



# مدیریت آب و آبیاری

(نشریه علمی)

دوره ۱۱ ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۴۰۰

صفحه‌های ۵۷۳-۵۶۱

DOI: 10.22059/jwim.2021.327499.904

مقاله مروری:

## مروری بر کارایی مدل عددی WRF-ARW به عنوان ابزاری در شبیه‌سازی‌های بارش ایران زمین

محمدامین مداح<sup>۱\*</sup>، فاطمه پرهیزکار<sup>۲</sup>

۱. استادیار، گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲. دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۳۱

### چکیده

کسب اطلاع از نحوه توزیع و شدت بارش محتمل باعث بهبود دقت در اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی در حین و پس از بارش در شرایط رخداد سیل می‌شود. امروزه با رشد علوم به‌ویژه در زمینه محاسبات کامپیوتری و حل معادلات پیشرفته جوی، مبتنی بر قوانین معتبر فیزیکی - دینامیکی این امکان در اختیار همگان به‌ویژه مدیران، بهره‌برداران و برنامه‌ریزان منابع آب قرار داده شده تا به کمک شبیه‌سازی، نحوه تغییرات شرایط جوی در آینده نزدیک را با عدم قطعیت کم‌تر از گذشته پیش‌بینی نمود. مدل عددی هواشناسی میان‌مقیاس WRF اخیراً مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته و رفته‌رفته به مهم‌ترین ابزار برای مطالعات جو و پیش‌بینی تبدیل شده است، چراکه با اعمال به‌روزترین یافته‌های علوم جوی در قالب مجموعه‌ای از پارامتری‌سازی‌های فیزیکی (خردفیزیک ابر، تابش، همرفت، تلاطم لایه‌مرزی، انتقال دمای سطح و رطوبت در مقیاس زیرشبکه) یک روش ریزمقیاس‌نمایی دینامیک در شبیه‌سازی فرایندهای جوی فراهم می‌کند. بدین‌منظور، در مطالعه حاضر جهت آشنایی مخاطبان با مدل WRF با هسته ARW و هم‌چنین برای در اختیار قراردادن مجموعه‌ای از نقطه‌نظرات سازنده و پیشنهادات حاصله در رابطه با کاربست مدل WRF-ARW در شبیه‌سازی بارش، سعی شد با گردآوری، مرور و جمع‌بندی، نتایج چندی از پژوهش‌های انجام‌پذیرفته (در داخل کشور) ارائه شوند. از این‌رو طبیعی است که مقاله‌های بیش‌تری نه‌تنها در داخل کشور بلکه در خارج از کشور توسط پژوهش‌گران کشورمان منتشر شده‌اند که در اینجا مجال بررسی همه آن‌ها در قالب یک مقاله مروری نبود و به‌طور مشخص یکی از اهداف پژوهشی نویسندگان این مقاله در آینده خواهد بود.

**کلیدواژه‌ها:** ریزمقیاس‌نمایی دینامیک، شبیه‌سازی بارش، مدل عددی، WRF.

## A review of the WRF-ARW numerical model's performance as a tool for precipitation simulations over Iran

Mohammad Amin Maddah<sup>1\*</sup>, Fatemeh Parhizkar<sup>2</sup>

1. Assistant Professor, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2. Undergraduate Student, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Received: July 22, 2021

Accepted: October 04, 2021

### Abstract

Knowledge of the spatial distribution and intensity of an impending heavy rainstorm improves the accuracy of management decisions made before, during, and after the storm. Thanks to advances in science, particularly in the field of computer calculations and solving advanced atmospheric equations based on valid physical and dynamic equations, everyone, especially managers and planners of water resources, now can predict how the weather will change in the near future with less uncertainty than in the past. Researchers have recently regarded the Weather Research and Forecasting (WRF) mesoscale model as an essential tool for atmospheric studies and forecasting, because it combines the most recent advances in atmospheric sciences with a set of physical parameterization options (cloud microphysics, radiation, convection, boundary layer turbulence, surface temperature, and moisture treatment at a sub-grid scale) to produce a dynamic downscaling model in simulating atmospheric processes. Therefore, in the current study, we attempted to collect, review, and summarize the results of several studies conducted (within the country) in order to familiarize the audience with the WRF model with ARW core, as well as to provide a set of constructive points of view and suggestions regarding the application of the WRF-ARW model in precipitation simulation. Naturally, domestic researchers have published so many investigations both within the country and overseas that there was no way to examine them all in the form of a review article; however, this will undoubtedly be one of the authors' future study goals.

**Keywords:** Dynamic downscaling, Numerical model, Precipitation simulation, WRF.

## مقدمه

بارش به منزله یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین مؤلفه‌های اصلی هواشناسی تأثیر زیادی در اقلیم و فرایندهای آب‌شناختی چه برای پژوهش و چه در پیش‌بینی دارد. بارش از جمله کمیت‌هایی است که پیش‌بینی درست و به‌موقع آن دارای اهمیت زیادی است. هر ساله، بارندگی شدید منجر به جاری‌شدن سیل می‌شود و صدمات زیادی به صنایع، تأسیسات آبی، کشاورزی و جوامع انسانی وارد می‌کند. بنابراین پیش‌بینی و پیش‌آگاهی از هنگام وقوع ریزش‌های جوی سبب کاهش تلفات و خسارت‌های وارده خواهد شد. یکی از مؤثرترین مراحل در ایجاد طرح اضطراری کنترل سیل، پیش‌بینی بارندگی شدید است. روش‌های آماری مختلفی از قبیل روش‌های هوشمند<sup>۱</sup> (Basha et al., 2020)، مدل‌های سری‌زمانی<sup>۲</sup> (Mehdizadeh, 2020) و نظریه موجک<sup>۳</sup> (Ghamariadyan et al., 2021) برای پیش‌بینی پارامترهای جوی، از جمله بارش، تاکنون پیشنهاد شده است. امروزه، انسان تا حدودی توانسته در زمینه علم هواشناسی با کشف قوانین موجود در جو و با بهره‌گیری از ابزارهای محاسباتی از رخدادهای جو آگاهی داشته باشد. به‌عنوان مثال عوامل اصلی تأثیرگذار در تشکیل ابرها و بارش؛ رطوبت، میزان فراوانی هواویزها، دمای هوا و سرعت باد قائم می‌باشند که تغییر در هر یک از این پارامترها می‌تواند بر ریزش‌های جوی تأثیرگذار باشد. با استفاده از شبیه‌سازی<sup>۴</sup> فرایندها تحت قوانین دقیق و کامل‌تر، می‌توان مدلی به‌منظور پیش‌بینی واقعی‌تر وضع هوا داشت.

مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا<sup>۵</sup> نقش اساسی در بهبود کیفیت پیش‌بینی‌ها دارند و در دهه گذشته بسیار موردتوجه قرار گرفته‌اند. مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های هواشناسی با دامنه متوسط<sup>۶</sup> (ECMWF)، مراکز ملی پیش‌بینی محیط‌زیست<sup>۷</sup> (NCEP)، آژانس هواشناسی ژاپن<sup>۸</sup> (JMA)، دفتر هواشناسی انگلستان<sup>۹</sup> (UKMO)، خدمات هواشناسی

کانادا<sup>۱۰</sup> (MSC) و سایر مراکز پیش‌بینی مشابه از جمله مراکز مختلف هواشناسی هستند. آن‌ها با حل مدل‌هایگردش عمومی<sup>۱۱</sup> جو، شرایط جوی را نشان می‌دهند (Hong et al., 2004). محصولات این مراکز در سطح وسیع با تفکیک مکانی<sup>۱۲</sup> پایین شبکه می‌شوند. در نتیجه عدم تطابق بین مقیاس پیش‌بینی‌ها و مقیاس موردنیاز در مطالعات هواشناسی و هیدرولوژیکی، روش‌های ریزمقیاس‌نمایی<sup>۱۳</sup> ایجاد شده‌اند (Cloke & Pappenberger, 2009). روش‌های دینامیک و آماری دو نوع تکنیک ریزمقیاس‌نمایی هستند. مدل عددی هواشناسی میان‌مقیاس WRF<sup>۱۴</sup> یک روش ریزمقیاس‌نمایی دینامیک است که اخیراً مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است. مدل WRF با مشارکت بیش از ۱۵۰ مؤسسه و دانشگاه در سراسر جهان ایجاد شده است.

