



Analysis of Systematic Errors of NEX-GDDP Models and Improving Precipitation Estimation in Iran via an Exponentially Weighted Ensemble (Exp-Ensemble)

Dadashi-Roudbari, A. A. 

Department of Geography, Faculty of Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Corresponding Author E-mail: a-dadashi@um.ac.ir

(Received: 1 April 2026, Revised: 14 July 2026, Accepted: 15 Aug 2026, Published online: 5 Sep 2026)

Summary

Anthropogenic climate change, driven by the escalating concentration of greenhouse gases, has posed fundamental and unprecedented challenges to both natural and human systems in recent decades (IPCC, 2021). Among the most pronounced consequences of global warming are shifts in the frequency, intensity, spatial distribution, and timing of extreme hydro-meteorological events, particularly precipitation. As the moisture-holding capacity of the atmosphere increases by approximately 7% per 1°C of warming—governed by the Clausius-Clapeyron relationship—numerous studies warn that spatial and seasonal fluctuations in precipitation regimes will inevitably intensify. Addressing this critical challenge, the present study investigates precipitation dynamics across Iran during the historical period of 1980–2014. The primary methodological innovation lies in first evaluating the performance of individual downscaled NEX-GDDP-CMIP6 models, followed by the development of a non-linear, exponentially weighted multi-model ensemble. Fundamentally, this research demonstrates how formulating a non-linear ensemble framework—one that accounts for the spatial variance in modeling errors by assigning geographically dependent weights—can substantially enhance the accuracy of precipitation simulations. We also examine how individual models perform against this proposed framework. Rigorous assessment of the capacity of NEX-GDDP-CMIP6 datasets alongside the proposed exponential ensemble (Exp-Ensemble) reveals substantial limitations in the individual models' ability to reliably capture precipitation patterns, particularly over complex mountainous terrain and coastal margins. When evaluated against GPCC observations, these individual models exhibit a pervasive dry bias of -25 to -50 mm yr⁻¹, coupled with Root Mean Square Error (RMSE) values of 127 to 155 mm yr⁻¹. Notably, GFDL and EC-Earth3 display anomalous deviations in precipitation variance; consequently, their spatial outputs across Iran's diverse topography exhibit high spatial uncertainty. Implementing the exponentially weighted multi-model ensemble strategy yielded a statistically significant reduction in these systematic errors. By calibrating grid-cell weights based on each model's historical skill across distinct climate zones, the overall RMSE was reduced to 108 mm yr⁻¹, while the dry bias decreased to -23 mm yr⁻¹. Despite these improvements, standard Bias-Correction Spatial Disaggregation (BCSD) algorithms continue to exhibit limitations. They fail to fully compensate for the unresolved sub-grid-scale processes in model outputs along the southern coastlines of the Caspian Sea. Intense precipitation maxima exceeding 1000 mm yr⁻¹ within this narrow coastal strip are systematically underestimated, with a peak of only 600 mm yr⁻¹ even within the integrated ensemble framework. This pronounced discrepancy highlights a simulated deficit exceeding 50% for this specific geographic sub-region. Ultimately, the arid and semi-arid expanse of Iran represents a formidable challenge for parameterizing precipitation schemes within the sixth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6). While it cannot eliminate the underlying dry bias ubiquitous across this latest generation of models, the weighted ensemble proposed herein successfully minimizes error variance. Integrating this methodology into broader climate impact evaluations and macro-level water resource policymaking effectively mitigates structural uncertainties, thereby establishing a rigorous baseline for future hydrological projections in Iran and geographically analogous regions worldwide.

Keywords: Precipitation, Exponentially Weighted Ensemble (Exp-Ensemble), NEX-GDDP, Dry Bias, Bias Correction.

Cite this article: Dadashi-Roudbari, A. A. (2026). Analysis of Systematic Errors of NEX-GDDP Models and Improving Precipitation Estimation in Iran via an Exponentially Weighted Ensemble (Exp-Ensemble). *Journal of the Earth and Space Physics*, 52(2), 397-418. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2026.412350.1007766>



© Authors Retain the Copyright and Full Publishing Rights.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2026.412350.1007766>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

تحلیل خطاهای سیستماتیک مدل‌های NEX-GDDP و بهبود کارایی آنها با مدل همادی وزنی نمایی (Exp-Ensemble) برای بازتولید بارش در ایران

عباسعلی داداشی رودباری ✉

گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: a-dadashi@um.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۵/۱/۱۲، بازنگری: ۱۴۰۵/۴/۲۳، پذیرش نهایی: ۱۴۰۵/۵/۲۴، انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۶/۱۴)

چکیده

این مطالعه کارایی ۲۸ مدل از پروژه NEX-GDDP-CMIP6 و مدل همادی وزنی-نمایی (Exp-Ensemble) تولید شده را در بازتولید بارش ایران طی دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۱۴) ارزیابی می‌کند. به منظور رفع خطای عدم تطابق مقیاس ایستگاهی به نقطه شبکه و اجتناب از عدم قطعیت‌های سیستماتیک ناشی از درونیابی شبکه پراکنده ایستگاهی کشور، از مجموعه داده مرکز اقلیم‌شناسی بارش جهانی (GPCC) با تفکیک ۰/۲۵ درجه قوسی به عنوان مشاهدات مرجع استفاده شد. ارزیابی‌ها نشان می‌دهد مدل‌های NEX-GDDP-CMIP6 الگوی مکانی بارش را به خوبی بازتولید کرده‌اند و بهترین کارایی در متوسط پهنه‌ای کشور برای مدل MPI-ESM1-2-LR با همبستگی ۰/۷۳ محاسبه شده است. با این حال، مدل‌های منفرد دارای یک اریبی خشک فراگیر (۲۵- تا ۵۰- میلی‌متر) و خطای بین ۱۲۷ تا ۱۵۵ میلی‌متر در سطح کشور هستند. ضعف مدل‌های دارای شبکه پایه درشت‌مقیاس در حل دینامیکی واداشت‌های کوهساری، اریبی خشک را در آنها تا ۳۰۰- میلی‌متر تشدید کرده است. توسعه چندمدلی همادی وزن‌دار نمایی، اریبی را به ۲۳- میلی‌متر و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) را به ۱۰۸ میلی‌متر کاهش داد. با این وجود، الگوریتم تصحیح اریبی و مقیاس‌کاهی مکانی (BCSD) در بازتولید فرایندهای فیزیکی زیرشبکه‌ای دارای محدودیت‌های ساختاری است و هسته‌های بارشی فراتر از ۱۰۰۰ میلی‌متری سواحل جنوبی دریای خزر را با خطایی بیش از ۵۰ درصد (حداکثر ۶۰۰ میلی‌متر) برآورد می‌کند. استفاده از چند مدلی همادی با وزن‌دهی نمایی، خطاهای سیستماتیک در مدل‌های گردش کلی (GCM) را به شکل قابل‌توجهی کاهش داده و رویکردی قابل‌اتکا جهت مدل‌سازی‌های هیدرولوژیک و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم در مناطقی با توپوگرافی پیچیده فراهم آورده است.

واژه‌های کلیدی: بارش، مدل همادی وزنی نمایی (Exp-Ensemble)، NEX-GDDP، اریبی خشک، تصحیح اریبی.

۱. مقدمه

تغییر اقلیم، سامانه‌های طبیعی و انسانی را در دهه‌های اخیر با چالش‌های اساسی و بی‌سابقه‌ای مواجه ساخته است (IPCC، ۲۰۱۳). یکی از بارزترین پیامدهای گرمایش جهانی، تغییرات در فراوانی، شدت، گستره مکانی و زمان‌بندی رخدادهای فرین جوی/اقلیمی، به‌ویژه بارش است (وارناچ و ری، ۲۰۱۹). هم‌زمان با افزایش ظرفیت رطوبتی جو در پی گرمایشی در حدود 0.78°C ، مطالعات متعددی هشدار داده‌اند که نوسانات مکانی و فصلی رژیم بارش تشدید خواهد شد (فال و همکاران، ۲۰۱۷). اگرچه پیامدهای مخرب این پدیده‌ها تمامی نقاط جهان را تهدید می‌کند، اما ابعاد ویرانگر آنها در مناطق خشک و نیمه‌خشک و کشورهای در حال توسعه به مراتب شدیدتر است؛ مناطقی که زیرساخت‌های آنها تاب‌آوری کافی در برابر مخاطراتی نظیر سیلاب و خشکسالی را ندارند (کرفت و همکاران، ۲۰۱۶؛ هوانگ و همکاران، ۲۰۱۷). در چنین شرایطی، طراحی راهبردهای سازگاری نیازمند درک عمیق و پیش‌نگری‌های متغیرهای اقلیمی دقیق است (کارل و همکاران، ۲۰۰۹).

در راستای کاربست این پیش‌نگری‌ها، مدل‌های گردش کلی (General Circulation Models) GCMs و پروژه مقایسه متقابل مدل‌های جفت‌شده CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) به عنوان

تغییر اقلیم، سامانه‌های طبیعی و انسانی را در دهه‌های اخیر با چالش‌های اساسی و بی‌سابقه‌ای مواجه ساخته است (IPCC، ۲۰۱۳). یکی از بارزترین پیامدهای گرمایش جهانی، تغییرات در فراوانی، شدت، گستره مکانی و زمان‌بندی رخدادهای فرین جوی/اقلیمی، به‌ویژه بارش است (وارناچ و ری، ۲۰۱۹). هم‌زمان با افزایش ظرفیت رطوبتی جو در پی گرمایشی در حدود 0.78°C ، مطالعات متعددی هشدار داده‌اند که نوسانات مکانی و فصلی رژیم بارش تشدید خواهد شد (فال و همکاران، ۲۰۱۷). اگرچه پیامدهای مخرب این پدیده‌ها تمامی نقاط جهان را تهدید می‌کند، اما ابعاد ویرانگر آنها در مناطق خشک و

(میانگین‌گیری ساده) یا خطی (یعنی یک وزن ثابت برای یک کشور همچون ایران) انجام می‌شود. این رویکردهای وزن‌دهی این واقعیت کلیدی را نادیده می‌گیرند که کارایی هر مدل، تابعی از شرایط پیچیده جغرافیایی است. از آنجاکه فیزیک جو و توپوگرافی محلی باعث می‌شود یک مدل در یک منطقه کارایی بالا و در منطقه‌ای دیگر کارایی ضعیفی داشته باشد، تخصیص وزن‌های ثابت به انحراف نتایج منجر می‌شود (شارما و همکاران، ۲۰۱۸). برای دستیابی به تولید چند مدلی همادی دقیق‌تر، تخصیص وزن‌های غیرخطی امری کاملاً ضروری است؛ به این معنا که وزن هر مدل باید به‌صورت پویا تغییر کرده و به‌طور اختصاصی بر اساس کارایی آن مدل در هر نقطه شبکه و منطقه جغرافیایی متفاوت تعیین شود.

کشور ایران با برخورداری از اقلیمی غالباً خشک و نیمه‌خشک، تنوع توپوگرافیک شدید و رژیم‌های بارشی بسیار پیچیده، به‌شدت در برابر نوسانات اقلیمی آسیب‌پذیر است. با وجود نیاز مبرم به برآوردهای دقیق هیدرواقلیمی جهت مدیریت منابع آب در این پهنه، خلأ ارزیابی جامع مدل‌های پیشرفته در ایران احساس می‌شود. بر همین اساس، پژوهش حاضر با هدف پاسخ به این شکاف علمی، به بررسی متغیر بارش طی دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۱۴) در ایران می‌پردازد. نوآوری کلیدی و مسئله اصلی این مطالعه، ارزیابی کارایی مدل‌های منفرد مقیاس‌کاهی شده NEX-GDDP-CMIP6 و سپس توسعه یک چند مدلی همادی وزن‌دار نمایی (غیرخطی) است. این تحقیق به دنبال اثبات این اصل کلیدی است که توسعه مدل همادی غیرخطی که در آن وردایی مکانی خطاهای مدل‌سازی لحاظ شده و وزن مدل‌ها متناسب با ویژگی‌های جغرافیایی تغییر می‌کند، چه تأثیری بر ارتقای کارایی شبیه‌سازی بارش در ایران داشته و مدل‌های منفرد در قیاس با این روش نوین چه رفتاری از خود نشان می‌دهند.

در دهه‌های اخیر، مدل‌های گردش کلی (GCMs) ابزارهای کلیدی در درک و پیش‌نگری تغییر اقلیم هستند. با این وجود همان‌طور که گفته شد، تفکیک افقی پایین این مدل‌ها، کاربست مستقیم از آنها را برای ارزیابی‌های

ابزارهای کلیدی در بازتولید اقلیم گذشته و پیش‌نگری آینده شناخته می‌شوند (تیلور و همکاران، ۲۰۱۲). با این وجود، کاربرد مستقیم خروجی این مدل‌ها در مطالعات مقیاس محلی و منطقه‌ای با محدودیت‌های ذاتی و چالش‌هایی روبه‌رو است. تفکیک افقی پایین این مدل‌ها موجب می‌شود تا از بازتولید دقیق فرایندهای زیرشبکه‌ای، اثرات توپوگرافی محلی و گرادیان‌های اقلیمی ناتوان باشند (پیلر و همکاران، ۲۰۱۶). این ناتوانی در بازنمایی فیزیک محلی جو، منجر به بروز عدم قطعیت‌های گسترده و اریبی‌های سیستماتیک در برآورد شدت و توزیع مکانی بارش می‌شود (کنوتی و سدلاچک، ۲۰۱۳؛ استورلومو و همکاران، ۲۰۱۶).

