

پیش‌بینی بارش ماهانه در ایران بر اساس رویکرد همادی با استفاده از مدل WRF/CFSv.2 (مطالعه موردی: دوره اکتبر ۲۰۱۹ تا آوریل ۲۰۲۰)

محمدسعید نجفی^{۱*}، حسین دهبان^۲ و اشکان فرخ‌نیا^۳

^۱استادیار پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران

^۲کارشناس پژوهشی، پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران

^۳استادیار پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۹، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۴)

چکیده

ارزیابی مهارت مدل‌های پیش‌بینی جهانی و مقیاس‌گاهی آن برای مناطق و مقیاس‌های زمانی مختلف، نه تنها می‌تواند به بهبود عملکرد این مدل‌ها بر اساس استفاده از پارامترهای مناسب برای مدل یا روش‌های مناسب برای پس‌پردازش منجر شود، بلکه سبب افزایش درک ما نسبت به عملکرد مدل‌های پیش‌بینی در مناطق و مقیاس‌های زمانی مختلف نیز می‌شود. هدف از این مطالعه پیش‌بینی بارش ماهانه بر اساس یک رویکرد همادی با کاربرد مدل جهانی CFSv.2 و مقیاس‌گاهی آن با مدل میان‌مقیاس WRF و در نهایت، سنجش کارایی آن برای ایران است. بر این اساس مدل WRF با چهار پیکربندی فیزیکی و شش شرایط اولیه مختلف (در مجموع ۲۴ عضو) برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۰۰ و بارش اکتبر-آوریل اجرا و درستی‌سنجی هریک از عضوها نیز بر اساس آماره KGE و بارش ماهانه در ۱۴۵ ایستگاه در کشور انجام شد. برای ایجاد مدل همادی و ترکیب نتایج پیش‌بینی‌های حاصل از ۲۴ عضو، از روش میانگین‌گیری وزنی استفاده شد. کارایی کلی مدل همادی با محاسبه سنجه‌های آماری RMSE، MBE، ضریب همبستگی پیرسون (PCC) و نش-ساتکلیف (NSE) و استخراج برخی از سنجه‌های درستی‌سنجی حاصل از یک جدول توافقی ۳×۳ ارزیابی شد. نتایج نشان داد متوسط سنجه‌های RMSE، MBE، PCC و NSE مدل همادی مورد استفاده برای پیش‌بینی بارش در دوره اکتبر-آوریل به ترتیب ۰/۴۶، ۰/۳۶۵، ۵/۷- و ۰/۶۷ است که کارایی پذیرفتنی این مدل همادی را نشان می‌دهد. البته به تفکیک هر ماه، در ماه‌های اکتبر و ژانویه کارایی مدل در پیش‌بینی بارش ماهانه بهتر و در ماه‌های آوریل و مارس ضعیف‌تر بوده است. همچنین کارایی آن در تخمین دسته بارش شامل دسته‌های زیرنرمال، نرمال و بیش از نرمال حدود ۵۲ درصد است. اجرای این مدل برای پیش‌بینی بارش ماهانه در دوره ۲۰۲۰-۲۰۱۹ در قالب یک نمونه عملیاتی نشان می‌دهد مدل می‌تواند به‌خوبی پراکندگی و مناطق تمرکز بارش ماهانه را در کشور پیش‌بینی کند.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی ماهانه، بارش، WRF، CFSv.2، مدل همادی

۱ مقدمه

از ابتدای دهه ۱۹۸۰ میلادی با توسعه دانش بشر در زمینه پیش‌بینی وضع هوا و اقلیم، مشخص شد که امکان پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت وضع هوا یعنی پیش‌بینی سامانه‌های آب‌وهوایی در مقیاس زمانی فراتر از مقیاس مدنظر آن دوران وجود دارد. در انتهای قرن گذشته، با توسعه سریع مدل‌های عددی پیش‌بینی، فنون داده‌گوازی (data assimilation) و تنوع منابع جمع‌آوری داده، دوره‌ای جدید برای پیش‌بینی وضعیت آب‌وهوا در مقیاس زمانی میان‌مدت (ماهانه و فصلی) با استفاده از مدل‌های جفت‌شده جو-اقیانوس (Coupled Atmosphere-Ocean General Circulation Models, CGCMs) آغاز شد (وانگ و همکاران، ۲۰۰۹). پیش‌بینی میان‌مدت، ابزاری مفید برای اتخاذ تصمیمات مناسب در بخش‌های آسیب‌پذیر در مقابل تغییرات میان‌مدت سامانه‌های آب‌وهوایی مانند کشاورزی، بهداشت، انرژی، مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی برای کنترل حوادث و همچنین مدیریت بحران است (ویتارا و همکاران، ۲۰۱۴). وجود این نیازهای عمومی باعث شد مراکز اقلیمی در سراسر جهان، سامانه‌های پیش‌بینی را در مقیاس زمانی فراتر از چند روز (پیش‌بینی میان‌مدت) به صورت عملیاتی راه‌اندازی و بخشی از نیازهای کنونی جامعه را درباره آگاهی از وضعیت فراسنج‌های مختلف جوئی در مقیاس زمانی ماهانه و فصلی تأمین کنند.

با توجه به اهمیت بارش در مؤلفه‌های بهره‌وری آب، وجود پیش‌بینی‌های معتبر در مقیاس زمانی میان‌مدت می‌تواند در مدیریت منابع آب و همچنین کاهش خسارات ناشی از بارش‌های حدی بر کشاورزی، صنعت و شرب و همچنین مدیریت خشکسالی مؤثر باشد (ژائو و همکاران، ۲۰۱۹ و آگیما و همکاران، ۲۰۱۷). برای پیش‌بینی ماهانه بارش از روش‌های مختلفی از جمله روش‌های داده‌مبنا (مانند مدل‌های سری زمانی خودهمبسته، شبکه‌های عصبی

مصنوعی، رگرسیون چندمتغیره خطی و رگرسیون بردار پشتیبان) و روش‌های مدل‌سازی سامانه جو بر اساس مدل‌های عددی پیش‌بینی هوا و اقلیم استفاده می‌شود (دهبان و همکاران، ۱۳۹۹).

یک جنبه اساسی در پیش‌بینی‌های میان‌مدت بارش، سطح مهارت پیش‌بینی است. وجود این پیش‌بینی‌ها در صورتی می‌تواند مفید باشد که اطلاعات ارائه‌شده فراتر از آن چیزی باشد که از یک ماه یا یک فصل نرمال انتظار می‌رود. این اطلاعات باید بتواند نوسانات را در طول دوره پیش‌بینی به‌خوبی نشان دهد (سینگ و همکاران، ۲۰۱۵)؛ بنابراین استفاده از نتایج مدل‌هایی که شرایط اولیه و مرزی در آنها پیوسته به‌روزرسانی می‌شود، می‌تواند نتایج بهتری در پی داشته باشد. در دهه‌های گذشته، مهارت پیش‌بینی‌های میان‌مدت با استفاده از توسعه روش‌های کالیبراسیون، که کمک شایانی به اصلاح و بهینه‌سازی نتایج مدل‌های آب‌وهوایی می‌کند، توسعه مدل‌های آب‌وهوایی، پیشرفت در منابع گردآوری داده و توسعه روش‌های داده‌گوازی بهبود یافته است (خان و همکاران، ۲۰۱۷).

با گذشت بیش از سه دهه از توسعه مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا، دو تحول عمده در راهبرد این پیش‌بینی‌ها ایجاد شده است: توسعه پیش‌بینی‌های احتمالاتی و راهبرد استفاده از پیش‌بینی‌های همادی (ensemble). توسعه راهبرد اول به علت وجود عدم قطعیت در مدل‌های عددی و در نظر گرفتن رویکرد کمی نسبت به این عدم قطعیت‌ها است و راهبرد دوم روشی برای کاهش عدم قطعیت در پیش‌بینی‌ها است (کرتمان و همکاران، ۲۰۱۴).

با توجه به ماهیت آشوبناک جو، استفاده از رویکرد پیش‌بینی همادی در پیش‌بینی‌های میان‌مدت، راهکاری مفید برای کاهش خطای نظام‌مند موجود در این مدل‌ها

بهنه‌سازی شود. کینگ و همکاران (۲۰۲۰) به امکان‌سنجی پیش‌بینی بارش‌های حدی در مقیاس زمانی زیر فصلی و فصلی بر اساس مدل همادی توسعه‌یافته در اداره هواشناسی استرالیا (ACCESS-S1) پرداختند. نتایج نشان داد این مدل در پیش‌دیدهای دو هفته تا ماه نخست، عملکرد مناسبی در پیش‌بینی مقادیر حدی بارش دارد. همچنین بر اساس آن پژوهش، مهارت مدل همادی مورد استفاده در دوره گرم سال ضعیف‌تر از سایر فصول است و در مقابل، در مناطق شمالی و مرکزی استرالیا در دوره‌های خشک مناسب‌تر است. ماریوتی و همکاران (۲۰۲۰) اثر مقیاس‌گاهی مدل جهانی پیش‌بینی فصلی SEAS5 را در عملکرد مدل ذکر شده در منطقه شاخ آفریقا بررسی کردند. مدل عددی منطقه‌ای استفاده‌شده در این مطالعه مدل WRF بود و نتایج نشان داد مقیاس‌گاهی به افزایش اطمینان پیش‌بینی‌های حاصل از مدل SEAS5 منجر می‌شود. در داخل کشور نیز مطالعاتی در زمینه استفاده از نتایج مدل‌های جهانی پیش‌بینی عددی هوا و اقلیم انجام شده است که از این میان می‌توان به مطالعه نجفی و همکاران (۱۳۹۶) اشاره کرد که به بررسی مدل‌های همادی آمریکای شمالی در پیش‌بینی فصلی بارش پرداختند. دهبان و همکاران (۱۳۹۸) نیز دقت مدل‌های NMME را در پیش‌بینی بارش ماهانه در حوضه سفیدرود ارزیابی کردند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، استفاده از مدل‌های عددی یکی از روش‌های شایع برای تولید پیش‌بینی‌های فصلی است، اما در مطالعاتی که در این زمینه برای کشور انجام شده است، هنوز در زمینه استفاده از مدل‌های عددی منطقه‌ای، توسعه سامانه‌های همادی تحت مدل‌های منطقه‌ای و همچنین ارزیابی کارایی این مدل‌ها برای پیش‌بینی بارش در کشور احساس خلاء می‌شود.

