



Golestan University



Journal of the Climate Change Research

Scientific Journal of Golestan University
Vol. 4, No. 16, Winter 2024



Assessment of Pooled CMIP6 Climate Models for estimation of Intensity-Frequency of 24-hour precipitation in Iran

Ameneh Mianabadi^{1*}, Mohammad Mehdi Bateni², Morteza Babaei³

¹ Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran, Email: ammianabadi@gmail.com, a.mianabadi@kgut.ac.ir

² University School for Advanced Studies Pavia, Piazza della Vittoria 15, 27100 Pavia, Italy

³ Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 2023-10-16
Accepted: 2023-11-26

Keywords:
IDF curves
CMIP6
Pooling
Median

ABSTRACT

Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves are crucial in the design of water and hydraulic infrastructures. These curves are estimated based on rainfall data collected by rain gauge stations. However, due to global climate change, the intensity and frequency of extreme events can be altered. Hence, the existing IDF curves may not be reliable for the design of infrastructures and should be revised based on more recent data. Climate models can be used to investigate the impact of climate change on IDF curves. Typically, after developing the IDF curves from each climate model, the final curve used is extracted based on the median of the data. This study explores the use of five CMIP6 climate models to estimate the intensity-frequency curves of 24-hour rainfall at 12 stations in Iran. In addition to evaluating each model individually, this study also assesses the combined output of the models and compares its results with the curve obtained from the median of the data. Evaluation metrics such as mean error (ME), root mean square error (RMSE) and relative error (RE) indicated that among the studied models, the CMCC-CM2-SR5 model provides a better estimate of the 24-hour rainfall intensity at most stations, likely due to its finer resolution. Furthermore, pooling the models and estimating the IDF curve with the pooled data yielded better results than the median method and most of the individual models, particularly for longer return periods. This suggests that using pooled data from multiple models could improve the accuracy of IDF curve estimates.

Cite this article: Mianabadi, A., Bateni, M.M., Babaei, M. (2023). Assessment of Pooled CMIP6 Climate Models for estimation of Intensity-Frequency of 24-hour precipitation in Iran. *Journal of the Climate Change Research*, 4 (16), 1-20.



©The author(s)

Publisher: Golestan University

Doi: 10.30488/CCR.2023.421019.1166



ارزیابی خروجی ادغام شده مدل‌های اقلیمی CMIP6 برای تخمین شدت - فراوانی بارش‌های ۲۴ ساعته در ایران

آمنه میان‌آبادی^{۱*}، محمدمهدی باطنی^۲، مرتضی بابایی^۳

^۱ گروه اکولوژی، پژوهشکده علوم محیطی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران، رایانامه: a.mianabadi@kgut.ac.ir, ammianabadi@gmail.com

^۲ پژوهشگر، انستیتوی مطالعات پیشرفته (IUSS)، پاویا، ایتالیا

^۳ موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی (IDF) از جمله ابزارهای مهم در طراحی سازه‌های آبی و
مقاله کامل علمی	هیدرولیکی هستند. این منحنی‌ها براساس داده‌های بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی تخمین زده می‌شوند. اما تغییر اقلیم می‌تواند بر شدت و فراوانی وقوع پدیده‌های حدی مانند بارش‌های شدید تأثیرگذار باشد. بنابراین، منحنی‌های IDF موجود ممکن است برای طراحی سازه‌ها قابل اعتماد نباشند و باید مجدداً بر اساس داده‌های جدیدتر تخمین زده شوند. بر اساس خروجی مدل‌های اقلیمی می‌توان اثر تغییر اقلیم بر منحنی‌های IDF را بررسی نمود. برای این کار معمولاً پس از استخراج منحنی‌های IDF از هر مدل اقلیمی، منحنی نهایی مورد استفاده بر اساس میانه (median) داده‌ها استخراج می‌شود. در این مطالعه، ۵ مدل اقلیمی از مدل‌های اقلیمی آخرین گزارش کمیته بین‌الدول تغییر اقلیم (CMIP6) انتخاب شده و دقت آنها در تخمین منحنی‌های شدت-فراوانی بارش ۲۴ ساعته در ۱۲ ایستگاه در ایران ارزیابی شد. همچنین، علاوه بر ارزیابی هر مدل، خروجی ادغام شده (pooled) مدل‌ها نیز مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج آن با منحنی حاصل از میانه داده‌ها مقایسه شد. معیارهای خط‌سنجی شامل خطای میانگین (ME)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای نسبی (RE) نشان داد که از بین مدل‌های مورد بررسی، مدل CMCC-CM2-SR5 در اغلب ایستگاه‌ها بهتر از سایر مدل‌ها شدت بارش ۲۴ ساعته را تخمین می‌زند که این مسئله می‌تواند به دلیل توان تفکیک بهتر این مدل باشد. همچنین ادغام مدل‌ها و تخمین منحنی IDF با داده‌های ادغام شده نتایج بهتری از روش میانه و همچنین از اغلب مدل‌ها به‌ویژه در دوره‌های بازگشت طولانی‌تر به همراه داشت.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۷/۲۴	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۹/۵	
واژه‌های کلیدی:	
منحنی‌های IDF	
CMIP6	
ادغام	
میانه	
استناد: میان‌آبادی، آمنه؛ باطنی، محمدمهدی؛ بابایی، مرتضی. (۱۴۰۲). ارزیابی خروجی ادغام شده مدل‌های اقلیمی CMIP6 برای تخمین شدت - فراوانی بارش‌های ۲۴ ساعته در ایران. نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۴ (۱۶)، ۲۰-۱.	
ناشر: دانشگاه گلستان	Doi: 10.30488/CCR.2023.421019.1166
© نویسندگان	



مقدمه

سیلاب یکی از بلاهای طبیعی است که تقریباً همه ساله در نقاط مختلف ایران رخ می‌دهد (Mianabadi, 2023). وقوع این پدیده خسارات مالی و جانی بسیاری در کشور به همراه داشته است و زیرساخت‌های مهم، محصولات و زمین‌های کشاورزی و اقتصاد کشور راتحت تاثیر قرار داده است. مهار سیلاب و کاهش خسارات ناشی از آن اغلب با ساخت سازه‌های آبی و هیدرولیکی مدیریت می‌شود. برای طراحی سازه‌های مختلف آبی تخمین دقیق سیلاب طرح اهمیت بسیاری دارد (Venkatesh et al., 2022). یکی از رویکردهای متداول در محاسبه سیلاب طرح، استفاده از روابط شدت، مدت و فراوانی بارش است. در هیدرولوژی برای تعیین ارتباط این مشخصات بارش از منحنی‌های IDF (Intensity-Duration-Frequency) استفاده می‌شود. این منحنی‌ها در واقع رابطه بین شدت، مدت و فراوانی بارش را به صورت گرافیکی نشان می‌دهند (Koutsoyiannis et al., 1998). برای تخمین این منحنی‌ها ابتدا باید برای هر مدت بارش معین (در مقیاس یک دقیقه تا چند روز) حداکثر بارش سالانه (Annual Maximum Precipitation (AMP)) را استخراج کرده و سپس با برازش یک تابع توزیع حدی مناسب بر آن احتمال وقوع هر شدت خاصی از بارش را محاسبه کرد. به این ترتیب با داشتن مقادیر شدت بارش و احتمال وقوع (یا دوره بازگشت) متناظر با آن، برای هر مدت معینی از بارش، منحنی مربوطه را می‌توان به شکل گرافیکی ارائه کرد.

منحنی‌های IDF معمولاً با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده بارش در ایستگاه‌های باران‌سنجی تهیه می‌شوند (Marra et al., 2017; Noor et al., 2021). هرچه تعداد سال‌های آماری موجود بیشتر باشد، سری زمانی طولانی‌تری از حداکثر بارش سالانه وجود خواهد داشت و منحنی برازش یافته بر این سری‌ها با دقت بیشتری فراوانی وقوع را تخمین می‌زنند. این مسئله به ویژه در دوره‌های بازگشت طولانی‌تر اهمیت پیدا می‌کند. از آنجا که ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارش پراکنندگی مکانی مناسبی ندارند، در

سال‌های اخیر استفاده از داده‌های شبکه‌بندی شده بارش برای تخمین منحنی‌های IDF مورد توجه قرار گرفته است. به عنوان مثال، برخی از محققان به ارزیابی محصولات ماهواره‌ای بارش برای تخمین منحنی‌های IDF پرداخته‌اند (Mianabadi, 2023; Noor et al., 2021; Ombadi et al., 2018; Venkatesh et al., 2022). برخی دیگر از محققان نیز از خروجی مدل‌های اقلیمی برای تخمین این منحنی‌ها استفاده کرده‌اند (Abduljaleel & Demissie, 2021; Ayugi et al., 2021; Crévolin et al., 2023; Luo et al., 2022; Ragno et al., 2018; Sarkar & Maity, 2022). از سوی دیگر باید توجه داشت که تغییر اقلیم شدت و فراوانی وقوع بارش‌های حدی را تحت تاثیر قرار داده و بنابراین طراحی سازه‌های آبی با منحنی‌هایی که بر اساس داده‌های گذشته تولید شده است می‌تواند کارآیی لازم را در کنترل کاهش ریسک سیلاب نداشته باشد (Cheng & AghaKouchak, 2015; Ghasemi Tousi et al., 2009; Sugahara et al., 2021). در نتیجه باید منحنی‌های IDF را با استفاده از داده‌های بارش جدیدتر به روز کرده و سازه‌های آبی را بر مبنای منحنی‌های جدید و با در نظر گرفتن اثر تغییر اقلیم طراحی نمود (Khazaei et al., 2019; Lau & Behrangi, 2022; Martel et al., 2021).

