



## Evaluation of rainfall simulation using WRF/WRF-Hydro model (case study: Abol-Abbas basin)

Farzaneh Yazdanpanah Gharaei<sup>1</sup> , Mohsen Pourreza Bilondi<sup>2</sup> , Ameneh Mianabadi<sup>3</sup> ,  
Morteza Babaei<sup>4</sup> , Somaye Imani Amirabad<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Ph. D. student of water resources, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Birjand University, Birjand, Iran. Email: fyazdanpanah4@birjand.ac.ir

<sup>2</sup> Corresponding Author, Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Birjand University, Birjand, Iran Email: Mohsen.pourreza@birjand.ac.ir

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran. Email: a.mianabadi@kgut.ac.ir

<sup>4</sup> M. Sc graduated of Meteorology, Tehran University, Tehran, Iran. Email: morteza\_babaei@alumni.ut.ac.ir

<sup>5</sup> Ph. D. student of water resources, Department of Environmental engineering, College of Engineering of Tehran University, Tehran, Iran. Email: s.imani@ut.ac.ir

### ABSTRACT

#### Introduction

Every year, the occurrence of heavy rains in the flood-prone basins of the country leads to the occurrence of floods and the resulting damages. Therefore, accurate prediction of rainfall is of great importance to take preventive measures. So far, various methods have been used to predict rainfall. The concept of connecting the hydrological model (WRF-Hydro) with the atmospheric model (WRF) is expected to reduce the uncertainties related to the spatial and temporal distribution of storm events, especially for areas with complex characteristics. In this study, the effectiveness of the WRF/WRF-Hydro model in rainfall forecasting and the evaluation of this model in coupled and uncoupled mode for several flood events in the Abu al-Abbas catchment are investigated.

#### Methodology

In this study, the WRF/WRF-Hydro model was used to simulate four rainfall events in 1979, 1983, 1984 and 1993 that led to floods. WRF is designed as an open source and very flexible, so that it can be implemented on a wide range of computing environments from supercomputers to personal computers. In this study, the simulation area consists of three nested grids with horizontal grid spacing of 9, 3, and 1 km in the horizontal direction. The simulations performed in this study, initial and boundary conditions are provided by ERA5 reanalysis data. Lin, Thompson and WSM6 microphysics were used to configure the model. WRF-Hydro is one of the free extensions of the WRF model, which is a distributed, physical and multi-scale hydrologic-hydraulic model. Therefore, WRF-Hydro is not an independent hydrological modelling structure, but a coupled system of hydrological models with atmospheric models, which were used in this study in two ways, coupled and uncoupled.

#### Results and discussion

Coupled simulation of all three microphysics had almost similar performance for all four events. In 1993, out of three rainfall peaks, only the first rainfall peak was simulated by the model, and the model performed relatively poorly for the next two peaks. The performance of the model in coupled mode is somewhat better than uncoupled mode. The 1979 performance in the coupled mode was almost identical to the real data and the performance of the model was very good. According to the precipitation curves, it can be concluded that in the general state of the WRF/WRF-Hydro model, both in its coupled and uncoupled states, it is underestimated. The amount of error in the coupled and uncoupled state in all three schemas are almost equal and often the amount of error in the coupled state is slightly better than the uncoupled state. The error in 1993 was higher in both coupled and uncoupled modes than in other years, which could be due to errors in ERA5 data or observational data for that year.

#### Conclusion

Advanced hydrological research in short-term weather forecasting is uncertain and its impact is still being investigated and understood. The concept of connecting the hydrological model (WRF-Hydro) with the atmospheric model (WRF) is expected to reduce the uncertainties related to the spatial and temporal distribution of storm events, especially for areas with complex characteristics. In this study, the results indicated that the WRF model has a good capability in predicting heavy rainfall and this model can be used to predict rainfall in mountain basins.

**Key words:** Abol-Abbas, climate model, ERA5 reanalysis data, rainfall simulation, WRF.

**Article Type:** Research Article

**Article history: Received:** 02 October 2022 **Revised:** 06 November 2022 **Accepted:** 15 November 2022 **ePublished:** 28 February 2023

**Cite this article:** 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. DOI: 10.22126/ATWE.2023.8482.1031





## ارزیابی شبیه‌سازی بارش با استفاده از مدل WRF/WRF-Hydro (مطالعه موردی: حوضه

### ابوالعباس)

فرزانه یزدان پناه قرایی<sup>۱</sup> ID، محسن پوررضا بیلندی<sup>۲</sup> ID، آمنه میان‌آبادی<sup>۳</sup> ID، مرتضی بابایی<sup>۴</sup> ID، سمیه ایمانی  
امیرآباد<sup>۵</sup> ID

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. رایانامه: [fyazdanpanah4@birjand.ac.ir](mailto:fyazdanpanah4@birjand.ac.ir)  
<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. رایانامه: [Mohsen.pourreza@birjand.ac.ir](mailto:Mohsen.pourreza@birjand.ac.ir)  
<sup>۳</sup> استادیار گروه اکولوژی، پژوهشکده علوم محیطی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.  
رایانامه: [a.mianabadi@kgut.ac.ir](mailto:a.mianabadi@kgut.ac.ir)

<sup>۴</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد هواشناسی، دانشکده تهران، تهران، ایران. رایانامه: [morteza\\_babaei@alumni.ut.ac.ir](mailto:morteza_babaei@alumni.ut.ac.ir)  
<sup>۵</sup> دانشجوی دکتری منابع آب، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [s.imani@ut.ac.ir](mailto:s.imani@ut.ac.ir)

### چکیده

هر ساله وقوع بارش‌های سنگین در حوضه‌های سیل‌خیز کشور منجر به رخداد سیلاب و خسارت‌های ناشی از آن می‌گردد. بنابراین پیش‌بینی دقیق بارندگی برای انجام اقدامات پیشگیرانه از اهمیت بالایی برخوردار است. از این رو پیش‌بینی بارش یکی از مهمترین مسائل در حوزه مدیریت منابع آب می‌باشد. تاکنون روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی بارش استفاده شده‌است. پژوهش‌های هیدرولوژیکی پیشرفته در پیش‌بینی‌های کوتاه مدت هواشناسی نامشخص است و هنوز در دست بررسی و درک تاثیر آن است. مدل تحقیق و پیش‌بینی آب و هوا (WRF) یک مدل پیش‌بینی عددی آب و هوا است که می‌تواند اطلاعات خوبی برای پیش‌بینی بارندگی ارائه دهد. انتظار می‌رود مفهوم اتصال مدل هیدرولوژیکی (WRF-Hydro) با مدل جوی (WRF) عدم قطعیت‌های مربوط به توزیع مکانی و زمانی وقایع طوفان، به ویژه برای مناطق با خصوصیات پیچیده را کاهش دهد.

