

Evaluation of the Performance of Different Physics Schemes of the WRF Model in Precipitation Prediction Using Geodesy Observations and Synoptic Stations in Northern and Northwestern Iran

Tayfehrostami, A.¹  | Amerian, Y.²   | Azadi, M.⁴ 

1. Ph.D. candidate, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
2. Associate Professor, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
3. Professor, Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: amerian@kntu.ac.ir

(Received: 14 Sep 2025, Revise: 23 Oct 2025, Accepted: 01 Nov 2025, Published online: 21 Mar 2026)

Abstract

Accurate modeling of precipitation in urban and mountainous regions is of great importance in meteorology and atmospheric sciences due to its key role in water resource management and in mitigating the damages caused by extreme weather events. In this study, the performance of the WRF numerical model with seven different physical parameterization schemes was evaluated in simulating precipitation during the second half of 2022 for selected stations in northern and northwestern Iran. The datasets used included observed precipitation from synoptic stations and precipitable water vapor (PWV) derived from permanent stations of the country's Global Navigation Satellite Systems (GNSS) network. After quality control of the data, comparisons were made using statistical indices including the Spearman correlation coefficient (ρ_s), the normalized root mean square error (nRMSE), and the normalized mean absolute error (nMAE). The results indicated that the WRF model was able to reproduce the temporal pattern of rainfall occurrence at most stations, although some discrepancies were found in estimating rainfall intensity. The Spearman correlation between simulated and observed precipitation ranged from 0.26 to 0.71, while nRMSE and nMAE values varied between 50–145% and 50–90%, respectively. Analysis of the relationship between PWV and precipitation also revealed a significant positive correlation at most stations (ranging from 0.63 to 0.95). The ALKH, AZUI, OIII, and OIIP stations exhibited the highest consistency between datasets. Based on the integrated analyses, Scheme No. 5 showed the highest mean correlation with both observational and PWV data, although the 95% confidence intervals of Schemes 3 and 4 overlapped with it, indicating that its statistical superiority at the 0.05 significance level is not conclusive. These findings highlight that selecting an appropriate physical parameterization scheme in the WRF model and simultaneously utilizing GNSS and synoptic station data can significantly enhance precipitation prediction accuracy, contributing to the improvement of flood warning systems and water resource management.

Keywords: WRF model; Physics schemes; Precipitation; Global Navigation Satellite Systems (GNSS); Precipitable Water Vapor (PWV)

Cite this article: Tayfehrostami, A. , Amerian, Y. and Azadi, M. (2026). Evaluation of the Performance of Different Physics Schemes of the WRF Model in Precipitation Prediction Using Geodesy Observations and Synoptic Stations in Northern and Northwestern Iran. *Nivar*, 50(132-133), 125-152. Doi: <https://doi.org/10.30467/nivar.2025.547121.1354>

E-mail: (1) a.tayfehrostami@email.kntu.ac.ir (3) azadi68@hotmail.com



ارزیابی عملکرد طرحواره‌های فیزیکی مختلف مدل WRF در پیش‌بینی بارش با مشاهدات ژئودزی و ایستگاه‌های همدیدی در شمال و شمال غرب ایران

آرش طایفه رستمی^۱ | یزدان عامریان^۲ | مجید آزادی^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

۲. دانشیار، گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

۳. استاد، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: amerian@kntu.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۳، بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۱، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۰، انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱)

چکیده

مدل‌سازی دقیق بارش در مناطق شهری و کوهستانی به دلیل نقش کلیدی آن در مدیریت منابع آب و کاهش خسارات ناشی از رخدادهای حدی، اهمیت فراوانی در هواشناسی و علوم جوی دارد. در این پژوهش، عملکرد مدل عددی WRF با هفت طرحواره فیزیکی مختلف در شبیه‌سازی بارش‌های نیمه دوم سال ۲۰۲۲ برای ایستگاه‌های منتخب در شمال و شمال غرب ایران ارزیابی شد. داده‌های مورد استفاده شامل بارش ثبت‌شده در ایستگاه‌های همدیدی و بخار آب بارش شو (PWV) استخراج‌شده از ایستگاه‌های دائمی سامانه‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی (GNSS) کشور بود. پس از کنترل کیفیت داده‌ها، مقایسه‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری شامل ضریب همبستگی اسپیرمن (ρ_s)، ریشه میانگین مربعات خطای نسبی (nRMSE) و میانگین قدر مطلق خطای نسبی (nMAE) انجام شد. نتایج نشان داد مدل WRF قادر است الگوی زمانی وقوع بارش را در اغلب ایستگاه‌ها بازتولید کند، هرچند در برآورد شدت بارش اختلاف‌هایی مشاهده شد. ضریب همبستگی اسپیرمن بین بارش شبیه‌سازی‌شده و مشاهدات در بازه ۰٫۲۶ تا ۰٫۷۱ به دست آمد، در حالی که مقادیر nRMSE و nMAE به ترتیب بین ۵۰ تا ۱۴۵ درصد و ۵۰ تا ۹۰ درصد متغیر بودند. بررسی همبستگی بین PWV و بارش نیز نشان داد که این دو پارامتر در بیشتر ایستگاه‌ها همبستگی مثبت و معناداری دارند (۰٫۶۳ تا ۰٫۹۵). ایستگاه‌های ALKH، AZUI، OIII و OIIP بالاترین میزان انطباق را نشان دادند. بر اساس تحلیل‌های تلفیقی، طرحواره شماره ۵ بالاترین میانگین همبستگی را با داده‌های مشاهده‌ای و PWV داشته است، هرچند بازه‌های اطمینان ۹۵٪ طرحواره‌های ۳ و ۴ با آن همپوشانی داشته و برتری آماری آن در سطح ۰٫۰۵ قطعی نیست. این یافته‌ها بیانگر آن است که انتخاب طرحواره فیزیکی مناسب مدل WRF و بهره‌گیری هم‌زمان از داده‌های GNSS و ایستگاه‌های همدیدی می‌تواند دقت پیش‌بینی بارش را به‌طور چشمگیری افزایش داده و در بهبود سامانه‌های هشدار سیل و مدیریت منابع آب مؤثر واقع شود.

کلمات کلیدی: مدل WRF، طرحواره فیزیکی، بارش، سامانه‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی، بخار آب بارش شو.

۱. مقدمه

مواجهه با آلودگی و پراکنش جوی مطرح هستند. مدل‌سازی هواشناسی قابل اعتماد نقش اساسی در درک این فرآیندها دارد، اما برای شبیه‌سازی دقیق انتقال جوی در محیط‌های شهری - که با ناهمگنی مکانی بالایی مشخص می‌شوند -

مناطق شهری به دلیل تراکم بالای جمعیت و انتشار گسترده گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های هوا، به‌عنوان یکی از کانون‌های اصلی برای پیش‌بینی دقیق الگوهای جوی، میزان

استناد: طایفه رستمی، آرش، عامریان، یزدان و آزادی، مجید. (۱۴۰۵). ارزیابی عملکرد طرحواره‌های فیزیکی مختلف مدل WRF در پیش‌بینی بارش با مشاهدات ژئودزی و

ایستگاه‌های همدیدی در شمال و شمال غرب ایران. نویار، ۵۰(۱۳۲-۱۳۳)، ۱۲۵-۱۵۲. <https://doi.org/10.30467/nivar.2025.547121.1354>

رایانامه: (۱) a.tayfehrostami@email.kntu.ac.ir (۳) azadi68@hotmail.com

ناشر: سازمان هواشناسی کشور.



DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2025.547121.1354>

افت محسوس در دقت پیش‌بینی، کارایی محاسباتی مدل WRF را افزایش دهد (Mohamadi & Azadi, 2022). مدل WRF از پارامترسازی لایه مرزی سیاره‌ای (PBL) برای بازنمایی حرکات آشفته جوی در مقیاس‌های زیرشبکه استفاده می‌کند. مدل PBL تأثیر مستقیمی بر اختلاط آشوبناک و ارتفاع لایه مرزی دارد و در نتیجه بر انتقال حرارت و تکانه در تروپوسفر زیرین اثر می‌گذارد؛ موضوعی که به‌طور مستقیم بر دمای دو متری، بادهای ده متری و ارتفاع لایه مرزی مؤثر است. برای مثال، (Jänicke et al., 2017) نشان دادند که انتخاب طرحواره PBL تأثیر قابل توجهی بر دمای شبیه‌سازی شده در شهر برلین دارد. همچنین، (Mantovani Júnior et al., 2023) عملکرد شبیه‌سازی‌های WRF با تفکیک یک کیلومتر را با استفاده از طرحواره‌های مختلف PBL در حوضه آمازون مرکزی مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که بسیاری از طرحواره‌های PBL قادر به بازنمایی افزایش تدریجی ارتفاع لایه مرزی نیستند و این موضوع منجر به کم‌پرآورد میانگین ارتفاع لایه مرزی می‌شود. علاوه بر این، مطالعات دیگری از جمله (Avolio et al., 2017; Banks & Baldasano, 2016; García-Díez et al., 2013; Gholami et al., 2021) به‌طور کلی عملکرد مناسب طرحواره YSU PBL را از نظر سرعت و جهت باد در ارتفاع ۱۰ متری گزارش کرده‌اند.