برای غلبه بر این چالش و پر کردن شکاف میان خروجی‌هایی با تفکیک افقی پایین و نیازهای اطلاعاتی محلی، بهره‌گیری از تکنیک‌های مقیاس‌کاهی و تصحیح اریبی امری اجتناب‌ناپذیر است (مارون و همکاران، ۲۰۱۰). در میان رویکردهای موجود، پروژه تبادل زمین ناسا برای پیش‌نگری‌های روزانه جهانی NEX-GDDP (NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections) با اتکا به روش‌های پیشرفته آماری، مجموعه داده‌ای با تفکیک افقی بسیار بالا (در مقیاس ۲۵ کیلومتر) توسعه داده است که تطابق خوبی با توزیع رخداد‌های فرین نشان داده و قابلیت اطمینان آن در تولید مجموعه داده‌های باکیفیت به اثبات رسیده است (جیان و همکاران، ۲۰۱۹). با این حال، حتی با وجود پیشرفت‌های حاصل در خروجی‌های مقیاس‌کاهی شده NEX-GDDP، کاربست یک مدل منفرد به دلیل تفاوت در طرح‌واره‌های پارامترسازی، همواره با عدم قطعیت‌های محاسباتی همراه است (کریستین و کریستین، ۲۰۰۷).

ضرورت عبور از مدل‌های منفرد، استفاده از رویکرد چند مدلی همادی MME (Multi-Model Ensemble) را برای کاربست پیش‌نگری‌ها توجیه می‌کند (مین و هنس، ۲۰۰۶). اما شکاف تحقیقاتی در مطالعات پیشین، نحوه تولید چند مدلی همادی از این مدل‌هاست. در رویکردهای سنتی، تولید مدل همادی غالباً با تخصیص وزن‌های یکسان

منطقه‌ای و تدوین برنامه‌های سازگاری با چالش‌های جدی مواجه کرده است. در پاسخ به این محدودیت، روش‌های مقیاس‌کاهی توسعه یافتند. در این میان، پروژه NEX-GDDP ناسا با ارائه داده‌های مقیاس‌کاهی شده آماری در سطح جهانی، یک نقطه عطف در مطالعات اقلیمی به شمار می‌رود. پژوهش‌های زیادی نشان داده‌اند که این داده‌ها در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی، به‌ویژه در مناطق پیچیده، کارایی بالایی دارند. برای نمونه، جیان و همکاران (۲۰۱۹) با بررسی دوره تاریخی، نشان دادند که مدل‌های NEX-GDDP در شبیه‌سازی الگوهای مکانی میانگین دما و بارش (با همبستگی الگویی حدود ۰/۸) بسیار موفق‌تر از داده‌های خام CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 Coordinated Regional Climate Downscaling) و حتی مدل‌های CORDEX Experiment عمل می‌کنند. با توجه به کارایی بالای مدل‌های NEX-GDDP توجه زیادی به ارزیابی این مدل‌ها در شبیه‌سازی رخدادهای فرین شده است. ایودون و همکاران (۲۰۲۰) در ارزیابی اثرات سطوح مختلف گرمایش جهانی بر بارش‌های فرین جنوب آفریقا، نشان دادند که هر دو مجموعه داده CORDEX و NEX-GDDP در شبیه‌سازی اقلیم‌شناسی شاخص‌های بارش موفق عمل می‌کنند. با این حال، در برخی دیگر از مناطق مانند هند، پژوهش کومار و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که اگرچه مدل‌های NEX-GDDP توانایی بالایی در شبیه‌سازی بارش‌های فصلی مونسون دارند اما این مدل‌ها در ثبت دقیق تغییرپذیری‌های روزانه بارش همچنان با محدودیت‌هایی روبه‌رو هستند. ژائو و همکاران (۲۰۲۰b) در مطالعه‌ای بر روی حوضه رودخانه ژیانگ، از همادی با وزن برابر برای ۱۰ مدل NEX-GDDP استفاده کردند تا تأثیر گرمایش 1.5°C و 2°C را بر رواناب و بارش فرین بررسی کنند. نتایج آنها افزایش قابل توجه بارش‌های فرین را تحت سناریوهای با انتشار بالا (RCP8.5) اثبات کرد. در مطالعه‌ای دیگر، ژائو و همکاران (۲۰۲۰a) در یک منطقه خشک و نیمه‌خشک در چین، با بهره‌گیری از روش میانگین‌گیری بیزین BMA (Bayesian Model Averaging)، روند افزایشی

شاخص‌های گرم (مانند روزها و شب‌های گرم) و شدت بارش را در قرن بیست‌ویکم پیش‌نگری کردند که اهمیت استفاده از روش‌های همادی پیشرفته‌تر را برجسته می‌سازد. در تحقیقی مشابه در هند نیز توسط رائو و همکاران (۲۰۲۰) نشان از افزایش شدت و فراوانی بارش‌های فرین در آینده نزدیک و دور دادند. سوفاراتید و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از روش‌های نگاشت واریانس و نگاشت چندک تجربی EQM (Empirical Quantile Mapping) بر روی ۱۸ مدل CMIP6، نشان دادند که میانگین همادی چند مدلی (MME) تحت سناریوهای SSP، افزایش شدت بارش را برای جنوب شرق آسیا پیش‌نگری می‌کند. به‌طور مشابه، رائو و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از داده‌های مقیاس‌کاهی شده NEX-GDDP CMIP6 برای بررسی رژیم بارش در شبه‌جزیره عربستان و امارات متحده عربی استفاده کردند و افزایش تا ۳۰ درصدی در بارش سالانه و تشدید رخدادهای فرین را تحت سناریوهای SSP1-2.6 تا SSP5-8.5 گزارش کردند.

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در ایران بر اهمیت استفاده از رویکرد تولید چندمدلی همادی به‌منظور کاهش عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی منفرد تأکید داشته‌اند. به‌عنوان نمونه، عالمزاده و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از میانگین همادی چندمدلی در پروژه CMIP5، پاسخ جت جنب‌حاره‌ای را به گرمایش زمین بررسی کرده و بر کارایی بالاتر نتایج همادی نسبت به خروجی‌های منفرد تأکید کردند. در ادامه، عسگری و همکاران (۱۴۰۱) با تولید چند مدلی همادی از ۱۷ مدل گردش کلی، کاهش عدم قطعیت در پیش‌نگری دما و بارش و اثرات آن بر کاهش حجم مخزن سد دز را نشان دادند. اهمیت این موضوع در مطالعات آزاد و احمدی (۱۴۰۲) و همچنین خان‌سالاری و محمدی (۱۴۰۲) که به‌ترتیب از روش‌های میانگین‌گیری بیزین و وزن‌دهی مبتنی بر رتبه بر روی مدل‌های CMIP6 استفاده کردند نیز تأیید شد. نتایج آنها نشان داد که مدل همادی دقت بالاتری نسبت به مدل‌های منفرد داشته و عدم قطعیت پیش‌نگری‌های آینده را کاهش می‌دهند. شاهی

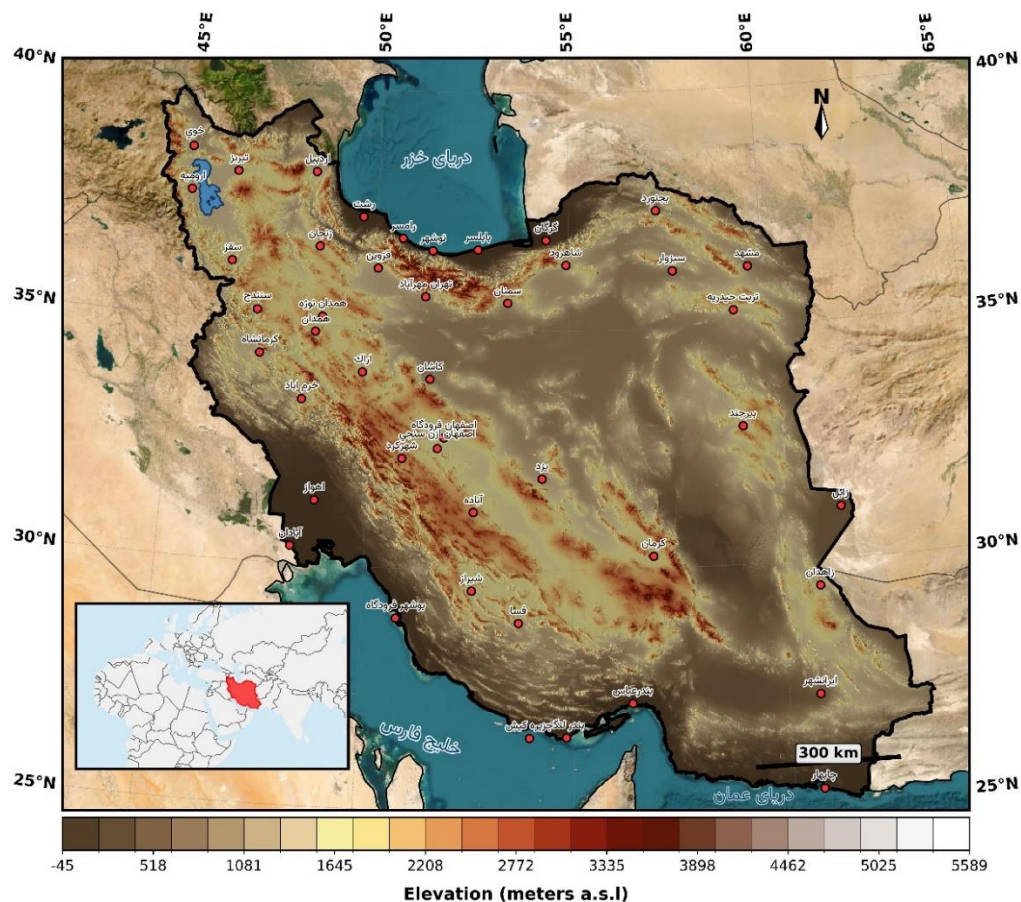
قابلیت اطمینان پیش‌نگری‌های اقلیمی در مقیاس محلی باشد.

۲. روش تحقیق

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

ایران به دلیل تنوع شدید اقلیمی، تضاد بارش بین نواحی مرطوب خزری و پهنه‌های خشک مرکزی و حاکمیت واداشتهای کوهساری ناشی از سامانه‌های البرز و زاگرس (شکل ۱)، یکی از مناطق چالش‌برانگیز برای بازتولید بارش با مدل‌های گردش کلی (GCMs) محسوب می‌شود. چنین ساختار ناهمگنی، همان‌گونه که در این تحقیق نیز نمایان شد، موجب بروز اریبی‌های خشک و مرطوب قابل توجه و افزایش عدم قطعیت در خروجی مدل‌های منفرد-NEX-GDDP می‌شود و اتکا به یک GCM منفرد را برای کاربردهای هیدرواقلیم و برنامه‌ریزی منابع آب را در عمل غیر ممکن می‌سازد.

و همکاران (۱۴۰۴) با به کارگیری میانگین‌گیری وزنی برای تولید چند مدلی همادی، برتری این روش را در پیش‌نگری رخدادهای بارش سنگین نسبت به مدل‌های منفرد گزارش کردند. با این وجود، به رغم اثبات کاهش عدم قطعیت در این مطالعات، غالب تحقیقات انجام شده در کشور همچنان از روش‌های وزن‌دهی ثابت و خطی یا میانگین حسابی استفاده می‌کنند. از آنجا که مشخص است مدل‌های گردش کلی در مناطق مختلف جغرافیایی و پهنه‌های مختلف پاسخ متفاوتی دارند و اختصاص یک وزن ثابت برای کل یک پهنه منطقی نیست، لذا این تحقیق با درک کامل از این شکاف تحقیقاتی، یک روش نوین و پویا در تولید چندمدلی همادی ایجاد کرده است. توسعه یک چند مدلی همادی وزن‌دار نمایی (Exponentially Weighted Multi-model Ensemble) با استفاده از مدل‌های مقیاس‌کاهی شده NEX-GDDP، می‌تواند با تخصیص پویای وزن‌ها بر اساس کارایی تاریخی هر مدل و افزایش



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه به همراه مدل رقمی ارتفاعی؛ موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی با دایره‌های قرمز روی شکل مشخص شده است.

۲-۲. داده‌های مورد استفاده

۲-۲-۱. داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی و مجموعه داده مرکز اقلیم‌شناسی بارش جهانی GPCC

(Global Precipitation Climatology Centre)

در این مطالعه، به منظور ارزیابی مشاهداتی داده‌های بارش، از مجموعه داده مرکز اقلیم‌شناسی بارش جهانی (GPCC) استفاده شده است. این مجموعه داده، بالغ بر ۸۵۰۰۰ ایستگاه باران‌سنجی در سطح جهان را پوشش می‌دهد که تحت هماهنگی برنامه جهانی پژوهش‌های اقلیمی WCRP (World Climate Research Programme) توسعه یافته و داده‌های تاریخی را با داده‌های سیستم ارتباطات جهانی (Global Telecommunication System) GTS تلفیق می‌کند (زیسه و همکاران، ۲۰۲۱). داده‌های بارش GPCC با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه قوسی و در مقیاس زمانی ماهانه برای دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۸۰) مورد استفاده قرار گرفت.