در مطالعه حاضر به بررسی ارزیابی مدل WRF/WRF-Hydro جهت پیش‌بینی ۴ روزه بارش که منتج به وقوع سیلاب شده‌اند، پرداخته شد. در شبیه‌سازی‌های بارش این مدل کم تخمین بود و مدل در حالت جفت‌شده نتایج بهتری ارائه داد. جهت اجرای مدل از داده‌های ERA5 استفاده شد که این داده‌ها عملکرد مطلوبی برای مدل در حوزه مذکور داشتند. همچنین برای پیکربندی مدل از سه طرح واره خرد فیزیک Lin، Thompson و WSM6 استفاده شد و با توجه به معیارهای ارزیابی خطا RMSE و NSE هر سه این طرح‌واره‌ها عملکرد مشابهی داشتند.

**واژه‌های کلیدی:** ابوالعباس، داده‌های بازتحلیل ERA5، شبیه‌سازی بارش، مدل اقلیمی، WRF

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۱۰ مهر ۱۴۰۱ اصلاح: ۱۵ آبان ۱۴۰۱ پذیرش: ۲۴ آبان ۱۴۰۱ چاپ الکترونیکی: ۰۹ اسفند ۱۴۰۱

**استناد:** یزدان پناه قرایی، ف.، پوررضا بیلندی، م.، میان‌آبادی، الف.، بابایی، م.، و ایمانی امیرآباد، س. (۱۴۰۱). ارزیابی شبیه‌سازی بارش با استفاده از مدل WRF/WRF-Hydro (مطالعه موردی: حوضه ابوالعباس)، فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۲(۴)، ۱-۱۴، شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2023.8482.1031



## مقدمه

ایران کشوری با اقلیم خشک و نیمه خشک است که هر ساله شاهد اثرات نامطلوب رویدادهای حدی بارش کم (خشکسالی) و رویدادهای بارش زیاد (سیل) نیز بوده است (صدیقی و صدیقی، ۲۰۲۰)؛ از این رو پیش‌بینی بارش یکی از مهمترین مسائل در حوزه مدیریت منابع آب می‌باشد (زابل و موسر ۲۰۱۳). تاکنون روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی بارش استفاده شده‌است (لیو و همکاران، ۲۰۱۹؛ ژاو و همکاران، ۲۰۲۱؛ ژاو و همکاران، ۲۰۲۰؛ نی و همکاران، ۲۰۲۰). پیش‌بینی بارندگی در چند دهه گذشته یکی از نگرانی‌های مهم جهانی در جامعه علمی است. چالش‌های عمده‌ای که در فرآیند پیش‌بینی بارندگی با آن مواجه است شامل ماهیت تصادفی و فراوانی آن است. علاوه بر این، در دسترس نبودن داده‌های تاریخی طولانی‌مدت، فرآیند پیش‌بینی بارندگی را پیچیده‌تر می‌کند. همچنین بارندگی یک پدیده بهم پیوسته است که تحت تأثیر سایر متغیرهای هواشناسی مانند حداقل و حداکثر دما، فشار، رطوبت نسبی و سرعت باد قرار دارد. از آنجایی که بارندگی متغیری است که با برخی از پدیده‌های طبیعی نامطلوب مانند حرکت سیل همبستگی دارد، پیش‌بینی دقیق بارندگی می‌تواند به عنوان یک سیستم هشدار اولیه برای فرآیندهای طبیعی نامطلوب عمل کند (پیرس و همکاران، ۲۰۱۴؛ چن و همکاران، ۲۰۲۲؛ ایمانی و همکاران، ۱۳۹۹).

با گسترش کاربرد مدل‌های عددی در دهه اخیر، تحقیقات در ارتباط با ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی وارد مرحله تازه‌ای شده است. مدل‌های جهانی پیش‌بینی عددی آب و هوا در درک الگوهای جوی در مقیاس همدیدی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما به دلیل وضوح بالا، قادر به تعیین کمیت فرآیندهای مقیاس محلی یا منطقه‌ای نیستند. با این حال، مدل‌های منطقه‌ای مانند مدل تحقیق و پیش‌بینی هوا (WRF) (اسکاماروک و همکاران، ۲۰۰۸) برای پیش‌بینی‌های بارش کوتاه برد و با وضوح بالا استفاده شده‌اند (روندا و همکاران، ۲۰۱۷). مدل WRF سامانه‌ای برای پیش‌بینی عددی وضع هوا و حالت جو می‌باشد که برای کاربردهای پژوهشی و در عین حال عملیاتی طراحی شده است. طراحی مدل WRF نتیجه تلاش‌های مشترک نهادهای مختلفی از جمله مرکز تحقیقات جوی ملی ایالات متحده (NCAR)، بخش هواشناسی ریزمقیاس و میان‌مقیاس NCAR موسوم به MMM، مراکز اقیانوس‌شناسی و جوی آمریکا (NOAA)، مرکز پیش‌بینی محیطی (NCEP) و مرکز هواشناسی نیروی هوایی آمریکا (AFWA) است.

## مبانی نظری و پیشینه پژوهش

تا کنون مطالعات متعددی جهت ارزیابی مدل WRF انجام گرفته است. گودرزی و همکاران (۱۳۹۷) به ارزیابی مدل WRF در پیش‌بینی بارش‌های سنگین در حوضه آبریز رودخانه کن تهران پرداختند؛ نتایج حاکی از آن بود که بارش‌های پیش‌بینی شده توسط NCEP بسیار کمتر از مقدار واقعی برآورد شده اند و مدل WRF عملکرد نسبتاً مطلوبی در پیش‌بینی بارش‌های سنگین داشت. اسفندآبادی و فاضلی (۱۳۹۸) به بررسی صحت داده‌های هواشناسی بصورت نقطه‌ای و حوضه‌ای (متوسط در سطح حوضه) در مقایسه با مقادیر مشاهداتی پرداختند. نتایج مدل‌سازی هواشناسی در مراجع مختلف، مانند مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا مانند WRF، GFS، MM5 استفاده و میزان صحت آن‌ها (البته