با توجه به اهمیت مناطق شهری، طی سال‌های اخیر مدل‌های سایه‌انداز شهری (UCMs) توسعه یافته‌اند تا تبدلات سطحی-جوی در مناطق شهری با دقت بیشتری بازنمایی شوند. طرحواره‌های شهری موجود شامل مدل‌های ساده توده‌ای، مدل سایه‌انداز شهری تک‌لایه (Fei Chen, 2006) که ساختارهای شهری را در نظر می‌گیرد، و همچنین مدل‌های سایه‌انداز شهری چندلایه مانند Martilli BEP (Martilli et al., 2002) هستند که افزون بر این، امکان اتصال به مدل انرژی ساختمان را نیز فراهم می‌سازند. برخی از اثرات شهری که توسط این مدل‌ها بازنمایی می‌شوند شامل شارهای حرارتی ناشی از دیوارها و به‌دام افتادن تابش در دره‌های

استفاده از مدل‌های انتقال با تفکیک مکانی بالا ضروری است. با وجود پیشرفت‌های حاصل‌شده در روش‌های مدل‌سازی، خطاهای مربوط به انتقال همچنان به‌عنوان منبع اصلی عدم قطعیت در برآوردهای انتشار شناخته می‌شوند (Munassar et al., 2023; Ohyama et al., 2023) و اغلب به‌عنوان گلوگاه در برآوردهای بالا به پایین انتشار در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین، به حداقل رساندن عدم قطعیت انتقال از طریق انتخاب دقیق پارامترهای مدل، برای بهبود برآوردهای انتشار و تقویت توانایی ما در پایش و کاهش مؤثر انتشارهای شهری، امری ضروری است (Pilz et al., 2025).

مدل WRF یک سامانه عددی پیش‌بینی وضع هوا در میان مقیاس است که توانایی شبیه‌سازی انتقال جوی در مناطق شهری با تفکیک‌پذیری بالا را دارد (Neyestani et al., 2018; Zakeri et al., 2017). این مدل تاکنون در مطالعات متعددی در سراسر جهان و برای اهداف گوناگون به کار گرفته شده است و به همین دلیل، مجموعه‌ای متنوع از پارامترسازی‌ها و تنظیمات برای آن توسعه یافته است. پارامترسازی‌های موجود در مدل WRF نمایانگر اجزای مختلف سامانه هواشناسی هستند که هر یک بر متغیرهای جوی متفاوتی اثر می‌گذارند. برای بهینه‌سازی اثر انتخاب پارامترسازی‌ها و تنظیمات بر دینامیک جوی در منطقه مورد مطالعه، لازم است پیکربندی مدل، پارامترسازی‌ها و تنظیمات آن به‌صورت متغیر در نظر گرفته شوند. با مقایسه خروجی مدل با مشاهدات هواشناسی می‌توان مجموعه بهینه‌ای از پارامترسازی‌ها را شناسایی کرد. این امر منجر به کاهش خطاهای انتقال در مدل می‌شود که موضوعی کلیدی برای کاربردهایی مانند برآورد انتشار در چارچوب وارون‌سازی است (Lauvaux et al., 2009; Lauvaux & Davis, 2014; Munassar et al., 2023). مطالعه‌ی محمدی و آزادی (۲۰۲۲) با بررسی تأثیر تعداد اعضای سامانه همادی بر دقت پیش‌بینی بارش نشان داد که کاهش تعداد اعضا، در صورت انتخاب بهینه اعضای همادی با استفاده از روش Bayesian Model Averaging (BMA) می‌تواند بدون

پیش‌بینی عددی وضع هوا و افزایش دقت پیش‌بینی بارش کمک کند، به‌ویژه در شرایطی که پرمایش‌های فیزیکی مدل‌ها تحت تأثیر عدم قطعیت‌های ذاتی قرار دارد (Zhang et al., 2019).

هدف اصلی این مطالعه، بررسی دقیق عملکرد طرحواره‌های فیزیکی مختلف مدل WRF در پیش‌بینی بارش و همچنین ارزیابی همبستگی بین پیش‌بینی‌های مدل با داده‌های مشاهده‌ای PWV حاصل از GNSS و مشاهدات ایستگاه-های همدیدی است. با توجه به نقش کلیدی PWV به عنوان یک شاخص پیش‌بینی‌کننده بارش و اهمیت دقت در پیش‌بینی بارش برای مدیریت منابع آب و کاهش خطرات طبیعی، بررسی ارتباط بین این متغیرها و خروجی‌های مدل WRF از اهمیت بالایی برخوردار است. این مطالعه با استفاده از ۷ سناریوی مختلف از پارامترسازی‌های فیزیکی مدل WRF (شامل ترکیب‌های مختلف از پرمایش لایه مرزی، ریزمقیاس‌سازی ابر، و همرفت)، به دنبال شناسایی بهترین ترکیب فیزیکی برای شبیه‌سازی بارش در منطقه مورد مطالعه است. علاوه بر این، اعتبارسنجی نتایج مدل با داده‌های PWV حاصل از GNSS و مقایسه آن با مشاهدات ایستگاه-های همدیدی، به درک بهتر عدم قطعیت‌های موجود در پیش‌بینی بارش و بهبود دقت مدل‌های عددی کمک می‌کند. این رویکرد نه تنها به بهبود پیش‌بینی بارش کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به عنوان یک چارچوب علمی برای مطالعات آینده در زمینه پارامترسازی فیزیکی و اعتبارسنجی مدل‌های عددی مانند WRF مورد استفاده قرار گیرد.

۲. روش‌ها و داده‌های مورد استفاده

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

ایران، به‌عنوان کشوری با وسعت جغرافیایی گسترده، طیف متنوعی از شرایط آب‌وهوایی را در مناطق مختلف خود نشان می‌دهد. این تنوع آب‌وهوایی شامل پدیده‌هایی مانند بارش‌های شدید در مناطق شمالی و تندبادهای قوی در مناطق جنوبی است. از نظر آماری، این تنوع در تفاوت‌های قابل توجه میزان بارش سالانه نیز مشهود است؛ به‌طوری‌که برخی

شهری است که به‌طور مستقیم بر دمای دو متری اثر می‌گذارد. این مدل‌ها همچنین تبادل تکانه با جو را در نظر می‌گیرند، مانند مقاومت ناشی از جهت‌گیری دره‌های شهری که بر سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری تأثیرگذار است. این مطالعات نشان می‌دهند که انتخاب بهینه پارامترسازی شهری به مکان و دوره زمانی وابسته است. در واقع، مدل‌های پیچیده‌تر همواره عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های ساده ندارند، همان‌طور که در (Jänicke et al., 2017; Salamanca et al., 2011) گزارش شده است.

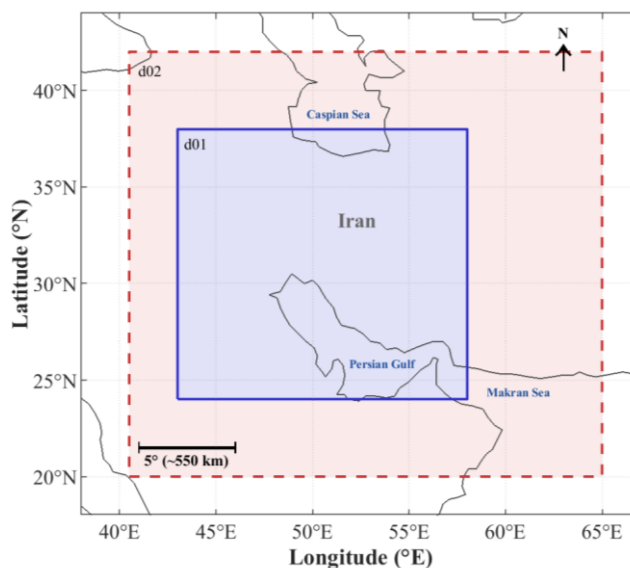
بخار آب بارش‌شو (PWV) یکی از پارامترهای کلیدی در مطالعات هواشناسی است که نشان‌دهنده مقدار آب موجود در ستون جوی است و نقش تعیین‌کننده‌ای در فرآیندهای بارش ایفا می‌کند (Aghajany & Amerian, 2017; Sam-Khaniani et al., 2017; Sam-Khaniani & Naeijian, 2024; Sharifi et al., 2016). اندازه‌گیری دقیق PWV از طریق تکنیک‌های پیشرفته‌ای مانند سامانه‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی (GNSS)، رادیسوند‌ها و یا رخدادهای اختفای رادیویی GNSS (Tayfehrostami & Amerian, 2025) امکان‌پذیر شده است که بر اساس تأخیر سیگنال‌های رادیویی در عبور از لایه‌های جوی عمل می‌کند (Bevis et al., 1992). داده‌های GNSS به دلیل پوشش گسترده، دقت بالا، و قابلیت به‌روزرسانی آنی (Real-Time)، به ابزاری قدرتمند برای مطالعه رفتار بخار آب در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف تبدیل شده‌اند (Aghajany et al., 2020, 2025; Izanlou et al., 2024). از آنجایی که بخار آب بارش‌شو به‌طور مستقیم با فرآیندهای بارش مرتبط است، این پارامتر می‌تواند به عنوان شاخصی پیش‌بینی‌کننده برای وقوع بارش، به ویژه در مناطق مرطوب و طوفانی، مورد استفاده قرار گیرد (Wang et al., 2012). به علاوه، اعتبارسنجی داده‌های GNSS با مشاهدات مستقیم از رادیسوند نشان داده است که این روش می‌تواند به عنوان جایگزینی دقیق و اقتصادی برای روش‌های سنتی اندازه‌گیری بخار آب مورد استفاده قرار گیرد (Benevides et al., 2018). در این راستا، بررسی ارتباط بین بخار آب بارش‌شو و پیش‌بینی بارش می‌تواند به بهبود مدل‌های

