



Assessing the effects of Physical Parametrization of the WRF Model in Simulating Flood-Inducing Rainfall in Arid and Semi-Arid Areas (Case Study: Isfahan Province)

M.S. Najafi^{1*}, S. Imani², and V. Shokri Kuchak²

Abstract

Extreme weather events are significantly more frequent in the past decades due to global warming. While preventing these events from happening is impossible, providing accurate weather forecasts can help the society to be better prepared for them. Regional climate models have been widely applied locally as a robust forecast and monitoring tool for extreme weather events. This study assesses the performance of the Weather Research and Forecasting (WRF) model in simulating different heavy precipitation events across Isfahan province. For this, WRF parametrization was established considering different versions of the microphysics, planetary boundary layer (PBL), short and long wavelength radiation, surface layer and convection scheme. The model was implemented in two nests of 12 and 4 km, using the GDAS-FNL reanalysis data as initial and boundary conditions for 17 extreme rainfall events in 2011-2018 and with different combinations of the schemes. The daily precipitation observational records from 77 rain gauge stations were applied to validate the WRF output. Finally, several statistical goodness-of-fit measures and spatial and temporal precipitation distributions were used to evaluate WRF performance. The result showed that the appropriate physical scheme for the parameterisation of short and long-wavelength radiation and surface layer could increase the performance of precipitation forecasts in the 4 km grid (high resolution), the microphysics was nonetheless more crucial than other parameterisations. In Isfahan province, the Revised Monin-Obokhov, Dudhia, RRTMG, NSSL, TiedTKE, and BouLac schemes performed better in simulating precipitation respectively for parameterisation of surface layer, short and long wavelength radiation, microphysics, convection, and planetary boundary layer. Therefore, This optimal combination of parameterisations is suggested for further studies with the aim of precipitation forecasting and using them in flood forecast systems.

Keywords: Arid and Semi-Arid Climate, Extreme Precipitation, Numerical Weather Forecasting, Physical Parameterization.

Received: September 3, 2023

Accepted: November 14, 2023

ارزیابی اثر پارامترسازی فیزیکی مدل WRF در شبیه‌سازی وقایع بارشی سنگین منجر به وقوع سیلاب در نواحی خشک و نیمه خشک (مطالعه موردی: استان اصفهان)

محمدسعید نجفی^{۱*}، سمیه ایمانی^۲ و وحید شکری کوچک^۲

چکیده

وقوع رویدادهای فرین جوی در دهه‌های گذشته به دلیل گرم شدن سیاره زمین به طور قابل توجهی افزایش یافته است. در حالی که کنترل این رویدادها غیرممکن است، ارائه پیش‌بینی‌های مناسب جوی می‌تواند به آمادگی بهتر جامعه برای مواجهه با رخداد‌های فرین جوی کمک کند. مدل‌های منطقه‌ای پیش‌بینی عددی وضع هوا به‌عنوان یک ابزار مناسب برای پیش‌بینی رویدادهای فرین جوی به‌طور گسترده به کار گرفته می‌شوند. این مطالعه به حساسیت‌سنجی مدل WRF نسبت به پارامترسازی فیزیکی شامل طرح‌واره‌های مختلف خردفیزیک، لایه مرزی سیاره‌ای، تابش طول موج کوتاه و بلند، لایه سطحی و همرفت در پیش‌بینی بارش در استان اصفهان به عنوان یک ناحیه خشک و نیمه‌خشک می‌پردازد. مدل در دو دامنه (اول) ۱۲ و (دوم) ۴ کیلومتری و با استفاده از داده‌های GFS به‌عنوان شرایط اولیه و مرزی برای ۱۷ رخداد بارشی فرین در دوره ۲۰۱۱-۲۰۱۸ و با پیکربندی‌های مختلف اجرا شد. برای ارزیابی خروجی مدل WRF از داده‌های ۷۷ ایستگاه باران‌سنجی در منطقه مورد مطالعه استفاده شد. در نهایت، جهت ارزیابی کارایی مدل WRF از چندین معیار آماری و توزیع بارش مکانی و زمانی در منطقه مورد مطالعه، استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که انتخاب طرح‌واره‌های فیزیکی مناسب برای پارامترهای تابش موج کوتاه، بلند و لایه سطحی می‌تواند دقت پیش‌بینی بارش در دامنه دوم را افزایش دهد. هرچند که مهم‌ترین طرح‌واره در پیش‌بینی بارش، طرح‌واره خردفیزیک است. بطوریکه انتخاب طرح‌واره مناسب خردفیزیک می‌تواند تا حد زیادی دقت پیش‌بینی بارش در یک منطقه را بهبود بخشد. در محدوده استان اصفهان طرح‌واره‌های Revised Monin-Obokhov, Dudhia, RRTMG, NSSL, TiedTKE و BouLac به ترتیب برای پارامترهای فیزیکی لایه سطحی، تابش طول موج کوتاه و بلند، خردفیزیک، همرفت و لایه مرزی سیاره‌ای دارای بیشترین کارایی در پیش‌بینی بارش بودند. بنابراین استفاده از این طرح‌واره‌ها جهت استفاده در مطالعات آتی با هدف پیش‌بینی بارش و استفاده در سامانه‌های پیش‌بینی سیلاب، پیشنهاد می‌شود.

کلمات کلیدی: اقلیم خشک و نیمه خشک، بارش فرین، پیش‌بینی عددی وضع هوا، پارامترسازی فیزیکی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۶/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۸/۲۳

1- Assistant Professor, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran. Email: ms.najafi@wri.ac.ir

2- Research Fellow, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

Doi: [10.22034/IWRR.2023.183124](https://doi.org/10.22034/IWRR.2023.183124)

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

۲- کارشناس پژوهشی 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 بهار ۱۴۰۳ امکانپذیر است.



مدل‌های منطقه محدود است که به منظور پیش‌بینی عملیاتی و نیازهای تحقیقات جوی طراحی شده است. این مدل دارای طرح‌واره‌های پارامترساز فیزیکی متنوعی است که پدیده‌های جوی کوچک‌مقیاس و زیر شبکه‌ای را که مدل قادر به آشکارسازی آن‌ها نیست، شبیه‌سازی می‌کند. دیگر دلیل استفاده از طرح‌واره‌ها، پیچیدگی و یا عدم شناخت کافی از پدیده مورد نظر می‌باشد (Elguindi et al., 2011). بدین منظور جهت کاربردی نمودن پیش‌بینی‌های هواشناسی، تنظیم بخش فیزیک مدل و به کار بردن ترکیب مناسبی از طرح‌واره‌ها لازم و ضروری است (Jee and Kim, 2017; Nooni et al., 2022; Pegahfar et al., 2022; Valappil et al., 2023).

تاکنون پژوهش‌های مختلفی در زمینه ارزیابی کارایی مدل WRF صورت گرفته است. Jankov et al. (2005) اثر پارامترسازی‌های فیزیکی متفاوت در مدل WRF و اثر متقابل آن‌ها را بر روی بارش‌های همرفتی میان‌مقیاس در فصل گرم را بررسی نمودند. مقایسه عملکرد ۱۸ پیکربندی مدل WRF متشکل از ۳ طرح‌واره خردفیزیک، ۳ طرح‌واره همرفت و ۲ طرح‌واره لایه مرزی نشان داد که بیشترین حساسیت مدل در پیش‌بینی بارش در دوره گرم سال به استفاده از طرح‌واره‌های همرفتی است (Jankov et al., 2005). در مطالعه دیگر Jankov et al. (2007) به تحلیل حساسیت مدل WRF نسبت به طرح‌واره‌های مختلف خردفیزیک، لایه مرزی سیاره‌ای، همرفت و استفاده از داده‌های مختلف شرایط مرزی در پیش‌بینی سامانه‌های همرفتی پرداختند و نتایج این مطالعه نشان داد که حتی با تغییر در داده‌های شرایط مرزی، همچنان پارامتر همرفت، مهمترین پارامتر فیزیکی در پیش‌بینی بارش‌های همرفتی میان‌مقیاس است (Jankov et al., 2007). Fovell and Su (2007) به حساسیت‌سنجی پارامتر خردفیزیک ابر در مدل WRF در مسیر یابی طوفان پرداختند و نتایج این مطالعه نشان داد تغییر طرح‌واره‌های مختلف خردفیزیک در مدل، منجر به تغییرپذیری قابل توجهی در پیش‌بینی‌ها می‌شود (Fovell and Su, 2007). مطالعه lowrey and Yang (2008) نیز نشان داد خطاهای اصلی در پیش‌بینی بارش ناشی از پارامترسازی خردفیزیک و همرفت، ناحیه بافر، گام زمانی آغازین، دامنه و شرایط اولیه و مرزی است و بارش نسبت به طرح‌واره‌های همرفت نسبت به طرح‌واره‌های خردفیزیک از حساسیت بالاتری برخوردار است (Lowrey and Yang, 2008). Merino et al. (2022) برای پیش‌بینی بارش‌های سنگین در شرق اسپانیا، ۴۵ واقعه بارشی سنگین را بررسی کردند و حساسیت مدل WRF را نسبت به پارامترسازی خردفیزیک و لایه مرزی سیاره‌ای در شبیه‌سازی بارش بررسی نمودند. بدین منظور با در نظر گرفتن سه طرح‌واره خردفیزیک و دو طرح‌واره لایه مرزی

سیل یکی از متداول‌ترین بلایای طبیعی در جهان است که هر ساله خسارات مالی و جانی فراوانی را به همراه دارد (Fraser et al., 2010). کشور ایران نیز اگر چه به‌عنوان یک کشور دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک شناخته می‌شود، اما همواره شاهد وقوع سیلاب‌های مخرب بوده است به طوری که که برخی از آن‌ها به دلیل خسارات سنگین انسانی و پیامدهای فاجعه‌بار حادث شده، در تاریخ نیز ثبت شده‌اند. در این راستا پیش‌بینی قابل اعتماد متغیرهای جوی از جمله بارش و پیش‌آگاهی دقیق در مقیاس‌های زمانی کوتاه و متوسط (چند ساعت تا چند روز آینده) می‌تواند اثرات این پدیده را کاهش دهد (Emmanouil et al., 2021)، چرا که پدیده سیلاب عمدتاً از بارش‌های سنگین حاصل می‌شود و پیش‌بینی آن برای مدیریت مناسب و انجام اقدامات پیشگیرانه از اهمیت بالایی برخوردار است (Yazdanpanah Gharai et al., 2023).

بارش منبع اولیه و اساسی برای شبیه‌سازی جریان و پیش‌بینی سیلاب در مقیاس حوضه است (Ozkaya and Akyurek, 2020). بیشتر مدل‌های هیدرولوژیکی با به‌کارگیری مدل‌های پیش‌بینی عددی هواشناسی میان‌مدت و کوتاه‌مدت، رادارهای هواشناسی و مشاهدات ایستگاهی، قادر به برآورد و پیش‌بینی سیلاب خواهند بود (Yucel et al., 2015). اما کمبود داده به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه به دلیل هزینه بالای ایجاد و نگهداری ابزارها یکی از چالش‌برانگیزترین موضوعات در مطالعات هیدرولوژیکی سیلاب است (Nyeko, 2015). برای رسیدگی به مشکل کمبود داده‌های هواشناسی، در سال‌های اخیر پیش‌بینی کمی بارش توسط مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا (NWP¹) بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Collischonn et al., 2007). اگرچه استفاده از این مدل‌ها در پیش‌بینی بارش کوتاه‌مدت و میان‌مدت (تا ۱۰ روز) بسیار مناسب است (Hopson and Webster, 2010)، اما برخی از عدم قطعیت‌ها مانند مکان‌یابی، زمان‌بندی و شدت رویدادهای بارندگی، سودمندی آن‌ها را محدود کرده است (Habets et al., 2004). از سوی دیگر مزیت این مدل‌ها در افزایش حداکثری زمان پیش‌هشدار به‌ویژه در حوضه‌های کوچک با زمان تمرکز پایین و حوضه‌های مرتفع و کوهستانی بسیار حائز اهمیت است (Anderson et al., 2002; Miller, 2023; Rogelis and Werner, 2018). بنابراین تلاش برای کاهش خطاهای سامان‌مند این مدل‌ها امری ضروری می‌باشد. مدل پیش‌بینی و پژوهشی وضع هوا (WRF) (Skamarock et al., 2001)، سیستم مدل‌سازی میان‌مقیاسی است که جهت بهبود پیش‌بینی‌های هواشناسی طراحی شده و جزء دسته

سیاره‌ای^۲، نتایج نشان داد که انتخاب طرح‌واره مناسب خردفیزیک تأثیر بسیاری در دقت پیش‌بینی بارش این منطقه داشته است. طرح‌واره Thompson برای خردفیزیک و Mellor-Yamada-Nakanishi برای لایه مرزی سیاره‌ای دارای بیشترین کارایی در شبیه‌سازی بارش در اکثر وقایع منتخب در منطقه مورد مطالعه بوده است. با این حال، ترکیبی بهینه برای شبیه‌سازی مناسب کلیه وقایع به دست نیامد، زیرا ویژگی‌های رویداد تأثیرات مهمی بر عملکرد مدل داشتند (Merino et al., 2022). (Pennelly et al. (2014 از ۵ طرح‌واره مختلف همرفت مدل WRF در شبیه‌سازی سه واقعه بارشی سنگین در آلبرتا استفاده کردند که نتایج حاکی از عملکرد بهتر طرح‌واره Kain-Fritsch نسبت به سایر طرح‌واره‌ها بود (Pennelly et al., 2014). برخلاف مطالعات انجام شده در این زمینه، نتایج مطالعه Nasrollahi et al. (2012) نشان داد که استفاده از طرح‌واره‌های همرفت، خروجی مدل را در زمانی بهبود می‌بخشد که تفکیک مکانی آن کوچک‌تر از ۱۰ کیلومتر باشد (Nasrollahi et al., 2012).

