکربندی بخش همرفت از بیشترین اختلاف با مقادیر بارش مشاهده‌ای برخوردار بوده است. پس از بخش همرفت، ایجاد تغییر در پیکربندی لایه مرزی منجر به بیشترین اختلاف در بارش شبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر مشاهده‌ای شده است. با توجه به نتایج مشخص است که دامنه تغییرات مربوط به قدر مطلق خطای نسبی با ایجاد تغییر در پیکربندی بخش میکروفیزیک در تعداد بیشتری از ایستگاه‌ها (شامل آبدانان، رومشکان، خرم‌آباد، کوه‌دشت، پلدختر و دره‌شهر) و رخدادهای کمتر از دو بخش دیگر بوده است. براساس نتایج، متوسط قدر مطلق خطای نسبی در سطح ایستگاه‌های مطالعاتی در رخدادهای ۲۰۱۹ برای بخش‌های همرفت، لایه مرزی و میکروفیزیک به ترتیب برابر است با ۶۱/۴۵، ۵۸/۱۹ و ۵۳/۸۴، برای رخدادهای ۲۰۱۸ به ترتیب ۴۲/۴۶، ۳۵/۳۰ و ۳۱/۹۳ و برای رخدادهای ۲۰۱۶، ۴۷/۶۲، ۴۶/۸۴ و ۴۷/۰۰ تخمین زده شده است. بنابراین با توجه به نتایج می‌توان بیان نمود که بیشترین تأثیر در نتایج مدل می‌تواند مربوط به انتخاب طرح‌واره‌های بخش همرفت و پس از آن لایه مرزی باشد. بخش

میکروفیزیک فرآیندهای مربوط به بخار آب، ابر و بارش را حل می‌نماید. درحالی‌که در بخش همرفت به پدیده‌های نظیر شکل‌گیری ابرها، جریانات عمودی اطراف ابرها، جریان به سمت خارج از ابرها پرداخته می‌شود. همچنین، بخش لایه مرزی جریان‌های عمودی را نه تنها در لایه مرزی بلکه در تمام اتمسفر در نظر می‌گیرد. با توجه به نتایج می‌توان چنین عنوان نمود که تعیین نسبتاً دقیق‌تر نحوه شکل‌گیری ابرها، جریانات عمودی در لایه مرزی و اتمسفر از تأثیر بیشتری بر نتایج شبیه‌سازی‌های مدل عددی WRF برخوردار خواهد بود. بنابراین لازم است تا در انتخاب پیکربندی مناسب برای بخش‌های همرفت و لایه مرزی دقت بیشتری صورت پذیرد. در همین راستا، در مطالعه‌ای که توسط Moradi et al. (2020) با هدف بررسی عملکرد طرح‌واره‌های مختلف مدل WRF برای شبیه‌سازی یک رخداد بارش زمستانی در منطقه شمال غرب ایران به انجام رسید نشان داده شد که شبیه‌سازی بارش توسط این مدل عددی به طرح‌واره‌های لایه مرزی وابستگی زیادی دارد. اما در مطالعه‌ای که توسط Najafi et al. (2023) با هدف حساسیت‌سنجی مدل WRF نسبت به پارامترسازی فیزیکی در منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک (استان اصفهان) به انجام رسید نشان داده است که انتخاب طرح‌واره مناسب برای میکروفیزیک از اهمیت بیشتری نسبت به سایر موارد برای پیش‌بینی بارش‌های سنگین برخوردار است. بنابراین می‌توان چنین عنوان نمود که علاوه بر انتخاب طرح‌واره برای یک شبیه‌سازی مناسب، میزان حساسیت مدل نسبت به پارامترسازی فیزیکی نیز به شدت تحت تأثیر اقلیم منطقه مورد مطالعه قرار داشته و لازم است مطالعات در این زمینه نیز به صورت منطقه‌ای انجام شوند.

همچنین با توجه به شکل ۳ مشخص است که کاربرد پیکربندی‌های مختلف از مدل WRF به‌طور کلی با بیش‌برآورد در شبیه‌سازی بارش همراه بوده است، به‌طوری‌که مقدار قدرمطلق خطای نسبی همواره مثبت است. محدوده پلدختر به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود، تحت تأثیر توپوگرافی کوهستانی و جریان‌های جوی محلی قرار دارد. مدل WRF ممکن است در بازنمایی دقیق این ویژگی‌ها، به‌خصوص جریان‌های صعودی که منجر به افزایش تراکم ابرها و بارش می‌شوند، دچار خطا شود. این مسئله می‌تواند به بیش‌برآورد بارش توسط مدل در منطقه منجر شده باشد.

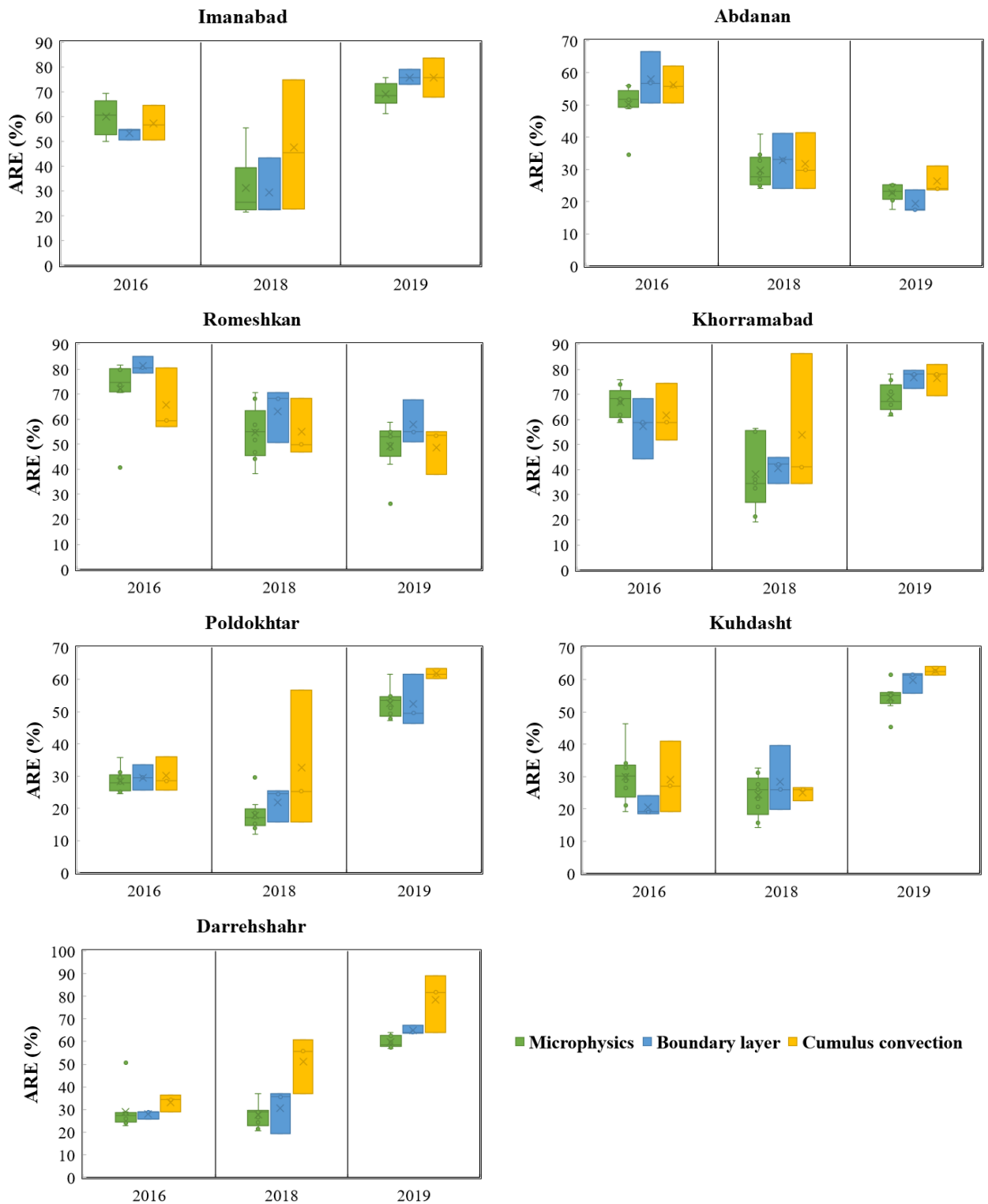
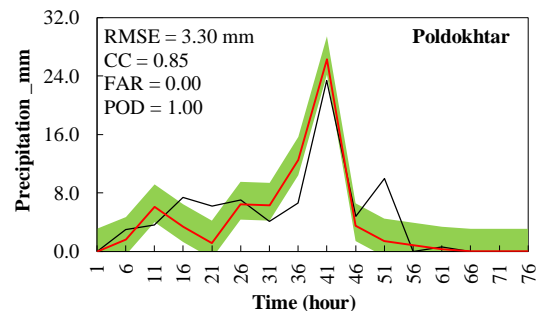
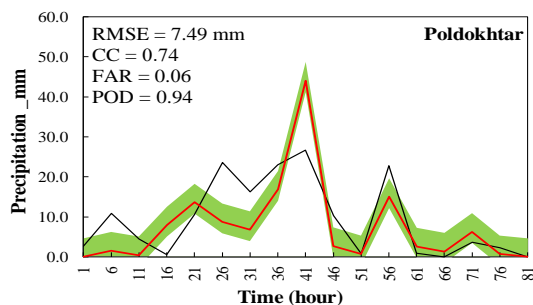
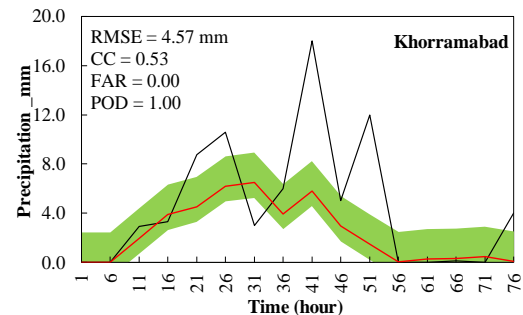
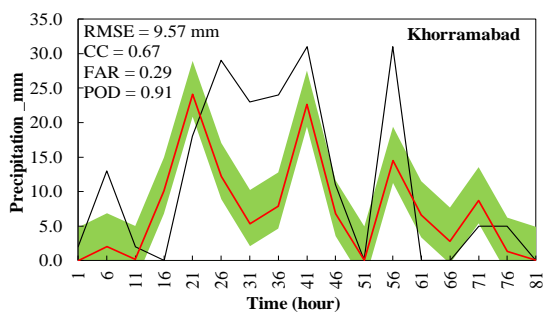