علی‌رغم وجود بیش از ۴۰۰ ایستگاه هواشناسی همدیدی و شبکه متراکمی از ایستگاه‌های اقلیم‌شناسی در سطح ایران، انتخاب داده‌های GPCC به جای استفاده مستقیم از داده‌های نقطه‌ای ایستگاهی، بر مبنای الزامات دقیق علمی در ارزیابی مدل‌های گردش کلی (GCMs) صورت گرفته است. مهم‌ترین چالش در استفاده از ایستگاه‌های محلی برای درستی سنجی مدل‌های بلندمدتی نظیر NEX-GDDP، مسئله پیوستگی زمانی و همگنی داده‌ها در بازه ۳۵ ساله (۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴) است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که از میان شبکه ایستگاهی کشور، تنها ۴۶ ایستگاه همدیدی دارای آمار کاملاً پیوسته، همگن و بدون داده گمشده چشمگیر در کل این بازه زمانی هستند. استفاده از تنها ۴۶ ایستگاه برای پهنه‌بندی بارش در گستره وسیع و با توپوگرافی پیچیده‌ای مانند ایران، نیازمند درون‌یابی‌های مکانی (Spatial Interpolation) با فواصل زیاد است که خود به تولید عدم قطعیت‌های قابل توجه و خطاهای سیستماتیک به مراتب بیشتری نسبت به مجموعه داده‌های معتبر جهانی همانند GPCC منجر می‌شود.

از سوی دیگر، مقایسه مستقیم داده‌های نقطه‌ای ایستگاهی با خروجی‌های شبکه‌ای مدل‌ها، خطای عدم تطابق مقیاس (Point-to-Pixel Mismatch) را به همراه دارد. استفاده از GPCC امکان مقایسه دو مجموعه داده (مشاهداتی و مدلی) با تفکیک مکانی کاملاً یکسان (۰/۲۵ درجه) را فراهم می‌آورد که این امر مسیر ارزیابی آماری را منسجم‌تر و علمی‌تر می‌سازد. با این وجود، به منظور اطمینان از کارایی مجموعه داده GPCC در بازتولید رفتارهای منطقه‌ای بارش کشور، پیش از به کارگیری این مجموعه داده به عنوان مشاهدات مرجع، داده‌های آن با داده‌های ۴۶ ایستگاه همدیدی (شکل ۱) بلندمدت و معتبر ایران درستی سنجی شد.

توزیع مکانی سنج‌ها اریبی و RMSE مجموعه داده GPCC در برابر داده‌های مشاهداتی هواشناسی همدید در شکل ۲ ارائه شده است. نتایج ارزیابی‌ها حاکی از تطابق بسیار بالا و توانمندی قابل توجه مجموعه داده GPCC در بازتولید نوسانات زمانی و مکانی بارش کشور است؛ به طوری که میانگین پهنه‌ای ضریب همبستگی در گستره ایران حدود ۰/۹۰ محاسبه شد. بررسی‌های ایستگاهی نشان می‌دهد که در بخش اعظم مساحت کشور، به ویژه در پهنه‌های وسیع مرکزی، شرقی و جنوبی (نظیر ایستگاه‌های آبادان، زاهدان، بندر لنگه و شیراز)، مقدار همبستگی فراتر از ۰/۹۵ بوده و RMSE در کمترین سطح ممکن قرار دارد. این همگرایی نشان می‌دهد که GPCC رفتارهای منطقه‌ای بارش را در اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران با دقتی هم‌تراز با ایستگاه‌های زمینی ثبت کرده است.

با این وجود، تحلیل توزیع فضایی اریبی (Bias) و RMSE نشان می‌دهد که مقادیر خطای بالا به صورت کاملاً متمرکز و محدود، تنها در نوار باریک ساحلی دریای خزر (نظیر ایستگاه‌های بابل و نوشهر) و برخی مناطق با توپوگرافی پیچیده (مانند خرم‌آباد) دیده می‌شود. از منظر فیزیکی، کم‌برآوردی بارش در این مناطق خرداقلیمی ناشی از ضعف داده‌های GPCC نیست؛ بلکه پیامد مستقیم خطای عدم تطابق مقیاس است. در مناطقی با گرا دیان شدید بارش

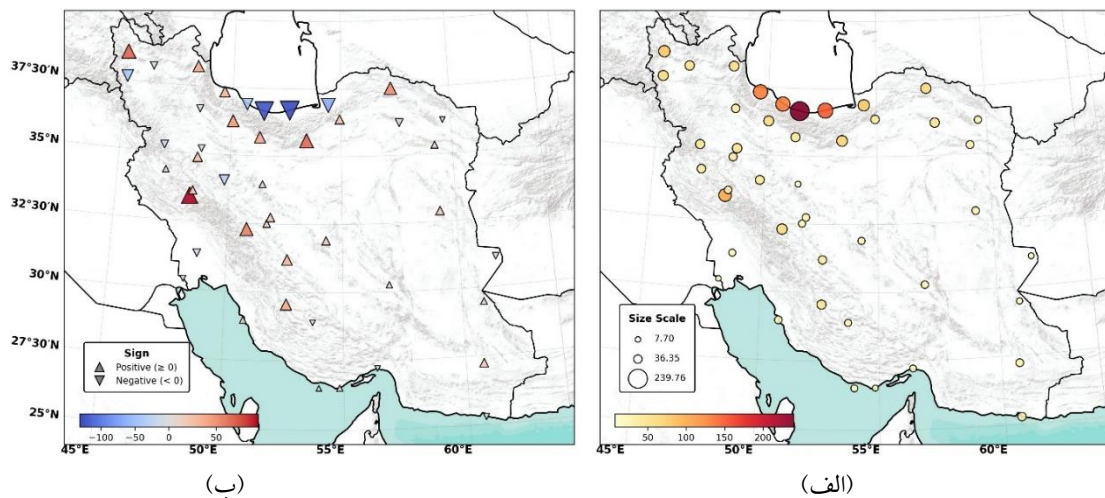
سیستماتیک جلوگیری می‌کند.

۲-۲-۲. مدل‌های پروژه تبادل زمین ناسا برای

پیش‌نگری‌های روزانه جهانی (NEX-GDDP)

برای بررسی مدل‌های گردش کلی مشارکت یافته در NEX-GDDP، از خروجی‌های روزانه ۲۸ مدل گردش کلی (GCM) منتخب از آرشیو NEX-GDDP استفاده شد (جدول ۱).

و رطوبت، میانگین‌گیری فضایی در یک نقطه شبکه ۰/۲۵ درجه قوسی، طبیعتاً مقادیر فرین ثبت شده در یک ایستگاه نقطه‌ای را تعدیل می‌کند. از آنجایی که بیش از ۸۰ درصد مساحت کشور دارای همبستگی حداکثری و خطای حداقلی با مشاهدات GPCC است، استفاده از این مجموعه داده به عنوان مرجع برای ارزیابی خروجی مدل‌های NEX-GDDP-CMIP6، نسبت به درونیابی تنها ۴۶ ایستگاه پراکنده، دقیق‌تر بوده و از بروز عدم قطعیت‌های



شکل ۲. توزیع مکانی سنجه‌های اریبی و RMSE مجموعه داده بارش GPCC در مقایسه با ۴۶ ایستگاه هواشناسی همدیدی ایران در دوره زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴. الف) ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، اندازه و رنگ تیره‌تر دایره‌ها نشان‌دهنده مقدار خطای بالاتر است و ب) اریبی (Bias) را با استفاده از علائم مثلثی نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که مثلث‌های رو به بالا (قرمز) نشان‌دهنده بیش‌برآوردی و مثلث‌های رو به پایین (آبی) نشان‌دهنده کم‌برآوردی داده‌های GPCC هستند.

جدول ۱. مدل‌های منتخب NEX-GDDP-CMIP6 در تحقیق به همراه گونه اجرا در دسترس و تفکیک افقی شبکه پایه.

ردیف	نام مدل	تفکیک افقی (شبکه پایه) درجه قوسی	گونه اجرا	ردیف	نام مدل	تفکیک افقی (شبکه پایه) درجه قوسی	گونه اجرا
۱	ACCESS-CM2	۱/۹×۱/۳	rlilplfl	۱۵	INM-CM4-8	۲/۰×۱/۵	rlilplfl
۲	ACCESS-ESM1-5	۱/۸۷×۱/۲۵	rlilplfl	۱۶	INM-CM5-0	۲/۰×۱/۵	rlilplfl
۳	CanESM5	۲/۸×۲/۸	rlilplfl	۱۷	IPSL-CM6A-LR	۲/۵×۱/۳	rlilplfl
۴	CMCC-ESM2	۰/۹۳×۱/۲۵	rlilplf2	۱۸	KACE-1-0-G	۱/۹×۱/۳	rlilplfl
۵	CNRM-CM6-1	۱/۴×۱/۴	rlilplf2	۱۹	KIST-ESM	۱/۹×۱/۹	rlilplfl
۶	CNRM-ESM2-1	۱/۴×۱/۴	rlilplf2	۲۰	MIRC6	۱/۴×۱/۴	rlilplfl
۷	EC-Earth3	۰/۷×۰/۷	rlilplfl	۲۱	MIRC-ES2L	۲/۸×۲/۸	rlilplf2
۸	EC-Earth3-Veg-LR	۱/۱۲×۱/۱۲	rlilplfl	۲۲	MPI-ESM1-2-HR	۰/۹×۰/۹	rlilplfl
۹	GFDL-CM4	۱/۰×۰/۹	rlilplfl	۲۳	MPI-ESM1-2-LR	۱/۹×۱/۹	rlilplfl
۱۰	GFDL-ESM4	۱/۳×۱/۰	rlilplfl	۲۴	MRI-ESM2-0	۱/۱×۱/۱	rlilplfl
۱۱	GFDL-CM4 gr2	۱/۰×۱/۲۵	rlilplfl	۲۵	NrESM2-LM	۲/۵×۱/۹	rlilplfl
۱۲	GISS-E2-1-G	۲/۰×۲/۵	rlilplf2	۲۶	NrESM2-MM	۰/۹×۱/۳	rlilplfl
۱۳	HadGEM3-GC31-LL	۱/۲۵×۱/۸۵	rlilplf3	۲۷	TaiESM1	۰/۹۳×۱/۲۵	rlilplfl
۱۴	HadGEM3-GC31-MM	۰/۸۳×۰/۵۶	rlilplf3	۲۸	UKESM1-0-LL	۱/۹×۱/۳	rlilplf2

این مجموعه داده‌ها شامل یک دوره تاریخی از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۴ و یک دوره پیش‌نگری آینده از سال ۲۰۱۵ تا ۲۱۰۰ تحت سناریوهای مشترک اقتصادی-اجتماعی (SSPs Shared Socio-economic Pathways) می‌باشد. به منظور تصحیح اریبی و درستی خروجی مدل‌ها، از مجموعه داده مشاهداتی واداشت هواشناسی جهانی برای مدل‌سازی سطح زمین (GMFD Global Meteorological Forcing Dataset) استفاده شده است (شفیلد و همکاران، ۲۰۰۶). این مجموعه داده که محصول تلفیق داده‌های بازتحلیل با مشاهدات ایستگاهی است، دارای تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه قوسی و دوره زمانی روزانه می‌باشد. در این تحقیق دوره تاریخی ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ انتخاب شده است.

۳-۲. روش تحقیق

این پژوهش بر پایه مجموعه داده‌های مقیاس‌کاهی شده NEX-GDDP-CMIP6 انجام شده است که برون‌دادهای مدل‌های گردش کلی (GCMs) پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6) را با استفاده از یک روش پیشرفته مقیاس‌کاهی آماری پردازش می‌کند (ترشر و همکاران، ۲۰۲۲). رویکرد اتخاذشده در این مطالعه، بهره‌گیری از الگوریتم تصحیح اریبی و مقیاس‌کاهی مکانی (Bias-Correction Spatial Disaggregation) BCSD است که به‌طور ویژه برای رفع دو محدودیت اصلی GCMها، یعنی تفکیک افقی درشت (اغلب در مقیاس ۱۰۰ کیلومتر) و وجود اریبی‌های سیستماتیک در مقایسه با داده‌های مشاهداتی، توسعه یافته است (ترشر و همکاران، ۲۰۱۲). فرایند این روش‌شناسی در دو گام اصلی تصحیح اریبی و تفکیک افقی پیاده‌سازی شده که شرح آن در ادامه ارائه شده است. الگوریتم BCSD یک فرایند دومرحله‌ای است که ابتدا اریبی GCMها را تصحیح کرده و سپس آنها را به یک شبکه با تفکیک افقی بالاتر تبدیل می‌کند.