<sup>1</sup> Seddighi & Seddighi

<sup>2</sup> Liu et al

<sup>3</sup> Zhao et al

<sup>4</sup> Zhao et al

<sup>5</sup> Ni et al

<sup>6</sup> Pearce et al

<sup>7</sup> Chen et al

<sup>8</sup> Skamarock et al

<sup>9</sup> Ronda et al

<sup>10</sup> National Center for Atmospheric Research

<sup>11</sup> Mesoscale and Microscale Meteorology

<sup>12</sup> National Oceanic and Atmospheric Administration

<sup>13</sup> National Centers for Environmental Prediction

<sup>14</sup> Air Force Weather Agency

بصورت روزانه) بررسی شده است. با توجه به اختلاف محتمل بین داده‌های پیش بینی جوی و مقادیر مشاهداتی، سعی شد ارتباط معنی دار بین این داده ها ایجاد شود و از ارتباط بین داده های محاسباتی و مشاهداتی، برای پیش بینی سیل در حوضه های غرب کشور استفاده گردد. نتایج صحت سنجی نشان می دهد که مدل WRF قابلیت خوبی برای پیش بینی بارندگی در حوضه های غرب کشور دارد. ذاکری و همکاران (۱۳۹۳) به راستی آزمایی برون داد مدل WRF برای بارندگی بر روی کشور ایران در دوره فوریه تا انتهای می سال ۲۰۰۹ پرداختند. نتایج نشان داد که مهارت مدل در پیش بینی بارش برای آستانه های مختلف متفاوت است و با افزایش آستانه بارش مهارت مدل در پیش بینی مقدار بارندگی کاهش می یابد. در مجموع به نظر می رسد مدل از قابلیت نسبتا مطلوبی برای پیش بینی بارندگی در چارچوب عملیاتی در منطقه ایران برخوردار است. ال افندی و همکاران (۲۰۱۳) وقایع بارندگی شدید در شبه جزیره سینا را با استفاده از مدل WRF شبیه سازی کردند تا بتواند نحوه هشدارهای اولیه برای کاهش خطر سیلاب سریع را بررسی کنند. در بررسی یک سیلاب شدید در ۱۸ ژانویه به این نتیجه رسیدند که مقدار بارش مشاهداتی و مقدار شبیه سازی شده ی آن دارای RMSE کمتر از ۵ درصد بود. روگلیس و وارنر<sup>۲</sup> (۲۰۱۷) از مدل WRF برای پیش بینی بارش و رواناب در حوضه رودخانه تونجولا در کلمبیا استفاده کردند. نتایج کارایی این مدل را برای ارائه پیش بینی بارش در حوضه های آب و هوایی کوهستانی گرمسیری نشان داد.

ریز مقیاس نمایی با استفاده از WRF تحت تأثیر ویژگی های منطقه ای و انتخاب طرحواره های فیزیک است (گسلا و همکاران،<sup>۳</sup> ۲۰۱۴). لیو و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۲۱) دریافته اند که بهترین پیکربندی مدل برای رویدادهای بارندگی شدید در مصر شامل WRF Single Moment 6-class (WSM6) microphysical (MP)، MYJ PBL و طرح های Grell-Freitas CU است. پاتل و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۹) شش رویداد بارندگی را با استفاده از مجموعه داده های ERA-Interim Reanalysis با مدل WRF شبیه سازی کردند و نشان دادند که طرح های CU بر میزان بارندگی تأثیر می گذارند در حالی که طرح های MP تأثیر کمتری دارند. همچنین طرح شهری BEP، Grell-Devenyi 3D CU، و طرح Lin MP بهترین عملکرد را دارند. این مطالعات ثابت کردند که طرح های پارامترسازی فیزیکی عملکردهای متفاوتی در مناطق مورد مطالعه مختلف دارند و هیچ پیکربندی مدل یکسانی برای همه مناطق ندارند. مجموعه چند فیزیک می تواند راه حلی برای تعیین پیکربندی بهینه فیزیک تا حدی در یک منطقه مورد مطالعه باشد.

در این مطالعه جهت ارزیابی مدل WRF/WRF-Hydro، حوضه آبریز ابوالعباس انتخاب گردید. با توجه به کوهستانی بودن این حوضه و وقوع سیلاب های شدید، این حوضه به دقت شبیه سازی بیشتر بارش نیاز دارد. برای داده های ورودی مدل هواشناسی و شرایط اولیه مدلسازی آن از داده های بازتحلیل ERA5 که تاکنون از جمله بهترین داده های ورودی مدل های اقلیمی می باشد استفاده شده که در این مطالعه دقت و کارایی این داده ها برای مدل جفت شده و جفت نشده WRF/WRF-Hydro نیز بررسی شد. بدین منظور هدف اصلی این پژوهش بررسی کارایی مدل WRF/WRF-Hydro در پیش بینی بارش و ارزیابی این مدل در حالت جفت شده و جفت نشده برای چند واقعه سیلابی در حوضه آبریز ابوالعباس است.

## روش پژوهش

### منطقه مورد مطالعه

حوضه ابوالعباس واقع در استان خوزستان، بزرگترین زیرحوضه رودخانه زرد می باشد. این حوضه به مساحت ۲۸۳ کیلومتر مربع در محدوده ۴۹°۵۴' تا ۵۰°۰۵' طول شرقی و ۳۱°۴۲' تا ۳۱°۴۴' عرض شمالی واقع شده است. ارتفاع این حوضه آبریز کوهستانی از ۹۶۱ تا ۳۲۱۱ متر از سطح دریا با ارتفاع متوسط ۱۱۱۳ متر تغییر می کند و ساختاری پیچیده با زیر حوضه هایی با اندازه های مختلف دارد. حوضه ابوالعباس با توجه به محل تقاطع رودخانه ها و نقاط با اهمیت به شش زیرحوضه تقسیم شد. شکل ۱ نقشه موقعیت حوضه ابوالعباس را در استان خوزستان نشان می دهد.

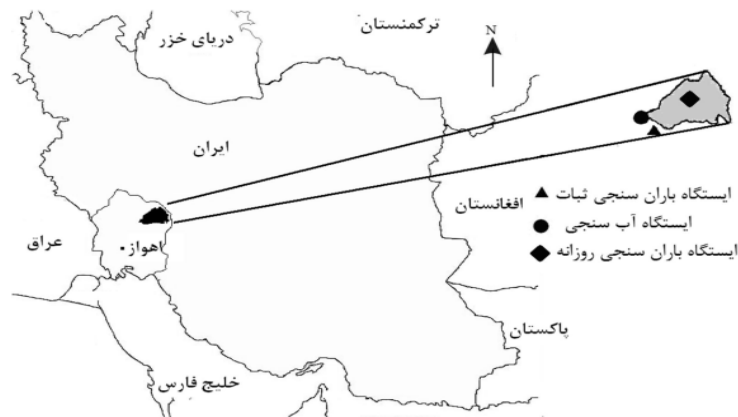
<sup>1</sup> El Afandi et al

<sup>2</sup> Rogelis & Werner

<sup>3</sup> Gsella et al

<sup>4</sup> Liu et al

<sup>5</sup> Patel et al



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی زیر حوضه ابوالعباس در ایران و استان خوزستان

این حوضه‌ی کوهستانی دارای کوه‌های مرتفع پوشیده از درختان متنوع بلوط می‌باشد. متأسفانه با گذر زمان، پوشش جنگلی و زمین‌های زراعی این منطقه دستخوش تغییراتی شده است و خطر بروز سیل را افزایش داده که گویای اهمیت پیش‌بینی بارش در این حوضه می‌باشد.