Fig. 3- The Boxplot of the ARE in the simulation of cumulative precipitation for the stations
 شکل ۳- نمودار جعبه‌ای قدر مطلق خطای نسبی در شبیه‌سازی بارش تجمعی برای ایستگاه‌های مطالعاتی

۲-۳- تحلیل عملکرد و عدم قطعیت مدل WRF در این بخش به بررسی سری زمانی بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF به صورت خام (پیش از کاربرد هرگونه پس‌پردازش و تصحیح پیش‌بینی بارش)

ارویی) نسبت به مقادیر ثبت شده در ایستگاه‌های سینوپتیک پرداخته شده است. در شکل‌های ۴ و ۵ سری زمانی میانگین و باند عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های برتر به همراه سری زمانی بارش مشاهداتی و شاخص‌های CC، RMSE، FAR و POD برای ایستگاه‌های خرم‌آباد، پلدختر و کوه‌دشت برای ۴ رخداد مورد مطالعه نشان داده شده است. بررسی تغییرات مقدار شاخص همبستگی بین میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل و مقادیر مشاهداتی در سطح ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که متوسط شاخص همبستگی در رخداد‌های بارش ۲۰۱۶، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹ و ۲۰۱۹-۲ به ترتیب برابر است با ۰/۵۴، ۰/۷۲، ۰/۵۹ و ۰/۶۵. بنابراین مشخص است که بیشترین همبستگی بین مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل و مقادیر مشاهداتی به رخداد‌های بارش ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹-۲ تعلق دارد. ارزیابی نتایج براساس شاخص FAR گویای این مطلب است که در تمام ایستگاه‌های مطالعاتی در رخداد‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹ و ۲۰۱۹-۲ مقدار نرخ هشدار اشتباه به ترتیب کمتر از ۰/۲۵، ۰/۴۰، ۰/۰۰ و ۰/۲۵ درصد است و این مورد بدین معنی است که مدل عددی WRF به ترتیب در ۷۵، ۱۰۰، ۶۰ و ۷۵ درصد از مواقع زمان‌هایی که براساس آمار ثبت شده در ایستگاه دارای بارش است را به درستی گزارش نموده است و توانایی این مدل را در تشخیص زمان‌های بارانی از غیربارانی را نشان می‌دهد. در تحقیقی که توسط Khansalari et

al. (2021) به ارزیابی عملکرد مدل WRF در پیش‌بینی مقدار و شدت بارش و دما در محدوده شهرستان چالدران پرداخته شد، نشان داده شد که نرخ هشدار اشتباه مدل در پیش‌بینی بارش در محدوده ۰ تا ۰/۵۸ است. ارزیابی نتایج براساس شاخص جدولی POD نیز نشان داد که عملکرد مدل WRF در تشخیص صحیح زمان‌های بارانی قابل قبول است، به طوری که مقدار آن در سطح ایستگاه‌های مطالعاتی همواره بالای ۰/۷۵ بوده و نشان‌دهنده آن است که مدل عددی WRF در بیش از ۷۵ درصد از مواقع، زمان‌های بارندگی را درست گزارش نموده است. به طور کلی بررسی سری زمانی میانگین و باند عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های برتر حاکی از آن است که مدل در عمده رخدادها و ایستگاه‌های مورد مطالعه تمایل به کم‌برآوردی در مقدار بارش دارد. طبق محاسبات صورت گرفته مقدار متوسط شاخص RMSE در سطح ایستگاه‌های مورد مطالعه برای رخداد‌های بارش ۲۰۱۶، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹ و ۲۰۱۹-۲ به ترتیب معادل ۱۴/۴۸، ۴/۸۷، ۹/۲۶ و ۱۵/۴۲ میلی‌متر است.



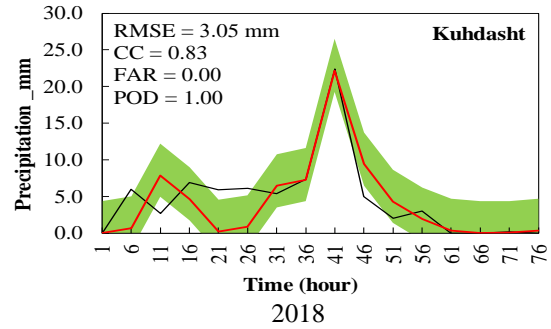
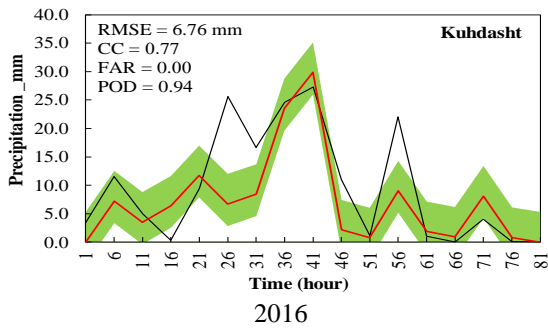


Fig. 4- Time series and confidence interval obtained from the best combinations of schemas (Khorramabad, Poldokhter, and Kuhdasht stations, events of 2016 and 2018) by non-parametric Bootstrap method

شکل ۴- سری زمانی بارش و باند اطمینان حاصل از ترکیب‌های برتر طرح‌واره‌ها (ایستگاه‌های خرم‌آباد، پلدختر و کوه‌دشت رخدادهای بارش: ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸) به روش ناپارامتری Bootstrap