در حال حاضر مراکز معتبری که به ارائه خدمات و پیش‌بینی‌های جوی می‌پردازند، به منظور ارائه چشم‌اندازی از وضعیت جوی هر منطقه در بازه‌های زمانی مختلف،

است (سها و همکاران، ۲۰۱۴). پیش‌بینی‌های همادی می‌تواند به صورت همادی چندمدلی (که در آن از دو یا چند روش پیش‌بینی یا مدل برای پیش‌بینی استفاده می‌شود) یا همادی چندفیزیکی (ترکیبی از طرح‌واره‌های مختلف فیزیکی در یک مدل عددی) باشد (رضازاده و همکاران، ۱۳۹۸)؛ بنابراین استفاده از مدل‌های عددی پیش‌بینی و همچنین توسعه مدل‌ها و سامانه‌های همادی پیش‌بینی ماهانه و میان‌مدت در بستر مدل‌های عددی، هم می‌تواند به تولید پیش‌بینی‌های احتمالاتی بینجامد و هم به کاهش عدم قطعیت‌های شایع در پیش‌بینی‌های حاصل از این مدل‌ها منجر شود.

مطالعات مختلفی در زمینه استفاده از مدل‌های عددی یا توسعه سامانه‌های همادی برای پیش‌بینی‌های میان‌مدت انجام شده است. اینفانتی و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند پیش‌بینی‌های همادی حاصل از مدل‌های (North NMME) American Multi-Model Ensemble برای پیش‌بینی بارش به‌ویژه در ماه‌های فصل سرد در جنوب شرق آمریکا خطای کمتر و مهارت بیشتری در مقایسه با مدل‌های انفرادی دارند. سینگ و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی توانایی مدل WRF (Weather Research and Forecasting model) در پیش‌بینی متغیرهای مختلف جوی در فصول موسمی و غیرموسمی پرداختند. نتایج نشان داد این مدل در برآورد متغیرهای دما، تابش، سرعت باد و رطوبت نسبی در دوره فعالیت موسمی‌ها عملکرد مطلوب و معتبری دارد. چنین شرایطی برای فصول غیرموسمی نیز صادق است. علیزاده چوبری (۲۰۱۹) به منظور ارائه روشی برای پیش‌بینی ماهانه و فصلی بارش و دما در ایران، کارایی مدل گردش کلی CSIRO-Mk3.6 و مقیاس‌گاهی آن را تحت مدل عددی RegCM-4 بررسی کرد و نشان داد این مدل در برخی از مناطق ایران خطای زیادی دارد که این خطا ناشی از خطای داده‌های شرایط مرزی مورد استفاده است و باید برای ایران

گروه اول داده‌های مشاهداتی بارش در مقیاس ماهانه در گستره کشور است که برای درستی‌سنجی مدل استفاده می‌شود. گروه دوم داده‌های مورد نیاز برای تأمین شرایط اولیه و مرزی مدل WRF است. گروه سوم داده نیز داده‌های یک پایگاه داده شبکه‌ای بارش است، به گونه‌ای که بتواند پراکندگی بارش در کشور را در دوره اکتبر- آوریل سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۰ به شکل مطلوبی نشان دهد. دلیل انتخاب دوره اکتبر- آوریل این است که عمده بارش کشور در این بازه زمانی اتفاق می‌افتد و در سایر ماه‌ها، بارش به نواحی اقلیمی محدودی منحصر می‌شود. برای گروه اول، از داده‌های ماهانه ۱۴۵ ایستگاه سینوپتیک در گستره کشور در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۰۰ استفاده شد. موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده در شکل ۱ آورده شده است.

گروه دوم داده، داده‌های مدل‌های جهانی پیش‌بینی هستند که برای تأمین شرایط اولیه و شرایط مرزی مدل WRF استفاده می‌شوند. در این مطالعه برای شرایط مرزی و اولیه اجراها از داده‌های جهانی (CFSv.2 Climate Forecast System Version 2) با تفکیک افقی یک درجه برای متغیرهای جوّی و ۰/۵ درجه برای متغیرهای سطحی استفاده می‌شود. این داده‌ها روزانه چهار نوبت به‌روزرسانی شده‌اند و حاوی پیش‌بینی متغیرهای مختلف جوّی برای حدود شش ماه آینده هستند (<https://nomads.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/cfs/prod/cfs/>). گام‌های زمانی داده‌های مورد استفاده شش ساعته است.

گروه سوم داده، داده‌های مرکز اقلیم‌شناسی جهانی (Global Precipitation Climatology Centre, GPCC) است که سازمان هواشناسی آلمان به درخواست سازمان هواشناسی جهانی در سال ۱۹۸۹ ایجاد کرده است. این محصول شامل داده‌های روزانه و ماهانه بارش در شبکه‌ای منظم و با تفکیک مکانی ۲/۵، ۱ و ۰/۵ درجه قوسی است.

ماهانه اقدام به صدور پیش‌بینی‌های ماهانه و فصلی برای مناطق مختلف دنیا می‌کنند. این پیش‌بینی‌ها معایبی دارند که شامل محدودیت‌هایی در قدرت تفکیک مکانی، ارائه پیش‌بینی‌ها به‌صورت سه ماهه و بدون در نظر گرفتن ماهیت اقلیم منطقه‌ای، ارائه نشدن نتایج به‌صورت زمان واقعی برای یک دوره واحد، نبود دسترسی به داده‌های خام جهت پس‌پردازش‌های بعدی و مواردی از این قبیل است (سانگی‌لانوتونی و همکاران، ۲۰۲۱)؛ لذا ارائه یک پیش‌بینی مبتنی بر مدل‌های منطقه‌ای یا جهانی به‌صورت همادی و پس‌پردازش نتایج این مدل‌ها بر اساس روش‌های آماری مرسوم می‌تواند سبب تولید پیش‌بینی‌های بارش با دقت بیشتر شود. با توجه به اینکه برخی مدل‌های هواشناسی جهانی پیش‌بینی کوتاه‌مدت مانند GFS را حداکثر تا شانزده روز، پیش‌بینی ECMWF را تا ده روز و پیش‌بینی ICON را تا پنج روز پوشش می‌دهند و وجود پیش‌بینی‌های ماهانه بارش برای مباحث مربوط به مدیریت منابع آب، انرژی و مدیریت مخاطرات مربوط به سیلاب بسیار ضروری است، هدف از این مطالعه توسعه مدلی بر اساس رویکرد همادی (با توجه به استفاده از شش تاریخ مختلف برای داده‌های شرایط اولیه و مرزی) مبتنی بر مقیاس‌گاهی دینامیکی مدل CFSv.2 تحت مدل WRF برای پیش‌بینی بارش ماهانه در کشور است تا هم از عدم قطعیت‌های شایع در پیش‌بینی‌های منفرد مدل CFSv.2 کاسته شود و هم پیش‌بینی‌های بارش حاصل از مدل جهانی CFSv.2 بر اساس تنوع اقلیمی کشور و با توجه به تنوع ارتفاعی و ویژگی‌های محلی و منطقه‌ای، در مقیاس منطقه‌ای مقیاس‌گاهی شود. سپس به ارزیابی عملکرد این مدل در پیش‌بینی بارش ماهانه در ایران پرداخته می‌شود.

۲ داده‌ها و روش کار

۲-۱ داده‌ها

در تحقیق حاضر از سه گروه داده استفاده شده است.

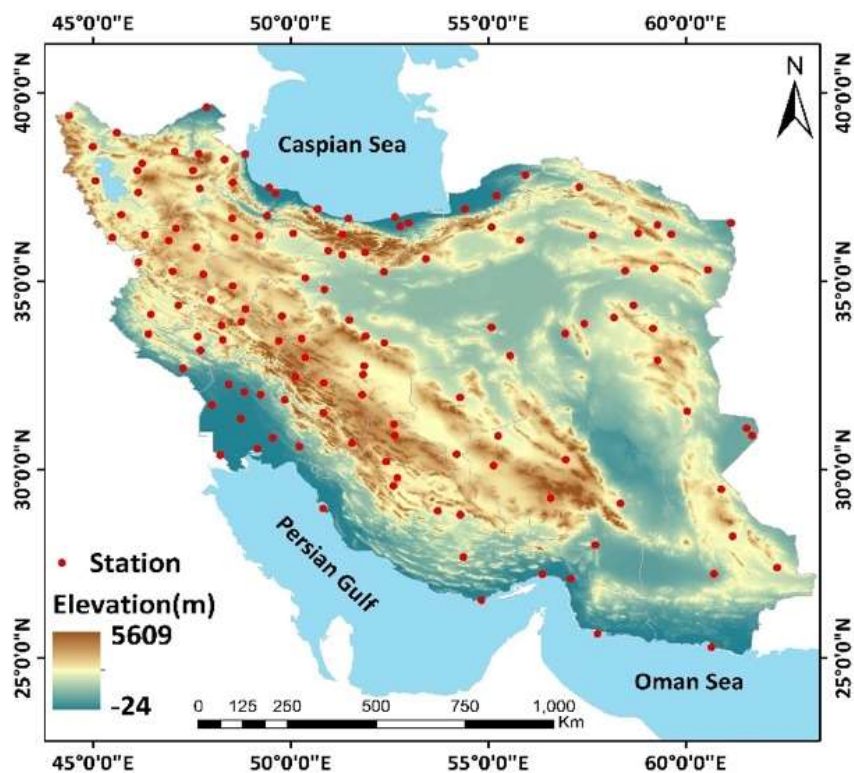
دامنه اجرا شد. نسبت مقیاس‌کاهی دامنه‌ها سه به یک بود؛ بنابراین دامنه بزرگ (دامنه مادر) با تفکیک افقی ۶۰ کیلومتر و دامنه کوچک‌تر (آشیا ناه اول) با تفکیک افقی ۲۰ کیلومتر انتخاب شد. دامنه دوم به گونه‌ای انتخاب شد که نواحی داخل مرزهای کشور را به‌خوبی پوشش دهد (شکل ۲). مشخصات و طرح‌واره‌های مورد استفاده در مدل WRF در جدول ۱ آورده شده است. برای توسعه مدل همادی، مدل WRF با چهار پیکربندی مختلف (جدول ۲) به‌منظور کاهش عدم قطعیت ناشی از پارامترسازی فیزیکی و همچنین با شش شرایط اولیه و مرزی مختلف (در مجموع ۲۴ عضو)، که حاصل استفاده از تاریخ‌های مختلف در ده روز انتهایی هر ماه است، برای کاهش عدم قطعیت در شرایط اولیه، در دوره‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ (به‌عنوان دوره پایه جهت ارزیابی مدل همادی) و ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۰ جهت ارائه یک پیش‌بینی ماهانه به شکل عملیاتی اجرا شد. برای دوره تطبیق (spin-up) نیز با توجه به اینکه مدل برای ارائه یک پیش‌بینی ماهانه در شش تاریخ مختلف در ده روز انتهایی هر ماه اجرا شد (برای مثال جهت پیش‌بینی بارش ماه سپتامبر، داده‌های CFSv.2 برای تاریخ‌های ۲۰، ۲۵، ۲۸، ۲۹، ۳۰ اوت و ۱ سپتامبر تا ساعت ۰۰ اول اکتبر برای دوره ۲۰۱۹-۲۰۰۰ بارگیری و مدل بر اساس داده‌های موجود برای یک بازه سی تا چهل روزه اجرا شد؛ لذا روزهای باقی‌مانده تا ابتدای هر ماه به‌عنوان دوره تطبیق برای مدل در نظر گرفته شد (برای نمونه جهت اجرای مدل بر اساس داده‌های ۲۰ اوت، مدل ده روز دوره تطبیق خواهد داشت) و چون آخرین اجرا مطابق با اولین روز ماه مورد نظر برای پیش‌بینی بود، فاقد دوره تطبیق بود.