علاوه بر تغییرات رخ داده در دهه‌های گذشته، در آینده نیز اقلیم زمین دستخوش دگرگونی خواهد شد. تغییر اقلیم می‌تواند بر متغیرهای مختلف اقلیمی از جمله شدت و فراوانی وقوع بارش در آینده نیز تاثیر قابل توجهی داشته باشد که این اثرات را می‌توان با استفاده از خروجی مدل‌های اقلیمی بررسی نمود. شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی با استفاده از مدل‌های مختلف اقلیمی تا به حال در فازهای مختلفی در اختیار کاربران قرار گرفته است. مطالعات پیشین اغلب از مدل‌های ارائه شده در فازهای ۳ و ۵ (CMIP3) و CMIP5 استفاده نموده و به بررسی اثر تغییر اقلیم پرداخته‌اند (Almagro et al., 2020; Maxino et al., 2014; Rana et al., 2008). اخیراً خروجی این مدل‌ها در فاز ۶ (CMIP6) توسط هیات بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) ارائه شده است (Eyring et al., 2016) و

حوضه آبریز در آمریکا بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که ادغام مدل‌ها نتایج بهتری از روش میانگین‌گیری به دست می‌دهد. بر این اساس، هدف مطالعه حاضر، ارزیابی روش ادغام مدل‌های اقلیمی در مقایسه با روش میانه در ۱۲ ایستگاه منتخب در کشور با استفاده از خروجی مدل‌های اقلیمی گزارش ششم می‌باشد. انتخاب این ۱۲ ایستگاه به دلیل اهمیت آنها از نظر تراکم جمعیت و ارزش‌های اجتماعی-اقتصادی آنها می‌باشد. چرا که با توجه به جمعیت زیاد این شهرها و نیز وجود مراکز مهم صنعتی، تجاری و فرهنگی در آنها، وقوع سیل منجر به خسارات مالی و جانی زیادی می‌شود.

در این مطالعه، ۵ مدل اقلیمی از مدل‌های اقلیمی آخرین گزارش کمیته بین‌الدول تغییر اقلیم (CMIP6) انتخاب شده و دقت آنها در تخمین منحنی‌های شدت-فراوانی بارش ۲۴ ساعته در ۱۲ ایستگاه در ایران ارزیابی شد. همچنین، علاوه بر ارزیابی هر مدل، خروجی ادغام شده (pooled) مدل‌ها نیز مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج آن با منحنی حاصل از میانه داده‌ها مقایسه شد. ارزیابی نتایج حاصل با استفاده از معیارهای خطاسنجی شامل خطای میانگین (ME)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای نسبی (RE) انجام شد.

مواد و روش‌ها

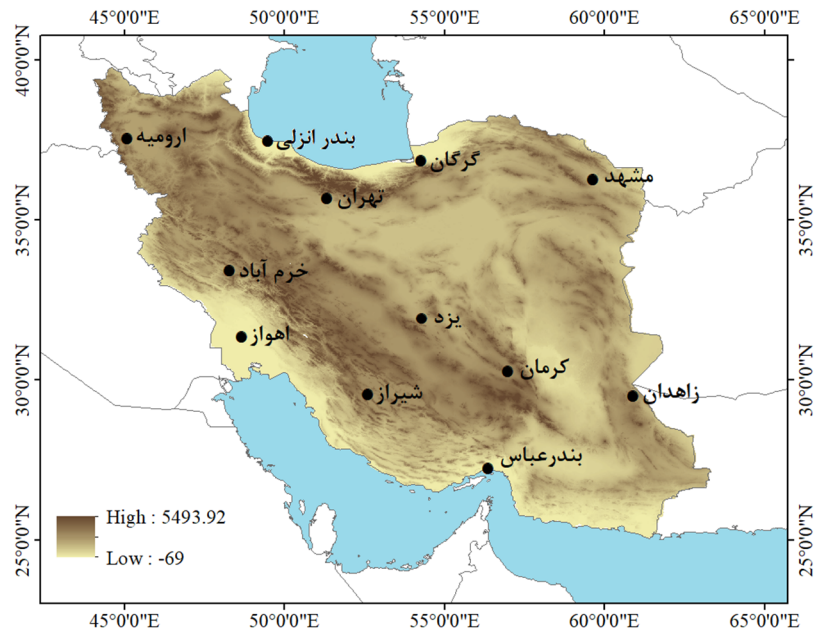
منطقه مورد مطالعه: کشور ایران (شکل ۱) مساحتی حدود ۱۶۴۸۰۰۰ کیلومتر مربع را در جنوب غرب آسیا در بر می‌گیرد. این کشور به دلیل موقعیت دریای خزر، دریای عمان و خلیج فارس و رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس دارای تنوع اقلیمی زیادی است (Sanjani et al., 2011). بر اساس طبقه بندی شاخص خشکی هیبریدی (Oskouei et al., 2022) و طبقه بندی دومارتن (de Martonne, 1925) بیشتر بخش‌های کشور ایران در طبقه گرم و خشک قرار دارد. میزان بارش متوسط کشور ۲۵۰ میلی‌متر در سال است که تقریباً یک سوم میانگین بارش جهان می‌باشد. متوسط دما از حدود ۱۰ درجه سلسیوس در غرب کشور تا ۳۵

محققان از این مدل‌ها به طور گسترده در تحقیقات خود استفاده می‌نمایند (Doulabian et al., 2021; Sarkar & Maity, 2022; Wang et al., 2023). مطالعات نشان داده است که مدل‌های فاز ششم دقت بیشتر و عدم قطعیت کمتری نسبت به مدل‌های فازهای قبلی دارند (Carvalho et al., 2022; Gusain et al., 2020; Khadka et al., 2022; Rivera & Arnould, 2020). بنابراین در این مطالعه از خروجی مدل‌های اقلیمی فاز ششم برای تخمین منحنی‌های IDF استفاده شد.

در مطالعات گذشته پس از تعیین منحنی‌های IDF با هر یک از مدل‌های اقلیمی، در نهایت برای داشتن منحنی نهایی از روش میانگین‌گیری استفاده می‌شد. به این ترتیب که میانه یا میانگین منحنی‌های استخراج شده از مدل‌های اقلیمی محاسبه شده و منحنی نهایی IDF حاصل می‌شود. هرچند (Srivastava et al., 2021) معتقد بودند که استفاده از روش میانه می‌تواند دقت تخمین شدت بارش را کاهش و عدم قطعیت آن را افزایش دهد. این مسئله به‌ویژه زمانی اهمیت می‌یابد که دوره آماری موجود برای هر مدل کمتر از دوره‌های بازگشت مورد بررسی باشد. چرا که اغلب مدل‌ها دوره آماری کمتر از ۱۰۰ سال دارند و لذا تخمین شدت بارش برای دوره‌های بازگشت طولانی (به عنوان مثال ۵۰ و ۱۰۰ سال) دارای خطای بیشتری خواهد بود (Sadegh et al., 2018). بنابراین (Srivastava et al., 2021) پیشنهاد کردند که بهتر است به جای تخمین منحنی‌های IDF برای هر مدل و سپس استفاده از میانه آنها، تمام داده‌های AMP مدل‌ها را با هم ادغام (pooling) و یک سری زمانی (با تعداد داده‌های بیشتر) تولید نمود. سپس تابع توزیع حدی را بر این سری زمانی برآزش داده و در نهایت یک منحنی IDF تهیه شود. توجیه ایشان برای استفاده از روش ادغام این است که هر مدل می‌تواند بخشی از فرآیندهای فیزیکی سیستم زمین را نمایش دهد و بنابراین با ادغام آنها با یکدیگر (به‌ویژه مدل‌های دقیق‌تر) اغلب این فرآیندهای فیزیکی مورد توجه قرار گرفته و در نتیجه می‌توان به نتایج بهتری دست یافت. آنها پیشنهاد خود را در دو

برای انجام تحقیق حاضر، ۱۲ ایستگاه منتخب به نمایندگی از اقلیم‌های مختلف کشور مورد بررسی قرار می‌گیرد. موقعیت این ایستگاه‌ها در شکل ۱ و خصوصیات اقلیمی آنها در جدول ۱ نشان داده شده است.

درجه سلسیوس در مرکز متغیر است. با وجود چنین اقلیمی، کشور ایران همواره با چالش‌های آبی روبه‌رو بوده است. اما در سال‌های اخیر با توجه به اثرات تغییر اقلیم و افزایش فراوانی وقوع سیل و خشکسالی در کشور و همچنین افزایش فعالیت‌های انسانی، این چالش‌ها بیشتر شده است (Mianabadi et al., 2023).



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه.

جدول ۱- مشخصات اقلیمی ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	بارش (میلی‌متر در سال)	دما (°C)	اقلیم (بر مبنای روش دومارتن)
اهواز	۲۲۹	۲۵/۷	خشک
بندرعباس	۱۷۲	۲۷	خشک
بندر انزلی	۱۷۷۲	۱۶/۴	بسیار مرطوب
گرگان	۵۷۳	۱۷/۸	مدیترانه ای
کرمان	۱۳۶	۱۶	خشک
خرم‌آباد	۴۹۳	۱۷/۱	نیمه خشک
مشهد	۲۵۲	۱۴/۷	نیمه خشک
ارومیه	۳۳۳	۱۱/۴	نیمه خشک
شیراز	۳۲۱	۱۸	نیمه خشک
تهران	۲۳۸	۱۷/۷	خشک
یزد	۵۷	۱۹/۴	خشک
زاهدان	۷۸	۱۸/۶	خشک

شد. داده‌های بارش در تمام ایستگاه‌ها از سال ۱۹۵۹ موجود است، اما به دلیل هماهنگی با داده‌های

داده‌ها: داده‌های بارش روزانه برای ایستگاه‌های همدیدی منتخب از سازمان هواشناسی کشور دریافت

شده و سپس از آنها در مطالعات آب و هواشناسی و هیدرولوژی استفاده شود. مدل‌های اقلیمی توسط سازمان فضایی آمریکا (NASA) به مقیاس 0.25×0.25 ریزمقیاس شده است (Thrasher et al., 2022) که خروجی ریزمقیاس نمایی شده از سایت <https://www.nccs.nasa.gov/services/data-products/nex-gddp-collections/land-based-cmip6> قابل دسترسی می‌باشد. برای استخراج داده بارش شبیه‌سازی شده برای هر ایستگاه، اطلاعات مربوط به سلول‌هایی که هر ایستگاه در آن قرار داشت، به‌عنوان مقدار بارش آن ایستگاه در نظر گرفته شد.