به‌کمک مدل عددی میان‌مقیاس WRF می‌توان از چند ساعت تا چند روز قبل از وقوع رخداد هواشناسی را پیش‌بینی و در صورت لزوم اطلاعیه‌های لازم را صادر کرد. علاوه‌بر هسته پیشرفته تحقیقاتی<sup>۱۵</sup> (WRF-ARW)، مدل WRF با داشتن هسته‌های محاسباتی دیگر برای حل معادلات جوی مختلف مثل شیمی هوا (WRF-Chem)، هیدرولوژی (WRF-Hydro)، آتش‌سوزی در مناطق طبیعی (WRF-Fire)، هواشناسی شهری (WRF-Urban)، طوفان‌های حاره‌ای (HWRF)، انرژی تابش‌خورشیدی و باد (WRF-Solar)، پیچک‌های بزرگ‌مقیاس<sup>۱۶</sup> (WRF-LES)، محیط قطبی (Polar WRF) و غیره می‌تواند در شبیه‌سازی بسیاری از پدیده‌های مرتبط با جو به‌کار گرفته شود.

استفاده از مدل هواشناسی WRF-ARW در پژوهش‌های علوم جوی در کشورهای مختلف جهان روند رو به رشد داشته و هم‌چنان به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارها در مطالعه فرایندهای جوی (Mahala et al., 2021; Emmanouil et al., 2021) و پیش‌بینی (Duzenli et al., 2021; Yang et al., 2021) مورد استفاده

دامنه‌های محاسباتی<sup>۲۱</sup> در شبیه‌سازی- درون‌یابی میدان‌های ثابت شامل ناهمواری و کاربری اراضی به شکل مدل و نیز استخراج میدان‌های پیش‌بینی یک مدل تمام‌کره‌ای به منظور فراهم کردن شرایط اولیه و مرزی<sup>۲۲</sup> سیستم، مورد استفاده قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که منظور از دامنه محاسباتی (دامنه شبکه)، محدوده جغرافیایی شبکه‌ای از نقاط است که معادلات وضع جوی توسط مدل در محل نقاط گره این شبکه حل می‌شود.

۲- WRF-VAR<sup>۲۳</sup>: انجام این بخش در اجرای مدل اختیاری می‌باشد. می‌توان برای داده‌گذاری<sup>۲۴</sup> مشاهدات تکمیلی به تحلیل درون‌یابی و ایجاد شده توسط WPS و نیز به روز کردن شرایط اولیه و مرزی سیستم در دامنه‌های WRF زمانی که مدل به صورت چرخه متناوب اجرا می‌شود، از WRF-VAR استفاده نمود.

۳- حل‌کننده ARW<sup>۲۵</sup>: جزو مؤلفه‌های کلیدی سامانه مدل‌سازی است و از چندین برنامه مقادردهی اولیه برای شبیه‌سازی‌های ایده‌آل شده<sup>۲۶</sup> و داده‌واقعی<sup>۲۷</sup> و برنامه انتگرال‌گیری عددی ترکیب شده پشتیبانی می‌کند. این برنامه هم‌چنین شامل یک برنامه برای دامنه‌سازی یک‌طرفه<sup>۲۸</sup> است.

۴- ابزارهای گرافیکی: برون‌دادهای WPS و WRF که به فرمت NetCDF هستند توسط این ابزارهای گرافیکی تصویرسازی و نمایش داده می‌شوند.

قرار دارد (شکل ۱). در کشورمان نیز پژوهش‌های بسیار را می‌توان مورد اشاره قرار داد. هدف اصلی این مقاله مروری، تشویق پژوهش‌گران در استفاده از این مدل و آشنایی با محدودیت‌ها و مزایای حاصله و منتشر شده مرتبط با پیش‌بینی عددی بارش در ایران است. لذا با توجه به محدودیت ارائه مطالب در این قالب، در ادامه پس از ارائه توضیح مختصر در خصوص مدل و اجزای آن، جهت آشنایی با دستاوردهای منتشر شده داخلی به بررسی تعدادی از پژوهش‌های پیرامون ارزیابی عملکرد مدل در پیش‌بینی ریزش‌های جوی (بارش) در ایران می‌پردازیم. در انتها با جمع‌بندی مرور صورت‌گرفته پیشنهادات بیان می‌شوند.

از زمان انتشار عمومی مدل در سال ۱۳۷۹، مدل WRF مورد استفاده‌ترین مدل جوی در جهان قرار گرفته است و جزو پیشرفته‌ترین و کاربردی‌ترین مدل‌ها و جایگزین مدل قبلی MM5<sup>۱۷</sup> شده است (شکل ۲). فرم شبکه C-Arakawa در این مدل غیرهیدرواستاتیک<sup>۱۸</sup> استفاده شده است. مقادیر جرمی پارامترهایی مانند فشار، دما، رطوبت و سایر موارد در هر گره شبکه<sup>۱۹</sup> شبکه اندازه‌گیری می‌شود. به‌طور کلی مدل WRF از چهار بخش اصلی تشکیل شده است که عبارتند از:

۱- سامانه پیش‌پردازش<sup>۲۰</sup> (WPS): برای تعریف

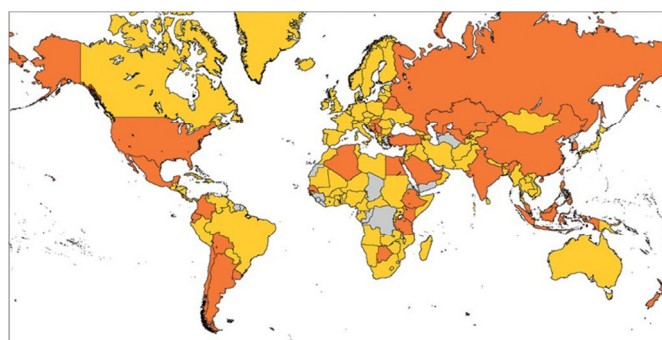
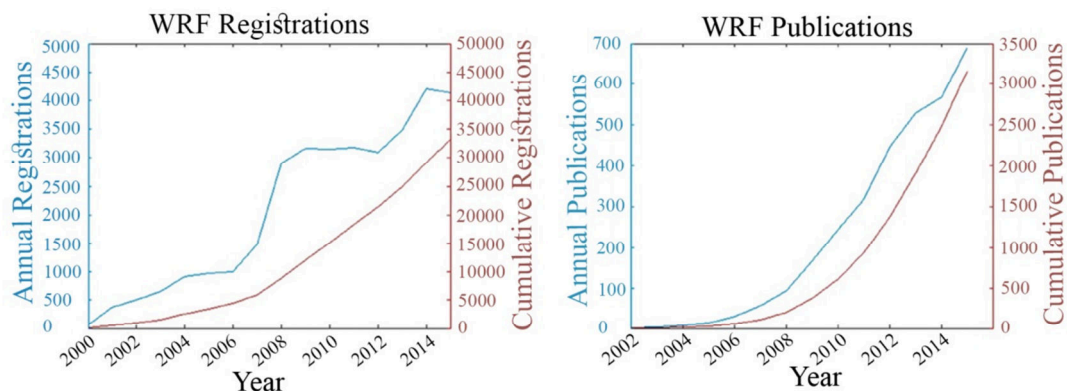


Figure 1. Countries where have registered WRF users (yellow) and that, in addition to logged-registered users, the WRF model has been run operationally (orange) through 2015; (Powers et al., 2017).



