

Investigate the efficiency of the probabilistic forecasting model of seasonal precipitation variation over Iran

Mohammad Saeed Najafi^{1*}, Hossein Dehban²

¹ Department Member of Water Research Institute (WRI), Email: ms.najafi@wri.ac.ir

² Research Expert of Water Research Institute (WRI)

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 2023-11-22
Accepted: 2023-12-10

Keywords:
Probabilistic forecasting
Ensemble model
Seasonal precipitation
statistical metrics
Iran

ABSTRACT

This study evaluates the performance of an ensemble framework using the Weather Research and Forecasting (WRF) model for probabilistic seasonal precipitation forecasts. In this study, two types of data were used: a) The meteorological initial and boundary conditions come from the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) data. b) Precipitation data from the Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) dataset used as observational data over Iran. The ensemble model was designed based on a one-way double-nested (60-parent domain and 20-nested Km resolutions) modeling system using Weather Research and Forecasting (WRF) version 4.2 customized over Iran to downscale the second version of the NCEP Climate Forecast System (CFSv2). The results showed that precipitation forecast at seasonal time scale in Iran has high uncertainty. Although probabilistic forecasts can increase the efficacy of seasonal forecasts more than deterministic, the uncertainty of these forecasts is still high. Additionally, the downscaling of the CFS.v2 model by WRF and using multiple initial conditions and model physics can increase the accuracy of seasonal forecasts. The spatial distribution of the forecast accuracy of the ensemble model is dependent on the spatial distribution of precipitation over Iran. Another factor that affects the model's accuracy is the forecast lead time dependent especially at 2-month and 3-month forecast lead times. The results showed that the model has high uncertainty in the east and southeast of Iran. The implementation of this model for an operational period showed that although the model can forecast the spatial variation of rainfall over Iran up to a three-month lead time, probabilistic forecasting cannot significantly reduce the uncertainty of the model in a seasonal time scale. The ensemble model tends to overestimate precipitation in the third lead time.

Cite this article: Najafi, M.S., Dehban, H. (2024). Investigating spatial-temporal changes in the average snowmelt of cold seasons in the northwestern region of Iran. *Journal of the Climate Change Research*, 4 (16), 63-76.



©The author(s)

Publisher: Golestan University

Doi: 10.30488/CCR.2023.426428.1178



نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی



فصلنامه علمی دانشگاه گلستان

سال چهارم / شماره مسلسل شانزدهم / زمستان ۱۴۰۲ / صفحات: ۷۶-۶۳

بررسی کارایی مدل پیش‌بینی احتمالاتی تغییرات فصلی بارش در ایران

محمدسعید نجفی^{۱*}، حسین دهبان^۲

^۱ عضو هیات علمی پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب، رایانامه: ms.najafi@wri.ac.ir

^۲ پژوهشگر پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب

اطلاعات مقاله چکیده

این مطالعه به بررسی کارایی یک مدل همادی در مقیاس زمانی فصلی برای تولید پیش‌بینی احتمالاتی با استفاده از مدل WRF جهت پیش‌بینی بارش در ایران پرداخته شده است. این مدل از اجرای مدل WRF با ۴ پیکربندی مختلف و با ۱۶ حالت شرایط اولیه و مرزی مختلف حاصل از پیش‌بینی‌های مدل CFSv.2 تشکیل شده است و مجموعاً دارای ۶۴ عضو است. صدک‌های ۳۳ و ۶۶ مبنای بارش‌های زیر نرمال، نرمال و بالای نرمال بوده و دوره تاریخی اجرای مدل سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ است. دوره عملیاتی جهت بررسی کارایی مدل نیز زمستان سال ۲۰۲۰ می‌باشد و سنجه‌های ارزیابی هم دو نمایه ضریب همبستگی و جذر میانگین مجذور خطا است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که پیش‌بینی بارش در مقیاس فصلی در ایران دارای عدم قطعیت بالایی است و ارائه پیش‌بینی‌ها به صورت احتمالاتی هرچند می‌تواند از کارایی بیشتری نسبت به پیش‌بینی قطعی برخوردار باشد اما همچنان دارای عدم قطعیت است. توزیع فضایی خطای پیش‌بینی مدل در دوره تاریخی وابسته به پراکندگی مکانی بارش و فاصله از مبدأ زمانی پیش‌بینی است، به طوری که در پیش‌دید اول کارایی مدل بهتر از پیش‌دید دوم و سوم است و از طرف دیگر در شرق و جنوب شرق کشور مدل از عدم قطعیت بالاتری نسبت به نواحی دیگر کشور برخوردار است. پیاده‌سازی این مدل برای یک دوره عملیاتی نشان داد که هرچند مدل می‌تواند تغییرات فضایی بارش در کشور را در سه پیش‌دید مورد بررسی پیش‌بینی نماید اما پیش‌بینی احتمالاتی هم نمی‌تواند به میزان قابل توجهی از عدم قطعیت مدل‌های عددی در پیش‌بینی فصلی بارش را کاهش دهد.

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۹/۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۹/۱۹

واژه‌های کلیدی:
پیش‌بینی احتمالاتی
مدل همادی
بارش فصلی
سنجه‌های آماری
ایران

استناد: نجفی، محمدسعید؛ دهبان، حسین. (۱۴۰۲). بررسی کارایی مدل پیش‌بینی احتمالاتی تغییرات فصلی بارش در ایران.

نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۴ (۱۶)، ۶۳-۷۶.

Doi: 10.30488/CCR.2023.426428.1178

ناشر: دانشگاه گلستان

© نویسندگان.



مقدمه

در یک طبقه‌بندی توسط انجمن هواشناسی ایالات متحده، پیش‌بینی وضع هوا تا یک بازه سه روز را پیش‌بینی کوتاه‌مدت، ۳ تا ۷ روز را پیش‌بینی میان‌مدت و بیش از ۷ روز را بلندمدت دسته‌بندی کرده است (Frnda et al., 2022). پیش‌بینی فصلی را می‌توان در دسته پیش‌بینی‌های اقلیمی قرار داد که یک بازه ۱ تا ۱۲ ماه را پوشش می‌دهد. ارائه پیش‌بینی‌های فصلی قابل اتکا از وضعیت جو امری ضروری برای تصمیم‌گیری، مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب، انرژی و همچنین مدیریت آسیب‌های احتمالی از مخاطرات جوی است، به‌گونه‌ای که پیشرفت در پیش‌بینی فصلی و بهینه‌سازی آن با استفاده از ریزمقیاس‌گردانی دینامیکی می‌تواند منافع اقتصادی و اجتماعی قابل توجهی به همراه داشته باشد (Alizadeh, 2019). همچنین داشتن پیش‌بینی‌های معتبر فصلی بارندگی، با توجه به اهمیت آن در مؤلفه‌های بیابان آب، با استفاده از الگوی اقلیمی منطقه‌ای می‌تواند در مدیریت منابع آب و همچنین کاهش خسارات ناشی از باران‌های سنگین بر کشاورزی، صنعت و شرب و همچنین مدیریت خشکسالی مؤثر باشد (Agyeman, 2017) و پیش‌بینی آن حتی در مقیاس چشم‌اندازهای بلندمدت اقلیمی می‌تواند منجر به ارائه راهکارهای مناسب برای فرصت‌ها و تهدیدهای حاصل از تغییر الگوی بارش فصلی در مقیاس بلندمدت باشد (Le et al., 2023). امروزه به‌خوبی آشکار شده است که تغییرات نسبتاً کند در رطوبت خاک، پوشش برف، میزان یخ دریا و دمای سطح دریا نسبت به پارامترهای مختلف جوی، باعث شکل‌گیری پیش‌بینی‌های بلندمدت (فصلی) آب و هوایی شده است. در واقع با آگاهی از تکامل و تعامل پویای این مؤلفه‌ها که به عنوان شرایط مرزی برای شبیه‌سازی شرایط جو عمل می‌کنند و معمولاً بسامد نسبتاً اندکی دارند، پیش‌بینی فصلی آب و هوا توسعه یافته است (Neelin, 2011).