شبیه‌سازی شده مدل‌های اقلیمی، دوره آماری مورد بررسی سال‌های ۱۹۶۵ تا ۲۰۱۴ (۵۰ سال) انتخاب شد. مدل‌های اقلیمی انتخاب شده در این مطالعه شامل BCC-CSM2-MR، CNRM-CM6-1، CMCC-CM2-SR5، GFDL-ESM4 و MRI-ESM2-0 هستند که داده‌های بارش شبیه‌سازی شده این مدل‌ها در دوره پایه (historical) بر اساس گزارش ششم (CMIP6) برای مطالعه حاضر استفاده شد. مشخصات این مدل‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. یکی از مشکلات عمده استفاده از خروجی‌های مدل‌های GCM اندازه سلول بزرگ شبیه‌سازی آنها در هر منطقه است. بنابراین ابتدا باید خروجی آنها ریزمقیاس

جدول ۲- مشخصات مدل‌های اقلیمی استفاده شده در مطالعه حاضر

مدل	مرکز توسعه دهنده مدل	کشور	توان تفکیک افقی (عرض جغرافیایی/درجه)	توان تفکیک افقی (طول جغرافیایی/درجه)
BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	چین	۱/۱۲۵	۱/۱۲۵
CNRM-CM6-1	National Center of Meteorological Research	فرانسه	۱/۴	۱/۴
CMCC-CM2-SR5	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici	ایتالیا	۱	۱
GFDL-ESM4	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	ایالات متحده آمریکا	۱/۲۵	۱
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute	ژاپن	۱/۱۲۵	۱/۱۲۵

منحنی شدت-فراوانی بارش ۲۴ ساعته: برای تخمین منحنی‌های IDF از برازش یک تابع توزیع حدی مناسب بر داده‌های حداکثر بارش استفاده می‌شود. تابع توزیع مقدار حدی تعمیم یافته (Generalized Extreme Value (GEV)) یکی از توابعی است که می‌تواند به خوبی بر سری مقادیر حدی از جمله مقادیر بارش حداکثر برازش یابد (Coles et al., 2001; Crévolin et al., 2023). مطالعات بسیاری نیز از این تابع توزیع برای تولید منحنی‌های IDF استفاده نموده‌اند (Cheng & AghaKouchak, 2015; Guhathakurta et al., 2011; Ragno et al., 2018; Shrestha et al., 2017). تابع توزیع GEV با رابطه زیر تعریف می‌شود:

اصلاح اریبی: پیش از استفاده از خروجی مدل‌های اقلیمی، ابتدا با استفاده از روش چندکی (quantile-based) اصلاح اریبی (bias correction) بر روی آنها انجام شد. فاکتور اصلاح اریبی (f_{bc}) برای سری‌های فوق برای هر ایستگاه با نسبت مقدار λ در سری AMP ایستگاه ($AMP_{S(i,l)}$) به مقدار λ در سری AMP مدل اقلیمی ($AMP_{M(i,l)}$) به دست می‌آید (معادله ۱):

$$f_{bc} = \frac{AMP_{S(i,l)}}{AMP_{M(i,l)}}$$

در این معادله، i مبین ایستگاه مورد نظر است. بعد از محاسبه فاکتور اصلاح اریبی برای هر سال، متوسط مقادیر فاکتور محاسبه و در مقادیر اصلی سری AMP حاصل از مدل‌ها ضرب می‌شود و سری اصلاح اریبی شده به دست می‌آید.

(معادله ۲):

$$F(x) = \exp \left[- \left(1 + k \frac{(x-\mu)}{\sigma} \right)^{\frac{1}{k}} \right]$$

در این تابع k ، μ و σ پارامترهای شکل، مکان و مقیاس هستند. پس از برازش تابع توزیع $F(x)$ بر داده‌های حداکثر بارش ۲۴ ساعته در هر ایستگاه، دوره بازگشت برای هر شدت معین بارش (I) با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_I = \frac{1}{1-F_I} \quad (\text{معادله ۳})$$

سپس با داشتن مقادیر شدت بارش و دوره بازگشت متناظر آن منحنی شدت-فراوانی برای بارش ۲۴ ساعته در هر ایستگاه و برای هر مدل اقلیمی تعیین می‌شود.

روش ادغام: در اغلب مطالعات گذشته پس از اینکه منحنی IDF برای هر مدل اقلیمی به صورت جداگانه تهیه شد، در نهایت با محاسبه میانه (Median) شدت‌های مختلف بارش برای هر دوره بازگشت و تداوم بارش، یک منحنی IDF نهایی برای هر منطقه یا ایستگاه تخمین زده می‌شود (Abduljaleel & Demissie, 2021; Doulabian et al., 2023; Sarkar & Maity, 2022). در روش ادغام، به جای اینکه برای هر مدل یک منحنی تهیه شود، تمام داده‌های شدت بارش برای هر تداوم معین با همدیگر ادغام شده و یک سری زمانی از مقادیر شدت‌های بارش حاصل می‌شود (Srivastava et al., 2021). در این مطالعه هر مدل اقلیمی شامل ۵۰ داده مقدار شدت بارش ۲۴ ساعته در هر ایستگاه است که با ادغام همه ۵ مدل با هم، یک سری زمانی نهایی با $250 (5 \times 50)$ داده شدت بارش برای هر ایستگاه ایجاد می‌شود. در این حالت تابع توزیع GEV بر این سری نهایی برازش داده شده و در نهایت یک منحنی IDF در هر ایستگاه تولید می‌شود. سپس منحنی تولید شده با این روش با میانه منحنی‌های حاصل از هر مدل مقایسه و دقت آن ارزیابی می‌شود.

معیارهای خطاسنجی: برای بررسی دقت مدل‌های اقلیمی از معیارهای خطاسنجی شامل میانگین خطاها

(ME)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، و خطای نسبی (RE) استفاده شد.

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{im} - x_{ig})}{n} \quad (\text{معادله ۴})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{im} - x_{ig})^2}{n}} \quad (\text{معادله ۵})$$

$$RE = \frac{(x_{im} - x_{ig})}{x_{ig}} \times 100 \quad (\text{معادله ۶})$$

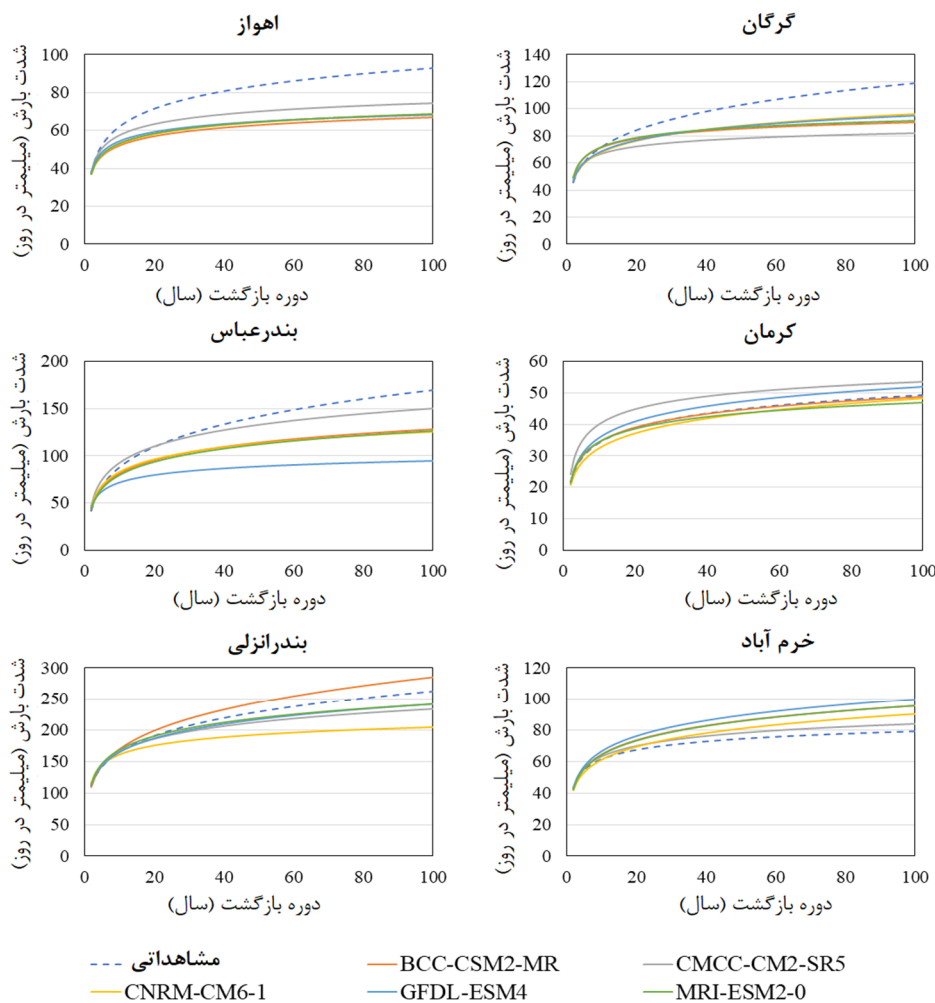
در این معادلات x_{im} و x_{ig} به ترتیب مقادیر متغیر تخمین زده شده توسط مدل و مشاهداتی در ایستگاه‌های منتخب در زمان i ، \bar{x}_m و \bar{x}_g متغیر متوسط تخمین زده شده توسط مدل و مشاهداتی در دوره زمانی موردنظر و n تعداد مشاهدات می‌باشد.