در ایران نیز پژوهش‌هایی پیرامون ارزیابی مدل WRF در پیش‌بینی بارش صورت گرفته است. (Arkian et al. (2015 در مطالعه‌ای به ارزیابی کارایی مدل WRF در شبیه‌سازی بارش در بازه‌های زمانی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت پیش از رخداد بارش در سی‌مورد از بارش‌های سنگین در استان قزوین در دهه هشتاد شمسی پرداختند. در این مطالعه با استفاده از دو پیکربندی متفاوت از طرح‌واره‌های همرفت و لایه مرزی سیاره‌ای (GD-MYJ^۳ و KF-MYJ^۴) شبیه‌سازی شدند. نتایج تحلیل نقطه‌ای و منطقه‌ای نشان داد شاخص ریشه میانگین مربعات خطا^۵ پیکربندی KF-MYJ نسبت به پیکربندی GD-MYJ مقدار کمتری را دارا است (Arkian et al., 2015). (Zeyaeyan et al. (2017 برای پیش‌بینی مناسب بارش‌های سیل‌آسای تابستانی (که عمدتاً از نوع همرفت هستند) در شمال غرب ایران، ترکیب پنج طرح‌واره همرفت، چهار لایه مرزی سیاره‌ای و دو طرح‌واره خردفیزیک را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل حساسیت بالایی به انتخاب طرح‌واره‌های همرفت در شبیه‌سازی بارش‌های تابستانی در شمال غرب کشور داشته است (Zeyaeyan et al., 2017). در مطالعه دیگری (Moradi et al. (2020 به بررسی اثر پارامترسازی فیزیکی در مدل WRF در شبیه‌سازی بارندگی‌های زمستانی در شمال غرب ایران پرداختند، که بررسی ترکیب طرح‌واره‌های مختلف در این مطالعه نشان داد که ترکیب طرح‌واره‌های Lin (خردفیزیک)، Eta-similarity (لایه سطحی)، MYJ (لایه مرزی سیاره‌ای)، RRTM (تابش موج بلند) و Dudhia (تابش موج کوتاه) بهینه‌ترین پیکربندی برای پیش‌بینی‌های بارش زمستانی در منطقه شمال غرب ایران

است (Moradi et al., 2020). (Khansalari et al. (2021 در ارزیابی کارایی مدل WRF در پیش‌بینی بارش‌های منجر به سیلاب اردیبهشت ۱۳۹۶ در مناطق خشک و نیمه خشک در ناحیه مرکزی کشور پرداختند و نتایج نشان داد که طرح‌واره همرفت Grell-Devenyi نسبت به ۱۱ طرح‌واره مورد بررسی دیگر، دارای دقت بالاتری در پیش‌بینی این واقعه بوده است (Khansalari et al., 2021).

اگرچه طرح‌واره‌های مختلف خردفیزیک و همرفت به طور گسترده در مطالعات مربوط به پیش‌بینی بارش مورد بررسی قرار گرفته است، اما پارامترهای فیزیکی دیگری مانند لایه مرزی سیاره‌ای، تابش و لایه سطحی نیز می‌تواند بر پیش‌بینی‌ها اثر بگذارد. همچنین باید بررسی شود که این طرح‌واره‌ها آیا اثرات متقابل بر یکدیگر برای پیش‌بینی بارش دارند یا نه. در این راستا این پژوهش به تحلیل حساسیت مدل پیش‌بینی هواشناسی WRF نسبت به پارامترسازی فیزیکی (خردفیزیک، همرفت، لایه مرزی سیاره‌ای، تابش و لایه سطحی) در پیش‌بینی بارش پرداخته شده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- محدوده مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

استان اصفهان با وسعتی در حدود ۱۰۷۳۵۰ کیلومترمربع در مرکز فلات ایران شمالی واقع شده است. این استان از لحاظ تقسیمات حوضه آبریز درجه ۲، در حوضه‌های کارون بزرگ، گاوخونی، دریاچه نمک، کویر سیاه‌کوه-ریگ زرین و کویر مرکزی قرار گرفته است. مرتفع‌ترین نقطه در غرب استان با ارتفاع ۴۴۱۵ متر از سطح دریا و کم‌ارتفاع‌ترین نقطه در مناطق کویری شرق استان با ارتفاع ۶۸۳ متر از سطح دریا می‌باشد (شکل ۱). تغییرات وضع هوا در سطح این استان نیز بسیار چشمگیر است به طوری که در ناحیه چلگرد واقع در غرب استان بارش متوسط سالیانه بیش از ۱۴۰۰ میلیمتر و در شرق استان کمتر از ۱۰۰ میلیمتر است.

بر اساس آمار سیلاب ثبت شده از سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹، در حدود ۷۰ رخداد بارش سنگین در محدوده استان اصفهان به وقوع پیوسته است که اکثر آن‌ها در فصل بهار و زمستان اتفاق افتاده و برخی از آن‌ها منجر به وقوع سیلاب در این منطقه شده است. در این مطالعه ملاک انتخاب بارش سنگین برای انتخاب وقایع، بارش بالای ۵۰ میلیمتر است که حداقل در یکی از ایستگاه‌ها در دوره آماری ۱۹ ساله ثبت شده است و اعلام وقوع سیلاب و ثبت داده دبی پیک ساعتی در

یکی از رودخانه‌های محدوده مورد مطالعه است. پس از شناسایی این وقایع سیلابی، از ۱۷ رخداد بارش سنگین منجر به وقوع سیلاب (از سال ۱۳۹۰ به بعد، که دقت ورودی‌های مدل WRF نیز بهبود یافته است) برای تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترسازی فیزیکی در محدوده استان اصفهان استفاده شد (جدول ۱).

یکی از رودخانه‌های محدوده مورد مطالعه است. پس از شناسایی این وقایع سیلابی، از ۱۷ رخداد بارش سنگین منجر به وقوع سیلاب (از سال ۱۳۹۰ به بعد، که دقت ورودی‌های مدل WRF نیز بهبود یافته است) برای تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترسازی فیزیکی در محدوده استان اصفهان استفاده شد (جدول ۱).

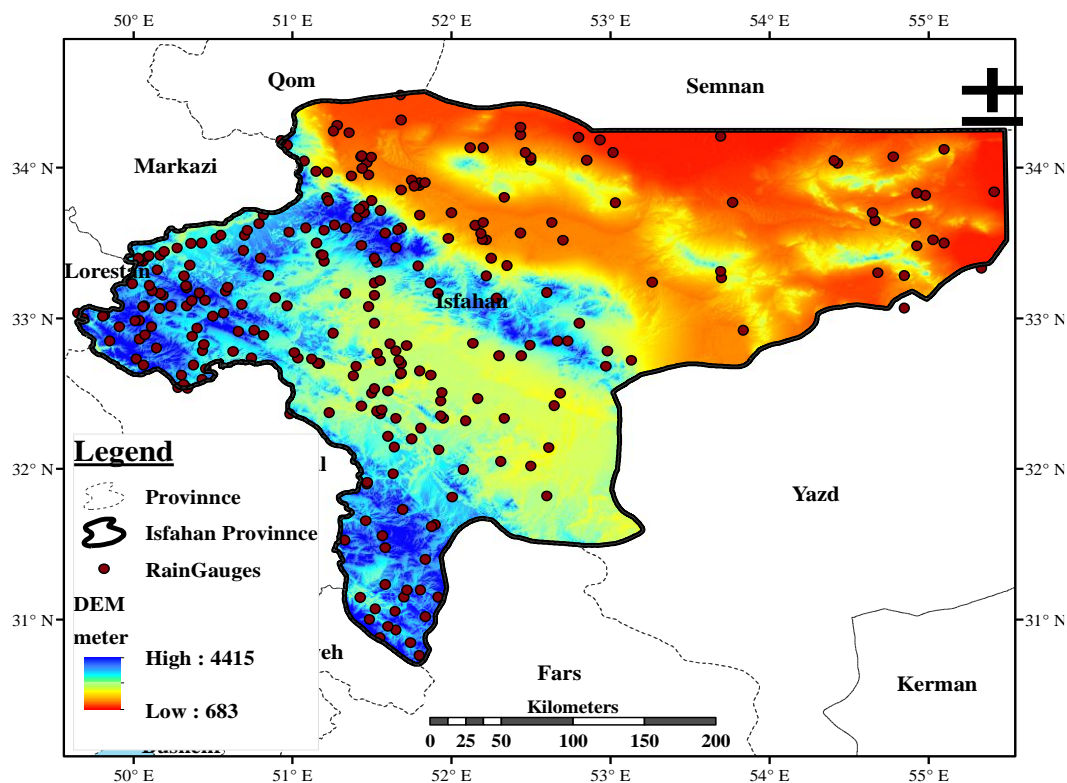


Fig. 1- Isfahan Province DEM and the location of rain gauges for the case study

شکل ۱- استان اصفهان به همراه نقشه Dem و موقعیت باران سنج‌های موجود در محدوده مورد مطالعه

Table 1- Selected heavy rainfall events (floods-causing) in the Isfahan province for the case study

جدول ۱- وقایع بارندگی شدید منتخب (مولد سیلاب) در محدوده مورد مطالعه

Event Number	Abbreviated name	Date			Peak PCP (mm)	Peak flow (m ³ /s)
		Year	Month	Day		
1	Case-1	2011	11	16	99	145
2	Case-2	2012	2	2	66	38.6
3	Case-3	2012	11	14	65	25.4
4	Case-4	2013	1	29	53	37.3
5	Case-5	2013	3	6	96	88.6
6	Case-6	2013	12	13	83	48.7
7	Case-7	2014	3	12	82	106
8	Case-8	2014	4	3	68	96.1
9	Case-9	2014	10	21	50	16.4
10	Case-10	2014	11	1	123	79.5
11	Case-11	2015	3	22	80	296
12	Case-12	2015	10	30	59	92.5
13	Case-13	2016	4	15	57	178
14	Case-14	2016	12	2	94	246
15	Case-15	2016	12	26	59	370
16	Case-16	2018	4	23	67	177
17	Case-17	2018	5	9	59	100

علاوه بر داده‌های مشاهداتی در این مطالعه از پایگاه‌های داده GFS^۶ و ERA5^۷ نیز برای شرایط اولیه و مرزی مدل WRF استفاده شده است. از داده‌های GFS برای شرایط اولیه و مرزی مدل WRF در تاریخ‌های مورد نظر استفاده شد. پیش‌بینی‌های این مدل در ساعات ۰۰، ۰۶، ۱۲ و ۱۸ در دسترس است، با توجه به زمان وقوع سیلاب از داده‌های نزدیک‌ترین گام زمانی به وقوع سیلاب، برای شرایط اولیه و مرزی استفاده شد. بازه مدل‌سازی نیز با توجه به تداوم وقوع بارش تعیین شد. این نوع داده با قدرت تفکیک افقی ۰/۵ (از سال ۲۰۰۷) و گام زمانی ۶ ساعت در دسترس قرار دارد. از داده‌های ERA5 هم برای ارزیابی کارایی مدل WRF در شبیه‌سازی مؤلفه‌های باد در سطح زمین، دمای سطحی و ارتفاع ژئوپتانسیل در ترازهای ۵۰۰ و ۲۰۰ هکتوپاسکالی در دامنه اول استفاده شده است. تفکیک افقی این داده‌ها ۰/۲۵ درجه و دارای گام زمانی ۶ ساعته است.

۲-۲- مدل عددی هواشناسی WRF

هدف از این مطالعه تحلیل حساسیت مدل پیش‌بینی و پژوهش وضع هوا (WRF) نسبت به پارامتر سازی فیزیکی در پیش‌بینی بارش است. مدل WRF یک مدل میان‌مقیاس پیش‌بینی عددی وضع هوا و در دسته مدل‌های منطقه محدود است. این مدل به‌منظور پیش‌بینی عملیاتی و نیازهای تحقیقات جوی طراحی شده است (Skamarock, 2008). در این مطالعه از نسخه 4.5 این مدل استفاده شده است. از آنجایی که بعضی از فرایندها در جو به‌طور کامل با بخش دینامیکی مدل قابل حل نیستند و باید پارامتر سازی شوند، در این مدل پارامتر سازی فیزیکی به‌وسیله طرح‌واره‌های مختلف فیزیکی از جمله پارامترهای تابش، لایه سطحی، لایه مرزی سیاره‌ای، همرفت و خردفیزیک ابر (که در پیش‌بینی بارش با اهمیت هستند) انجام خواهد شد.