### دوره انجام شبیه‌سازی و داده‌ها

وقایع مورد استفاده در این تحقیق بایستی دارای ویژگی‌هایی باشد تا از خطای شبیه‌سازی تا حد امکان بکاهد. به‌طوریکه بتوان نسبت به هم‌زمانی بارش در تمامی نقاط حوضه اطمینان داشت. همچنین انتخاب وقایع باید به‌گونه‌ای صورت گیرد که هر رویداد سیل معرف یک واقعه مستقل باشد. در نهایت چهار واقعه در سال‌های ۱۹۷۹، ۱۹۸۳، ۱۹۸۴ و ۱۹۹۳ انتخاب گردید که مشخصات این رویدادها در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. مشخصات رویدادهای منتخب در حوضه آبریز ابوالعباس

شماره سیلاب	تاریخ وقوع	مقدار بارش	دبی اوج برحسب $m^3/s$	شرایط رطوبتی خاک
۱	۱۹۷۹/۱۲/۱۳	۲۰	۱۴,۲۶	خشک
۲	۱۹۸۳/۰۱/۲۴	۴۳	۷۸	متوسط
۳	۱۹۸۴/۱۱/۱۵	۳۷	۲۵,۵	خشک
۴	۱۹۹۳/۰۱/۳۱	۷۴	۴۰	متوسط

در این مطالعه برای اجرای مدل از مجموعه داده‌های جوی در مقیاس جهانی، مانند داده‌های سیستم پیش‌بینی جهانی GFS و ECMWF (ERA5) Reanalysis v5 استفاده شد. از داده‌های GFS به‌عنوان شرایط اولیه برای مدل منطقه‌ای WRF با وضوح بالا انتخاب شد. دوره‌های داده با دوره‌های شبیه‌سازی مدل WRF با بازه زمانی ۳ ساعته و وضوح افقی  $۰,۲۵ \times ۰,۲۵$  درجه برای همه متغیرها سازگار است. داده‌های ERA5 نسل پنجم داده‌های بازتحلیل مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت وضع هوا (ECMWF) برای اقلیم جهانی در ۴ تا ۷ دهه گذشته است. داده‌های بازتحلیل، داده‌های خروجی مدل است که با داده‌های مشاهداتی از سراسر جهان و با در نظر گرفتن رابطه فیزیکی-دینامیکی بین جو و اقیانوس و اثر توپوگرافی پیچیده کره زمین و توزیع دریاها، اقیانوس‌ها و جنگل‌های گسترده، ترکیب می‌شود. این اصل، که داده‌های گواهی نامیده می‌شود، مبتنی بر روشی است که توسط مراکز پیش‌بینی آب و هوا به کار می‌رود. در این روش، هر چند ساعت (۱۲ ساعت در ECMWF) پیش‌بینی قبلی با مشاهدات جدید موجود به روشی مطلوب برای ایجاد بهترین برآورد جدید وضعیت جو، به نام داده‌های تحلیلی، ترکیب می‌شود.

داده‌های بازتحلیل نیز به همین شیوه عمل می‌کنند، اما مدت زمان گوار داده‌ها کوتاه‌تر است. با استفاده از این روش برای چندین دهه گذشته، داده بازتحلیل ایجاد شده است. جزئیات بیشتر در مورد داده‌های ERA5 در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. جزئیات داده‌های ERA5

نوع داده	شبکه‌ای
طرح	شبکه منظم طول و عرض جغرافیایی
دامنه افقی	جهانی
تفکیک افقی	0.25*0.25
دامنه عمودی	1hpa تا ۱۰۰۰ hpa
وضوح عمودی	137 سطح فشار
دامنه زمانی	1979 تا کنون
وضوح زمانی	ساعتی
فرمت فایل	nc و GRIB

### مدل WRF

مدل WRF به صورت کد باز و بسیار منعطف طراحی شده، به گونه‌ای که روی طیف گسترده‌ای از محیط‌های محاسبه‌ای از ابررایانه‌ها تا رایانه‌های رومیزی و خانگی قابل اجراست. گزینه‌های فیزیکی و دینامیکی آن حاصل تجربه و تلاش گروه علمی گسترده‌ای است. مدل WRF یک مدل غیرهیدروستاتیک (با گزینه اختیاری هیدروستاتیک) است که شبکه‌بندی افقی آن شبکه آراکاوای<sup>۱</sup> C است. در این مدل از طرحواره‌های انتگرال‌گیری مرتبه دوم و سوم زمانی رانگ-کوتا و طرحواره‌های مرتبه دو تا شش برای فرارفت در دو راستای افقی و قائم استفاده می‌شود (اسکاماروک و همکاران؛ ۲۰۰۸).

این مدل از دامنه چندگانه تودرتو پشتیبانی می‌کند. این نوع تکنیک اجازه می‌دهد تا وضوح را با وارد کردن یک شبکه (یا شبکه‌ها) اضافی در شبیه‌سازی بر روی منطقه مورد نظر متمرکز کنید. شبکه‌های تو در تو مستطیل هستند و با شبکه اصلی (بزرگ‌تر) که درون آن لانه شده‌اند، تراز می‌شوند. علاوه بر این، شبکه‌های تو در تو هر تصحیح مکانی و زمانی شبکه صحیح را امکان پذیر می‌سازد. شرایط مرزی شبکه ریزتر با درون‌یابی شبکه بزرگ فراهم می‌شود. نحوه تعامل بین دو شبکه می‌تواند لانه‌سازی یک طرفه یا تو در تو دو طرفه باشد. در روش اول تنها راه تبادل اطلاعات از شبکه بزرگ به شبکه کوچک وجود دارد. در راه دوم تبادل اطلاعات بین شبکه‌ها در هر دو جهت است که اتصال شبکه کوچک، شبکه اصلی را برای نقاط شبکه اصلی که در داخل شبکه کوچک قرار دارد جایگزین می‌کند.

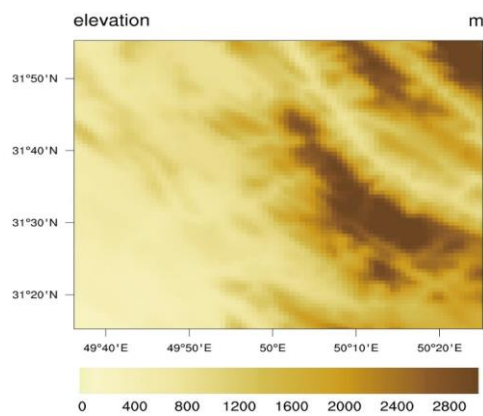
در این مطالعه با استفاده از نرم افزار domainwizard، منطقه شبیه‌سازی از سه شبکه تو در تو (لانه‌ای) با فواصل شبکه افقی ۹، ۳ و ۱ کیلومتر در راستای افقی تشکیل شده است (شکل ۲). لازم به ذکر است که در آزمایش های WRF/WRF-Hydro، اجزای روندیابی WRF-Hydro فقط در داخلی‌ترین دامنه اجرا می‌شوند.