برای شبیه‌سازی بارش، تمامی پارامترهای میکروفیزیک، تابش موج بلند، تابش موج کوتاه، لایه سطحی، سطح زمین، لایه مرزی سیاره‌ای و همرفت اهمیت دارند، اما انتخاب طرح‌واره‌های مناسب برای لایه

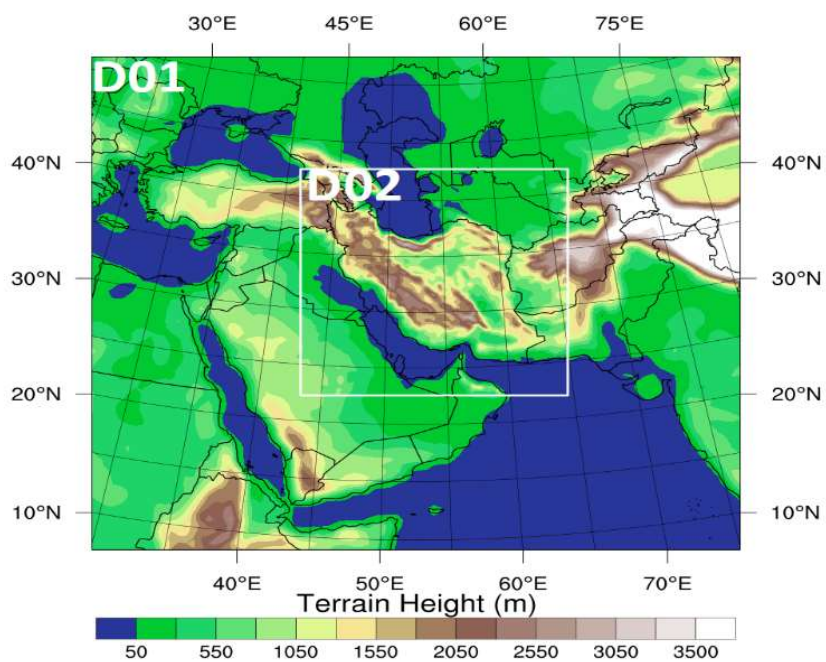
و بر اساس اندازه‌گیری‌های ایستگاهی در سطح جهان تولید می‌شود (دارند و زند کریمی، ۱۳۹۵). پس از اجرای مدل برای پیش‌بینی بارش ماهانه در دوره اکتبر-آوریل سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۱۹ به‌صورت یک نمونه عملیاتی، با توجه به کافی نبودن پراکندگی ایستگاه‌های موجود برای درون‌یابی بارش و نشان دادن پراکنش فضایی بارش به گونه‌ای که مقادیر بارش را در ارتفاعات به خوبی نشان دهد و همچنین از آنجا که خروجی‌های مدل WRF نیز به‌صورت یاخته‌های ۲۰ کیلومتری و شبکه‌ای است؛ برای مقایسه بصری بین پراکنش فضایی بارش حاصل از پیش‌بینی‌های مدل و مقادیر مشاهداتی، بهتر بود از یک پایگاه داده شبکه‌ای استفاده شود تا به شکلی ملموس، عملکرد مدل در مقایسه با یک پایگاه داده شبکه‌ای نشان داده شود. گفتنی است عملکرد پایگاه‌های داده در مقیاس زمانی ماهانه به‌مراتب بهتر از مقیاس زمانی روزانه و ساعتی است و به مقادیر واقعی بسیار نزدیک است (سرانو و تئودور، ۲۰۲۱)؛ از این رو با استناد به مطالعات فلاح و همکاران (۲۰۱۹)، دارند و خاندو (۲۰۲۰) و نساج و همکاران (۲۰۲۱)، پایگاه داده GPCC بهترین عملکرد را در بین پایگاه‌های مختلف برای تخمین بارش ماهانه در ایران دارد. شایان ذکر است برای این دوره (۲۰۲۰-۲۰۱۹) عملکرد مدل بر اساس آمار بارش ماهانه در ۴۰۹ ایستگاه همدید در سطح کشور ارزیابی شد و از پایگاه GPCC تنها برای مقایسه بصری بارش مدل همادی با یک پایگاه داده به‌عنوان داده مشاهداتی در گستره کشور استفاده شد.

۲-۲ پیکربندی مدل WRF و چارچوب مدل همادی

در این مطالعه مدل پیش‌بینی کمیت‌های هواشناسی (بارش) در مقیاس زمانی ماهانه بر اساس پیش‌بینی‌های حاصل از نسخه ۴/۱ مدل WRF و داده‌های شرایط اولیه و مرزی مدل CFSv.2 به‌دست می‌آید. مدل WRF برای دو



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های مشاهداتی مورد استفاده در این مطالعه.



شکل ۲. دامنه‌های اجرای مدل WRF. تفکیک افقی دامنه بزرگ (دامنه مادر) ۶۰ کیلومتر و تفکیک افقی دامنه کوچک‌تر (آشپانه اول) ۲۰ کیلومتر است.

جدول ۱. مشخصات و طرح‌واره‌های مورد استفاده در مدل WRF.

مدل	WRF 4.1 (همکاران، ۲۰۱۹)
تفکیک افقی	60 (دامنه دوم); 20 km (دامنه اول)
ابعاد (e_we; e_sn)	91-84 (دامنه اول); 112-115 (دامنه دوم)
تعداد تراز قائم	32
داده‌های شرایط مرزی	گام زمانی ۶ ساعته، NCEP CFSv.2
گام زمانی	300s
دوره شبیه‌سازی	2000-2019 (دوره تاریخی); 2019-2020 (پیش‌بینی عملیاتی)
طرح‌واره‌های فیزیکی	خردفیزیک:
	<ul style="list-style-type: none"> • Lin (۱۹۸۳، همکاران، لین) • Eta (Ferrier) (۲۰۰۱، راجر و همکاران، ایتا) • WSM3 (۲۰۰۴، هونگ و همکاران، وسم ۳) • Kessler (۱۹۹۵، کسلر، کسلر)
	تابش موج کوتاه: Dudhia (چن و همکاران، ۲۰۱۴)
	تابش موج بلند: RRTM (چن و همکاران، ۲۰۱۴)
	لایه مرزی سیاره‌ای:
<ul style="list-style-type: none"> • YSU (۲۰۰۶، هانگ و همکاران، ی‌اس‌یو) • MYJ (۱۹۹۴، جانجیک، م‌ی‌جی) • MYNN2 (۲۰۰۴، نینو، م‌ی‌ان‌ان‌۲) 	
لایه سطحی: Noah (چن و همکاران، ۲۰۱۴)	
همرفت:	
<ul style="list-style-type: none"> • Kain-Fritsch (۱۹۹۳، کین و فریتس، کین-فریتس) • Betts-Miller-Janjic (۱۹۹۴، جانجیک، بتس-میلر-جانجیک) • Tiedtke (۱۹۸۹، تایدکی، تایدکی) • Grell 3D (۲۰۱۴، گرل و فریتس، گرل ۳‌دی) 	

جدول ۲. ترکیب پیکربندی‌های استفاده‌شده در این مطالعه.

شماره پیکربندی	خردفیزیک	لایه مرزی سیاره‌ای	همرفت	تابش موج بلند	تابش موج کوتاه	لایه سطحی	سطح زمین
۱	Eta	MYJ	BMJ	RRTM	Dudhia	M-O	Noah
۲	Lin	YSU	Grell 3D	RRTM	Dudhia	M-O	Noah
۳	Kessler	YSU	Tiedtke	RRTM	Dudhia	M-O	Noah
۴	WSM3	MYNN	K-F	RRTM	Dudhia	M-O	Noah

تغییر طرح‌واره‌های مربوط به همرفت، لایه مرزی سیاره‌ای و خردفیزیک بود و انتخاب طرح‌واره‌های آن هم بر اساس نتایج مطالعات پیشین در زمینه حساسیت‌سنجی مدل نسبت به پارامترسازی فیزیکی جهت پیش‌بینی بارش کشور صورت گرفت (قصابی و همکاران، ۱۳۹۳؛ قاضی میرسعید و همکاران، ۱۳۹۷ و مرادی و همکاران، ۱۳۹۹).