**Figure 2.** The number of WRF-related publications and WRF registration from the initial public release in 2000 through 2015 (Powers *et al.*, 2017). The red graph shows the cumulative and the blue shows the annual values. The number of users who are actively running the model is unknown.

دیده‌بانی متناظر با آن‌ها برای ۱۲۷ ایستگاه همدید در ایران استخراج و مورد ارزیابی قرار داده شد. نتیجه حاصل شده حاکی از آن بود که در وضعیت پیش‌بینی احتمال وقوع بارش مدل WRF از دقت قابل‌قبولی برخوردار است.

شبیه‌سازی بارش منجر به سیل در استان قم در تاریخ ۱۱ فروردین‌ماه ۱۳۸۸ در سه دامنه تودرتو مدل WRF توسط Torabian & Heidari (2019) انجام شد تا با افزایش مهارت پیش‌بینی‌های مدل و صدور پیش‌آگاهی از وقوع این‌چنین رخدادهایی، بتوان اقدامات احتمالی در جهت کاهش خسارت‌ها و تلفات را انجام داد. بارش تجمعی توسط برنامه NCL<sup>۳۲</sup> به‌صورت گرافیکی و کمی استخراج شد. در نتیجه ایشان بیان داشتند که مدل پیش‌بینی صحیح‌تری از بارش حداکثری رخ داده‌شده در قسمت‌های جنوبی و مرتفع استان نسبت به مناطق شمالی و مرکز قم دارد.

پیش‌بینی بارش در دوره هشت ماهه (آبان‌ماه ۱۳۸۷- خردادماه ۱۳۸۸) با استفاده از مدل WRF روی پهنه‌ی ایران توسط Azadi *et al.* (2012a) انجام شد. بارش‌های تجمعی ۲۴ ساعته در افق‌زمانی پیش‌بینی<sup>۳۳</sup> ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته با مقادیر ۲۷۰ ایستگاه همدیدی مورد مقایسه قرار گرفته شد. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که به‌طورکلی در

داده‌های شرایط اولیه و مرزی به مدل WRF در اجرا به‌حالت غیرایده‌آل، یا از برون‌داد مستقیم و داده‌های تحلیل<sup>۳۰</sup> مدل‌های گردش عمومی جو (Analysis) یا از داده‌های بازتحلیل شده<sup>۳۱</sup> (Reanalysis) این برون‌دادها تأمین می‌شود. در نتیجه، کاربر با توجه به اهداف و بودجه، از منابع متفاوت مانند محصولات NCEP یا ECMWF، استفاده می‌کند. اطلاعات کامل و موردنیاز کاربران درخصوص فیزیک و دینامیک مدل WRF در وبگاه ارائه‌دهنده ([https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_v4/contents.html](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_v4/contents.html)) به‌صورت راهنمای مجزا برای هر نسخه در دسترس قرار گرفته است. بنابراین، در اینجا از مرور این اطلاعات خودداری شده و خوانندگان به مطالعه Powers *et al.* (2017) و Skamarock *et al.* (2019) دعوت می‌شوند.

**مرور چندی از مطالعات انجام‌شده توسط WRF-ARW (در ارتباط با شبیه‌سازی بارش، منتشره در داخل کشور)**  
Azadi *et al.* (2009) عملکرد مدل WRF در پیش‌بینی بارش روی ایران برای دوره یک ماه از تاریخ ۱۱ دی‌ماه تا ۱۱ بهمن‌ماه ۱۳۸۶ را مورد بررسی قرار دادند. برون‌داد مدل برای بارش تجمعی ۲۴ و ۴۸ ساعته و مقادیر

است. در ۲۴ ساعت اول مدل فروپیش‌بینی و در ۲۴ ساعت دوم مدل فرارپیش‌بینی<sup>۳۸</sup> داشته است. به عنوان نتیجه کلی پیش‌بینی مدل در وقوع بارش منجر به سیل در حوضه آبریز کارون را همراه با دقت قابل قبولی دانسته‌اند. Negah *et al.* (2015) با استفاده از مدل عددی WRF با

دو دامنه (با تفکیک افقی سه و نه کیلومتری) به شناسایی و واکاوی سازوکار شرایط همدیدی- دینامیکی سامانه‌های منجر به شکل‌گیری الگوی مکانی برف‌های جلگه مرکزی گیلان (برف دلتا) در ترازهای مختلف جوی پرداختند. با استفاده از تصاویر سنجیده مودیس<sup>۳۹</sup>؛ ماهواره‌های آکوا و ترا<sup>۴۰</sup> (فرمت رستری و برای یک دوره ۳ ساله با فواصل زمانی روزانه با تفکیک افقی<sup>۴۱</sup> ۲۵۱ متر) الگوی مکانی ویژه مثلثی و به‌طور تقریبی منطبق بر دلتای رودخانه سفیدرود شناسایی شد. به‌جز سازوکار فیزیکی و دینامیکی حاکم بر فرایند بارش برف، پستی و بلندی منطقه و وجود دره زمین‌ساختی منجیل در رشته کوه البرز، تنها مسیر نفوذ هوای سرد فلات ایران به جلگه گیلان معرفی شد که با شکل‌گیری الگوی مکانی دلتا مطابقت داشته است.

مسأله پیش‌بینی عددی وضع هوا یک مسأله مقدار مرزی- اولیه است. بنابراین، پیش‌بینی نیازمند دانستن شرایط اولیه جو است که البته باید بهترین برآورد ممکن از حالت جو باشد. مدل‌های منطقه‌ای پیش‌بینی عددی وضع هوا دارای خطاهایی هستند که بخشی از این خطاها ناشی از عدم قطعیت<sup>۴۲</sup> موجود در شرایط اولیه مدل است. مطالعه موردی اثر داده‌گذاری ایستگاه دیده‌بانی و جوی بالا بر برون‌داد بارش مدل WRF روی منطقه ایران توسط Azadi *et al.* (2016) مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور مدل برای چهار سامانه بارشی برگزیده یک بار با استفاده از داده‌گذاری و بار دیگر بدون استفاده از آن اجرا و برون‌داد هر حالت تا ۷۲ ساعت به‌طور متناظر مقایسه شده است. نتایج نشان داد که داده‌گذاری تأثیر مطلوبی بر

آستانه<sup>۳۴</sup> بارش متوسط و همین‌طور در شرق و جنوب شرق کشور (که منطقه‌ای کم‌بارش و با تعداد ایستگاه‌های دیده‌بانی کم است) پیش‌بینی‌ها ضعیف‌تر و در شمال کشور با بیش‌ترین میزان بارش می‌توان پیش‌بینی‌های بهتری از مدل انتظار داشت.