به‌طور کلی روش و مدل‌های زیادی برای پیش‌بینی متغیرهای هواشناسی و اقلیمی و به همراه آن برای

پیش‌بینی بارش و متغیرهای هیدرولوژیکی وجود دارد. این مدل‌ها شامل مدل‌های آماری (مانند مدل‌های رگرسیونی، سری زمانی، شبکه عصبی و ...)، مدل‌های تجربی و مدل‌های دینامیکی-عددی هستند. بسیاری از پژوهش‌ها، مدل‌های احتمالاتی و استفاده از رویکردهای آماری مثل رگرسیون چند متغیره (Bierkens and Van Beek, 2009) و برخی دیگر از مدل‌های عددی و یا به عبارتی مدل‌های دینامیکی را برای پیش‌بینی‌های میان‌مدت بارش و متغیرهای هیدرولوژیکی مثل جریان رودخانه استفاده کرده‌اند (Wood et al, 2008). بسیاری از پیش‌بینی‌های فصلی مبتنی تغییرات سیگنال‌های بزرگ‌مقیاس جوی قابل پیش‌بینی مانند دمای سطح آب دریا، الگوهای بزرگ‌مقیاس گردش جو و شرایط اولیه سطح زمین است و بسیاری از پژوهشگران معتقدند که در نظر گرفتن سیگنال‌های جوی در پیش‌بینی‌های اقلیمی، باعث بهبود پیش‌بینی‌های فصلی اقلیمی و به دنبال آن، پیش‌بینی فصلی هیدرولوژیکی می‌شود (Lang et al., 2014).

به‌طور کلی مطالعات در زمینه ارائه روش‌های مختلف برای پیش‌بینی‌های میان‌مدت و فصلی دارای سابقه طولانی مدت است. در مطالعه (Rishnamurti et al., 1999) از یک روش چندمدلی فوق‌گروهی برای بهبود پیش‌بینی‌های فصلی و اقلیمی استفاده شده است. آنها از روش رگرسیون چندگانه برای تعیین ضرایب بین پیش‌بینی چند مدلی و مشاهدات استفاده کرده و نشان دادند روش چند مدلی مورد استفاده، بسیار بهتر از مدل‌های انفرادی عمل می‌کند. (Yun et al., 2003) یک روش گروهی چند مدلی بهبود یافته به وسیله روش‌های پس‌پردازش آماری را برای پیش‌بینی‌های فصلی ارائه می‌دهند. در این مطالعه روشی پیشنهاد گردید تا تعیین ضرایب رگرسیون که مبین وزن هر مدل در روش چندمدلی است، دقیق‌تر شود و در نتیجه، پیش‌بینی ارائه شده دقیق‌تر خواهد بود (Infanti et al., 2014) به بررسی پیش‌بینی‌های فصلی بارش در جنوب شرق آمریکا به کمک مدل‌های

متفاوت جوی در دوره ۱۹۸۱ تا سال ۲۰۰۷ و پس‌پردازش آماری برون‌داد این مدل روی هفت ایستگاه استان خراسان رضوی پرداخته و چشم‌انداز فصلی بارش استان را بر اساس نتایج این مدل پیش‌بینی نمودند. در این مطالعه بر استفاده از مدل‌های چندگانه و گروهی بصورت ترکیبی (بجای استفاده انفرادی از مدل‌ها) برای ارائه نتایج بهتر تاکید شده است. نتایج نشان داد که مدل‌های اصلاح شده با استفاده از روش‌های آماری توان محدودی در ارائه پیش‌بینی میان مدت بارش دارد. نجفی و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی مدل‌های همادی آمریکای شمالی در پیش‌بینی فصلی بارش در گستره‌ی ایران پرداختند و نتایج آن‌ها نشان داد که از نتایج این مدل‌ها می‌توان برای صدور پیش‌بینی‌های فصلی استفاده نمود، زیرا همبستگی میان بی‌هنجاری‌های بارش مدل‌های آمریکای شمالی با داده‌های بارش مشاهداتی در اکثر مناطق کشور ایران بالا بوده است. دهیان و همکاران (۱۳۹۸) به ارزیابی دقت مدل‌های NMME در پیش‌بینی بارش ماهانه در حوضه سفیدرود پرداختند و نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که نتایج مدل‌های NMME به‌تنهایی دارای دقت مناسبی برای صدور پیش‌بینی فصلی نمی‌باشند. اما ترکیب نتایج می‌تواند عملکرد این مدل‌ها را در برآورد ماهانه بارش افزایش دهد. موسوی و همکاران (۱۳۹۸) به ارزیابی عملکرد پیش‌بینی مدل CFSv.2^۴ در حوضه آبریز سد دز پرداختند و نتایج نشان داد که پیش‌دید ماه اول^۵ در بین پیش‌دیدهای ماهانه بهترین عملکرد را از لحاظ پیش‌بینی کمی بارش دارد هر چند برآوردهای آن نسبت به بقیه پیش‌دیدها کم برآوردتر می‌باشد. در بخش دیگری از این مطالعه به ارزیابی پیش‌بینی‌ها بر اساس چندک‌ها به صورت دسته‌های زیرنرمال، نرمال و فرانرمال و بر اساس نمایه‌های ROC_AUC و ROC_score پرداخته شده و نتایج نشان داد که پیش‌بینی‌ها در چندک‌های بارشی زیر ۰/۴ و بالای ۰/۶ عملکرد مطلوبی داشته است و در مقیاس ماهانه، ماه نوامبر با ۰/۸۸، دسامبر

همادی آمریکای شمالی (NMME)^۱ پرداخته‌اند. نتایج این مطالعه نشان داد که نتایج گروهی مدل‌های NMME خطای کمتر و مهارت بیشتری در مقایسه با مدل‌های انفرادی برای پیش‌بینی بارش به‌خصوص در ماه‌های زمستان دارد. در زمینه استفاده از مدل‌های منطقه‌ای به منظور ارائه پیش‌بینی‌های فصلی (Singh et al., 2015) به بررسی قابلیت مدل WRF^۲ به منظور پیش‌بینی متغیرهای مختلف جوی در فصول فعالیت موسمی و فصلی که موسمی‌ها غیرفعال هستند، پرداختند. نتایج نشان داد که این مدل در برآورد متغیرهای دما، تابش، سرعت باد و رطوبت نسبی در دوره فعالیت موسمی‌ها، عملکرد مطلوب و قابل اتکایی دارد. علیزاده (۲۰۱۹) به ریزمقیاس‌گردانی^۳ مدل گردش کلی CSIRO-Mk3.6 به منظور ارائه روشی برای پیش‌بینی فصلی بارش و دما در ایران پرداخته و نتایج نشان داد که این مدل در برخی از مناطق ایران دارای خطای زیادی است که این خطا ناشی از خطایی بوده که در پارامترسازی مدل گردش کلی وجود داشته است و نیاز به بهینه‌سازی پارامترهای آن برای ایران است. (Miller et al., 2021) به ارزیابی کارایی مدل CFSv.2 در پیش‌بینی فصلی بارش در کنیا پرداختند و نتایج آن‌ها نشان داد که کارایی مدل در نواحی مرتفع و ساحلی کنیا پایین بوده و عملکرد مدل در ماه‌ها و فصول مختلف یک الگوی ثابت ندارد و متفاوت است، اما بطور کلی در فصول بارانی عملکرد مدل بهتر بوده است. (Pinheiro and Ouandra, 2023) با استفاده از یک رویکرد همادی و مبتنی بر مدل‌های داده مبنای به توسعه یک مدل برای پیش‌بینی ماهانه بارش در شمال شرقی برزیل پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که ترکیب روش‌های داده مبنای و استفاده از خروجی مدل‌های دینامیکی منجر به تولید نتایج با اطمینان بیشتر برای پیش‌بینی ماهانه بارش می‌شود. در زمینه پیش‌بینی‌های فصلی در داخل کشور، بابائیان و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی عملکرد مدل MRI-CGCM3 برای پیش‌بینی فصلی متغیرهای