تهیه توپوگرافی منطقه یکی دیگر از داده‌های ورودی مدل WRF می‌باشد که در این مطالعه با تفکیک افقی ۹۰۰ متر جهت ورودی به مدل در شکل ۳ داده شد.

<sup>1</sup> Skamarock et al



شکل ۲. حوضه آبریز ابوالعباس با پیکربندی تو در تو دامنه‌های WRF



شکل ۳. توپوگرافی مدل WRF با تفکیک افقی ۹۰۰ متر

مدل WRF به شرایط مرزی از مدل‌های جهانی (GCMs) نیاز دارد. در هر دو آزمایشی که در این مطالعه انجام شده است، شرایط اولیه و مرزی توسط داده‌های بازتحلیل ERA5 ارائه شده است. WRF به منظور توصیف بهتر ویژگی‌های اتمسفر از مقیاس بزرگ تا مقیاس کوچک، چندین گزینه فیزیک را ارائه می‌دهد. گزینه‌ها معمولاً از ساده و کارآمد تا پیچیده و از نظر محاسباتی پرهزینه‌تر هستند و از طرح‌های تازه توسعه یافته تا طرح‌های آزمایش شده می‌باشند. فیزیک مدل اجازه می‌دهد تا پارامترهای متفاوتی را در زمینه خردفیزیک، پارامترهای ابر کومولوس، فیزیک سطح، لایه مرزی سیاره‌ای و فیزیک تابش جو تنظیم کند. خرد فیزیک ابر شامل تمام جنبه‌های مربوط به خاصیت ابر در مقیاس کوچک از جمله غلظت و اندازه قطرات، تشکیل کریستال یخ، تعامل بین قطرات و تشکیل قطرات باران است و به همین دلیل بالاترین تاثیر را در بارش و فرآیندهای هسته‌ای ابر دارد. جدول (۳) خلاصه‌ای از طرحواره‌های خردفیزیک در WRF که در تحقیق حاضر استفاده شده را ارائه می‌دهد.

## جدول ۳. خلاصه‌ای از خردفیزیک‌های به کار برده شده در تحقیق

منبع	توضیحات	طرحواره
لین و همکاران (۱۹۸۳)	شش طبقه بندی طرحواره با بخار آب، آب ابری، باران، یخ ابر، برف و گروپل. برای مطالعات تحقیقی مناسب تر است	Lin(Purdue)
تامپسون و همکاران (۲۰۰۸)	بروزرسانی جدید طرح قبلی تامپسون (۲۰۰۷) می‌باشد. این طرح طیفی پیچیده تری دارد که جداول جستجو و مفروضات جدید توزیع اندازه برف را در پیش می‌گیرد. طرح مناسب برای شبیه سازی با وضوح بالا.	Thompson
هانگ و لیم (۲۰۰۶)	طرحواره ای با یخ، برف و گروپل. مناسب برای شبیه سازی با وضوح بالا.	WSM6

## جدول ۴. خلاصه‌ای از پیکربندی مدل WRF

گزینه انتخاب شده	موضوع
ERA5	داده‌های اجرا
27s	گام‌های زمانی
1 hr	فاصله زمانی خروجی‌ها
50hPa	فشار
lambert	وضوح طرح
Noah-MP	مدل سطح زمین
Lin Purdue/Thompson/WSM6	طرحواره‌های خرد فیزیک
Monin-Obukhov	طرحواره فیزیک سطح
Shin Hong	لایه مرزی (PBL)
Rrtm	فیزیک طول موج بلند
Dudhia	فیزیک طول موج کوتاه

## مدل WRF-Hydro

WRF-Hydro از افزونه‌های رایگان مدل WRF است که مدل هیدرولوژیکی-هیدرولیکی توزیعی، فیزیکی و چند مقیاسی است (گوچیس و همکاران<sup>۱</sup> ۲۰۱۵). این مدل در سال ۲۰۱۳ با هدف تسهیل جفت کردن مدل‌های هیدرولوژیکی با مدل‌های جوی و سطح زمین توسعه یافته است (گوچیس و همکاران ۲۰۱۵). لذا WRF-Hydro یک ساختار مدل‌سازی هیدرولوژیکی مستقل نیست بلکه سیستم جفت شده از مدل‌های هیدرولوژیکی با مدل‌های جوی است.

WRF-Hydro دارای فیزیک‌های مختلفی می‌باشد که بسته به انتخاب هریک، مدل دارای قابلیت‌های مدل‌سازی یک بعدی سطح زمین (Noah, Noah-MP)، جریان سطحی، جریان زیرسطحی اشباع، روندیابی در شبکه جریان، جریان پایه و روندیابی در مخزن/دریاچه می‌باشد. این مدل می‌تواند هم به عنوان یک مدل هیدرولوژیکی مستقل و هم به عنوان یک مدل جفت شده با مدل جوی WRF استفاده شود. تنظیمات فیزیکی سطح زمین می‌تواند مدل‌های چند لایه‌ای از سطح زمین باشد که از یک مدل حرارتی ساده گرفته تا مدل‌های پوشش گیاهی و رطوبت

<sup>1</sup> Gochis et al



کامل خاک، پوشش برف و یخ دریا را شامل شود. در این تحقیق ما از مدل سطح زمین Noah-MP استفاده کرده‌ایم. مدل Noah-MP در واقع طرح مبتنی بر Noah LSM که از چندین گزینه برای فرآیندهای کلیدی تعامل جو زمین استفاده می‌کند، می‌باشد.

### ارزیابی میزان خطا

#### خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)

انحراف جذر میانگین مربعات (RMSE) یا خطای میانگین مربعات (RMSE) یک معیار رایج برای استفاده از تفاوت بین مقادیری (نمونه یا مقادیر جمعیت) که توسط یک مدل یا برآورد کننده پیش‌بینی شده و مقادیر مشاهده شده می‌باشد (چای و دراکسلر ۲۰۱۴). این معیار برای سنجش بزرگی خطاها در پیش‌بینی‌ها برای نقاط مختلف داده در یک اندازه‌گیری واحد عمل می‌کند. تأثیر هر خطا بر RMSE متناسب با اندازه خطای مربع است. بنابراین خطاهای بزرگتر تأثیر نامتناسب زیادی بر RMSE دارند؛ در نتیجه، RMSE نسبت به داده‌های پرت حساس است. مقدار RMSE همواره مثبت بوده و مقدار صفر (تقریباً هرگز در عمل به دست نیامده است) نشان دهنده تناسب کامل با داده‌ها می‌باشد. به طور کلی، هر چه مقدار RMSE کمتر باشد نشان‌دهنده میزان خطای کمتری خواهد بود. این معیار از فرمول زیر بدست می‌آید:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (P_{sj} - P_{oj})^2} \quad (1)$$

در این فرمول  $M$  تعداد گام‌های زمانی،  $P_{sj}$  و  $P_{oj}$  به ترتیب داده‌های بارش شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای هستند.