در پژوهش دیگر Azadi *et al.* (2012b) بارندگی روزانه در سطح ایران برای بازه شش‌ماهه (از اول آبان‌ماه ۱۳۸۷ تا ۱۰ اردیبهشت‌ماه ۱۳۸۸) توسط مدل WRF را شبیه‌سازی و مورد پس‌پردازش (با دو روش برآوردگر ساده و روش میانگین متحرک) نموده و نتایج دامنه داخلی را در مقابل داده‌های دیده‌بانی ۲۰۵ ایستگاه همدید هواشناسی مورد ارزیابی قرار دادند. مدل با دو دامنه (تفکیک افقی ۴۵ و ۱۵ کیلومتری) اجرا شد. نتایج نشان دادند که در برخی ایستگاه‌ها و برای روزهایی که بارندگی‌های همرفتی و رگباری وجود داشته است اعمال پس‌پردازش تأثیر چندانی نداشته است (فروپیش‌بینی<sup>۳۵</sup> حتی در مقادیر پس‌پردازش شده قابل توجه است). در انتها ایشان بیان داشتند از آنجایی که سازوکار تشکیل این نوع بارش از نوع پدیده‌های کوچک‌مقیاس<sup>۳۶</sup> و محلی بوده لذا مدل WRF به‌خوبی قادر به پیش‌بینی این بارش نبوده است.

راستی‌آزمایی نتایج مدل در پیش‌بینی بارش سنگین منجر به سیل در حوضه آبریز کارون برای یک واقعه بارشی (۲۰ تا ۲۱ بهمن‌ماه ۱۳۸۴) توسط Ghafarian and Berekati (2013) انجام پذیرفت. داده‌های دیده‌بانی شده بارش و داده‌های بارش TRMM<sup>۳۷</sup> برای راستی‌آزمایی مدل استفاده شدند. مدل با دو دامنه ۴۵ و ۱۵ کیلومتری در افق زمانی ۲۴ و ۴۸ ساعته اجرا شد. نتایج آماری در سه آستانه بارشی وقوع یا عدم وقوع، متوسط و سنگین در ۲۴ ساعت اول و دوم نشان داد که الگوی بارش و میزان آن به‌درستی پیش‌بینی شد. مدل در ۲۴ ساعت اول و دوم در آستانه وقوع یا عدم وقوع بارش بسیار دقیق عمل کرده

Rahmanian *et al.* (2012) عملکرد مدل در پیش‌بینی مخاطرات جوی حاصل از یک سامانه بارشی قوی (۲۵ تا ۲۹ فروردین ماه ۱۳۹۱) در ایران را مورد ارزیابی قرار دادند. داده‌های بازتحلیل NCEP با تفکیک افقی ۱ درجه در کنار مقادیر دیده‌بانی ایستگاه‌های هواشناسی همدید جهت ارزیابی برون‌داد مدل و تحلیل هم‌دید شرایط بارشی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد که این سامانه بارشی روی مدیترانه تشکیل شده و در هنگام ورود به کشور با تقویت کم فشار و نفوذ پرفشار از عرض‌های شمالی بارش‌های قابل ملاحظه‌ای را ایجاد کرده است. در نتیجه بین پیش‌بینی مدل با واقعیت سازگاری خوبی یافت و پیشنهاد شد که از مدل WRF می‌توان در امر کشاورزی و به‌حداقل رساندن خسارت‌های ناشی از بارندگی و در نتیجه افزایش راندمان بهره جست.

در مطالعه دیگر Faridmojtahedi *et al.* (2017) توسط مدل WRF (در دو دامنه هفت و ۶۱ کیلومتر) توزیع مکانی کانون‌های تمرکز ارتفاع برف سه سامانه بارشی در جلگه گیلان را مورد واکاری قرار دادند. برای ارزیابی نتایج از داده‌های سنجنده مودیس ماهواره ترا و هم‌چنین شدت بارش خروجی رادار گیلان استفاده شد. نتایج بیان‌گر دقت قابل قبول برون‌داد مدل در شبیه‌سازی مقادیر بارش و آشکارسازی دو هسته بیشینه ارتفاع برف یکی در جلگه مرکزی گیلان و دیگری اطراف تالاب انزلی بوده است.

رطوبت، میزان فراوانی هواویزها و سرعت باد قائم به گونه‌های مختلف بر انواع هسته‌سازی در ابر تأثیر داشته و در شرایط متفاوت می‌توانند باعث کاهش یا افزایش هسته‌سازی و در نتیجه افزایش یا کاهش بارش شوند. لذا Pourghasemi Ardakani & Memarian (2018) در پژوهش خود سعی کردند تا اثر تغییر برخی از این عوامل در طرح‌واره<sup>۴۵</sup> خردفیزیک<sup>۴۶</sup> مدل WRF بر دقت

برون‌داد بارش داشته و پیش‌بینی آن را بهبود بخشیده است. از نظر کیفی و با روش درستی‌سنجی بصری<sup>۴۳</sup> (قیاس میدان بارش مدل‌شده و مشاهداتی)، الگوی بارش با استفاده از کشانش<sup>۴۴</sup> شباهت بیشتری با الگوی بارش واقعی دارد. به‌ویژه این‌که کاربست این روش داده‌گواری بیش‌ترین بهبود را روی پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت (۲۴ و ۴۸ ساعته) داشته و بعد از آن به تدریج اثر داده‌گواری روی بهبود نتایج کم شده است.

Memarian & Daman Afshan (2016) عملکرد مدل WRF در پیش‌بینی مقدار ابرناکی در پهنه ایران را بررسی کردند. دوره پنج‌روزه‌ای به‌گونه‌ای انتخاب شد تا داده‌های ایستگاهی دیده‌بانی‌شده گسترده‌تری را در ابری و صاف‌بودن هوا داشته باشند. از تصاویر ماهواره سنجنده مودیس جهت ارزیابی‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل WRF هوای صاف را خوب و به‌طور کامل پیش‌بینی می‌کند هرچند دارای فرابیش‌بینی است. زمانی که پوشش ابری کامل است مدل پیش‌بینی قابل قبولی دارد ولی برای هوای نیمه‌ابری خروجی مدل ضعیف است و فروپیش‌بینی دارد.

Karimkhani *et al.* (2018) در پژوهش خود تأثیر تفکیک افقی دامنه محاسباتی مدل WRF بر دقت پیش‌بینی بارش در حوضه‌های آبریز کرخه و کارون را بررسی نمودند. در مجموع از دیده‌بانی‌های ۴۲ ایستگاه همدید برای واسنجی شبیه‌سازی‌ها در ۵ مورد بارش سنگین منجر به سیل در سه دامنه (چهار، ۱۲ و ۳۶ کیلومتری) استفاده کردند. ایشان بیان داشتند که مدل WRF در پیش‌بینی بارش در کل حوضه آبریز کرخه و کارون در دامنه با تفکیک افقی بالاتر (چهار کیلومتری) دقت قابل قبول‌تری داشته و کم‌ترین درصد خطا را به‌خود اختصاص داده است. نتیجه‌گیری نهایی ایشان حاکی از اثر مثبت افزایش تفکیک افقی بر توانایی مدل در پیش‌بینی بارش داشته است.

مازندران) به عنوان مناطق درگیر واقعه به نواحی جنگلی (مرتفع و پست) و کوهستانی (دارای شیب کم و زیاد) تقسیم شدند. از تصاویر سنجنده مودیس ماهواره ترا ([www.ncids.org](http://www.ncids.org)) با تفکیک مکانی ۵۰۰ متر و تفکیک زمانی روزانه جهت ارزیابی برون‌داد مدل استفاده شد. نتایج ایشان نشان‌دهنده وجود عدم قطعیت بالا در برآورد کسپوشش برف و ارتفاع برف در نواحی دارای توپوگرافی پیچیده و دارای ناهمگنی سطح است. در نتیجه، بهترین عملکرد مدل به نواحی پست و کم‌ارتفاع با بالاترین ضریب کارایی و کوچک‌ترین میانگین مطلق خطا اختصاص داشته است.

