

حساسیت‌سنجی مدل WRF به پیکربندی فیزیکی و فرآیندهای همرفتی در پیش‌بینی فصلی بارش در شمال شرق ایران

الهه قاسمی کرکانی^۱، حسین محمدی^{۲*}، قاسم عزیزی^۳، علی اکبر شمسی پور^۴، ابراهیم فتاحی^۵

۱- دانشجوی دکتری آب و هواشناسی دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲ و ۳- استاد، گروه آب و هواشناسی دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران، تهران، ایران

۴- دانشیار، گروه آب و هواشناسی دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران، تهران، ایران

۵- دانشیار، پژوهشکده هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

چکیده

فرآیندهای همرفتی در مدل‌سازی پیش‌بینی‌های جوی در کنار پارامتری‌سازی‌های فیزیکی و شرایط اولیه و مرزی همواره مورد توجه است زیرا پیش‌بینی‌های عددی بویژه در مورد بارش با شدت به پارامترسازی‌های فیزیکی از جمله لایه مرزی سیاره‌ای، مدل سطح زمین، فرآیندهای همرفتی و ... وابسته است. در این مطالعه داده‌های CFSv2، از مجموعه پیش‌بینی‌های فصلی NCEP با مدل WRF به مقیاس منطقه‌ای تبدیل (با دامنه‌های ۵۴، ۱۸ و ۶ کیلومتر) و حساسیت پیش‌بینی فصلی بارش توسط مدل تحقیقاتی آب‌وهوا به پارامتری‌سازی لایه‌مرزی سیاره‌ای و فرآیندهای همرفتی مورد تحلیل قرار گرفته است. با توجه به هدف این مطالعه برای ارزیابی نقش فیزیک لایه‌مرزی سیاره‌ای و پارامترهای همرفت در پیش‌بینی بارش، مدل در ۴ گروه اصلی پیکربندی با طرحواره‌های لایه‌مرزی سیاره‌ای MYNN3، MYJ، YSU و ACM2 و هر گروه با شرایط همرفتی KFT، BMJ، GF، KF و عدم پارامترسازی همرفت در دامنه ۳ در مجموع تحت ۲۰ سناریوی مختلف پیکربندی از ۱ نوامبر ۲۰۱۹ تا ۳۱ می سال ۲۰۲۰ اجرا گردید. ماه اول (نوامبر) به عنوان زمان تطبیق مدل و ۶ ماه بعدی مورد تحلیل قرار گرفته است. خروجی پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که ضرایب همبستگی از ۰/۳۰ تا نزدیک به ۰/۵ برای سناریوهای ۲۰ گانه بدست آمده است میزان انحراف بارش پیش‌بینی شده مدل نسبت به داده‌های مشاهداتی نیز نشان‌دهنده سازگاری نسبی خروجی مدل با پیکربندی‌های انتخابی است. در مجموع می‌توان گفت طرحواره‌های لایه‌مرزی سیاره‌ای YSU همراه با تابش موج‌بلند RRTM، موج‌کوتاه Dudhia و مدل سطح زمین Noah در کنار طرح‌های همرفتی BMJ و KFT توانسته برآوردهایی با خطای کمتری از میزان بارش ارائه کند. نکته قابل توجه دیگر آن است عدم اجرای طرحواره همرفت برای وضوح ۶ کیلومتر (دامنه ۳) نشان داده است در مقیاس بین ۳ تا ۱۰ کیلومتر عملکرد طرحواره‌های همرفتی خاکستری است بدین معنی که اجرا یا عدم اجرای آن می‌تواند نتایج پیش‌بینی‌ها را بهبود بخشد و یا منجر به افزایش خطا در نتایج گردد.

کلید واژه‌ها: پیش‌بینی فصلی، WRF، CFSv2، طرحواره، بارش.

مقدمه

فضایی بالا استفاده می‌گردد (Yan, et al. 2020). به عبارتی مقیاس کاهی پویا می‌تواند پیش‌بینی‌های جهانی را از GCM ها به‌عنوان شرایط اولیه و مرزی دریافت و با لحاظ شرایط فیزیکی (ازجمله توپوگرافی، کاربری زمین، پوشش سطحی و...) به مقیاس‌های منطقه‌ای یا محلی منتقل کند. در نتیجه تنوع آب و هوایی منطقه‌ای و وقایع حدی را در مقایسه با وضوح درشت GCMها بهبود می‌بخشد (Manzanas 2022; Hari Prasad et al., 2018; Samanta et al., 2018). اولین نسخه مدل پیش‌بینی آب‌وهوای فصلی (CFSV1) در یک دوره چندساله در فاصله سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۱ توسعه اجرا و در مارس ۲۰۱۱ نسخه دوم این مدل توسط مرکز ملی پیش‌بینی محیطی (NCEP)، در فاز عملیاتی قرار گرفته است (Saha et al., 2014). این نسخه تقریباً در تمام جنبه‌های اجزای شبیه‌سازی داده‌ها و پیش‌بینی مدل با بهبودهایی همراه بوده است. از برونداد این مدل تاکنون در مطالعات موردی در مناطق مختلف از جمله مطالعات دوانند و همکاران (۲۰۱۸) با تمرکز بر نقش فرآیندهای زمین- جو بر سوگیری خشک بارش‌های موسمی هند، هاری پراساد و همکاران ۲۰۲۱ و راجندران و همکاران ۲۰۲۱ به ترتیب با مطالعه اثر مقیاس کاهی دینامیکی CFSV2 در کاهش خطای سیستماتیک پیش‌بینی باران‌های مونسون هند و تأثیرپذیری پیش‌بینی‌های فصلی بارش مونسون از شرایط اولیه ماه فوریه به‌عنوان نمونه در منطقه هندوستان نام برد. روش پس‌پردازش بارش مدل CFS به همراه منابع دیگر پیش‌بینی‌های بارش در حوضه رودخانه گنجیانگ (2022 Liu et al., نقش طرحواره‌های همرفتی کومولوس در پیش‌بینی بارش با مدل WRF (Gao et al., 2022) و پیش‌بینی بارش‌های فرین دره رودخانه یانگ تسه در تابستان ۲۰۲۰ (Tang et al., 2022) ازجمله مطالعاتی هستند که با کاربست این گروه از داده‌ها (NCEP CFS) و روش‌های مقیاس کاهی دینامیکی در چین انجام شده است. در اروپا سنگلاتونی و همکاران (۲۰۲۱) و در آمریکای شمالی تیان و همکاران (۲۰۱۷)، پال و همکاران (۲۰۱۹) و اندلوو و وویسا (۲۰۲۱) هریک با رویکردهای متفاوتی به مطالعه دقت و کارایی پیش‌بینی فصلی بارش در مناطق مختلف جهان پرداخته‌اند. در مطالعات انجام‌شده در داخل کشور موسوی و همکاران (۱۳۹۸) به ارزیابی داده‌های گذشته‌نگر CFSV2 در

امروزه داده‌های شبکه‌بندی شده پارامترهای هواشناسی به دست آمده از مدل‌های پیش‌بینی آب و هوا همانند GFS, CFS, ECMWF در مراکز عملیاتی هواشناسی از جمله مراکز ملی پیش‌بینی محیطی (NCEP)، مرکز اروپایی پیش‌بینی هوای متوسط (ECMWF) و مراکز دیگر توسعه یافته و در دسترس قرار گرفته‌اند. بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که این گروه از مدل‌سازی‌های عددی که آنها نیز در خانواده مدل‌های گردش جهانی GCMها جای دارند، به دلیل بهبود و ارتقای دانش مدل‌سازی، با دقت بالایی شرایط اولیه و مرزی را برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای هواشناسی فراهم می‌آورند و می‌توان با شناسایی پیکربندی بهینه، دقت پیش‌بینی را به میزان قابل‌توجهی افزایش داد. این پیش‌بینی‌ها بازه‌های زمانی روزانه، هفتگی، ماهانه (کوتاه‌مدت) تا فصلی (درازمدت) را شامل می‌شوند. مدل پیش‌بینی آب‌وهوای فصلی (CFSs) مقیاس‌های زمانی از یک ماه تا یک سال آینده را پوشش می‌دهد و معمولاً به‌عنوان یک تخمین احتمالی از متغیرهای کلیدی آمار ماهانه یا فصلی را ارائه می‌دهد و ابزاری ارزشمند برای برآوردن نیازهای طیف وسیعی از بخش‌های برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری بشمار می‌رود (Bruno Soares and Dessai, 2015; Sangelantoni, et al., 2021). مهارت‌های این مدل به مانند سایر مدل‌های جهانی آب‌وهوا GCMs در پیش‌بینی تغییرپذیری آب‌وهوا در مقیاس زمانی فصلی به‌طور اساسی به توانایی دریافت تغییرات جو، اقیانوس‌ها، دینامیک هیدرولوژی (رطوبت خاک، پوشش برف و ...)، تعاملات و بازخوردها بستگی دارد (Befort, et al., 2019; Doblal - Reyes et al., 2013). علاوه بر این تغییرپذیری استراتوسفر و ناهنجاری‌های یخ دریا نیز منابع اصلی پیش‌بینی مقیاس زمانی فصلی هستند (Weisheimer et al., 2020). کاربست این مدل‌ها در فرآیند پیش‌بینی فصلی مانند پیش‌بینی بارش و دما برای ۱ تا ۱۲ ماه آینده به کمک روش‌های مقیاس کاهی پویا صورت می‌گیرد. برای این منظور از مدل‌های عددی مانند مدل پیش‌بینی منطقه‌ای پیشرفته (ARPS) و تحقیقات و پیش‌بینی آب و هوا (WRF) برای شبیه‌سازی فرآیندهای سطح زمین در مقیاس محلی و شبیه‌سازی‌های با وضوح

است ارزیابی دقیقی از کیفیت پیش‌بینی‌های تولیدشده در منطقه موردنظر باید صورت گیرد. این ارزیابی‌ها همانطور که بیان‌شده با روش‌های بهره‌گیری از مدل‌های آماری و دینامیکی (پویا) امکان‌پذیر است (Saha et al., 2014). روش دینامیکی به دلیل گستره وسیعی از تنظیمات مدل دارای پیچیدگی زیادی است و بیشتر تحلیل‌های حساسیت پیکربندی‌ها در RCMها به دلیل دشواری‌های موجود و نیاز به قدرت محاسباتی بالا تنها یک جنبه را در نظر می‌گیرند اما واضح است که به دلیل پیچیدگی سیستم آب و هوایی ناکافی است. فرآیندهای همرفتی به‌طور مستقیم بر تولید بارش تأثیر می‌گذارد و منجر به تغییرات قابل‌توجهی در ویژگی‌های سطح زمین، مانند رطوبت خاک و آبدوی سطح می‌شوند این تغییرات بر فعل‌وانفعالات سطح زمین با جو تأثیر می‌گذارد، مانند شارهای گرمای نهان و شارهای حرارتی محسوس، که به‌نوبه خود بر پایداری جو تأثیر گذارند بنابراین، فرآیندهای سطح زمین و همرفت با سایر فرآیندها باید به‌طور همزمان در نظر گرفته شوند (غلامی و همکاران ۱۳۹۸). مطالعه اثرات سطح زمین و پارامترسازی همرفتی بر پیش‌بینی وقایع حدی آب و هوایی کوتاه مدت نشان داده است که فرآیندهای سطح زمین به شدت بر میزان بارندگی تأثیر می‌گذارند در حالی‌که پارامتر همرفتی تأثیر قابل توجهی بر الگوی بارش دارد. به همین جهت طرح‌های پارامتری همرفتی مختلفی برای مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا توسعه داده شده است تا همرفت محلی را در شبیه‌سازی‌های عددی نشان دهند (Grell and Devenyi 2002). در این مطالعه به دلیل اهمیت نسبی طرح‌های همرفت در پیش‌بینی بارش با بهره‌گیری از داده‌های شرایط اولیه و مرزی NCEP CFSv2، حساسیت مدل WRF به طرح‌های پارامترسازی مختلف فیزیکی و همرفتی برای دوره سرد ۲۰۱۹-۲۰۲۰ (دسامبر تا می) پرداخته شده است. از آنجایی‌که رویدادهای شدید مانند خشکسالی و بارش‌های شدید در ۳۰ سال گذشته در بیشتر مناطق کشور از جمله دشت‌های شمال شرق کشور افزایش داشته و به‌ویژه در ۱۵ سال گذشته، فراوانی بیشتری داشته است بنابراین ارتقاء پیش‌بینی فصلی با رویکرد اهمیت نقش پارامترسازی‌های مختلف فیزیکی و همرفت دارای اهمیت است. تاکنون در مطالعات انجام‌شده غالباً مدل منطقه‌ای RegCM اجرا شده و یا با روش‌های مقیاس گاهی