در این مطالعه، برای شرایط اولیه در اجرای مدل WRF (نسخه ۴.۲)، از داده‌های GFS با تفکیک افقی ۰.۵ درجه استفاده شده است و ساعت شروع اجرا ۱۲ UTC می‌باشد. مدل WRF با دو دامنه اجرا شده است (شکل (۱)). توان تفکیک مکانی برای دامنه بزرگ‌تر و کوچک‌تر به ترتیب ۲۷ و ۹ کیلومتر است. خروجی‌های مدل WRF با روش دوخطی (Bilinear) به ایستگاه‌های مورد نظر درون‌یابی شده‌اند. سامانه همادی مورد استفاده در این مطالعه بر اساس ترکیب‌های مختلف از طرحواره‌های فیزیکی مدل WRF طراحی شده است. در این سامانه، هر عضو به صورت خاص از مجموعه‌ای منحصر به فرد از طرحواره‌های فیزیکی بهره می‌برد که شامل پارامترسازی‌های خردفیزیکی، همرفت، لایه مرزی، سطح زمین، و فرآیندهای تابشی (تابش موج کوتاه و بلند) می‌شود. این تنوع در انتخاب طرحواره‌ها به منظور بررسی حساسیت مدل به تغییرات در پارامترسازی‌های فیزیکی و ارزیابی عدم قطعیت‌های ناشی از آن‌ها طراحی شده است (Fei Chen, 2006). هر عضو از سامانه هما به گونه‌ای تنظیم شده است که بتواند رفتار مدل را تحت تأثیر ترکیب خاصی از طرحواره‌های فیزیکی بررسی کند. به عنوان مثال، طرحواره‌های خردفیزیکی مربوط به فرآیندهای ابر، بارش و ذوب برف را پوشش می‌دهند، در حالی که طرحواره‌های همرفتی به مدل‌سازی فرآیندهای مقیاس بزرگ‌تر مرتبط با جابجایی هوای عمودی می‌پردازند. همچنین، طرحواره‌های لایه مرزی و سطح زمین نقش مهمی در شبیه‌سازی تعاملات بین سطح زمین و جو دارند، و طرحواره‌های تابشی به مدل‌سازی تابش خورشیدی و حرارتی کمک می‌کنند. برای ارائه جزئیات دقیق‌تر، تمامی ترکیب‌های طرحواره‌های فیزیکی مورد استفاده در سامانه همادی در جدول (۱) ارائه شده است.

از شهرهای جنوبی کشور کمتر از ۴۰ میلی‌متر بارش سالانه دریافت می‌کنند، در حالی که مناطق غربی بیش از ۶۰۰ میلی‌متر بارش ثبت می‌نمایند. یکی از چالش‌های اصلی در مدیریت و پیش‌بینی وضع هوا در ایران، عدم وجود داده‌های جامع و سیستم‌های سازمان‌یافته برای جمع‌آوری داده‌ها است. این موضوع باعث می‌شود که هماهنگی بین مدل‌های NWP و مشاهدات منطقه‌ای با دشواری‌هایی همراه باشد. به عنوان مثال، تنها ۱۲ ایستگاه رادیوسوند در سراسر کشور وجود دارد که به صورت ناموزون توزیع شده‌اند و اغلب به صورت منظم عملیاتی نیستند. این محدودیت‌ها کارایی این ایستگاه‌ها را در پیش‌بینی وضع هوا و نظارت بر شرایط آب‌وهوایی کاهش می‌دهد.

برای رفع این محدودیت‌ها، استفاده از پیش‌بینی‌های مدل‌های NWP می‌تواند راه‌حلی امیدوارکننده ارائه دهد. از طرف دیگر، بهره‌گیری از ایستگاه‌های دائمی GNSS می‌تواند به توسعه سیستمی قوی برای نظارت بر شرایط آب‌وهوایی کمک کند که به ویژگی‌های منطقه‌ای کشور انطباق داشته باشد. چنین سیستمی نه تنها می‌تواند دقت پیش‌بینی‌های هواشناسی را افزایش دهد، بلکه دقت تعیین موقعیت را نیز بهبود می‌بخشد. این امر به طور همزمان به مطالعات هواشناسی و کاربردهای عملی مرتبط با زیرساخت‌های مکانی کمک می‌کند. این رویکرد نشان‌دهنده پتانسیل بالای فناوری‌های مبتنی بر GNSS برای جبران کاستی‌های شبکه‌های مشاهده‌ای سنتی و مشارکت در نظارت دقیق‌تر بر شرایط آب‌وهوایی در ایران است. در این مطالعه، با توجه به دسترسی به داده‌های GNSS در مناطق شمالی و شمال‌غربی ایران، این محدوده به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است.

۲.۲. مدل WRF



شکل ۱. محدوده در نظر گرفته شده برای دامنه ۱ و ۲ در اجرای مدل WRF.

جدول ۱. طرحواره‌های فیزیکی مختلف مورد استفاده برای اجرای مدل WRF.

| عضو همادی | خرد فیزیک | فیزیک تابش موج کوتاه | فیزیک تابش موج بلند | فیزیک همرفت | سطح زمین | لایه سطحی | لایه مرزی |
|--------------|-------------|----------------------------|---------------------------|---------------------|--------------|-------------------|--------------------------|
| ۱ | Lin et al | Goddard | RRTM | Kain-Fritsch | Unified Noah | MM5 Monin-Obukhov | YSU |
| ۲ | Ferrier | Goddard | RRTM | Kain-Fritsch | Unified Noah | MM5 Monin-Obukhov | YSU |
| ۳ | Lin et al | Dudhia | RRTM | Kain-Fritsch | Unified Noah | Janjic | Janjic |
| ۴ | Lin et al | Goddard | RRTM | Betts-Miller-Janjic | Unified Noah | MM5 Monin-Obukhov | Grenier-Bretherton-McCaa |
| ۵ | Ferrier | Goddard | RRTM | Betts-Miller-Janjic | Unified Noah | MM5 Monin-Obukhov | Grenier-Bretherton-McCaa |
| ۶ | WSM 6-class | Goddard | RRTM | Betts-Miller-Janjic | Unified Noah | MM5 Monin-Obukhov | Grenier-Bretherton-McCaa |
| ۷ | Thompson | Dudhia | RRTM | Betts-Miller-Janjic | RUC | MM5 Monin-Obukhov | YSU |

۳.۲. مشاهدات ایستگاه‌های سامانه‌های ماهواره‌ای

ناوبری جهانی

در سال ۱۳۸۳، سازمان نقشه‌برداری کشور (<https://ncc.gov.ir>) آغاز به ساخت شبکه‌ای به نام شبکه

دائمی GPS ایران (IPGN) کرد به عنوان بخشی از تلاش‌های خود برای مطالعه و کاهش خطرات زلزله در ایران. این پروژه طولانی مدت و بسیار ارزشمند، گامی مهم در جهت درک بهتر تغییر شکل‌های تکتونیکی و کاهش بلایای

انجام محاسبات مربوط به ZWD از نرم‌افزار PRIDE PPP-AR استفاده شد (Geng et al., 2019). این نرم‌افزار یک ابزار پیشرفته برای PPP است که توسط دانشگاه ووهان چین توسعه یافته و به‌طور گسترده در مطالعات ژئودزی و هواشناسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از محاسبه ZWD، از معادله زیر که شامل یک ضریب تبدیل است، برای تعیین PWV استفاده می‌شود (Ding, 2018; RISANTO et al., 2021):

$$PWV = \Pi \cdot ZWD \quad (2)$$

در معادله (۲)، Π نشان‌دهنده ضریب تبدیل بخار آب است که می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho_w R_V \left(k_2' + \frac{k_3}{T_m} \right)} \quad (3)$$

در معادله (۳)، ρ_w نشان‌دهنده چگالی آب است که معمولاً برابر با ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب فرض می‌شود، R_V ثابت گازی ویژه برای بخار آب را نشان می‌دهد که مقدار آن ۴۶۱٫۱ ژول بر کیلوگرم بر کلون است. این ثابت، رفتار ترمودینامیکی بخار آب را تحت شرایط مختلف دما و فشار توصیف می‌کند. علاوه بر این، k_2' و k_3 ثوابت شکست-پذیری (Refractivity) جوی هستند که به ترتیب مقادیر ۱۷ (کلون مربع بر هکتوپاسکال) و ۳۷۷٫۶۰۰ (کلون مربع بر هکتوپاسکال) دارند. این ثوابت نقش مهمی در محاسبه اثرات بخار آب بر ZWD و در نهایت در برآورد PWV ایفا می‌کنند. برای دستیابی به مقادیر دقیق PWV این فرآیند محاسباتی، برآورد دقیق T_m (دمای متوسط وزن-دار جو) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بسیاری از مدل‌های جهانی توسعه‌یافته برای محاسبه T_m اغلب پارامترهای منطقه‌ای خاصی مانند شرایط اقلیمی و توپوگرافی را نادیده می‌گیرند که می‌تواند دقت برآوردهای T_m را کاهش دهد. در حال حاضر، روش‌های دقیق برای محاسبه T_m شامل انتگرال‌گیری از پروفایل‌های دما و فشار بخار آب در ستون جوی است. این رویکرد با در نظر گرفتن تغییرات عمودی دما و رطوبت در سراسر جو، نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد و خطاهای مرتبط با استفاده از مدل‌های بیش از حد

طبیعی در کشور بود و همزمان قابلیت‌های علمی کشور را نیز گسترش داد. در طراحی و اجرای این پروژه از دانش و بینش موسسات آموزشی و تحقیقاتی فرانسه، سازمان زمین‌شناسی ایران و مؤسسه بین‌المللی مهندسی و لرزه‌نگاری زلزله بهره گرفته شده است. در این مطالعه، از داده‌های ۲۰ ایستگاه IPGN واقع در شمال و شمال غرب ایران استفاده شده است. اندازه‌گیری‌های GNSS در بازه شش ماهه، از صد و هشتاد و دومین روز از سال ۲۰۲۲ تا سیصد و شصت و پنجمین روز از سال ۲۰۲۲، مورد تحلیل قرار گرفتند. بر اساس گزارش‌های هواشناسی، رطوبت در منطقه مورد مطالعه در این بازه زمانی به اوج خود می‌رسد. قابل ذکر است که برخی از ایستگاه‌ها تنها برای تعداد محدودی از روزها در این بازه داده‌های مشاهداتی ارائه کرده‌اند. ارتفاع ژئودتیک (Geodetic Height) ایستگاه‌های IPGN GNSS مورد استفاده در این مطالعه از ۲۰ متر پایین‌تر از سطح دریا (MSL) تا ۲۵۱۳ متر بالاتر از سطح دریا متغیر است.