Salahi *et al.* (2020) کیفیت برآورد بارش توسط رادار (ایستگاه گیاهر)، داده‌های ماهواره GPM-IMERG<sup>۴۸</sup> و مدل WRF را در قیاس با داده‌های دیده‌بانی روزانه در ۱۲ ایستگاه همدید استان گیلان برای دو رخداد بارشی بررسی نمودند. مدل WRF با داده‌های ورودی NCEP-FNL اجرا و در محیط نرم‌افزار متلب پردازش و سپس تصاویر بارش استخراج شد. نتیجه مهم به دست آمده این بود که در رخداد اول رادار بالاترین همبستگی و کم‌ترین خطا و پس از آن WRF و GPM-IMERG با ضریب همبستگی برابر بهترین تطبیق با داده‌های زمینی را داشته‌اند، در صورتی که در رخداد دوم مدل WRF بالاترین همبستگی و کم‌ترین خطا و سپس رادار و GPM-IMERG بهترین تطبیق با داده‌های زمینی را دارند.

یکی از چالش‌های همبستگی در شبیه‌سازی وضع هوا، پیش‌بینی صحیح بارش به‌ویژه بارش‌های همرفتی فصل بهار است. مدل WRF دارای طرح‌واره‌های پارامتری‌سازی فیزیکی گسترده‌ای است که انتخاب هر گروه از این طرح‌واره‌ها می‌تواند در نتایج پیش‌بینی مدل تأثیر قابل‌ملاحظه داشته باشد. اما گاهی با وجود به‌کارگیری طرح‌واره‌های مختلف، بهبود کافی در دقت پیش‌بینی

شبیه‌سازی بارش روی ایران را ارزیابی کنند. در این راستا مدل WRF با طرح‌واره خردفیزیک مدنظر در اجرای اول بدون تغییر در طرح‌واره، در شبیه‌سازی بعدی با تغییر در برخی از پارامترهای طرح‌واره برای یک منطقه پنج بار اجرا شد. خروجی مدل نشان داد که افزایش دو برابری شعاع میانگین هواویزها در نهایت باعث کاهش بارش می‌شود. با دو برابر شدن سرعت باد قائم در تراز تشکیل و گسترش ابر میزان بارش نسبتاً خوبی نسبت به شبیه‌سازی پایه داشت. افزایش دو برابری هواویزها در منطقه تشکیل و گسترش ابر در نهایت موجب افزایش نسبتاً چشم‌گیر بارش در سطح شد که این افزایش بارش می‌تواند به علت افزایش هسته‌سازی تصنعی در ابر باشد.

Goodarzi *et al.* (2018) عملکرد مدل WRF (با سه دامنه ۲۷، ۹ و ۳) در شبیه‌سازی بارش‌های سنگین روزانه در حوضه آبریز رودخانه کن را ارزیابی کردند. داده‌های شرایط اولیه- مرزی NCEP و نتایج حاصل از برون‌داد مدل (ریزمقیاس‌نمایی دینامیک) با مقدار بارش مشاهداتی ثبت‌شده در ایستگاه‌های باران‌سنجی مقایسه شدند. نتایج نشان‌دهنده فروپیش‌بینی توسط NCEP بوده است. علاوه بر این خطای مشهود در پیش‌بینی وقوع بارش دیده شد، اما از طرفی مدل WRF در پیش‌بینی بارش‌های سنگین عمل‌کرد مطلوب داشته است. در پایان نویسندگان توصیه به استفاده از مدل WRF در تدوین و توسعه سیستم سیلاب در حوضه‌های سیل‌خیز کشور در ترکیب با مدل هیدرولوژیکی جهت پیش‌بینی سیلاب نموده‌اند.

Khodamoradpour & Irannejad (2020) عملکرد مدل برف جفت‌شده<sup>۴۷</sup> در مدل WRF (با فاکتور ذوب برف واسنجی‌شده) را در نواحی با توپوگرافی متفاوت در شبیه‌سازی بارش‌های بارش سنگین برف سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ مورد ارزیابی قرار دادند. استان‌های غربی (همدان و کردستان) و استان‌های شمالی (اردبیل، گیلان و

سیلاب در حوضه آبریز کارون ۴ پرداختند. بدین منظور ایشان شبیه‌سازی مقادیر ساعتی بارش و دمای هوا حاصل شده از برون‌داد مدل با هشت پیکربندی متفاوت را برای واقعه بارش منجر به سیل اسفندماه ۱۳۹۴ آزمودند. از نتایج ایشان می‌توان نتیجه گرفت که طرح‌واره لایه‌مرزی<sup>۱</sup>، طرح‌واره خردفیزیک و طرح‌واره تابشی<sup>۲</sup> در عملکرد مدل در پیش‌بینی این واقعه از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. پیشنهاد شد تا در تهیه سیستم پیش‌بینی و هشدار سیل در منطقه مورد مطالعه از پیش‌بینی بارش و دمای هوای ساعتی با مدل WRF در ترکیب با مدل هیدرولوژیکی جهت پیش‌بینی هیدروگراف سیلاب استفاده شود.

عدم قطعیت پارامترهای مدل‌های بارش- رواناب، منابع اصلی عدم قطعیت در پیش‌بینی به‌هنگام سیل می‌باشند. با استفاده از بارش و دمای هوای پیش‌بینی شده توسط مدل WRF، Mehralipour et al. (2020) به بررسی عدم قطعیت پارامترها با روش مونت- کارلو در پیش‌بینی سیل در حوضه آبریز دز (مطالعه موردی) پرداختند. مدل WRF با یک دامنه (تفکیک افقی ۵۰ کیلومتری) برای هشت پیکربندی متفاوت اجرا شد. نتایج این پژوهش نشان داد که با در نظر گرفتن عدم قطعیت هم‌زمان در تمام پارامترها، عدم قطعیت در دبی اوج هیدروگراف سیل بیش‌تر از عدم قطعیت در حجم هیدروگراف پیش‌بینی شده است. بنابراین با کاهش مراحل پیش‌بینی و هشدار سیل بر مبنای ریسک و نیز به کمیت درآوردن عدم قطعیت، اطلاعات تکمیلی در مورد پیش‌بینی‌ها فراهم شده و به مسئولین و مدیران تصمیم‌گیرنده کمک می‌کند تا به نحو مناسب‌تر اقدامات و عملیات مقتضی در جهت کنترل و کاهش خسارت‌ها را لحاظ کنند.

همان‌طور که گفته شد، کاهش خسارت‌های سیلاب‌های مخرب با رویکردهای مختلفی امکان‌پذیر است، که یکی

حاصل نمی‌شود. بنابراین لازم است با توجه به عامل تشکیل‌دهنده بارش، طرح‌واره‌های مناسب انتخاب شوند. در پژوهشی Khansalari & Ranjbar Saadatabadi (2020) به بررسی علل تفاوت در عملکرد مدل WRF در پیش‌بینی بارش دو سامانه جوی در فصل بهار با عوامل دینامیکی متفاوت، به منظور انتخاب طرح‌واره‌های مناسب‌تر جهت پیش‌بینی بهتر بارش پرداختند. بدین منظور مدل WRF توسط ایشان با ۹ پیکربندی<sup>۳</sup> مختلف از طرح‌واره‌های فیزیکی اجرا و با توجه به عوامل دینامیکی و از مقایسه برون‌داد و مقادیر دیدبانی شده پیکربندی مناسب برای هر نوع سامانه جوی معرفی شد. ایشان در نتیجه گفتند که جهت نیل به پیش‌بینی دقیق‌تر توجه به طرح‌واره همرفتی حائز اهمیت‌ترین است، چراکه وجود اثر بالای طرح‌واره همرفتی در پیش‌بینی مقدار بارش و وابستگی شدیدی این طرح‌واره به عامل ایجاد ناپایداری مشهود بود.