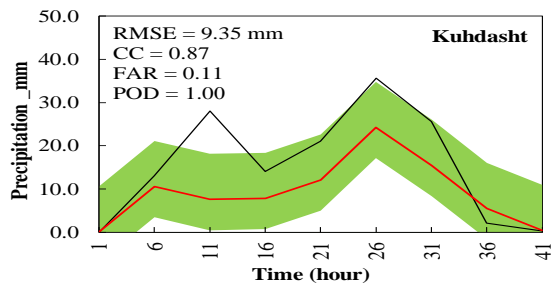
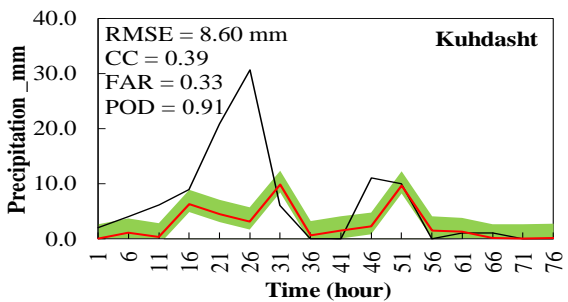
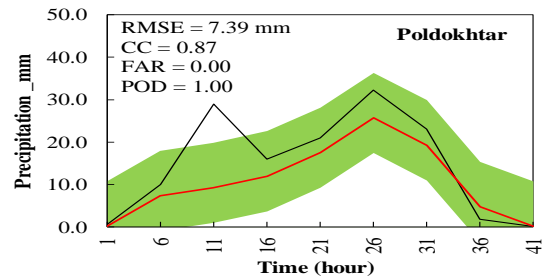
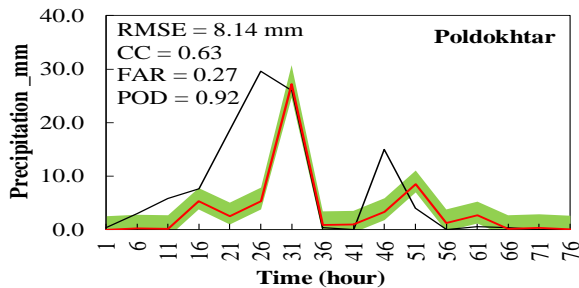
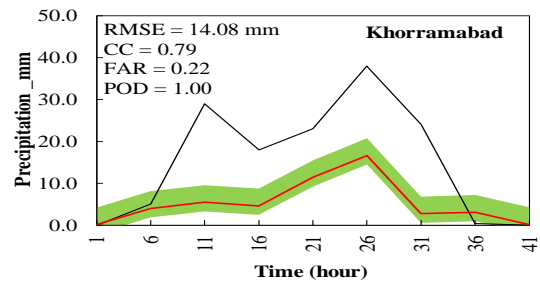
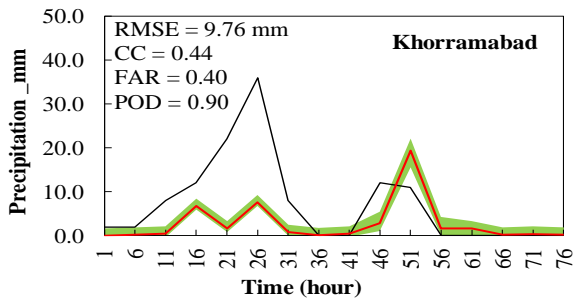


Fig. 5- Time series and confidence interval obtained from the best combinations of schemas (Khorramabad, Poldokhter, and Kuhdasht stations, events of 2019_1 and 2019_2) by non-parametric Bootstrap method

شکل ۵- سری زمانی بارش و باند اطمینان حاصل از ترکیب‌های برتر طرح‌واره‌ها (ایستگاه‌های خرم‌آباد، پلدختر و کوه‌دشت رخدادهای بارش: ۲۰۱۹) به روش ناپارامتری Bootstrap

در این بخش میزان دقت در شبیه‌سازی به موقع بیشینه بارش برای
رخداد‌های مورد مطالعه ارزیابی شده است (نتایج ۴).

Table 4- The accuracy in timely simulation of maximum precipitation
جدول ۴- میزان دقت در شبیه‌سازی به موقع بیشینه بارش

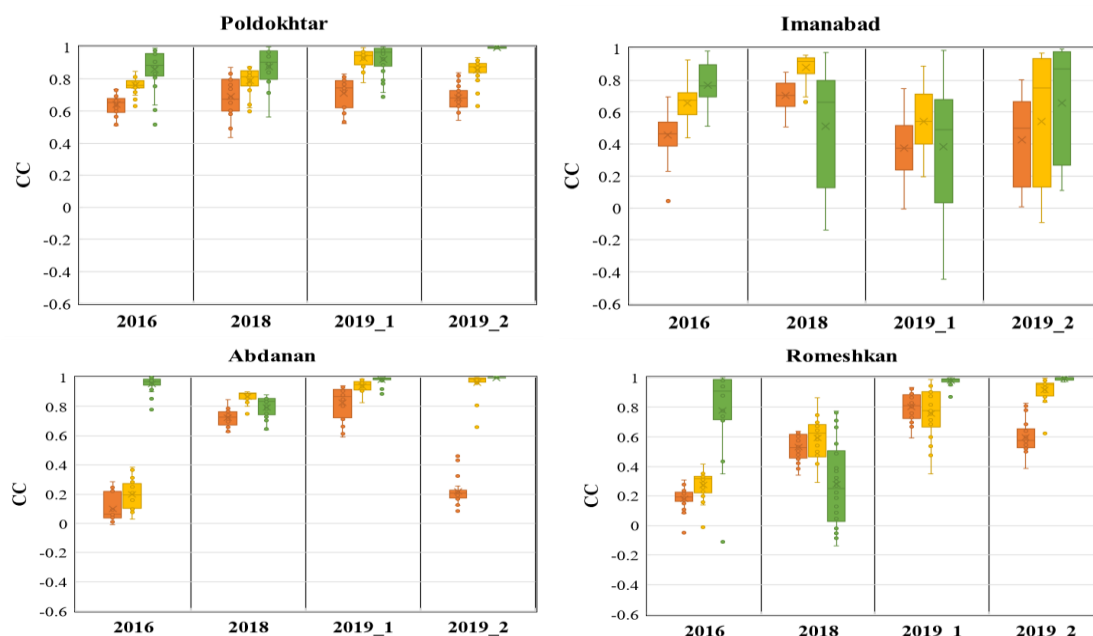
Station	Observed		Modeled			Observed		Modeled		
	Time of peak precipitation	Peak precipitation_mm	Time of peak precipitation	Peak precipitation_mm	Accuracy of time (hr)	Time of peak precipitation	Peak precipitation_mm	Time of peak precipitation	Peak precipitation_mm	Accuracy of time (hr)
	2016					2018				
Imanabad	4/13/2016 6:00	33.0	4/13/2016 6:00	16.6	0	11/25/2018 0:00	28.0	11/25/2018 0:00	15.4	0
Abdanan	4/14/2016 6:00	106.0	4/14/2016 0:00	34.7	-6	11/25/2018 0:00	23.0	11/25/2018 0:00	33.5	0
Romeshkan	4/14/2016 6:00	67.0	4/14/2016 0:00	23.6	-6	11/25/2018 0:00	14.0	11/25/2018 0:00	14.4	0
Khorramabad	4/14/2016 0:00	31.0	4/14/2016 0:00	22.7	0	11/25/2018 0:00	18.0	11/24/2018 12:00	6.5	-12
Poldokhtar	4/14/2016 0:00	26.7	4/14/2016 0:00	44.0	0	11/25/2018 0:00	23.4	11/25/2018 0:00	26.3	0
Kuhdasht	4/14/2016 0:00	27.3	4/14/2016 0:00	29.9	0	11/25/2018 0:00	22.4	11/25/2018 0:00	22.2	0
Darrehshahr	4/14/2016 0:00	25.9	4/13/2016 6:00	28.5	-6	11/25/2018 0:00	22.9	11/25/2018 0:00	14.9	0
	2019_1					2019_2				
Imanabad	3/25/2019 6:00	51.0	3/26/2019 12:00	20.0	+30	4/1/2019 6:00	37.6	4/1/2019 6:00	17.7	0
Abdanan	3/25/2019 6:00	26.7	3/25/2019 6:00	31.0	0	3/31/2019 12:00	61.0	4/1/2019 6:00	29.1	+18
Romeshkan	3/25/2019 6:00	29.1	3/25/2019 6:00	21.1	0	3/31/2019 12:00	42.0	4/1/2019 6:00	41.8	+18
Khorramabad	3/25/2019 6:00	36.0	3/26/2019 12:00	19.4	+30	4/1/2019 6:00	38.0	4/1/2019 6:00	16.6	0
Poldokhtar	3/25/2019 6:00	29.6	3/25/2019 12:00	27.2	+6	4/1/2019 6:00	32.2	4/1/2019 6:00	25.7	0
Kuhdasht	3/25/2019 6:00	30.7	3/26/2019 12:00	9.6	+30	4/1/2019 6:00	35.7	4/1/2019 6:00	24.2	0
Darrehshahr	3/25/2019 6:00	27.6	3/26/2019 12:00	8.3	+30	4/1/2019 6:00	30.6	4/1/2019 6:00	13.5	0