#### ضریب نش-ساتکلیف (NSE)

از ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE) برای ارزیابی مهارت پیش‌بینی مدل‌های آب‌شناسی استفاده می‌شود. در ضریب نش-ساتکلیف نسبت واریانس خطای سری‌های زمانی شبیه‌سازی شده بر واریانس سری‌های زمانی مشاهده شده را از عدد یک کم می‌کنیم و به صورت زیر تعریف شده است (چاپتا و همکاران؛ ۲۰۰۹):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (2)$$

در این رابطه  $\bar{Q}_o$  میانگین دبی مشاهده شده،  $Q_m^t$  دبی شبیه‌سازی شده و  $Q_o^t$  مقدار دبی مشاهده شده در زمان  $t$ . در حالت یک مدل کامل با واریانس خطای برآورد برابر با صفر، نش-ساتکلیف برابر ۱ است ( $NSE = 1$ )؛ برعکس، در مدلی که واریانس خطای برآورد برابر با واریانس سری‌های زمانی مشاهده شده باشد، مقدار نش-ساتکلیف برابر با صفر می‌شود ( $NSE = 0$ ) در حقیقت،  $NSE = 0$  نشان می‌دهد که مدل از نظر مجموع خطای مربع دارای مهارت پیش‌بینی یکسانی با میانگین سری‌های زمانی است. بازده کمتر از صفر ( $NSE < 0$ ) زمانی رخ می‌دهد که میانگین مشاهده شده پیش‌بینی بهتری نسبت به مدل داشته باشد. در واقع هر چه مقادیر NSE نزدیک به ۱ باشد، نشان‌دهنده‌ی پیش‌بینی بهتر مدل است.

### یافته‌ها

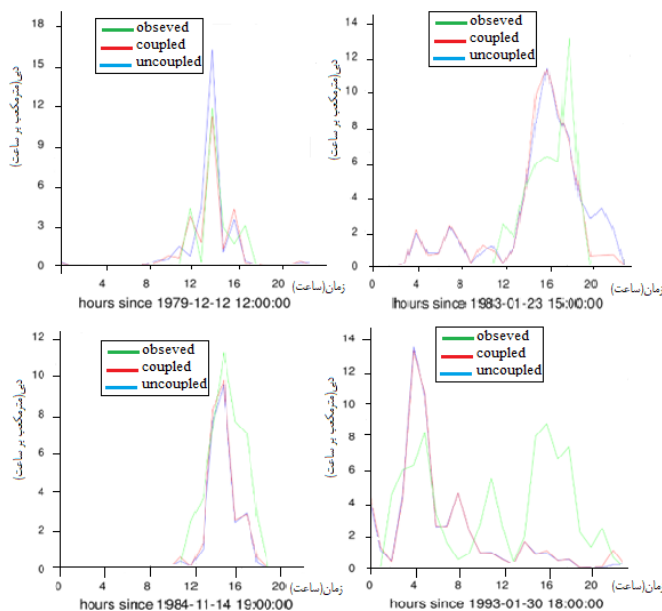
در این مطالعه به شبیه‌سازی بارش در ۴ رویداد سال‌های ۱۹۷۹، ۱۹۸۳، ۱۹۸۴ و ۱۹۹۳ با سه طرحواره میکروفیزیک Thompson, Lin و WSM6 در حالت جفت‌شده و جفت‌نشده اجرا شد. برای انجام شبیه‌سازی‌ها ابتدا از مدل WRF(V4.0) در فضای سیستم عامل لینوکس استفاده شد؛ پس از اجرای مدل WRF، برای پیش‌پردازش و اجرای مدل، از نسخه WRF-Hydro V5.1.1 استفاده می‌شود. از خروجی‌های

مدل WRF نمی‌توان به‌طور مستقیم برای مدل WRF-Hydro استفاده کرد. به همین دلیل با استفاده از کد زبان برنامه‌نویسی NCL، شبکه‌بندی خروجی‌های مدل WRF تغییر داده شدند و به‌عنوان ورودی مدل WRF-Hydro استفاده شدند.

بر خلاف مطالعات گسلا و همکاران (۲۰۱۴) و پاتل و همکاران (۲۰۱۹) که از چند طرحواره میکروفیزیک منتخب، طرحواره‌ها نتایج تقریباً متفاوتی ارائه دادند در این مطالعه در شبیه‌سازی به صورت جفت‌شده هر سه طرحواره برای سال‌های ۱۹۷۹، ۱۹۸۳ و ۱۹۸۴ عملکرد تقریباً مشابه‌ای داشتند. در سال ۱۹۹۳ از سه بیشینه‌ی بارش رخ داده، فقط بیشینه اول بارش توسط مدل شبیه‌سازی شده است و مدل برای دو بیشینه بعدی عملکرد نسبتاً ضعیفی داشته است.

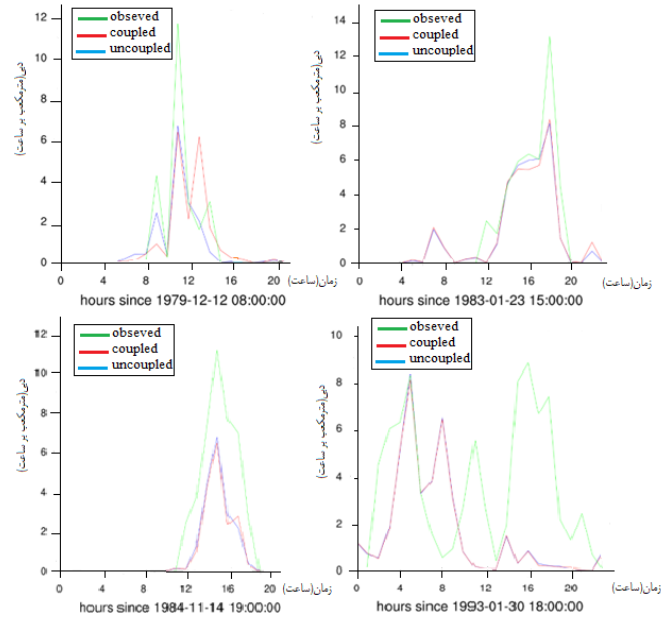
در مرحله بعد شبیه‌سازی بارش در حالت جفت‌شده اجرا شد. شرایط تمام شبیه‌سازی‌ها در حالت جفت‌شده مشابه شرایط حالت جفت‌نشده در نظر گرفته شد. برای سه رویداد ۱۹۸۳، ۱۹۸۴ و ۱۹۹۳ عملکرد مدل در حالت جفت‌شده تا حدودی بهتر از حالت جفت‌نشده است. اجرای سال ۱۹۷۹ در حالت جفت‌شده تقریباً مشابه داده‌های واقعی شدند و عملکرد مدل بسیار خوب بود.