مرزی سیاره‌ای، خردفیزیک و کومولوس می‌تواند نقش مهمی در دقت شبیه‌سازی بارش ایفا کند (پنلی و همکاران، ۲۰۱۴). برای کاهش عدم قطعیت مرتبط با بخش‌های عددی و طرح‌واره‌های فیزیکی در مدل WRF، می‌توان با به‌کارگیری طرح‌واره‌های متفاوت برای هر پارامتر این مشکل را برطرف کرد؛ لذا در این مطالعه از چهار پیکربندی فیزیکی متفاوت استفاده شد که تأکید بر

۳-۲ روش‌های درستی‌سنجی

با هدف تعیین دقت هر عضو از ۲۴ عضو مدل همادی، مقادیر پیش‌بینی بارش در مقیاس ماهانه با آمار معادل مشاهداتی در ۱۴۵ ایستگاه در کشور مقایسه و دقت هر عضو تعیین شد. در این مرحله، از سنجه آماری KGE (Kling-Gupta Efficiency) (روابط ۱ تا ۳)، استفاده شد. سپس بر اساس مقادیر آماره KGE محاسبه شده برای هر عضو، رتبه کلی آن (در میان ۲۴ عضو مدل همادی) برای محاسبه میانگین وزنی استخراج شد (رابطه ۴). هدف از وزن‌دهی به عضوهای مدل، دادن وزن بیشتر به عضوهای است که مقادیر بارش ماهانه برآوردشده کشور در آنها در طول دوره ۲۰۰۰-۲۰۱۹ با دقت بیشتری صورت گرفته است. هر عضو بر مبنای دقت محاسبه شده حاصل از آماره KGE رتبه‌دهی می‌شود؛ یعنی هرچه مقادیر KGE بیشتر باشد، رتبه عضو (R_i) در رابطه (۴) بیشتر است. بیشترین ارزش برای R_i برابر با ۲۴ و کمترین هم ۱ است.

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

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

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

$$W_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (4)$$

در روابط (۱) تا (۳)، 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. در رابطه (۴)، R_i رتبه نهایی هر عضو حاصل از رتبه‌بندی و W_i وزن هر عضو است. برای درستی‌سنجی نتایج نهایی بارش ماهانه مدل‌سازی شده در مقایسه با مقادیر مشاهداتی، از سنجه‌های آماری نش-ساتکلایف (NSE)، میانگین خطای انحراف (MBE)، مجذور مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی پیرسون (PCC) استفاده شد:

$$\text{Root Mean Square Error (RMSE)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (5)$$

$$\text{Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)} = \frac{NSE = \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (6)$$

$$\text{Mean Bias Error (MBE)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (7)$$

$$\text{Pearson Correlation Coefficient (CC)} = \frac{r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (8)$$

که P_i مقدار بارش پیش‌بینی شده در مدل WRF، O_i مقدار بارش مشاهداتی در ایستگاه‌های هواشناسی، \bar{O} میانگین مقادیر مشاهده شده، \bar{P} میانگین مقادیر پیش‌بینی شده و n تعداد مشاهدات است. برای درستی‌سنجی کمی مدل همادی بر اساس نتایج مدل در دوره ۲۰۱۹-۲۰۰۰، جهت تخمین دسته صحیح بارشی از بین سه دسته زیرنرمال (کمتر از صدک ۳۳ ام)، نرمال (بین صدک ۳۳ ام و ۶۶ ام) و بیشتر از نرمال (بیشتر از صدک ۶۶ ام)، از جدول توافقی 3×3 استفاده شد.

کمیت‌های درستی‌سنجی مختلفی را می‌توان از یک جدول توافقی K×K استخراج کرد که در این مطالعه از کمیت آهنگ برخورد (POD)، کمیت نسبت هشدارهای نادرست (FAR_i) و امتیاز مهارتی هاید (HSS) استفاده شد:

$$\text{Probability of Detection (hit rate) (POD)} = H_i = \frac{N_{i,i}}{\sum_{j=1}^k N_{i,j}} \quad (9)$$

$$\text{False Alarm Ratio} = FAR_i = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^k N_{i,j}}{\sum_{j=1}^k N_{i,j}} \quad (10)$$

$$\text{Heidke Skill Score} = \frac{HSS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k N_{i,i} - \frac{1}{N^2} \sum_{j=1}^k N(F_i) N(O_i)}{1 - \frac{1}{N^2} \sum_{j=1}^k N(F_i) N(O_i)} \quad (11)$$

i و j تقسیم‌بندی بارش ماهانه پیش‌بینی شده و مشاهده شده

در ایستگاه‌های مورد مطالعه در کشور دارند. در مقابل، عضو ۴ کمترین دقت را دارد و مقدار R_i آن برابر با ۱ است و البته کمترین ضریب (۰/۰۰۳۳) را نیز در محاسبه میانگین وزنی بارش ماهانه دارد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، تقریباً مقدار سنجه KGE در کلیه اعضا برای نواحی جنوب شرقی، شرق و سواحل خلیج فارس بزرگ است؛ زیرا بارش این نواحی در این ماه نزدیک به صفر است و کلیه اعضا کارایی مناسبی در پیش‌بینی بارش ماه اکتبر در این نواحی داشته‌اند. عملکرد عضوهای مختلف در نواحی شمالی و غربی کشور متفاوت است؛ زیرا این ماه در شمال کشور از ماه‌های پربارش کشور است و در غرب کشور نیز بارش‌های پاییزه از این ماه آغاز می‌شود، لذا پیش‌بینی مدل برای این نواحی می‌تواند نتایج مطلوب‌تری را ارائه نماید. این فرایند برای تمامی ماه‌های مورد مطالعه یعنی اکتبر تا آوریل انجام شد و رتبه هر یک از ۲۴ عضو و همچنین میانگین وزنی بارش برای آن محاسبه شد؛ برای مثال برای ماه نوامبر، عضو ۲۱ بهترین عملکرد را دارد، در حالی که برای ماه دسامبر، عضو ۱۸ بیشترین مقادیر KGE را برای متوسط کشوری دارد. پس تولید پیش‌بینی‌های حاصل از مدل همادی که از اعضای با شرایط اولیه و پارامترسازی فیزیکی متفاوتی تشکیل شده باشند، می‌تواند نتایج پذیرفتنی‌تری را نسبت به پیش‌بینی‌های منفرد برای پیش‌بینی‌های ماهانه ارائه کند؛ زیرا آن نتایج حاصل مجموعه متنوعی از پیش‌بینی است که بر اساس شرایط اولیه و پارامترسازی فیزیکی مختلفی برای همان ماه مدل‌سازی شده است و لذا پیش‌بینی بارش حاصل از مدل همادی می‌تواند به کاهش عدم قطعیت در پیش‌بینی بارش ماهانه منجر شود.

به سه دسته زیرنرمال، نرمال و بیش از نرمال است. $N(Fi)$ تعداد کل دفعاتی است که مدل، پدیده را در دسته i پیش‌بینی کرده و $N(Oi)$ تعداد کل دفعاتی است که دیدبانی، پدیده را در دسته i دسته‌بندی کرده است. N_{ij} تعداد دفعاتی است که پیش‌بینی‌ها در دسته i و مشاهدات در دسته j بوده و N تعداد کل داده‌ها است.

برای درستی سنجه پیش‌بینی ماهانه بارش مدل همادی، در ابتدا مقادیر بارش پیش‌بینی‌شده در ماه‌های مورد بررسی (اکتبر تا آوریل) برای کلیه ایستگاه‌ها در دوره بیست ساله مورد مطالعه برای ۱۴۵ ایستگاه استخراج و کمیت‌های اشاره‌شده به صورت متوسط برای کشور محاسبه شدند.

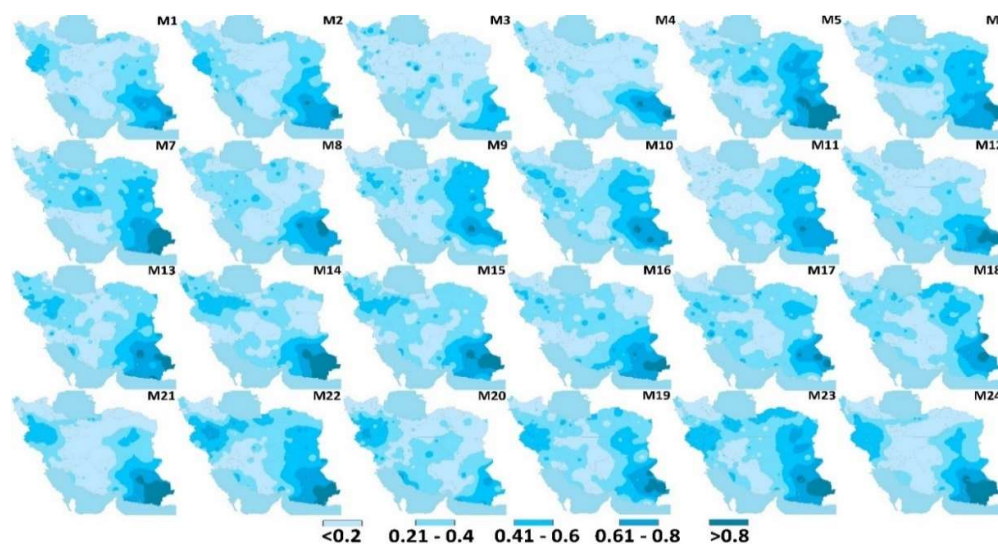
۳ یافته‌ها

۳-۱ ترکیب وزنی عضوهای مدل همادی

شکل ۳ مقادیر آماره KGE محاسبه‌شده در پهنه کشور را بر اساس مقایسه با مقادیر مشاهداتی ۱۴۵ ایستگاه مورد بررسی برای ۲۴ عضو مدل همادی (نمونه بارش اکتبر) نشان می‌دهد. هدف از ارائه این شکل، نشان دادن اهمیت استفاده از عضوهای مختلف در پیش‌بینی ماهانه بارش است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، هر عضو در نواحی مختلف کشور و همچنین متوسط کشوری عملکردی متفاوت در پیش‌بینی بارش دارد و همه اعضا از یک الگوی واحد تبعیت نمی‌کنند (شکل ۳ و جدول ۴). جدول ۴ چگونگی تعیین رتبه‌ها (R_i) را بر اساس مقادیر محاسبه‌شده سنجه آماری KGE در کشور برای نمونه بارش ماه مهر نشان می‌دهد. بر این اساس، پیش‌بینی‌های بارش حاصل از عضوهای شماره ۱۵، ۱۹، ۱۳ و ۱۴ بیشترین رتبه و بیشترین وزن را در محاسبه میانگین بارش