4. Climate Forecast System Version 2
5. 1-month-lead

1. North American Multi-Model Ensemble
2. Weather Research and Forecasting model
3. Downscaling

در ابتدا تفکیک افقی داده‌های GPCC با خروجی‌های مدل (۲۰ کیلومتر) هم‌مقیاس گردید (از طریق resampling) و سپس برای تحلیل‌های بعدی استفاده شد.

روش‌ها

پیکربندی مدل عددی پیش‌بینی: در این مطالعه از نسخه ۴/۲ این مدل و برای دو دامنه اجرا گردید. دامنه بزرگ (دامنه مادر) با تفکیک افقی ۶۰ کیلومتر و دامنه کوچکتر (آشیانه اول) با تفکیک افقی ۲۰ کیلومتر انتخاب شد. دامنه دوم به گونه‌ای انتخاب شد که نواحی داخل مرزهای کشور را به‌خوبی پوشش دهد (شکل ۱). برای توسعه مدل همادی پیش‌بینی میان مدت بارش با استفاده از مدل دینامیکی WRF، چهار پیکربندی در نظر گرفته شد (جدول ۱)، که انتخاب این پیکربندی‌ها به‌منظور کاهش عدم قطعیت ناشی از پارامترسازی فیزیکی است. این پیکربندی‌ها توسط نجفی و همکاران (۱۴۰۲) برای پیش‌بینی فصلی بارش در ایران پیشنهاد شده است. همانطور که اشاره شد، مدل CFS روزانه ۴ مرتبه به رزورسانی می‌شود و هر پیش‌بینی دارای ۴ عضو همادی است. بنابراین با توجه به اینکه بازه پیش‌بینی ۳ پیش‌دید است، امکان استفاده از کلیه عضوهای همادی مدل وجود دارد، لذا از هر ۴ عضو همادی مدل CFSv.2 برای استفاده به‌عنوان شرایط مرزی مدل WRF استفاده گردید. همچنین برای شرایط اولیه نیز از داده‌های مدل CFSv.2 برای تاریخ‌های ۲۰ و ۲۵ هر ماه از پیش‌بینی‌های ساعت ۰۰ و برای تاریخ ۳۰ هر ماه از پیش‌بینی‌های ساعت ۰۰ و ۱۲ استفاده شد. دوره تطبیق^۷ مدل برای تاریخ‌های ۲۰ و ۲۵ به ترتیب ۱۰ و ۵ روز و برای تاریخ ۳۰ به ترتیب ۱ روز و ۱۲ ساعت در نظر گرفته شد. بنابراین یک مدل همادی با ۶۴ عضو متشکل از پیکربندی‌های فیزیکی مختلف، شرایط اولیه و مرزی مختلف تشکیل گردید. بازه زمانی پیش‌بینی نیز سه ماه در نظر گرفته شد. در نهایت از ۶۴ عضو به عنوان ورودی مدل احتمالاتی پیش‌بینی بارش و از

۰/۶۶ و ماه مارس ۰/۸، بیشترین نمایه ROC_AUC را به ترتیب در طبقه ۱، ۲ و ۳ داشته‌اند. در این مطالعه به بررسی کارایی اعضای همادی مدل میان مدت CFSv.2 در پیش‌بینی بارش در کشور پرداخته می‌شود.

داده‌ها و روش‌ها

داده‌ها

شرایط مرزی: در این مطالعه برای شرایط مرزی و اولیه اجراهای مدل WRF از داده‌های جهانی CFSv.2 و با تفکیک افقی ۱ درجه برای متغیرهای جوی و ۰/۵ درجه برای متغیرهای سطحی استفاده می‌شود. گام زمانی داده‌های مورد استفاده ۶ ساعته است. این داده‌ها توسط مرکز ملی پیش‌بینی‌های محیطی ایالات متحده (NCEP) روزانه بطور منظم ۴ مرتبه و برای ۴ عضو همادی در روز اجرا و پیش‌بینی‌های آن در عضو ۰۱ یک بازه زمانی ۹ ماهه و برای عضوهای ۰۲، ۰۳ و ۰۴ یک بازه ۳ ماهه را پوشش می‌دهند.

داده‌های مشاهداتی: با توجه به اینکه پراکندگی ایستگاه‌های مشاهداتی بارش در گستره کشور به خوبی نواحی مرتفع و داخلی کشور را پوشش نمی‌دهد و داده‌های مربوط به همه ایستگاه‌های موجود هم در دست رس نبود، همچنین عدم وجود یک پایگاه داده منحصر بارش در کشور که به خوبی تغییرات مکانی بارش را به صورت رقمی تحلیل نماید، در این مطالعه از پایگاه داده GPCC، به عنوان یک پایگاه داده معتبر، برای بررسی بارش ماهانه در کشور و مقایسه نتایج مدل استفاده شد. لازم به توضیح است که در مقیاس ماهانه، عدم قطعیت این پایگاه‌های داده بسیار کمتر از مقیاس روزانه است و در صورت نبود داده‌های ایستگاهی، یک پایگاه داده قابل اتکا برای استفاده به عنوان داده شبه مشاهداتی است. با استناد به مطالعات فلاح و همکاران (۲۰۱۹)، دارند و خاندو (۲۰۲۰) و نساج و همکاران (۲۰۲۱) پایگاه داده GPCC^۶ بهترین عملکرد را در بین پایگاه‌های مختلف برای تخمین بارش ماهانه در ایران دارد. برای استفاده از این داده،

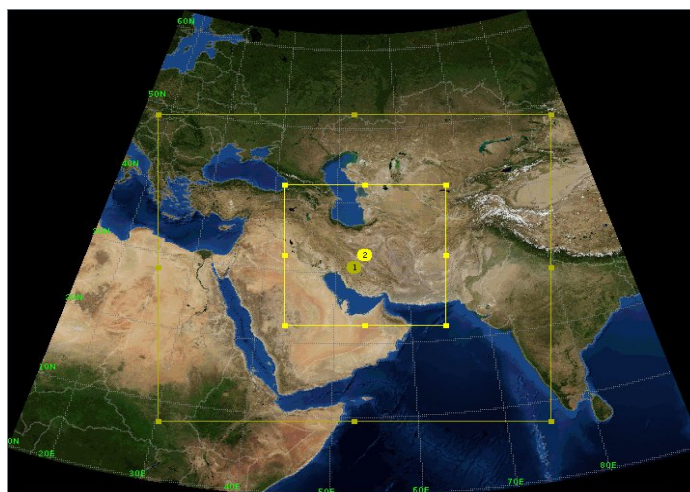
7. Spin-up

6. Global Precipitation Climatology Centre

در رابطه (۱)، P احتمال وقوع و n تعداد کل پیش‌بینی‌ها (۶۴ عضو سامانه همادی) است. در واقع زمانی که مدل برای یک ماه (مثلاً ژانویه ۲۰۲۰) بالاتر از نرمال نشان دهد، یعنی بارش در ماه مورد نظر بالاتر از صدک ۶۶ ام بوده است و صدک ۶۶ ام نیز از بارش ماه ژانویه در دوره ۲۰۱۹-۲۰۰۰ به دست آمده است. مبنای بارش نرمال، بارش بین صدک ۳۳ تا ۶۶ ام و مبنای بارش زیر نرمال بارش‌های کمتر از صدک ۳۳ ام بوده است.