همانطور که مشاهده می‌شود در رخداد ۲۰۱۶، در ۵ ایستگاه از ایستگاه‌های مطالعاتی، زمان بیشینه بارش شبیه‌سازی شده منطبق بر زمان بیشینه بارش مشاهداتی است. اما در ایستگاه‌های آبدانان، رومشکان و دره‌شهر مقدار بیشینه بارش توسط مدل عددی WRF، ۶ ساعت زودتر از مقدار واقعی آن است. در رخداد ۲۰۱۸ نیز می‌توان عملکرد مدل WRF را از نظر شبیه‌سازی به موقع مقدار اوج بارش مناسب ارزیابی نمود، به طوری که در ۶ ایستگاه زمان اوج بارش به درستی شبیه‌سازی شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که عملکرد مدل در پیش‌بینی به موقع مقدار اوج بارش در بارش‌های سنگین همچون رخداد‌های ۲۰۱۹ ضعیف‌تر است. چنانکه در رخداد ۲۰۱۹-۱ تنها در دو ایستگاه آبدانان و رومشکان پیش‌بینی اوج بارش دقیقاً به موقع و در یک ایستگاه (پلدختر) ۶ ساعت پیش از زمان واقعی اوج بارش بوده است. در سایر ایستگاه‌ها زمان اوج بارش مدل‌سازی شده ۳۰ ساعت بعد از اوج بارش ثبت شده در ایستگاه است. در رخداد دوم ۲۰۱۹ عملکرد مدل عددی WRF بهتر از رخداد اول ۲۰۱۹ ارزیابی می‌شود، به طوری که زمان اوج بارش در ۵ ایستگاه منطبق بر مقادیر ثبت شده در ایستگاه است.

۱۲ ساعته و ۱ روزه برای ایستگاه‌های پلدختر، ایمان‌آباد، رومشکان و آبدانان ارائه شده در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. بررسی تغییرات شاخص همبستگی در شکل ۶ نشان می‌دهد که با افزایش گام زمانی و تجمیع بارش‌ها، پیش‌بینی بارش توسط مدل WRF از همبستگی بیشتری با داده‌های زمینی برخوردار است و این درحالی است که در برخی از ایستگاه‌ها همچون رومشکان و آبدانان در رخداد‌های بارش ۲۰۱۶ و ۲۰۱۹-۲ مقدار شاخص CC به مراتب کمتر است، با این وجود افزایش گام زمانی به ۱ روزه منجر به بهبود قابل توجهی در میزان همبستگی (شاخص همبستگی بزرگتر از ۰/۸۰) بین بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل و مقادیر زمینی شده است. این بدین معنی است که می‌توان از پیش‌بینی‌های این مدل در گام زمانی روزانه با حاشیه اطمینان بالاتری استفاده نمود. همچنین ذکر این نکته ضروری است که با توجه به همبستگی بالا بین نتایج این مدل با داده‌های زمینی، می‌توان با کاربرد روش‌های تصحیح اریبی مقدار خطای آن را کاهش داده و در مطالعات مختلف به ویژه شبیه‌سازی و پیش‌بینی سیلاب مورد استفاده قرار داد. ارزیابی نتایج براساس شاخص NRMSE نیز حاکی از آن است مقدار خطا در برآورد بارش در گام‌های زمانی ۶ و ۱۲ ساعته نسبت به مقادیر روزانه بالا است و این درحالی است که در گام زمانی روزانه مقدار شاخص NRMSE در تعداد زیادی از ایستگاه‌ها و رخداد‌های مورد مطالعه به کمتر از ۱/۲۵ محدود شده است. با توجه به نتایج مشخص است که از میان گام‌های زمانی مورد مطالعه، مدل WRF با خطای نسبتاً بیشتری اقدام به پیش‌بینی بارش‌های ۶ ساعته می‌نماید.

۳-۳- تحلیل عملکرد مدل WRF در پیش‌بینی بارش در گام‌های زمانی ۶، ۱۲ ساعته و ۱ روزه

در این بخش از تحقیق، به ارزیابی عملکرد مدل عددی هواشناسی WRF در پیش‌بینی بارش در گام‌های زمانی ۶، ۱۲ ساعته و ۱ روزه پرداخته شده است. به همین منظور نمودار جعبه‌ای تغییرات شاخص‌های CC، NRMSE، POD و FAR در گام‌های زمانی ۶



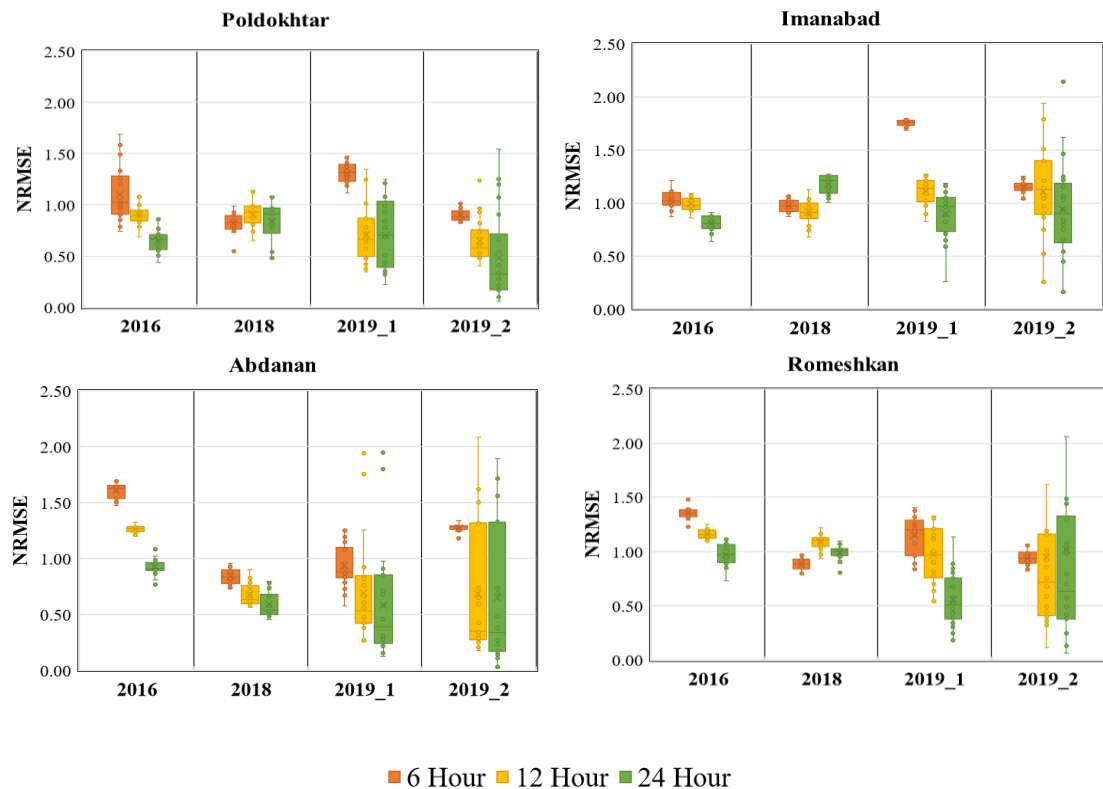


Fig. 6- The Boxplot of CC and NRMSE for 6, 12, and 24-hour time steps (Poldokhtar, Imanabad, Abdanan, and Romeshkan stations)

شکل ۶- نمودار جعبه‌ای تغییرات شاخص همبستگی و NRMSE برای شبیه‌سازی بارش در گام‌های زمانی ۶ و ۱۲ ساعته و روزانه (ایستگاه‌های پلدختر، ایمان‌آباد، آبدانان و رومشکان)

زمانی ۶ ساعته برای رخدادهای ۲۰۱۶، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹ و ۲۰۱۹-۲ به ترتیب ۰/۲۷، ۰/۲۳، ۰/۰۰ و ۰/۰۰ بوده است. در گام زمانی ۱۲ ساعته مقدار شاخص FAR در رخدادهای مذکور به ترتیب به ۰/۱۷، ۰/۲۹ و ۰/۲۹ محدود شده است. همچنین در پیش‌بینی بارش روزانه مقدار شاخص نرخ هشدار اشتباه در سطح ایستگاه‌های مورد مطالعه برای رخدادهای ۲۰۱۶، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹ و ۲۰۱۹-۲ به ترتیب به ۰/۰۰، ۰/۰۰، ۰/۲۳ و ۰/۲۱ محدود شده است. بنابراین می‌توان چنین عنوان نمود که توانایی این مدل به صورت خام و پیش از انجام پس‌پردازش در خروجی‌های آن، در عدم اعلام هشدارهای غلط قابل قبول ارزیابی می‌شود.