نتایج و بحث

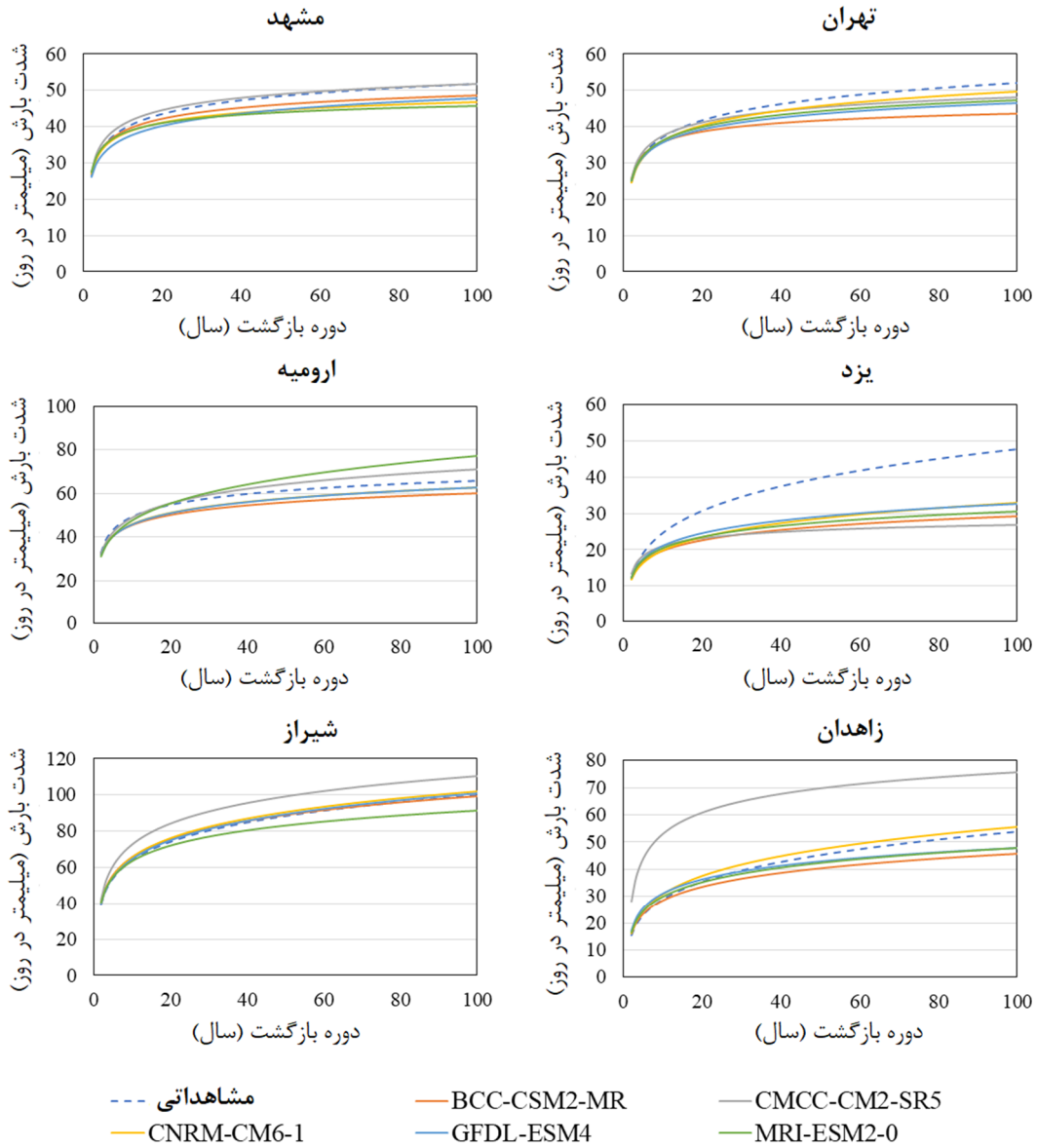
ارزیابی مدل‌های اقلیمی: شکل ۲ مقایسه دقت مدل‌های اقلیمی انتخابی در تخمین منحنی شدت-فراوانی بارش ۲۴ ساعته را برای ایستگاه‌های منتخب نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، برخی از مدل‌ها تخمین مناسبی از منحنی‌ها ارائه داده‌اند. دقت تخمین منحنی‌ها برای هر مدل اقلیمی و هر ایستگاه متفاوت است. به‌عنوان مثال در ایستگاه‌های کرمان، مشهد، تهران و شیراز اغلب مدل‌ها نتایج قابل قبولی به همراه داشته‌اند. در مقابل در ایستگاه اهواز، گرگان و یزد منحنی‌های حاصل به ویژه در دوره‌های بازگشت طولانی‌تر و شدت‌های بیشتر بارش در هیچ‌کدام از مدل‌ها دقت مناسبی ندارند. در مطالعات گذشته نیز اشاره شده است که اغلب مدل‌های اقلیمی در تخمین بارش‌های با شدت کمتر بهتر از بارش‌های شدیدتر عمل می‌کنند (Crévolin et al., 2023; Martel et al., 2021; Tang et al., 2023). شکل ۳ (شکل‌های پیوست: پ ۱، پ ۲، پ ۳) مقایسه بین مدل‌ها در هر ایستگاه را بر اساس آماره‌های ME، RMSE و RE نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نیز مشاهده می‌شود، دقت مدل‌ها از ایستگاهی به ایستگاه دیگر و از مدلی به مدل دیگر متفاوت است. در ایستگاه اهواز، بندرعباس، خرم‌آباد، مشهد و ارومیه، مدل CMCC-CM2-SR5 بهتر از بقیه مدل‌ها عمل کرده است. در ایستگاه کرمان، شیراز، یزد و زاهدان این مدل دقت کمتری از سایر

خطا و عدم قطعیت در خروجی مدل‌ها شود. چرا که در فرآیند ریزمقیاس‌نمایی میانگین اطلاعات یک سلول بزرگتر (به عنوان مثال اندازه سلول $1/4 \times 1/4$ در مدل (CNRM-CM6-1) به یک سلول کوچکتر ($0/25 \times 0/25$) و یا یک نقطه (ایستگاه) اختصاص داده می‌شود و بنابراین ممکن است بخشی از تغییرات آب و هوایی محلی در این فرآیند نادیده گرفته شود (Jentsch et al., 2013). از سوی دیگر فرآیند ریزمقیاس‌نمایی وابستگی بالایی به شرایط مرزی و اولیه که از مدل‌های اقلیمی جهانی گرفته می‌شود، دارد و بنابراین خطا در مدل جهانی مورد استفاده می‌تواند باعث رخداد خطا در خروجی ریزمقیاس‌نمایی شده شود.

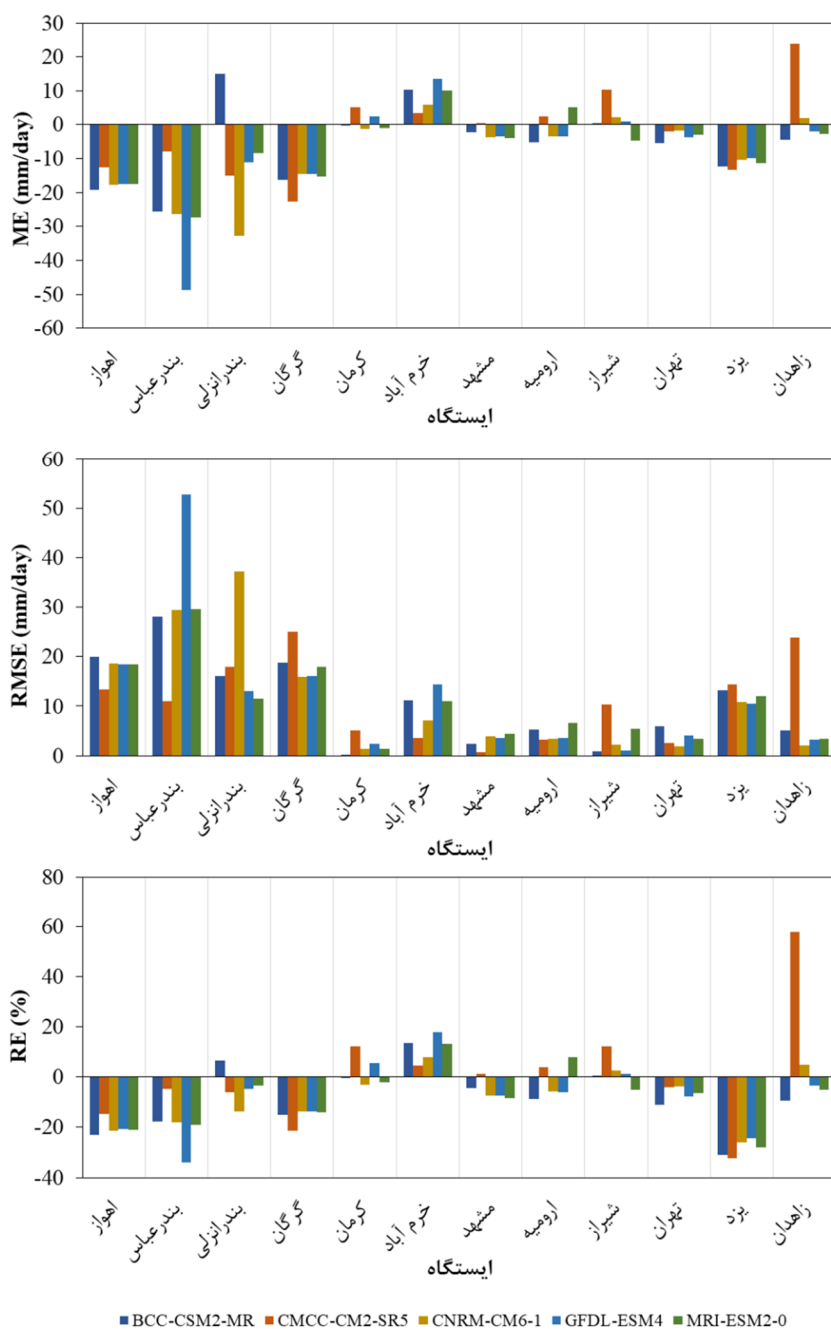
مدل‌ها داشته است. بیشترین خطای مدل‌ها به طور کلی برای ایستگاه‌های اهواز، بندرعباس، بندرانزلی و گرگان دیده می‌شود. نزدیکی به دریا می‌تواند بر حرکات همرفتی جو که عامل کلیدی در رخدادهای حدی است و باعث وقوع بارش‌های شدید در مقیاس محلی می‌شود، موثر باشد. این حرکات همرفتی اغلب توسط مدل‌های اقلیمی به خوبی آشکارسازی نمی‌شوند و بنابراین مدل‌های اقلیمی در تخمین بارش‌های شدید در مناطق نزدیک به دریا دارای خطای بیشتری هستند (Asadieh & Krakauer, 2015; Ban et al., 2021). همچنین باید توجه داشت که به‌طور کلی اثر هموارسازی (smoothing) در فرآیند ریزمقیاس‌نمایی و تبدیل اطلاعات پیکسل به ایستگاه نیز می‌تواند باعث افزایش