پیش‌بینی کاهش دید افقی ناشی از مه و بارش با استفاده از مدل WRF در تهران (دو ایستگاه فرودگاه امام خمینی و فرودگاه مهرآباد) توسط Jaber et al. (2021) مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به کامل و نسبتاً قابل اعتماد بودن داده‌های دیده‌بانی در این دو ایستگاه، روزهای ۱۷ اسفندماه ۱۳۹۱ و ۲۱ دی‌ماه ۱۳۹۲ به‌عنوان نمونه روزهایی که در آن کاهش دید افقی به دلیل پدیده‌های بارش باران، برف و مه رخ داده است، انتخاب شدند. میزان دید افقی با کدنویسی چهار روش پارامتری‌سازی<sup>۴</sup> در مدل WRF برآورد و سپس با دید افقی گزارش شده در ایستگاه‌ها مقایسه شد. نتایج نشان داد کارایی روش به نوع پدیده مورد مطالعه بستگی دارد، به‌گونه‌ای که پیش‌بینی دید افقی در هنگام بارش نسبت به رخدادهای دقت بالاتری برخوردار خواهد بود.

Shirali et al. (2021) در مقاله خود به ارزیابی عملکرد مدل WRF در شبیه‌سازی بارش و پیش‌بینی



رواناب گزارش شده با هیدروگراف حاصله از داده‌های مدل بدون پس‌پردازش (خام) و نیز پس‌پردازش شده WRF مشخص شد که پس‌پردازش برون‌داد مدل WRF باعث افزایش دقت در پیش‌بینی رواناب حاصله در مدل هیدرولوژیک شده، به طوری که در خروجی خام هیچ‌گونه افت و خیزی روی منحنی هیدروگراف دیده نشده، اما با اعمال پس‌پردازش در بازه زمانی مذکور هیدروگراف افزایش ناگهانی دبی (دو مترمکعب بر ثانیه) را نشان داده است.

عملکرد مدل WRF تحت نه پیکربندی متفاوت از طرح‌واره‌های فیزیکی در پیش‌بینی بارش زمستانه (برای دوره سه ماهه) جنوب غرب ایران را *Sasanian et al.* (2015) مورد ارزیابی قرار دادند. تفکیک افقی ۱۵ کیلومتری دامنه برای اجرای مدل در نظر گرفته شد. فرایند راستی‌آزمایی در چهار گروه سبک، متوسط، شدید و سنگین با استفاده از دیده‌بانی در حدود ۲۴۱ ایستگاه همدید انجام گرفت. نتایج نشان از عملکرد متفاوت پیکربندی‌ها در آستانه‌های بارشی متفاوت داشتند. بدین منظور پیشنهاد می‌شود در استفاده از مدل به صورت عملیاتی حتماً گزینه اجرای همادی<sup>۴</sup> (گروهی) در نظر گرفته شود.

*Nikfal et al.* (2019) بارش منجر به سیل فروردین‌ماه ۱۳۹۸ در استان لرستان را از منظر شرایط همیدی مورد تحلیل و با استفاده از مدل WRF (دوره پنج روزه) شبیه‌سازی کردند. بارش مدل‌سازی شده از تطابق قابل قبول و مناسب با واقعیت برخوردار بود. همچنین رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF با واقعیت (که شروع سیلاب در ۱۲ فروردین‌ماه بوده است) تا حدود زیادی تطابق دارد. مدل WRF با داشتن قابلیت اجرا به صورت هم‌روزه و خودکار می‌تواند برای چند روز آینده پیش‌بینی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی تولید کند. بنابراین می‌توان با استفاده از مدل WRF سامانه‌های هشدار سیل را در مقیاس محلی و منطقه‌ای راه‌اندازی نمود.

از آن‌ها استفاده از مدل‌های عددی در پیش‌بینی بارش است. دقت پیش‌بینی بارش‌های سنگین بهار ۱۳۹۸ منجر به سیل در حوضه آبریز کارون بزرگ و کرخه با استفاده از مدل WRF و GFS<sup>۵</sup> را *Imani Amirabad et al.* (2019) مورد بررسی قرار دادند. مقادیر بارش مشاهداتی با بارش پیش‌بینی حاصل از اجرای مختلف مدل‌ها (چهار اجرا در هر روز) مقایسه شدند. نتایج نشان‌دهنده موفقیت پیش‌بینی بیش‌تر هر دو مدل در مقیاس مکانی نسبت به نقطه‌ای در افق‌زمانی ۷۲ ساعته است. همچنین در هر دو رویکرد ارزیابی نقطه‌ای و مکانی پیش‌بینی بارش، مدل منطقه‌ای (میان‌مقیاس) WRF عملکرد بهتری نسبت به مدل جهانی (بزرگ‌مقیاس) GFS داشته است.

*Akbari & Davoodi* (2019) برون‌داد مدل منطقه‌ای WRF و مدل جهانی GFS در پیش‌بینی بارش ۲۴ و ۴۸ ساعته در استان لرستان را مورد راستی‌آزمایی قرار دادند. مدل WRF با دو دامنه تودرتو (۲۷ و ۲۷ کیلومتری) در یک دوره آماری دو ماهه (فروردین‌ماه و اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۷) اجرا شد. نتایج کلی حاکی از موفقیت پیش‌بینی وقوع یا عدم وقوع در بیش از ۷۰ درصد موارد توسط مدل WRF است، اگرچه در افق‌زمانی ۲۴ ساعته می‌توان بیان داشت این دقت به حدود ۸۰ درصد رسیده است. از طرفی مدل WRF در هر دو دامنه تعداد پیش‌بینی‌های وقوع بارش بیشتری نسبت به بارش واقعی (تمایل به فراییش‌بینی) به همراه داشته است، این معیار برای مدل GFS با درصد خطای کم‌تری همراه بود.

*Bijandi* (2019) از یک مدل هیدرولوژیک در پیش‌بینی چهار سیلاب فروردین‌ماه ۱۳۹۸ در شمال شرق ایران استفاده نمود. مدل پس‌پردازش شده WRF مبتنی بر الگوریتم ازدحام ذرات شبکه عصبی و فازی بر مبنی داده‌های ماهواره GPM-IMERG جهت تأمین کمیت بارش ورودی به مدل هیدرولوژیک اجرا شد. از مقایسه

## نتیجه گیری

رشد علوم به ویژه در زمینه محاسبات کامپیوتری و حل معادلات پیشرفته جوی مبتنی بر قوانین معتبر فیزیکی-دینامیکی، باعث بهبود دقت در کسب اطلاعات از نحوه توزیع و شدت بارش محتمل در شرایط رخداد سیل شده است. در حال حاضر شبیه سازی و پیش بینی های کوتاه مدت بارش توسط مدل WRF با هسته ARW به مهم ترین ابزار در دسترس کاربران علوم آب و هوایی در جهان تبدیل شده است. از این رو در مطالعه حاضر سعی شد تا با گردآوری، مرور نتایج چندی از پژوهش های انجام پذیرفته در داخل کشور ضمن آشنایی بیشتر تر مخاطبان با مدل، مجموعه ای از نقطه نظرات سازنده و پیشنهادات حاصله در رابطه با کاربست مدل WRF-ARW در شبیه سازی بارش جمع بندی و در اختیار کاربران قرار داده شود. نکات مهم (محدودیت ها و پیشنهادات) برگرفته از مرور انجام شده در ادامه آورده شده است.

- عملکرد مدل عددی میان مقیاس WRF-ARW نسبت به عملکرد مدل جهانی GFS (داده های شرایط اولیه و مرزی) با موفقیت های بیش تری همراه است.