در مرحله نخست، با استفاده از تکنیک نگاشت چندک‌ها (Quantile Mapping) اریبی GCMها در قیاس با داده‌های مشاهداتی GMFD تصحیح می‌شود. برای هر متغیر اقلیمی

و برای هر روز از سال، تابع توزیع تجمعی (Cumulative Distribution Function) با تجمیع داده‌های مربوط به یک بازه ۳۱ روزه (روز هدف ± ۱۵ روز) در طول دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۶۰) ساخته می‌شود. سپس، یک نگاشت بین چندک‌های متناظر این دو تابع توزیع برقرار می‌شود. در مرحله دوم مقیاس‌کاهی داده‌های تصحیح‌شده ۰/۲۵ درجه قوسی با داده‌های GMFD است. این الگوریتم به‌جای درون‌یابی فضایی ساده، از یک روش چندمرحله‌ای برای حفظ جزئیات مکانی موجود در داده‌های مشاهداتی استفاده می‌شود. نخست، یک اقلیم‌شناسی روزانه با استفاده از تبدیل فوریه سریع (Fast Fourier Transform) از داده‌های مشاهداتی برای دوره تاریخی تولید می‌شود. سپس، برای هر گام زمانی، فاکتورهای مقیاس (Scaling Factors) از طریق مقایسه داده‌های تصحیح‌شده GCM با اقلیم‌شناسی مشاهداتی درشت‌مقیاس محاسبه می‌شوند. این فاکتورها برای متغیرهای دما به‌صورت تفاضل و برای سایر متغیرها به‌منظور جلوگیری از مقادیر منفی به‌صورت نسبت محاسبه می‌شوند. در ادامه، با استفاده از روش درون‌یابی دوخطی (Bilinear Interpolation) متغیرها به شبکه ۰/۲۵ درجه قوسی تبدیل می‌شوند (ترشر و همکاران، ۲۰۲۲).

۳-۲-۱. تولید چند مدلی همادی با رویکرد غیر خطی

وزن‌دهی نمایی مبتنی بر مهارت

روش اتخاذ شده در این پژوهش بر پایه توسعه یک چندمدلی همادی (MME) با رویکرد وزن‌دهی غیرخطی است. فرایند پیاده‌سازی این روش شامل دو گام تصحیح اریبی و وزن‌دهی نمایی مبتنی بر مهارت است. در گام اول ابتدا تمامی مدل‌های مورد استفاده تصحیح اریبی شده با روش BCSD از جدول ۱ جمع‌آوری شدند. تصحیح اریبی این اجازه را می‌دهد تا اریبی سیستماتیک مدل‌ها نسبت به داده‌های مشاهداتی به حداقل برسد. پس از این مرحله، کارایی هر مدل تصحیح‌شده ($M_{corrected}$) ارزیابی می‌شود.

۲-۳-۲. ارزیابی کارایی مدل‌های منفرد و چندمدلی

همادی در بازتولید بارش ایران

در این مطالعه، برای سنجش درستی مدل‌های منفرد و چند مدلی همادی در بازتولید بارش در ایران، از دو سنجه آماری Bias و RMSE استفاده شد. سنجه Bias به‌عنوان میانگین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و داده‌های مشاهداتی تعریف شده و نشان‌دهنده تمایل مدل به بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی بارش است (هیل و همکاران، ۲۰۰۶) که در رابطه (۳) ارائه شده است. از سوی دیگر، RMSE (رابطه ۴) مقدار پراکندگی خطاها را بررسی می‌کند و به‌طور ویژه حساس به خطاهای بزرگ است (هودسون، ۲۰۲۲)، بنابراین نشان‌دهنده توانایی مدل در بازتولید مقادیر بارش واقعی در طول دوره تاریخی می‌باشد. به این ترتیب، با ترکیب این دو سنجه، امکان مقایسه کارایی مدل‌های منفرد با خروجی چندمدلی همادی فراهم شده و توانایی مدل‌ها در بازتولید الگوهای فضایی و زمانی بارش در مقیاس ایران مورد ارزیابی قرار گرفت. در کنار این دو سنجه آماری، نمودار تیلور برای مقایسه همزمان توانایی مدل‌ها در بازتولید میانگین، واریانس و همبستگی فضایی بارش به کار گرفته شد، که دیدی جامع از کارایی مدل‌های منفرد و چندمدلی همادی فراهم می‌کند. به این ترتیب، ترکیب این سه سنجه امکان ارزیابی دقیق قابلیت مدل‌های NEX-GDDP-CMIP6 را میسر می‌سازد.

$$\text{Bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{Mode } l_i - \text{Obs}_i) \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{Mode } l_i - \text{Obs}_i)^2} \quad (4)$$

در روابط بالا، Model بارش بازتولید شده توسط NEX-GDDP-CMIP6 و Obs بارش مشاهداتی طی دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۱۴) بر اساس داده‌های GPCC است.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. ارزیابی مدل‌های منفرد NEX-GDDP و همادی

وزنی در بازتولید بارش ایران

ارزیابی کارایی ۲۸ مدل گردش کلی مقیاس‌کاهی شده

در گام دوم، برخلاف روش‌های سنتی که یا وزن یکسانی به مدل‌ها اختصاص می‌دهند یا با استفاده از یک روش خطی، وزن ثابتی برای آنها در نظر می‌گیرند، در این مطالعه از یک تابع غیرخطی استفاده شده است. این تابع از مفاهیم میانگین‌گیری بیزین (BMA) و تابع پیشینه هموار (Softmax) الهام گرفته شده است. ابتدا ضریب همبستگی پیرسون (r) بین سری زمانی تصحیح‌شده هر مدل و داده‌های مشاهداتی برای تک‌تک نقطه شبکه‌ها در مختصات (x, y) محاسبه می‌شود. سپس، وزن نهایی (W) برای هر مدل (i) از طریق رابطه نمایی (رابطه ۱) تعیین می‌شود.

$$W_i(x, y) = \frac{\exp(R_i(x, y))}{\sum_{j=1}^N \exp(R_j(x, y))} \quad (1)$$

مبنای علمی استفاده از تابع نمایی $\exp()$ ، برجسته‌سازی تفاوت‌های جزئی در مهارت مدل‌هاست. طبق این رویکرد که ریشه در مفاهیم میانگین‌گیری همادی مبتنی بر قابلیت اعتماد (Reliability Ensemble Averaging) دارد (جیورجی و مارنز، ۲۰۰۲)، وزن مدل‌هایی با کارایی ضعیف و همبستگی پایین به‌شدت به سمت صفر میل کرده و به‌عنوان نویز از چرخه محاسبات حذف می‌شوند. در مقابل، مدل برتر در هر منطقه جغرافیایی، بیشترین سهم را در بازتولید خروجی نهایی خواهد داشت.

در مرحله نهایی، مقادیر تصحیح‌شده هر مدل ($M_{corrected,i}$) در گام زمانی روزانه (t)، در وزن‌های نمایی نرمال‌شده (W_i) ضرب شده و مجموع آنها خروجی نهایی همادی را تشکیل می‌دهد (رابطه ۲).

$$\text{Ensemble}(x, y, t) = \sum_{i=1}^N (M_{corrected,i}(x, y, t) \times W_i(x, y)) \quad (2)$$

این روش محاسباتی تضمین می‌کند که خروجی نهایی، ترکیبی بهینه از توانمندی‌های مدل‌های مختلف باشد و عدم قطعیت‌های ناشی از مدل‌های منفرد را به حداقل برساند.

NEX-GDDP در بازتولید بارش ایران طی دوره ۲۰۱۴-۱۹۸۰ نشان‌دهنده تغییرات زیادی در شبیه‌سازی دقیق زمانی و مکانی بارش است. بررسی همبستگی مدل‌های منفرد با داده مشاهداتی GPCC روی نمودار تیلور ضرایبی را بین بازه $r = 0.2$ تا $r = 0.5$ برای بیشتر مدل‌ها نشان می‌دهد. تنها تعداد بسیار کمی از مدل‌ها توانسته‌اند همبستگی بالایی را با داده مشاهداتی نشان دهند. انحراف فاز در شبیه‌سازی سامانه‌های جوی، با خطاهای ساختاری در برآورد دامنه سیگنال بارش تشدید شده است. این امر را به روشنی می‌توان در انحراف معیار نرمال شده دید. به‌طوری‌که توزیع انحراف معیار نرمال شده مدل‌های منفرد گستره‌ای از 0.7 تا $1/3$ را در بر می‌گیرد (شکل ۳). پراکندگی وسیع برآوردهای بارش، عدم قطعیت بالای پارامترسازی‌های خردفیزیکی و دینامیک مقیاس زیرشبکه‌ای را در تولید بارش ایران اثبات می‌کند. ترکیب همبستگی ضعیف فضایی و تغییرات زیاد واریانس، خطای جذر میانگین مربعات نرمال شده (Root Mean Square Deviation) RMSD قابل توجهی را در بازه ۱ تا $1/5$ برای مدل‌های منفرد ایجاد کرده است. مدل همادی وزنی نمایی خطا را به شکل قابل توجهی کاهش داده است. تولید مدل همادی، خطای سیستماتیک را به مقدار 0.8 کاهش داده و ضریب همبستگی را در محدوده $0.45 \leq R \leq 0.5$ افزایش داده است (شکل ۳). از نظر آماری سازوکار وزن‌دهی نمایی با فیلتر کردن نویزهای تصادفی و خطاهای غیرسیستماتیک مدل‌های منفرد، سیگنال‌های اقلیمی قطعی را با دقتی به مراتب بالاتر استخراج کرده و این ویژگی آماری باعث شده است چند مدلی همادی توسعه داده شده در این تحقیق نسبت به مدل‌های منفرد دقت به مراتب بالاتری را داشته باشد.

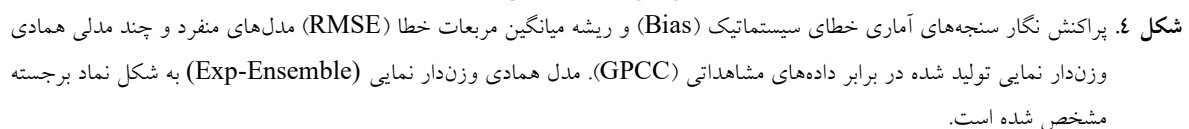
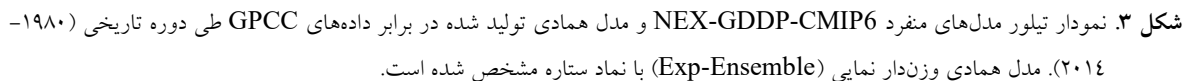
۳-۲. کارایی چندمدلی همادی وزن‌دار نمایی در بازتولید بارش در مقایسه با مدل‌های منفرد مقیاس کاهی شده پروژه NEX-GDDP

ارزیابی بارش مدل‌های منفرد در ایران طی دوره ۲۰۱۴-۱۹۸۰ نسبت داده‌های مشاهداتی GPCC، یک کم‌برآوردی

سیستماتیک را در خروجی‌های مقیاس کاهی شده NEX-GDDP نشان می‌دهد. تمامی ۲۸ مدل منفرد فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP6)، اریبی بین ۲۵- تا ۵۰- میلی‌متری را نشان می‌دهند. این غلبه مطلق اریبی منفی که از آن تحت عنوان اریبی خشک (Dry Bias) در مدل‌های گردش کلی یاد می‌شود ریشه در نقص ساختاری پارامترسازی‌های همرفتی و تفکیک‌ناپذیری توپوگرافی پیچیده در مدل‌ها دارد. ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) برای مدل‌های منفرد بازه‌ای از ۱۲۷ تا ۱۵۵ میلی‌متری را در بر می‌گیرد. مدل‌هایی چون TaiESM1 و CMCC-ESM2 با ثبت $RMSE > 150$ و اریبی‌های شدید منفی در بازه ۴۸- تا ۴۲- خطای محاسباتی زیادی را در بازتولید توزیع فضایی-زمانی بارش به تصویر می‌کشند. تقریباً رفتار مشابهی در ساختار مدل‌های CMCC-ESM2 و CanESM5 با مقادیر $RMSE > 150$ و $Bias \approx -42$ مشهود است. مدل EC-Earth3-Veg-LR اریبی را به مقدار زیادی کاهش داده است ($Bias \approx -35$)، اما خطای مدل ($RMSE \approx 153$) کماکان قابل توجه است (شکل ۴). بزرگی این اریبی‌های منفی (اریبی خشک)، به کارگیری یک مدل منفرد آنچه که در برخی از تحقیقات علمی تحت عنوان مدل کارآمد یا بهینه مرسوم است را فاقد اعتبار علمی می‌سازد.