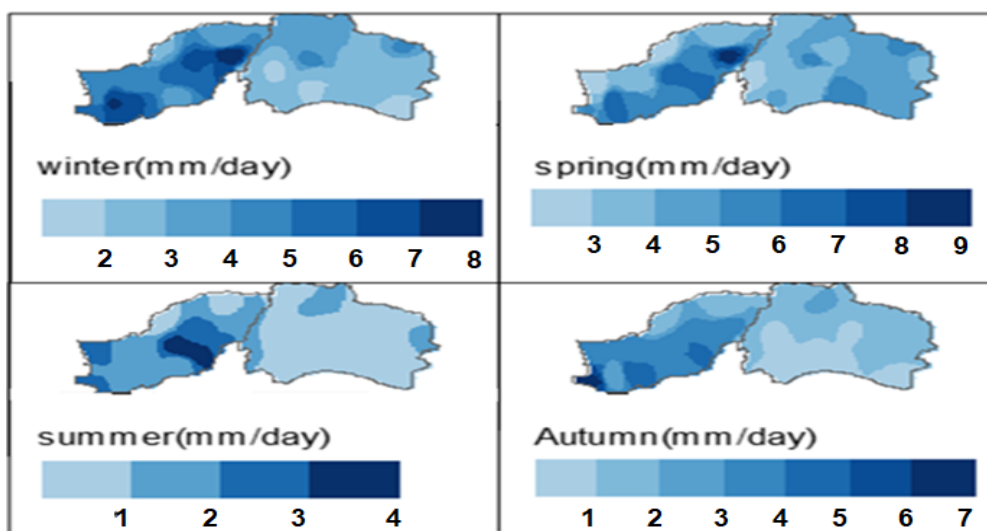
دوره ۱۹۸۲-۲۰۱۰ با استفاده از روش آماری در حوضه آبریز سد دز پرداخته و پیش‌بینی بارش در ماه‌های نوامبر، دسامبر و مارس را با بیشترین مطلوبیت پیش‌بینی گزارش کرده‌اند. علیزاده و همکاران ۱۳۹۸، با استفاده از داده‌های پیش‌بینی CFSv2 عملکرد چهار پارامترسازی مختلف RegCM4 برای پیش‌بینی دمای نزدیک سطح زمین و بارش سال ۲۰۱۰ در کل کشور را مطالعه کردند و طرحواره همرفت Tiedtke را در داشتن همبستگی زمانی و مکانی بیشتر با بارش مشاهداتی در منطقه ایران موفق‌تر دانسته‌اند. شعبان پور و همکاران ۱۳۹۹، به مطالعه دقت پنج روش تصحیح اریبی بر مهارت پیش‌بینی بارش فصل پاییز مدل CFSv2 در دوره اقلیمی ۲۰۰۹-۱۹۸۳ در حوضه آبریز گرگانرود با روش آماری پرداخته‌اند و روش‌های مختلف تصحیح اریبی و شناسایی مناسب‌ترین روش را با توجه به هدف هر مطالعه در ارتقاء مهارت پیش‌بینی فصلی بارش مؤثر دانسته‌اند. مرادی و همکاران (۱۳۹۹) طرحواره‌های خردفیزیک Lin et al، لایه سطحی Eta Similarity، لایه مرزی MYJ، تابش موج‌بلند RRTM و تابش موج‌کوتاه Dudhia را به‌عنوان طرحواره‌های بهینه برای پیش‌بینی بارش زمستانی روی شمال غرب ایران معرفی کردند. اقبالی و همکاران، ۱۴۰۱ مدل اقلیمی CFSv2 را برای شناسایی مناسب‌ترین طرحواره همرفت بارش برای پیش‌بینی بارش فصلی با استفاده از مدل RegCM در فصول بارشی زمستان و بهار بکار برده و طرحواره‌های همرفت Tiedtke, Emanuel, Grell, Kuo و Kain را برای دستیابی به پیکربندی بهینه مورد آزمایش قرار دادند. در اقلیم‌های خیلی مرطوب، نیمه مرطوب و مرطوب طرحواره همرفت Tiedtke، در مناطق نیمه‌خشک طرحواره Grell و در مناطق خشک طرحواره Kuo را موفق‌تر ارزیابی کرده‌اند. مرور نتایج مطالعات نشان می‌دهد اگرچه نتیجه‌گیری یکسانی از مطالعات ذکر شده وجود ندارد، اما یک یافته رایج این است که، مقیاس گاهی مدل‌های اقلیمی به همراه پیکربندی‌های مناسب برای بهبود نمایش توزیع فضایی و مقادیر فیزیکی متغیرهای آب و هوایی کلیدی است (Yuan et al., 2012 ; Pal et al., 2019) به عبارتی این ارزیابی‌ها در عرض‌های جغرافیایی مختلف و در بازه‌های زمانی ماهانه و فصلی انجام گرفته و همگی نشان می‌دهند باوجود کیفیت و قابلیت کاربرد این پیش‌بینی‌ها لازم

زمین‌های کم ارتفاع شرق دریای خزر دارای تنوع آب و هوایی گسترده‌ای است. از منظر اقلیمی بیشترین بارش در منطقه مورد مطالعه در دوره سرد سال از نوامبر تا آوریل دریافت می‌شود و در دوره گرم میزان بارش کاهش می‌یابد در شکل (۱) توزیع بارش فصلی بلند مدت منطقه نشان داده شده است. توزیع جغرافیایی بارش به گونه‌ای است که سهم مناطق غربی منطقه مورد مطالعه از بارش سالانه بیشتر از مناطق شرقی و در حدود ۶۰٪ از بارندگی سالانه است. مطالعه حاضر بر رویدادهای بارش دوره بارشی سال (فصل زمستان و بهار) متمرکز است، که اغلب با سیستم‌های همرفتی در مقیاس متوسط (MCS) مرتبط هستند. در شکل (۲) توزیع ارتفاعی منطقه مورد به همراه موقعیت ایستگاه‌های انتخابی ارائه شده است.

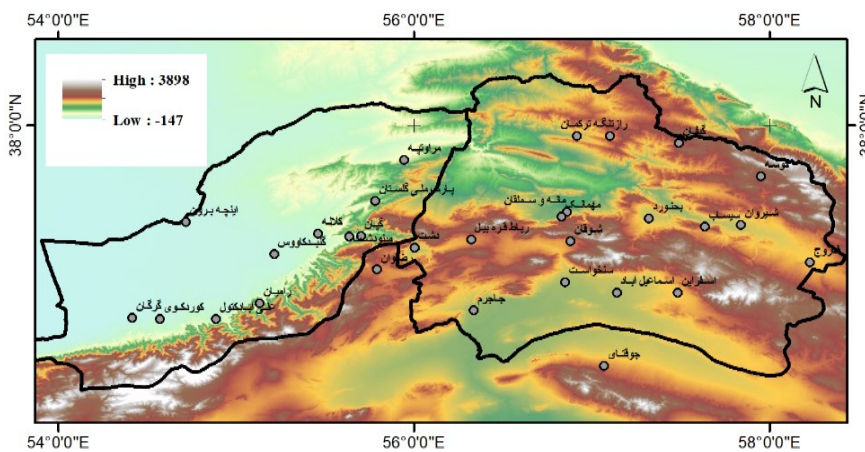
آماری داده‌های CFSv2 ارزیابی شده است. اما در این مقاله رویکرد، کاربست مدل WRF برای پیش‌بینی فرآیندهای سطح زمین در تعامل با شرایط اولیه و مرزی به کمک داده‌های ۶ ساعته زمانی CFSv2 است تا به یافتن مناسب‌ترین پارامترسازی فیزیکی و همرفتی نسبی در منطقه مورد مطالعه منجر شود. برای این منظور مقیاس گاهی پویا از وضوح ۵۴ کیلومتر (CFS) به وضوح ۱۸ کیلومتر (حوزه دریای خزر) و به وضوح ۶ کیلومتر (شمال شرق ایران) انجام گرفت.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: بخشی از شمال شرق ایران در محدوده سیاسی استان‌های خراسان شمالی و گلستان است که با وجود رشته‌کوه‌های شمال شرقی در استان خراسان شمالی و



شکل ۱- توزیع بارش فصلی در منطقه مورد مطالعه



شکل ۲- توزیع ارتفاعی منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های مشاهداتی

شمالی است (شکل ۳). گام زمانی مدل برای اجرا با توجه به اندازه دامنه‌های انتخابی ۲۷۰ ثانیه است. پیش‌بینی در هر سه دامنه در ۳۷ سطح عمودی تحت شرایط اولیه و مرزی CFSv2 از ۰۰ UTC ۰۱ نوامبر ۲۰۱۹ تا ۱۸ UTC می ۲۰۲۱ به مدت ۷ ماه بدون وقفه انجام شده است. ۴ طرحواره همرفتی (KFT (Kain, 2004), BMJ (Betts and GF (Grell and Miller, 1986; Janjic, 1994) و KF (Kain and Fritsch, 1993) و Freitas, 2014) به ترتیب با مشخصه‌های (CU01)، (CU02)، (CU03) و (CU11) در این مطالعه آزمون شده است. طرحواره‌های همرفتی KFT، GF و KF بر شار جرم و حرکات بالا و پائین سوی توده‌ها و مدل‌سازی ابری برای فرآیندهای همرفتی استوارند و طرحواره BMJ بر پایه تنظیم نرخ‌های کاهش دما با ارتفاع و رطوبت عمل می‌کند. از طرف دیگر لایه‌مرزی سیاره‌ای به دلیل اینکه نزدیک‌ترین بخش تروپوسفر به سطح زمین است (Stull, 1988) و بیشترین غلظت بخار آب را به‌عنوان عامل اصلی ریزش‌های جوی در خود جای می‌دهد دارای اهمیت است و تحلیل آن در ارزیابی پیش‌بینی بارش را ارزشمند می‌کند. در این مطالعه طرحواره‌های لایه‌مرزی سیاره‌ای (YSU, Hong et al. 2006) با مشخصه (PBL1) ، (MYJ, Janjic 1994) با مشخصه (MYNN3)، (PBL2)، (MYNN3) (Nakanishi and Niino, 2004; 2006) با مشخصه (PBL6) و (ACM2, Pleim, 2007) با مشخصه (PBL7) که بنابر مطالعات سایر محققین از عملکرد مناسبی برخوردار بوده‌اند، انتخاب شده‌است. طرحواره‌های لایه‌مرزی سیاره‌ای MYJ و MYNN3 بر پایه پیش‌بینی انرژی جنبشی آشفته عمل می‌کنند اما YSU و ACM2 از ساختار تشخیص غیرمتمرکز (محلی) پیروی می‌کنند. اولین گروه پیکره‌بندی از طرحواره لایه‌مرزی سیاره‌ای (YSU (PBL1) به همراه طرحواره‌های تابش امواج کوتاه (Dudhia, 1989) و (Dudhia, Mlawer et al., 1997) و (Chen and Dudhia, 2001) مدل سطح زمین (Noah Jimenez and Dudhia, 2012) و لایه سطحی (MM5) تشکیل شده که با ۴ طرحواره همرفت منتخب ترکیب شده‌اند. طرحواره لایه‌مرزی سیاره‌ای (MYJ (PBL2) به همراه نسخه ارتقاء یافته طرحواره تابش امواج کوتاه و بلند (RRTM, Barker et al., 2003) به نام (RRTMG)،

داده‌ها: داده‌های اقلیمی NCEP-CFS در سه گروه: ۱- تجزیه و تحلیل مجدد (CFSR) (۲- پیش‌بینی مجدد (CFSv2- reforecasts) و پیش‌بینی زمان واقعی (CFSv2 -real-time) تقسیم‌بندی شده است. پیش‌بینی عملیاتی زمان واقعی هر روز دارای ۴ اجرای ۹ ماهه در ۰۰، ۰۶، ۱۲ و ۱۸ UTC است. علاوه بر این، سه اجرای ۳ ماهه در ۰۰ UTC و سه اجرای ۴۵ روزه در ۰۶، ۱۲ و ۱۸ UTC مقداردهی اولیه می‌شوند. اجرای پیش‌بینی‌های زمان واقعی ۷ روز گذشته داخل یک آرشیو چرخشی ۷ روزه در پایگاه داده‌های NOAA^۱ در دسترس است (Saha et al., 2014). در این مطالعه داده‌های عملیاتی CFSv2 ساعت ۰۰ از ۱ نوامبر ۲۰۱۹ به عنوان شرایط اولیه و مرزی با وضوح زمانی ۶ ساعته برای اجرای WRF انتخاب شده است. داده‌های مشاهداتی از مجموعه داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی سازمان هواشناسی در مقیاس روزانه به دست آمده است.