- تحت تأثیر پیکربندی مدل و انتخاب طرحواره های فیزیکی در آستانه های بارشی، مناطق جغرافیایی، توپوگرافی، سیستم های بارشی با سازوکار متفاوت، عملکرد مختلف داشته و نیاز به ارزیابی موردی و منطقه ای نمودن دارد.

- مدل WRF در مناطق مرطوب نسبت به مناطق کم باران عملکرد بهتری دارد.

- هوای صاف (پایدار) را بهتر از جو ابری-بارانی (ناپایدار) پیش بینی می کند.

- کارایی مدل تحت تأثیر روش های ارزیابی و کیفیت داده های دیده بانی قرار دارد. در ارزیابی منطقه ای موفق تر از ارزیابی نقطه ای است.

- مدل در پیش بینی بارش های همرفتی (کوچک مقیاس) نیاز به مطالعات بیشتر و بهبود در طرحواره ها دارد.

- عملکرد مدل در افق های زمانی مختلف متفاوت است و غالباً با افزایش افق زمانی، دقت کاهش می یابد.

- عملکرد مدل عددی میان مقیاس WRF در شبیه سازی بارش به شدت تحت تأثیر انتخاب طرحواره های لایه مرزی، طرحواره خرد فیزیک و همرفت است. استفاده از اجرای گروهی پیشنهاد می شود.

- بسیار مناسب استفاده در مطالعات پایش و بازسازی وقایع بارشی بوده چرا که کارایی مدل از دقت قابل قبولی در مقایسه با داده های بارش ماهواره ای و رادار برخوردار است.

- می توان عملکرد مدل را با افزایش تفکیک افقی دامنه محاسباتی از طریق دامنه سازی تودرتو افزایش (تأخیر) داد.

- با به کارگیری پس پردازش مقادیر، مهارت مدل در شبیه سازی بارش های گسترده (بزرگ مقیاس) را می توان افزایش داد.

- استفاده از روش داده گواری داده های بارش، می توان بهبود قابل ملاحظه ای در پیش بینی های کوتاه مدت (۲۴ و ۴۸ ساعته) ایجاد نمود.

- کارایی مدل WRF در ارزیابی خرد فرایندهای مؤثر در تشکیل باران و قطره، از طریق اعمال تغییر در پارامترهای (ضرایب و کدهای) طرحواره های فیزیکی، مفید و کاربردی است.

- با استفاده از اعمال تغییرات در کد نویسی و پارامتری سازی، به طور مطلوبی در تخمین برخی از پدیده های جوی که به صورت مستقیم از برون داد مدل مستخرج نمی شوند، کارایی دارد.

- مدل WRF-ARW جهت جفت شدن با مدل های

18. Non-Hydrostatic Model
19. Grid Point
20. WRF Pre-Processing System
21. Computational Domain
22. Initial and Boundary Conditions
23. Variational Data Assimilation System for WRF
24. Data Assimilation
25. Advanced Research WRF
26. WRF Idealized Simulations
27. WRF Real-data Simulations
28. One-Way Nesting
29. Outputs
30. Analysis Data
31. Reanalysis Data
32. NCAR Command Language
33. Forecast Lead-Time
34. Threshold
35. Underprediction
36. Microscale
37. Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) precipitation data
38. Overprediction
39. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
40. Terra and Aqua MODIS products
41. Horizontal Resolution
42. Uncertainty
43. Eyeball Verification
44. Nudging
45. Scheme
46. Microphysics
47. Coupled Model
48. Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM
49. Configuration
50. Parameterization
51. Planetary Boundaries Layer scheme
52. Radiation Scheme
53. Global Forecast System
54. Ensemble Forecasting

هیدرولوژیک در پیش‌بینی سیل و کاهش عدم قطعیت در بارش، مؤثر و کارآمد است.

- برای اجرای خودکار و همه‌روزه، جهت راه‌اندازی سامانه پیش‌بینی هواشناسی- هیدرولوژیکی در چند روز آینده در مقیاس محلی پیشنهاد می‌شود.

در انتها شایان ذکر است که طبیعتاً مقالات بیشتری نه تنها در داخل کشور بلکه در خارج از کشور توسط پژوهش‌گران کشورمان منتشر شده‌اند که در اینجا مجال بررسی همه آن‌ها در قالب یک مقاله مروری نبود. تأیید موارد یادشده فوق نیازمند آزمایش‌ها و مطالعه بیشتری توسط پژوهش‌گران عرصه پیش‌بینی‌های جوی است. به‌طور مشخص یکی از اهداف پژوهشی نویسندگان این مقاله در آینده مرور منابع منتشره در خارج از کشور جهت تدقیق نتایج حاصله خواهد بود.

### تشکر و قدردانی

از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (SCU.WH99.44131:GN) در انجام این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌گردد.

### تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

### منابع

- Akbari, Z., & Davoodi, R. (2019). 24 and 48 hour rainfall forecast verification of WRF and GFS regional model with observational data in Lorestan province, In: Proceeding of 4th International Congress of Developing Agriculture, Natural Resources, Environment and Tourism of Iran, 13-15 Feb., Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran, 1-13. (In Persian).
- Azadi, M., Ghazi Mir Saeed, M., & Jafari, S. (2009), Performance evaluation of WRF model for forecasting rainfall in Iran for one month, In: Proceeding of 12th Conference on Fluid Dynamics, 28-30 April, Babol Noshirvani university of technology, Babol, Iran, 1-6. (In Persian).

### پی‌نوشت‌ها

1. Intelligent Methods
2. Time series Models
3. Wavelet Theory
4. Simulation
5. Numerical Weather Prediction
6. The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
7. National Centers for Environmental Prediction
8. Japan Meteorological Agency
9. United Kingdom Met Office
10. The Meteorological Service of Canada
11. General Circulation Model (GCM)
12. Spatial Resolution
13. Downscaling
14. The Weather Research and Forecasting (WRF) Mesoscale Model
15. Advanced Research WRF
16. Large-Eddy-Scale Modeling
17. Fifth-Generation NCAR/ Penn State Mesoscale Model