تعداد بالایی از مدل‌ها، $RMSE$ برابر با ۱۳۰ تا ۱۴۵ میلی‌متری را نشان می‌دهند. پیکربندی‌های مختلف مدل سامانه زمین بریتانیایی شامل HadGEM3-GC31-LL، HadGEM3-GC31-MM و همچنین مدل UKESM1-0-LL، علی‌رغم ارتقای نسبی در تفکیک افقی، کم‌برآوردی‌های سیستماتیک را در محدوده اریبی ۳۸- تا ۵۲- میلی‌متر بازتولید می‌کنند. همگرایی آماری متمایزی در خروجی‌های ACCESS-CM2، NorESM2-MM و GISS-E2-1-G با مقادیر $RMSE$ حدود ۱۳۵ میلی‌متر دیده می‌شود. در مقابل مدل‌های IPSL-CM6A-LR، GFDL-ESM4 و GFDL-CM4-gr2 کمترین مقدار $RMSE$ را در میان GCM‌های منفرد نشان داده‌اند. از بین ۲۸ مدل منفرد مورد بررسی از پروژه NEX-GDDP

بدترین مدل از منظر اریبی مدل KACE-1-0-G است. توسعه مدل همادی مبتنی بر وزن دهی نمایی، مقدار خطا و اریبی را به شکل قابل توجهی در ایران کاهش می دهد. این روش تولید چند مدلی همادی وزن دار و غیرخطی، اریبی



۳-۳. وزن‌دهی مکان‌محور مدل‌های NEX-GDDP در

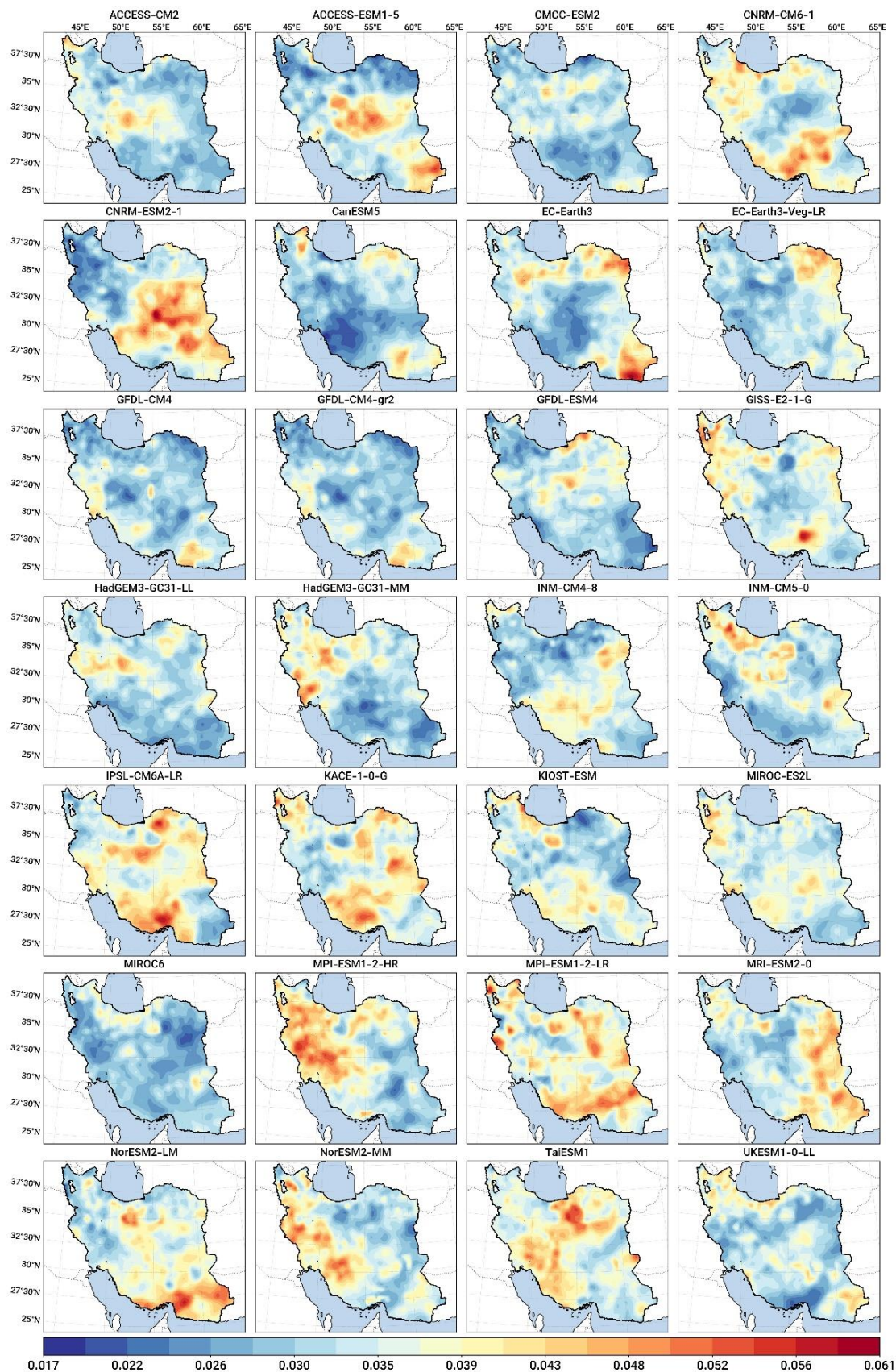
بازتولید بارش ایران طی دوره تاریخی

توزیع فضایی وزن‌های اختصاص‌یافته نشان‌دهنده واگرایی ۲۸ مدل NEX-GDDP در پارامترسازی فرایندهای زیرشبکه‌ای است. دامنه تغییرات این وزن‌ها در یک بازه کمی از ۰/۰۲ تا ۰/۰۶۱ در نوسان است. در امتداد رشته کوه زاگرس، مدل‌هایی نظیر MPI-ESM1-2-HR با ثبت مقادیر بیش از ۰/۰۵ بالاترین کارایی را در بازتولید بارش این منطقه از کشور نشان می‌دهند. این ویژگی آماری مستقیماً به توانمندی طرحواره‌های همرفتی این مدل‌ها در صعود مکانیکی توده‌های هوای مرطوب تغذیه‌شده در این منطقه است. ناتوانی مدل‌هایی نظیر EC-Earth3 و CNRM-CM6-1 با حداقل وزن ۰/۰۲ در همین پهنه، بر عدم کارایی این مدل‌ها در شبیه‌سازی برهم‌کنش دینامیک کوهساری دلالت دارد (شکل ۵).

پایداری ترمودینامیکی ناشی از استقرار پرفشار جنب‌حاره در عرض‌های $<35^{\circ}N$ ، معیار اصلی تفکیک کارایی مدل‌ها در نواحی داخلی و کویری است. مدل‌هایی نظیر ACCESS-CM2، ACCESS-ESM1-5 و MRI-ESM2-0 با شبیه‌سازی دقیق اثر سایه بارش، حداکثر وزن شبکه‌ای را در این مناطق به خود اختصاص داده‌اند. اریبی مرطوب سیستماتیک توسط مدلی مانند IPSL-CM6A-LR نشان‌دهنده خطای محاسباتی آن در پارامترسازی نرخ تبخیر-تعرق و بیلان تابشی این مناطق در کشور است. خروجی مدل‌هایی همانند CanESM5 و خانواده GFDL به دلیل پاسخ منطبق‌تر به شار

حرارت محسوس در برهم‌کنش دریا-خشکی، وزن‌های بالاتری را برای این مناطق ثبت کرده‌اند. سواحل جنوبی دریای خزر با یک خطای سیستماتیک فراگیر در نوار عرضی $36^{\circ}N$ تا $38^{\circ}N$ ، کارایی تمام GCM‌ها را به‌طور یکپارچه کاهش داده است. عبور سامانه‌های سرد شمالی از روی پهنه گرم خزر و جذب شدید رطوبت، به یک صعود همرفتی عمیق در برخورد آبی با رشته‌کوه البرز ختم می‌شود (شکل ۵). تفکیک درشت مدل‌ها و هموارسازی کوهساری محلی باعث می‌شود الگوریتم‌های آب-خشکی توانایی بازتولید این دینامیک متلاطم را نداشته باشند. روش‌های مقیاس‌کاهی آماری نظیر BCSD ذاتاً فاقد قابلیت خلق بارش در غیاب واداشت‌های دینامیکی صریح در مدل هستند و لذا خطای سیستماتیک قابل‌توجهی را در این مناطق به‌وجود می‌آورند.

وابستگی کارایی مدل‌ها به ویژگی‌های محلی، اهمیت بسیار پایین استفاده از میانگین حسابی ساده را در تولید یک چند مدلی همادی برای بارش پیچیده ایران را اثبات می‌کند. تفاوت‌های بنیادین در فیزیک ابر و تفکیک مؤثر توپوگرافیک ایجاب می‌کند که معماری مدل‌های همادی منحصراً بر پایه وزن‌های مکان-محور نمایی تولید شوند. همان‌طور که در این تحقیق دیده شد تخصیص وزن بالا به مدل‌های خانواده MPI در ارتفاعات غربی و جبران متقاطع ضعف‌ها با مدل‌های ACCESS در فلات مرکزی، بهینه‌سازی فضایی بارش را در روش‌هایی نظیر مدل نمایی تضمین می‌کند (شکل ۵).



شکل ۵. پراکنش مکانی وزن‌های مکان محور در ساختار همادی چندمدلی (NEX-GDDP) برای بازتولید بارش ایران طی دوره تاریخی ۱۹۸۰-۲۰۱۴ (واحد: مقادیر وزن‌ها تحت شرط $\sum w_i = 1$ نرمال‌سازی شده‌اند).

۳-۴. مقایسه بارش بازتولیدشده مدل‌های منفرد NEX-

GDDP در برابر مدل همادی وزن‌دار نمایی و داده

مشاهداتی GPCC در ایران

توزیع مکانی بارش در ایران تابع گرادیان‌های شدید واداشت‌های کوهساری است که در مجموعه داده مشاهداتی GPCC طی دوره ۱۹۸۰-۲۰۱۴ قابل مشاهده است. ساحل جنوبی دریای خزر و دامنه‌های شمالی البرز با مقداری در بازه ۹۸۵ تا بیش از ۱۳۰۰ میلی‌متر کانون اصلی بیشینه بارش ایران را تشکیل می‌دهند. این تمرکز شدید رطوبتی در امتداد رشته‌کوه زاگرس به صورت هسته‌های بارشی متصل با مقادیر ۴۸۰ تا ۸۶۰ میلی‌متر امتداد می‌یابد. افت ناگهانی رطوبت در سمت بادپناه این ارتفاعات، مناطق داخلی، دشت کویر و دشت لوت را در پایین‌ترین طبقه بارشی با مقادیر ۴۱ تا ۱۶۷ میلی‌متر قرار داده است. سواحل جنوبی خلیج فارس و دریای عمان نیز با حاکمیت سامانه‌های محلی، دامنه بارشی ۱۶۷ تا ۲۳۰ میلی‌متر را تجربه می‌کنند (شکل ۶). ساختار دوقطبی خشک-مرطوب ایران، شرایط بسیار مناسبی را برای ارزیابی رفتار مدل‌های گردش کلی در شبیه‌سازی بیلان آب فراهم می‌کند. بررسی ۲۸ مدل GCM از مجموعه NEX-GDDP-CMIP6 در مواجهه با تضاد ذاتی بارش ایران بسیار متنوع است. این تغییرات را می‌توان از کاهش واریانس مکانی و همگن‌سازی بارش به راحتی مشاهده کرد. بیشتر مدل‌ها گستره وسیعی از ایران را در طبقات بارشی ۱۶۷ تا ۳۵۰ میلی‌متر نشان می‌دهند. در مناطق خشک داخلی که مشاهدات مقادیر بین ۴۱ تا ۱۶۷ میلی‌متر را ثبت کرده‌اند، مدل‌هایی نظیر MIROC6، CNRM-CM6-1 و IPSL-CM6A-LR مقادیر کاذبی عمدتاً نزدیک به ۲۳۰ میلی‌متر و حتی بیشتر شبیه‌سازی کرده‌اند. این اریبی مرطوب (Wet Bias) ریشه در خطای مدل‌های سطح خشکی LSM (Land Surface Model) و برآورد فراتر از واقعیت تبخیر-تعرق پتانسیل در سطوح با سپیدایی بالا دارد. تزریق کاذب شار گرمای نهان به لایه مرزی جو، یک چرخه بازخورد مثبت رطوبتی ایجاد کرده و ناپایداری‌های استاتیکی جو را به شکل بارش‌های کاذب

در چنین مناطقی تخلیه می‌کند. معادلات خردفیزیک ابر در این مدل‌ها با بروز پدیده باران‌ریزه (Drizzle)، رطوبت اندک انتقالی را به جای حفظ در تروپوسفر، پیش از موعد و به صورت بارش‌های سبک مداوم به سطح زمین می‌رسانند.

تخلیه زود هنگام رطوبت در مناطق خشک و نیمه خشک همودار داخلی، توان مدل‌ها را در بازتولید بیشینه‌های بارش کوهساری به شدت کاهش داده است. در نوار ساحلی خزر، هیچ یک از ۲۸ مدل نتوانسته‌اند از آستانه ۶۰۰ میلی‌متر عبور کنند. این کم‌برآوردی قابل توجه معادل ۵۰ درصد از کل بارش است یعنی مدل‌های NEX-GDDP-CMIP6 در سواحل جنوبی دریای خزر یک اریبی خشک قابل توجه را در پرباران‌ترین نقطه کشور دارند (شکل ۶). تفکیک افقی پایین مدل‌ها در تفکیک مرز خشکی و آب، گرادیان حرارتی و شار گرمای نهان ناشی از سطح نسبتاً گرم دریای خزر را از بین می‌برد. رشته کوه البرز در مدل‌ها (توپوگرافی هموار شده) به عنوان یک مانع مؤثر عمل نکرده و پارامتری‌سازی لایه مرزی سیاره‌ای PBL (Planetary Boundary Layer) در محاسبه تلاطم‌های مکانیکی و انتقال قائم تکانه ناکام می‌ماند. لذا جابه‌جایی توده‌های هوای مرطوب از روی این موانع بدون صعود کافی، هسته‌های بارشی فراتر از ۱۰۰۰ میلی‌متر را در خروجی مدل‌ها از بین برده است و به عبارتی مدل‌ها نتوانستند بارش این پهنه از کشور را به درستی بازتولید کنند.