جدول ۳. جدول توافقی K×K

دسته پیش‌بینی	دسته مشاهداتی					مجموع
	I _j	1	2	...	K	
1	n(F ₁ ,O ₁)	n(F ₁ ,O ₂)	...	n(F ₁ ,O _k)	N(F ₁)	
2	n(F ₂ ,O ₁)	n(F ₂ ,O ₂)	...	n(F ₂ ,O _k)	N(F ₂)	
...	
K	n(F _k ,O ₁)	n(F _k ,O ₂)	...	n(F _k ,O _k)	N(F _k)	
مجموع		N(O ₁)	N(O ₁)	...	n(O _k)	N



شکل ۳. مقادیر سنجه KGE محاسبه‌شده در پهنه کشور برای ۲۴ عضو (M1-M24) در پیش‌بینی بارش ماهانه (نمونه بارش ماه اکتبر).

جدول ۴. رتبه‌بندی اعضای مدل همادی (نمونه بارش ماه اکتبر).

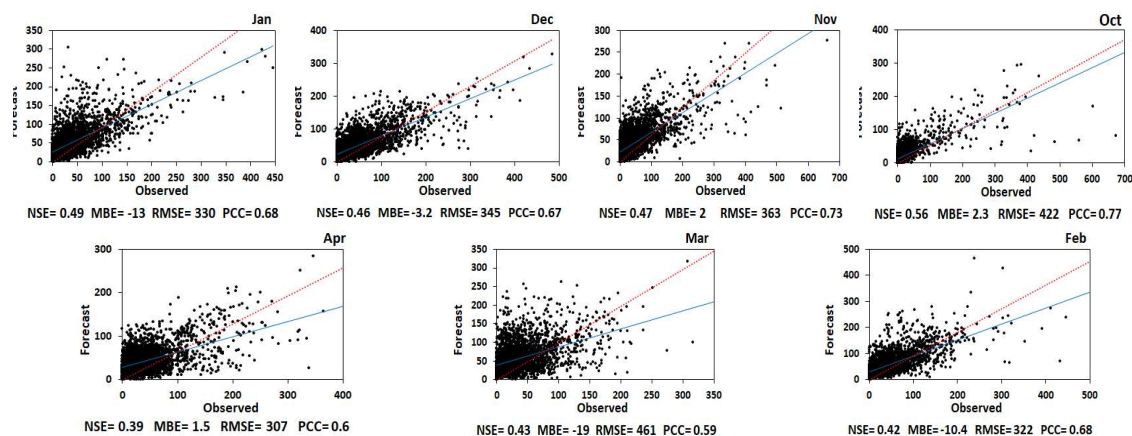
وزن	رتبه	KGE	عضو همادی	وزن	رتبه	KGE	عضو همادی	وزن	رتبه	KGE	عضو همادی
۰/۰۲۶۶	۸	۰/۴۲	۱۷	۰/۰۰۶۶	۲	۰/۲۸	۹	۰/۰۴۶۶	۱۴	۰/۵۳	۱
۰/۰۲۳۳	۷	۰/۴	۱۸	۰/۰۳۶۶	۱۱	۰/۴۷	۱۰	۰/۰۵	۱۵	۰/۵۴	۲
۰/۰۷۶۶	۲۳	۰/۶۳	۱۹	۰/۰۱۳۳	۴	۰/۳۵	۱۱	۰/۰۰۶۶	۲	۰/۲۸	۳
۰/۰۴۳۳	۱۳	۰/۵۱	۲۰	۰/۰۱۶۶	۵	۰/۳۷	۱۲	۰/۰۳۳	۱	۰/۲۴	۴
۰/۰۳۳۳	۱۰	۰/۴۵	۲۱	۰/۰۷۶۶	۲۳	۰/۶۳	۱۳	۰/۰۵۶۶	۱۷	۰/۵۶	۵
۰/۰۳	۹	۰/۴۲	۲۲	۰/۰۷	۲۱	۰/۶۲	۱۴	۰/۰۶	۱۸	۰/۵۸	۶
۰/۰۲	۶	۰/۳۸	۲۳	۰/۰۸	۲۴	۰/۶۵	۱۵	۰/۰۶۳۳	۱۹	۰/۵۹	۷
۰/۰۴	۱۲	۰/۵۱	۲۴	۰/۰۵۳۳	۱۶	۰/۵۵	۱۶	۰/۰۶۶۶	۲۰	۰/۶	۸

۲-۳ درستی‌سنجی کارایی مدل همادی در پیش‌بینی بارش ماهانه

دارد که این موضوع می‌تواند ناشی از ضعف مدل‌های عددی در پیش‌بینی بارش‌های بهاره باشد که اغلب به‌صورت همرفتی و کوچک‌مقیاس هستند؛ بنابراین مقادیر دو نمایه MBE و RMSE می‌تواند متأثر از مقادیر بارش ماهانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه باشد. وقوع بارش کمتر به معنای خطای کمتر است، اما خطای کمتر همیشه نشان‌دهنده کارایی بیشتر نیست. پس برای قضاوت درباره درستی‌سنجی کلی مدل مورد بررسی بهتر است به دو نمایه NSE و PCC و همچنین مقادیر حاصل از جدول توافقی رجوع شود.

بر اساس جدول ۵ که نتایج درستی‌آزمایی مدل را در پیش‌بینی دسته صحیح بارشی (زیرنرمال، نرمال و بیش از نرمال) در دوره ۲۰۱۹-۲۰۰۰ در سطح کشور نشان می‌دهد، به‌طور کلی دقت مدل در کشور برای پیش‌بینی بارش در دسته‌های یادشده در حدود ۵۲ درصد است (بر اساس مقادیر نمایه POD). بیشترین مقادیر کمیت POD مربوط به ماه نوامبر است که دقت ۵۵ درصدی و خطای ۴۵ درصدی را برای این ماه نشان می‌دهد و بیشترین مقادیر HSS (۰/۳۳) نیز مربوط به همین ماه است. پس از آن بیشترین دقت برای ماه ژانویه با POD برابر با ۵۴ درصد، FAR برابر با ۴۶ درصد و HSS به میزان ۰/۳۱ به‌دست آمد. از نظر پیش‌بینی دسته صحیح بارشی، کارایی مدل در ماه آوریل ضعیف‌تر از ماه‌های دیگر است و مقادیر کمیت‌های POD، FAR و HSS برای این ماه برابر با ۴۸ درصد، ۵۲ درصد و ۰/۲۳ است که کمتر از دیگر ماه‌ها است. با توجه به اینکه عدم قطعیت از ویژگی‌های ذاتی مدل‌های پیش‌بینی عددی، به‌ویژه برای متغیر بارش است و هرچه بازه پیش‌بینی طولانی‌تر باشد، عدم قطعیت پیش‌بینی این متغیر هم بیشتر می‌شود، کارایی کلی مدل برای پیش‌بینی ماهانه دسته بارش (زیرنرمال، نرمال و بیش از نرمال) در گستره کشور، مطلوب ارزیابی می‌شود.

شکل ۴ عملکرد مدل مورد مطالعه را در پیش‌بینی بارش ماهانه (دوره اکتبر-آوریل) به تفکیک هر ماه نشان می‌دهد. بر اساس مقادیر سنجه NSE، این مدل همادی کارایی مطلوبی در پیش‌بینی بارش در ماه‌های اکتبر (۰/۵۶)، ژانویه (۰/۴۹)، نوامبر (۰/۴۷) و دسامبر (۰/۴۶) دارد. بر اساس مقادیر PCC هم مناسب‌ترین عملکرد مربوط به ماه‌های اکتبر (۰/۷۷)، نوامبر (۰/۷۳)، ژانویه و فوریه (۰/۶۸) است. مقادیر سنجه MBE هم نشان می‌دهد کارایی این مدل در ماه‌های آوریل (۱/۵ میلی‌متر)، نوامبر (۲ میلی‌متر) و اکتبر (۲/۳ میلی‌متر) بهتر از دیگر ماه‌ها بوده است. بر اساس سنجه RMSE، عملکرد مدل در ماه آوریل بهتر از دیگر ماه‌ها بوده است و بیشترین خطا هم مربوط به ماه مارس (RMSE=۴۶۱) است (شکل ۴). به‌طور کلی می‌توان گفت با توجه به مقادیر سنجه‌های آماری و بازه زمانی پیش‌بینی، عملکرد مدل همادی مورد بررسی پذیرفتنی است. البته، در ماه‌های آوریل و مارس عملکرد ضعیف‌تری نسبت به سایر ماه‌ها دارد. با توجه به مقادیر دو سنجه MBE و RMSE در ماه آوریل، کارایی مدل در پیش‌بینی بارش در این ماه، مطلوب ارزیابی می‌شود، اما مقادیر دو سنجه NSE و PCC نشان از کارایی ضعیف‌تر مدل در این ماه دارد. کاهش مقادیر خطا (دو سنجه MBE و RMSE) در ماه آوریل می‌تواند ناشی از کاهش مقدار بارش کشور و محدود شدن بارش به نیمه شمالی در این دوره از سال باشد که به کاهش خطای کلی پیش‌بینی‌ها منجر می‌شود؛ زیرا مقادیر بارش در بخشی از ایستگاه‌ها صفر می‌شود و با توجه به اینکه مدل‌های عددی معمولاً در پیش‌بینی عدم وقوع بارش عملکرد خوبی دارند، مقادیر خطا نیز کاهش می‌یابد. البته برای بررسی کارایی کلی مدل در ماه‌های مختلف، در نظر گرفتن سنجه‌های NSE و PCC سبب توصیف بهتر کارایی مدل می‌شود. بر اساس نتایج این دو سنجه، مدل در ماه آوریل کارایی کمتری



شکل ۴. پراش‌نگار و شاخص‌های آماری بارش پیش‌بینی‌شده در دوره ۲۰۱۹-۲۰۲۰ در مقایسه با مقادیر مشاهداتی در ۱۴۵ ایستگاه همدید در همان دوره در دوره بارشی اکتبر-آوریل.