مقایسه توانایی مدل عددی WRF از نظر قابلیت پیش‌بینی و تشخیص زمان‌های بارانی نشان می‌دهد که تقریباً در هر سه گام زمانی از عملکرد خوبی برخوردار بوده است، به طوری که مقدار شاخص POD همواره بالاتر از ۰/۷۵ است. نکته دیگری که از شکل ۷ می‌توان برداشت نمود این است که با افزایش گام زمانی و تجمیع بارش‌ها، میزان دقت در پیش‌بینی صحیح زمان‌های بارانی به‌ویژه در رخدادهای ۲۰۱۶، ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ افزایش می‌یابد. چنانکه در سه رخداد مذکور در ۱۰۰ درصد مواقع، زمان‌های بارندگی توسط مدل درست گزارش شده است. بررسی تغییرات شاخص جدولی FAR نیز مؤید این مطلب است تعداد زمانی‌هایی که به اشتباه توسط مدل WRF بارش پیش‌بینی شده است در هر سه گام زمانی بسیار کم است. بررسی نتایج نشان داد که مقدار بیشینه شاخص FAR در سطح ایستگاه‌های مطالعاتی در گام

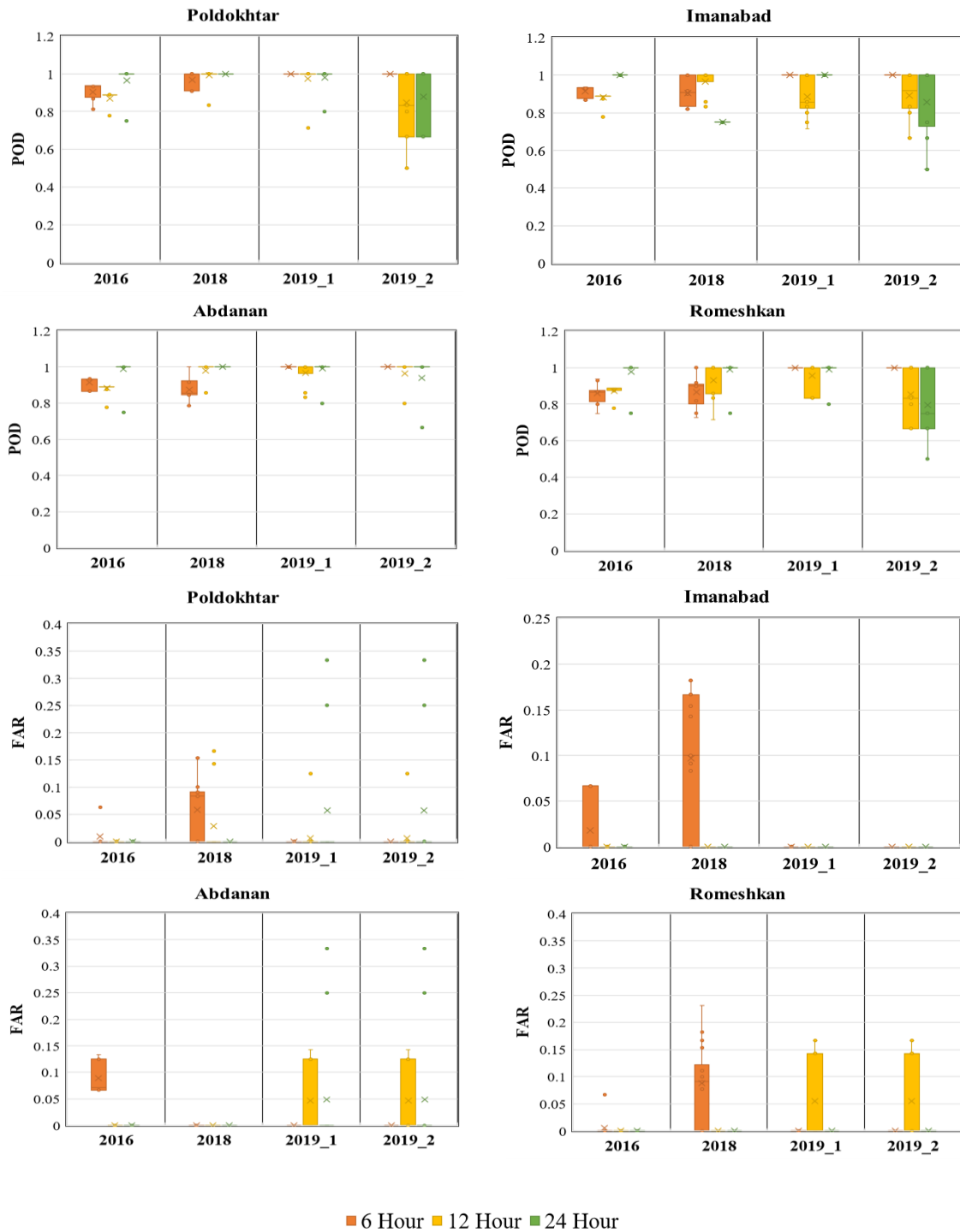


Fig. 7- The Boxplot of POD and FAR for 6, 12, and 24-hour time steps (Poldokhtar, Imanabad, Abdanan, and Romeshkan stations)

شکل ۷- نمودار جعبه‌ای تغییرات شاخص‌های جدولی POD و FAR برای شبیه‌سازی بارش در گام‌های زمانی ۶ و ۱۲ ساعته و روزانه (ایستگاه‌های پلدختر، ایمان‌آباد، آبدانان و رومشکان)

همانگونه که پیش‌تر نیز عنوان شد در این پژوهش صحت پیش‌بینی بارش در حوضه پلدختر با استفاده از ۸۷ پیکربندی متفاوت برای مدل WRF مورد بررسی قرار گرفت تا پیکربندی مناسب مشخص شود.

۳-۴- بررسی عملکرد طرح‌واره‌های مختلف و تعیین برترین طرح‌واره در پیش‌بینی بارش

جدول ۴ پیکربندی‌هایی که حداقل در ۵ و ۴ ایستگاه به عنوان پیکربندی برتر وجود داشته‌اند، مشخص شده است. سپس پیکربندی مشترک با بیشترین فراوانی در ایستگاه‌ها که در رخداد‌های بیشتری نیز به عنوان پیکربندی برتر مشخص شده است، به عنوان پیکربندی برتر برای حوضه پلدختر معرفی شده است.

سپس چارک برتر اجراها (۲۲ اجرای برتر) بر مبنای مقدار شاخص شباهت، از سایر اجراها تفکیک شدند. با توجه به تعداد بالای ایستگاه‌ها و رخداد‌ها، و وجود تنوع در پیکربندی برتر بین ایستگاه‌ها و رخداد‌های مختلف، به منظور تعیین برترین پیکربندی، در ابتدا پیکربندی‌های با فراوانی بیشتر بین ایستگاه‌های مختلف در هر رخداد مشخص شد، در

Table 5- The optimal configuration with the frequency of 4 and 5 stations in each event
جدول ۵- پیکربندی‌های برتر با فراوانی ۴ و ۵ ایستگاه در رخداد‌های بارش مورد مطالعه

2018		2016	
The optimal configuration in 4 stations	The optimal configuration in 5 stations	The optimal configuration in 4 stations	The optimal configuration in 5 stations
L-KF-YSU	K-G3D-YSU	EF-G3D-BL	EF-G3D-ACM2
WSM3-G3D-ACM2	L-G3D-YSU	SBUY-G3D-BL	
T-G3D-YSU		M2-G3D-YSU	
WDM5-G3D-ACM2		WSM3-G3D-YSU	
WSM3-G3D-BL		K-KF-ACM2	
WSM6-KF-YSU		T-BMJ-YSU	
K-KF-YSU		WDM5-G3D-ACM2	
K-G3D-BL		M2-G3D-ACM2	
		WDM5-BMJ-YSU	
2019_2		2019_1	
The optimal configuration in 4 stations	The optimal configuration in 5 stations	The optimal configuration in 4 stations	The optimal configuration in 5 stations
SBUY-BMJ-BL	K-G3D-YSU	T-G3D-BL	T-G3D-ACM2
WSM3-BMJ-ACM2	WSM3-BMJ-YSU	WDM5-G3D-ACM2	SBUY-G3D-YSU
		WSM3-G3D-ACM2	SBUY-G3D-ACM2
		WSM6-BMJ-BL	WDM6-G3D-ACM2
		M2-BMJ-BL	