تأخیر زینتی کل (ZTD) که با استفاده از تکنیک GNSS به دست می‌آید، معمولاً به دو مؤلفه تقسیم می‌شود: تأخیر زینتی هیدرواستاتیکی (ZHD) و تأخیر زینتی تر (ZWD) (Izanlou et al., 2024). عوامل اقلیمی سطحی، فشار جو، دما و تغییرات رطوبت بر این مقادیر تأثیر می‌گذارند. در بین این دو مؤلفه، ZWD به‌طور مستقیم با مقدار بخار آب موجود در جو مرتبط است و بنابراین برای محاسبه PWV استفاده می‌شود. ZWD با استفاده از معادله (۱) محاسبه می‌شود که از تفریق ZHD از ZTD به دست می‌آید:

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (1)$$

ZWD معمولاً با استفاده از روش‌های پیشرفته تعیین موقعیت، مانند تعیین موقعیت نقطه‌ای دقیق (PPP) و کینماتیک آنی (RTK) به دست می‌آید. روش PPP قابلیت محاسبه مستقیم و لحظه‌ای تأخیر تروپوسفری مطلق در یک ایستگاه را فراهم می‌کند که آن را از روش RTK متمایز می‌سازد. در حالی که روش RTK به شدت به مقایسه داده‌ها بین چندین ایستگاه متکی است، روش PPP به‌صورت مستقل عمل می‌کند و نیازی به شبکه‌ای از ایستگاه‌ها ندارد. در این مطالعه، برای

منجر به خطاهای قابل توجهی در محاسبات شود. بنابراین، باید تصحیح قائم برای دما و فشار در نظر گرفته شود. به طور خاص، اگر ارتفاع داده‌های شبکه (h_{grid}) کمتر از ارتفاع گیرنده (h_i) باشد، تفاوت بین h_{grid} و h_i باید با استفاده از فرمول‌های زیر به صورت قائم برون‌یابی شود. دمای تنظیم‌شده در ارتفاع گیرنده ($T(h_i)$) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T(h_i) = T(h_{grid}) + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \cdot (h_i - h_{grid}) \quad (۶)$$

که در آن، $T(h_i)$ دمای ارتفاع شبکه را نشان می‌دهد و $\partial T / \partial z$ گرادیان قائم دما را نشان می‌دهد که به عنوان مقدار میانگین محاسبه شده از سه لایه شبکه نزدیک به ارتفاع ایستگاه تعیین می‌شود. اگر این نرخ برابر یا بیشتر از ۰ کلوین بر کیلومتر باشد، یا کمتر از -۱۰ کلوین بر کیلومتر باشد، به نرخ استاندارد کاهش دمای متعارف یعنی ۶٫۵- کلوین بر کیلومتر تبدیل می‌شود. فشار اصلاح‌شده در ارتفاع گیرنده ($P(h_i)$) به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$P(h_i) = P(h_{grid}) \cdot \exp\left(-\frac{g \cdot (h_i - h_{grid})}{R_d \cdot T(h_{grid})}\right) \quad (۷)$$

در رابطه بالا، $P(h_{grid})$ فشار در ارتفاع شبکه است، g شتاب گرانشی (تقریباً ۹٫۸۱ متر بر مجذور ثانیه)، R_d ثابت گاز ویژه برای هوای خشک (تقریباً ۲۸۷ ژول بر کیلوگرم بر کلوین) و $T(h_{grid})$ دمای ارتفاع شبکه بر حسب کلوین می‌باشد. شایان ذکر است که گرچه g در بسیاری از کاربردها به طور تقریبی به عنوان مقدار ثابتی (۹٫۸۱ متر بر مجذور ثانیه) در نظر گرفته می‌شود، اما به دلیل چرخش زمین و غیر کروی بودن آن، مقدار آن با عرض جغرافیایی کمی تغییر می‌کند. با این حال، در بیشتر مطالعات هواشناسی و اقلیم‌شناسی، این تغییرات در مقیاس‌های مکانی کوچک قابل چشم‌پوشی بوده و برای سادگی g به عنوان مقدار ثابتی لحاظ می‌شود. برای کاربردهای با دقت بالا یا مطالعات در مقیاس‌های بزرگ، ممکن است تصحیحات وابسته به عرض جغرافیایی برای g با استفاده از مدل‌های ژئوفیزیکی موجود اعمال شود. این فرایند برون‌یابی تضمین می‌کند که مقادیر دما و فشار به طور دقیق

ساده‌شده را کاهش می‌دهد. بنابراین، استفاده از داده‌های مشاهداتی دقیق و روش‌های انتگرال‌گیری مناسب، نقش کلیدی در بهبود دقت برآورد PWV ایفا می‌کند که در نهایت منجر به افزایش دقت پیش‌بینی‌های هواشناسی و مطالعات اقلیمی می‌شود. T_m از طریق انتگرال‌گیری گسسته فشار بخار آب جوی و دمای مطلق جوی در محدوده بالای ایستگاه GNSS محاسبه می‌شود. این رابطه به صورت زیر بیان می‌شود (Davis et al., 1985):

$$T_m = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_{w,i} + P_{w,i+1}}{2} + I}{\sum_{i=1}^n \frac{T_i^2 + T_{i+1}^2}{2}} \cdot \Delta z \quad (۴)$$

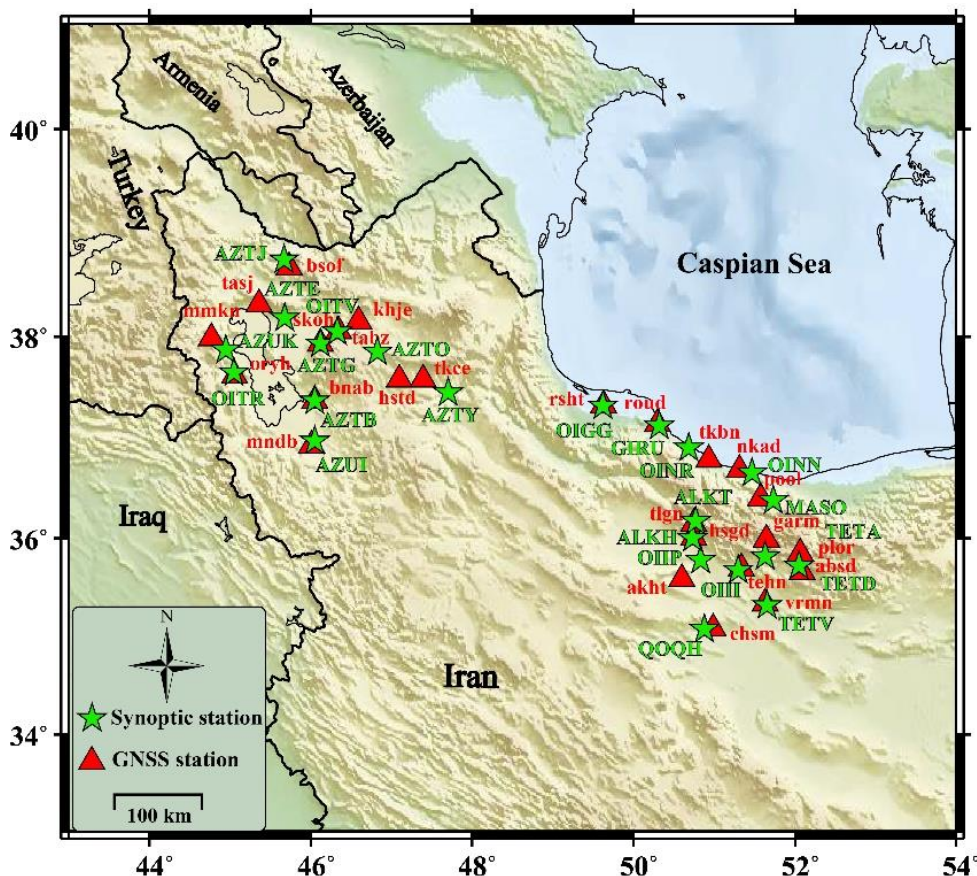
در معادله (۴)، $P_{w,i}$ و T_i به ترتیب نشان‌دهنده فشار بخار آب و دما در لایه i ام جو بر حسب کلوین هستند. Δz اختلاف ارتفاع عمودی بین لایه‌های بالایی و پایینی جو بر حسب متر است. رابطه مربوط به P_w به شرح زیر است (Gong et al., 2018):

$$P_w = \frac{q \cdot p}{(0.622 + 0.378 \cdot q)} \quad (۵)$$

در معادله (۵)، p نشان‌دهنده فشار لایه‌های جوی و q رطوبت ویژه را نشان می‌دهد. هنگام محاسبه T_m با استفاده از داده‌های ارائه‌شده توسط مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت جوئی (ECMWF) مهم است که توجه شود سیستم ارتفاعی داده‌های شبکه‌بندی‌شده ECMWF با سیستم ارتفاعی استفاده‌شده در GNSS همخوانی ندارد. این عدم تطابق می‌تواند منجر به خطاهای قابل توجهی در محاسبات شود. بنابراین، برای محاسبه دقیق T_m ، لازم است ابتدا ارتفاع‌ها بین دو منبع داده یکسان شوند. پس از همسان‌سازی ارتفاع‌ها، داده‌ها باید بر اساس شرایط واقعی، برون‌یابی یا درون‌یابی شوند. هنگام انجام تبدیل ارتفاع، مشخص می‌شود که داده‌های هواشناسی سطحی ارائه‌شده توسط مجموعه داده بازتحلیل ERA5 (<https://cds.climate.copernicus.eu/>) با ارتفاع اندازه‌گیری گیرنده همخوانی ندارد. این ناسازگاری می‌تواند

استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. جدول (۲) مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های GNSS و ایستگاه‌های همدیدی متناظر را نشان می‌دهد. همچنین فاصله میان این دو دسته ایستگاه محاسبه شده است تا مبنای تطبیق و تحلیل داده‌های بارش و PWV قرار گیرد.