شکل ۲- مقایسه منحنی شدت-فراوانی بارش ۲۴ ساعته بر اساس داده‌های بارش مشاهده‌ای در ۱۲ ایستگاه منتخب و خروجی اصلاح‌اریبی شده مدل‌های اقلیمی.



شکل ۲- ادامه.

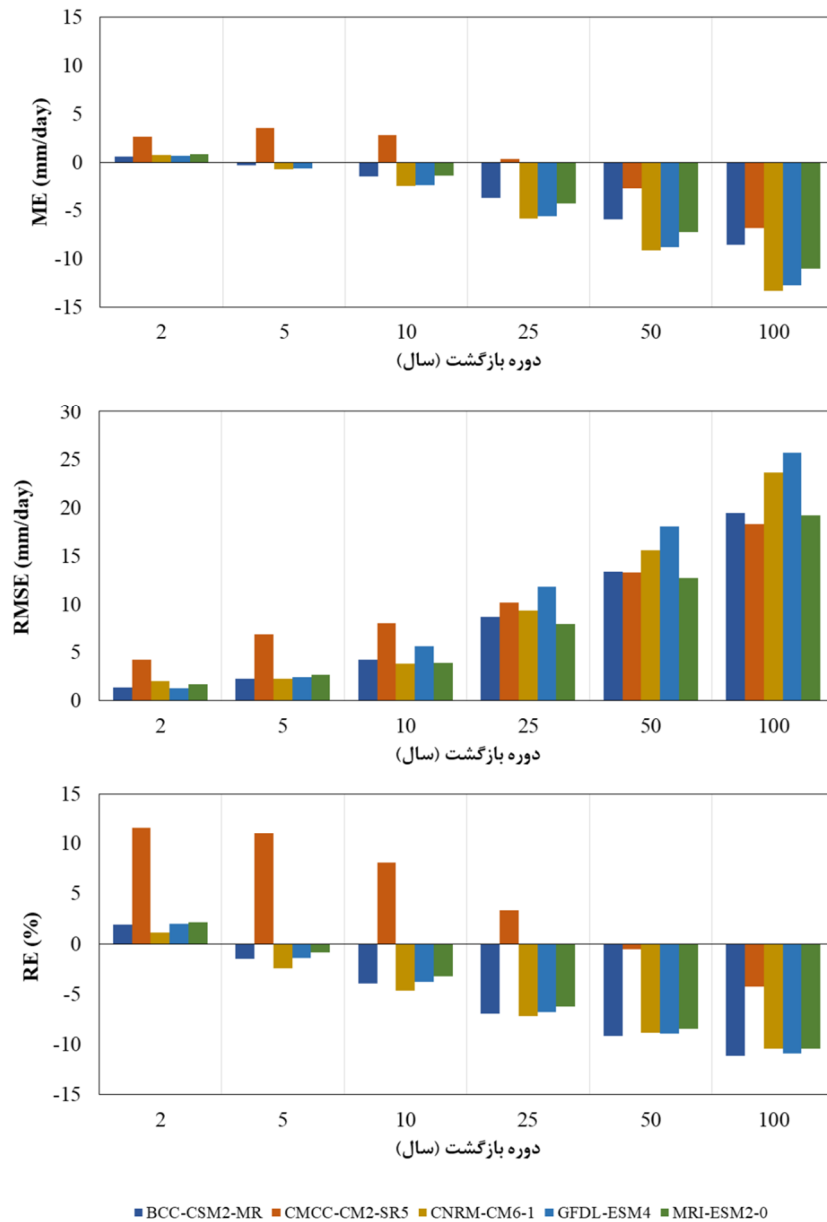


شکل ۳- ارزیابی خروجی اصلاح اریبی شده خروجی مدل‌های اقلیمی در تخمین مقادیر شدت بارش ۲۴ ساعته در هر ایستگاه بر اساس آماره‌های ME، RMSE و RE.

دارد، در دوره‌های بازگشت طولانی‌تر که مرتبط با شدت بیشتر بارش‌ها می‌باشد، بهتر از سایر مدل‌ها عمل کرده است. این مسئله نیز نشان می‌دهد که مدل‌های با توان تفکیک بالاتر، بهتر از سایر مدل‌ها

شکل ۴ ارزیابی مدل‌ها را برای دوره بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود، با افزایش طول دوره بازگشت دقت مدل‌ها کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. مدل CMCC-CM2-SR5 که بالاترین توان تفکیک را

بارش‌های شدید را که در مقیاس‌های کوچک شکل می‌گیرد، تخمین می‌زنند.



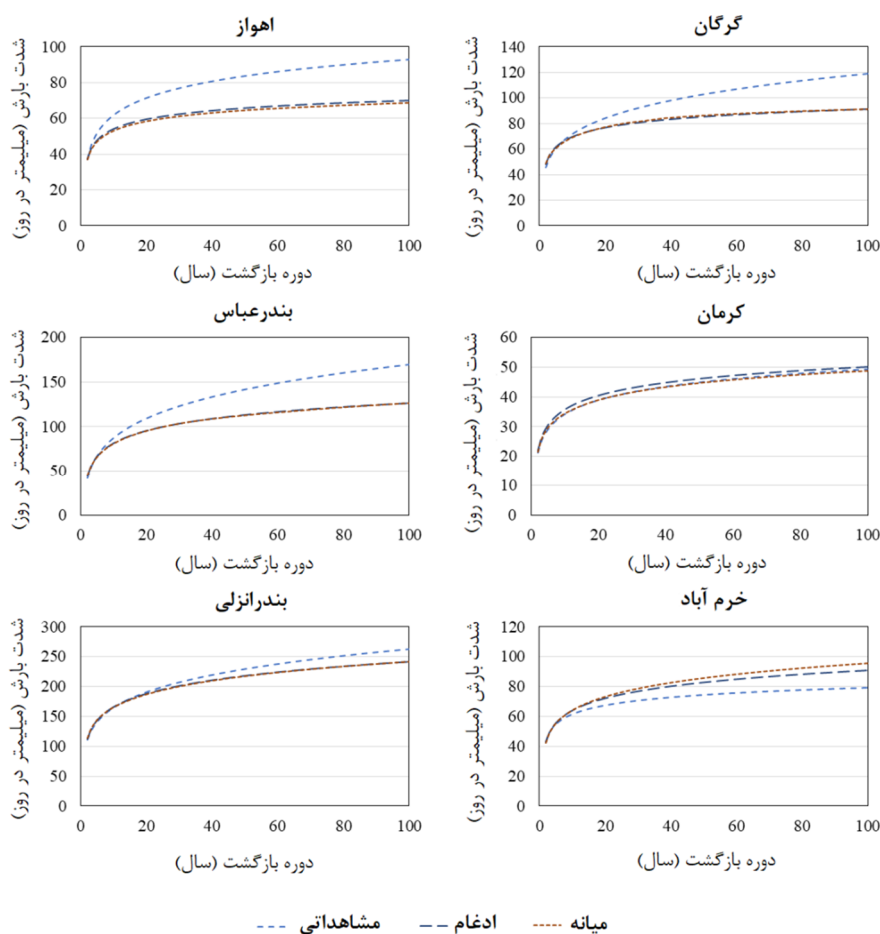
شکل ۴- ارزیابی خروجی اصلاح اریبی شده خروجی مدل‌های اقلیمی در تخمین مقادیر شدت بارش ۲۴ ساعته برای دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله بر اساس آماره‌های ME ، $RMSE$ و RE .