دارد. همچنین انتخاب طرح‌واره YSU برای بخش لایه مرزی در تعداد بیشتری از ایستگاه‌ها منجر به پیش‌بینی دقیق‌تری از بارش شده است. تحلیل نتایج در رخداد ۲۰۱۸ نشان می‌دهد که در این رخداد فارغ از نوع طرح‌واره انتخاب شده برای بخش میکروفیزیک، طرح‌واره‌های Grell 3D و YSU به ترتیب برای شبیه‌سازی بخش‌های همرفت و لایه مرزی در تعداد بیشتری از ایستگاه‌های مطالعاتی عملکرد رضایت‌بخشی در شبیه‌سازی بارش داشته و از میزان شباهت بیشتری با بارش‌های ثبت شده در ایستگاه‌ها برخوردار بوده‌اند. بررسی نتایج در

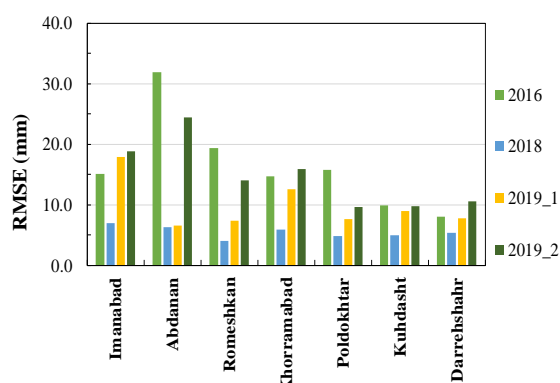
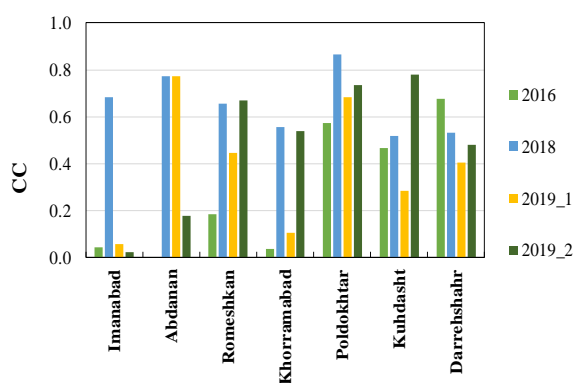
بررسی نتایج در رخداد بارش ۲۰۱۶ حاکی از آن است که پیکربندی شامل طرح‌واره‌های Eta Ferrier, Grell 3D و Asymmetrical Convective Model v2 برای بخش‌های میکروفیزیک، همرفت و لایه مرزی حداقل در ۵ ایستگاه به عنوان پیکربندی برتر وجود داشته است. مشخص است که انتخاب طرح‌واره Grell 3D برای بخش همرفت از تأثیر بالایی در صحت بارش‌های شبیه‌سازی شده برخوردار است، به طوری که در تعداد زیادی از پیکربندی‌های برتر فارغ از نوع پیکربندی منتخب برای بخش‌های میکروفیزیک و لایه مرزی، وجود

تفکیک ایستگاه‌ها و رخدادهای مورد مطالعه نشان داده شده است. بررسی میزان همبستگی بین بارش پیش‌بینی شده توسط مدل عددی WRF و مقادیر مشاهداتی نشان می‌دهد که در رخداد ۲۰۱۸، به غیر از ایستگاه‌های آبدانان و رومشکان میزان همبستگی در سایر ایستگاه در محدوده ۰/۵۲ تا ۰/۸۷ متغیر است. در رخداد اول ۲۰۱۹ به جز ایستگاه‌های ایمان‌آباد و خرم‌آباد بازه تغییرات شاخص همبستگی در سایر ایستگاه‌ها در محدوده ۰/۲۸ تا ۰/۷۷ تخمین زده شده است و در رخداد دوم بارشی سال ۲۰۱۹ به غیر از ایستگاه‌های ایمان‌آباد و آبدانان بازه تغییرات شاخص CC در محدوده ۰/۴۸ تا ۰/۷۸ برآورد شده است. بررسی تغییرات شاخص خطای RMSE نشان می‌دهد که در ۷۱ درصد از ایستگاه‌ها و رخداد‌های مورد مطالعه مقدار شاخص خطای کمتر از ۱۵ میلی‌متر تخمین زده شده است. بیشترین مقدار خطا در شبیه‌سازی بارش نیز به ایستگاه‌های آبدانان (رخداد ۲۰۱۶=۳۱/۹۳ میلی‌متر، رخداد دوم ۲۰۱۹=۲۴/۴۷ میلی‌متر)، رومشکان (رخداد ۲۰۱۶=۱۹/۳۱ میلی‌متر) و ایمان‌آباد (رخداد دوم ۲۰۱۹=۱۸/۸۷ میلی‌متر) تعلق دارد. ارزیابی عملکرد پیکربندی WDM5، Grell 3D و Asymmetrical Convective Model v2 برای پیش‌بینی زمان‌های بارانی براساس شاخص‌های جدولی FAR و POD نشان می‌دهد که متوسط شاخص FAR در سطح ایستگاه‌های مورد مطالعه برای رخداد‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹_۱ و ۲۰۱۹_۲ به ترتیب معادل است با ۰/۰۳، ۰/۰۰، ۰/۲۷ و ۰/۰۹ که قابل قبول ارزیابی می‌شود. همچنین، متوسط شاخص POD برای رخداد‌های به ترتیب برابر است با ۰/۸۹، ۰/۸۵، ۰/۹۱ و ۰/۹۲ که توانایی این پیکربندی را در تشخیص زمان‌های بارانی از غیربارانی نشان می‌دهد.

اولین رخداد بارش مربوط به سال ۲۰۱۹ حاکی از آن است که در این رخداد نیز می‌توان طرح‌واره Grell 3D را به عنوان طرح‌واره منتخب برای بخش همرفت معرفی نمود. همچنین، در این رخداد می‌توان طرح‌واره Asymmetrical Convective Model v2 را به عنوان طرح‌واره برتر برای شبیه‌سازی بخش لایه مرزی معرفی نمود. با توجه به جدول ۳ مشخص است که در رخداد بارشی دوم سال ۲۰۱۹، پیکربندی‌های (YSU و Grell 3D، Kessler) و (YSU و Miller-Janjic) حداقل در ۵ ایستگاه و پیکربندی‌های (WSM3، Asymmetrical Convective Model v2 و Betts-Miller-Janjic) و (Betts-Miller-، SBU_YLIN) و (Convective Model v2 و Bougeult Lacarrere و Janjic) حداقل در ۴ ایستگاه از ایستگاه‌های مورد بررسی، جزء پیکربندی‌های برتر و چارک اول از شاخص تشابه بوده‌اند.

بررسی نتایج ایستگاه‌ها و رخداد‌های بارشی مورد مطالعه نشان داد که پیکربندی متشکل از طرح‌واره‌های WDM5، Grell 3D و Asymmetrical Convective Model v2 برای بخش‌های میکروفیزیک، همرفت و لایه مرزی است، را می‌توان به عنوان پیکربندی منتخب برای این منطقه معرفی نمود؛ به‌طوری‌که پیکربندی مذکور از عملکرد قابل‌قبولی نسبت به سایر پیکربندی‌ها در تعداد بیشتری از ایستگاه‌ها و رخداد‌ها برخوردار بوده است. پیکربندی مذکور در رخداد بارش ۲۰۱۶ در ۴ ایستگاه، در رخداد ۲۰۱۸ در ۵ ایستگاه، در رخداد اول بارش ۲۰۱۹ در ۴ ایستگاه و در رخداد دوم بارش ۲۰۱۹ در ۱ ایستگاه از ایستگاه‌های مورد مطالعه جزء پیکربندی‌های برتر وجود داشته است.