در ارتفاع گیرنده محاسبه شوند و خطاهای ناشی از اختلاف ارتفاع بین داده‌های شبکه و محل واقعی اندازه‌گیری از بین بروند. این مجموعه تبدیلات نقش بسیار مهمی در بهبود دقت محاسبات هواشناسی و اقلیم‌شناسی، به ویژه در تعیین پارامترهایی مانند T_m و در نهایت PWV ایفا می‌کنند. شکل (۲) موقعیت مکانی ایستگاه‌های GNSS و همدید مورد

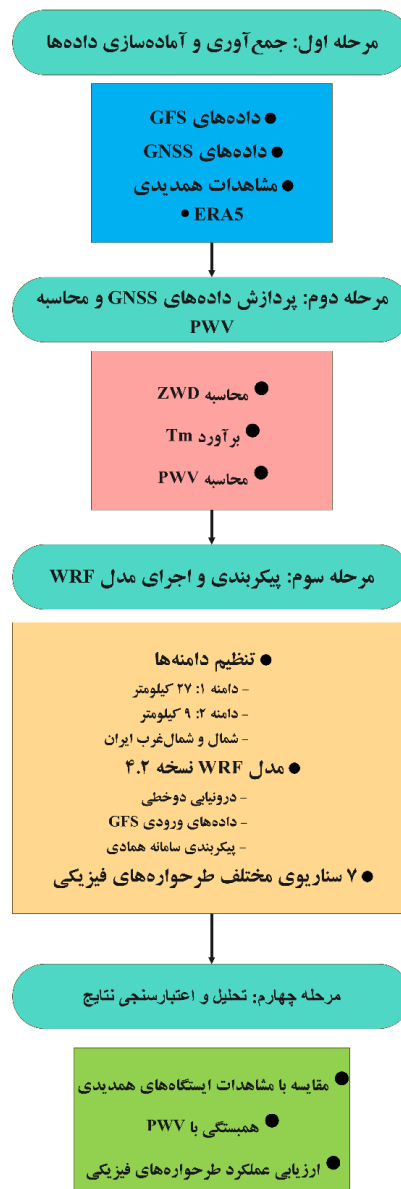


شکل ۲. موقعیت مکانی ایستگاه‌های GNSS و همدیدی.

جدول ۲. مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های GNSS و نزدیک‌ترین ایستگاه‌های همدیدی به آن‌ها همراه با فاصله بین دو ایستگاه.

| فاصله (کیلومتر) | طول جغرافیایی (درجه) | عرض جغرافیایی (درجه) | نزدیک ترین ایستگاه همدیدی | طول جغرافیایی (درجه) | عرض جغرافیایی (درجه) | ایستگاه GNSS |
|--------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------|
| ۷,۵۲ | ۵۲,۰۵ | ۳۵,۷۲ | TETD | ۵۲,۰۹ | ۳۵,۶۶ | absd |
| ۲۹,۷۳ | ۵۰,۸۳ | ۳۵,۷۸ | OIIP | ۵۰,۶ | ۳۵,۵۹ | akht |
| ۰,۱۷ | ۴۶,۰۵ | ۳۷,۳۷ | AZTB | ۴۶,۰۵ | ۳۷,۳۷ | bnab |
| ۱۰ | ۴۵,۶۷ | ۳۸,۷۵ | AZTJ | ۴۵,۷۳ | ۳۸,۶۷ | bsof |
| ۱,۷ | ۵۰,۷۳ | ۳۶ | ALKH | ۵۰,۷۵ | ۳۶,۰۱ | hsgd |
| ۳۸,۳ | ۴۶,۸۳ | ۳۷,۸۵ | AZTO | ۴۷,۰۹ | ۳۷,۵۸ | hstd |
| ۲۰,۲۶ | ۴۴,۹۵ | ۳۷,۸۷ | AZUK | ۴۴,۷۷ | ۳۷,۹۹ | mmkn |
| ۵,۷۴ | ۴۶,۰۵ | ۳۶,۹۷ | AZUI | ۴۶,۰۱ | ۳۶,۹۳ | mndb |
| ۱۴,۸۱ | ۵۱,۴۷ | ۳۶,۶۵ | OINN | ۵۱,۳۱ | ۳۶,۶۹ | nkad |
| ۳,۶ | ۴۵,۰۵ | ۳۷,۶۵ | OITR | ۴۵,۰۶ | ۳۷,۶۲ | oryh |
| ۱۴,۴۷ | ۵۲,۰۵ | ۳۵,۷۲ | TETD | ۵۲,۰۶ | ۳۵,۸۵ | plor |
| ۱۴,۱۸ | ۵۱,۷۳ | ۳۶,۳۸ | MASO | ۵۱,۵۷ | ۳۶,۴ | pool |
| ۲,۹۴ | ۵۰,۳۲ | ۳۷,۱۲ | GIRU | ۵۰,۳ | ۳۷,۱۴ | roud |
| ۰,۵۲ | ۴۹,۶۲ | ۳۷,۳۲ | OIGG | ۴۹,۶۲ | ۳۷,۳۲ | rsht |
| ۱,۳۲ | ۴۶,۳۳ | ۳۸,۰۵ | AZTG | ۴۶,۳۴ | ۳۸,۰۶ | tabz |
| ۳,۶۳ | ۵۱,۳ | ۳۵,۶۸ | OIII | ۵۱,۳۳ | ۳۵,۷ | tehn |
| ۲۵,۶۱ | ۵۰,۶۸ | ۳۶,۹ | OINR | ۵۰,۹۳ | ۳۶,۷۹ | tkbn |
| ۳۰,۶۸ | ۴۷,۷ | ۳۷,۴۵ | AZTY | ۴۷,۳۹ | ۳۷,۵۸ | tkce |
| ۳,۶۹ | ۵۰,۷۷ | ۳۶,۱۷ | ALKT | ۵۰,۷۴ | ۳۶,۱۴ | tlgn |
| ۳,۱۲ | ۵۱,۶۵ | ۳۵,۳۲ | TETV | ۵۱,۶۳ | ۳۵,۳۴ | vrnm |

در شکل (۳) نیز فلوچارت کلی روش پژوهش این مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۳. نمودار جریان مراحل پژوهش برای بررسی عملکرد طرحواره‌های فیزیکی مختلف مدل WRF و اعتبارسنجی با داده‌های GNSS.

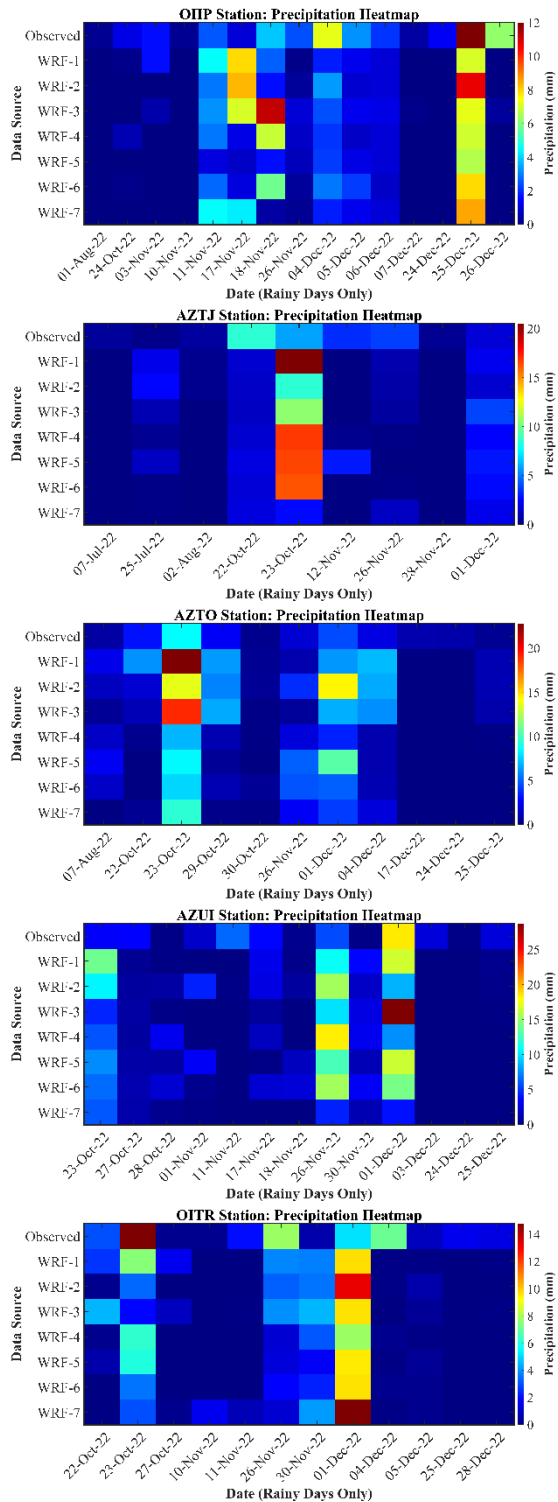
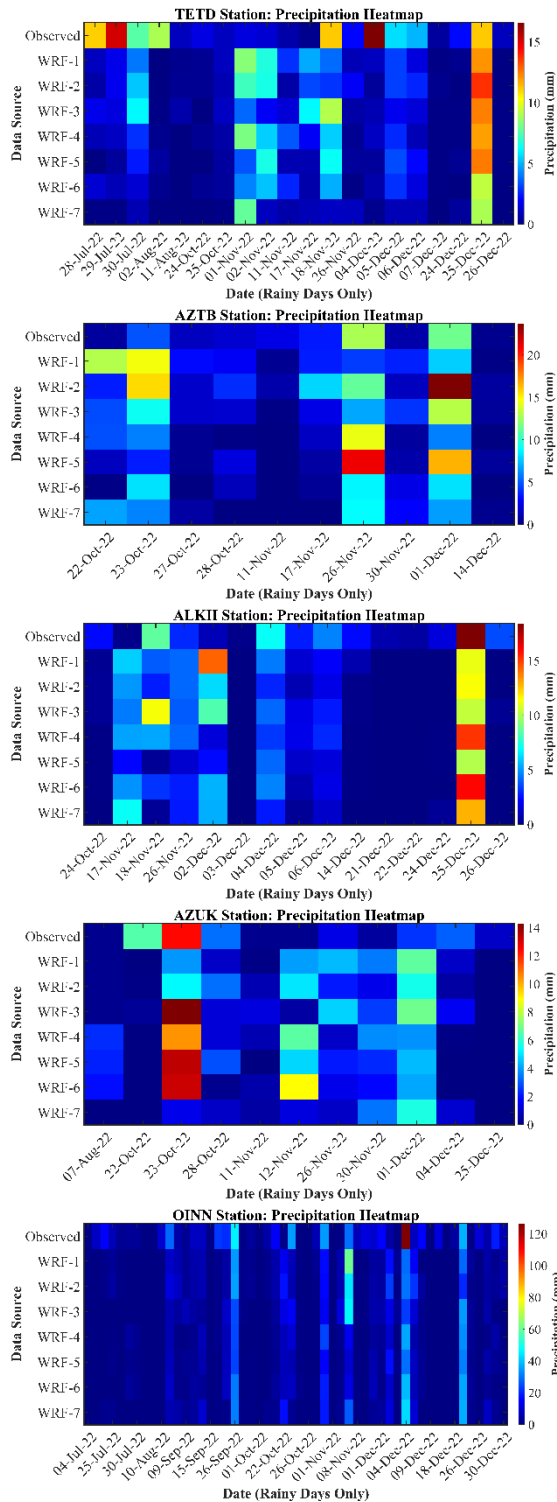
۳. نتایج و بحث