ارائه‌شده در بخش داده‌ها، از پایگاه داده GPCC برای به‌تصویر کشیدن پراکندگی فضایی بارش در دوره اکتبر-آوریل ۲۰۲۰-۲۰۱۹ استفاده شد (شکل ۵)، اما سنجه درستی‌سنجی (همبستگی) بر اساس مقادیر بارش ماهانه مشاهداتی در ۴۰۹ ایستگاه همدید محاسبه شد. نتایج این بخش (شکل‌های ۵ تا ۷) نشان می‌دهد در ماه اکتبر ۲۰۱۹، عمده تمرکز بارش در کشور مربوط به سواحل دریای خزر است و نتایج مدل پیش‌بینی هم به‌خوبی تمرکز بارش در این ماه را در این ناحیه از کشور نشان داده است. مقادیر همبستگی محاسبه‌شده برای این ماه هم در حدود ۰/۸۱ است که برای پیش‌بینی ماهانه عملکرد بسیار مناسبی است (شکل ۷). در ماه نوامبر عمده تمرکز بارش (بر اساس پایگاه داده GPCC) در نواحی سواحل دریای خزر، دامنه‌های زاگرس میانی، بخش‌هایی از جنوب استان آذربایجان غربی و شمال استان کردستان است. همبستگی بین بارش پیش‌بینی‌شده در این ماه با مقادیر مشاهداتی هم ۰/۶۶ است. پیش‌بینی بارش در این ماه عمده تمرکز بارش را برای شمال کشور و دامنه‌های زاگرس میانی نشان می‌دهد که با داده‌های شبکه‌ای مطابقت دارد. داده‌های شبکه‌ای برای غرب کشور بارشی بین ۷۰ تا ۱۰۰ میلیمتر را

جدول ۵. کمیت‌های راستی‌آزمایی استخراج‌شده از جدول توافقی ۳×۳.

ماه/کمیت	POD	FAR	HSS
Oct	۰/۵۳	۰/۴۷	۰/۳
Nov	۰/۵۵	۰/۴۵	۰/۳۳
Dec	۰/۵۲	۰/۴۸	۰/۲۸
Jan	۰/۵۴	۰/۴۶	۰/۳۱
Feb	۰/۵۱	۰/۴۹	۰/۲۶
Mar	۰/۵	۰/۵	۰/۲۵
Apr	۰/۴۸	۰/۵۲	۰/۲۳

۳-۳ اجرای مدل برای یک نمونه عملیاتی (سال ۲۰۲۰-۲۰۱۹)

در ادامه برای ارزیابی کارایی مدل جهت صدور پیش‌بینی ماهانه بارش به‌صورت عملیاتی در گستره کشور، عملکرد آن برای دوره اکتبر-آوریل سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۲۰ به‌عنوان یک نمونه عملیاتی بررسی می‌شود. برای رتبه‌بندی هر عضو از مدل در دوره پیش‌بینی عملیاتی، ابتدا وزن‌دهی هر عضو بر اساس عملکرد آن در دوره ۲۰۰۰-۲۰۱۹ انجام و وزن‌های محاسبه‌شده برای هر عضو مدل همادی در دوره ۲۰۱۹-۲۰۰۰، به ۲۴ عضو مورد استفاده در مدل همادی برای دوره پیش‌بینی عملیاتی تعمیم داده شد. شایان ذکر است در این بخش، با توجه به توضیحات

همبستگی محاسبه شده بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی‌ها هم ۰/۸۲ است که عملکرد مناسب پیش‌بینی‌ها را برای این ماه نشان می‌دهد. عملکرد مدل برای دو ماه مارس و آوریل نسبت به دیگر ماه‌های مورد بررسی (به جز ژانویه) کاهش یافته و ضریب همبستگی بین بارش ماهانه مشاهداتی و پیش‌بینی شده برای این دو ماه به ترتیب ۰/۵۳ و ۰/۷۱ است. بر اساس مقادیر پایگاه GPCC، در برخی از مناطق کشور بارشی بین ۴۰ تا ۷۰ میلیمتر تخمین زده شده است و مقادیر پیش‌بینی شده برای این نواحی در حدود ۱۰۰ میلیمتر است. همچنین گفتنی است مدل در پیش‌بینی مقادیر بارش کم و نزدیک به صفر (نبود بارش) عملکرد مطلوبی داشته است، به گونه‌ای که برای نواحی جنوب شرقی کشور که در بیشتر ماه‌های سال در دوره ۲۰۲۰-۲۰۱۹ بارش ناچیزی به ثبت رسیده است، کارایی خوبی داشته و به درستی نبود بارش یا مقادیر ناچیز بارش را برای این نواحی پیش‌بینی کرده است.

۴ نتیجه گیری

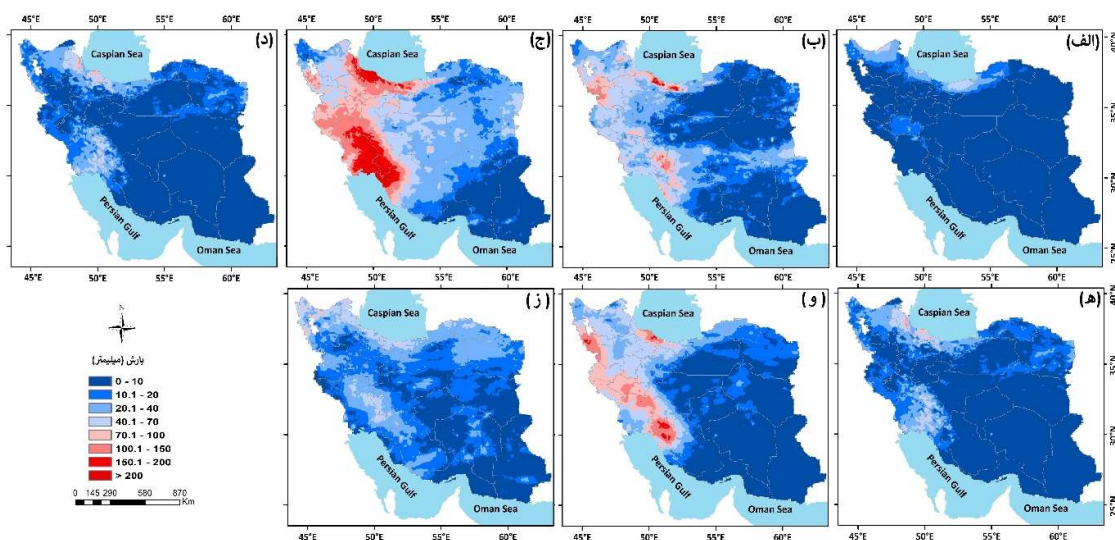
در این مطالعه برای پیش‌بینی بارش ماهانه در ایران، مدلی همادی مبتنی بر مقیاس‌کاهی دینامیکی مدل CFSv.2 تحت مدل WRF توسعه داده شد. با توجه به مقادیر سنج‌های درستی‌سنجی، عملکرد پیش‌بینی‌های ارائه شده با استفاده از مدل همادی مورد بررسی، به ویژه در ماه‌های اکتبر و ژانویه پذیرفتنی است. البته در ماه‌های آوریل و مارس، عملکرد ضعیف‌تری نسبت به سایر ماه‌ها وجود دارد که دلیل آن می‌تواند ناشی از افزایش عدم قطعیت مدل‌های پیش‌بینی عددی در تخمین سامانه‌های همرفتی و کوچک‌مقیاس باشد؛ زیرا بخشی از بارش‌های کشور در دو ماه مذکور، بارش همرفتی است. دقت این مدل در تخمین دسته بارش شامل دسته‌های زیرنرمال (ماه خشک)، نرمال و بیش از نرمال (ماه تر) در دوره ۲۰۰۰-۲۰۱۹ حدود ۵۲ درصد در گستره کشور بوده است. اجرای این

نشان می‌دهد، درحالی‌که مقادیر پیش‌بینی شده بین ۴۰ تا ۷۰ میلیمتر است؛ لذا مدل تقریباً توانسته است الگوی پراکندگی بارش در کشور را برای ماه نوامبر پیش‌بینی کند. البته مقادیر پیش‌بینی شده نسبت به مشاهداتی (GPCC)، به ویژه در غرب و دامنه‌های زاگرس جنوبی اختلاف دارد و کمتر برآورد شده است. در ماه دسامبر سال ۲۰۱۹ بارش چشمگیری برای جنوب غرب کشور و دامنه‌های زاگرس جنوبی به ثبت رسیده است و پایگاه داده GPCC هم آن را به خوبی نشان می‌دهد. مقادیر بارش در برخی از نقاط در جنوب غرب کشور در این ماه بیش از ۲۰۰ میلیمتر بوده و مدل به خوبی توانسته است مقادیر بارش را در این ناحیه از کشور پیش‌بینی کند. همچنین در این ماه مقادیر بارش برای شمال کشور هم چشمگیر بوده است و مدل هم خوب توانسته است مقادیر بارش در این ماه را برای این ناحیه پیش‌بینی کند. ضریب همبستگی بارش پیش‌بینی شده و مشاهداتی در این ماه در ۴۰۹ ایستگاه هم‌دید ۰/۸۵ است که نشان‌دهنده عملکرد مطلوب مدل پیش‌بینی است.