فرایندهای خردفیزیکی ابر با استفاده از طرح‌واره‌های خردفیزیک موجود در مدل پارامتر سازی می‌شوند. این طرح‌واره‌ها، گستره‌ای از فیزیک ساده شده مناسب برای مدل‌سازی میان‌مقیاس تا فیزیک

پیچیده فاز آمیخته مناسب برای مدل تفکیک‌کننده ابر را در برمی‌گیرند (Dudhia, 2014). طرح‌واره‌های خردفیزیک شامل مقادیری برای شعاع میانگین هواویزها، نم‌گیری هواویزها، توزیع اندازه قطره‌های ابر و تعداد قطره‌های ابر که چهار عامل اساسی در بررسی برهم‌کنش هواویز- ابر، بارش و تابش هستند، می‌باشند. همچنین، دقت پیش‌بینی‌های یک مدل پیش‌بینی عددی به‌ویژه در ترازهای پایین‌تر به‌شدت به پارامتر سازی‌های فیزیکی لایه مرزی سیاره‌ای و لایه سطحی وابسته است. وظیفه اصلی طرح‌واره‌های لایه مرزی سیاره‌ای انتقال قائم‌گرم، رطوبت و تکانه است. هرکدام از این طرح‌واره‌ها با یک یا چند طرح‌واره خاص لایه سطحی جفت شده‌اند و طرح‌واره‌های لایه سطحی شرایط مرزی پایین‌تر را برای PBL مهیا می‌کنند (Gholami et al., 2019). از دیگر پارامترهای مهم در مدل‌های عددی، همرفت است. پارامتر سازی همرفت همچنان یکی از چالش‌برانگیزترین جنبه‌های مدل‌سازی عددی هوا، به‌ویژه برای پیش‌بینی عددی وضع هوا و پیش‌بینی آب‌وهوای جهانی توسط مدل‌های گردش کلی است. طرح‌واره‌های همرفت همگی جزء همرفتی بارندگی سطحی را ارائه می‌دهند. از نظر تئوری در مدل‌های عددی، پارامتر سازی همرفت فقط برای شبکه‌های درشت‌تر معتبر هستند (برای مثال بزرگ‌تر از ۱۰ کیلومتر)، درحالی‌که در مورد پیچانه‌های همرفتی که کاملاً در مقیاس زیرشبکه‌ای هستند، باید طرح‌واره‌هایی طراحی شود که امکان اندازه‌گیری آن‌ها را در مقیاس زیر-شبکه فراهم باشد و در محاسبه همرفت در شبکه‌های ۵ تا ۱۰ کیلومتری مفید باشند. به‌طور کلی، زمانی که مدل بتواند خود جریان‌های همرفتی عمیق را حل کند (به‌عنوان مثال، شبکه کوچک‌تر از ۴ کیلومتر) نباید از این طرح‌واره‌ها استفاده کرد (Skamarock, 2008). در این مطالعه از طرح‌واره‌های ارائه شده در جدول ۲ برای حساسیت سنجی مدل نسبت به پارامتر سازی فیزیکی در محدوده مورد مطالعه استفاده شده است. در این مطالعه مدل برای دو دامنه تو در تو اجرا می‌شود. دامنه مادر با تفکیک افقی ۱۲ کیلومتر و دامنه کوچک‌تر با تفکیک افقی ۴ کیلومتر که مقادیر بارش پیش‌بینی شده از دامنه دوم استخراج می‌شوند.

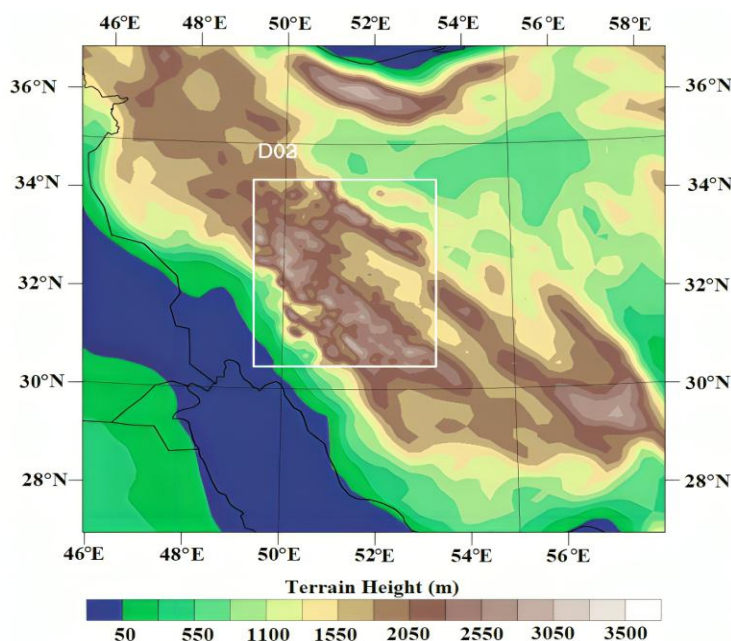


Fig. 2- Geographical domains of WRF model for the D01 (12 Km) and D02 (4 Km)
 شکل ۲- موقعیت جغرافیایی دامنه‌های مورد بررسی در مدل WRF، D01 (دامنه ۱۲ کیلومتری) و D02 (دامنه ۴ کیلومتری)

Table 2- Physical schemes used for the study
 جدول ۲- طرح‌واره‌های فیزیکی مورد استفاده

Physical schemes	Microphysics:	<ul style="list-style-type: none"> • Kessler (Kessler, 1969) • Lin (Lin et al., 1983) • WSM3 (Hong et al., 2004) • WSM5 (Hong et al., 2004) • Eta (Rogers et al., 2001) • WSM6 (Lim and Hong, 2010) • Thompson (Thompson et al., 2008) 	<ul style="list-style-type: none"> • MYDM-7 (Milbrandt and Yau, 2005) • Morrison (Hong and Pan, 1998) • CAM5 (Eaton, 2011) • SUB_YLIN (Lin and Colle, 2011) • WDM5 (Lim and Hong, 2010) • WDM6 (Lim and Hong, 2010) • NSSL (Ziegler, 1985)
	Short-wave radiation:	<ul style="list-style-type: none"> • Goddard (Chou and Suarez, 1994) • Dudhia (Dudhia, 1989) • RRTMG (Iacono et al., 2008) 	
	Long-wave radiation:	<ul style="list-style-type: none"> • RRTM (Wild et al., 2001) • RRTMG (Iacono et al., 2008) • New Goddard (Chou et al., 2001) 	
	PBL:	<ul style="list-style-type: none"> • YSU (Hong et al., 2004) • MYJ (Janjić, 1994) • MYNN2 (Nakanishi and Niino, 2004) • ACM2 (Pleim, 2007) 	<ul style="list-style-type: none"> • BouLac (Bougeault and Lacarrere, 1989) • UWMT (Bretherton and Park, 2009) • Shin-Hong (Shin and Hong, 2011) • GBM (Grenier and Bretherton, 2001)
	Surface:	<ul style="list-style-type: none"> • Monin and Obukhov (Monin and Obukhov, 1954) • Revised Monin and Obukhov • NCEP GFS 	
	Cumulus convection:	<ul style="list-style-type: none"> • Kain-Fritsch (KF) (Kain, 2004) • Betts-Miller-Janjic (Janjić, 1994) • Grell 3D Ensemble (Grell and Dévényi, 2002) 	<ul style="list-style-type: none"> • KF Cumulus Potential • Multi-scale KF • Arakawa-Schubert (Han and Pan, 2011) • Tiedtke (Tiedtke, 1989)

۳-۲- شاخص‌های ارزیابی

با هدف ارزیابی کارایی هر طرح‌واره، مقادیر پیش‌بینی بارش ۲۴ ساعته با آمار معادل مشاهداتی در هر منطقه مورد مقایسه قرار خواهد گرفت تا دقت آن تعیین ارزیابی شود. در این مرحله، از سنجه‌های آماری KGE^۱ (روابط ۱ تا ۳)، همبستگی (رابطه ۴)، سنجه کارایی نش-ساتکلیف^۲ (رابطه ۵) و خطای نسبی^۳ (رابطه ۶) استفاده شد.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o} \quad (3)$$

که در روابط فوق μ_s و μ_o به ترتیب میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی، r ضریب همبستگی پیرسون و σ_s و σ_o به ترتیب انحراف معیار داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی هستند.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (4)$$

$$NSE = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

$$RE = \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| \times 100 \quad (6)$$

در روابط بالا، P_i مقدار بارش پیش‌بینی شده، O_i مقدار بارش مشاهداتی در ایستگاه‌های هواشناسی، \bar{O} میانگین مقادیر مشاهده شده و \bar{P} میانگین مقادیر پیش‌بینی شده است.

برای استخراج مقادیر بارش حاصل از پیش‌بینی‌های مدل WRF از میانگین ۹ سول نزدیک به ایستگاه مشاهداتی (APB^۱) و از روش نزدیک‌ترین همسایگی و الگوریتم KNN^۲ استفاده شد. سپس به ارزیابی مقادیر پیش‌بینی شده بارش بر اساس شاخص‌ها و سنجه‌های

آماری فوق‌الذکر پرداخته شد و برای هر واقعه، طرح‌واره‌های مربوط به خردفیزیک، لایه مرزی سیاره‌ای و همرفت اولویت‌بندی شد. سپس فراوانی کسب رتبه‌های برتر (اول تا سوم) توسط هر یک از طرح‌واره‌ها محاسبه و با توجه به اهمیت رتبه‌ها، هر یک از فراوانی‌ها به صورت وزنی تجمیع شده است به طوری که به ترتیب ضریب وزنی رتبه‌های ۱ الی ۳؛ ۰/۴، ۰/۳۵ و ۰/۲۵ تعیین شد. در نهایت طرح‌واره‌هایی که بیشترین امتیاز مجموع وزنی را اخذ نمودند به عنوان بهترین طرح‌واره انتخاب شدند.

۳- نتایج و بحث

به طور کلی طرح‌واره‌های فیزیکی شرایط مختلف جوی و سطحی را برای مدل WRF توصیف می‌کنند که می‌توانند موجب عملکرد بهتر مدل شوند. هر کدام از این طرح‌واره‌ها عملکرد مدل در زمینه خاصی را بهبود می‌بخشند و لذا برای بررسی هر کدام از آن‌ها نیاز است که عملکرد آن طرح‌واره در زمینه خاص خود مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به محاسبه جریان‌های شار و فرایندهای سطحی توسط طرح‌واره لایه سطحی و محاسبه تابش توسط طرح‌واره‌های طول موج کوتاه و بلند و تأثیر محاسبه صحیح آن‌ها در شبیه‌سازی بهتر دما، که عنصری مهم در شبیه‌سازی بارش در دامنه دوم است، لذا در گام نخست برای دامنه اول طرح‌واره‌های مربوط به لایه سطحی، تابش موج کوتاه و بلند ارزیابی شدند. از طرح‌واره‌های برتر در دامنه اول، برای تحلیل حساسیت مدل به طرح‌واره‌های خردفیزیک ابر، همرفت و لایه مرزی سیاره‌ای که پارامترهای فیزیکی مهم در شبیه‌سازی بارش در شبکه دوم هستند، استفاده شد. برای هر رخداد بارش، از ۲۰ پیکربندی مختلف برای تحلیل حساسیت مدل استفاده شد (جدول ۳).

Table 3- Physical configuration of WRF for sensitivity analysis of surface (SF), shortwave (SW) and longwave (LW) in the parent domain

جدول ۳- پیکربندی‌های فیزیکی مورد استفاده برای تحلیل حساسیت مدل WRF نسبت به پارامترسازی لایه سطحی، موج کوتاه و موج بلند

Configurations	SF_SW_LW Scheme	Configurations	SF_SW_LW Scheme
Config-1	Revised M-O_Dudhia_RRTMG	Config-11	M-O_Goddard_RRTM
Config-2	Revised M-O_RRTMG_RRTMG	Config-12	M-O_Dudhia_RRTM
Config-3	Revised M-O_Dudhia_RRTM	Config-13	M-O_Dudhia_Goddard
Config-4	Revised M-O_Dudhia_Goddard	Config-14	M-O_Dudhia_RRTMG
Config-5	Revised M-O_Goddard_RRTM	Config-15	M-O_RRTMG_RRTM
Config-6	Revised M-O_Goddard_RRTMG	Config-16	NCEP GFS_Dudhia_RRTMG
Config-7	Revised M-O_Goddard_Goddard	Config-17	NCEP GFS_Dudhia_RRTM
Config-8	Revised M-O_RRTMG_Goddard	Config-18	NCEP GFS_Goddard_RRTMG
Config-9	M-O_RRTMG_RRTMG	Config-19	NCEP GFS_Goddard_RRTM
Config-10	M-O_Goddard_RRTMG	Config-20	NCEP GFS_Goddard_Goddard

انتخاب شدند (شکل ۴). پیکربندی ۱ که برای لایه سطحی از طرح‌واره Revised MM5 Monin-Obukhov برای تابش طول موج کوتاه از طرح‌واره Dudhia و برای تابش طول موج بلند از RRTMG استفاده می‌شود، دارای بالاترین مقادیر همبستگی و انحراف استاندارد مشابه مقادیر مشاهداتی برای شبیه‌سازی دمای ۲ متری است در حالی که در برای شبیه‌سازی باد ۱۰ متری، پیکربندی ۲ (Revised MM5 Monin-Obukhov, RRTM, RRTMG) علی‌رغم اینکه از همبستگی کمتری نسبت به پیکربندی ۱ برخوردار است، اما دارای انحراف استاندارد نزدیک به مقادیر مشاهداتی است. در شبیه‌سازی ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ و ۲۰۰ هکتوپاسکالی هم، پیکربندی ۱ دارای بهترین عملکرد بوده است.