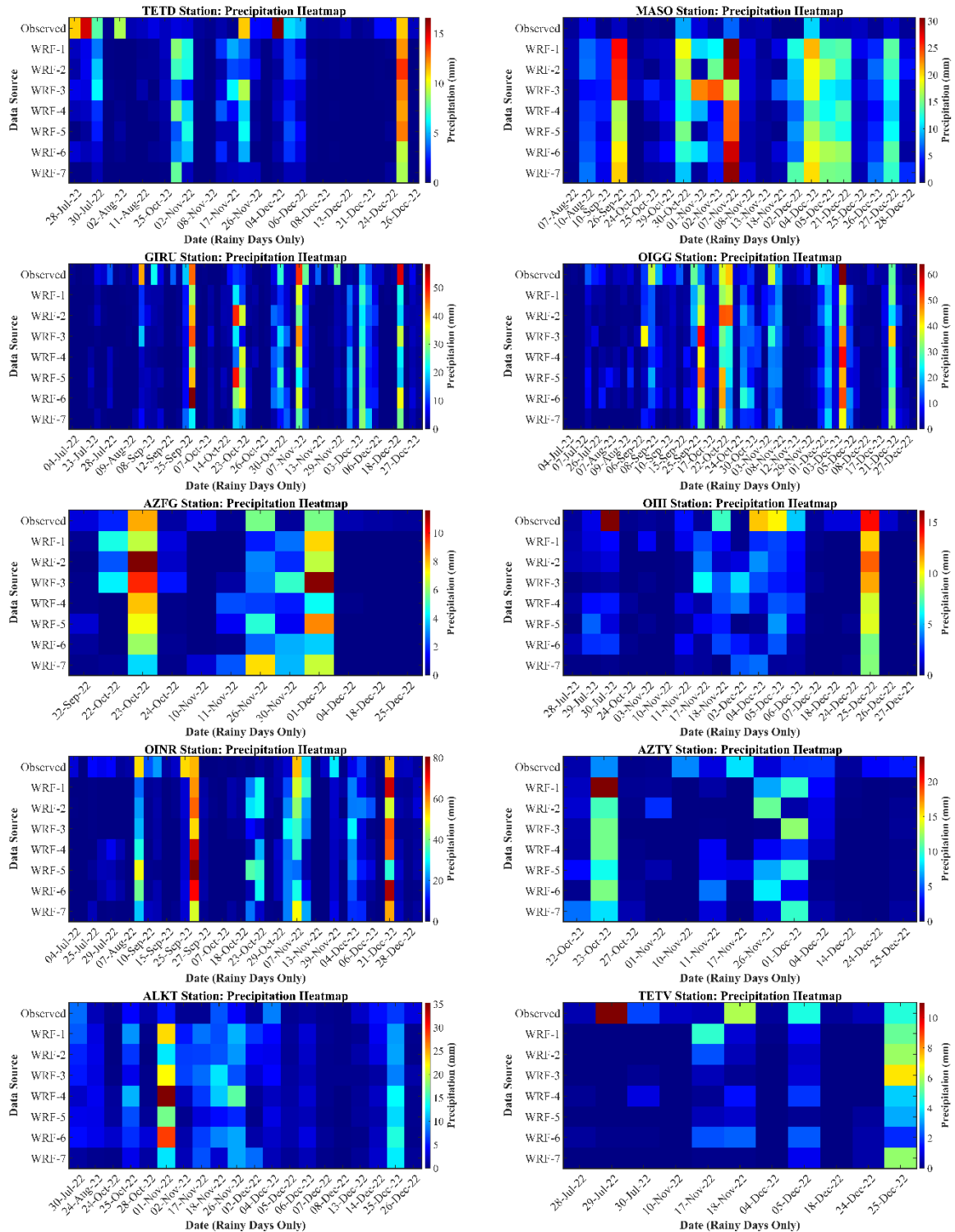
آمد)، نقاط قوت و ضعف طرحواره‌ها در شرایط اقلیمی و جغرافیایی گوناگون کشور بررسی می‌شود. در این پژوهش از داده‌های دیدبانی بارش تجمعی ۲۴ ساعته در ایستگاه‌های همدیدی واقع در شمال و شمال‌غرب کشور استفاده شده است. مقادیر بارش تجمعی از ساعت ۰۶ به وقت UTC هر روز تا ساعت ۰۶ روز بعد محاسبه و برای مقایسه با خروجی مدل WRF در همان بازه زمانی مورد استفاده قرار گرفت. برای بررسی دقیق‌تر عملکرد مدل در بازتولید بارش‌های رخ داده، در شکل (۴) نقشه‌های حرارتی (Heatmap) بارش

در این بخش به ارزیابی عملکرد مدل WRF در شبیه‌سازی بارش‌های نیمه دوم سال ۲۰۲۲ در سطح ایستگاه‌های همدید منتخب پرداخته می‌شود. بدین منظور، ابتدا مقایسه‌ای میان سری‌های زمانی بارش مشاهده‌ای و خروجی هفت طرحواره مختلف فیزیکی مدل ارائه شده است. این مقایسه امکان شناسایی میزان دقت مدل در بازتولید شدت، فراوانی و زمان‌بندی رخداد‌های بارشی را فراهم می‌سازد. سپس با استفاده از تحلیل‌های تکمیلی آماری (که در ادامه خواهد

(کمترین مقدار) تا قرمز (بیشترین مقدار) نشان داده شده‌اند. این شیوه نمایش، علاوه بر افزایش خوانایی، امکان مقایسه هم‌زمان شدت، زمان وقوع و تطابق الگوی بارش میان مدل و مشاهدات را در هر ایستگاه فراهم می‌سازد.

برای ایستگاه‌های منتخب شمال و شمال‌غرب کشور نمایش داده شده است. در این نقشه‌ها، محور افقی بیانگر توالی روزهای بارشی طی نیمه دوم سال ۲۰۲۲ و محور عمودی شامل داده‌های مشاهده‌ای و خروجی هفت طرحواره فیزیکی مدل WRF است. مقادیر بارش به‌صورت رنگی از آبی





شکل ۴. نقشه‌های حرارتی (Heatmap) بارش حاصل از ایستگاه‌های همدیدی و خروجی هفت طرحواره فیزیکی مدل WRF در شمال و شمال‌غرب ایران طی نیمه دوم سال ۲۰۲۲.