تنظیمات مدل تحقیقات و پیش‌بینی هوا WRF: این مدل یکی از مدل‌های عددی میان‌مقیاس پرکاربرد برای تخمین داده‌های هواشناسی با وضوح بالا است (Fekih, &, Mohamed, 2019) که به‌طور مشترک با NCAR^۲ و با مراکز ملی پیش‌بینی محیط‌زیست NCEP^۳ توسعه داده شده است. مدل WRF گستره وسیعی از گزینه‌های پارامترسازی فیزیکی را داراست (Diaz et al., 2021) زیرا بسیاری از فرآیندهای فیزیکی جوی را نمی‌توان به‌طور کامل با مدل عددی حل کرد و باید پارامتربندی شوند. طرح‌های پارامترسازی سهم این پدیده‌های حل‌نشده را برحسب متغیرهای حل‌شده در شبکه گسسته مدل توصیف می‌کنند (Díez et al., 2013). مدل WRF.4.3 از یازده طرح پارامتری همرفتی و ۱۳ طرح پارامتری لایه‌مرزی سیاره‌ای و ۸ طرح پارامتری خاص لایه سطحی بهره می‌برد که هرکدام با محرک‌ها و مفروضات متفاوت برای رژیم‌های همرفتی مختلف بارش مناسب است. در این مطالعه از مدل WRF نسخه ۴.۳.۱ استفاده شده است. پیکره‌بندی دامنه در سه اندازه ۵۴، ۱۸ و ۶ کیلومتر با مرکز ۵۶ درجه شرقی، ۳۷ درجه

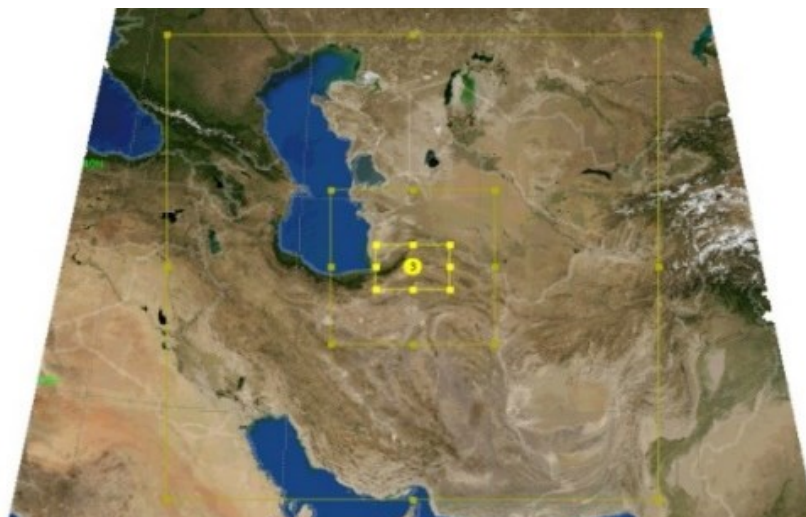
^۱) National Ocean And Atmospheric research

^۲) National Center for Atmospheric Research

^۳) <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/>

مختلف مطابق جدول (۱) اجرا شده است. مطالعاتی با موضوع پارامترسازی طرحواره‌های همرفتی نظیر واگنر و همکاران ۲۰۱۸، لایپزیگ و همکاران ۲۰۱۵، چان و همکاران Chan et al. 2013; Van Lipzig et al, 2015,) ۲۰۱۳ (Wagner et al., 2018) بیان داشته‌اند که مدل WRF قادر به حل همرفت سازمان‌یافته در فاصله شبکه‌ای کمتر از ۵ کیلومتر است و نتایج پارامترسازی همرفتی با افزایش وضوح به‌طور تدریجی نزول یافته و ممکن است در دامنه‌های کمتر از ۳ کیلومتر منجر به خطا می‌گردد. از این روی در این مطالعه به این موضوع نیز پرداخته‌شده و سناریوها CU0 بیانگر عدم اجرای طرحواره همرفت در دامنه سوم می‌باشد و به‌صورت سناریوی PBL1-CU0 برای طرحواره همرفتی FT، PBL2-CU0، BMJ برای طرحواره همرفتی PBL6-CU0، برای طرحواره همرفتی GF و برای طرحواره همرفتی KF به صورت PBL7-CU0 در جدول ۱ نمایش داده‌شده است. از آنجا که برای اجرای مدل زمان تطبیق برای پارامترهای سطح زمین بیشتر از متغیرهای جوی است و چند هفته طول می‌کشد تا پارامترهای سطح زمین به تعادل پویا برسند ۱ ماه اولیه (۴ هفته اول) اجرای WRF به‌عنوان دوره تطبیق لحاظ شده و از تحلیل خارج و نتایج مدل از ۰۰ UTC ۰۱ دسامبر ۲۰۱۹ تا ۱۸ UTC ۳۱ می ۲۰۲۱ برای تجزیه و تحلیل انتخاب شده‌اند.

طرحواره مدل سطح زمین (5-layer thermal diffusion, Dudhia, 1996) که نسخه‌ای بر پایه مدل MM5 با طبقه‌بندی ۵ لایه‌ای دمای خاک و تابش، شار حرارتی محسوس و نهان را شامل می‌شود به همراه طرحواره لایه سطحی (Eta, Janjic, 1996) دومین گروه پیکربندی را در قالب ترکیب با طرحواره‌های همرفتی منتخب تشکیل داده است. گروه سوم از طرحواره‌های لایه‌مرزی سیاره‌ای MYNN3(PBL6) با ساختار متمرکز در کنار New (Goddard, Chou and Suarez, 1999) برای تابش امواج کوتاه و بلند و مدل سطح زمین (Smirnova et al., 1997; RCU, 2000) با ساختار طبقه‌بندی ۶ لایه‌ای دما و رطوبت خاک و لایه سطحی (MYNN, Nakanishi and Niino, 2006) تشکیل شده که به همراه طرحواره‌های همرفتی منتخب اجرا شده است. گروه چهارم از طرحواره لایه مرزی سیاره‌ای ACM2(PBL7) با ساختار ترکیبی متمرکز و غیرمتمرکز در کنار طرحواره (GFDL, Fels and Schwarzkopf, 1981) برای تابش امواج کوتاه و بلند و مدل (PX, Xiu and Pleim, 2001) برای سطح زمین و لایه سطحی تشکیل شده است. طرحواره خردفیزیک کلاس (WSM6, Hong and Lim 2006) در هر ۴ گروه پیکربندی ثابت بوده است. ۴ گروه پیکربندی اصلی با طرحواره های همرفتی ذکر شده تنظیم و در قالب سناریوهای



شکل ۳- شماتیک کلی دامنه‌های منتخب برای اجرای مدل

جدول ۱- طرحواره‌های انتخابی در مدل WRF

Micro-Physics	ra_sw	ra_lw	sf_surface	sf_sfclay	cu_physics	PBL physics	Scenario	Group
WSM6 (6)	Dudhia (1)	RRTM (1)	Noah (2)	MM5(1)	Kain-Fritsch (new Eta) (1)	YSU (1)	PBL1-CU1	1
					Betts-Miller-Janjic (2)		PBL1-CU2	
					Grell-Devenyi ensemble (3)		PBL1-CU3	
					previous Kain-Fritsch (11)		PBL1-CU11	
					Kain-Fritsch (new Eta) (1) NO D3		PBL1-CU0	
	RRTMG (4)	5-layer thermal diffusion (1)	Janjic Eta (Monin-Obukhov) (2)	Kain-Fritsch (new Eta) (1)	Mellor-Yamada-Janjic TKE (2)	PBL2-CU1	2	
				Betts-Miller-Janjic (2)		PBL2-CU2		
				Grell-Devenyi ensemble (3)		PBL2-CU3		
				previous Kain-Fritsch (11)		PBL2-CU11		
				Kain-Fritsch (new Eta) (1) NO D3		PBL2-CU0		
	new Goddard	RUC (3)	MYNN(5)	Kain-Fritsch (new Eta) (1)	Mellor-Yamada Nakanishi and Niino Level 3 (6)	PBL6-CU1	3	
				Betts-Miller-Janjic (2)		PBL6-CU2		
				Grell-Devenyi ensemble (3)		PBL6-CU3		
				previous Kain-Fritsch (11)		PBL6-CU11		
				Kain-Fritsch (new Eta) (1) NO D3		PBL6-CU0		
	GFDL (99)	Pleim-Xiu (7)		Kain-Fritsch (new Eta) (1)	ACM2 (Pleim) (7)	PBL7-CU1	4	
				Betts-Miller-Janjic (2)		PBL7-CU2		
				Grell-Devenyi ensemble (3)		PBL7-CU3		
				previous Kain-Fritsch (11)		PBL7-CU11		
				Kain-Fritsch (new Eta) (1) NO D3		PBL7-CU0		

ارزیابی مقدار بارش: معیارهای آماری مورد استفاده شامل ضریب همبستگی پیرسون (R)، اریبی، میانگین خطای مطلق (MAE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) است. این معیارها از معیارهای آماری پر کاربرد برای ارزیابی کارایی و دقت اندازه‌گیری‌های مدل‌ها بشمار می‌روند (Onwukwe and Jackson, 2020). معادلات این معیارها در جدول ۲ ارائه شده است. برای تجزیه و تحلیل عملکرد طرح پارامترسازی مختلف WRF، استخراج داده‌ها با روش نزدیک‌ترین نقطه شبکه به ایستگاه انجام شده است.

تحلیل حساسیت و ارزیابی میزان اریبی و مهارت پیش‌بینی مدل این مطالعه به نقش طرحواره فیزیکی همرفتی و لایه‌مرزی سیاره‌ای بر میزان و مهارت پیش‌بینی فصلی بارش در مقیاس منطقه‌ای در دوره بارشی زمستان و بهار در منطقه شمال شرق ایران پرداخته که دو بخش ذیل چارچوب روش شناختی آن را توضیح می‌دهد.

جدول ۲. معیارهای ارزیابی مقدار و مهارت مدل CFSV2 در پیش‌بینی بارش فصلی

$MAE = n^{(-1)} \sum_{i=1}^n P_i - O_i $	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 (P_i - \bar{P})^2}}$	مقدار	شاخص ارزیابی پیش‌بینی شده	
$Bias = \left(\sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \right)$	$RMSE = \sqrt{\left(n^{(-1)} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right)}$			
POD = a/(a + c)	FAR = b/(a + b)	TS = a / (a + b + c)	FBI=(a + b)/(a + c)	مهارت

مثبت/ منفی آن، بیش‌ازحد/ دست‌کم گرفتن رویداد را نشان می‌دهد (Cai et al., 2018).