شکل ۵ متوسط آماره KGE برای ۴ متغیر و همچنین ۲۰ پیکربندی مورد بررسی را در مقایسه با مقادیر مشاهداتی (ERA5) در رخدادها مورد بررسی برای متوسط شبکه اول نشان می‌دهد. بیشترین مقادیر این نمایه برای پیکربندی ۱ (Revised Monin-Obukhov, RRTM, RRTMG) (۰/۸۶۳) محاسبه شده است. لذا در ادامه از این طرح‌واره‌ها برای پارامترهای لایه سطحی، تابش موج کوتاه و بلند جهت تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای خردفیزیکی ابر، همرفت و لایه مرزی سیاره‌ای در شبیه‌سازی بارش استفاده شد.

برای ارزیابی کارایی مدل در ناحیه شبیه‌سازی اول، از شاخص همبستگی استفاده شده است. جهت محاسبه همبستگی، ابعاد داده‌های ERA5 باید با ابعاد خروجی مدل WRF برای شبکه اول یکسان باشد. خروجی‌های مدل برای این بخش ۱۲ کیلومتری است. با توجه به تفکیک افقی ۰/۸ درجه‌ای داده‌های ERA5، ابتدا خروجی مدل resample و ابعاد یاخته‌های آن با داده‌های ورودی یکسان گردید و سپس به محاسبه همبستگی متغیرهای دما و مؤلفه‌های باد در سطح زمین و ارتفاع ژئوپتانسیل ترازهای ۵۰۰ و ۲۰۰ هکتوپاسکالی پرداخته شد. برای نمونه نتایج همبستگی محاسبه شده برای شبیه‌سازی پیکربندی SF_1_SW_4_LW_5 برای رخداد ۲۳ آوریل ۲۰۱۸ برای دو متغیر دمای سطحی و باد ۱۰ متری در شکل (۳) نمایش داده شده است. در این پیکربندی برای لایه سطحی از طرح‌واره Revised MM5 Monin-Obukhov، برای تابش طول موج کوتاه از طرح‌واره RRTMG و برای تابش طول موج بلند از GODDARD استفاده شده است و متوسط ضریب همبستگی محاسبه شده برای دامنه اول ۰/۸۱ بوده است. این فرآیند برای کلیه پیکربندی‌های مورد بررسی انجام شد.

سپس پیکربندی‌های مورد بررسی در هر رخداد بر اساس مقادیر همبستگی مرتب‌سازی و برای ارزیابی بعدی با استفاده از نمودار تیلور

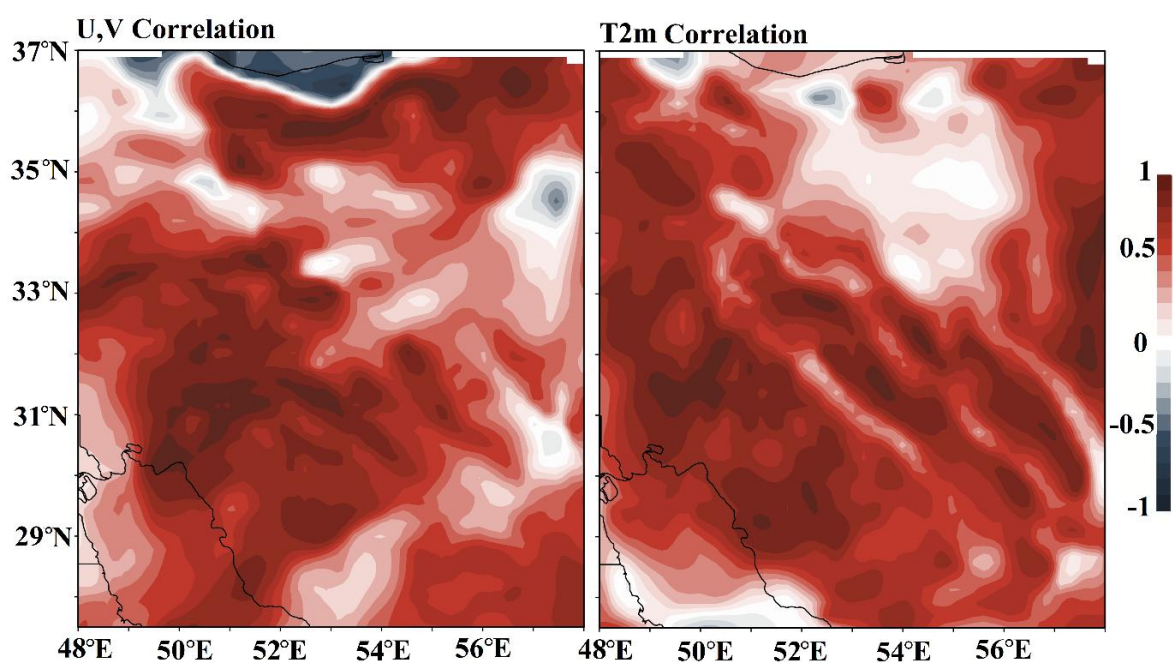


Fig. 3- Correlation results calculated for the simulation of configuration SF_1_SW_4_LW_5 for surface temperature and 10-meter wind variables in the event of April 23, 2018

شکل ۳- نتایج همبستگی محاسبه شده برای شبیه‌سازی پیکربندی SF_1_SW_4_LW_5 برای رخداد ۲۳ آوریل ۲۰۱۸ برای دو متغیر دمای سطحی و باد ۱۰ متری

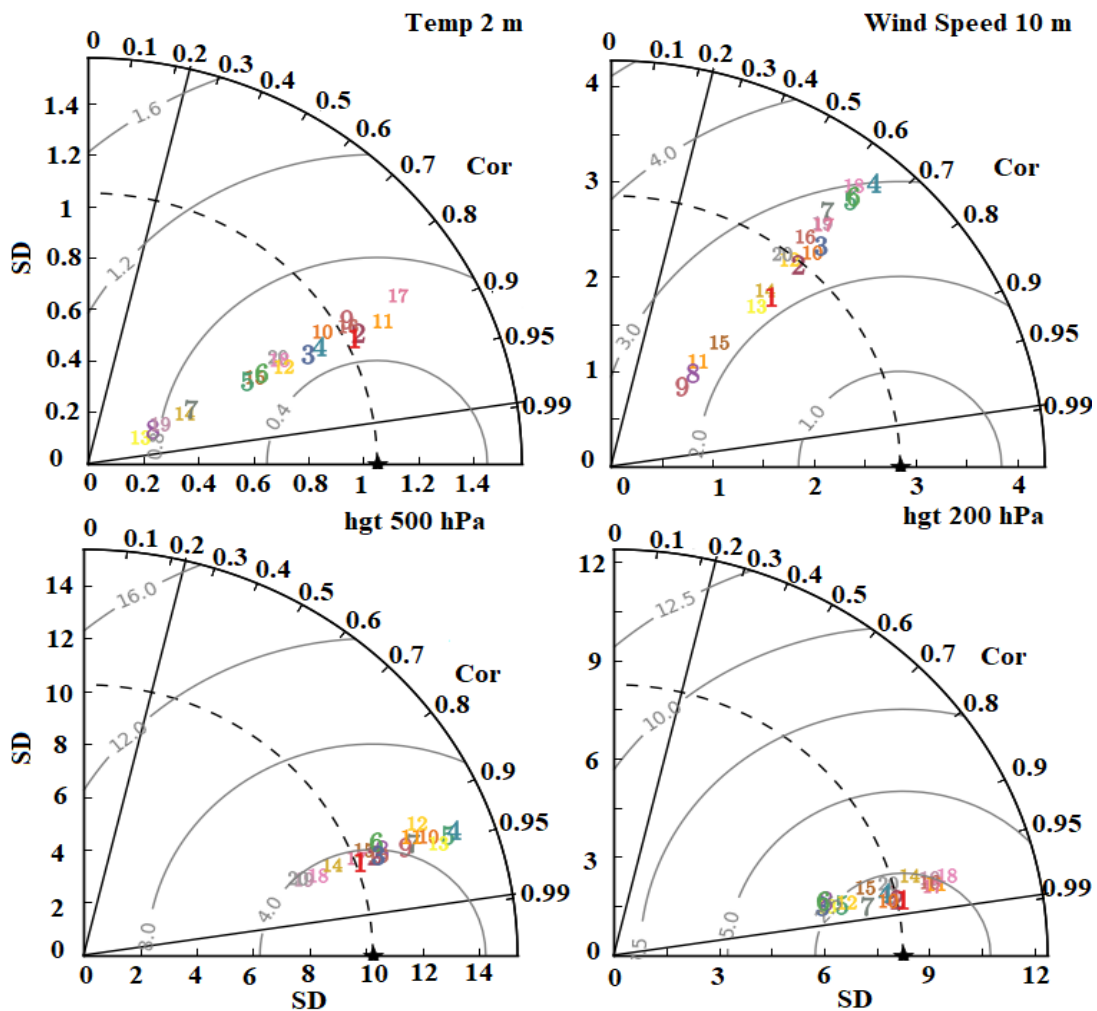


Fig. 4- Taylor plots of the 20 configurations considered in Table 3 compared to the observed values (ERA5) - شکل ۴- نمودار تیلور ۲۰ پیکربندی مورد بررسی در جدول ۳ در مقایسه با مقادیر مشاهداتی (ERA5)

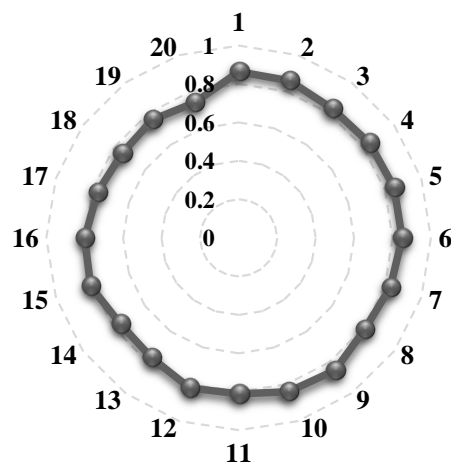


Fig. 5- The average KGE statistics of 20 investigated configurations (for the average of 4 variables of temperature 2 m, wind 10 m, and the geopotential height at 500 and 200 hPa) compared to the observed values (ERA5)

شکل ۵- متوسط آماره KGE ۲۰ پیکربندی مورد بررسی (برای متوسط ۴ متغیر دمای ۲ متری، باد ۱۰ متری، ارتفاع ژئوپتانسیل در ۵۰۰ و ۲۰۰ هکتوپاسکالی) در مقایسه با مقادیر مشاهداتی (ERA5)

۱-۳- حساسیت‌سنجی مدل نسبت به خردفیزیک

در این مطالعه، کارایی ۱۴ طرح‌واره مختلف خردفیزیک در برآورد بارش در محدوده استان اصفهان به‌وسیله آماره‌های RE، KGE، NSE و r بررسی شده است و طرح‌واره‌هایی که دارای مناسب‌ترین عملکرد بر اساس مقادیر آماره‌های ذکر شده را دارا بودند، معرفی شده‌اند. لازم به ذکر است که در حساسیت‌سنجی مدل WRF نسب به پارامترسازی خردفیزیک، طرح‌واره‌های مربوط به سایر پارامترهای فیزیکی از قبیل تابش موج کوتاه، بلند سطح زمین (که بر اساس نتایج بخش قبل انتخاب شد)، لایه مرزی سیاره‌ای و همرفت ثابت در نظر گرفته شده‌اند و تنها طرح‌واره خردفیزیک در اجراهای مختلف تغییر کرده است. همان‌طور که شکل ۶ و جدول ۴ نشان داده شده است، طرح‌واره‌های مختلف عملکردی متفاوت در پیش‌بینی بارش ۲۴ ساعته در ایستگاه‌های مختلف در منطقه مورد مطالعه داشته‌اند (نمونه رخداد ۲۰۱۳/۰۱/۲۹).

سنجه‌های ارزیابی بر اساس مقایسه مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده استخراج شد و در هر واقعه طرح‌واره‌هایی که عملکرد مناسبی در پیش‌بینی بارش بر اساس آماره‌های ذکر شده را داشتند رتبه‌بندی (رتبه‌های اول؛ دوم و سوم) شدند. پس از تعیین فراوانی رتبه‌های کسب شده در هر یک از طرح‌واره‌ها، وزن هر طرح‌واره محاسبه شد. به عنوان مثال در یک رخداد، طرح‌واره شماره ۱۷ (NSSL)، به ترتیب ۱، ۱ و ۱ مرتبه رتبه‌های اول تا سوم را کسب نموده است. بنابراین وزن این

طرح‌واره به‌صورت $۵ \times ۰/۴$ ، $۱ \times ۰/۳۵$ و $۱ \times ۰/۲۵$ محاسبه و در نهایت طرح‌واره‌هایی که بیشترین امتیاز مجموع وزنی را اخذ نمودند به‌عنوان بهترین طرح‌واره انتخاب می‌شوند. در نمونه رخداد ۲۰۱۳/۰۱/۲۹ طرح‌واره خردفیزیک Thompson دارای مناسب‌ترین عملکرد و رتبه نخست بر اساس نمایه‌های NSE، KGE، RE و CC، طرح‌واره خردفیزیک Kessler رتبه دوم و طرح‌واره خردفیزیک WDM6 رتبه سوم را بر اساس نمایه‌های ذکر شده کسب کرده‌اند. بنابراین در این رخداد بالاترین ضریب مربوط به طرح‌واره Thompson (با ضریب ۰/۴)، پس از آن طرح‌واره Kessler با ضریب ۰/۳۵ و ضریب ۰/۲۵ مربوط به طرح‌واره WDM6 است.