میان‌ه در تخمین حداکثر بارش ۲۴ ساعته عمل کرده و در سایر ایستگاه‌ها به جز زاهدان، روش میان‌ه اختلاف اندکی با روش ادغام دارد. به طور کلی بهترین نتایج در هر دو روش ادغام و میان‌ه در ایستگاه کرمان، مشهد، ارومیه، شیراز، و تهران دیده می‌شود که از آن میان در ایستگاه مشهد و ارومیه روش ادغام نتایج بهتری را به همراه داشته است (خطای نسبی (RE) حدود ۲

مقایسه روش ادغام با میان‌ه: شکل ۵ رابطه شدت- فراوانی بارش ۲۴ ساعته را برای ایستگاه‌های منتخب با دو روش ادغام و میان‌ه نشان می‌دهد. مقایسه این دو روش با استفاده از معیارهای آماری در شکل ۶ نشان داده شده است. مقادیر ME ، $RMSE$ و RE نشان می‌دهد که در ۶ ایستگاه اهواز، بندرعباس، بندرعباس، خرم‌آباد، مشهد و ارومیه روش ادغام بهتر از روش

بازگشت ۵۰ و ۱۰۰ بیشتر از دوره‌های بازگشت کمتر از ۵۰ است و هرچه تعداد سال‌های آماری بیشتر باشد، نتایج برای دوره‌های بازگشت مختلف از دقت بیشتری برخوردار خواهد بود. بنابراین چون طول سری حداکثر بارش ۲۴ ساعته سالانه با ادغام مدل‌ها بیشتر می‌شود (در این مطالعه ۵ مدل با ۵۰ سال داده که با ادغام آنها یک سری زمانی با ۲۵۰ داده حاصل شده است)، عدم قطعیت و خطا در تخمین شدت بارش در روش ادغام کاهش یافته و منحنی‌های IDF با دقت بیشتری تخمین زده می‌شود. مقایسه بین اشکال ۲ و ۵ و همچنین بین اشکال ۳ و ۶ نشان می‌دهد که مقادیر ME، RMSE و RE در روش ادغام و میانه نسبت به اغلب مدل‌ها کمتر بوده و لذا روش‌های ترکیبی نسبت به برخی از مدل‌ها دقت بالاتری در تخمین شدت بارش دارند.

درصد). مقایسه دو روش ادغام و میانه برای دوره‌های بازگشت مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود برای دوره‌های بازگشت طولانی‌تر از ۱۰ سال روش ادغام دقت بهتری از روش میانه در تخمین شدت بارش ۲۴ ساعته دارد. در دوره‌های بازگشت ۲ و ۵ سال نیز اختلاف چندانی بین دو روش مشاهده نمی‌شود. Srivastava و همکاران (۲۰۲۱) تاکید داشتند که استفاده از روش میانه می‌تواند باعث کم‌برآورد شدت بارش و افزایش عدم قطعیت نتایج به‌ویژه در دوره‌های بازگشت طولانی‌تر شود. این عدم قطعیت در مواردی که دوره آماری مورد نظر کمتر از طول دوره بازگشت باشد، بیشتر خواهد بود. بنابراین در مطالعه حاضر که منحنی شدت-فراوانی بارش ۲۴ ساعته ایستگاه‌ها با ۵۰ سال داده تخمین زده شده است، احتمال خطا در دوره‌های

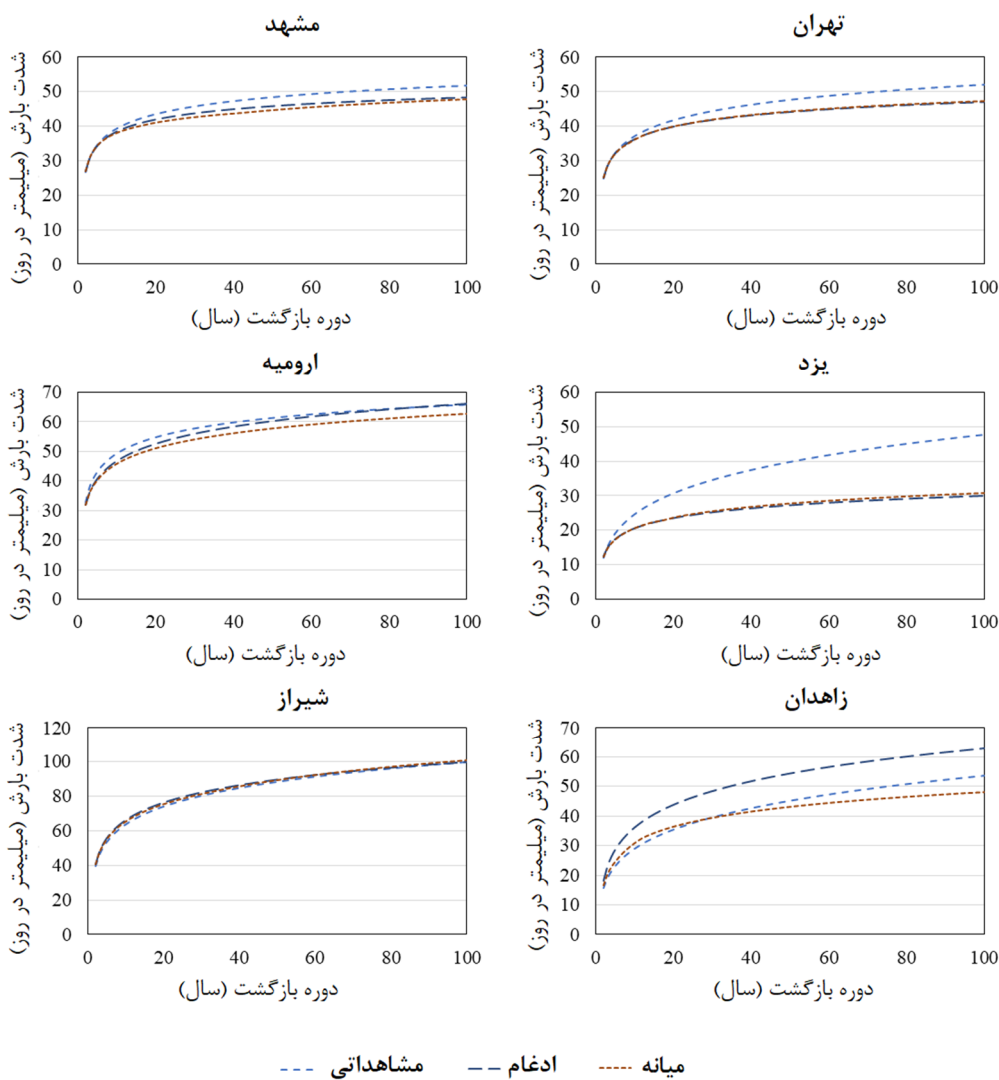


شکل ۵- مقایسه منحنی شدت-فراوانی بارش ۲۴ ساعته بر اساس داده‌های بارش ۱۲ ایستگاه منتخب.

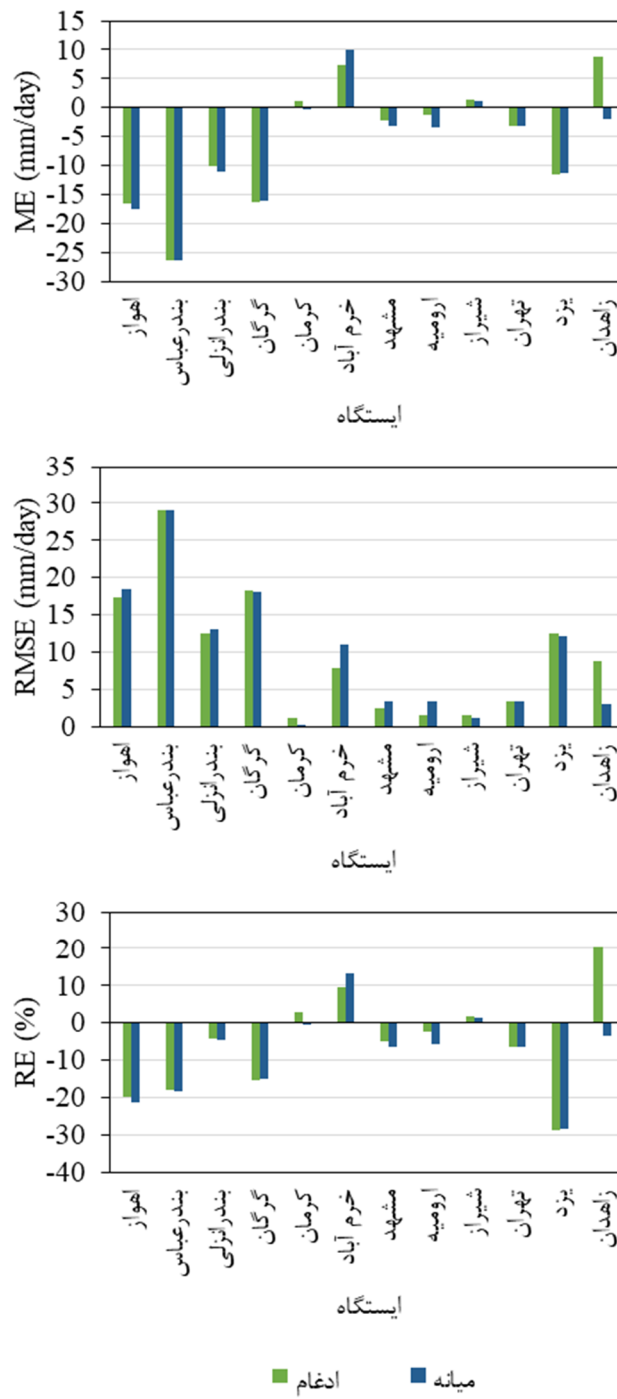
روش ادغام و روش میانه.

مدل‌هایی که تخمین بهتری از بارش دارند برای ادغام استفاده شوند، می‌توان با دقت بیشتری منحنی‌های IDF را تخمین زد. همچنین این مطالعه را می‌توان برای تداوم‌های مختلف بارش (کمتر و بیشتر از ۲۴ ساعت) نیز انجام داد و نتایج حاصل را برای تداوم‌های دیگر بارش ارزیابی و مقایسه نمود. سپس می‌توان با انتخاب بهترین مدل‌های اقلیمی و کاربرد روش ادغام، منحنی‌های IDF را برای دوره آینده نیز توسعه داده و تغییرات رخ داده در اثر تغییر اقلیم را مورد بررسی قرار داد.