۱- نتایج :

اعتبارسنجی پیش‌بینی بارش‌های ۶ و ۳ ماهه

شاخص‌های آماری: اعتبارسنجی تخمین بارش با مدل WRF با تغییر طرحواره‌های همرفت در ۴ گروه پیکربندی‌های متفاوت در دوره‌های شش ماه از دسامبر تا می، سه ماه دسامبر تا فوریه (زمستان) و مارس تا می (بهار) در شکل ۴ نشان داده شده است. مقادیر ضریب همبستگی برای ۲۰ سناریوی اجرای شده در دوره‌های ۶ ماه و فصل زمستان بین ۳۰ تا ۵۰ درصد و در فصل بهار حداکثر تا ۳۶ درصد به دست آمده که نشان می‌دهد برخی از پیکربندی‌ها عملکرد بهتری داشته و بطور معمول در ارزیابی سایر آماره‌ها همانند اریبی بارش، RMSE و MAE نیز با عملکرد به نسبت قوی‌تری همراه بوده‌اند. مقادیر انحراف بارش‌ها نشان می‌دهد تمامی سناریوهای اجرا شده در اکثر ایستگاه‌ها تمایل به بیش برآورد نسبت به مشاهدات داشته و در پیکربندی گروه (۳) با مشخصه لایه‌مرزی سیاره‌ای MYNN3(PBL6) میزان بیش برآورد بارش از سه گروه دیگر بیشتر است. سناریوهای اجرا شده PBL6-CU0 و PBL6-CU03 بیشترین بیش برآورد بارش را با قریب به ۴- میلی‌متر در روز در دوره ۶ ماه نشان داده است. در مقابل سناریوهای اجرا شده PBL1-CU1، PBL1-CU2 و PBL1-CU0 از پیکربندی گروه (۱) با مشخصه لایه‌مرزی سیاره‌ای YSU(PBL1) به ترتیب با ۰/۸-، ۱/۲- و ۱/۵- میلی‌متر در روز بیش برآورد ضعیفی‌تری را نشان داده‌اند. سناریوی اجرا شده PBL1-CU0 که معرف عدم اجرای طرحواره همرفت در دامنه ۳ می‌باشد نتایجی نزدیک به سناریوهای اجرا شده با طرحواره‌های همرفتی منتخب داشته و همبستگی قوی‌تری با داده‌های مشاهداتی داشته است (شکل ۴). میزان خطای مطلق به دست آمده در سناریوهای اجرا شده در گام زمانی شش‌ماهه، بیانگر غلبه گروه ۱ با طرحواره لایه‌مرزی سیاره‌ای YSU(PBL1) بر سایر پیکربندی‌ها است و سناریوهای اجرا شده PBL1-CU0، PBL1-CU1 و PBL1-CU2 با کمترین مقادیر MAE به

در جدول ۲، p_i و O_i به ترتیب مقادیر مدل‌سازی شده و مشاهده شده زوجی هستند، n تعداد جفت‌ها است و عبارت‌های دارای نوارهای اضافه، مقادیر میانگین مربوطه هستند. اریبی، MAE و RMSE دارای مقادیر نزدیک‌تر به صفر بهتر هستند. اریبی در تعیین بیش برآورد و کم برآورد بودن خروجی مدل نسبت به مشاهدات مفید است. میانگین تفاوت مطلق بین شبیه‌سازی‌ها و مشاهدات با نمایه MAE، صرف‌نظر از بیش برآورد یا کم برآورد نمودن خروجی‌ها است. معیار RMSE نشان‌دهنده انحراف بین مقادیر مدل و مشاهداتی است و به دلیل مجذور شدن خطاها، به مقادیر پرت حساس‌تر است. در حالی که R دارای مقادیری بین ۱- تا ۱ است و مقادیر نزدیک به ۱ نشان‌دهنده همبستگی قوی است. مقادیر R گزارش شده در سطح اطمینان ۹۵ درصد است.

ارزیابی مهارت پیش‌بینی: مهارت مدل در تشخیص و پیش‌بینی رخداد بارش با شاخص‌های احتمال تشخیص (POD^1)، امتیاز تهدید (TS)، نسبت رویدادهای پیش‌بینی شده و مشاهداتی (FBI) و نسبت هشدار نادرست (FAR^2) مطابق قسمت دوم جدول ۲ محاسبه شده‌اند. a (heat)؛ تعداد رخداد بارش پیش‌بینی شده و مشاهده شده، b (false alarms)؛ تعداد رخداد بارش پیش‌بینی شده ولی مشاهده نشده یا هشدار نادرست و c (misses) تعداد رخداد بارش از دست‌رفته (پیش‌بینی نشده) است. بهترین پیش‌بینی دارای بالاترین مقادیر a و کوچک‌ترین مقدار b و c هستند. POD مهارت مدل در تشخیص رخدادهای بارشی صحیح، FAR تعداد رخدادهای بارش پیش‌بینی شده ولی مشاهده نشده و TS ترکیب جنبه‌های POD و FAR است. محدوده تغییر آنها بین صفر و یک است و هرچه مقدار POD و TS بیشتر و FAR کمتر باشد پیش‌بینی رخداد مورد نظر دقیق‌تر است (Zhang et al., 2022)؛ (حسینی‌پژوه و همکاران، ۱۳۹۷). معیار FBI بیانگر نسبت بین تعداد رویدادهای پیش‌بینی شده و مشاهده شده است و از صفر تا بی‌نهایت است که بهترین مقدار آن صفر و مقادیر

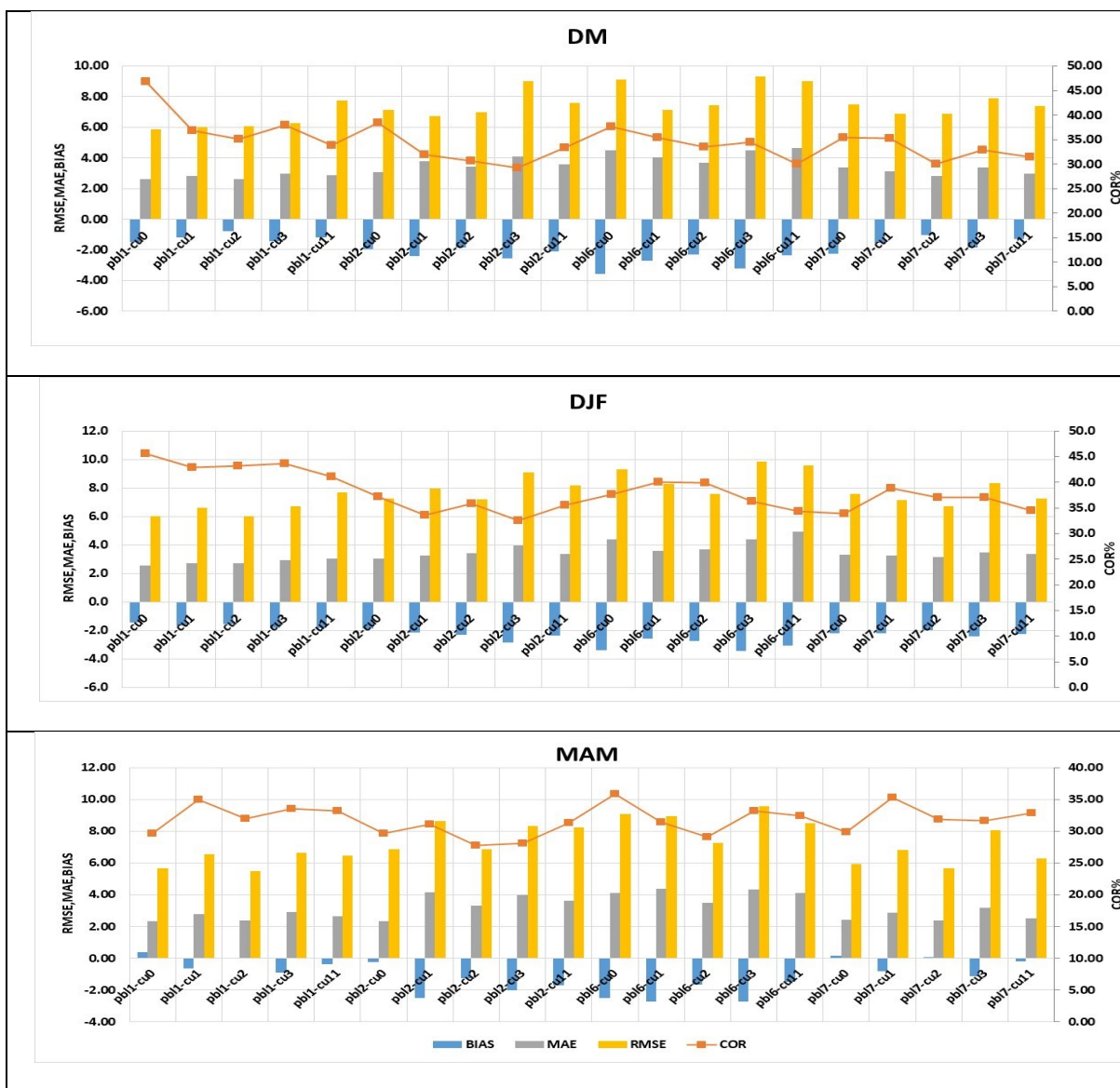
- 1) Probability of detection
- 2) alarm ratio

و ۴ نتایج اجرای سناریوی CU0 نشان می‌دهد برخلاف دو گروه پیکربندی ۱ و ۲ عملکرد این سناریو در رتبه پایین‌تری نسبت به سایر سناریوها جای می‌گیرد. علاوه بر این توزیع فضایی شاخص‌های آماری برای دوره ۶ ماه (شکل ۵) نشان می‌دهد میزان خطای مدل و انحراف بارش در نواحی کم ارتفاع و مرطوب به‌طور مثال ایستگاه گرگان و رامیان در نواحی غرب منطقه نسبت به نواحی مرتفع و نسبتاً معتدل مانند بجنورد، مانه، راز، رباط قریل و ... در مرکز و شرق منطقه مورد مطالعه به‌مراتب بیشتر است و بیانگر عملکرد ضعیف‌تر مدل‌ها در پیش‌بینی و شبیه‌سازی بارش در نواحی کم ارتفاع غرب منطقه مورد مطالعه است. به‌طور کلی سیستم‌های مدل‌سازی عددی قابلیت ضعیف‌تری در نواحی پست و نزدیک خطوط ساحلی و مناطق کوه‌نگاری پیچیده دارند و نیاز به تعدیل بیشتر با این شرایط دارند (Nurmi 2002، Ojrzyńska, 2016) که در این مطالعه نیز در ایستگاه‌های شرق دریای خزر مشاهده شده است. گروه ۳ پیکربندی در تمامی سناریوها عملکرد ضعیف‌تری نسبت به سایر پیکربندی‌ها نشان داده است، به عبارتی پیکربندی متشکل از لایه‌مرزی سیاره‌ای MYNN3 همراه با طرحواره‌های RCU, New Goddard و MYNN در پیش‌بینی بارش با طرحواره‌های همرفت منتخب در منطقه مورد مطالعه عملکرد ضعیف‌تری داشته است که تا حدودی می‌تواند متأثر از طرحواره تابش انتخابی باشد زیرا که این موضوع در مطالعات مرادی و همکاران (۱۳۹۹) نیز مشاهده شده است و برآوردهایی با دامنه پراکندگی زیاد بارش را متأثر از طرحواره تابش موج کوتاه دانسته‌اند. در شکل ۶ توزیع فراوانی معیارهای آماری همبستگی، MAE، RMSE و اریبی بارش در دوره ۶ ماه برای نمونه نمایش داده شده است. بیشترین فراوانی ضعیف‌ترین همبستگی‌ها همان‌طور که با توجه به نتایج ذکر شده در بالا انتظار می‌رفت در گروه ۳ و در ترکیب طرحواره لایه مرزی سیاره‌ای MYNN3(PBL6) با طرحواره‌های همرفت انتخابی مشاهده می‌گردد. اما توزیع فراوانی MAE و RMSE در هر ۴ گروه نشان می‌دهد مقادیر بالای این آماره‌ها که بیانگر وجود خطای بیشتر در پیش‌بینی‌ها است در مقایسه با مقادیر پائین آنها با فراوانی کمتری همراه است و می‌تواند