عملکرد طرح‌واره‌های مختلف خردفیزیک در مدل WRF در پیش‌بینی بارش در ۱۷ رخداد مورد بررسی نشان داد که در عمده طرح‌واره‌های مورد بررسی، مدل در پیش‌بینی مکانی بارش عملکرد تقریباً یکسانی داشته است. یعنی در ایستگاه‌هایی که مقادیر بارش بالاتر از ایستگاه‌های مجاور بوده است، کلیه طرح‌واره‌ها وقوع بارش سنگین در آن ایستگاه‌ها را پیش‌بینی نموده‌اند، هرچند که از نظر مقدار بارش پیش‌بینی‌شده در طرح‌واره‌های مختلف اختلاف‌هایی وجود دارد. بنابراین مدل در تخمین نقاط اوج بارش عملکرد مطلوبی داشته است، هرچند که در برخی رخدادها مقادیر پیش‌بینی‌شده کمتر و یا بعضاً بیشتر از مقادیر مشاهداتی است که چنین عدم قطعیت‌هایی مشخصه ذاتی مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا است (نمونه شکل ۶ برای رخداد ۲۰۱۳/۰۱/۲۹).

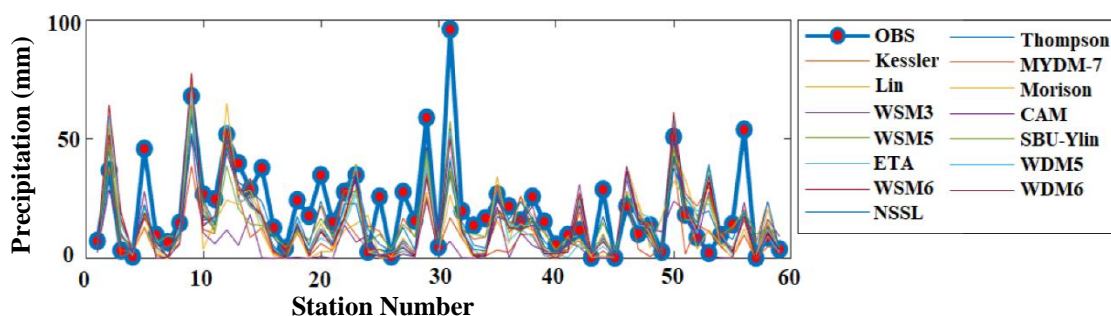


Fig. 6- Forecast precipitation in 14 microphysics schemes investigated in the rainfall event of 2013/01/29 compared to the observed values in 60 rain gauge stations

شکل ۶- مقادیر بارش پیش‌بینی شده در ۱۴ طرح‌واره خردفیزیک مورد بررسی در رخداد بارش ۲۰۱۳/۰۱/۲۹ در مقایسه با مقادیر مشاهداتی در ۶۰ ایستگاه باران‌سنجی

Table 4- Comparison of forecast precipitation with different microphysics schemes compared to observed values in 60 investigated stations for the precipitation event of 01/29/2013

جدول ۴- مقایسه مقادیر بارش پیش‌بینی شده با طرح‌واره‌های مختلف خردفیزیکی نسبت به مقادیر مشاهداتی در ۶۰ ایستگاه

موردبررسی برای رخداد بارش ۲۰۱۳/۰۱/۲۹

Schemes	r	NSE	KGE	RE (%)
Kessler	0.69	0.25	0.57	19.42
Lin	0.28	-0.18	0.02	48.52
WSM3	0.67	0.01	0.48	109.47
WSM5	0.70	0.12	0.52	24.13
ETA	0.63	-0.07	0.47	84.98
WSM6	0.69	0.23	0.59	113.35
Thompson	0.73	0.29	0.61	28.47
Milbrandt-Yau	0.71	-0.39	0.18	102.67
Morrison	0.68	0.23	0.58	108.16
CAM	0.04	-1.55	-0.41	175.00
SBU_YLIN	0.20	-1.01	-0.08	195.00
WDM5	0.72	0.18	0.55	56.90
WDM6	0.67	0.21	0.58	38.92
NSSL	0.20	-1.06	-0.03	203.57

Table 5- Values of statistical measures and forecast values of microphysical schemes that performed best in forecasting precipitation in 17 events

جدول ۵- مقادیر سنجه‌های آماری و مقادیر پیش‌بینی شده مربوط به طرح‌واره‌های خردفیزیکی که بهترین عملکرد را در پیش‌بینی بارش در ۱۷ رخداد را داشته‌اند

Event Number	Best Scheme	Observed PCP	Forecasted PCP	r	RE (%)	KGE	NSE
Case-1	NSSL	17.70	7.30	0.35	34.70	-0.09	-0.61
Case-2	NSSL	16.80	13.60	0.63	7.80	0.57	0.14
Case-3	Lin	18.30	15.60	0.59	0.42	0.33	0.22
Case-4	Thompson	9.70	13.20	0.73	19.00	0.52	0.34
Case-5	NSSL	21.00	17.00	0.78	22.30	0.59	0.55
Case-6	NSSL	27.10	23.20	0.72	12.00	0.58	0.49
Case-7	MYD-7	30.30	14.10	0.36	15.80	-0.05	-0.67
Case-8	Thompson	18.30	9.20	0.05	17.70	-0.16	-0.60
Case-9	WSM-6	15.70	8.70	0.60	42.70	0.26	0.00
Case-10	WDM-6	20.00	10.00	0.30	22.03	-0.16	-0.45
Case-11	WSM-3	16.10	14.60	0.45	30.60	0.35	0.03
Case-12	WDM-5	22.10	18.90	0.68	4.34	0.64	0.29
Case-13	NSSL	27.57	16.70	0.73	38.40	0.49	0.17
Case-14	Thompson	24.30	24.27	0.83	1.10	0.71	0.46
Case-15	WDM-6	8.56	8.10	0.78	84.20	0.59	0.53
Case-16	WSM-3	22.10	10.20	0.36	21.15	-0.07	-1.03
Case-17	Morrison	12.80	11.90	0.78	6.50	0.58	0.32

اساس امتیاز وزنی حاصله که ۲/۶، مناسب‌ترین عملکرد را در برآورد بارش در منطقه مورد مطالعه را داشته است. طرح‌واره WDM-6 با امتیاز وزنی ۲/۳۵ و پس از آن MYD-7 با امتیاز وزنی ۲/۱ بالاترین وزن و مناسب‌ترین عملکرد را در تخمین بارش را در این حوضه نشان می‌دهند.

بر اساس شکل‌های ۷ و ۸ و جدول ۵ تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامتر سازی خردفیزیک نشان می‌دهد که در ۱۷ رخداد موردبررسی، طرح‌واره NSSL بر اساس سنجه‌های ارزیابی در ۵ رخداد دارای بالاترین کارایی بوده است که شامل Case-1، Case-2، Case-5، Case-6 و Case-13 است. این طرح‌واره در یک رخداد از نظر کارایی در رتبه دوم و در یک رخداد هم در رتبه سوم قرار داشته است و بر

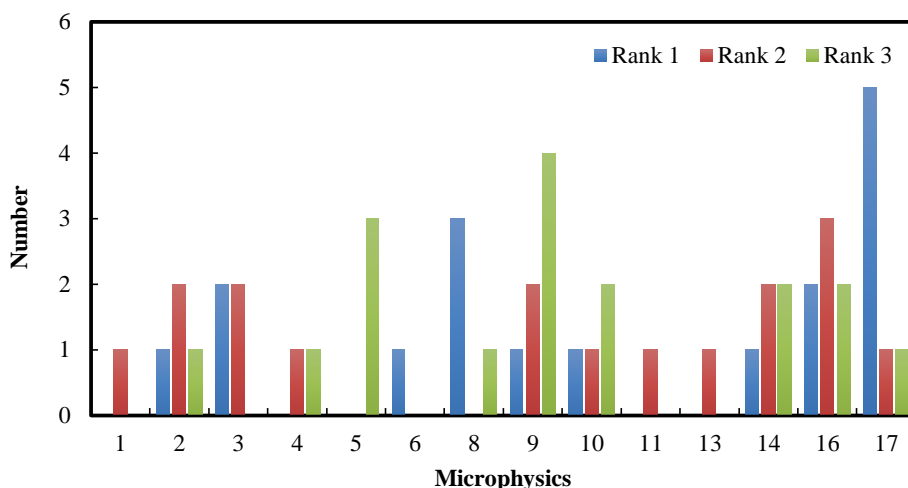


Fig. 7- The performance of each of the microphysics schemas based on the number of ranks 1 to 3 in the investigated events

شکل ۷- عملکرد هر یک از طرح‌واره‌های خردفیزیک بر اساس تعداد رتبه‌های ۱ تا ۳ کسب شده در واقعه‌های مورد بررسی

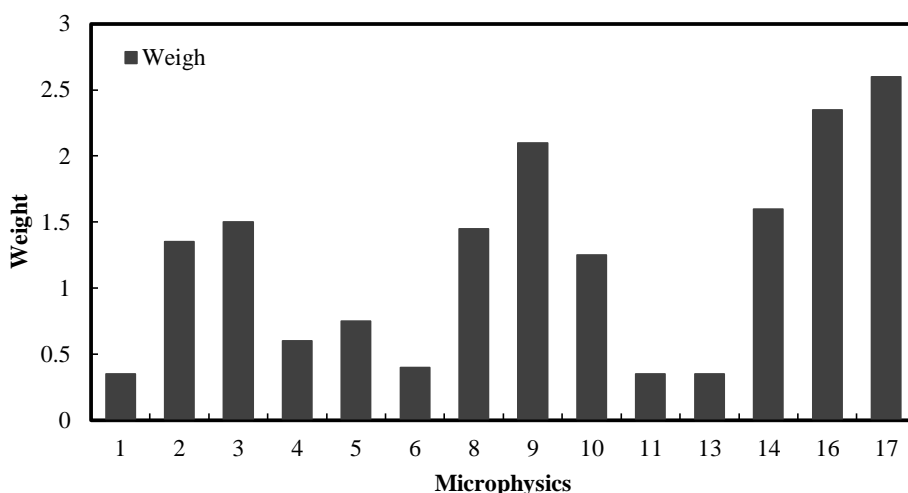


Fig. 8- The performance of each microphysics scheme based on the calculated weight

شکل ۸- عملکرد هر یک از طرح‌واره‌های خردفیزیک بر اساس وزن محاسبه شده

در شکل ۹ عملکرد ۸ طرح‌واره لایه مرزی سیاره‌ای مورد بررسی در پیش‌بینی بارش ۲۴ ساعته نسبت به مقادیر مشاهداتی نشان داده شده است. دامنه تغییرات پیش‌بینی‌های بارش در لایه مرزی سیاره‌ای کمتر از خردفیزیک است که نشان می‌دهد که خردفیزیک نقش مؤثرتری را در پیش‌بینی صحیح بارش دارد. در رخداد Case-1 دامنه تغییرات متوسط بارش پیش‌بینی شده در ایستگاه‌های مورد بررسی ۰/۷۳ میلی‌متر است، در حالی که این مقدار برای خردفیزیک ۳/۸۴ میلی‌متر بوده است، یا در رخداد Case-2، دامنه تغییرات میانگین بارش در ایستگاه‌های مورد بررسی بین کمترین و بیشترین مقادیر پیش‌بینی ۴/۶۳ میلی‌متر است، در حالی که این مقدار برای لایه مرزی سیاره‌ای

۳-۲- حساسیت‌سنجی مدل نسبت به طرح‌واره‌های لایه مرزی سیاره‌ای

در این مرحله اجرای مدل با طرح‌واره‌های مختلف لایه مرزی سیاره‌ای و بهترین طرح‌واره‌های خردفیزیک، تابش موج کوتاه و بلند، لایه سطحی در هر رخداد انجام شد و پس از استخراج مقادیر بارش ۲۴ ساعته، سنجه‌های مختلف ارزیابی محاسبه شد. فرایند انتخاب مناسب‌ترین طرح‌واره‌های لایه مرزی سیاره‌ای نیز مشابه خردفیزیک بود.

است که شامل Case-8, Case-9, Case-14, Case-16 و Case-17 است. این طرح‌واره در ۴ رخداد از نظر عملکرد در رتبه دوم قرار داشته است و بر اساس امتیاز وزنی، با وزن ۳/۴، مناسب‌ترین عملکرد را در برآورد بارش در حوضه آبریز زاینده‌رود داشته است. طرح‌واره UWMT با امتیاز وزنی ۲/۶۵ که در ۳ رخداد رتبه اول، در ۲ رخداد در رتبه دوم و در ۳ رخداد دیگر هم در رتبه سوم از نظر دقت نتایج قرار داشته است و دیگر طرح‌واره سازگار با منطقه است.