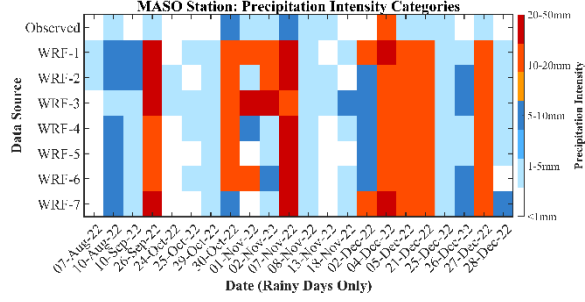
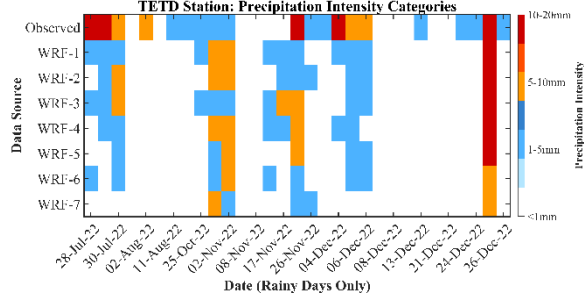
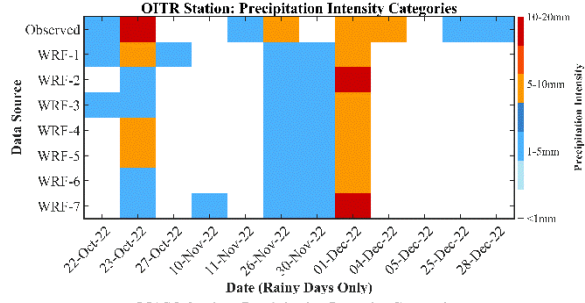
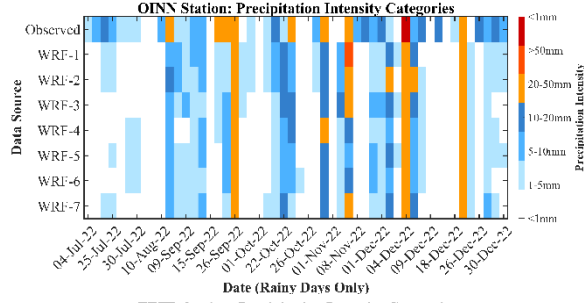
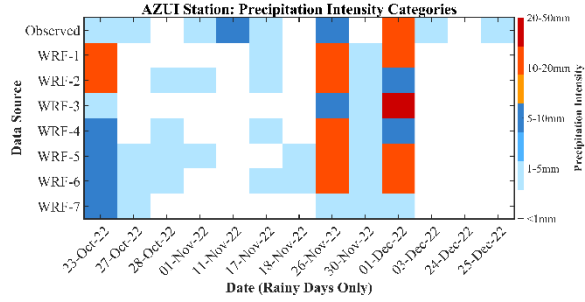
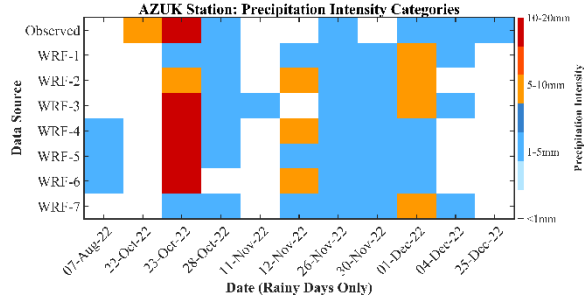
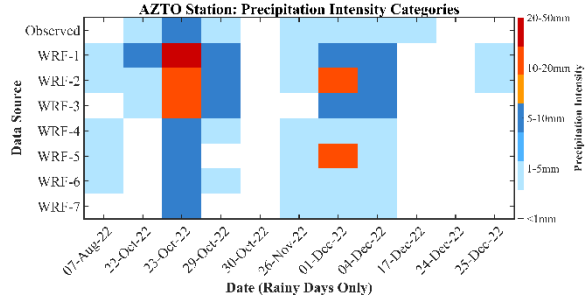
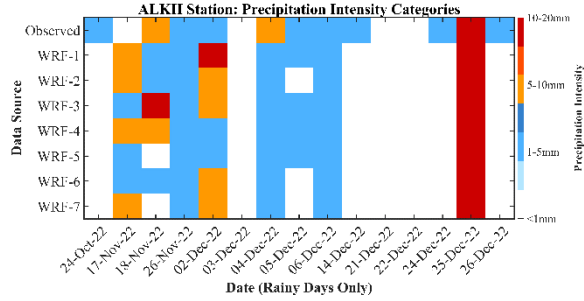
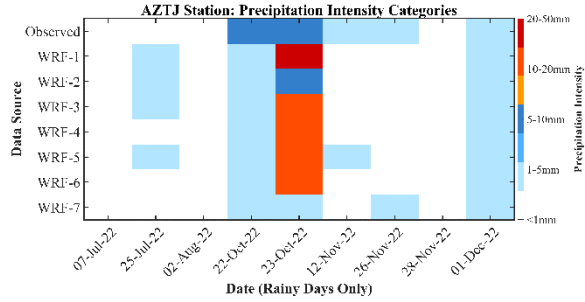
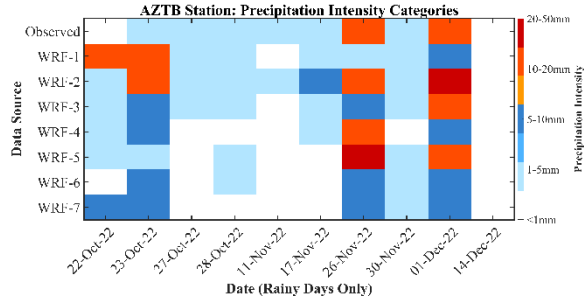
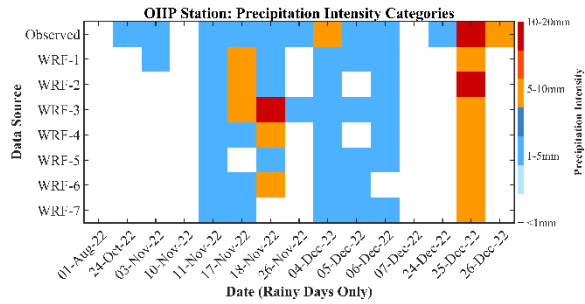
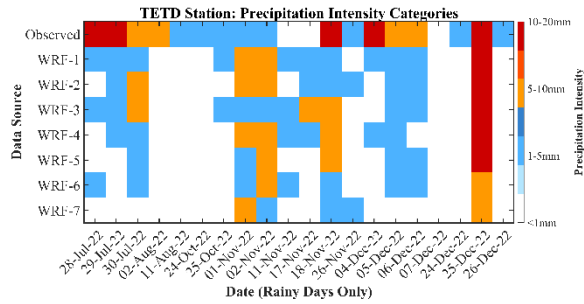
نشان‌دهنده داده‌های مشاهده‌ای و خروجی هفت طرحواره فیزیکی مدل WRF است. شدت بارش در چهار طبقه اصلی شامل کمتر از ۱ میلی‌متر (آبی روشن)، ۱ تا ۵ میلی‌متر (آبی متوسط)، ۵ تا ۱۰ میلی‌متر (سبز)، و بیش از ۱۰ میلی‌متر (نارنجی) و بیش از ۱۰ میلی‌متر (قرمز).

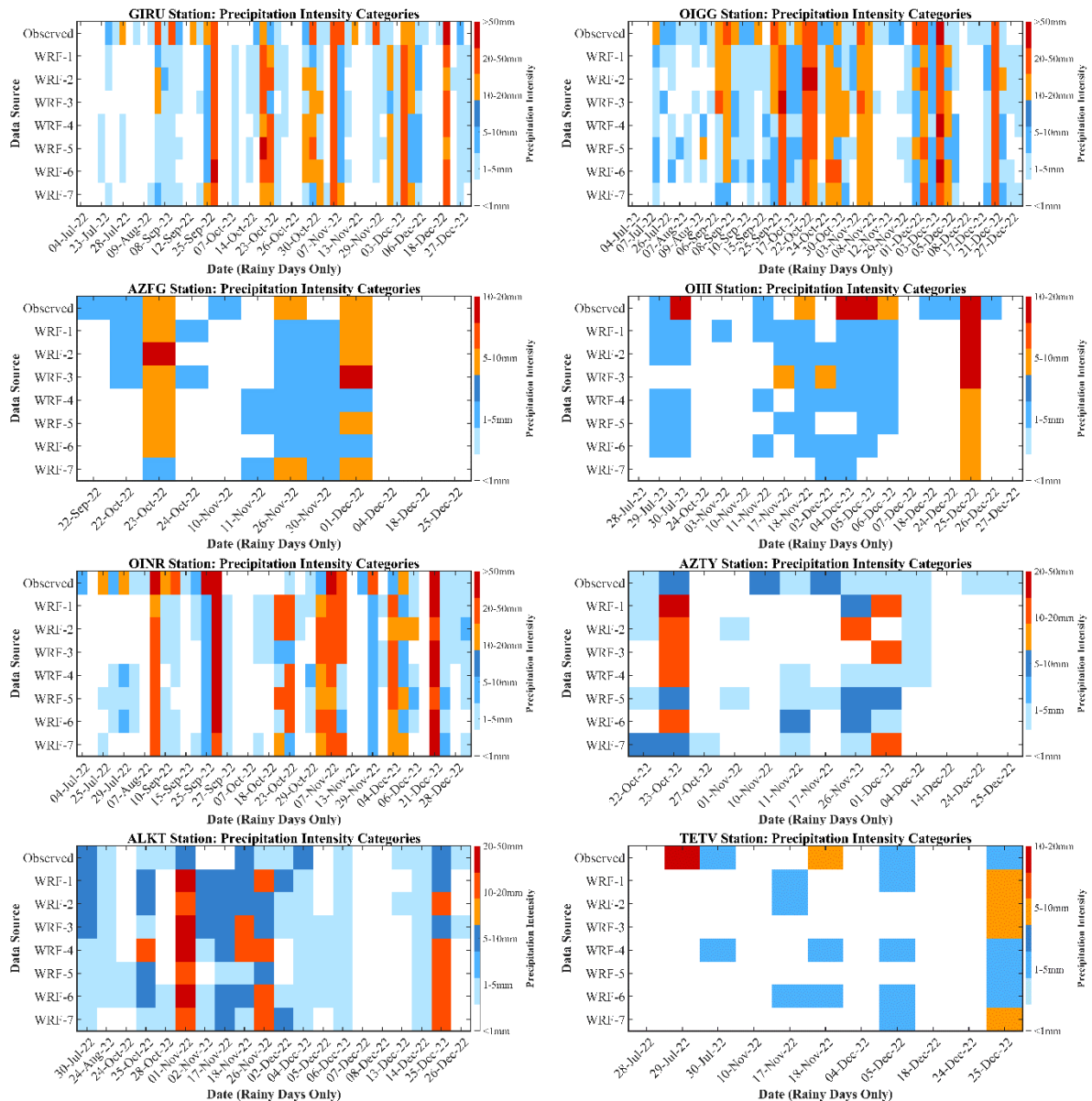
برای بررسی دقیق‌تر الگوی وقوع و شدت بارش، شکل (۵) توزیع زمانی و مکانی بارش را در ایستگاه‌های منتخب بر اساس طبقات شدت بارش نمایش می‌دهد. در این نقشه‌های حرارتی، محور افقی بیانگر روزهای بارشی و محور عمودی