- Azadi, M., Shirgholami, M. R., Hajjam, S., & Sahraian, F. (2012b). WRF Model Output Postprocessing for Daily Precipitation over Iran, *Iran Water Resources Research*, 7(4), 71. (In Persian).
- Azadi, M., Soufiyani, M., Vakili, G., & Ghaemi, H. (2016). A case study on the impact of synoptic and upper air data assimilation in WRF output for precipitation over Iran, *Iranian Journal of Geophysics*, 10(2), 110-119. (In Persian).
- Azadi, M., Taghizadeh, E., & Memarian, M. H. (2012a). Verification of WRF Precipitation Forecast over Iran Country during Nov. 2008-Jun. 2009, *Iran Water Resources Research*, 8(2), 48. (In Persian).
- Basha, C. Z., Bhavana, N., Bhavya, P., & Sowmya, V. (2020). Rainfall Prediction using Machine Learning & Deep Learning Techniques. In *2020 International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)* (pp. 92-97). IEEE.
- Bijandi, M. (2019). Flood Prediction Using HEC-1 Model and WRF Postprocessed Model Based on Neural and Fuzzy Particle Swarm Algorithm and GPM Satellite Data: A Case Study of April 1398 Flood in Northeast of Iran, In: *Proceeding of 7th comprehensive conference on flood engineering and management*, 5-7 Aug, Tehran, Iran. (In Persian).
- Cloke, H. L., & Pappenberger, F. (2009). Ensemble flood forecasting: A review. *Journal of hydrology*, 375(3-4), 613-626.
- Duzenli, E., Yucl, I., Pilatin, H., & Yilmaz, M. T. (2021). Evaluating the performance of a WRF initial and physics ensemble over Eastern Black Sea and Mediterranean regions in Turkey. *Atmospheric Research*, 248, 105184.
- Emmanouil, G., Vlachogiannis, D., & Sfetsos, A. (2021). Exploring the ability of the WRF-ARW atmospheric model to simulate different meteorological conditions in Greece. *Atmospheric Research*, 247, 105226.
- Faridmojtahedi, N., Ghaffarian, P., & Negah, S. (2017). Analyzing the Spatial Distribution of Heavy Snow Fall Depth in Gilan Plain (February 2005, January 2008, and February 2014) Using WRF Model, *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 6(21), 109-126. (In Persian).
- Ghafarian, P., & Barekati, S. M. (2013). Verification of the Weather Research and Forecasting Model (WRF) for the Heavy Precipitation Forecasting in the Karun basin. A case study (8-9 February 2006), *Journal of Climate Research*, 4(15), 129-140. (In Persian).
- Ghamariadyan, M., & Imteaz, M. A. (2021). A Wavelet Artificial Neural Network method for medium-term rainfall prediction in Queensland (Australia) and the comparisons with conventional methods. *International Journal of Climatology*, 41, E1396-E1416.
- Goodarzi, L., Banihabib, M. E., & Ghafarian, P. (2018). Evaluation of the WRF Model Performance for Heavy Rainfall Simulation A Case Study of the Kan Basin in Iran, *Water and Soil Conservation*, 25(1), 229-242. (In Persian).
- Hong, S. Y., Dudhia, J., & Chen, S. H. (2004). A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Monthly weather review*, 132(1), 103-120.
- Imani Amirabad, S., Farrokhnia, A., Dehban, H., Hassanli, A.M., Javadi, F., & Najafi, M.S. (2019). WRF and GFS forecast performance model in forecasting heavy rainfall in the last country, In: *Proceeding of 7th comprehensive conference on flood engineering and management*, 5-6 Aug, Tehran, 1-19. (In Persian).
- Jaberi, P., Sabetghadam, S., & Ghader, S. (2021). Visibility prediction during fog and precipitation using the WRF model over Tehran, *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 7(3), 107-124. (In Persian).
- Karimkhani, M., Jamshidi, T., Azadi, M., & Fattahi, E. (2018). Resolution impacts for accuracy of forecasting precipitation using the WRF model Area of Study: Karkhe and Karoon basin, *Journal of Wetland Ecobiology*, 9(4), 55-74. (In Persian).
- Khansalari, S., & Ranjbar Saadatabadi, A. (2020). Investigating the causes of different performance of WRF model in forecasting rainfall of different weather systems from a Dynamic Perspective: A case study, *Nivar*, 108, 1-10. (In Persian).
- Khodamoradpour, M., & Irannejad, P. (2020). Evaluation of the calibrated snow model of the NOAA-MP land surface scheme coupled in the WRF using MODIS images in areas with different land-surface features, *Journal of Agricultural Meteorology*, 7(2), 15-25. (In Persian).
- Mahala, B. K., Mohanty, P. K., Xalxo, K. L., Routray, A., & Misra, S. K. (2021). Impact of WRF Parameterization Schemes on Track and Intensity of Extremely Severe Cyclonic Storm "Fani". *Pure and Applied Geophysics*, 178(1), 245-268.
- Mehdizadeh, S. (2020). Using AR, MA, and ARMA time series models to improve the performance of MARS and KNN approaches in monthly precipitation modeling under limited climatic data. *Water Resources Management*, 34(1), 263-282.

- Mehralipour, M. A., Fathian, H., Nikbakht Shahbazi, A., Zohrabi, N., & Mobarak Hassan, E. (2020). Parameter uncertainty analysis by Monte-Carlo method for flood forecasting using WRF Prediction of Precipitation and Air Temperature in Dez Basin, *Iran Water Resources Research*, 16(2), 115-131. (In Persian).
- Memarian, M. H., & Daman Afshan, M. (2016). Evaluation of cloudiness prediction resulting from WRF model, *Journal of the Earth and Space Physics*, 42(1), 183-196. (In Persian).
- Negah, S., Momenpoor, F., Ghaffarian, P., Faridmojtahedi, N., & Asadi Oskooiee, E. (2015). Identification and formation mechanism analysis of spatial pattern snowfall in central plain of guilan (delta snow) by using weather and research forecast (WRF) model, *Journal of Climate Research*, 5(19), 113-125. (In Persian).
- Nikfal, A., Kashi, M., Khodam, N., Hashemi, M., & Karami, J., (2019). Meteorological analysis and numerical simulation of Lorestan flood in April 2017 using WRF atmospheric model, In: *Proceeding of 7th comprehensive conference on flood engineering and management*, 5-6 Aug., Tehran, 1-11. (In Persian).
- Pourghasemi Ardakani, M. A., & Memarian, M.H. (2018). Investigation of the effect of some microphysical parameters on precipitation, using the WRF model, In: *Proceeding of 7th National Conference on Water Resources Management*, 25-26 April, Yazd University, Yazd, Iran. (In Persian).
- Powers, J. G., Klemp, J. B., Skamarock, W. C., Davis, C. A., Dudhia, J., Gill, D. O., Coen, J.L., Gochis, D.J., Ahmadov, R., Peckham, S.E., Grell, G.A., & Duda, M. G. (2017). The weather research and forecasting model: Overview, system efforts, and future directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8), 1717-1737.
- Rahmanian, M., Ahmadi Hojjat, M., Kalateh Seifri, Z., & Malahi, S. (2012). Performance evaluation of WRF model for predicting atmospheric hazards of a strong rainfall system: a case study, In: *Proceeding of 1st national conference on sustainable development strategies (agriculture, natural resources) And Environment*, Tehran, Iran, 1-7. (In Persian).
- Salahi, A., Ashrafzadeh, A., & Vazefehdoost, M., (2020). Comparison of estimated precipitation from GPM satellite, Doppler meteorological radar and WRF precipitation forecast model with ground station data in Gilan province, In: *Proceeding of 18th Iranian Hydraulics Conference*, 5-6 Feb., Tehran University, Tehran, Iran, 1-6. (In Persian).
- Sasanian, S., Azadi, M., & Ghorban Fallah, R., (2015). Evaluation of WRF model performance with different physical options for predicting winter rainfall in southwestern Iran, In: *Proceeding of 1st scientific congress on the development and promotion of agricultural sciences, natural resources and environment*, Tehran, Iran, 1-12. (In Persian).
- Shirali, E., Nikbakht Shahbazi, A., Fathian, H., Zohrabi, N., & Mobarak Hassan, E. (2021). Evaluation of WRF Model for Simulation of Precipitation and Flood Forecasting in Karun 4 Basin, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(8), 1907-1920. (In Persian).
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, J.G., Duda, M.G., Barker, D.M., & Huang, X. Y. (2019). A description of the advanced research WRF model version 4. *National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA*, 145.
- Torabian, M. J., & Heidari, M. (2019). Simulation of Cumulative Flood in Qom with WRF Numerical Model, In: *Proceeding of 6th Regional Conference of Climate change*, 18-19 Nov., Tehran, Iran, 1-7. (In Persian).
- Yang, Q., Yu, Z., Wei, J., Yang, C., Gu, H., Xiao, M., Laux, P., Arnault, J., Gao, L., Dong, N., Shang, S., & Kunstmann, H. (2021). Performance of the WRF model in simulating intense precipitation events over the Hanjiang River Basin, China—A multi-physics ensemble approach. *Atmospheric Research*, 248, 105206.