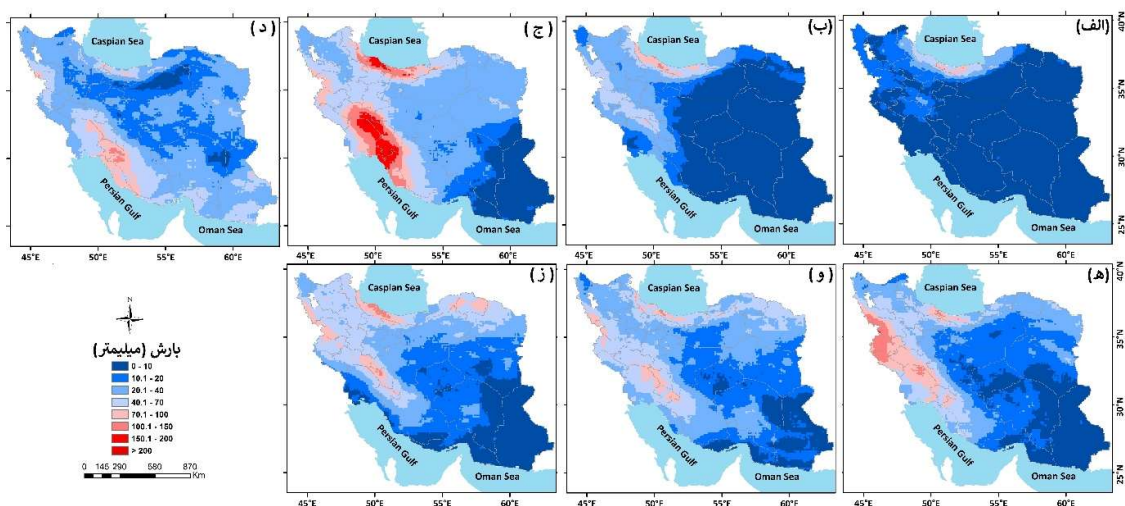
در ماه ژانویه، بر اساس داده‌های GPCC، بارش در کشور اغلب محدود به سواحل جنوب غربی دریای خزر و بخش‌هایی از جنوب غربی کشور است. در این ماه، بارش پیش‌بینی شده در جنوب غرب کشور حدود ۱۰۰ میلیمتر است، اما در داده‌های شبکه‌ای مقادیر کمتری به ثبت رسیده است؛ بنابراین مدل برای برآورد بارش در این ماه عملکرد مطلوبی نداشته است و ضریب همبستگی محاسبه شده بین داده‌های پیش‌بینی شده و مشاهداتی (۰/۳۸) هم گواهی بر این موضوع است. در ماه فوریه تمرکز بارش بیشتر در غرب، جنوب غرب و سواحل جنوب غربی دریای خزر است و بارشی در حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلیمتر برای این نواحی بر اساس داده‌های شبکه‌ای اندازه‌گیری شده است. بارش پیش‌بینی شده هم به خوبی پراکندگی بارش را در این ماه نشان می‌دهد. ضریب

مقادیر بارش مشاهداتی و پیش‌بینی شده برای دوره پیش‌بینی عملیاتی ۰/۶۸ بوده است که حاکی از کارایی پذیرفتنی مدل در پیش‌بینی بارش ماهانه است.

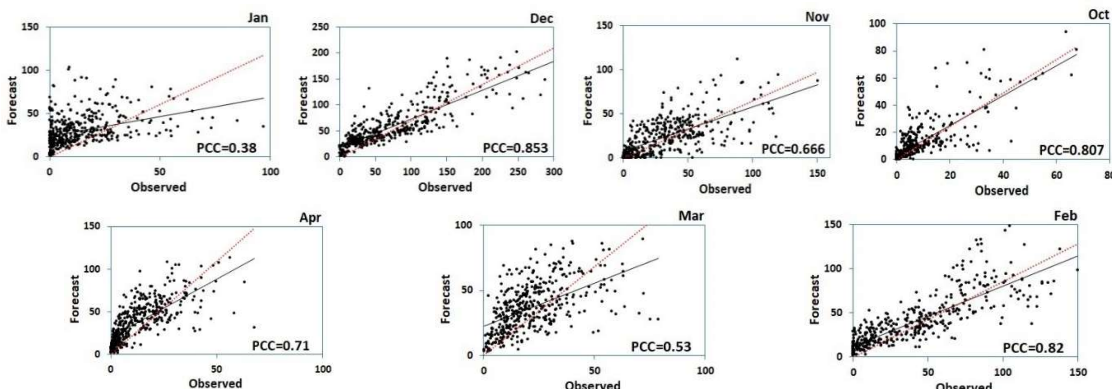
مدل برای پیش‌بینی بارش ماهانه به صورت عملیاتی برای دوره اکتبر-آوریل سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۲۰ نشان می‌دهد مدل توانسته است پراکندگی بارش و مناطق تمرکز بارش در کشور را به خوبی پیش‌بینی کند. متوسط همبستگی بین



شکل ۵. مقادیر بارش اندازه‌گیری شده پایگاه داده GPCC در دوره اکتبر-آوریل سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۲۰ در ماه‌های (الف) اکتبر (ب) نوامبر (ج) دسامبر (د) ژانویه (ه) فوریه (و) مارس (ز) آوریل.



شکل ۶. مقادیر بارش پیش‌بینی شده بر اساس مدل همادی در دوره اکتبر-آوریل سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۲۰ در ماه‌های (الف) اکتبر (ب) نوامبر (ج) دسامبر (د) ژانویه (ه) فوریه (و) مارس (ز) آوریل.



شکل ۷. پراش‌نگار و ضریب همبستگی مقادیر ثبت‌شده در داده‌های بارش ماهانه مشاهداتی در ۴۰۹ ایستگاه همدید در مقایسه با مقادیر پیش‌بینی‌شده با مدل همادی در دوره اکتبر-آوریل سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۲۰.

همادی مبتنی بر مدل WRF/CFSv.2 برای پیش‌بینی بارش ماهانه می‌تواند به تولید پیش‌بینی‌هایی با دقت پذیرفتنی منجر شود. این موضوع با مطالعه ترناری و همکاران (۲۰۱۸) و واندرز و وود (۲۰۱۶) نیز همخوانی دارد که نشان دادند پیش‌بینی همادی، نتایج بهتری را نسبت به پیش‌بینی‌های تک‌عضوی و مبتنی بر داده‌های زمان واقعی برای پیش‌بینی پدیده‌های اقلیمی ارائه می‌دهد. برای بهینه‌سازی پیش‌بینی‌های حاصل از این مدل همادی پیشنهاد می‌شود مطالعه‌ای برای حساسیت‌سنجی مدل WRF نسبت به پارامترسازی فیزیکی جهت پیش‌بینی بارش ماهانه در کشور انجام و بهترین پیکربندی‌ها برای پیش‌بینی بارش ماهانه معرفی شود. همچنین برای بهینه‌سازی پیش‌بینی‌های بارش حاصل از این مدل همادی، بهتر است روش‌های مختلف پس‌پردازش آماری بررسی و مناسب‌ترین و همچنین عملیاتی‌ترین روش‌ها معرفی شوند.

منابع

دارند، م، زندکریمی، س،، ۱۳۹۵، ارزیابی دقت داده‌های بارش مرکز اقلیم‌شناسی بارش جهانی بر روی ایران: مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۰(۳)، ۹۵-۱۱۳.
 دهبان، ح، ابراهیمی، ک.ک، عراقی نژاد، ش.، بدرافشان،

گفتنی است در رخداد بارش سنگین دسامبر سال ۲۰۱۹ که به وقوع سیلاب در نواحی جنوب غربی کشور منجر شد، مدل به‌خوبی وقوع بارش‌های حدی را در این ناحیه برای این ماه پیش‌بینی کرده است که این موضوع نشان‌دهنده کارایی مناسب این مدل برای پیش‌بینی وقوع بارش‌های سنگین در مقیاس زمانی ماهانه است و برای پیش‌بینی سیلاب و مدیریت بهینه منابع آب هم می‌توان از آن استفاده کرد. همچنین مدل در پیش‌بینی مقادیر بارش نزدیک به صفر (نبود بارش) هم عملکرد مطلوبی داشته به‌طوری‌که برای نواحی جنوب شرقی کشور که در بیشتر سال در دوره ۲۰۱۹-۲۰۲۰ بارش ناچیزی به ثبت رسیده است، به‌خوبی عمل کرده و به‌درستی نبود بارش یا مقادیر ناچیز بارش را برای این نواحی پیش‌بینی کرده است. شایان ذکر است در برخی از سامانه‌های بارشی، مقادیر بارش کمتر یا بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی شده است. در مدل‌سازی عددی پیش‌بینی وضع هوا، وجود چنین عدم قطعیت‌هایی با توجه به ماهیت ناپایدار سامانه‌های جوئی و همچنین مقیاس زمانی پیش‌بینی که یک ماهه است و در ابتدای هر ماه، وضعیت بارش یک ماه آینده پیش‌بینی می‌شود، اجتناب‌ناپذیر است.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد استفاده از پیش‌بینی