متوسط این اعضا برای پیش‌بینی بی‌هنجاری بارش در زمستان سال ۱۳۹۹ نسبت به دوره تاریخی (۲۰۱۹-۲۰۰۰) استفاده شد. مدل برای دو دوره تاریخی (۲۰۱۹-۲۰۰۰) و عملیاتی (زمستان ۲۰۲۰) اجرا گردید و نتایج برای زمستان ۲۰۲۰ تحلیل گردید. برای استخراج احتمال وقوع بارش در هر ماه تا سه پیش دید در دسته‌های بارش زیرنرمال (B)، نرمال (N) و بالای نرمال (A) از روش (Phan-Van et al., 2018) استفاده شد و احتمال وقوع به صورت زیر محاسبه شد:

$$P(B)=P_B/n; P(A)=P_A/n; P(N)=P_N/n;$$



شکل ۱: دامنه‌های اجرا مدل WRF

جدول ۲: ترکیب پیکربندی‌های مورد استفاده 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

(RMSE) (رابطه ۱) و همبستگی (CC) (رابطه ۲) استفاده گردید.

Root Mean Square Error (RMSE)

Pearson Correlation Coefficient (CC)

درستی‌سنجی: برای درستی‌سنجی نتایج نهایی بارش ماهانه مدل‌سازی شده در مقایسه با مقادیر مشاهداتی، از سنج‌های آماری مجذور مربعات خطا

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (p_i - O_i)^2}{n}} \quad (1)$$

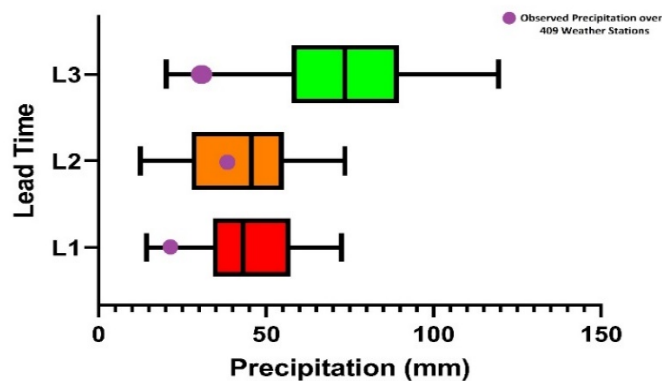
$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (2)$$

یافته‌ها

شکل (۲) نمودار جعبه‌ای بارش پیش‌بینی شده، شامل مقادیر بیشینه و کمینه، چارک اول، سوم و میانه مقادیر متوسط کشوری پیش‌بینی شده بارش برای ۶۴ عضو همادی در سه پیش‌دید مورد مطالعه، نشان می‌دهد که در هر سه پیش‌دید مقادیر مشاهداتی در باند عدم قطعیت مدل قرار گرفته است. یعنی در پیش‌دید اول (L1) متوسط بارش کشوری در ماه ژانویه حدوداً ۲۰ میلی‌متر بوده است و حد کمینه، بیشینه و میانه بارش پیش‌بینی شده توسط اعضای مدل به ترتیب ۱۴/۳، ۷۲/۳ و ۴۳/۱ میلی‌متر بوده است. متوسط بارش پیش‌بینی شده کشور برای پیش‌دید نخست ۴۴ میلی‌متر است و مقادیر مشاهداتی ۲۰ میلی‌متر است که نشان می‌دهد در حالت پیش‌بینی قطعی، مدل در پیش‌بینی بارش در پیش‌دید نخست، بیش برآورد بوده است. در پیش‌دید دوم، مدل عملکرد بهتری نسبت به پیش‌دید اول در پیش‌بینی بارش داشته است. متوسط کشوری بارش در این ماه (فوریه) حدود ۳۸ میلی‌متر است و متوسط بارش پیش‌بینی شده حاصل از مدل همادی ۴۲

میلی‌متر است، که نزدیک به مقادیر مشاهداتی است. در پیش‌دید سوم، با فاصله از مبدأ زمانی پیش‌بینی، بالطبع کارایی مدل نیز کاهش می‌یابد و همانطور که ملاحظه می‌شود حد کمینه و بیشینه پیش‌بینی عضوهای مختلف همادی (۲۰ و ۱۱۹ میلی‌متر) نسبت به پیش‌دیدهای اول و سوم، دارای دامنه تغییرات بالاتری است که نشان دهنده عدم قطعیت بیشتر مدل برای پیش‌دید سوم است. اما نکته قابل توجه، مقادیر مشاهداتی بارش در بازه باند عدم قطعیت مدل قرار گرفته است و نشان می‌دهد که حداقل یک و یا چند عضو توانسته‌اند که مقادیر بارش در پیش‌دید سوم را نزدیک به مقادیر مشاهداتی برآورد نمایند. بنابراین پیش‌بینی قطعی با توجه به عدم قطعیت بالای مدل‌های عددی در پیش‌بینی بارش، نمی‌تواند راهکاری مناسب برای ارائه چشم انداز بارش در بازه میان‌مدت باشد و در صورتی که هدف پیش‌بینی بارش در مقیاس زمانی میان‌مدت باشد، پیش‌بینی احتمالاتی می‌تواند نتایج کاربردی تر را در اختیار برنامه‌ریزان قرار دهد (نمونه چند مطالعه که اشاره شده است که پیش‌بینی احتمالاتی بهتر است).

Range of Iran's Precip. Ave. in 56 Members (mm)



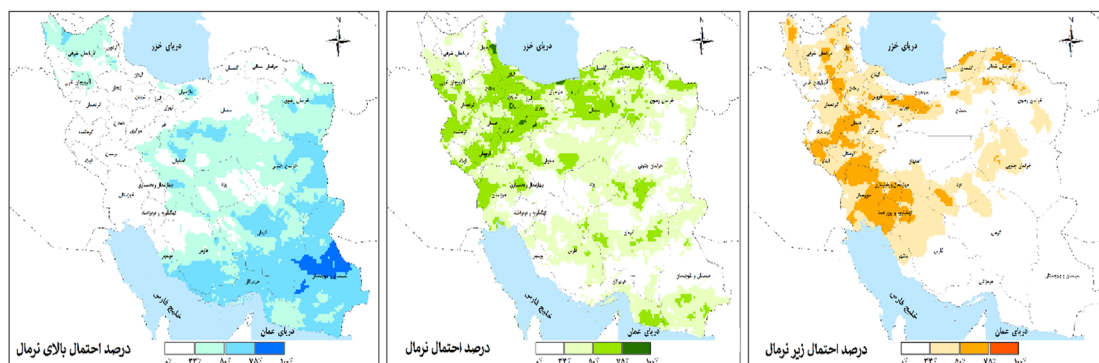
شکل ۲: نمودار جعبه‌ای بارش پیش‌بینی شده توسط ۶۴ عضو همادی در سه پیش‌دید (پیش‌دید اول: ژانویه ۲۰۲۰؛ پیش‌دید دوم: فوریه ۲۰۲۰؛ پیش‌دید سوم: مارس ۲۰۲۰)