اشکال ۵، ۶ و ۷ منحنی‌های بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی در حالت جفت‌شده و جفت‌نشده برای سه طرحواره مذکور نشان می‌دهد. با توجه به منحنی‌های بارش می‌توان نتیجه گرفت که در حالت کلی مدل WRF/WRF-Hydro هم در حالت جفت‌شده و هم در حالت جفت‌نشده‌ی آن کم برآورد (under estimate) می‌باشد.

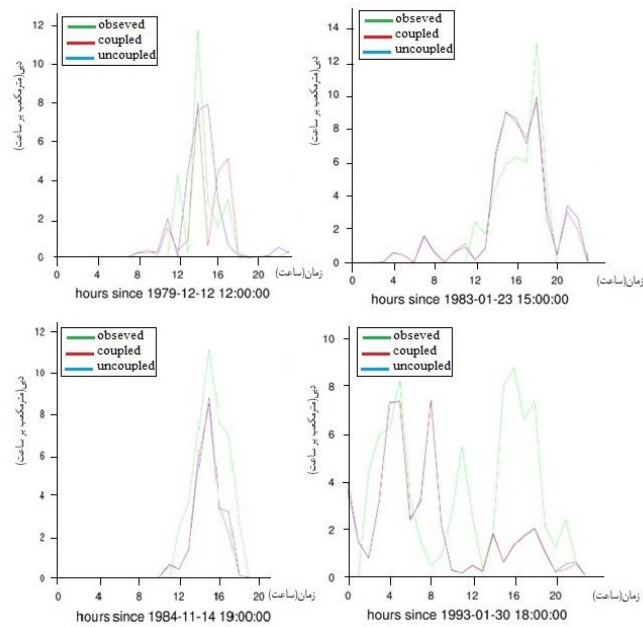


شکل ۴. منحنی‌های بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در طرحواره Lin

<sup>1</sup> NCAR Command Language



شکل ۵. منحنی های بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در طرحواره Thompson



شکل ۶. منحنی های بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در طرحواره WSM6

در ادامه برای ارزیابی خطا و مقایسه‌ی شبیه‌سازی‌ها در حالت‌های جفت‌شده و جفت‌نشده از معیار RMSE استفاده شد که در جدول ۵ مقادیر آن بیان شده‌است. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که میزان خطا در حالت جفت‌شده و جفت‌نشده در هر سه طرحواره تقریباً با هم برابرند و اغلب مقدار خطا در حالت جفت‌شده کمی بهتر از حالت جفت‌نشده می‌باشد. میزان خطا در سال ۱۹۹۳ در هر دو حالت جفت‌شده و جفت‌نشده بیشتر از دیگر سال‌ها بود که می‌تواند ناشی از خطای داده‌های ERA5 یا داده‌های مشاهداتی آن سال باشد.

جدول ۵. برآورد میزان خطای RMSE در شبیه‌سازی بارش در حالت جفت‌شده و جفت‌نشده در طرحواره‌های Lin, Thompson, Purdue و WSM6 (مقادیر بر حسب میلی متر بر ساعت)

WSM6 طرحواره	Lin Purdue طرحواره	Thompson طرحواره	
1.529586	0.9365454	1.212862	جفت‌شده ۱۹۷۹
1.445897	1.632094	1.620066	جفت‌نشده ۱۹۷۹
1.567547	2.014604	1.3729	جفت‌شده ۱۹۸۳
1.599869	2.176302	1.374915	جفت‌نشده ۱۹۸۳
1.434166	1.611722	1.942872	جفت‌شده ۱۹۸۴
1.536774	1.650395	1.994799	جفت‌نشده ۱۹۸۴
3.359717	3.839743	3.813318	جفت‌شده ۱۹۹۳
3.518452	3.834860	3.816754	جفت‌نشده ۱۹۹۳

## بحث

ایران کشوری با اقلیم خشک و نیمه خشک است که هر ساله شاهد اثرات نامطلوب رویدادهای حدی بارش کم (خشکسالی) و رویدادهای بارش زیاد (سیل) نیز بوده است. از این رو پیش‌بینی بارش یکی از مهمترین مسائل در حوزه مدیریت منابع آب می‌باشد. تاکنون روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی بارش استفاده شده‌است. پژوهش‌های هیدرولوژیکی پیشرفته در پیش‌بینی‌های کوتاه مدت هواشناسی نامشخص است و هنوز در دست بررسی و درک تاثیر آن است. انتظار می‌رود مفهوم اتصال مدل هیدرولوژیکی (WRF-Hydro) با مدل جوی (WRF) عدم قطعیت‌های مربوط به توزیع مکانی و زمانی وقایع طوفان، به ویژه برای مناطق با خصوصیات پیچیده را کاهش دهد. همانند مطالعه گودرزی و همکاران (۱۳۹۷) و ذاکری و همکاران در این مطالعه هم نتایج حاکی از این بود که مدل WRF دارای قابلیت خوبی در پیش‌بینی بارش‌های سنگین دارد و می‌توان از این مدل برای پیش‌بینی بارش در حوضه‌های کوهستانی استفاده نمود.

## نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر به بررسی ارزیابی مدل WRF/WRF-Hydro جهت پیش‌بینی ۴ رویداد بارش که منتج به وقوع سیلاب شده‌اند، پرداخت شد. در شبیه‌سازی‌های بارش این مدل کم تخمین بود و مدل در حالت جفت‌شده نتایج بهتری ارائه داد. جهت اجرای مدل از داده‌های ERA5

استفاده شد که این داده‌ها عملکرد مطلوبی برای مدل در حوزه مذکور داشتند. همچنین برای پیکربندی مدل از سه طرح واره خرد فیزیک Lin، Thompson و WSM6 استفاده شد و با توجه به معیارهای ارزیابی خطا RMSE و NSE هر سه این طرحواره‌ها عملکرد مشابهی داشتند.