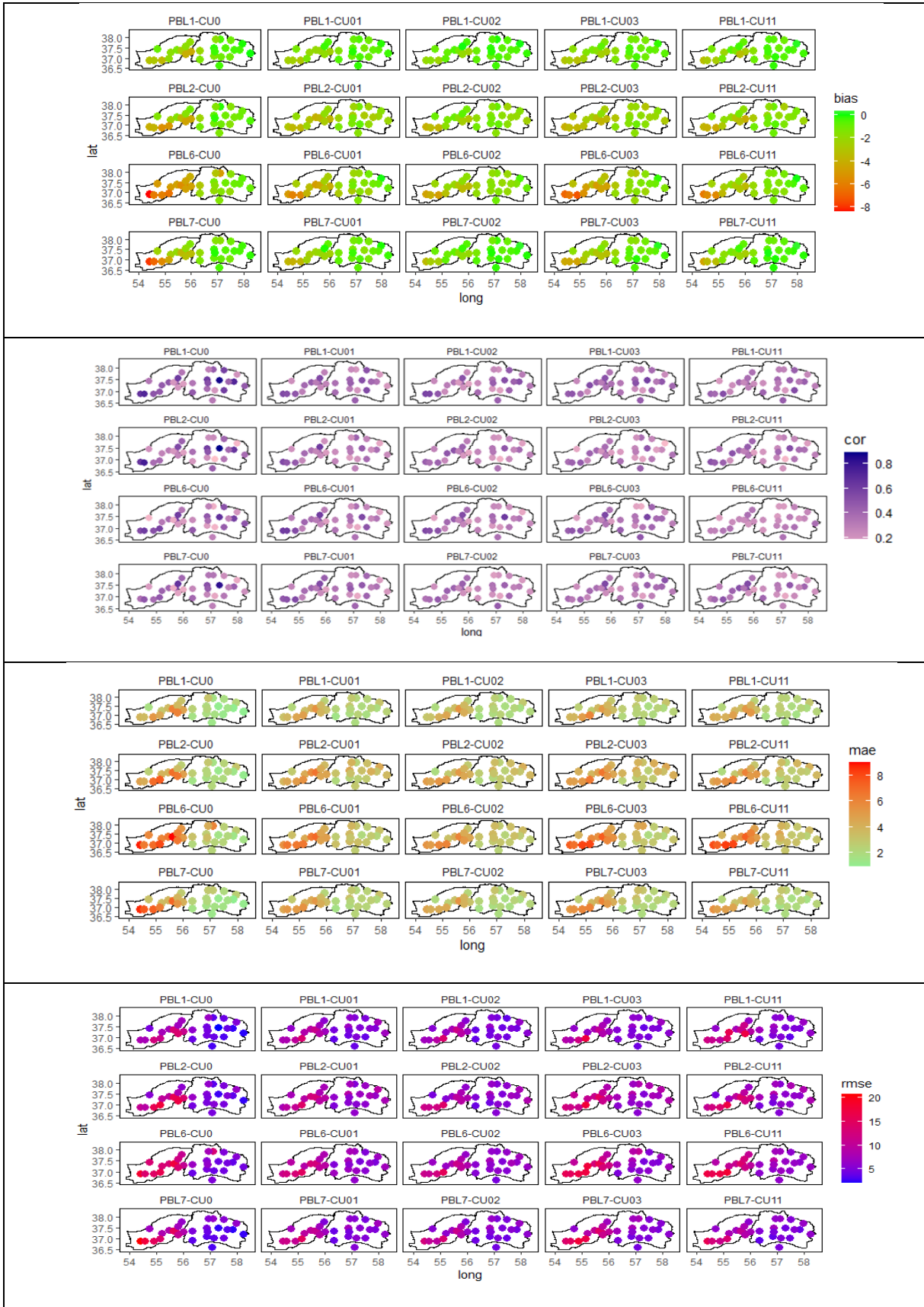
نسبت برجسته‌تر هستند این الگو برای RMSE با مقدار خطای ۶ میلی‌متر و نزدیک به آن نیز تکرار می‌شود. در این دوره پیکربندی گروه ۳ با مشخصه MYNN3(PBL6) و سناریوهای PBL6-CU11، PBL6-CU3 و پیکربندی گروه ۲ با مشخصه MYJ (PBL2) و سناریوی اجرا شده PBL2-CU3 با RMSE‌های به ترتیب ۹/۳ و ۹ میلی‌متر عملکرد ضعیف‌تری نسبت به سایر سناریوهای اجرا شده داشته‌اند. در مجموع پیکربندی گروه ۶ با طرحواره لایه‌مرزی سیاره‌ای MYNN3 بالاترین میزان خطای RMSE و MAE را در مقایسه با سایر گروه‌های پیکربندی داراست. با وجود اینکه مقادیر کلی RMSE و MAE پیکربندی‌های طرحواره لایه‌مرزی سیاره‌ای ACM2(PBL7) کمی بالاتر از مقادیر پیکربندی‌های YSU(PBL1) هستند، با در نظر گرفتن دوره ۶ ماهه و فصول زمستان و بهار، پیکربندی گروه ۱ با مشخصه YSU(PBL1) با طرحواره‌های همرفت KFT و BMJ بر پیکربندی گروه ۴ با طرحواره لایه‌مرزی سیاره‌ای ACM2(PBL7) و طرحواره‌های همرفت مشابه غلبه ضعیفی دارد. مناسب‌ترین پیکربندی‌ها و تنظیمات WRF با در نظر گرفتن کمترین RMSE در فصل زمستان سناریوی PBL1-CU1 و در فصل بهار PBL1-CU2 و این الگو برای کمترین MAE هم در فصول مزبور تکرار می‌شود. مقایسه آماره‌های بدست آمده نشان می‌دهد در فصل بهار خطای مدل در بیشتر پیکربندی‌ها نسبت به فصل زمستان کاهش ضعیفی دارد. با توجه به جدول ۳ سناریوهای CU0 در ۴ گروه مورد بررسی نشان می‌دهد که در گروه ۱، سناریوی PBL1-CU0 در دوره ۶ ماه عملکردی بسیار نزدیک با سناریوی PBL1-CU2 داشته با خطای RMSE ۵/۹ میلی‌متر و خطای مطلق ۲/۶ عملکردی در محدوده خطاهای به‌دست‌آمده از اجرای سایر سناریوها داشته است. در دوره‌های فصلی زمستان و بهار نیز تقریباً به همین ترتیب است. در گروه ۲، سناریوی PBL2-CU0 عملکردی همانند سناریوی PBL1-CU0 داشته و پس از آن سناریوی PBL2-CU2 در دوره ۶ ماه دارای کمترین میزان خطا و بایاس در پیش‌بینی بارش بوده است که در دوره فصلی زمستان و بهار میزان خطا و بایاس در این سناریو تا حدودی کمتر از ۴ سناریو دیگر است. اما در دو گروه پیکربندی ۳

YSU همراه با طرحواره‌های سطح زمین Noah، تابش امواج کوتاه Dudhia و تابش امواج بلند RRTM در پیش‌بینی بارش منطقه مورد مطالعه عملکرد به نسبت قابل‌قبولی داشته‌است، مرادی و همکاران (۱۳۹۹) نیز نتایج نزدیک‌تر بارش را به مشاهدات را به ترکیب لایه‌مرزی سیاره‌ای YSU، تابش امواج بلند RRTM در کنار تابش موج کوتاه مناسب نسبت داده‌اند. در شکل ۷ نیز مقادیر نرمال RMSE به MAE نیز برتری نسبی پیکربندی گروه‌های ۱ و ۲ با سناریوهای PBL1-CU01 و PBL1-CU02 را نسبت به سایر سناریوهای اجرا شده نشان می‌دهد.

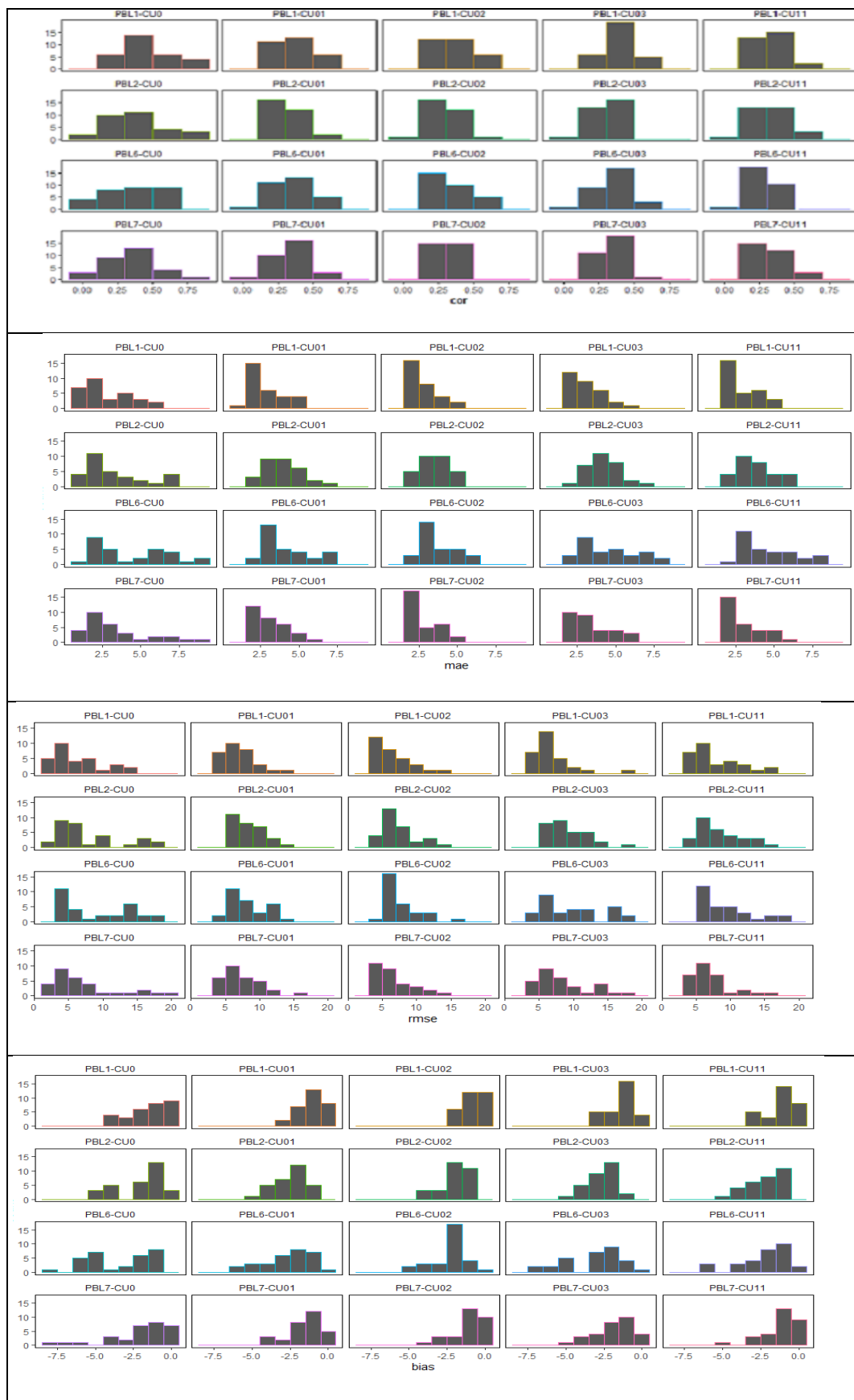
سازگاری نسبی پیکربندی‌های انجام‌شده در منطقه مورد مطالعه را نشان دهد. با این وجود فراوانی اریبی به دست‌آمده در ایستگاه‌های مورد مطالعه حاکی از بیش برآوردهای بزرگ‌تر در پیکربندی‌های گروه ۳ و ۲ با لایه‌های مرزی سیاره‌ای PBL6(MYNN3) و MYJ(PBL2) از پیکربندی گروه‌های ۱ و ۲ با طرحواره‌های YSU(PBL1) و ACM2(PBL7) است و فراوانی اریبی‌های ضعیف و یا به عبارتی بیش برآوردهای نه‌چندان زیاد در ترکیب YSU(PBL1) با طرحواره‌های همرفتی KF، BMJ و GD بدست آمده‌است. این موضوع نشان می‌دهد پیکربندی متشکل از لایه‌مرزی سیاره‌ای



شکل ۴. آماره‌های اریبی، MAE، RMSE و همبستگی در دوره‌های ۶ ماه (DM)، فصل زمستان (DJF) و فصل بهار (MAM)



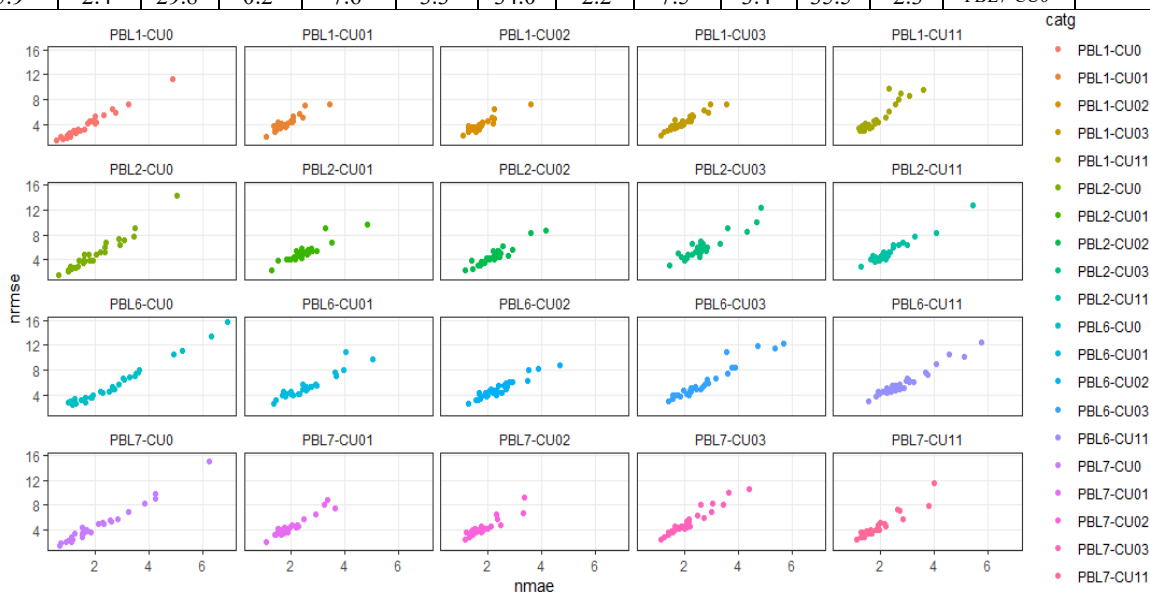
شکل ۵. توزیع مکانی معیارهای آماری ارزیابی در دوره‌های ۶ ماه