همادی، بارش را در این ناحیه بیش از نرمال، پیش‌بینی نموده‌اند. مبنای مقایسه بارش زیر نرمال، نرمال و بالاتر از نرمال، متوسط بارش پیش‌بینی شده توسط هر عضو از ۶۴ عضو همادی در دوره ۲۰ ساله ۲۰۰۰-۲۰۱۹ می‌باشد. در پیش‌دید اول بخش‌هایی از

شکل (۳) پیش‌بینی احتمالاتی بارش در پیش‌دید اول در سه حالت زیرنرمال، نرمال و بالای نرمال را نشان می‌دهد. بر این اساس در پیش‌دید اول (ژانویه ۲۰۲۰) در سواحل جنوبی خلیج فارس و دریای عمان، بیش از ۵۰ درصد از پیش‌بینی‌های حاصل از ۶۴ عضو

نخست زیرنرمال با درصد احتمال وقوع ۳۳ تا ۷۵ درصد پیش‌بینی شده است. در مقابل برای بخش‌های جنوب شرقی کشور، بارش نرمال تا بالاتر از نرمال با احتمال وقوع ۷۵ درصد پیش‌بینی شده است.

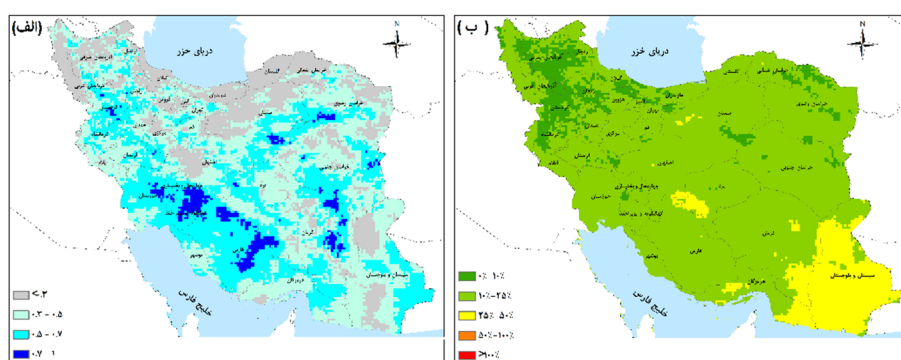
نواحی غربی کشور و دامنه‌های البرز بارش با درصد احتمال بیش از ۵۰ درصد، نرمال تا زیر نرمال پیش‌بینی شده است و در نواحی غربی کشور، به ویژه دامنه‌های زاگرس جنوبی، وضعیت بارش در پیش‌دید



شکل ۳: درصد احتمال وقوع بارش پیش‌بینی شده برای وضعیت‌های زیر نرمال، نرمال و بالای نرمال در ژانویه ۲۰۲۰.

از خطای بالاتری نسبت به سایر نواحی کشور برخوردار است. بنابراین در استفاده عملیاتی از پیش‌بینی‌های احتمالاتی حاصل از این مدل، باید به این نکته توجه کرد که در دوره تاریخی، مدل در نواحی جنوب شرقی کشور دارای خطای حدود ۵۰ درصدی و حتی بیشتر بوده است و باید با احتیاط بیشتری در مورد پیش‌بینی‌های ارائه شده با این الگو در این ناحیه اظهار نظر نمود.

شکل (۴) میزان اطمینان پیش‌بینی‌های ارائه شده برای پیش‌دید اول که محاسبه آن بر اساس مقایسه نتایج پیش‌بینی‌های عضوهای همادی در دوره تاریخی با مقادیر مشاهداتی است، را نشان می‌دهد. براساس نمایه ضریب همبستگی پیرسون، پیش‌بینی‌های ارائه شده برای نیمه جنوبی کشور از دقت بالاتری نسبت به نیمه شمالی کشور برخوردار است، درحالی‌که شاخص RMSE نشان می‌دهد که درصد خطا برای پیش‌بینی‌های ارائه شده در نواحی جنوب شرقی کشور



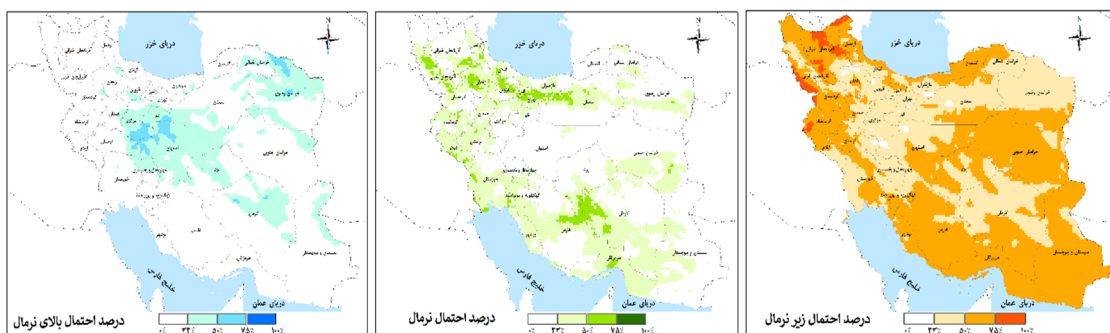
شکل ۴: شاخص ضریب همبستگی (الف) و درصد RMSE (ب) برای پیش‌بینی بارش کشور در ژانویه ۲۰۲۰.

میانی، بارش نرمال و بالاتر از نرمال پیش‌بینی شده است و در دامنه‌های البرز و بخش‌هایی از نوار مرزی غرب کشور، بارش نرمال با درصد احتمال وقوع ۵۰ درصد، پیش‌بینی شده است. در شکل (۶) که کارایی

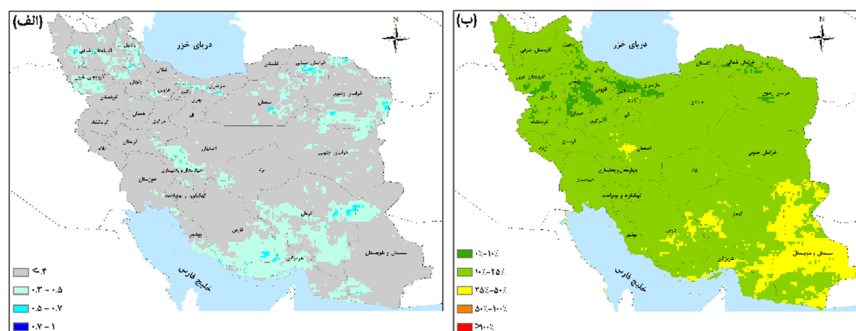
در پیش‌دید دوم (شکل ۵)، بارش در عمده نواحی کشور زیر نرمال با درصد احتمال وقوع بیشتر از ۵۰ درصد پیش‌بینی شده است. تنها در بخش‌هایی از نواحی مرکزی، در دامنه‌های پشت به باد زاگرس

RMSE کارایی مدل در پیش‌دید دوم، در عمده نواحی کشور نسبت به پیش‌دید اول کاهش می‌یابد که با توجه به عدم قطعیت بالای مدل‌های عددی در پیش‌بینی بارش، مخصوصاً در نواحی با اقلیم پیچیده، یک موضوع قابل پیش‌بینی برای پیش‌دید دوم است. بررسی بارش مشاهداتی در پیش‌دید دوم (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که در این ماه نواحی غربی کشور به‌طور متوسط بارش حدود ۴۰ میلی‌متری را دریافت نموده است که بارش نزدیک به نرمال است.