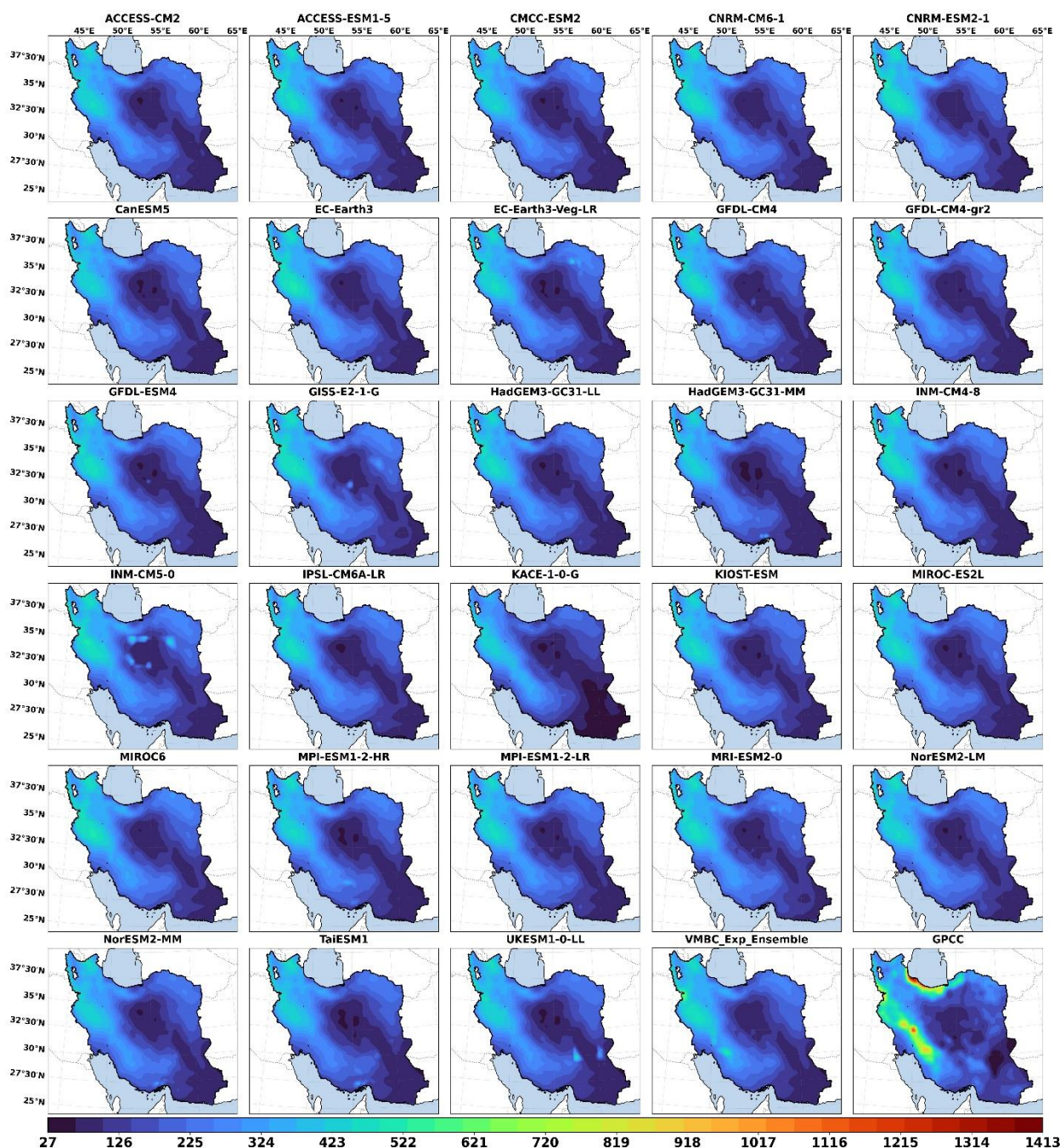
مدل همادی تولید شده توانسته است الگوی کلی بارش در کشور و به خصوص زاگرس را به خوبی نمایان سازد. مدل همادی وزنی در اینجا دقیقاً مشابه یک فیلتر پایین گذر عمل کرده است. هسته‌های بارش در بازه ۱۱۷۴ تا ۱۳۶۳ میلی‌متری سواحل گیلان و مازندران در خروجی مدل همادی همانند مدل‌های منفرد دیده نمی‌شود و بیشینه بارش این پهنه در حدود ۵۰۰ میلی‌متر است (شکل ۶). این مقدار کم‌برآوردی برای یک منطقه جغرافیایی مهم در ایران همانند سواحل جنوبی دریای خزر هر چند پایین است اما باید توجه کرد روش BCSD نمی‌تواند فقدان سازوکارهای

سطح نسبتاً هموار دیده می‌شوند و در نتیجه، واداشت‌های غیرخطی کوهساری (Non-linear Orographic Forcing) و صعود مکانیکی توده‌های هوا (هاوز، ۲۰۱۲) در شبکه اصلی آنها به درستی بازتولید نمی‌شود. از آنجا که الگوریتم BCSD نمی‌تواند پدیده‌های میان‌مقیاسی را که از ابتدا در فیزیک شبکه پایه مدل غایب بوده‌اند از طریق روابط آماری خلق کند، این خلأ اطلاعاتی منجر به توزیع اریبی حتی پس از فرایند مقیاس‌کاهی می‌شود.

در نقطه مقابل، ارزیابی‌ها نشان می‌دهد مدل‌هایی که از ابتدا با شبکه پایه بهتری داشتند، ارزش افزوده فیزیکی بالاتری در بازتولید بارش مناطق پیچیده به‌همراه دارند. به‌عنوان مثال، مدل‌هایی نظیر HadGEM3-GC31-MM (با تفکیک افقی 0.83×0.56 درجه قوسی)، EC-Earth3 (با تفکیک 0.7×0.7 درجه قوسی)، MPI-ESM1-2-HR (با تفکیک 0.9×0.9 درجه قوسی) و CMCC-ESM2 (با تفکیک افقی 0.93×1.25 درجه قوسی) ساختار توپوگرافی، خطوط ساحلی و مرزهای ترمودینامیکی خشکی-آب را با دقت بسیار بالاتری در شبکه ذاتی خود پارامتری‌سازی می‌کنند. در نتیجه، خطای سیستماتیک اولیه در این مدل‌ها در مواجهه با شیب‌های تند البرز و زاگرس کمتر بوده و فرایند مقیاس‌کاهی اعمال شده در پروژه NEX-GDDP روی آنها، به تولید گرادیان‌های مکانی دقیق‌تر و نزدیک‌تر به مشاهدات منجر شده است. بنابراین، بخش قابل توجهی از عدم قطعیت‌های بازتولید مقدار بارش و ناتوانی در ثبت دقیق هسته‌های بارشی، مستقیماً به فاصله هندسی بین شبکه ذاتی GCM ها و شبکه 0.25 درجه قوسی محصول نهایی باز می‌شود. شکافی که روش‌های آماری، قادر به جبران کامل محدودیت‌های فیزیکی آن نیستند.

فیزیکی خرد مقیاس، از جمله بستار شار جرمی (Mass Flux Closure) و ضعف در طرح‌واره‌های همرفتی را جبران کند. خروجی نهایی مدل همادی توسعه داده شده نشان می‌دهد که محدودیت‌های ذاتی دینامیک و فیزیک GCM های فعلی، مانع از شبیه‌سازی دقیق واداشت‌های محلی در مناطق کوهستانی و ساحلی با گرادیان‌های تند می‌شود.

در کنار محدودیت‌های فیزیکی و دینامیکی یاد شده، یکی از عوامل کلیدی در بروز خطاهای سیستماتیک و اریبی‌ها، تفاوت فاحش در تفکیک افقی ذاتی (Native Grid Resolution) هر یک از GCM ها است (جدول ۱). مجموعه داده NEX-GDDP-CMIP6 خروجی تمامی ۲۸ مدل را با استفاده از روش‌های آماری به یک شبکه هدف مشترک با تفکیک 0.25 درجه قوسی (حدود ۲۵ کیلومتر) مقیاس‌کاهی کرده است. با این حال، مقدار خطای تولید شده از این فرایند مقیاس‌کاهی، برای همه مدل‌ها یکسان نیست. مقیاس‌کاهی آماری داده‌هایی که در شبکه پایه خود گاهاً تفکیک افقی بسیار درشتی دارند، با تولید خطاهای مصنوعی (Interpolation Artifacts) و هموارسازی بیش‌ازحد (Oversmoothing) واریانس مکانی همراه است. به‌عنوان نمونه، مدل IPSL-CM6A-LR با تفکیک افقی پایه $1/3 \times 2/5$ درجه قوسی قادر به حل دینامیکی گرادیان‌های تند توپوگرافی در زاگرس و البرز نیست. این ضعف در مدل‌های با تفکیک بسیار پایین‌تر نظیر CanESM5 و MIROC-ES2L ($2/8 \times 2/8$ درجه قوسی) و مدل INM-CM4-8 ($2 \times 1/5$ درجه قوسی) به مراتب مشهودتر است. در این دسته از مدل‌ها، رشته‌کوه‌ها در مازول جوی (Atmospheric Module) به‌صورت یک



شکل ۶. پراکنش مکانی بارش بازتولید شده مدل‌های منفرد NEX-GDDP و همادی وزن‌دار نمایی (Exp-Ensemble) در ایران برابر داده‌های GPCC طی دوره تاریخی ۱۹۸۰-۲۰۱۴ (واحد: میلی‌متر/سال)

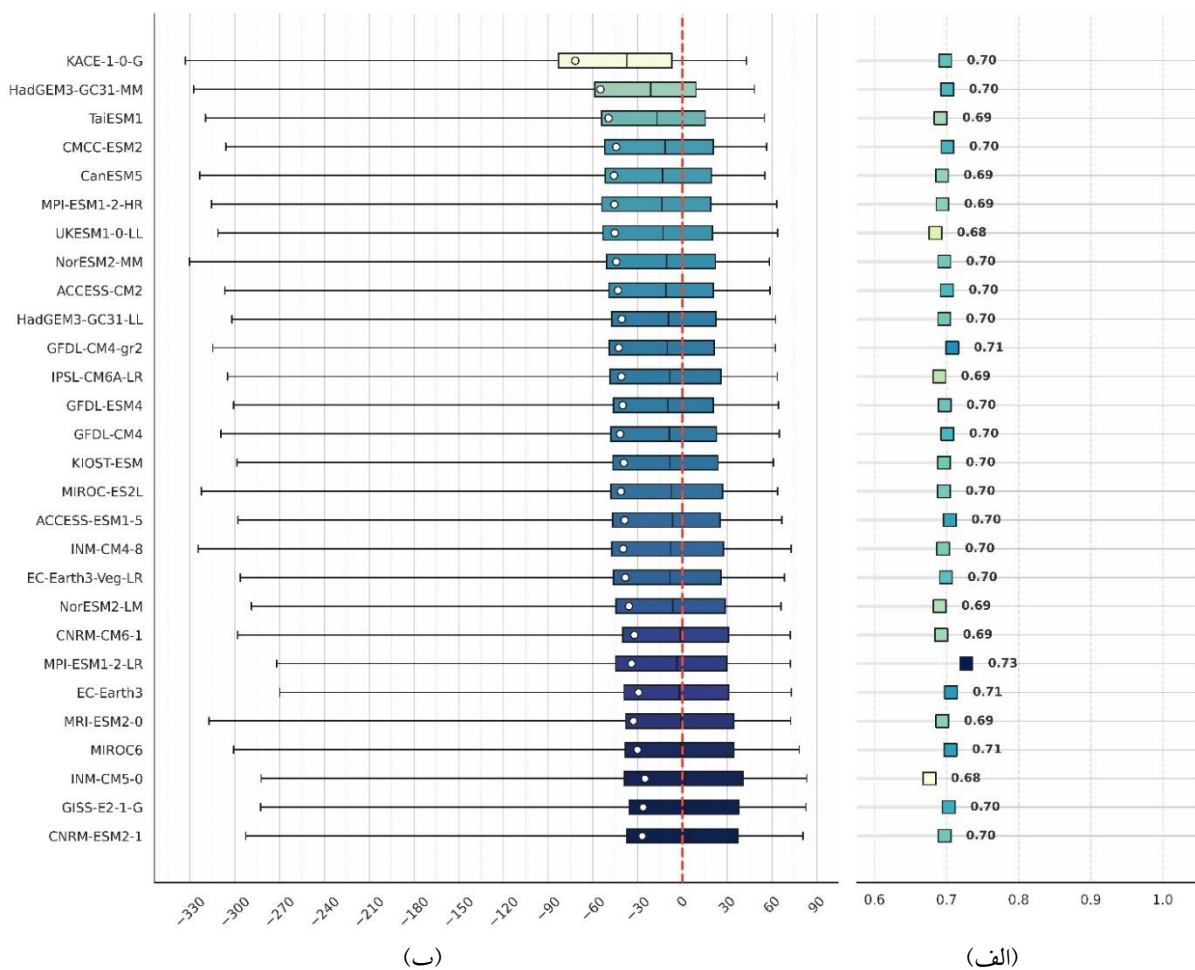
می‌دهد (شکل ۷). پس از آن، مدل‌های GFDL-CM4-EC-Earth3، gr2 و MIROC6 ضریب همبستگی ۰/۷۱ را نشان داده‌اند. کمینه همبستگی در مدل‌های UKESM1-0-LL و INM-CM5-0 با مقدار ۰/۶۸ ثبت شده است. این دامنه همبستگی نشان می‌دهد که دینامیک گردش‌های جوی شبیه‌سازی‌شده در مجموعه مدل‌های NEX-GDDP، الگوهای توزیع کلان‌مقیاس بارش را در ایران به‌درستی

۳-۵. ارزیابی خطای سیستماتیک و تطابق فضایی بازتولید بارش در ایران نسبت به داده مرجع GPCC ضرایب همبستگی فضایی ۲۸ مدل مقیاس‌کاهی‌شده NEX-GDDP در بازتولید بارش ایران طی دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴، یک دامنه آماری میان ۰/۶۸ تا ۰/۷۳ دارد. مدل MPI-ESM1-2-LR با همبستگی ۰/۷۳ دقیق‌ترین انطباق ساختاری را با گرادیان‌های مکانی بارش کشور ارائه

بازتولید کرده‌اند.