در شکل ۸ تغییرات مقدار شاخص‌های آماری (CC، RMSE) و جدولی (FAR، POD) مربوط به پیکربندی منتخب (پیکربندی شماره ۷۷) به



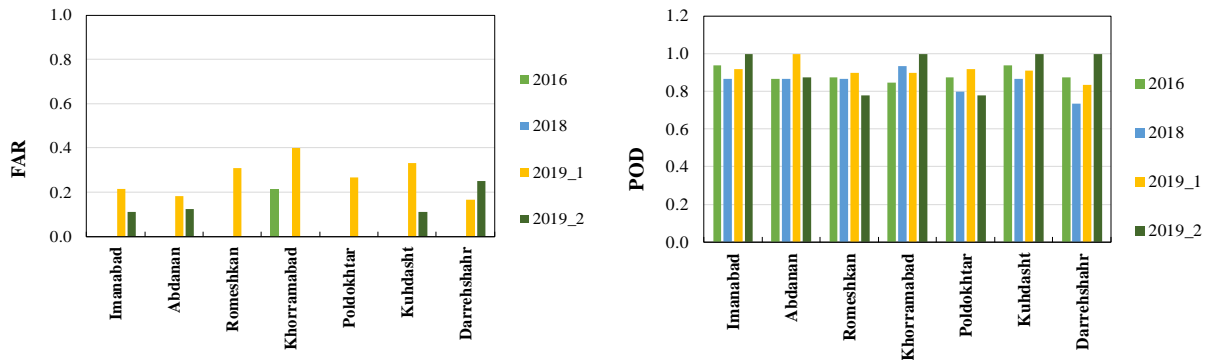


Fig. 8- Changes in the CC, RMSE, FAR and POD for the selected superior configuration in precipitation simulation

شکل ۸- تغییرات مقدار شاخص های CC, RMSE, FAR و POD مربوط به پیکربندی برتر منتخب در شبیه سازی بارش

درحالی که در بارش های ۵ تا ۱۵ میلی متر مقدار متوسط شاخص در NRMSE در سطح ایستگاه های مورد مطالعه برای رخدادهای مذکور به ترتیب به ۰/۸۹، ۰/۸۸، ۰/۹۵ و ۰/۷۱ کاهش پیدا نموده است. همچنین، متوسط شاخص NRMSE برای بارش های بیش از ۱۵ میلی متر در حداقل مقدار خود قرار دارد و معادل است با ۰/۶۹، ۰/۷۶ و ۰/۶۹. با توجه به نتایج می توان چنین عنوان نمود که با افزایش آستانه بارشی، مدل WRF از عملکرد بهتری در شبیه سازی بارش همراه بوده است، به طوری که مقدار خطای مدل در شبیه سازی بارش در سطح ایستگاه های مورد مطالعه کاهش یافته است که می تواند برای کاربرد در مطالعات مرتبط با شبیه سازی سیلاب مفید واقع شود.

در این بخش به بررسی عملکرد پیکربندی برتر مدل WRF در شبیه سازی آستانه های مختلف بارشی (شامل بارش های بین ۰/۵ تا ۵ میلی متر، ۵ تا ۱۵ میلی متر و بیش از ۱۵ میلی متر) پرداخته شده است. برای این منظور مقدار شاخص NRMSE محاسبه و نمودار جعبه ای تغییرات شاخص به تفکیک هر رخداد در شکل ۹ ارائه شده است. با توجه به نتایج مشخص است که محدوده تغییرات شاخص خطای مدل در شبیه سازی بارش های ۰/۵ تا ۵ میلی متر بیش از دو آستانه دیگر است. به عنوان مثال، متوسط شاخص NRMSE برای بارش های ۰/۵ تا ۵ میلی متر برای رخدادهای ۲۰۱۶، ۲۰۱۸، رخداد اول ۲۰۱۹ و رخداد دوم ۲۰۱۹ به ترتیب ۱/۶۱، ۱/۳۱، ۱/۳۸ و ۲/۱۰ تخمین زده شده است.

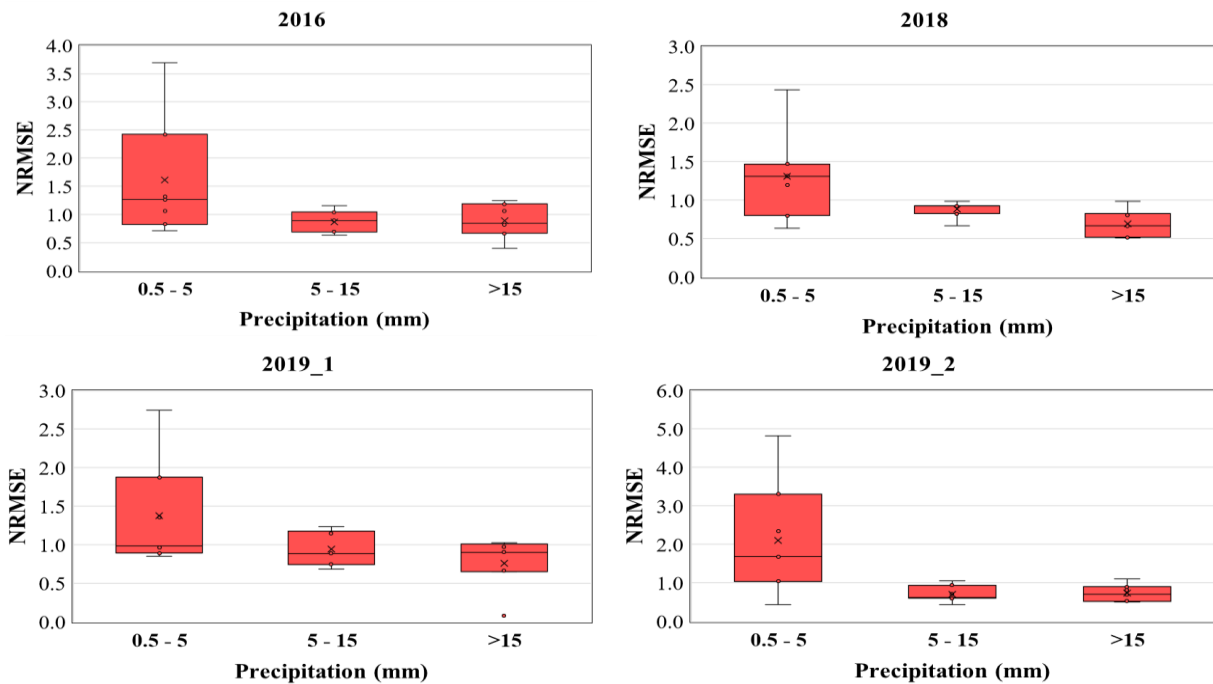


Fig. 9- Changes in the NRMSE for the selected superior configuration in in different precipitation thresholds

شکل ۹- تغییرات مقدار شاخص NRMSE مربوط به پیکربندی برتر منتخب در آستانه های مختلف بارشی

۴- نتیجه‌گیری

پیش‌بینی‌های جوی، پایه و اساس ارزیابی سیلاب و خسارت آن در بسیاری از فعالیت‌های اقتصادی، اجتماعی، کشاورزی و غیره هستند. 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 هستند. علاوه بر این انتخاب برترین ترکیب از طرح‌واره‌سازی فیزیکی برای سامانه‌های عددی همچون WRF به شدت تحت تأثیر منطقه مورد مطالعه و همچنین متغیر مورد شبیه‌سازی قرار دارد. بنابراین مناطق مختلف به طرح‌واره‌های متفاوتی برای رسیدن به عملکرد بهتر در شبیه‌سازی نیاز دارند. مطالعه حاضر با هدف تعیین حساسیت عملکرد مدل WRF نسبت به سه بخش فیزیکی (خردفیزیک، لایه مرزی و همرفت) و عدم قطعیت آن‌ها، همچنین تعیین ترکیب مناسبی از طرح‌واره‌های مربوط به سه بخش فیزیکی مذکور برای شبیه‌سازی بارش در محدوده جنوب‌غرب از کشور ایران به انجام رسیده است. نتایج حاصل از حساسیت‌سنجی مدل WRF نسبت به ایجاد تغییر در پارامترسازی بخش‌های همرفت، لایه مرزی و میکروفیزیک نشان داد که تغییر در انتخاب پیکربندی برای بخش‌های همرفت و لایه مرزی می‌تواند با ایجاد پراکندگی بیشتر، حالت‌های مختلفی از خروجی را در اختیار قرار دهد. همچنین ارزیابی عملکرد مدل براساس شاخص‌های جدولی POD و FAR نشان داد که سامانه عددی WRF دارای عملکرد قابل‌قبولی در تشخیص زمان‌های بارانی از غیربارانی است. به‌طوری‌که در بیش از ۷۵ درصد از مواقع، زمان‌های بارندگی را درست گزارش نموده است. به‌طورکلی بررسی میانگین شبیه‌سازی‌های برتر و باند اطمینان حاصل به روش بوت‌استرپ حاکی از تمایل به کم‌برآوردی در مقدار بارش در عمده رخدادها و ایستگاه‌های مطالعاتی است. مقدار متوسط شاخص RMSE در سطح ایستگاه‌های مورد مطالعه برای رخداد‌های بارش ۲۰۱۶، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹ و ۲۰۱۹_۲ به ترتیب معادل ۱۴/۴۸، ۴/۸۷، ۹/۲۶ و ۱۵/۴۲ میلی‌متر تخمین زده شده است. بررسی عملکرد مدل در پیش‌بینی به‌موقع بارش نشان داد که مدل در رخداد‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹_۲ در بیش از ۵۰ درصد از ایستگاه‌ها زمان اوج بارش را دقیق پیش‌بینی نموده است. همچنین ارزیابی کارایی مدل در پیش‌بینی بارش در گام‌های زمانی ۶ و ۱۲ ساعته و روزانه نشان داد که افزایش گام زمانی به ۱ روزه با افزایش قابل‌توجهی در میزان همبستگی بین بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل و مقادیر زمینی همراه است (شاخص CC بیش از ۰/۸۰). بررسی عملکرد ۸۷ پیکربندی مختلف در حوضه پلختر بر مبنای دو شاخص آماری