- precipitation simulation over Ghana: *Advances in Meteorology*, **2017**, 1-15.
- Alizadeh-Choobari, O., 2019, Dynamical downscaling of CSIRO-Mk3.6 seasonal forecasts over Iran with the regional climate model version 4: *International Journal of Climatology*, **39**(7), 3313-3322.
- Chen, F., Liu, C., Dudhia, J., and Chen, M., 2014, A sensitivity study of high-resolution regional climate simulations to three land surface models over the western United States: *Journal of Geophysical Research*, **119**, 7271-7291.
- Darand, M., and Khandu, K., 2020, Statistical evaluation of gridded precipitation datasets using rain gauge observations over Iran: *Journal of Arid Environments*, **178**, 104172.
- Fallah, A., Rakhshandehroo, G. R., Berg, P. O. S., and Orth, R., 2020, Evaluation of precipitation datasets against local observations in southwestern Iran: *International Journal of Climatology*, **40**(9), 4102-4116.
- Grell, G. A., and Freitas, S. R., 2014, A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling: *Atmospheric Chemistry and Physics*, **14**, 5233-5250, doi:10.5194/acp145233-2014.
- 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*, **132**(1), 103-120.
- Hong, S. Y., Noh, Y., and Dudhia, J., 2006, A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes: *Monthly Weather Review*, **134**, 2318-2341.
- Infanti, J. M., and Kirtman, B. P., 2014, Southeastern US rainfall prediction in the North American multi-model ensemble: *Journal of Hydrometeorology*, **15**(2), 529-550.
- Janjic, I. Z., 1994, The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes: *Monthly Weather Review*, **122**, 927-945.
- Kain, J. S., and Fritsch, J. M., 1993, Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme, in *The representation of cumulus convection in numerical models* (165-170): American Meteorological Society, Boston, MA.
- Kessler, E., 1969, On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations, in *Meteorological Monographs*,
- ج، ۱۳۹۸، ارزیابی دقت مدل‌های NMME در پیش‌بینی بارش ماهانه (مطالعه موردی: حوضه سفیدرود): *هواشناسی کشاورزی*، **۷**(۱)، ۳-۱۲.
- دهبان، ح.، ابراهیمی، ک.، عراقی نژاد، ش.، بذرافشان، ج.، ۱۳۹۹، توسعه سامانه پیش‌بینی چندمدلی بارش ماهانه در حوضه آبریز سفیدرود: *تحقیقات آب و خاک ایران*، **۵۱**(۸)، ۱۸۸۱-۱۸۹۳.
- رضازاده، م.، مرادیان، ف.، قادر، س.، ۱۳۹۸، بررسی عملکرد سامانه همادی چندفیزیکی مدل میان‌مقیاس WRF جهت شبیه‌سازی بارش در مناطق مرکزی ایران: *مجله ژئوفیزیک ایران*، **۱۴**(۱)، ۱۳-۳۸.
- قاضی میرسعید، س. م.، ذوالجودی، م.، سیفری، ز.، ۱۳۹۲، بررسی صحت و دقت طرح‌واره‌های مختلف مدل WRF و ارزیابی پیش‌بینی بارش در ایران زمین: *فصلنامه تحقیقات جغرافیایی*، **۲۸**(۲)، ۱۹۴-۲۱۰.
- قصابی، ز.، کمالی، غ.، مشکوتی، ا. ح.، حجام، س.، جواهری، ن.، ۱۳۹۳، ارزیابی عملکرد طرح‌واره‌های پارامترسازی خردفیزیکی و همرفت مدل WRF برآورد بارش در حوضه آبریز کارون در جنوب غرب ایران: *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، **۱۹**، ۱-۱۰.
- مرادی، ش.، جوانمرد، س.، قادر، س.، آزادی، م.، قزایلو، م.، ۱۳۹۹، مؤثرترین طرح‌واره در بهبود عملکرد مدل WRF جهت پیش‌بینی بارش در منطقه شمال غرب ایران - مطالعه موردی: *هواشناسی و علوم جو*، **۳**(۳)، ۱۸۸-۲۰۰.
- نجفی، ح.، مساح بوانی، ع. ر.، ایران نژاد، پ.، رابرتسون، ا.، ۱۳۹۶، کاربست مدل‌های همادی آمریکای شمالی در پیش‌بینی فصلی بارش گستره ایران: *تحقیقات منابع آب ایران*، **۱۳**(۴)، ۲۸-۳۸.
- Agyeman, R. Y. K., Annor, T., Lamptey, B., Quansah, E., Agyekum, J., and Tiekou, S. A., 2017, Optimal physics parameterization scheme combination of the weather research and forecasting model for seasonal

- 32: American Meteorological Society.
- Kessler, E., 1995, On the continuity and distribution of water substance in atmospheric circulations: *Atmospheric Research*, **38**(1-4), 109-145.
- Khan, M. Z. K., Sharma, A., and Mehrotra, R., 2017, Global seasonal precipitation forecasts using improved sea surface temperature predictions: *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, **122**(9), 4773-4785.
- King, A. D., Hudson, D., Lim, E. P., Marshall, A. G., Hendon, H. H., Lane, T. P., and Alves, O., 2020, Sub-seasonal to seasonal prediction of rainfall extremes in Australia: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **146**(730), 2228-2249.
- Kirtman, B. P., Min, D., Infanti, J. M., et al., 2014, The North American multimodel ensemble: phase-1 seasonal-to-interannual prediction; phase-2 toward developing intraseasonal prediction: *Bulletin of the American Meteorological Society*, **95**(4), 585-601.
- Lin, Y. L., Farley, R. D., and Orville, H. D., 1983, Bulk parameterization of the snow field in a cloud model: *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **22**, 1065-1092.
- Mariotti, A., Baggett, C., Barnes, E. A., et al., 2020, Windows of opportunity for skillful forecasts subseasonal to seasonal and beyond: *Bulletin of the American Meteorological Society*, **101**(5), E608-E625.
- Nakanishi, M., and Niino, H., 2004, An improved Mellor-Yamada level-3 model with condensation physics: Its design and verification: *Boundary-Layer Meteorology*, **112**(1), 1-31.
- Nassaj, B. N., Zohrabi, N., Shahbazi, A. N., and Fathian, H., 2022, Evaluating the performance of eight global gridded precipitation datasets across Iran: *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, **98**, 101297.
- Pennelly, C., Reuter, G., and Flesch, T., 2014, Verification of the WRF model for simulating heavy precipitation in Alberta: *Atmospheric Research*, **135-136**, 172-179.
- 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 pp.
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., et al., 2014, The NCEP climate forecast system version 2: *Journal of Climate*, **27**(6), 2185-2208.
- Sangelantoni, L., Ricchi, A., Ferretti, R., and Redaelli, G., 2021, Dynamical downscaling in seasonal climate forecasts: Comparison between RegCM-and WRF-based approaches: *Atmosphere*, **12**(6), 757.
- Serrano-Notivol, R., and Tejedor, E., 2021, From rain to data: A review of the creation of monthly and daily station-based gridded precipitation datasets: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, **8**(6), e1555.
- Singh, J., Yeo, K., Liu, X., Hosseini, R., and Kalaganam, J. R., 2015, Evaluation of WRF model seasonal forecasts for tropical region of Singapore: *Advances in Science and Research*, **12**(1), 69-72.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., et al., 2019, A description of the advanced research WRF model version 4: National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA, **145**, 145.
- Tiedtke, M., 1989, A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models: *Monthly Weather Review*, **117**, 177-1800.
- Toth, Z., and Kalnay, E., 1997, Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method: *Monthly Weather Review*, **125**, 3297-3319.
- Trenary, L., DelSole, T., Tippett, M. K., and Pegion, K., 2018, Monthly ENSO forecast skill and lagged ensemble size: *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **10**(4), 1074-1086.
- Vitart, F., 2014, Evolution of ECMWF sub-seasonal forecast skill scores: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **140**(683), 1889-1899.
- Wanders, N., and Wood, E. F., 2016, Improved sub-seasonal meteorological forecast skill using weighted multi-model ensemble simulations: *Environmental Research Letters*, **11**(9), 094007.
- Wang, B., Lee, J. Y., Kang, I. S., et al., 2009, Advance and prospectus of seasonal prediction: assessment of the APCC/CLIPAS 14-model ensemble retrospective seasonal prediction (1980-2004): *Climate Dynamics*, **33**(1), 93-117.
- Zhao, T., Zhang, Y., and Chen, X., 2019, Predictive performance of NMME seasonal forecasts of global precipitation: A spatial-temporal perspective: *Journal of Hydrology*, **570**, 17-25.

Forecasting of monthly precipitation based on ensemble approach using CFSv2-WRF model over Iran (case study: October 2019 to April 2020)

Mohammad Saeed Najafi^{1*}, Hossein Dehban² and Ashkan Farokhnia³

¹ Assistant Professor, Water Research Institute (WRI), Tehran, Iran

² Research Expert, Water Research Institute (WRI), Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Department of Energy, Faculty of New Sciences and Technologies, Graduate University of Advanced Technology (GUAT), Kerman, Iran

(Received: 30 June 2022, Accepted: 05 September 2022)

Summary

Skill assessment of global weather forecasting systems in different regions and time scales can not only improve the performance of the models based on the use of appropriate parameters for modeling or methods for post-processing, but also increase our understanding about performance of forecasting models in regions and different time scales. Accurate precipitation forecasts can play an important role in water resources management as well as reduce damages caused by heavy rainfall.

In this study, we assess the use of the Weather Research and Forecasting (WRF) model to downscale NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) atmospheric reanalysis for generating a monthly precipitation forecast over Iran. The WRF model is configured with two-way nested domains of 60-20 km horizontal resolution. It is used to produce precipitation forecasts based on four different configurations and six initial conditions of CFSv.2 data (totally 24 members) for October-April precipitation over the period 2000-2019 (as hindcast). Performance of ensemble members was evaluated according to the Kling-Gupta-Efficiency (KGE) in comparison with 145 meteorological stations over Iran. Each member has a rating of 1 to 24. The weighted average method was used to calculate the average precipitation obtained from 24 members. To evaluate the performance of WRF-CFSv.2 ensemble model in monthly precipitation forecast, we used some criteria such as False Alarms Rate (FAR), Proportion Correct (PC), and Heidke Skill Score (HSS) for the verification of categorical forecast and Root Mean Square Error (RMSE), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Pearson Correlation Coefficient (PCC) and Mean Bias Error (MBE). The results showed that the average values of NSE, RMSE, MBE and PCC of ensemble model for hindcast were 0.46, 365, -5.7 and 0.67, respectively. Categorical indices indicated that the model skill in forecast of each precipitation class (below normal- less than 33rd percentile, normal- between 33rd and 66rd percentiles, above normal- greater than 66rd percentile) has an accuracy of 52%. Evaluation of the efficiency of the model for a test period (October-April precipitation over the period 2019-2020) shows that the model is able to forecast the distribution of monthly precipitation over Iran. In this case study, the results show that the forecasted monthly precipitation has a positive correlation (PCC = 0.68) with the observations. The results suggest that the WRF-CFSv.2 ensemble forecast based on 24 members can be useful for flood forecasting and water resources management, although the amount of precipitation forecast has bias in some precipitation systems.

Keywords: Monthly forecast, precipitation, WRF, CFSv.2, ensemble model

*Corresponding author:

ms.najafi@wri.ac.ir