مدل بر اساس نتایج آن در دوره تاریخی بر اساس شاخص همبستگی و RMSE نشان داده شده است، بر اساس نمایه ضریب همبستگی به جز در بخش‌هایی از نواحی جنوبی کشور و برخی نقاط پراکنده، مدل از کارایی پایینی در پیش‌بینی بارش فصلی در عمده نواحی کشور برخوردار بوده است. شاخص درصد خطا هم نشان می‌دهد که به جز در نواحی جنوب شرقی کشور که خطای مدل در حدود ۵۰ درصد است، در سایر نواحی برای پیش‌دید دوم خطا حدوداً ۲۵ درصد است. بنابراین بر اساس دو نمایه ضریب همبستگی و



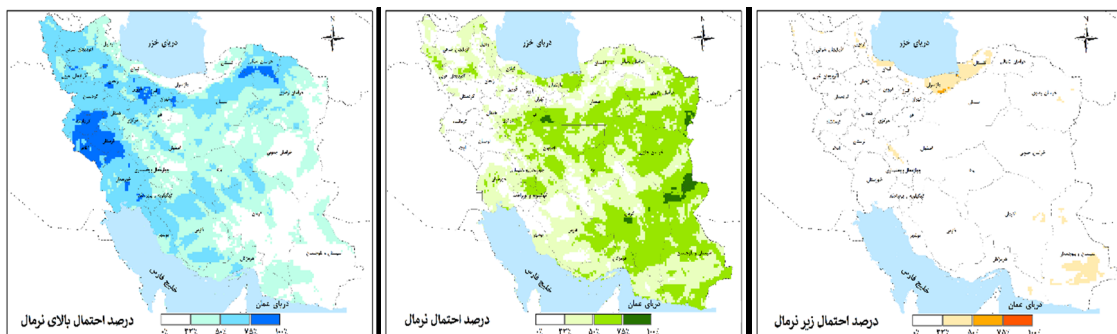
شکل ۵: درصد احتمال وقوع بارش پیش‌بینی شده برای وضعیت‌های زیر نرمال، نرمال و بالای نرمال در فوریه ۲۰۲۰



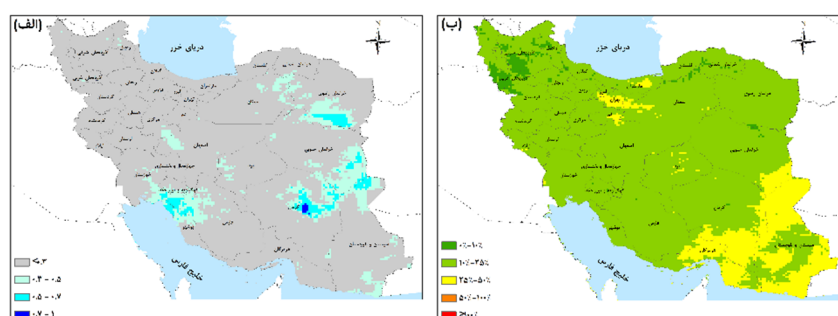
شکل ۶: شاخص ضریب همبستگی (الف) و درصد RMSE (ب) برای پیش‌بینی بارش کشور در فوریه ۲۰۲۰

کشور بهتر از ماه‌های دی و بهمن باشد، هرچند که نمایه همبستگی نشان می‌دهد (شکل ۸) که کارایی مدل برای پیش‌بینی بارش در پیش‌دید سوم، در عمده نواحی کشور بسیار کم است. نمایه درصد خطا (شکل ۸) هم نشان می‌دهد که خطای پیش‌بینی‌های بارش در عمده نواحی کشور، به جز در جنوب شرق، در حدود ۲۵ درصد است.

در پیش‌دید سوم (شکل ۷)، بارش در نیمه غربی کشور بالاتر از نرمال با درصد احتمال وقوع بیش از ۵۰ درصد و در نیمه شرقی کشور، نرمال با درصد احتمال وقوع بیشتر از ۵۰ درصد پیش‌بینی شده است. در دامنه‌های جنوب شرقی دریای خزر هم بارش زیر نرمال با احتمال وقوع کمتر از ۵۰ درصد، پیش‌بینی شده است. بنابراین انتظار می‌رود که در اسفند ماه بارش در



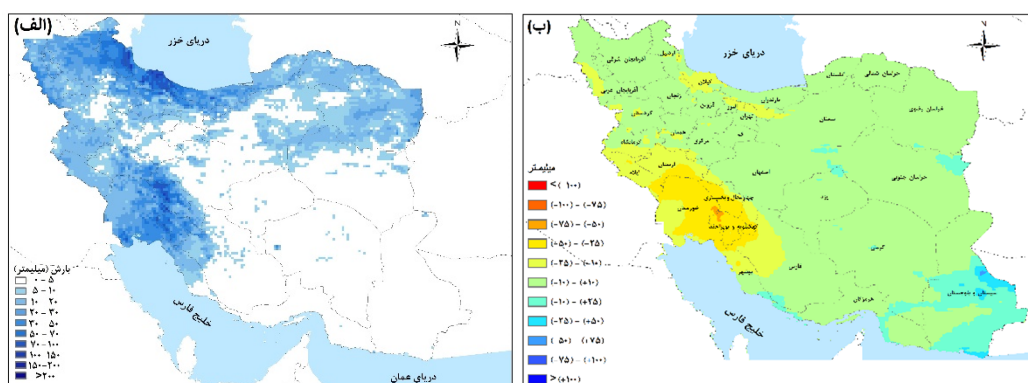
شکل ۷: درصد احتمال وقوع بارش پیش‌بینی شده برای وضعیت‌های زیر نرمال، نرمال و بالای نرمال در مارس ۲۰۲۰



شکل ۸: شاخص ضریب همبستگی (الف) و درصد RMSE (ب) برای پیش‌بینی بارش کشور در مارس ۲۰۲۰

نواحی است. شکل (۹-ب) بی‌هنجاری بارش پیش‌بینی شده نسبت به دوره بلند را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، مدل هم متوسط بارش در کشور را در این ماه کم و به جز در جنوب شرقی کشور که بالاتر از نرمال پیش‌بینی نموده است، در عمده نواحی کشور زیر نرمال تا نرمال پیش‌بینی نموده است. هرچند که همانطور که اشاره شد کارایی مدل در بخش‌های جنوب شرقی کشور با توجه به خطای بالای آن در این ناحیه، پایین است و باید با دقت نتایج آن را در این نواحی تحلیل نمود.