### منابع

- ایمانی، سمیه، حسن لی، امیر محمد، فرخ نیا، اشکان، جوادی، فاطمه، و نجفی، محمد سعید. (۱۳۹۹). ارزیابی کارایی مدل WRF-Hydro در توسعه سامانه‌های پیش‌بینی و هشدار سیلاب (مطالعه موردی حوضه آبریز کشکان). تحقیقات منابع آب ایران، ۱۶(۴)، ۲۲۵-۲۴۰. [http://www.iwrr.ir/article\\_126926.html](http://www.iwrr.ir/article_126926.html)
- ذاکری، زینب، آزادی، مجید، و صحرائیان، فاطمه. (۱۳۹۳). راستی آزمایی برون‌داد مدل WRF برای بارندگی بر روی کشور ایران در دوره فوریه تا انتهای می سال ۲۰۰۹. نشریه نیوار، ۳۸(۸۶-۸۷)، ۳-۱۰. [https://nivar.irimo.ir/article\\_13252.html](https://nivar.irimo.ir/article_13252.html)
- عبداللهی اسفندآبادی، مینا، و فاضلی، میثم. (۱۳۹۸). ارزیابی دقت پیش‌بینی هواشناسی در برآورد سیل در حوضه‌های غرب کشور. سومین کنفرانس ملی هیدرولوژی ایران، تبریز. <https://civilica.com/doc/950985>
- گودرزی، لیلا، بنی حبیب، محمدابراهیم، و غفاریان، پروین. (۱۳۹۷). ارزیابی عملکرد مدل WRF در شبیه‌سازی بارش‌های سنگین. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، ۲۵(۱)، ۲۴۲-۲۲۹. <https://sid.ir/paper/156374/fa>

### References

- Abdullahi Esfandabadi, M., & Fazli, M. (2018). Evaluation of the accuracy of meteorological forecast in the estimation of floods in the western basins of the country. the third national hydrology conference of Iran, Tabriz. <https://civilica.com/doc/950985> [In Persian]
- Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)—Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific model development*, 7(3), 1247-1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- Chen, C., Zhang, Q., Kashani, M. H., Jun, C., Bateni, S. M., Band, S. S., & Chau, K. W. (2022). Forecast of rainfall distribution based on fixed sliding window long short-term memory. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 16(1), 248-261. <https://doi.org/10.1080/19942060.2021.2009374>
- Gochis, D. J., Yu, W., & Yates, D. N. (2015). The WRF-Hydro model technical description and user's guide, version 3.0. NCAR Tech. National Center for Atmospheric Research, 120. [http://www.ral.ucar.edu/projects/wrf\\_hydro](http://www.ral.ucar.edu/projects/wrf_hydro)
- Gsella, a., de Meij, A., Kerschbaumer, A., Reimer, E., Thunis, P., & Cuvelier, C. (2014). Evaluation of MM5, WRF and TRAMPER meteorology over the complex terrain of the Po Valley, Italy. *Atmospheric Environment*, 89, 797-806. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.03.019>
- Guderzi, L., Bani Habib, M., Ghafarian, P. (2017). Evaluation of WRF model performance in simulating heavy rainfall. *Water and soil conservation research (agricultural sciences and natural resources)*, 25(1), 229-242 <https://sid.ir/paper/156374/fa> [In Persian]
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377(1-2), 80-91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Imani, S., Hasan Lee, A., Farrokhnia, A., Javadi, F., & Najafi, M. (2021). Evaluating the efficiency of WRF-Hydro model in the development of flood forecasting and warning systems (case study of Kashkan watershed). *Iran Water Resources Research*, 16(4). [http://www.iwrr.ir/article\\_126926.html](http://www.iwrr.ir/article_126926.html) [In Persian]

- Liu, Y., Chen, Y., Chen, O., Wang, J., Zhuo, L., Rico-Ramirez, M. A., & Han, D. (2021). To develop a progressive multimetric configuration optimisation method for WRF simulations of extreme rainfall events over Egypt. *Journal of Hydrology*, 598, 126237. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126237>
- Liu, Y., Zhao, Q., Yao, W., Ma, X., Yao, Y., & Liu, L. (2019). Short-term rainfall forecast model based on the improved BP–NN algorithm. *Scientific reports*, 9(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56452-5>
- Ni, L., Wang, D., Singh, V. P., Wu, J., Wang, Y., Tao, Y., & Zhang, J. (2020). Streamflow and rainfall forecasting by two long short-term memory-based models. *Journal of Hydrology*, 583, 124296. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124296>
- Patel, P., Ghosh, S., Kaginalkar, A., Islam, S., & Karmakar, S. (2019). Performance evaluation of WRF for extreme flood forecasts in a coastal urban environment. *Atmospheric Research*, 223, 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.03.005>
- Pearce, W., Holmberg, K., Hellsten, I., & Nerlich, B. (2014). Climate change on Twitter: Topics, communities and conversations about the 2013 IPCC Working Group 1 report. *PloS one*, 9(4), e94785. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094785>
- Rogelis, M. C., & Werner, M. (2018). Streamflow forecasts from WRF precipitation for flood early warning in mountain tropical areas. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(1), 853-870. <https://doi.org/10.5194/hess-22-853-2018>
- Ronda, R. J., Steeneveld, G. J., Heusinkveld, B. G., Attema, J. J., & Holtslag, A. A. (2017). Urban finescale forecasting reveals weather conditions with unprecedented detail. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98, 2675–2688. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0297.1>
- Seddighi, H., & Seddighi, S. (2020). How much the Iranian government spent on disasters in the last 100 years? A critical policy analysis. *Cost effectiveness and resource allocation*, 18(1), 1-11. <https://doi.org/10.1186/s12962-020-00242-8>
- Skamarock, W. C., and J. B. Klemp, 2008: A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *Journal of Computational Physics*, 227, 3465-3485. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.01.037>
- Skamarock, W., Klemp, J., Dudhi, J., Gill, D., Barker, D., Duda, M., Huang, X.Y., Wang, W., & Powers, J. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3. Technical Report June National Center for Atmospheric Research Boulder, Colorado, USA. <http://dx.doi.org/10.5065/D68S4MVH>
- Zabel, F., & Mauser, W. (2013). 2-way coupling the hydrological land surface model PROMET with the regional climate model MM5. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(5), 1705-1714. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1705-2013>
- Zakari, Z., Azadi, M., & Sahraian, F. (2013). Verification of the output of the WRF model for rainfall over Iran in the period from February to the end of May 2009. *Newar*, 38(8786), 10-3. [https://nivar.irimo.ir/article\\_13252.html](https://nivar.irimo.ir/article_13252.html) [In Persian]
- Zhao, Q., Liu, Y., Ma, X., Yao, W., Yao, Y., & Li, X. (2020). An improved rainfall forecasting model based on GNSS observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(7), 4891-4900. 10.1109/TGRS.2020.2968124
- Zhao, Q., Liu, Y., Yao, W., & Yao, Y. (2021). Hourly rainfall forecast model using supervised learning algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1-9. 10.1109/TGRS.2021.3054582
- El Afandi, G., Morsy, M., & El Hussieny, F. (2013). Heavy rainfall simulation over sinai peninsula using the weather research and forecasting model. *Int. J. Atmos. Sci*, 11, 241050. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/241050>