(NRMSE و CC) و دو شاخص جدولی (POD و FAR) نشان داد که پیکربندی متشکل از طرح‌واره‌های WDM5، Grell 3D و Asymmetrical Convective Model v2 برای بخش‌های میکروفیزیک، همرفت و لایه مرزی از کارایی و سازگاری بیشتری نسبت به مقادیر مشاهداتی در تعداد بیشتری از ایستگاه‌ها و رخداد‌های مورد مطالعه برخوردار بوده است. همچنین ارزیابی خطای مربوط به پیکربندی برتر از مدل عددی WRF در آستانه‌های مختلف بارشی حاکی از آن است که محدوده تغییرات خطای مدل در پیش‌بینی بارش‌های بیش از ۱۵ میلی‌متر کمتر است که نشان‌دهنده پتانسیل بالای خروجی‌های مدل برای کاربرد در مطالعات مرتبط با شبیه‌سازی و پیش‌بینی بارش‌های منتج به سیلاب است. اگرچه براساس تحقیقات مختلف نشان داده شده است که هیچ‌گاه یک پیکربندی نمی‌تواند بهترین پاسخ را برای همه سامانه‌های جوی داشته باشد؛ ولی با بررسی گزینه‌های مختلف برای پیکربندی (۸۷ پیکربندی) و در رخداد‌های مختلف بارشی (۷ ایستگاه و ۴ رخداد بارش) می‌توان با اطمینان نسبتاً بیشتری این پیکربندی را به عنوان بهترین پیکربندی برای منطقه مطالعاتی معرفی نمود.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Weather Research and Forecasting
- 2- Euclid Distance
- 3- Bootstrap

۵- مراجع

- Ader H, Mellenbergh G J, Hand D (2008) Advising on research methods: A consultant companion. Johannes van Kessel Advising, 572p
- Alizadeh Z, Yazdi J, Najafi M S (2022) Improving the outputs of regional heavy rainfall forecasting models using an adaptive real-time approach. *Hydrological Sciences Journal* 67(4):550-563
- Anderson M L, Chen Z Q, Kavvas M L, Feldman A (2002) Coupling HEC-HMS with atmospheric models for prediction of watershed runoff. *Journal of Hydrologic Engineering* 7(4):312-318
- Cloke H L, Pappenberger F (2009) Ensemble flood forecasting: A review. *Journal of Hydrology* 375(3):613-626
- Dehghani M (2009) Uncertainty analysis of streamflow drought forecasting. M.Sc.Thesis, Islamic Azad University (In Persian)
- Deng C, Chi Y, Huang Y, Jiang C, Su L, Lin H, Jiang L, Guan X, Gao L (2023) Sensitivity of WRF multiple parameterization schemes to extreme precipitation event over the poyang lake basin of China. *Frontiers in Environmental Science* 10(January):1-16
- Efron B, Tibshirani R J (1993) An introduction to the bootstrap. Chapman and Hall, 456p
- Garcia D W, Reboita M S, Carvalho V S B (2023) Evaluation of WRF performance in simulating an extreme precipitation event over the south of minas gerais, Brazil. *Atmosphere* 14(8):1276
- Gómez M, Mäll M, Aránguiz R (2021) The role of physical parameterization schemes in capturing the characteristics of extratropical cyclones over the south pacific ocean. *Earth and Space Science* 8(12)
- Hyndman R J, Koehler A B (2006) Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting* 22(4):679-688
- Jankov I, Grasso L D, Senguota M J, Neiman P, Zupanski D, Zupanski M, Lindsey D, Hillger D W, Birkenheuer D L, Yuan H (2011) An evaluation of five ARW-WRF microphysics schemes using synthetic GOES imagery for an atmospheric river event affecting the California coast. *Journal of Hydrometeorology* 12:618-633
- Kaewmesri P, Humphries U, Sooktaewee S (2017) Simulation on high-resolution WRF model for an extreme rainfall event over the southern part of Thailand. *International Journal of Advanced and Applied Sciences* 4(9):26-34
- 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)
- Madala S, Satyanarayana A N V, Rao T N (2014) Performance evaluation of PBL and cumulus parameterization schemes of WRF ARW model in simulating severe thunderstorm events over Gadanki MST radar facility-case study. *Atmospheric Research* 139:1-17
- Mekawy M, Saber M, Mekhaimar S A, Zakey A S, Robaa S M, Abdel Wahab M (2023) Evaluation of WRF microphysics schemes performance forced by reanalysis and satellite-based precipitation datasets for early warning system of extreme storms in hyper erid Environment. *Climate* 11(1):8
- 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. In: *Developments In Teracomputing*, World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 384p
- Moradi S, Javanmard S, Ghader S, Azadi M, Gharaylou M (2020) The most effective scheme in improving the performance of the WRF model for precipitation over northwest Iran (a case study: 4/1/2015). *Journal of Meteorology and Atmospheric Sciences* 3(3):188-200 (In Persian)
- Moradian F, Ghader S, Rezazadeh M (2020) Evaluation of a WRF model multi-physics ensemble forecasting system for simulation of precipitation over central region of Iran. *Iranian Journal of Geophysics* 14(1):13-38 (In Persian)
- Najafi M S, Imani S, Kuchak V S (2023) Assessing the impacts of physical parametrization of the WRF model in the simulation flood-inducing rainfall in arid and semi-arid areas (case study: Isfahan province). *Iran-Water Resources Research* 19(5):62-82 (In Persian)
- NDMO (2018) Post disaster needs assessment (PDNA) Iran 2019 floods in Lorestan, Khuzestan and Golestan provinces. 266p (In Persian)
- 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*, 235p
- 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

- Pennelly C, Reuter G, Flesch T (2014) Verification of the WRF model for simulating heavy precipitation in Alberta. *Atmospheric* 135:172–179
- Rincon D, Velandia J F, Tsanis I, Khan U T (2022) Stochastic flood risk assessment under climate change scenarios for Toronto , Canada using CAPRA. *Water* 14(2)
- Samal N, Jha S K (2022) Bias correction of WRF output for operational avalanche forecasting in the Indian Himalayan region. *Journal of Earth System Science* 131(156)
- 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, 165p
- Stanski H R, Wilson L J, Burrows W R (1989) Survey of common verification methods in meteorology (2nd ed.). World Meteorological Organization, 18p
- Tomasella J, Gonçalves A S, Falck A S, Caram R O, Diniz F L R, Rodriguez D A, Prado M C R, Negrão A C, Medeiros G S, Siquiera G C (2018) Probabilistic flood forecasting in the Doce basin in Brazil: effects of the basin scale and orientation and the spatial distribution of rainfall. *Journal of Flood Risk Management* 12(1)
- Trenberth K E (1992) *Climate system modeling*. Cambridge University Press, 820p
- Umer Y, Ettema J, Jetten V, Steeneveld G J, Ronda R (2021) Evaluation of the WRF model to simulate a high-intensity rainfall event over kampala, uganda. *Water (Switzerland)* 13(6)
- Van Cooten S, Elmore K L, Barbe D E, McCorquodale J A, Reed D J (2009) A statistical methodology to discover precipitation microclimates in southeast Louisiana: Implications for Coastal watersheds. *Journal of Hydrometeorology* 10(5):1184–1202
- Vemuri A, Munters W, Buckingham S, Helsen J, Beeck J Van (2022) Modeling extreme weather events for offshore wind in the north sea: A sensitivity analysis to physics parameterizations in WRF. *Journal of Physics: Conference Series* 2265(2)
- Yazdanpanah Gharaei F, Pourreza Bilondi M, Mianabadi A, Babaei M, Imani Amirabad S (2023) Evaluation of rainfall simulation using WRF/WRF-Hydro model (case study: Abol-Abbas basin). *Advanced Technologies in Water Efficiency* 2(4):1–14 (In Persian)