۲/۹ میلی‌متر است. بنابراین انتخاب لایه‌مرزی مناسب می‌تواند در تدقیق پیش‌بینی‌ها کمک شایانی نماید.

بر اساس جدول ۶ تحلیل حساسیت مدل WRF در پیش‌بینی بارش نسبت به پارامترسازی لایه مرزی سیاره‌ای نشان می‌دهد که در ۱۷ رخداد مورد بررسی، طرح‌واره BouLac بر اساس آماره‌های حاصل از محاسبه سنجه‌های ارزیابی در ۵ رخداد دارای بهترین عملکرد بوده

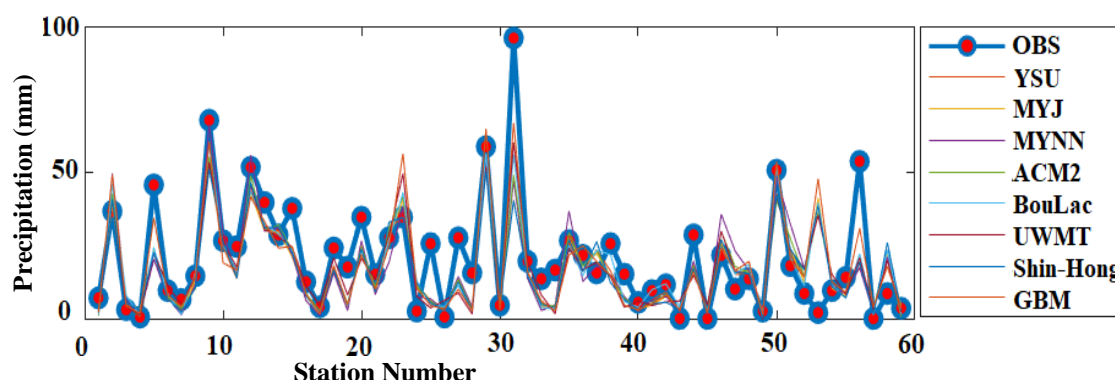


Fig. 9- Predicted precipitation in 8 PBL schemes investigated in the event of 01/29/2013 compared to observed precipitation in 60 rain gauge stations

شکل ۹- مقادیر بارش پیش‌بینی شده توسط مدل در ۸ طرح‌واره لایه مرزی سیاره‌ای مورد بررسی در رخداد بارش ۲۰۱۳/۰۱/۲۹ در مقایسه با مقادیر مشاهداتی در ۶۰ ایستگاه باران‌سنجی

Table 6- Values of statistical measures and forecast values of PBL schemes that performed best in forecasting precipitation in 17 events

جدول ۶- مقادیر سنجه‌های آماری و بارش پیش‌بینی شده مربوط به طرح‌واره‌های لایه مرزی سیاره‌ای که بهترین عملکرد را در

پیش‌بینی بارش در ۱۷ رخداد مورد بررسی داشته‌اند

Event Number	Best Scheme	Observed PCP	Forecasted PCP	r	RE (%)	KGE	NSE
Case-1	GBM	17.70	7.40	0.34	23.10	-0.07	-0.58
Case-2	MYJ	16.80	14.60	0.63	1.40	0.60	0.16
Case-3	YSU	18.30	15.50	0.51	38.60	0.28	0.21
Case-4	ACM2	9.70	12.50	0.75	90.70	0.57	0.26
Case-5	GBM	21.00	18.60	0.82	56.60	0.76	0.65
Case-6	UWMT	27.10	23.00	0.66	68.00	0.37	0.58
Case-7	MYJ	30.30	15.10	0.42	11.00	0.00	-0.50
Case-8	BouLac	18.30	10.10	0.13	50.30	-0.16	-0.66
Case-9	BouLac	15.70	7.90	0.76	37.00	0.26	0.10
Case-10	Shin-Hong	20.00	9.60	0.19	21.50	-0.15	-0.40
Case-11	UWMT	16.10	12.90	0.44	32.00	0.40	0.05
Case-12	ACM2	22.10	17.70	0.66	3.00	0.59	0.21
Case-13	ACM2	27.57	17.60	0.71	38.00	0.53	0.18
Case-14	BouLac	24.30	23.50	0.79	7.80	0.53	0.77
Case-15	UWMT	8.56	8.49	0.76	74.10	0.70	0.58
Case-16	BouLac	22.10	12.10	0.10	8.50	-0.18	-0.70
Case-17	BouLac	12.80	11.40	0.69	15.60	0.67	0.37

برای لایه مرزی سیاره‌ای در حدود ۷ میلی‌متر بود، در طرح‌واره‌های مختلف همرفت متوسط دامنه تغییرات بارش پیش‌بینی شده حدود ۹ میلی‌متر محاسبه گردید. البته ماهیت سامانه بارشی (گرم یا سرد) در اثر پارامتر همرفت بسیار با اهمیت است (شکل ۱۲) بطوریکه در رخداد ۲۰۱۳/۰۱/۲۹ که ماهیت سامانه بارشی جبهه‌ای است، طرح‌واره‌های مختلف همرفتی کارایی یکسانی در پیش‌بینی بارش داشته‌اند در حالی که در رخداد ۲۰۱۶/۰۴/۱۵ که کارایی طرح‌واره‌های مختلف متفاوت است که نشان می‌دهد ماهیت سامانه در اثر بخشی این پارامتر بسیار اهمیت دارد.

طرح‌واره‌های GBM و MYJ هم با امتیازهای ۲/۳۵ و ۲/۲۵ در رتبه‌های سوم و چهارم قرار دارند. بنابراین مناسب‌ترین طرح‌واره لایه مرزی سیاره‌ای در منطقه زاینده‌رود در برآورد بارش از بین طرح‌واره‌های مورد بررسی، طرح‌واره BouLac است (شکل ۱۰ و ۱۱).

۳-۳- حساسیت‌سنجی مدل نسبت به طرح‌واره‌های همرفت

برخلاف خردفیزیک که تغییر طرح‌واره‌ها باعث ایجاد دامنه تغییرات قابل توجه در میانگین بارش پیش‌بینی شده در ایستگاه‌های مورد بررسی گردید (حدود ۶۷ میلی‌متر برای ۱۷ رخداد مورد بررسی) و این دامنه

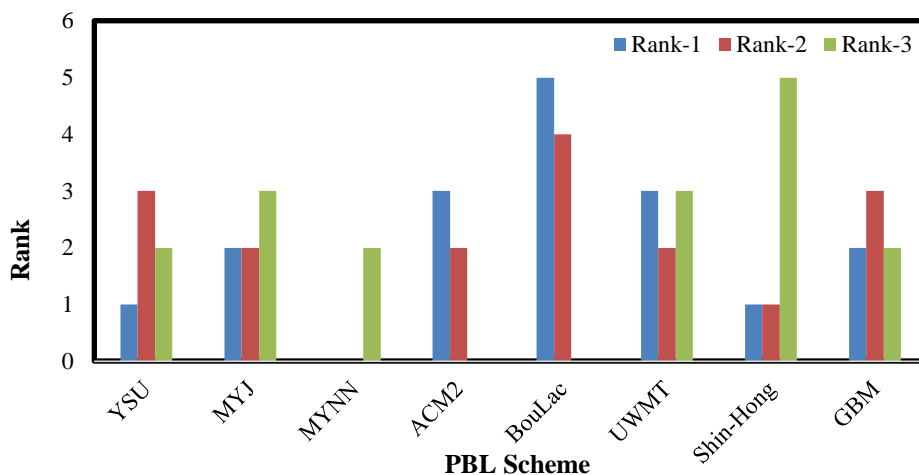


Fig. 10- The performance of each of the PBL schemas based on the number of ranks 1 to 3 in the investigated events

شکل ۱۰- عملکرد هر یک از طرح‌واره‌های لایه مرزی سیاره‌ای بر اساس تعداد رتبه‌های ۱ تا ۳ کسب شده در واقعه‌های مورد بررسی

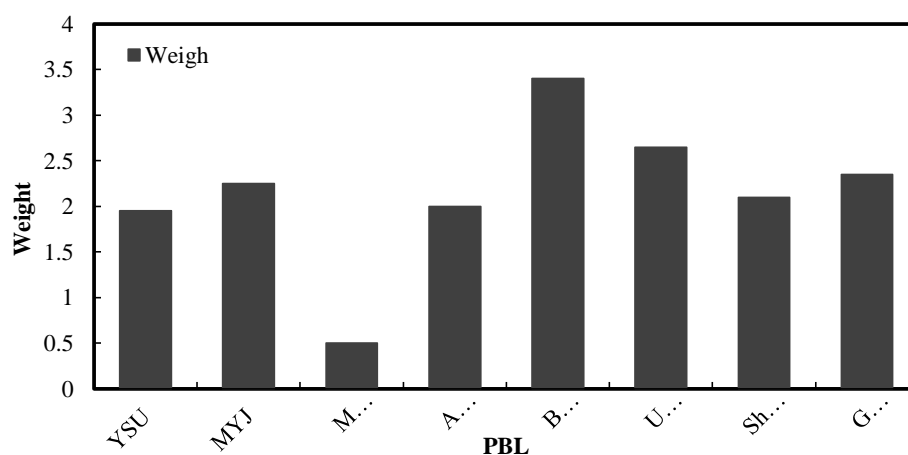


Fig. 11- The performance of each PBL scheme based on the calculated weight

شکل ۱۱- عملکرد هر یک از طرح‌واره‌های لایه مرزی سیاره‌ای بر اساس وزن محاسبه‌شده

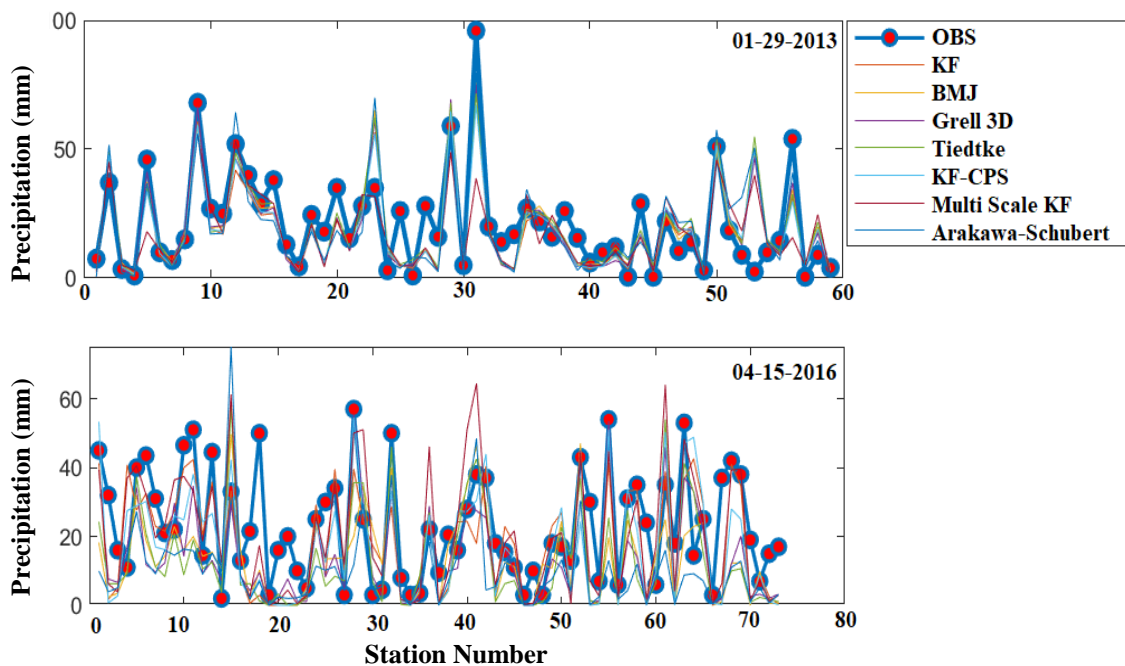


Fig. 12- Forecast precipitation in 7 Cumulus schemes investigated in the rainfall events of 01/29/2013 and 04/15/2016 compared to the observed precipitation

شکل ۱۲- مقادیر بارش پیش‌بینی شده توسط مدل در ۷ طرح‌واره همرفت مورد بررسی در رخداد‌های بارشی ۲۹/۰۱/۲۰۱۳ و ۱۵/۰۴/۲۰۱۶ در مقایسه با مقادیر مشاهداتی

طرح‌واره KF هم با امتیاز ۲/۹۵ در رتبه سوم از نظر کارایی قرار دارد. بنابراین مناسب‌ترین طرح‌واره همرفت در منطقه مورد مطالعه در برآورد بارش، طرح‌واره Tiedtke است (شکل ۱۴).