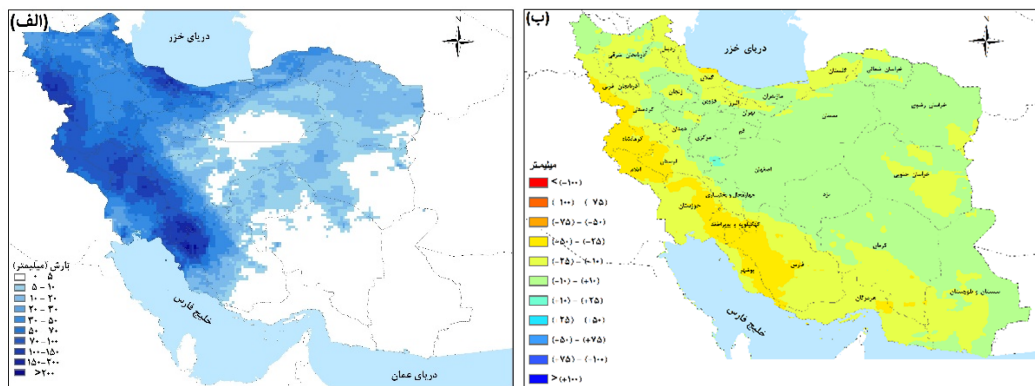
شکل (۹-الف) مقادیر بارش مشاهداتی در کشور در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. در ژانویه به جز نوار شمالی کشور و همچنین دامنه‌های زاگرس و بخش‌هایی از شمال شرقی کشور، در سایر نواحی، بارش قابل توجهی پیش‌بینی نشده است هرچند که پیش‌بینی احتمالاتی برای نواحی جنوب شرقی کشور بارش بیش از نرمال پیش‌بینی نموده است، اما بارش مشاهداتی در این ماه در نواحی مذکور کمتر از ۵ میلیمتر بوده است که نشان دهنده خطای مدل در پیش‌بینی احتمال وقوع بارش در این



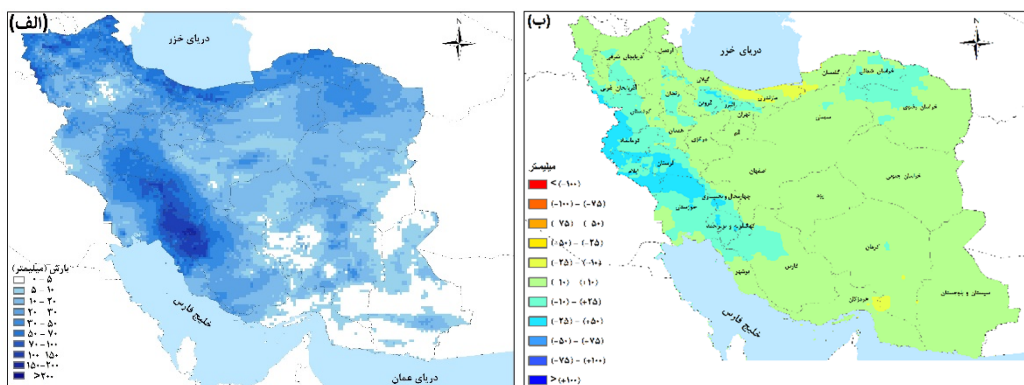
شکل ۹: مقادیر بارش مشاهداتی (الف) و مقدار اختلاف بارش پیش‌بینی شده از میانگین بلندمدت (ب) در ژانویه ۲۰۲۰

و در مرکز و شرق کشور نرمال است. متوسط بارش در ارتفاعات زاگرس در بهمن ماه یک بارش نرمال محسوب می‌شود و در دامنه‌های زاگرس هم بارش بین ۵۰ تا ۷۰ میلی‌متر یک بارش نرمال در این ناحیه محسوب می‌شود. با توجه به مقادیر مشاهداتی بارش ثبت شده برای ماه بهمن و بی‌هنجاری بارش پیش‌بینی شده که غرب و نواحی جنوب کشور را خشک پیش‌بینی نموده است، می‌تواند چشم‌انداز بارش پیش‌بینی شده از دوماه قبل توسط مدل را قابل قبول دانست.

در پیش‌دید دوم، مقادیر بارش مشاهداتی برای کشور نشان می‌دهد (شکل ۱۰-الف) که در نیمه شمالی و غربی کشور، بارش از ۲۰ تا بیش از ۲۰۰ میلی‌متر هم به ثبت رسیده است و در بخش‌های جنوبی و شرقی کشور، بارش کمتر از ۵ میلی‌متر بوده است. پیش‌بینی احتمالاتی نشان داد که بیشتر نواحی کشور بارش نرمال و یا کمتر از نرمال خواهند داشت و بی‌هنجاری بارش پیش‌بینی شده برای ماه فوریه در (شکل ۱۰-ب) هم نشان می‌دهد که بارش در بخش‌های غربی، شمال غرب و جنوبی کشور زیر نرمال



شکل ۱۰: مقادیر بارش مشاهداتی (الف) و مقدار اختلاف بارش پیش‌بینی شده از میانگین بلندمدت (ب) در فوریه ۲۰۲۰.



شکل ۱۱: مقادیر بارش مشاهداتی (الف) و مقدار اختلاف بارش پیش‌بینی شده از میانگین بلندمدت (ب) در مارس ۲۰۲۰.

نموده است و بی‌هنجاری بارش هم نشان می‌دهد که (شکل ۱۱-ب) بارش در پیش‌دید سوم در عمده نواحی نرمال و در دامنه‌های زاگرس و شمال شرق کشور بالاتر از نرمال (حدوداً ۱۰ تا ۲۵ میلی‌متر بیش از نرمال) پیش‌بینی شده است. متوسط بارش در

در پیش‌دید سوم (مارس ۲۰۲۰) بارش در عمده نواحی کشور به وقوع پیوسته است و در دامنه‌های زاگرس هم بارش قابل توجهی به ثبت رسیده است (شکل ۱۱-الف). مدل برای عمده نواحی کشور برای پیش‌دید سوم بارش نرمال و بالاتر از نرمال پیش‌بینی

بیش از ۷۵ درصد پیش‌بینی شد و مقادیر مشاهداتی نیز نشان داد که متوسط بارش در منطقه ذکر شده حدوداً ۳۰ میلی‌متر بوده است که با توجه به اینکه ماه ژانویه بیشترین بارش در این ناحیه به وقوع می‌پیوندد، لذا عملکرد مدل در پیش‌دید نخست این ناحیه قابل قبول ارزیابی شد، هرچند که در ناحیه شرقی کشور نیز نرمال تا زیرنرمال پیش‌بینی گردید و مقادیر ثبت شده بارش در این ناحیه کمتر از ۵ میلیمتر بود که نشان می‌دهد هرچند که در دوره تاریخی، مدل در این ناحیه چندان عملکرد مطلوبی نداشته است، اما در نمونه عملیاتی مورد بررسی، احتمال وقوع بارش در این ناحیه را بشکل قابل قبولی پیش‌بینی نموده است.

- عدم قطعیت مدل در پیش‌دید دوم نسبت به پیش‌دید اول و در پیش‌دید سوم، نسبت به دو پیش‌دید اول و دوم کاهش می‌یابد.
- در نمونه عملیاتی مورد بررسی، در پیش‌دید دوم مقادیر مشاهداتی بارش نشان داد که غرب کشور بارش نرمال تا بالاتر از نرمال داشته است و مدل، بارش این منطقه را کمتر از نرمال پیش‌بینی نموده است و در پیش‌دید سوم مدل بارش این منطقه را فراتر از نرمال پیش‌بینی نموده است که این موضوع به وقوع پیوسته است. بنابراین عدم قطعیت حتی در پیش‌بینی‌های احتمالاتی، ویژگی ذاتی این مدل‌ها است هرچند که پیش‌بینی‌های احتمالاتی سناریوهای محتمل‌تر را برای متغیرهای مختلف اقلیمی به شکل بهتر نسبت به پیش‌بینی قطعی تبیین می‌نماید.