کارایی بالا در بازنمایی الگوهای مکانی بارش، تضمین‌کننده درستی برآورد مقادیر مطلق بارش نیست. توزیع خطای سیستماتیک مدل‌ها همان‌طور که پیش‌تر گفته شد یک کم‌برآوردی سیستماتیک را در ایران آشکار می‌سازد. میانه و میانگین اریبی در بیشتر مدل‌ها در دامنه منفی تثبیت شده است. گستره این اختلاف از ۷۰ میلی‌متر تا ۳۰۰- میلی‌متر متغیر است. کشیدگی دنباله‌های توزیع خطا در مدل‌هایی نظیر KACE-1-0-G، NorESM2-MM، MIROC-ES2L و INM-CM4-8 تا ۳۳۰- میلی‌متر نیز توسعه می‌یابد. این بیشینه خطای منفی مستقیماً نتیجه محاسبات نقطه شبکه‌های مستقر در مناطقی با توپوگرافی

پیچیده البرز، زاگرس و سواحل جنوبی دریای خزر است. ضعف ذاتی شبکه‌های اقلیمی در پارامترسازی بارش‌های کوهساری و دینامیک همرفت‌های محلی، هسته اصلی این کم‌برآوردی‌های شدید است. مدل KACE-1-0-G وسیع‌ترین دامنه عدم قطعیت و بیشینه اریبی منفی را تولید کرده است. گروهی دیگر از مدل‌ها شامل CNRM-MIROC6، INM-CM5-0، GISS-E2-1-G، ESM2-1-MPI-ESM1-2-LR و EC-Earth3، MRI-ESM2-0 توزیع مقارن‌تری حول مبدأ صفر شکل داده‌اند. مدل MPI-ESM1-2-LR با بالاترین همبستگی فضایی (۰/۷۳) و کمترین انحراف مقداری از مبدأ، بهترین مدل در متوسط پهنه‌ای کشور در بازتولید بارش بوده است (شکل ۷).



شکل ۷. ارزیابی کارایی ۲۸ مدل مقیاس‌کاهی شده مجموعه NEX-GDDP در بازتولید بارش ایران (۱۹۸۰-۲۰۱۴). الف) ضریب همبستگی فضایی بارش در متوسط پهنه‌ای کشور؛ ب) توزیع آماری اریبی بارش (میلی‌متر) نسبت به داده مرجع GPCC همراه با میانه و میانگین.

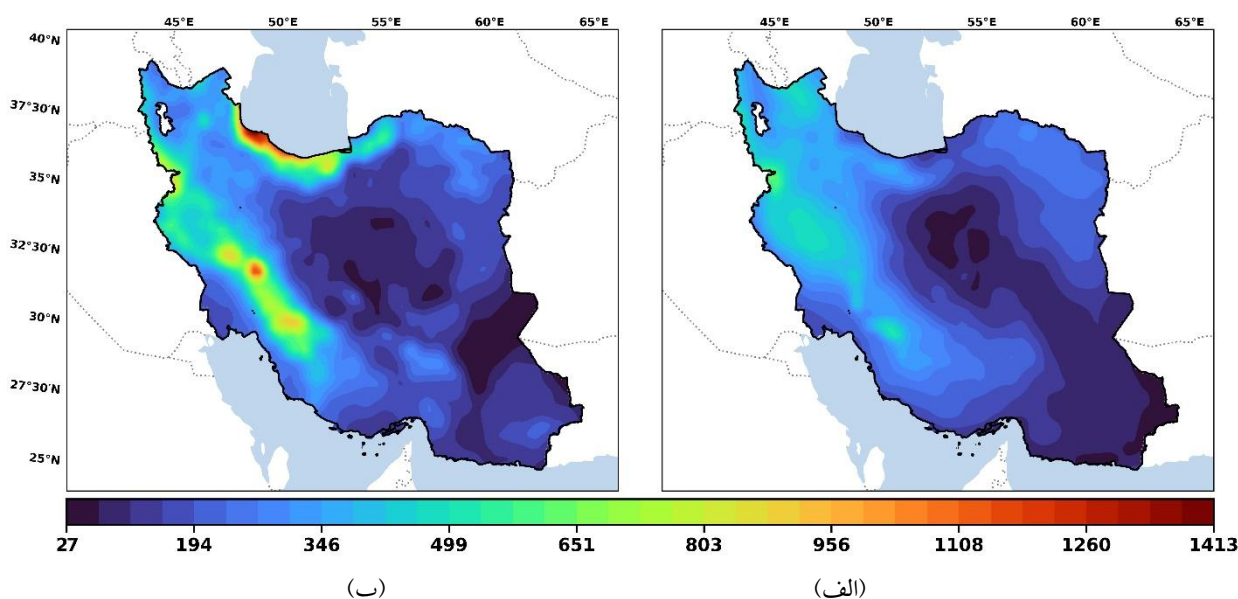
۳-۶. بارش بازتولید شده مدل همادی وزن‌دار نمایی

(Exp-Ensemble) در برابر مجموعه داده GPCC

توزیع مکانی بارش در ایران در دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ محصول تقابل واداشتهای مختلف است. داده‌های مشاهداتی GPCC در امتداد زاگرس با ثبت هسته‌های بارشی ۴۸۰ تا ۸۶۰ میلی‌متر به روشنی نشان می‌دهند. همادی وزن‌دار نمایی مستخرج از ۲۸ مدل پروژه NEX-GDDP، الگوی کلان این گرادیان کوهساری و اثر سایه بارش در مناطق مرکزی و دشت لوت را با مقادیر بارش کمتر از ۱۶۰ میلی‌متر با دقت قابل توجهی بازتولید کرده است. تطابق خروجی همادی با توزیع فضایی بارش در نواحی داخلی، بیانگر توانمندی مدل‌های مورد بررسی در شبیه‌سازی بارش در این منطقه است. تغییرات بارش در نوار ساحلی جنوب عمدتاً تحت کنترل سامانه‌های همرفتی محلی و نفوذ موسمی تابستانه قرار دارد. خروجی چندمدلی در این مناطق مقادیر ۱۶۷ تا ۲۳۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد که با مشاهدات تطابق دارد. ضعف ساختاری و سیستماتیک شبیه‌سازی در نوار باریک عرض‌های ۳۶°N تا ۳۸°N در سواحل جنوبی دریای خزر قابل مشاهده است. داده‌های GPCC در این منطقه مقادیر ۱۰۰۰ تا ۱۳۰۰ میلی‌متری را نشان می‌دهد اما

خروجی همادی با برآورد مقادیری در بازه ۴۸۱ تا ۶۰۰ میلی‌متری را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده یک کم‌برآوردی قابل توجه و خطای سیستماتیک بیش از ۵۰ درصدی است (شکل ۸).

سازوکار فیزیکی این خطای قابل توجه به تقابل جریانات شمالی-شمال‌شرقی از پهنه آبی دریای خزر با رشته‌کوه البرز باز می‌شود که ارتفاع آن در فاصله کمتر از ۵۰ کیلومتری از خط ساحل به بیش از ۳۰۰۰ متر می‌رسد. مدل‌های گردش کلی حتی پس از اعمال مقیاس‌های آماری در پروژه NEX-GDDP پاسخ فیزیکی دقیقی از این توپوگرافی ندارند و رشته‌کوه البرز را در قالب یک توپوگرافی هموار پردازش می‌کنند. طرحواره‌های فیزیک ابر و همرفت در مدل‌های گردش کلی فاقد تفکیک لازم برای محاسبه فرایندهای کوهساری سریع و تخلیه ناگهانی رطوبت در یک نوار بسیار باریک همانند آنچه در سواحل جنوبی دریای خزر شاهد آن می‌باشیم، هستند (شکل ۸). روش‌های تصحیح اریبی نظیر BCSD منحصراً مبتنی بر توابع توزیع احتمال عمل کرده و خطای پایه در شبیه‌سازی فاز سامانه‌های همدید را صرفاً در مقیاس مکانی کوچک‌تر توزیع می‌کنند. این تکنیک‌های آماری مقیاس‌گاهی توانایی جبران فیزیک مفقوده در GCMها را ندارند.



شکل ۸. پراکنش مکانی بارش مدل همادی وزن‌دار نمایی (Exp-Ensemble) در ایران در برابر داده‌های مشاهداتی GPCC طی دوره تاریخی ۱۹۸۰-۲۰۱۴ (واحد: میلی‌متر/سال). (الف) مدل همادی و (ب) داده GPCC.

۴. نتیجه‌گیری

ارزیابی مدل‌های گردش کلی (GCMs) مقیاس کاهی شده NEX-GDDP منفرد در شبیه‌سازی بارش، خطاهای سیستماتیک را در پارامترسازی‌های خردفیزیکی آشکار می‌سازد. واکاوی آماری ۲۸ مدل فاز ششم (CMIP6) تحت مجموعه NEX-GDDP نشان می‌دهد که ضریب همبستگی فضایی با داده‌های مشاهداتی پایگاه GPCC در بازه $0.2 \leq R \leq 0.5$ است و انحراف معیار نرمال‌شده نوساناتی بین ۰/۷ تا ۱/۳ را نشان داده است. نتایج نشان از یک اریبی خشک فراگیر با مقادیر بین ۲۵- تا ۵۰- میلی‌متر برای تمامی مدل‌های منفرد است. این کم‌برآوردی‌ها، به‌ویژه در نوار ساحلی دریای خزر و دامنه‌های رشته‌کوه البرز، ناشی از ضعف‌های ساختاری در مدل‌های گردش کلی در بازتولید فرایندهای همرفتی و توپوگرافی پیچیده این مناطق است. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) دامنه‌ای بین ۱۲۷ تا ۱۵۵ میلی‌متر را بر گرفته است. به‌طوری‌که مدل‌هایی نظیر KACE-1-0-G و CMCC-ESM2 خطایی فراتر از ۱۵۰ میلی‌متر را ثبت کرده‌اند. تولید چندمدلی همادی وزن‌دار نمایی با فیلتر کردن نویزهای تصادفی، ریشه میانگین مربعات خطا را به $RMSE \approx 108$ و اریبی سیستماتیک را به ۲۳- میلی‌متر کاهش داده است. این رفتار آماری و چالش مدل‌های منفرد در بازتولید بارش مناطق دارای توپوگرافی پیچیده، هم‌راستا با یافته‌های سوفراتید و همکاران (۲۰۲۱) است که نشان دادند تولید چندمدلی همادی با تصحیح اریبی، خطای سیستماتیک مدل‌های CMIP6 را به شدت کاهش می‌دهد.

توزیع فضایی وزن‌های نمایی در چند مدلی همادی، واگرایی مدل‌های NEX-GDDP را نشان می‌دهد. طرحواره‌های همرفتی مدل MPI-ESM1-2-HR با دریافت وزنی فراتر از ۰/۰۵ در امتداد رشته‌کوه زاگرس، کارایی بالایی در شبیه‌سازی صعود مکانیکی توده‌های هوا نشان داده‌اند. پایداری ترمودینامیکی در عرض‌های $35^{\circ}N <$ توسط مدل‌هایی نظیر ACCESS-CM2 با دقت بالاتری پردازش شده است. یک خطای سیستماتیک یکپارچه در

نوار عرضی $36^{\circ}N$ تا $38^{\circ}N$ سواحل دریای خزر دیده می‌شود که ناشی از ناتوانی الگوریتم‌های سطح-خشکی (LSM) در تفکیک گرادیان حرارتی آب و فرایند کوهساری است.