شکل ۶. توزیع فراوانی معیارهای آماری اریبی، MAE، RMSE و همبستگی در دوره ۶ ماه

جدول ۳. نتایج آماری مربوط به ۴ گروه پیکربندی انتخابی در ترکیب با طرحواره‌های همرفت منتخب (واحد BIAS میلی‌متر بر روز)

MAM				DJF				DM				سناریو	گروه پیکربندی
RMSE	MAE	COR	BIAS	RMSE	MAE	COR	BIAS	RMSE	MAE	COR	BIAS		
6.6	2.8	35.0	-0.6	6.6	2.7	42.9	-1.6	6.0	2.8	36.9	-1.2	PBL1-CU1	1
5.5	2.4	32.0	0.0	6.0	2.7	43.2	-1.5	6.1	2.6	35.1	-0.8	PBL1-CU2	
6.7	2.9	33.5	-0.9	6.7	2.9	43.6	-1.8	6.3	3.0	37.9	-1.4	PBL1-CU3	
6.5	2.6	33.2	-0.4	7.7	3.0	41.1	-1.8	7.8	2.9	33.9	-1.2	PBL1-CU11	
5.7	2.3	29.6	0.4	6.0	2.6	45.6	-1.4	5.9	2.6	46.8	-1.5	PBL1-CU0	
8.7	4.2	31.1	-2.5	7.9	3.3	33.6	-2.1	6.7	3.8	31.9	-2.4	PBL2-CU1	2
6.9	3.3	27.7	-1.3	7.2	3.4	35.9	-2.3	7.0	3.4	30.7	-1.9	PBL2-CU2	
8.3	4.0	28.1	-2.0	9.1	4.0	32.6	-2.9	9.0	4.1	29.2	-2.6	PBL2-CU3	
8.2	3.6	31.4	-1.7	8.2	3.4	35.6	-2.3	7.6	3.6	33.4	-2.1	PBL2-CU11	
6.8	2.3	29.6	-0.2	7.3	3.0	37.2	-1.9	7.1	3.1	38.5	-2.0	PBL2-CU0	
9.0	4.4	31.5	-2.7	8.3	3.6	40.0	-2.6	7.1	4.0	35.4	-2.7	PBL6-CU1	3
7.2	3.5	29.1	-1.6	7.6	3.7	39.9	-2.7	7.5	3.7	33.5	-2.3	PBL6-CU2	
9.6	4.3	33.2	-2.7	9.8	4.4	36.2	-3.5	9.3	4.5	34.5	-3.2	PBL6-CU3	
8.5	4.1	32.4	-1.5	9.6	4.9	34.3	-3.1	9.0	4.6	30.0	-2.4	PBL6-CU11	
9.1	4.1	35.9	-2.5	9.3	4.4	37.7	-3.4	9.1	4.5	37.6	-3.6	PBL6-CU0	
6.8	2.9	35.3	-0.8	7.1	3.3	38.8	-2.2	6.9	3.1	35.2	-1.6	PBL7-CU1	4
5.7	2.4	31.8	0.1	6.7	3.1	37.0	-2.0	6.9	2.8	30.0	-1.0	PBL7-CU2	
8.0	3.2	31.7	-1.1	8.3	3.5	37.0	-2.4	7.9	3.4	32.8	-1.9	PBL7-CU3	
6.3	2.5	32.8	-0.2	7.3	3.3	34.5	-2.2	7.4	3.0	31.4	-1.3	PBL7-CU11	
5.9	2.4	29.8	0.2	7.6	3.3	34.0	-2.2	7.5	3.4	35.5	-2.3	PBL7-CU0	



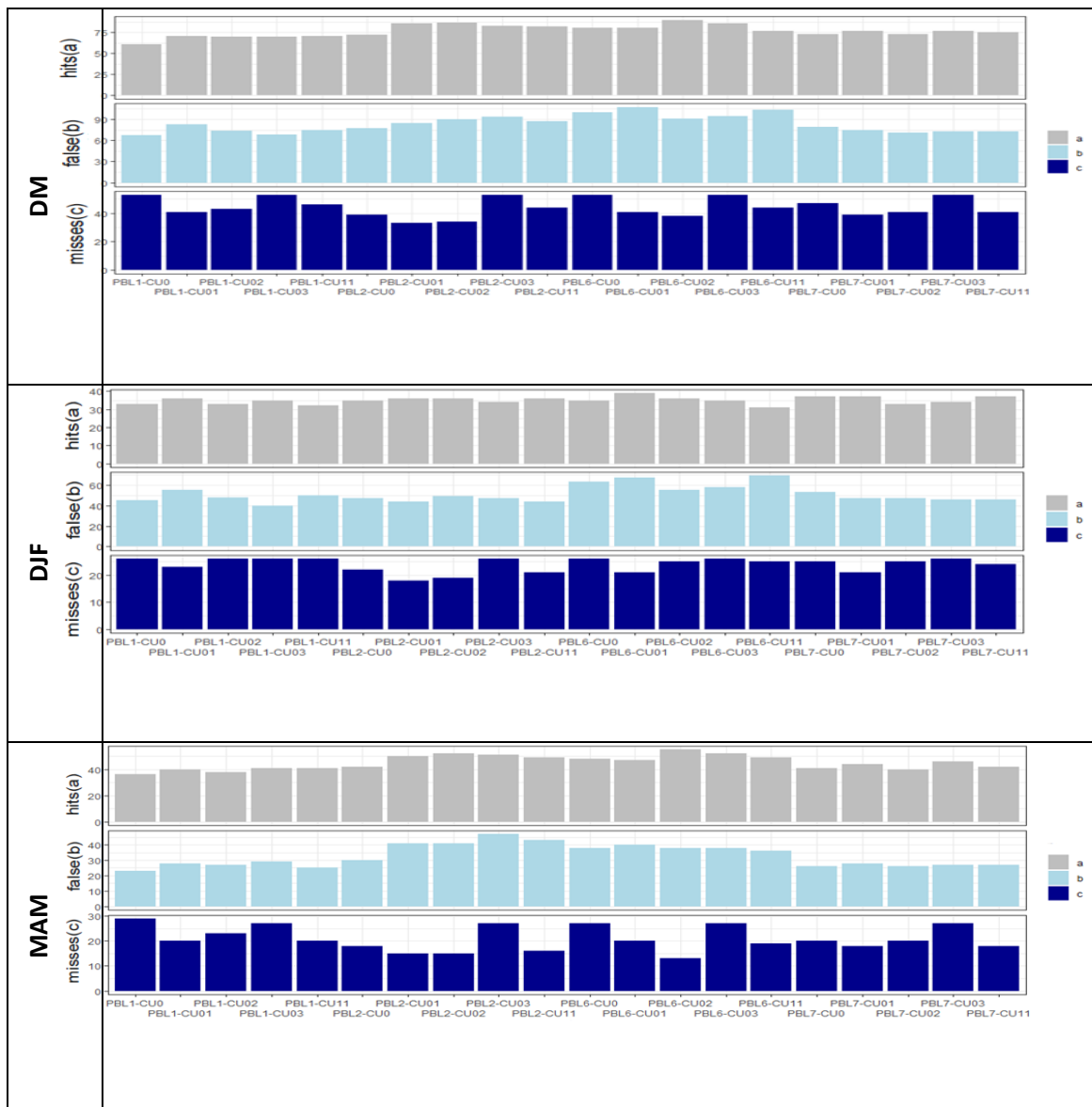
شکل ۷- توزیع خطای نرمال RMSE, MAE در دوره ۶ ماه

سیاره‌ای (PBL1) و YSU (PBL7) و ACM2 (PBL7) خطای کمتری در پیش‌بینی رخداد وقوع بارش داشته‌اند اما در دو گروه دیگر تعداد هشدار نادرست (b) بیشتر است و با توجه به خروجی‌ها این‌طور می‌توان قضاوت نمود که گروه ۳ به نسبت عملکرد ضعیف‌تری را به دلیل پیش‌بینی رخداد بارش نشان داده و مقادیر اریبی بارش به دست آمده و خطاهای محاسبه‌شده در این گروه نیز آن را تأیید می‌کند. تعداد رخداد بارش ازدست‌رفته یا پیش‌بینی‌نشده (c) در

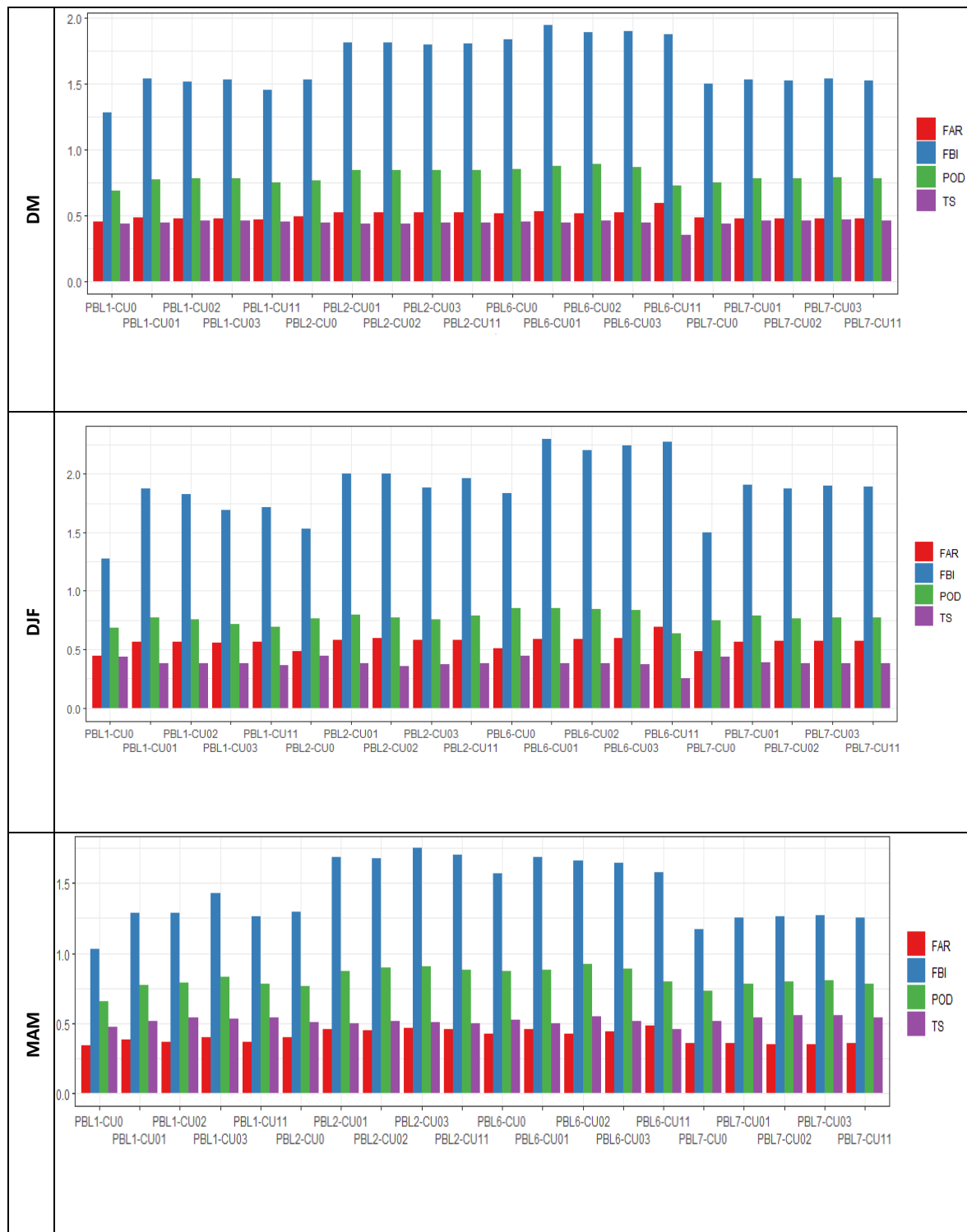
شاخص‌های مهارتی: شاخص‌های مهارتی مورد ارزیابی بر اساس جدول ۱ نتایج متفاوتی را برای پیکربندی‌های انتخابی نشان می‌دهد. برای پیش‌بینی ۶ ماهه، پیکربندی‌های گروه ۲ و ۳ با طرحواره‌های همرفتی KF، BMJ، و GD نسبت به دو گروه دیگر، در شناسایی رخداد بارش مشاهداتی بهتر عمل کرده‌اند. تعداد رخداد هشدار نادرست (b) یا به عبارت دیگر بارشی که مدل پیش‌بینی نموده اما رخ نداده، نشان می‌دهد گروه ۱ و ۴ با طرحواره‌های لایه‌مرزی

نادرست (b) در گروه ۱ و تعداد رویدادهای از دست رفته (c) در گروه ۲ موفق‌تر بوده است. به کمک مقادیر احتمالی به دست آمده نمرات مهارت‌های مختلف ارائه‌شده در جدول ۲ محاسبه شده و نتایج آن در شکل ۹ نشان داده شده است، در بیشتر سناریوها بخصوص گروه ۳ با طرحواره‌های همرفتی زیر مجموعه آن، مقادیر FBI فراتر از یک و POD نزدیک به یک با این واقعیت توضیح داده می‌شود که مدل بارش را بیش‌ازحد تخمین زده است. نسبت پائین FAR نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌ها معمولاً با بارش مشاهداتی تطابق بیشتری دارد که در فصل بهار مشهودتر است.