سپاسگزاری

این مطالعه با حمایت صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) و مستخرج از طرح پژوهشی شماره ۹۹۰۳۱۹۷۳ می‌باشد.

دامنه‌های زاگرس در ماه اسفند حدود ۵۰ میلی‌متر است و نتایج پیش‌بینی مدل برای این ماه مناسب بوده است، هرچند که شاخص‌های کارایی که در بخش قبلی بررسی شد، نشان داد که عملکرد مدل در پیش‌دید سوم کاهش می‌یابد، اما در این دوره مورد مطالعه، چه بسا کارایی مدل برای پیش‌دید دوم و سوم، بهتر از پیش‌دید نخست بوده است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی کارایی یک مدل همادی در مقیاس زمانی فصلی برای تولید پیش‌بینی احتمالاتی با استفاده از مدل WRF و اعضای همادی مدل CFSv.2 جهت پیش‌بینی بارش در ایران پرداخته شد. نتایج این مطالعه عبارت است از:

- در پیش‌بینی بارش، پیش‌بینی قطعی با توجه به عدم قطعیت بالای مدل‌های عددی در پیش‌بینی این متغیر، نمی‌تواند راهکاری مناسب برای ارائه چشم‌انداز بارش در مقیاس زمانی میان‌مدت باشد و پیش‌بینی احتمالاتی می‌تواند نتایج کاربردی‌تر را در اختیار برنامه‌ریزان قرار دهد، هرچند که پیش‌بینی احتمالاتی نیز وابسته به فاصله از مبدأ زمانی پیش‌بینی و تغییرات مکانی بارش است.
- معمولاً مقادیر واقعی بارش در بازه باند عدم قطعیت مدل احتمالاتی قرار می‌گیرند و این امکان طرح سناریوهای مختلف برای برنامه‌ریزان جهت مقابله با مخاطرات احتمالی ناشی از بارش‌های حدی را فراهم می‌کند.
- مدل مورد بررسی در نواحی جنوب شرقی کشور از خطای بالاتری نسبت به سایر نواحی کشور برخوردار است.
- در نمونه عملیاتی مورد بررسی، بارش در پیش‌دید اول (ژانویه ۲۰۲۰) توسط مدل احتمالاتی مورد بررسی در نیمه غربی کشور زیرنرمال تا نرمال با درصد احتمال وقوع حدوداً

منابع

10. Frnda, J., Durica, M., Rozhon, J., Vojtekova, M., Nedoma, J., & Martinek, R. 2022. ECMWF short-term prediction accuracy improvement by deep learning. *Scientific Reports*, 12(1), 7898.
11. Infanti, J.M., & Kirtman, B.P. 2014. Southeastern US rainfall prediction in the North American multi-model ensemble. *Journal of Hydrometeorology*, 15(2), 529-550.
12. Krishnamurti, T. N., Kishtawal, C.M., Zhang, Z., LaRow, T., Bachiochi, D., Williford, E., Gadgil, S. and Surendran, S. 1999. Improved weather and seasonal climate forecasts from multimodel superensemble, *Science*, 285, 1548-1550.
13. Lang, Y., Ye, A., Gong, W., Miao, C., Di, Z., Xu, J., & Duan, Q. 2014. Evaluating skill of seasonal precipitation and temperature predictions of NCEP CFSv2 forecasts over 17 hydroclimatic regions in China. *Journal of Hydrometeorology*, 15(4), 1546-1559.
14. Le, P. V., Randerson, J. T., Willett, R., Wright, S., Smyth, P., Guilloteau, C., & Foufoula-Georgiou, E. 2023. Climate-driven changes in the predictability of seasonal precipitation. *Nature communications*, 14(1), 3822.
15. Miller, S., Mishra, V., Ellenburg, W. L., Adams, E., Roberts, J., Limaye, A., & Griffin, R. 2021. Analysis of a short-term and a seasonal precipitation forecast over Kenya. *Atmosphere*, 12(11), 1371.
16. Nassaj, B.N., Zohrabi, N., Shahbazi, A.N. & Fathian, H. 2022. Evaluating the performance of eight global gridded precipitation datasets across Iran. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 98, p.101297.
17. Neelin, J.D. 2011. *Climate Change and Climate Modeling*. Cambridge: Cambridge University Press p. 282.
18. Phan-Van, T., Nguyen-Xuan, T., Van Nguyen, H., Laux, P., Pham-Thanh, H. and Ngo-Duc, T. 2018. Evaluation of the NCEP Climate Forecast System and Its Downscaling for Seasonal Rainfall Prediction over Vietnam. *Wea. Forecasting*, 33, 615-640.
1. بابائیان ا، کریمی‌ان م. و مدیریان ر. ۱۳۹۱. پس پردازش برون‌داد مدل دینامیکی MRI-CGCM3 برای پیش‌بینی فصلی بارش استان خراسان رضوی. *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۷(۳)، ۱۱۹-۱۳۳.
۲. دهبان ح، ابراهیمی ک، عراقی نژاد ش، بذرافشان ج. (۱۳۹۸). ارزیابی دقت مدل‌های NMME در پیش‌بینی بارش ماهانه (مطالعه موردی: حوضه سفیدرود)، هواشناسی کشاورزی، دوره ۷(۱)، ۳-۱۲.
۳. موسوی س. م، آخوندعلی ع. م، شهبازی ع. ۱۳۹۸. تحلیل پیش‌بینی گروهی بارش مدل CFSv2 با رویکرد مدیریت منابع آب (مطالعه موردی: حوضه آبریز سد دز)، تحقیقات منابع آب ایران، ۱۵(۴)، ۹۲-۱۰۶.
۴. نجفی ح، مساح بوانی ع. ر، ایران نژاد پ، رابرتسون ا. ۱۳۹۶. کاربست مدل‌های همادی آمریکای شمالی در پیش‌بینی فصلی بارش گستره ی ایران. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۳(۴)، ۲۸-۳۸.
5. Agyeman, R. Y. K., Annor, T., Lamptey, B., Quansah, E., Agyekum, J., & Tiekou, S.A. 2017. Optimal physics parameterization scheme combination of the weather research and forecasting model for seasonal precipitation simulation over Ghana: *Advances in Meteorology*, 2017, 1-15.
6. 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.
7. Bierkens, M.F.P., & Van Beek, L.P.H. 2009. Seasonal predictability of European discharge: NAO and hydrological response time. *Journal of Hydrometeorology*, 10(4), 953-968.
8. Darand, M., & Khandu, K. 2020. Statistical evaluation of gridded precipitation datasets using rain gauge observations over Iran: *Journal of Arid Environments*, 178, 104172.
9. 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.

21. Wood, A. W., & Lettenmaier, D. P. 2008. An ensemble approach for attribution of hydrologic prediction uncertainty. *Geophysical Research Letters*, 35(14).
22. Yun, W. T., Stefanova, L., & Krishnamurti, T. N. 2003. Improvement of the multimodel superensemble technique for seasonal forecasts. *Journal of Climate*, 16(22), 3834-3840.
19. Pinheiro, E., & Ouarda, T. B. 2023. Short-lead seasonal precipitation forecast in northeastern Brazil using an ensemble of artificial neural networks. *Scientific Reports*, 13(1), 20429.
20. Singh, J., Yeo, K., Liu, X., Hosseini, R., & Kalagnanam, J. R. 2015. Evaluation of WRF model seasonal forecasts for tropical region of Singapore: *Advances in Science and Research*, 12(1), 69-72.