بررسی ضرایب همبستگی فضایی ۲۸ مدل مقیاس کاهی شده NEX-GDDP در بازتولید بارش ایران طی دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴، نشان‌دهنده دامنه آماری مطلوب میان ۰/۶۸ تا ۰/۷۳ است. مدل MPI-ESM1-2-LR با همبستگی ۰/۷۳ دقیق‌ترین انطباق ساختاری را با گرادیان‌های مکانی بارش کشور ارائه می‌دهد. پس از آن، مدل‌های MIROC6 و EC-Earth3، GFDL-CM4-gr2 ضریب همبستگی ۰/۷۱ را نشان داده‌اند، در حالی که کمینه همبستگی در مدل‌های UKESM1-0-LL و INM-CM5-0 با مقدار ۰/۶۸ ثبت شده است. این دامنه همبستگی نشان می‌دهد که دینامیک گردش‌های جوی شبیه‌سازی‌شده، الگوهای توزیع کلان‌مقیاس بارش را در ایران به‌درستی بازتولید کرده‌اند. با این وجود، کارایی بالا در بازنمایی الگوهای مکانی، لزوماً تضمین‌کننده درستی برآورد مقادیر مطلق بارش نیست و توزیع خطای سیستماتیک مدل‌ها، یک کم‌برآوردی پهنه‌ای را در ایران آشکار می‌سازد.

ساختار دوقطبی خشک-مرطوب ایران، محدودیت‌های ذاتی فیزیک ابر را در مدل‌های فعلی به‌خوبی نشان می‌دهد. در حالی که میانگین بارش پهنه‌ای مشاهداتی ۲۴۷ میلی‌متر در سال است، مدل‌ها بازه ۱۸۳ تا ۲۲۴ میلی‌متر را برآورد کرده‌اند. میانه و میانگین اریبی در بیشتر مدل‌ها در دامنه منفی (بین ۷۰- تا ۳۰۰- میلی‌متر) تثبیت شده است. از یک سو، در مناطق خشک داخلی، داده‌های GPCC مقادیر ۴۱ تا ۱۶۷ میلی‌متر را ثبت کرده‌اند، اما مدل‌های منفرد نظیر MIROC6 و CNRM-CM6-1 با تزریق کاذب شار گرمای نهان و بروز پدیده باران‌ریزه، مقادیری فراتر از ۲۳۰ میلی‌متر را شبیه‌سازی کرده‌اند که یک اریبی مرطوب شدید است. از سوی دیگر، در مناطق دارای توپوگرافی پیچیده مانند البرز، زاگرس و سواحل جنوبی دریای خزر، هیچ‌یک از ۲۸ مدل نتوانسته‌اند از آستانه ۶۰۰ میلی‌متر عبور کنند (در

برابر هسته‌های ۹۸۵ تا ۱۳۰۰ میلی‌متری (GPCC) و یک کم‌برآوردی نزدیک به ۵۰ درصدی را رقم زده‌اند. کشیدگی دنباله‌های توزیع خطا در مدل‌هایی نظیر-KACE 1-0-G (با وسیع‌ترین دامنه عدم قطعیت)، NorESM2-MM، MIROC-ES2L و INM-CM4-8 تا ۳۳۰- میلی‌متر نیز توسعه می‌یابد که هسته اصلی آن، ضعف در پارامترسازی بارش‌های کوهساری و دینامیک همرفت‌های محلی است. در مقابل، گروهی از مدل‌ها نظیر-CNRM ESM2-1، GISS-E2-1-G و خصوصاً-MPI-ESM1-2-LR توزیع مقارن‌تری حول مبدأ صفر شکل داده‌اند. در کنار محدودیت‌های فیزیکی و دینامیکی یاد شده، یکی از عوامل کلیدی در بروز این خطاهای سیستماتیک، تفاوت فاحش در تفکیک افقی شبکه پایه هر یک از مدل‌های CMIP6 است. به عنوان نمونه، مدل‌های CanESM5، INM-CM4-8، IPSL-CM6A-LR، MIROC-ES2L قادر به حل دینامیکی گرادیان‌های تند توپوگرافی در زاگرس و البرز نیستند. لذا واداشت‌های غیرخطی کوهساری و صعود مکانیکی توده‌های هوا (هاوز، ۲۰۱۲) به‌درستی تولید نمی‌شود. از آنجا که الگوریتم BCSD نمی‌تواند پدیده‌های میان‌مقیاسی را که از ابتدا در فیزیک شبکه پایه غایب بوده‌اند از طریق روابط آماری بازتولید کند، این خلأ اطلاعاتی منجر به توزیع اریبی، حتی پس از فرایند مقیاس‌کاهی می‌شود.

با توجه به چالش‌های کلیدی مدل‌ها در شبیه‌سازی دقیق مقادیر مطلق بارش و تأثیر انکارناپذیر تفکیک افقی شبکه پایه در بازتولید اریبی‌ها، کاهش عدم قطعیت‌های ساختاری از طریق تولید چندمدلی همادی که در این تحقیق نشان داده شد، امری ضروری است. ارتقای نسبت سیگنال به نویز از طریق این رویکرد، یافته‌های ژائو و همکاران (۲۰۲۴) و ارزیابی‌های ژائو و همکاران (۲۰۲۰a) را در خصوص ضرورت استفاده از رویکردهای چندمدلی همادی برای سیاست‌گذاری‌های کلان اقلیمی کاملاً اثبات می‌کند. همان‌طور که ارزیابی‌ها نشان داد، بهره‌گیری از مدل‌هایی

مانند MPI-ESM1-2-LR (با بالاترین همبستگی فضایی و کمترین انحراف مقداری) در ترکیب با سایر مدل‌های همسو، کارایی چندمدلی همادی را بهبود می‌بخشد. از این‌رو، استفاده از چندمدلی همادی و تکنیک‌های وزن‌دهی مانند روش نمایی برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و پیش‌نگری بارش در ایران و سایر مناطق مشابه با توپوگرافی پیچیده، رویکردی ضروری و کارآمد ارزیابی می‌شود.

مراجع

آزاد، ن. و احمدی، آ. (۱۴۰۲). پیش‌نگری متغیرهای دما و بارش حوضه آبریز خزر با ارزیابی تأثیر روش‌های تصحیح اریبی و به‌کارگیری همادی مدل‌های اقلیمی CMIP6. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۹(۴)، ۱۹۸-۱۷۲.

خان سالاری، س. و محمدی، س. ع. (۱۴۰۲). پیش‌نگری بارش‌های فرین در ایران بر اساس رویکرد همادی مدل‌های CMIP6 در آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶) با وزن‌دهی مبتنی بر رتبه. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۹(۳)، ۷۲۷-۷۴۶.

شاهی، ع.؛ صلاحی، ب. و نجفی، م. س. (۱۴۰۴). پیش‌نگری رخداد‌های بارش سنگین شمال‌غرب ایران با به‌کارگیری مقیاس‌کاهی آماری برون‌داد مدل‌های منتخب CMIP6 با نرم‌افزار CMHyd. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۵۱(۲)، ۴۵۳-۴۷۶.

عالمزاده، ش.؛ احمدی گیوی، ف.؛ محب‌الحجه، ع. ر. و یازجی، د. (۱۳۹۶). ساختار هندسی جت آفریقا-آسیا در وردسپهر زبرین و پاسخ آن به گرمایش زمین در مدل‌های CMIP5. *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۱(۳)، ۱-۲۱.

عسگری، ا.؛ باعقیده، م.؛ انتظاری، ع. ر.؛ حسینی، م. و کامیار، ا. (۱۴۰۱). تحلیل تغییرات حجم مخزن و جریان ورودی به سد دز تحت شرایط تغییر اقلیم. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۴(۳)، ۳۶۵-۳۸۴.

- Abiodun, B. J., Mogebeisa, T. O., Petja, B., Abatan, A. A., & Roland, T. R. (2020). Potential impacts of specific global warming levels on extreme rainfall events over southern Africa in CORDEX and NEX-GDDP ensembles. *International Journal of Climatology*, 40(6), 3118–3141.
- Christensen, J. H., & Christensen, O. B. (2007). A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Climatic Change*, 81(1), 7–30.
- Giorgi, F., & Mearns, L. O. (2002). Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the “Reliability Ensemble Averaging” (REA) method. *Journal of Climate*, 15(10), 1141–1158.
- Hill, T., Lewicki, P., & Lewicki, P. (2006). *Statistics: methods and applications: a comprehensive reference for science, industry, and data mining*. StatSoft, Inc.
- Hodson, T.O. (2022). Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not, *Geoscientific Model Development*, 15, 5481–5487.
- Houze Jr, R. A. (2012). Orographic effects on precipitating clouds. *Reviews of Geophysics*, 50(1).
- Huang, J., Yu, H., Guan, X., Wang, G., & Guo, R. (2017). Dryland climate change: Recent progress and challenges. *Reviews of Geophysics*, 55(3), 719–778.
- IPCC. (2013). *Climate change 2013: the physical science basis*. In T. F. Stocker et al. (Eds.), *Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press.
- Jain, S., Salunke, P., Mishra, S. K., Sahany, S., & Choudhary, N. (2019). Advantage of NEX-GDDP over CMIP5 and CORDEX Data: Indian Summer Monsoon. *Atmospheric Research*, 228, 152–160.
- Karl, T. R., Melillo, J. M., Peterson, T. C., & Hassol, S. J. (Eds.). (2009). *Global Climate Change Impacts in the United States*. Cambridge University Press.
- Knutti, R., & Sedláček, J. (2013). Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change*, 3, 369–373.
- Kreft, S., Eckstein, D., & Melchior, I. (2016). *Global Climate Risk Index 2017: Who Suffers Most from Extreme Weather Events? Weather-Related Loss Events in 2015 and 1996 to 2015*. Germanwatch Nord-Süd Initiative eV.
- Kumar, P., Kumar, S., Barat, A., Sarthi, P. P., & Sinha, A. K. (2020). Evaluation of NASA's NEX-GDDP-simulated summer monsoon rainfall over homogeneous monsoon regions of India. *Theoretical and Applied Climatology*, 141, 1–16.
- Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A.M., Chandler, R.E., Kendon, E.J., Widmann, M., Brienen, S., Rust, H.W., Sauter, T., Themeßl, M., & Venema, V.K. (2010). Precipitation downscaling under climate change: recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, 48(3), 1–34.
- Min, S., & Hense, A. (2006). A Bayesian approach to climate model evaluation and multi-model averaging with an application to global mean surface temperatures from IPCC AR4 coupled climate models. *Geophysical Research Letters*, 33, L08708.
- Pepler, A. S., Alexander, L. V., Evans, J. P., & Sherwood, S. C. (2016). Zonal winds and southeast Australian rainfall in global and regional climate models. *Climate Dynamics*, 46(1–2), 123–133.
- Pfahl, S., O’Gorman, P. A., & Fischer, E. M. (2017). Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. *Nature Climate Change*, 7(6), 423–427.
- Rao, K. K., Al Mandous, A., Al Ebri, M., Al Hameli, N., Rakib, M., & Al Kaabi, S. (2024). Future changes in the precipitation regime over the Arabian Peninsula with special emphasis on UAE: insights from NEX-GDDP CMIP6 model simulations. *Scientific Reports*, 14(1), 151.
- Rao, K. K., Kulkarni, A., Patwardhan, S., Kumar, B. V., & Kumar, T. V. L. (2020). Future changes in precipitation extremes during northeast monsoon over south peninsular India. *Theoretical and Applied Climatology*, 141, 1–15.
- Sharma, T., Vittal, H., Chhabra, S., Salvi, K., Ghosh, S., & Karmakar, S. (2018). Understanding the cascade of GCM and downscaling uncertainties in hydro-climatic projections over India. *International Journal of Climatology*, 38, e178–e190.
- Sheffield, J., Goteti, G., & Wood, E. F. (2006). Development of a 50-yr high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling. *Journal of Climate*, 19(13), 3088–3111.
- Storelvmo, T., Leirvik, T., Lohmann, U., Phillips, P. C., & Wild, M. (2016). Disentangling greenhouse warming and aerosol cooling to reveal Earth’s climate sensitivity. *Nature Geoscience*, 9(4), 286.
- Supharatid, S., Aribarg, T., & Nafung, J. (2021). Bias-corrected CMIP6 climate model projection over Southeast Asia. *Theoretical and Applied Climatology*, 147, 1–21.

- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 485–498.
- Thrasher, B., Maurer, E. P., McKellar, C., & Duffy, P. B. (2012). Technical Note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3309–3314.
- Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A., Melton, F., Lee, T., & Nemani, R. (2022). NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. Scientific Data, 9, Article 262.
- Warnatzsch, E. A., & Reay, D. S. (2019). Temperature and precipitation change in Malawi: evaluation of CORDEX-Africa climate simulations for climate change impact assessments and adaptation planning. *Science of the Total Environment*, 654, 378–392.
- Zhao, C., Gong, J., Wang, H., Wei, S., Song, Q., & Zhou, Y. (2020a). Changes of temperature and precipitation extremes in a typical arid and semiarid zone: Observations and multi-model ensemble projections. *International Journal of Climatology*, 40(1), 1–26.
- Zhao, Y., Li, Z., Cai, S., & Wang, H. (2020b). Characteristics of extreme precipitation and runoff in the Xijiang River Basin at global warming of 1.5 °C and 2 °C. *Natural Hazards*, 101(3), 1–20.
- Ziese, M., Rauthe-Schöch, A., Becker, A., Finger, P., Rustemeier, E., & Schneider, U. (2021). *GPCC Full Data Daily Version 2020 at 1.0°: Daily Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges Built on GTS-Based and Historic Data*. Global Precipitation Climatology Centre at Deutscher Wetterdienst: Offenbach, Germany.