سناریوهای PBL1-CU1 و PBL2-CU2 عملکرد مناسب‌تری نسبت به سایر سناریوها داشته است و به‌طورکلی با توجه به غلبه اریبی منفی در پیکربندی‌های انتخابی و سناریوهای زیر مجموعه آنها، کاهش تعداد رویدادهای از دست رفته (c) قابل‌انتظار است. در فصول زمستان و بهار نیز کم‌وبیش این الگوها تکرار می‌شود و سناریوهای زیر مجموعه گروه ۲ در مقیاس سه ماهه (فصلی) نسبتاً موفق بوده‌اند (شکل ۸). مقایسه سناریوهای CU0 با سایر سناریوها نشان می‌دهد این سناریو در شناسایی رخداد‌های بارش عملکردی مشابه با سایر سناریوهای در هر گروه داشته است و در خصوص هشدار



شکل ۸- نتایج مقادیر احتمالی رخداد‌های بارش پیش‌بینی‌شده در دوره‌های ۶ ماه (DM)، فصل زمستان (DJF) و فصل بهار (MAM)



شکل ۹- نتایج امتیازات شاخص‌های مهارتی در دوره‌های ۶ ماه، فصل زمستان و فصل بهار

بحث و نتیجه‌گیری

پیکربندی فرآیندهای فیزیکی در مکان‌های جغرافیایی مختلف در کنار شرایط اولیه و مرزی، نقش کلیدی در مدل‌سازی و پیش‌بینی جوی و تخمین وضعیت آینده آن ایفا می‌کند. از این‌روی همواره یافتن گزینه‌های مختلف فیزیکی

انتخاب طرحواره همرفت یک تمایز مهم در توسعه همرفت و الگوهای بارش حاصل در شبیه‌سازی‌های WRF می‌باشد (Jeworrek, et al 2019) به همین جهت شناسایی بهترین

طرحواره‌های لایه مرزی سیاره‌ای مختلف در کنار طرحواره‌های فیزیکی دیگر می‌توانند نتایج تا حدودی مشابه را ایجاد کنند. این نتایج نشان می‌دهد انتخاب طرحواره لایه مرزی سیاره‌ای با طرحواره تابش موج‌بلند و طرحواره تابش موج کوتاه و لایه سطحی باشد، می‌تواند نتایج پیش‌بینی‌ها را به هم نزدیک‌تر کند. مرادی و همکاران ۱۳۹۹ در شمال غرب ایران، حساسیت خروجی‌های مدل WRF را در پیش‌بینی بارش ۶ ساعته با انتخاب گزینه‌های فیزیکی توسط طرحواره‌های Eta، MYJ، RRTM، Dudhia و Similarity موفق گزارش کرده‌اند که بخش عمده موفقیت این پیکربندی را به انتخاب طرحواره‌های تابش موج کوتاه Dudhia و تابش موج‌بلند RRTM وابسته دانسته‌اند. البته همواره باید در نظر داشت که بهترین پیکربندی در یک منطقه از نظر عملکرد، ممکن است نتایج متفاوتی را در مناطق مختلف یا در شرایط آب و هوایی متفاوت ایجاد کند (Carvalho et al 2012).

مطالعه طرحواره‌های همرفتی به همراه طرحواره‌های لایه مرزی سیاره‌ای ۴ گانه نشان می‌دهد ترکیب طرحواره لایه مرزی سیاره‌ای (گروه ۱) با مشخصه YSU(PBL1) با طرحواره‌های همرفتی در پیش‌بینی بارش فصلی در مقایسه با سایر طرحواره‌های لایه‌مرزی سیاره‌ای موفق عملکرد است و سناریوهای حاصل از چیدمان با طرحواره‌های همرفت BMJ(CU2) و KFT(CU1) نسبتاً از دو طرحواره دیگر با عملکرد مناسبی نتایج پایاپایی را به همراه داشته‌اند. بنابراین این موضوع تأیید می‌شود که نقش طرحواره‌های همرفت متأثر از سایر تنظیمات فیزیکی مدل در پیش‌بینی بارش می‌باشد. البته باید در نظر داشت سناریوی PBL1-CU0 در سه آماره MAE، RMSE، R از دو سناریوی مزبور با عملکرد قویتری همراه است بطوریکه عدم اجرای طرحواره KFT در وضوح بیش از ۶ کیلومتر اثر مثبت بر نتایج پیش‌بینی بارش در منطقه داشته است زیرا در وضوح افقی پائین‌تر (دامنه ۲۰۱ به ترتیب با ۵۴ و ۱۸ کیلومتر) تعامل عوامل مختلف از جمله گردش‌های محلی، کاربری زمین، توپوگرافی، طرحواره PBL و ... تأثیر قابل توجه‌ای بر پیش‌بینی محتوای بخار آب و انتقال عمودی در جو و بارش خواهد داشت. مطالعات موسی و همکاران

مدل WRF برای شناسایی مناسب‌ترین پیکربندی‌ها در مناطق مختلف آزمایش‌شده‌اند که از جمله اهداف این مطالعه تحلیل و ارزیابی نقش طرحواره‌های همرفت و لایه‌مرزی سیاره‌ای در تنظیم مدل پیش‌بینی عددی آب‌وهوا برای بارش با طرحواره‌های سطح زمین، لایه سطحی، موج‌کوتاه و موج‌بلند در قالب ۴ گروه اصلی به همراه ۴ طرحواره همرفتی بوده و علاوه بر آن در هر گروه سناریوی بدون طرحواره همرفت در دامنه ۳ نیز اجرا گردیده است. بطوریکه در مجموع ۲۰ سناریو در قالب ۴ گروه اصلی اجرا شده است. در این مطالعه به وسیله آماره‌های RMSE، MAE، R و اریبی، عملکرد پیش‌بینی بارش تحلیل شده است و با کمک شاخص‌های مهارتی FBI، POD، TS و FAR میزان مهارت پیش‌بینی‌های انجام‌شده در تشخیص رخداد بارش مورد قضاوت قرار گرفته است. داده‌های مورد استفاده در این مطالعه، مجموعه داده‌های پیش‌بینی ۹ ماهه CFSV2 بود که به صورت روزانه در چرخه‌های ۰۰، ۰۶، ۱۲ و ۱۸ UTC به روزرسانی می‌شود. دوره پیش‌بینی ۲۴۰ روزه از اکتبر ۲۰۱۹ تا می ۲۰۲۱ را پوشش می‌دهد که دوره ۶ ماه دسامبر تا می و سه ماه فصل‌های زمستان و بهار برای مطالعه انتخاب شده است.

نتایج نشان داد گروه ۳ پیکربندی MYNN3(PBL6) به همراه طرحواره‌های ۴ گانه همرفت و سناریوی PBL6-CU0 برآوردهایی با دامنه خطای بیشتر نسبت به سناریوهای زیرمجموعه گروه ۲ MYJ(PBL2) و سناریوهای زیرمجموعه گروه ۴ ACM2(PBL7) داشته است. پیکربندی گروه ۱ با ساختار طرحواره‌های لایه‌مرزی سیاره‌ای (PBL1) YSU، تابش موج‌بلند RRTM، موج کوتاه Dudhia و مدل سطح زمین Noah در کنار طرحواره همرفت BMJ و KFT توانسته است برآوردهایی با دامنه خطا و انحراف کمتر از پیش‌بینی بارش ارائه کند و گروه ۴ پیکربندی با ساختار طرحواره لایه‌مرزی سیاره‌ای ACM2، تابش موج‌بلند و موج‌کوتاه GFDL و لایه سطحی PX کمترین دامنه خطای MAE و RMSE بعد از طرحواره لایه مرزی سیاره‌ای YSU(PBL1) را به همراه داشته است. جوورک و همکاران (Jeworrek et al., 2019) ۲۰۱۹ نیز نشان داده‌اند که طرحواره‌های همرفت در ترکیب با

- GCSS/ARM workshop on the representation of cloud systems in large-scale models (p. 10).
3. Befort, D. J., Wild, S., Knight, J. R., Lockwood, J. F., Thornton, H. E., Hermanson, L., ... & Leckebusch, G. C. (2019). Seasonal forecast skill for extratropical cyclones and windstorms. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145(718), 92-104.
 4. Betts, A. K., & Miller, M. J. (1993). The betts-miller scheme. In *The representation of cumulus convection in numerical models* (pp. 107-121). American Meteorological Society, Boston, MA.
 5. Betts, A. K., & Miller, M. J. (1986). A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and arctic air-mass data sets. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 112(473), 693-709.
 6. Bruno Soares, M.; Dessai, S. Exploring the use of seasonal climate forecasts in Europe through expert elicitation. *Clim. Risk Manag.* 2015, 10, 8–16.
 7. Cai, Xinli & Wang, Xianli & Jain, Piyush & Flannigan, Mike. (2019). Evaluation of Gridded Precipitation Data and Interpolation Methods for Forest Fire Danger Rating in Alberta, Canada. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 124. 10.1029/2018JD028754.
 8. Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M., & Santos, C. (2012). A sensitivity study of the WRF model in wind simulation for an area of high wind energy. *Environmental Modelling & Software*, 33, 23-34.
 9. Chan, S. C., Kendon, E. J., Fowler, H. J., Blenkinsop, S., Ferro, C. A., & Stephenson, D. B. (2013). Does increasing the spatial resolution of a regional climate model improve the simulated daily precipitation? *Climate dynamics*, 41(5), 1475-1495.
 10. Chen, F., & Dudhia, J. (2001). Coupling an advanced land surface–hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Monthly weather review*, 129(4), 569-585.
 11. Chou, M. D., & Suarez, M. J. (1999). A solar radiation parameterization for atmospheric studies (No. NASA/TM-1999-104606/VOL15).
 12. Devanand, A., Koll Roxy, M., & Ghosh, S. (2018, April). Role of land-atmospheric processes in CFSv2 monsoon rainfall dry bias over India. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 950).
- (۲۰۲۰) و ژیتز و همکاران (۲۰۱۴) هم طرحواره KFT را برای منطقه جنوب غرب آسیا را مناسب دانسته‌اند (Zittis (et al., 2014); (Musa, A. I., et al; 2022).
- با توجه به نتایج بدست آمده و در تائید دیگر مطالعات، علی‌رغم نقش طرحواره ی لایه‌مرزی و همرفت و تأثیر آنها بر پیش‌بینی بارش نمی‌توان بدون در نظرگرفتن باقی طرحواره‌ها در پیکربندی در مورد تأثیر آنها گزارشی ارائه داد. زیرا با توجه به شرایط توپوگرافی و آب‌وهوایی و مکانیسم‌های پیچیده بارش در منطقه مورد مطالعه، عملکرد ۴ گروه پیکربندی انتخابی و سناریوهای زیرمجموعه آنها برای پیش‌بینی بارش در این منطقه علیرغم وجود تفاوت‌های بدست آمده در مجموع ضعیف عملکرد نکرده و در برخی از سناریوها با نتایج قابل قبولی همراه بوده است.
- نکته دیگر آن است که عدم اجرای طرحواره همرفت برای وضوح ۶ کیلومتر (دامنه ۳) مورد مطالعه قرارگرفته است و نتایج نشان داده است در مقیاس بین ۳ تا ۱۰ کیلومتر عملکرد طرحواره‌های همرفتی همانطور که در برخی مطالعات نیز به آن اشاره شده، خاکستری است. بدین معنی که اجرا یا عدم اجرای آن در مناطق مختلف می‌تواند نتایج پیش‌بینی را بهبود بخشیده و یا منجر به افزایش خطا گردد.
- زیرا در مقیاس تا ۱۰ کیلومتر به دلیل حساسیت فرآیندهایی که بر میزان رطوبت در جو تأثیر گذارند همانند جت‌های سطح پائین به وضوح افقی زیاد، ممکن است افزایش وضوح منجر به اثر سو بر پیش‌بینی بارش گردد. از این‌روی جهت افزایش دقت پیش‌بینی‌ها توصیه می‌شود در صورت شبیه‌سازی در دامنه بین ۳ تا ۱۰ کیلومتر در کنار اجرای طرحواره همرفت، در همان شرایط پیکربندی نتایج با شرایط عدم اجرا طرحواره همرفت نیز مورد مطالعه قرار گیرد.