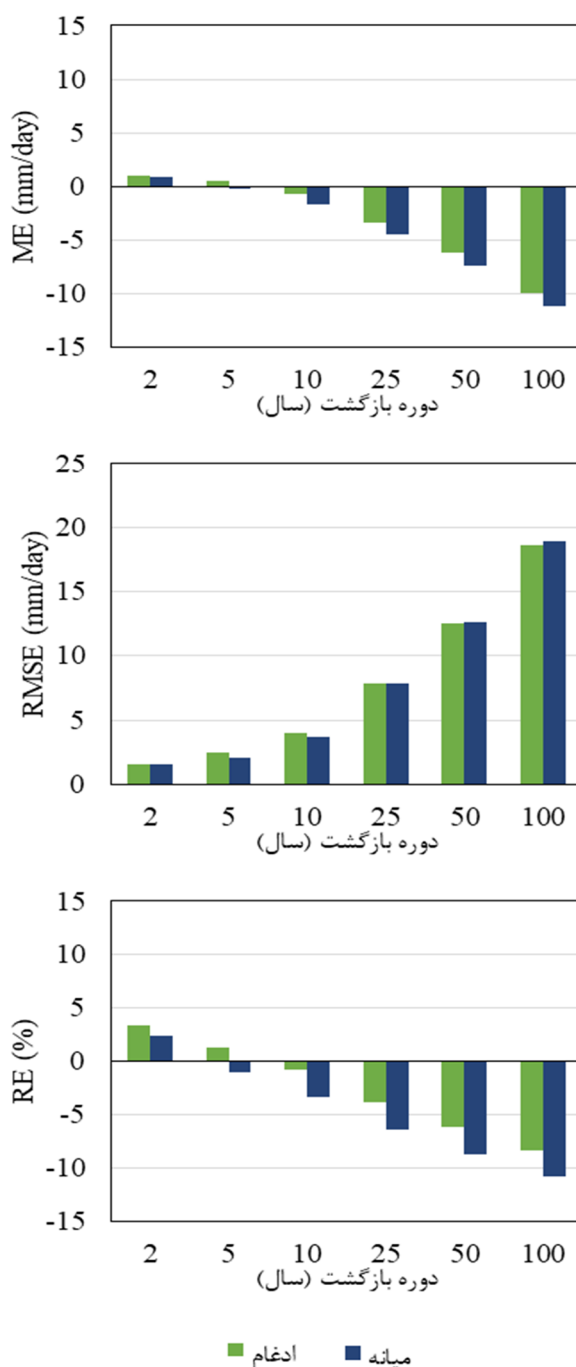
با توجه به اینکه بارش‌های دارای دوره بازگشت طولانی‌تر از شدت بالاتری برخوردار هستند و در نتیجه در صورت وقوع مخاطرات بیشتری به همراه خواهند داشت، بنابراین به نظر می‌رسد بهتر است از روش ادغام برای تخمین منحنی شدت-مدت-فراوانی استفاده شود. استفاده از روش ادغام نه تنها دقت تخمین را افزایش می‌دهد، بلکه با اجتناب از تکرار مراحل کار برای هر مدل، می‌تواند زمان محاسبات را نیز کاهش دهد. البته باید به این نکته توجه داشت که در صورتی که از تعداد مدل‌های بیشتری برای این منظور استفاده شود و از بین مدل‌های مختلف،



شکل ۵- ادامه.



شکل ۶- مقایسه مقادیر شدت بارش ۲۴ ساعته مشاهداتی در هر ایستگاه با روش ادغام و میانہ بر اساس آماره‌های ME، RMSE و RE.



شکل ۷- مقایسه مقادیر شدت بارش ۲۴ ساعته مشاهداتی با روش ادغام و میانه برای دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله بر اساس آماره‌های ME، RMSE و RE.

زده می‌شود. در این مطالعه با استخراج مقادیر حداکثر بارش ۲۴ ساعته از مدل‌های اقلیمی CMIP6، ابتدا برای هر مدل منحنی IDF در هر ایستگاه تولید شد. برای کاربرد راحت منحنی‌های IDF در طراحی سازه‌ها و زیرساخت‌های مختلف، میانه منحنی‌های حاصل از

نتیجه‌گیری

برای استفاده از مدل‌های اقلیمی برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر خصوصیات بارش، ابتدا باید دقت آنها مورد بررسی قرار گیرد. خصوصیات بارش شامل فراوانی و شدت، با استفاده از منحنی‌های IDF تخمین

بارش ۲۴ ساعته (و در نتیجه تخمین منحنی‌های IDF) در اغلب ایستگاه و به ویژه در دوره‌های بازگشت طولانی‌تر از ۱۰ سال دارد که این مسئله می‌تواند به دلیل تعداد داده‌های بیشتر در سری زمانی حداکثر بارش ۲۴ ساعته باشد.

بر اساس نتایج فوق می‌توان از روش ادغام برای تخمین منحنی‌های IDF در ایستگاه‌های مختلف در ایران استفاده شود. همچنین روش ادغام را می‌توان برای تداوم‌های مختلف بارش نیز استفاده نموده و سپس با استفاده از این روش تغییرات منحنی‌های IDF در تداوم‌های مختلف در شرایط تغییر اقلیم آینده مورد ارزیابی قرار گیرد. در این مطالعه تعداد ۵ مدل اقلیمی مورد بررسی قرار گرفت که پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی تعداد مدل‌های بیشتری استفاده شود تا نتایج معتبرتر و قابل اعتمادتری حاصل شود. همچنین می‌توان با انتخاب بهترین مدل‌های اقلیمی و کاربرد روش ادغام، منحنی‌های IDF را برای دوره آینده نیز توسعه داده و تغییرات رخ داده در اثر تغییر اقلیم را مورد بررسی قرار داد.

سیاسگزاری

این پژوهش در قالب طرح پژوهشی شماره ۴۰۰۶۱۱۳ با استفاده از اعتبارات پژوهشی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور انجام شده است.

هر مدل محاسبه و به عنوان منحنی نهایی استفاده می‌شود. در مطالعه‌ای که توسط (Srivastava et al., 2021) انجام شده است، نشان داده شد که انتخاب میانه منحنی‌های IDF می‌تواند عدم قطعیت‌هایی در تخمین شدت بارش در دوره‌های بارش مختلف به همراه داشته باشد. بنابراین توصیه شده است که از ادغام داده‌های شدت بارش برای برآزش تابع توزیع حدی و تخمین منحنی IDF استفاده شود. چرا که این روش به ویژه برای دوره‌های بازگشت طولانی‌تر دقت بیشتری در تخمین شدت بارش دارد.

در این مطالعه، ۵ مدل اقلیمی از مدل‌های اقلیمی آخرین گزارش کمیته بین‌الدول تغییر اقلیم (CMIP6) انتخاب شده و دقت آنها در تخمین منحنی‌های شدت فراوانی بارش ۲۴ ساعته در ۱۲ ایستگاه در ایران ارزیابی شد. همچنین، علاوه بر ارزیابی هر مدل، خروجی ادغام شده (pooled) مدل‌ها نیز مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج آن با منحنی حاصل از میانه داده‌ها مقایسه شد. از معیارهای خطاسنجی شامل خطای میانگین (ME)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای نسبی (RE) برای ارزیابی استفاده شد. به طور کلی تلفیق مدل‌های مختلف با روش میانه یا ادغام منجر به کاهش عدم قطعیت در تخمین منحنی‌های IDF شد. با این حال، نتایج مطالعه حاضر نیز همانند مطالعه (Srivastava et al., 2021) نشان داد که روش ادغام نسبت به روش میانه دقت بهتری در تخمین شدت

منابع

1. Abduljaleel, Y., & Demissie, Y. (2021). Evaluation and optimization of low impact development designs for sustainable stormwater management in a changing climate. *Water (Switzerland)*, 13(20), 1–21. <https://doi.org/10.3390/w13202889>
2. Almagro, A., Oliveira, P. T. S., Rosolem, R., Hagemann, S., & Nobre, C. A. (2020). Performance evaluation of Eta/HadGEM2-ES and Eta/MIROC5 precipitation simulations over Brazil. *Atmospheric Research*, 244, 105053. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105053>
3. Asadieh, B., & Krakauer, N. Y. (2015). Global trends in extreme precipitation: climate models versus observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(2), 877–891. <https://doi.org/10.5194/hess-19-877-2015>
4. Ayugi, B., Zhihong, J., Zhu, H., Ngoma, H., Babaousmail, H., Rizwan, K., & Dike, V. (2021). Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating mean and extreme precipitation over East