۳-۴- حساسیت‌سنجی نسبت به ترکیب طرح‌واره‌های مختلف در ادامه ترکیب طرح‌واره‌های مختلف برای رخداد نمونه ۲۰۱۸/۰۵/۰۹ بررسی می‌شود تا حساسیت مدل نسبت به ترکیب‌های مختلف طرح‌واره‌های فیزیکی سنجدیده شود. در واقع در این بخش به این سؤال پاسخ داده خواهد شد که آیا بهترین نتایج از ترکیب بهترین طرح‌واره‌ها به دست می‌آید یا طرح‌واره‌های مربوط به پارامترهای مختلف بر کارایی طرح‌واره‌ها اثرگذار است و ممکن است منجر به تغییر در عملکرد کلی طرح‌واره‌هایی شود که عملکرد مناسبی داشته‌اند. بر این اساس با توجه به نتایجی که در مراحل قبلی این مطالعه استخراج شد، برای رخداد نمونه ۲۰۱۸/۰۵/۰۹ پیکربندی‌های مختلفی از طرح‌واره‌های فیزیکی مربوط به پارامترهای خردفیزیک، لایه مرزی سیاره‌ای و همرفت، انتخاب و حساسیت مدل در رخداد ذکر شده نسبت پیکربندی‌های مختلف بررسی شد. در مجموع ۱۰۵ پیکربندی بررسی شد.

جدول ۷ عملکرد طرح‌واره‌های مختلف همرفت که بهترین عملکرد را در پیش‌بینی بارش در ۱۷ رخداد مورد بررسی داشته‌اند را بر اساس نمایه‌های مختلف آماری نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در رخداد‌های مختلف، طرح‌واره‌های متنوعی دارای بیشترین کارایی بوده‌اند، اما به‌طور کلی از بین ۷ طرح‌واره همرفت بررسی شده طرح‌واره Tiedtke در ۶ رخداد دارای بالاترین کارایی، طرح‌واره Grell 3D در چهار رخداد، طرح‌واره KF-CP در سه رخداد و طرح‌واره AS هم دو رخداد دارای بهترین عملکرد بوده‌اند.

بر اساس جدول ۷ و شکل ۱۳ تحلیل حساسیت مدل WRF نسبت به پارامترسازی همرفت نشان می‌دهد که در ۱۷ رخداد مورد بررسی، طرح‌واره Tiedtke بر اساس تحلیل سنجه‌های ارزیابی در ۶ رخداد دارای بهترین عملکرد بوده است. این طرح‌واره در ۲ رخداد از نظر کارایی در رتبه دوم و در دو رخداد دیگر در رتبه قرار داشته است و بر اساس امتیاز وزنی، با وزن ۳/۶، مناسب‌ترین عملکرد را در برآورد بارش در حوضه آبریز زاینده‌رود داشته است. طرح‌واره Grell 3D با امتیاز وزنی ۳/۳۵ که در ۴ رخداد رتبه اول، در ۵ رخداد در رتبه دوم از نظر دقت نتایج قرار داشته است، دیگر طرح‌واره سازگار با منطقه است.

خردفیزیک Morrison تعیین شد، همچنین برای لایه مرزی سیاره‌ای و همرفت هم به ترتیب BouLac و Grell 3D هم دارای بهترین عملکرد در پیش‌بینی بارش در منطقه مورد مطالعه بودند، لذا می‌توان گفت که در صورت حساسیت‌سنجی مدل WRF نسبت به پارامترسازی فیزیکی و تعیین طرح‌واره‌های بهینه برای هر پارامتر، می‌توان با ترکیب پارامترهای فیزیکی بهینه، بالاترین عملکرد را در برآورد بارش ۲۴ ساعته در منطقه مورد مطالعه به دست آورد.

بر اساس شکل ۱۵ مقادیر بیشینه نمایه KGE به‌عنوان نمایه‌ای که می‌توان عملکرد مدل را در برآورد بارش ۲۴ ساعته در رخدادهای نمونه ۲۰۱۸/۰۵/۰۹ ارزیابی نمود، بالاترین مقادیر نمایه KGE برای عضو ۱۵۶م (یعنی ترکیب پیکربندی‌های (Morrison-BouLac-Grell 3D) از پیکربندی‌های موردبررسی محاسبه شده است. پس از آن نیز ترکیب طرح‌واره‌های (Morrison-MYJ-Grell 3D) دارای بالاترین مقادیر نمایه KGE برای تخمین بارش بوده است. با توجه به اینکه در بخش‌های قبلی برای این رخداد، طرح‌واره بهینه برای پارامترسازی

Table 7- Values of statistical measures and forecast values of Cumulus schemes that performed best in forecasting precipitation in 17 events

جدول ۷- مقادیر سنجه‌های آماری و بارش پیش‌بینی شده مربوط به طرح‌واره‌های همرفت که بهترین عملکرد را در پیش‌بینی بارش در ۱۷ رخداد موردبررسی داشته‌اند

Event Number	Best Scheme	Observed PCP	Forecasted PCP	r	RE (%)	KGE	NSE
Case-1	Tiedtke	17.70	10.3	0.52	10.8	0.25	-0.11
Case-2	KF	16.80	15.9	0.63	1.4	0.59	0.16
Case-3	AS	18.30	16	0.6	6.2	0.43	0.25
Case-4	KF-CP	9.70	12.6	0.77	92	0.58	0.3
Case-5	Grell 3D	21.00	20.1	0.84	69	0.82	0.68
Case-6	Grell 3D	27.10	25.8	0.57	47.3	0.57	0.53
Case-7	Tiedtke	30.30	18.4	0.62	3.4	0.22	-0.13
Case-8	Tiedtke	18.30	10.6	0.47	22.8	0.05	-0.2
Case-9	Tiedtke	15.70	10.1	0.83	5.9	0.46	0.41
Case-10	Grell 3D	20.00	12.1	0.46	18.1	0.14	-0.09
Case-11	KF-CP	16.10	13.1	0.68	0.22	0.53	0.14
Case-12	MS-KF	22.10	21	0.71	5	0.64	0.25
Case-13	Tiedtke	27.57	23.4	0.74	8	0.64	0.3
Case-14	KF-CP	24.30	23.9	0.78	6.4	0.76	0.51
Case-15	AS	8.56	8.7	0.79	0.65	0.7	0.63
Case-16	Tiedtke	22.10	12.4	0.34	17.2	0.08	-0.3
Case-17	Grell 3D	12.80	11.8	0.73	1.1	0.71	0.21

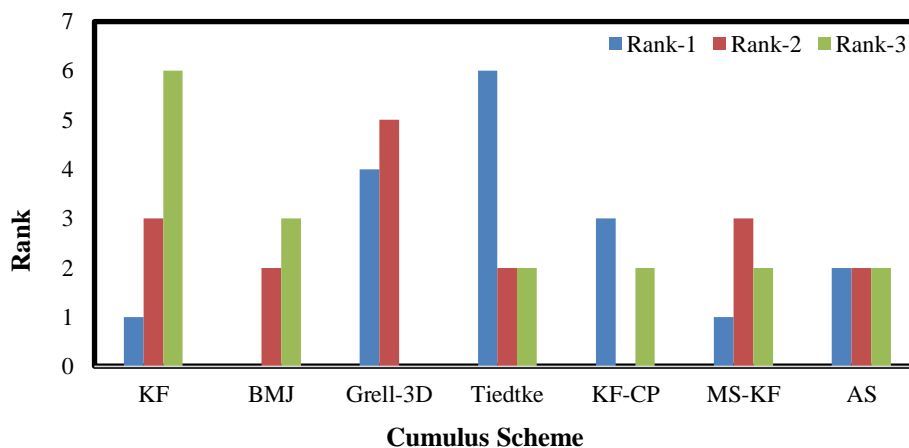


Fig. 13- The performance of each of the Cumulus schemas based on the number of ranks 1 to 3 in the investigated events

شکل ۱۳- عملکرد هر یک از طرح‌واره‌های همرفت بر اساس تعداد رتبه‌های ۱ تا ۳ کسب شده در واقعه‌های مورد بررسی

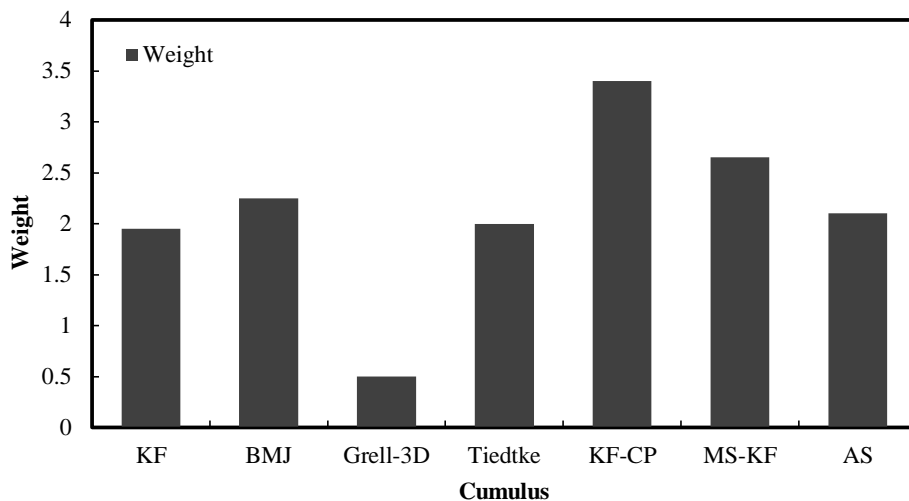


Fig. 14- The performance of each Cumulus scheme based on the calculated weight
 شکل ۱۴- عملکرد هر یک از طرح‌واره‌های همرفت بر اساس وزن محاسبه‌شده

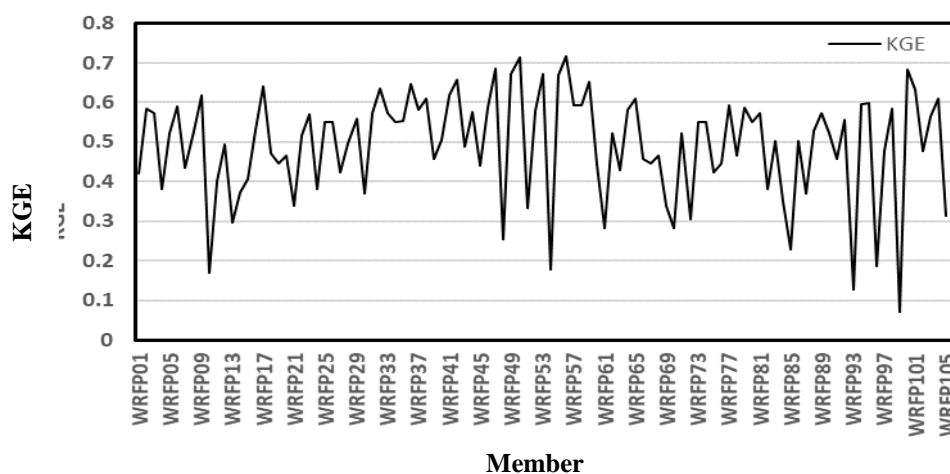


Fig. 15- KGE statistics for 105 investigated configurations for precipitation event of 05/09/2018
 شکل ۱۵- آماره KGE برای ۱۰۵ پیکربندی مورد بررسی برای رخداد بارش ۲۰۱۸/۰۵/۰۹

پارامترسازی خردفیزیک بر اساس طرح‌واره‌های مختلف آن در محدوده استان اصفهان نشان داد که در بین ۱۴ طرح‌واره خردفیزیک مورد بررسی، به ترتیب سه طرح‌واره NSSL، WDM-6 و MYD-7 دارای مناسب‌ترین عملکرد در شبیه‌سازی بارش منجر به وقوع سیلاب بوده‌اند. بعد از خردفیزیک، پارامتر همرفت دارای اهمیت بیشتری است، به طوری که در صورت انتخاب طرح‌واره مناسب خردفیزیک و همچنین همرفت، می‌توان انتظار داشت که مدل بتواند مقادیر بارش را تا حدودی نزدیک به مقادیر مشاهداتی شبیه‌سازی نماید. از بین ۷ طرح‌واره همرفت مورد بررسی، سه طرح‌واره Tiedtke، Grell 3D و Kain-Fritsch از کارایی بالاتر و سازگاری بیشتری با منطقه در شبیه‌سازی

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

حساسیت‌سنجی مدل WRF نسبت به پارامترسازی فیزیکی نشان می‌دهد که برای پیش‌بینی بارش منجر به وقوع سیلاب از بین پارامترهای فیزیکی تابش، لایه سطحی، خردفیزیک، لایه مرزی سیاره‌ای و همرفت، انتخاب طرح‌واره مناسب خردفیزیک از اهمیت بالاتری نسبت به ۴ پارامتر دیگر برخوردار است و در صورت انتخاب طرح‌واره خردفیزیک مناسب، می‌توان انتظار داشت که شبیه‌سازی بارش از دقت مناسبی برخوردار باشد، هرچند متناسب با نوع رخداد بارش نباید انتظار داشت که مدل در کلیه رخدادها بتواند عملکرد مطلوبی داشته باشد. حساسیت‌سنجی مدل WRF نسبت به

پی‌نوشت‌ها

- 1- Weather Research and Forecasting
- 2- Planetary Boundary Layer (PBL)
- 3- Grell and Devenyi-Mellor, Yamada, Janjić
- 4- Kain Fritsch-Mellor, Yamada, Janjić
- 5- Root Mean Squared Error (RMSE)
- 6- Global Forecast System
- 7- ECMWF Reanalysis v5
- 8- Kling-Gupta Efficiency
- 9- Nash-Sutcliffe Efficiency
- 10- Relative Error
- 11- Average Pixels Base
- 12- K-Nearest Neighbors

بارش برخوردار بوده‌اند. سومین پارامتر مهم در شبیه‌سازی بارش لایه‌مرزی سیاره‌ای است که در بین ۸ طرح‌واره موردبررسی برای این پارامتر، طرح‌واره BouLac و پس‌از آن UWMT و GBM از دقت بیشتری برای شبیه‌سازی بارش برخوردار بوده‌اند. همچنین، انتخاب طرح‌واره‌های مناسب تابش و لایه سطحی هم می‌توانند در افزایش دقت پیش‌بینی‌های بارش اثرگذار باشند، هرچند که نسبت به دو پارامتر خردفیزیک ابر و همرفت از اهمیت کمتری برخوردار هستند. بنابراین با انتخاب طرح‌واره‌های بهینه برای هر پارامتر فیزیکی شامل خردفیزیک، لایه مرزی سیاره‌ای، همرفت، تابش (موج کوتاه و بلند) و لایه سطحی، کارایی مدل WRF در شبیه‌سازی و یا پیش‌بینی بارش هم بهبود می‌یابد. لذا در صورت حساسیت‌سنجی مدل نسبت به پارامترسازی فیزیکی و تعیین طرح‌واره‌های بهینه برای هر پارامتر، می‌توان با ترکیب پارامترهای فیزیکی بهینه، بالاترین عملکرد را در برآورد بارش در منطقه مورد مطالعه به دست آورد. با توجه به اهمیت پارامتر همرفت در پیش‌بینی بارش پیشنهاد می‌شود که در یک مطالعه به تحلیل حساسیت مدل WRF نسبت به پارامترسازی همرفت به صورت مجزا در تفکیک‌های افقی مختلف و برای رخداد‌های بارشی مختلف در طول سال (جبهه‌ای و همرفتی) پرداخته شود.