منابع

1. Alizadeh-Choobari, O., Qadimi, M., & Marjani, S. (2019). Evaluation of 2-m temperature and precipitation products of the Climate Forecast System version 2 over Iran. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 88, 101105.
2. Barker, H. W., Pincus, R., & Morcrette, J. J. (2002, May). The Monte Carlo independent column approximation: Application within large-scale models. In *Proceedings of the*

22. 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.
23. Grell, G. A., & Dévényi, D. (2002). A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*, 29(14), 38-1.
24. Grell, G. A., & Freitas, S. R. (2014). A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(10), 5233-5250.
25. Hari Prasad, K. B. R. R., Ramu, D. A., Rao, S. A., Hameed, S. N., Samanta, D., & Srivastava, A. (2021). Reducing systematic biases over the Indian region in CFS V2 by dynamical downscaling. *Earth and Space Science*, 8, e2020EA001507. <https://doi.org/10.1029/2020EA001507>.
26. Hosseini Pazhouh, N., Ahmadaali, K., & Shokoohi, A. (2019). Assessment of standardized precipitation and standardized precipitation-evapotranspiration indices for wet period detection. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(6), 207-221. doi: 10.22069/jwsc.2019.15175.3036
27. Hong, S. Y., & Lim, J. O. J. (2006). The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 42(2), 129-151.
28. Janjić, Z. I. (1994). The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly weather review*, 122(5), 927-945.
29. Janjic, Z. I. (1996). The surface layer parameterization in the NCEP Eta Model. *World Meteorological Organization-Publications-WMO TD*, 4-16.
30. Jeworrek, J., West, G., & Stull, R. (2019). Evaluation of cumulus and microphysics parameterizations in WRF across the convective gray zone. *Weather and Forecasting*, 34(4), 1097-1115.
31. Jiménez, P. A., & Dudhia, J. (2012). Improving the representation of resolved and unresolved topographic effects on surface wind in the WRF model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(2), 300-316.
32. Kain, J. S. (2004). The Kain-Fritsch convective parameterization: an update. *Journal of applied meteorology*, 43(1), 170-181.
13. Diaz, L. R., Santos, D. C., Käfer, P. S., Iglesias, M. L., da Rocha, N. S., da Costa, S. T. L., ... & Rolim, S. B. A. (2021). Reanalysis profile downscaling with WRF model and sensitivity to PBL parameterization schemes over a subtropical station. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 222, 105724.
14. Doblas-Reyes, F. J., García-Serrano, J., Lienert, F., Biescas, A. P., & Rodrigues, L. R. (2013). Seasonal climate predictability and forecasting: status and prospects. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 4(4), 245-268. 08. *Clim. Dyn.* 2012, 39, 2041-2058.
15. 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.
16. Dudhia, J. (1996, July). A multi-layer soil temperature model for MM5. In *Preprints, The Sixth PSU/NCAR mesoscale model users' workshop* (pp. 22-24). Boulder, CO, USA: National Center for Atmospheric Research.
17. Eghbali, A., Babaeian, I., Azadi, M., Habibi Nokhandan, M., & Zarrin, A. (2022). Optimal configuration of RegCM4. 5 model for rainfall forecasting in Iran based on climatic zones (November-May), Case study: 2019-2014. *Journal of Climate Research*, 1401(49), 1-14.
18. Fekih, A., & Mohamed, A. (2019). Evaluation of the WRF model on simulating the vertical structure and diurnal cycle of the atmospheric boundary layer over Bordj Badji Mokhtar (southwestern Algeria). *Journal of King Saud University-Science*, 31(4), 602-611.
19. Fels, S. B., & Schwarzkopf, M. D. (1981). An efficient, accurate algorithm for calculating CO₂ 15 μm band cooling rates. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 86(C2), 1205-1232.
20. Gao, Shibo & Huang, Danlian & Du, Ningzhu & Ren, Chuanyou & Yu, Haiqiu. (2022). WRF ensemble dynamical downscaling of precipitation over China using different cumulus convective schemes. *Atmospheric Research*. 271. 106116. 10.1016/j.atmosres.2022.106116.
21. García-Díez, M., Fernández, J., Fita, L., & Yagüe, C. (2013). Seasonal dependence of WRF model biases and sensitivity to PBL schemes over Europe. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139(671), 501-514.

- modelling in the Zambezi River Basin, Southern Africa. *Journal of Hydrology*, 602, 126749.
43. Nurmi P. Recommendations on the verification of local weather forecasts. ECMWF Tech. Memo; 2003. <http://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2003/11401-recommendations-verification-local-weatherforecasts>.
 44. Ojrzyńska, H., Kryza, M., Wałaszek, K., Szymanowski, M., Werner, M., & Dore, A. (2016). High-Resolution Dynamical Downscaling of ERA-Interim Using the WRF Regional Climate Model for the Area of Poland. Part 2: Model Performance with Respect to Automatically Derived Circulation Types. *Pure and Applied Geophysics*, 174, 527-550.
 45. Onwukwe, C., & Jackson, P. L. (2020). Meteorological downscaling with wrf model, version 4.0, and comparative evaluation of planetary boundary layer schemes over a complex coastal airshed. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59(8), 1295-1319.
 46. Pal, S., Chang, H. I., Castro, C. L., & Dominguez, F. (2019). Credibility of convection-permitting modeling to improve seasonal precipitation forecasting in the southwestern United States. *Frontiers in Earth Science*, 7, 11.
 47. Pleim, J. E. (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*, 46(9), 1383-1395.
 48. Rajendran, K., Surendran, S., Varghese, S. J., & Chakraborty, A. (2021). Do seasonal forecasts of Indian summer monsoon rainfall show better skill with February initial conditions? *Current Science* (00113891), 120(12).
 49. Ruane, A. C., & Roads, J. O. (2008). Diurnal to annual precipitation sensitivity to convective and land surface schemes. *Earth Interactions*, 12(5), 1-13.
 50. Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., ... & Becker, E. (2014). The NCEP climate forecast system version 2. *Journal of climate*, 27(6), 2185-2208.
 51. Samanta, D., Hameed, S. N., Jin, D., Thilakan, V., Ganai, M., Rao, S. A., & Deshpande, M. (2018). Impact of a narrow coastal Bay of Bengal sea surface temperature front on an Indian summer monsoon simulation. *Scientific Reports*, 8, 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35735-3>
 33. Kain, J. S., & Fritsch, J. M. (1993). Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. In *The representation of cumulus convection in numerical models* (pp. 165-170).
 34. Liu, X., Zhang, L., She, D., Chen, J., Xia, J., Chen, X., & Zhao, T. (2022). Postprocessing of hydrometeorological ensemble forecasts based on multisource precipitation in Ganjiang River basin, China. *Journal of Hydrology*, 605, 127323.
 35. Manzananas, R., Gutiérrez, J. M., Fernández, J., Meijgaard, E. V., Calmanti, S., Magarino, M. E., et al. (2018). Dynamical and statistical downscaling of seasonal temperature forecasts in Europe: Added value for user applications. *Climate Service*, 9, 44-56. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2017.06.004>.
 36. Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., & Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 16663-16682.
 37. Moradi, S., Javanmard, S., Ghader, S., Azadi, M., & 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*, 3(3), 188-200. doi: 10.22034/jmas.2021.286905.1138
 38. Mousavi, S. M., AkhondAli, A. M., & Shahbazi, A. (2019). Evaluation of CFSv2 Ensemble Precipitation Forecasts with Water Resources Management Application Perspective (Case Study: Dez Dam River Basin). *Iran-Water Resources Research*, 15(4), 92-106.
 39. Musa, A. I., Tsubo, M., Ma, S., Kurosaki, Y., Ibaraki, Y., & Ali-Babiker, I. E. A. (2022). Evaluation of WRF Cumulus Parameterization Schemes for the Hot Climate of Sudan Emphasizing Crop Growing Seasons. *Atmosphere*, 13(4), 572.
 40. Nakanishi, M., & Niino, H. (2004). An improved Mellor-Yamada level-3 model with condensation physics: Its design and verification. *Boundary-layer meteorology*, 112(1), 1-31.
 41. Nakanishi, M., & Niino, H. (2006). An improved Mellor-Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog. *Boundary-Layer Meteorology*, 119(2), 397-407.
 42. Ndhlovu, G. Z., & Woyessa, Y. E. (2021). Use of gridded climate data for hydrological

- http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_v4/v4.1/contents.html
63. Xiu, A., & Pleim, J. E. (2001). Development of a land surface model. Part I: Application in a mesoscale meteorological model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 40(2), 192-209.
 64. Yan, D., Liu, T., Dong, W., Liao, X., Luo, S., Wu, K., & Wen, X. (2020). Integrating remote sensing data with WRF model for improved 2-m temperature and humidity simulations in China. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 89, 101127
 65. Yuan, X., Liang, X. Z., & Wood, E. F. (2012). WRF ensemble downscaling seasonal forecasts of China winter precipitation during 1982–2008. *Climate dynamics*, 39(7), 2041-2058.
 66. Zhang, Y., Ye, A., Nguyen, P., Analui, B., Sorooshian, S., & Hsu, K. (2022). QRF4P-NRT Probabilistic Post-processing of Near-real-time Satellite Precipitation Estimates using Quantile Regression Forests. *Water Resources Research*, e2022WR032117.
 67. Zittis, G., Hadjinicolaou, P., & Lelieveld, J. (2014). Comparison of WRF model physics parameterizations over the MENA-CORDEX domain. *American Journal of Climate Change*, 3(05), 490.
 52. Sangelantoni, L., Ricchi, A., Ferretti, R., & Redaelli, G. (2021). Dynamical Downscaling in Seasonal Climate Forecasts: Comparison between RegCM-and WRF-Based Approaches. *Atmosphere*, 12(6), 757.
 53. Shabanpour, F., Bazrafshan, J., & Araghinejad, S. (2021). Evaluation of the effect of bias correction methods on the skill of seasonal precipitation forecasts of CFSv2 climate model, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(12), 3017-3032. magiran.com/p2303296
 54. Smirnova, T. G., Brown, J. M., & Benjamin, S. G. (1997). Performance of different soil model configurations in simulating ground surface temperature and surface fluxes. *Monthly Weather Review*, 125(8), 1870-1884.
 55. Smirnova, T. G., Brown, J. M., Benjamin, S. G., & Kim, D. (2000). Parameterization of cold-season processes in the MAPS land-surface scheme. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D3), 4077-4086.
 56. Stull, R. B. (1988). *An introduction to boundary layer meteorology* (Vol. 13). Springer Science & Business Media.
 57. Tang, S., Qiao, S., Feng, T., Fu, Z., Zhang, Z., & Feng, G. (2022). Predictability of the record-breaking rainfall over the Yangtze and Huaihe River valley in 2020 summer by the NCEP CFSv2. *Atmospheric Research*, 266, 105956.
 58. Tian, D., Wood, E. F., & Yuan, X. (2017). CFSv2-based sub-seasonal precipitation and temperature forecast skill over the contiguous United States. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(3), 1477-1490.
 59. Van Lipzig, N., & Prein-nicole, A. (2015). A review on regional convection permitting climate modeling: demonstrations, prospects, and challenges. CLM Assembly, Date: 2015/09/01-2015/09/01, Location: Luxembourg.
 60. Wagner, A., Heinzeller, D., Wagner, S., Rummeler, T., & Kunstmann, H. (2018). Explicit convection and scale-aware cumulus parameterizations: High-resolution simulations over areas of different topography in Germany. *Monthly Weather Review*, 146(6), 1925-1944.
 61. Weisheimer, A.; Befort, D.J.; Macleod, D.; Palmer, T.; Reilly, C.O.; Strømmen, K. Seasonal Forecasts of the Twentieth Century. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2020, 101, 1413–1426.
 62. WRF-NMM V4: User's Guide WRF-ARW User's Guide.