- Africa. *International Journal of Climatology*, 41(15), 6474–6496. <https://doi.org/10.1002/joc.7207>
5. Bador, M., Boé, J., Terray, L., Alexander, L. V., Baker, A., Bellucci, A., Haarsma, R., Koenigk, T., Moine, M. P., Lohmann, K., Putrasahan, D. A., Roberts, C., Roberts, M., Scoccimarro, E., Schiemann, R., Seddon, J., Senan, R., Valcke, S., & Vanniere, B. (2020). Impact of Higher Spatial Atmospheric Resolution on Precipitation Extremes Over Land in Global Climate Models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(13), 1–23. <https://doi.org/10.1029/2019JD032184>
 6. Ban, N., Caillaud, C., Coppola, E., Pichelli, E., Sobolowski, S., Adinolfi, M., Ahrens, B., Alias, A., Anders, I., Bastin, S., Belušić, D., Berthou, S., Brisson, E., Cardoso, R. M., Chan, S. C., Christensen, O. B., Fernández, J., Fita, L., Frisius, T., ... Zander, M. J. (2021). The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution, part I: evaluation of precipitation. *Climate Dynamics*, 57(1–2), 275–302. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05708-w>
 7. Carvalho, D., Rafael, S., Monteiro, A., Rodrigues, V., Lopes, M., & Rocha, A. (2022). How well have CMIP3, CMIP5 and CMIP6 future climate projections portrayed the recently observed warming. *Scientific Reports*, 12(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16264-6>
 8. Cheng, L., & AghaKouchak, A. (2015). Nonstationary Precipitation Intensity-Duration-Frequency Curves for Infrastructure Design in a Changing Climate. *Scientific Reports*, 4(1), 7093. <https://doi.org/10.1038/srep07093>
 9. Coles, S., Bawa, J., Trenner, L., & Dorazio, P. (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3675-0>
 10. Crévolin, V., Hassanzadeh, E., & Bourdeau-Goulet, S.-C. (2023). Updating the intensity-duration-frequency curves in major Canadian cities under changing climate using CMIP5 and CMIP6 model projections. *Sustainable Cities and Society*, 92(September 2022), 104473. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104473>
 11. de Martonne, E. (1925). *Traité de Géographie Physique*. 3 tomes. Paris.
 12. Doulabian, S., Golian, S., Toosi, A. S., & Murphy, C. (2021). Evaluating the effects of climate change on precipitation and temperature for Iran using RCP scenarios. *Journal of Water and Climate Change*, 12(1), 166–184. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.114>
 13. Doulabian, S., Tousi, E. G., Shadmehri Toosi, A., & Alaghmand, S. (2023). Non-Stationary Precipitation Frequency Estimates for Resilient Infrastructure Design in a Changing Climate: A Case Study in Sydney. *Hydrology*, 10(6), 1–16. <https://doi.org/10.3390/hydrology10060117>
 14. Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
 15. Ghasemi Tousi, E., O'Brien, W., Doulabian, S., & Shadmehri Toosi, A. (2021). Climate changes impact on stormwater infrastructure design in Tucson Arizona. *Sustainable Cities and Society*, 72, 103014. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103014>
 16. Guhathakurta, P., Sreejith, O. P., & Menon, P. A. (2011). Impact of climate change on extreme rainfall events and flood risk in India. *Journal of Earth System Science*, 120(3), 359–373.
 17. Gusain, A., Ghosh, S., & Karmakar, S. (2020). Added value of CMIP6 over CMIP5 models in simulating Indian summer monsoon rainfall. *Atmospheric Research*, 232, 104680. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104680>
 18. Jentsch, M. F., James, P. A. B.,

- Bourikas, L., & Bahaj, A. B. S. (2013). Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates. *Renewable Energy*, 55, 514–524. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.049>
19. Khadka, D., Babel, M. S., Abatan, A. A., & Collins, M. (2022). An evaluation of CMIP5 and CMIP6 climate models in simulating summer rainfall in the Southeast Asian monsoon domain. *International Journal of Climatology*, 42(2), 1181–1202. <https://doi.org/10.1002/joc.7296>
20. Khazaei, B., Khatami, S., Hamed, S., Rashidi, L., Wu, C., Madani, K., Kalantari, Z., Destouni, G., & Aghakouchak, A. (2019). Climatic or regionally induced by humans? Tracing hydro-climatic and land-use changes to better understand the Lake Urmia tragedy. *Journal of Hydrology*, 569, 203–217. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.004>
21. Koutsoyiannis, D., Kozonis, D., & Manetas, A. (1998). A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology*, 206(1–2), 118–135. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00097-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00097-3)
22. Lau, A., & Behrangi, A. (2022). Understanding Intensity–Duration–Frequency (IDF) Curves Using IMERG Sub-Hourly Precipitation against Dense Gauge Networks. *Remote Sensing*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/rs14195032>
23. Luo, N., & Guo, Y. (2022). Impact of model resolution on the simulation of precipitation extremes over China. *Sustainability (Switzerland)*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/su14010025>
24. Luo, N., Guo, Y., Chou, J., & Gao, Z. (2022). Added value of CMIP6 models over CMIP5 models in simulating the climatological precipitation extremes in China. *International Journal of Climatology*, 42(2), 1148–1164. <https://doi.org/10.1002/joc.7294>
25. Marra, F., Morin, E., Peleg, N., Mei, Y., & Anagnostou, E. N. (2017). Intensity–duration–frequency curves from remote sensing rainfall estimates: comparing satellite and weather radar over the eastern Mediterranean. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(5), 2389–2404. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2389-2017>
26. Martel, J.-L., Brissette, F. P., Lucas-Picher, P., Troin, M., & Arsenault, R. (2021). Climate Change and Rainfall Intensity–Duration–Frequency Curves: Overview of Science and Guidelines for Adaptation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 26(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002122](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002122)
27. Maxino, C. C., McAvaney, B. J., Pitman, A. J., & Perkins, S. E. (2008). Ranking the AR4 climate models over the Murray-Darling Basin using simulated maximum temperature, minimum temperature and precipitation. *International Journal of Climatology*, 28(8), 1097–1112. <https://doi.org/10.1002/joc.1612>
28. Mianabadi, A. (2023). Evaluation of long-term satellite-based precipitation products for developing intensity-frequency (IF) curves of daily precipitation. *Atmospheric Research*, 286(February), 106667. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106667>
29. Mianabadi, A., Davary, K., Mianabadi, H., Kolahi, M., & Mostert, E. (2023). Toward the development of a conceptual framework for the complex interaction between environmental changes and rural-urban migration. *Frontiers in Water*, 5, 1–13. <https://doi.org/10.3389/frwa.2023.1142307>
30. Noor, M., Ismail, T., Shahid, S., Asaduzzaman, M., & Dewan, A. (2021). Evaluating intensity-duration-frequency (IDF) curves of satellite-based precipitation datasets in Peninsular Malaysia. *Atmospheric Research*, 248, 105203. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105203>
31. Ombadi, M., Nguyen, P., Sorooshian, S., & Hsu, K. (2018). Developing Intensity–Duration–Frequency (IDF) Curves From

- Satellite-Based Precipitation: Methodology and Evaluation. *Water Resources Research*, 54(10), 7752–7766.
<https://doi.org/10.1029/2018WR022929>
32. Oskouei, E. A., Khaki, B. D., Kouzegaran, S., Navidi, M. N., Haghghatd, M., Davatgar, N., & Lopez-Baeza, E. (2022). Mapping Climate Zones of Iran Using Hybrid Interpolation Methods. *Remote Sensing*, 14(11).
<https://doi.org/10.3390/rs14112632>
33. Ragno, E., AghaKouchak, A., Love, C. A., Cheng, L., Vahedifard, F., & Lima, C. H. R. (2018). Quantifying Changes in Future Intensity-Duration-Frequency Curves Using Multimodel Ensemble Simulations. *Water Resources Research*, 54(3), 1751–1764.
<https://doi.org/10.1002/2017WR021975>
34. Rana, A., Madan, S., & Bengtsson, L. (2014). Performance evaluation of regional climate models (RCMs) in determining precipitation characteristics for Gothenburg, Sweden. *Hydrology Research*, 45(4–5), 703–714.
<https://doi.org/10.2166/nh.2013.160>
35. Rivera, J. A., & Arnould, G. (2020). Evaluation of the ability of CMIP6 models to simulate precipitation over Southwestern South America: Climatic features and long-term trends (1901–2014). *Atmospheric Research*, 241, 104953.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104953>
36. Sadegh, M., Moftakhari, H., Gupta, H. V., Ragno, E., Mazdiyasi, O., Sanders, B., Matthew, R., & AghaKouchak, A. (2018). Multihazard Scenarios for Analysis of Compound Extreme Events. *Geophysical Research Letters*, 45(11), 5470–5480.
<https://doi.org/10.1029/2018GL077317>
37. Sarkar, S., & Maity, R. (2022). Future Characteristics of Extreme Precipitation Indicate the Dominance of Frequency Over Intensity: A Multi-Model Assessment From CMIP6 Across India. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(16), 1–22.
<https://doi.org/10.1029/2021JD035539>
38. Shrestha, A., Babel, M., Weesakul, S., & Vojinovic, Z. (2017). Developing Intensity–Duration–Frequency (IDF) Curves under Climate Change Uncertainty: The Case of Bangkok, Thailand. *Water*, 9(2), 1–22.
<https://doi.org/10.3390/w9020145>
39. Srivastava, A. K., Grotjahn, R., Ullrich, P. A., & Sadegh, M. (2021). Pooling Data Improves Multimodel IDF Estimates over Median-Based IDF Estimates: Analysis over the Susquehanna and Florida. *Journal of Hydrometeorology*, 22(4), 971–995.
<https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0180.1>
40. Sugahara, S., da Rocha, R. P., & Silveira, R. (2009). Non-stationary frequency analysis of extreme daily rainfall in Sao Paulo, Brazil. *International Journal of Climatology*, 29(9), 1339–1349.
<https://doi.org/10.1002/joc.1760>
41. Tang, Y., Wu, Q., Li, X., Sun, Y., & Hu, C. (2023). Comparison of different ensemble precipitation forecast system evaluation , integration and hydrological applications. *Acta Geophysica*, 71(1), 405–421.
<https://doi.org/10.1007/s11600-022-00877-6>
42. Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A., Melton, F., Lee, T., & Nemani, R. (2022). NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. *Scientific Data*, 9(1), 262.
<https://doi.org/10.1038/s41597-022-01393-4>
43. Venkatesh, K., Maheswaran, R., & Devacharan, J. (2022). Framework for developing IDF curves using satellite precipitation: a case study using GPM-IMERG V6 data. *Earth Science Informatics*, 15(1), 671–687.
<https://doi.org/10.1007/s12145-021-00708-0>
44. Wang, D., Liu, J., Luan, Q., Shao, W., Fu, X., Wang, H., & Gu, Y. (2023). Projection of future precipitation change using CMIP6 multimodel ensemble based on fusion of multiple machine learning algorithms: A case in Hanjiang

- River Basin, China. *Meteorological Applications*, 30(5), 1–21. <https://doi.org/10.1002/met.2144>
45. Yan, L., Xiong, L., Jiang, C., Zhang, M., Wang, D., & Xu, C. Y. (2021). Updating intensity–duration–frequency curves for urban infrastructure design under a changing environment. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 8(3), 1–24. <https://doi.org/10.1002/wat2.1519>