۵- تقدیر و تشکر

تحقیق حاضر برگرفته از بخشی از نتایج طرح پژوهشی "توسعه سامانه کشوری پایش و پیش‌بینی سیلاب برای مناطق حادثه‌خیز در استان اصفهان (مطالعه موردی حوضه آبریز سد زاینده‌رود)" است. بدین‌وسیله نویسندگان مقاله از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان به‌عنوان حامی مالی پروژه قدردانی می‌نمایند.

۶- مراجع

- Anderson ML, Chen Z-Q, Kavvas ML, and Feldman A (2002) Coupling HEC-HMS with atmospheric models for prediction of watershed runoff. *Journal of Hydrologic Engineering*. American Society of Civil Engineers 7(4):312–318
- Arkian F, Mashatan N, Katiraie Borojerdi PS, and Mirzaei Haji Baghlo E (2015) Evaluation of precipitation forecasts of WRF model for daily heavy rain in Qazvin Province during 2002-2011. *Journal of Marine Science & Technology Research* 9(4):88-102 (In Persian)
- Bougeault P and Lacarrere P (1989) Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model. *Monthly Weather Review* 117(8):1872–1890
- Bretherton CS and Park S (2009) A new moist turbulence parameterisation in the Community Atmosphere Model. *Journal of Climate* 22(12):3422–3448
- Chou MD and Suarez MJ (1994) An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models. *NASA Technical Memorandum* 104606, 3, 85pp
- Chou MD, Suarez MJ, Liang XZ, Yan MMH (2001) A thermal infrared radiation parameterization for atmospheric studies. *NASA Technical Memorandum* 104606, 19, 68pp
- Collischonn W, Tucci CEM, Clarke RT, Chou SC, Guilhon LG, Cataldi M, and Allasia D (2007) Medium-range reservoir inflow predictions based on quantitative precipitation forecasts. *Journal of Hydrology*. Elsevier 344(1–2):112–122
- Dudhia J (1989) Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of Atmospheric Sciences* 46(20):3077–3107
- Eaton B (2011) User's guide to the Community Atmosphere Model CAM-5.1. NCAR. URL <http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.0/cam>
- Elguindi N, Bi XQ, Giorgi F, Nagarajan B, Pal J, Solmon F, Rauscher S, Zakey A, and Giuliani G (2011) Regional Climatic Model RegCM User Manual Version 4.1. The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics Strada Costiera, Trieste
- Emmanouil G, Vlachogiannis D, and Sftos A (2021) Exploring the ability of the WRF-ARW atmospheric model to simulate different meteorological conditions in Greece. *Atmospheric Research*. Elsevier 247:105226
- Fovell RG and Su H (2007) Impact of cloud microphysics on hurricane track forecasts. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library 34(24)
- Frasera D, Tange P, and Kama A (2010) Early warning and on-line mapping for flood events. *Geoscience and Remote Sensing: New Achievements*. BoD–Books on Demand 147
- Gholami S, Ghader S, Khaleghi Zavareh H, & Ghafarian P (2019) Sensitivity of the WRF model surface wind simulations to initial conditions and planetary boundary layer parameterization schemes (case study: over Persian Gulf). *Iranian Journal of Geophysics* 13(1):14-31
- Grell GA and Dévényi D (2002) A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library 29(14):31–38
- Grenier H and Bretherton CS (2001) A moist PBL parameterization for large-scale models and its application to subtropical cloud-topped marine boundary layers. *Monthly Weather Review* 129(3):357–377
- Habets F, LeMoigne P and Noilhan J (2004) On the utility of operational precipitation forecasts to served as input for streamflow forecasting. *Journal of Hydrology* 293(1–4):270–288
- Han J and Pan H-L (2011) Revision of convection and vertical diffusion schemes in the NCEP Global Forecast System. *Weather and Forecasting*. American Meteorological Society 26(4):520–533
- Hong S-Y, Dudhia J, and Chen S-H (2004) A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Monthly Weather Review*, American Meteorological Society 132(1):103–120
- Hong S-Y and Pan H-L (1998) Convective trigger function for a mass-flux cumulus parameterization scheme. *Monthly Weather Review* 126(10):2599–2620
- Hopson TM and Webster PJ (2010) A 1–10-day ensemble forecasting scheme for the major river basins of Bangladesh: Forecasting severe floods of 2003–07. *Journal of Hydrometeorology* 11(3):618–641
- Iacono MJ, Delamere JS, Mlawer EJ, Shephard MW, Clough SA, and Collins WD (2008) Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of*

- Geophysical Research: Atmospheres. Wiley Online Library 113(D13)
- Janjić ZI (1994) The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review*, American Meteorological Society 122(5):927–945
- Jankov I, Gallus Jr WA, Segal M, and Koch SE (2007) Influence of initial conditions on the WRF–ARW model QPF response to physical parameterization changes. *Weather and Forecasting* 22(3):501–519
- Jankov I, Gallus WA, Segal M, Shaw B, and Koch SE (2005) The impact of different WRF model physical parameterizations and their interactions on warm season MCS rainfall. *Weather and Forecasting*, American Meteorological Society 20(6):1048–1060
- Jee J-B and Kim S (2017) Sensitivity study on high-resolution WRF precipitation forecast for a heavy rainfall event. *Atmosphere* 8(6):96-103
- Kain JS (2004) The Kain–Fritsch convective parameterization: An update. *Journal of Applied Meteorology* 43(1):170–181
- Kessler E (1969) On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations. On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulations 1–84
- Khansalari S, Ranjbar-Saadatabadi A, Fazel-Rastgar F, and Raziei T (2021) Synoptic and dynamic analysis of a flash flood-inducing heavy rainfall event in arid and semi-arid central-northern Iran and its simulation using the WRF model. *Dynamics of Atmospheres and Oceans* 93:101198
- Lim K-SS and Hong S-Y (2010) Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. *Monthly Weather Review*, American Meteorological Society 138(5):1587–1612
- Lin Y-L, Farley RD, and Orville HD (1983) Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 22(6):1065–1092
- Lin Y and Colle BA (2011) A new bulk microphysical scheme that includes riming intensity and temperature-dependent ice characteristics. *Monthly Weather Review*, American Meteorological Society 139(3):1013–1035
- Lowrey MRK and Yang Z-L (2008) Assessing the capability of a regional-scale weather model to simulate extreme precipitation patterns and flooding in central Texas. *Weather and Forecasting*, American Meteorological Society 23(6):1102–1126
- Merino A, García-Ortega E, Navarro A, Sánchez J L, and Tapiador F J (2022) WRF hourly evaluation for extreme precipitation events. *Atmospheric Research* 274:106215
- Milbrandt JA and Yau MK (2005) A multimoment bulk microphysics parameterization. Part II: A proposed three-moment closure and scheme description. *Journal of the Atmospheric Sciences*, American Meteorological Society 62(9):3065–3081
- Miller RL (2023) Managed diversion lead time effects on flood response in a tidal freshwater river. *Journal of Flood Risk Management*, Wiley Online Library, e12917
- Monin AS and Obukhov AM (1954) Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contributions of the Geophysical Institute of the Slovak Academy of Sciences* 24:163-187
- Moradi S, Javanmard S, Ghader S, Azadi M, and Gharayloo M (2020) The most effective scheme in improving the performance of the WRF model for precipitation over northwest Iran. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, Atmospheric Science and Meteorological Research Institute 3(3):188-200 (In Persian)
- Nakanishi M and Niino H (2004) An improved Mellor–Yamada level-3 model with condensation physics: Its design and verification. *Boundary-Layer Meteorology*, Springer 112:1–31
- Nasrollahi N, AghaKouchak A, Li J, Gao X, Hsu K, and Sorooshian S (2012) Assessing the impacts of different WRF precipitation physics in hurricane simulations. *Weather and Forecasting* 27(4):1003–1016
- Nooni IK, Tan G, Hongming Y, Saidou Chaibou AA, Habtemicheal BA, Gnitou GT, and Lim Kam Sian KTC (2022) Assessing the performance of WRF model in simulating heavy precipitation events over East Africa using satellite-based precipitation product. *Remote Sensing*
- Nyeko M (2015) Hydrologic modelling of data scarce basin with SWAT model: Capabilities and limitations. *Water Resources Management* 29:81–94
- Ozkaya A and Akyurek Z (2020) WRF-hydro model application in a data-scarce, small and topographically steep catchment in Samsun, Turkey. *Arabian Journal for Science and Engineering* 45(5):3781–3798

- Pegahfar N, Gharaylou M, and Shoushtari MH (2022) Assessing the performance of the WRF model cumulus parameterization schemes for the simulation of five heavy rainfall events over the Pol-Dokhtar, Iran during 1999–2019. *Natural Hazards* 112(1):253–279
- Pennelly C, Reuter G, and Flesch T (2014) Verification of the WRF model for simulating heavy precipitation in Alberta. *Atmospheric Research* 135:172–192
- Pleim JE (2007) A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part I: Model description and testing. *Journal of Applied Meteorology and Climatology, American Meteorological Society* 46(9):1383–1395
- Rogelis MC and Werner M (2018) Streamflow forecasts from WRF precipitation for flood early warning in mountain tropical areas. *Hydrology and Earth System Sciences, Copernicus GmbH* 22(1):853–870
- Rogers E, Black T, Ferrier B, Lin Y, Parrish D, and DiMego G (2001) Changes to the NCEP Meso Eta Analysis and Forecast System: Increase in resolution, new cloud microphysics, modified precipitation assimilation, modified 3DVAR analysis. *NWS Technical Procedures Bulletin* 488:15
- Shin HH and Hong S-Y (2011) Intercomparison of planetary boundary-layer parametrizations in the WRF model for a single day from CASES-99. *Boundary-Layer Meteorology* 139:261–281
- Skamarock WC, Klemp JB, and Dudhia J (2001) Prototypes for the WRF (Weather Research and Forecasting) model. Preprints, Ninth Conf. Mesoscale Processes, J11–J15, Amer. Meteorol. Soc., Fort Lauderdale, FL
- Thompson G, Field PR, Rasmussen RM, and Hall WD (2008) Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization. *Monthly Weather Review, American Meteorological Society* 136(12):5095–5115
- Tiedtke M (1989) A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Monthly Weather Review* 117(8):1779–1800
- Valappil VK, Kedia S, Dwivedi AK, Pokale SS, Islam S, and Khare MK (2023) Assessing the performance of WRF ARW model in simulating heavy rainfall events over the Pune region: In support of operational applications. *Meteorology and Atmospheric Physics* 135(2):16
- Wild M, Ohmura A, Gilgen H, Morcrette JJ, Slingo A (2001) Downward longwave radiation in general circulation models. *Journal of Climate* 14:3227–3239.
- Yazdanpanah Gharaei F, PourrezaBilondi M, Mianabadi A, Babaei M, and 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)
- Yucel I, Onen A, Yilmaz KK, and Gochis DJ (2015) Calibration and evaluation of a flood forecasting system: Utility of numerical weather prediction model, data assimilation and satellite-based rainfall. *Journal of Hydrology, Elsevier B.V.* 523:49–66
- Zeyaeyan S, Fattahi E, Ranjbar SaadatAbadi A, Azadi M, and Vazifedoust M (2017) Evaluating the effect of physics schemes in WRF simulations of summer rainfall in north west Iran. *Climate, MDPI* 5(3):48
- Ziegler CL (1985) Retrieval of thermal and microphysical variables in observed convective storms. Part 1: Model development and preliminary testing. *Journal of Atmospheric Sciences* 42(14):1487–1509