در بیشترین تعداد ایستگاه‌ها بهترین عملکرد را از خود نشان داده‌اند. به‌طور خاص، طرحواره شماره ۴ در ایستگاه‌های ALKH، AZTO، OIII، AZTY و طرحواره شماره ۶ در ایستگاه‌های OIIP، AZTB، TETV، ALKT به‌عنوان گزینه برتر شناسایی شدند. این دو طرحواره در مجموع بیشترین تعادل را میان مقادیر همبستگی بالا و خطای نسبی پایین ارائه داده‌اند. برای تعیین بهترین طرحواره فیزیکی مدل WRF در هر ایستگاه، از یک معیار ترکیبی چندشاخصه استفاده شد تا دقت مدل از جنبه‌های مختلف ارزیابی شود. در این روش، سه شاخص آماری شامل ضریب همبستگی اسپیرمن، nRMSE و nMAE به‌عنوان معیارهای اصلی سنجش عملکرد طرحواره‌ها در نظر گرفته شدند. برای هر طرحواره، مقادیر این شاخص‌ها محاسبه و سپس بر اساس عملکرد نسبی، به هر شاخص رتبه‌ای اختصاص داده شد؛ به‌طوری‌که بالاترین مقدار همبستگی و کمترین مقادیر خطای نسبی رتبه بهتری دریافت کردند. در نهایت، با جمع رتبه‌های به‌دست‌آمده از سه شاخص، طرحواره‌ای که کمترین مجموع رتبه را داشت، به‌عنوان «بهترین طرحواره فیزیکی» در آن ایستگاه انتخاب گردید. این رویکرد ضمن ترکیب معیارهای دقت، همبستگی و مقیاس‌پذیری خطا، تصویری جامع‌تر از توانایی مدل در بازتولید بارش در شرایط اقلیمی و مکانی متفاوت ارائه می‌دهد.

نتایج شکل (۵) و جدول (۳) نشان می‌دهند که مدل WRF با وجود اختلاف در شدت بارش، توانایی نسبتاً مناسبی در شناسایی رخداد‌های بارشی دارد و انتخاب طرحواره‌های فیزیکی مناسب می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود دقت پیش‌بینی بارش ایفا کند. استفاده از شاخص‌های نسبی (nRMSE و nMAE) نیز به تفسیر دقیق‌تر عملکرد مدل در ایستگاه‌هایی با شرایط بارشی متفاوت کمک کرده است.

میلی‌متر (قرمز) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل در بازتولید رخداد‌های بارش خفیف و متوسط عملکرد نسبتاً پایداری دارد، در حالی که در بارش‌های شدید (بیش از ۱۰ میلی‌متر) اختلاف میان طرحواره‌ها قابل توجه است. طرحواره‌های ۴، ۵ و ۶ در بیشتر ایستگاه‌ها توانسته‌اند توزیع شدت بارش را به الگوی مشاهداتی نزدیک‌تر بازسازی کنند. برای نمونه، در ایستگاه‌های AZTB و OIIP طرحواره‌های ۵ و ۶ بیشترین انطباق را با رخداد‌های بارش شدید نشان می‌دهند، در حالی که در ایستگاه‌های AZTJ و TETD طرحواره ۴ عملکرد بهتری در بازتولید توالی زمانی رخدادها داشته است. بر اساس جدول (۳)، مقادیر ضریب همبستگی اسپیرمن (ρ_s) در ایستگاه‌های مختلف بین ۰/۲۶ تا ۰/۷۱ متغیر بوده است که بیانگر توان نسبی مدل در بازتولید روند زمانی بارش‌ها، به‌ویژه در ایستگاه‌های با شدت بارش بالاتر است. بیشترین مقدار همبستگی در ایستگاه OIIP با مقدار ۰/۷۱ و کمترین مقدار در ایستگاه TETD با مقدار ۰/۲۶ مشاهده شد. در بیشتر ایستگاه‌ها، مدل در تشخیص رخداد‌های بارشی عملکرد قابل قبولی نشان داده است. مقادیر nRMSE و nMAE که بیانگر خطای نسبی مدل نسبت به میانگین بارش مشاهده‌ای هستند، به‌ترتیب در بازه‌های ۵۰ تا ۱۴۵ درصد و ۵۰ تا ۹۰ درصد قرار دارند. مقادیر بالاتر از ۱۰۰ درصد نشان‌دهنده آن است که میانگین خطای مدل بیش از میانگین بارش واقعی در آن ایستگاه بوده است. کمترین مقدار nRMSE مربوط به ایستگاه GIRU (۹۶/۳٪) و کمترین مقدار nMAE مربوط به ایستگاه AZTG (۷۱/۴٪) است که حاکی از عملکرد نسبتاً بهتر مدل در این ایستگاه‌ها است. در مقابل، بیشترین خطای نسبی در ایستگاه TETD (۱۱۱/۳٪) مشاهده می‌شود که به دلیل شدت پایین بارش و حساسیت بالای شاخص در مقادیر کوچک رخ داده است. بر پایه نتایج جدول (۳)، طرحواره‌های فیزیکی شماره ۴ و ۶





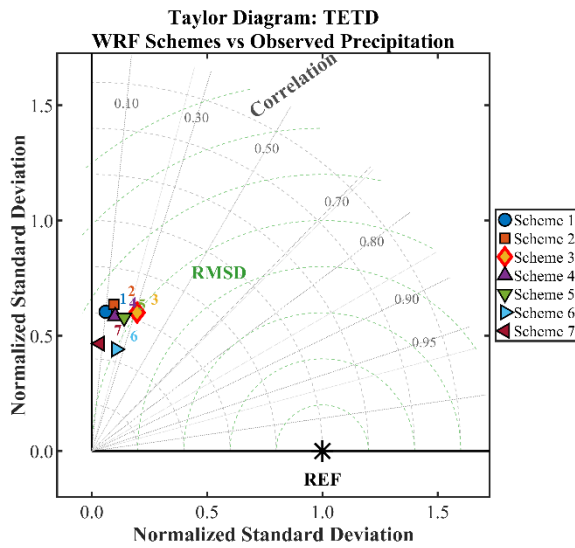
شکل ۵. توزیع شدت بارش در روزهای بارشی ایستگاه‌های منتخب شمال و شمال‌غرب ایران برای داده‌های مشاهده‌ای و خروجی هفت طرحواره فیزیکی مدل WRF در نیمه دوم سال ۲۰۲۲.

شماره ۳، ۴، ۵ و ۶ بیشترین انطباق را با داده‌های مشاهده‌ای در اغلب ایستگاه‌ها داشته‌اند. به‌طور خاص، در ایستگاه‌های TETD، AZUK و OITR، طرحواره ۳ کمترین RMSD و بیشترین ضریب همبستگی را نشان داده و به عنوان طرحواره بهینه انتخاب شده است. در حالی که در ایستگاه‌های ALKH، MASO و AZTO، طرحواره ۴ عملکرد برتری داشته است. همچنین در ایستگاه‌های OIIP و OINN طرحواره ۶ نزدیک‌ترین انحراف معیار و بیشترین شباهت آماری را با مشاهدات ثبت کرده است. در برخی مناطق دیگر مانند AZUI و AZTB

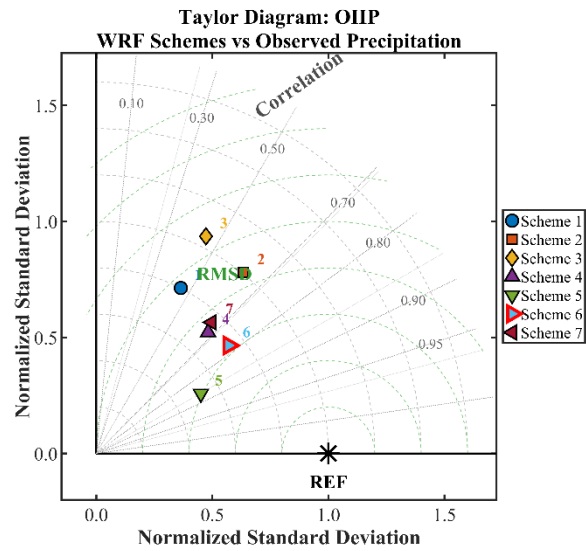
در شکل (۶)، نمودارهای تیلور برای بیست ایستگاه همدیدی در شمال و شمال‌غرب ایران نمایش داده شده است تا همبستگی، انحراف معیار نرمال‌شده و ریشه میانگین مربعات انحراف (RMSD) طرحواره‌های فیزیکی مختلف مدل WRF با داده‌های بارش مشاهده‌ای مقایسه شود. نتایج این نمودارها نشان می‌دهد که تفاوت معنی‌داری میان عملکرد طرحواره‌ها در ایستگاه‌های مختلف وجود دارد و هیچ طرحواره‌ای در تمام مناطق عملکرد یکسانی ندارد. با این حال، الگوی کلی نتایج بیانگر آن است که طرحواره‌های

متغیر بوده و در بیشتر موارد طرحواره‌های ۳ تا ۶ دارای RMSD کمتر از ۰/۵ و انحراف معیار نزدیک به واحد بوده‌اند. این نتایج حاکی از آن است که استفاده از این گروه از طرحواره‌ها می‌تواند در شبیه‌سازی بارش‌های شمال کشور دقت پیش‌بینی را به‌طور چشمگیری بهبود دهد. در جمع‌بندی می‌توان گفت که اگرچه طرحواره شماره ۵ در تحلیل کلی (میانگین تمام ایستگاه‌ها) همچنان بیشترین همبستگی را با داده‌های GNSS و همدیدی نشان می‌دهد، اما نمودارهای تیلور تأکید می‌کنند که تعیین طرحواره بهینه نیازمند در نظر گرفتن ویژگی‌های مکانی و نوع سامانه بارشی هر منطقه است.

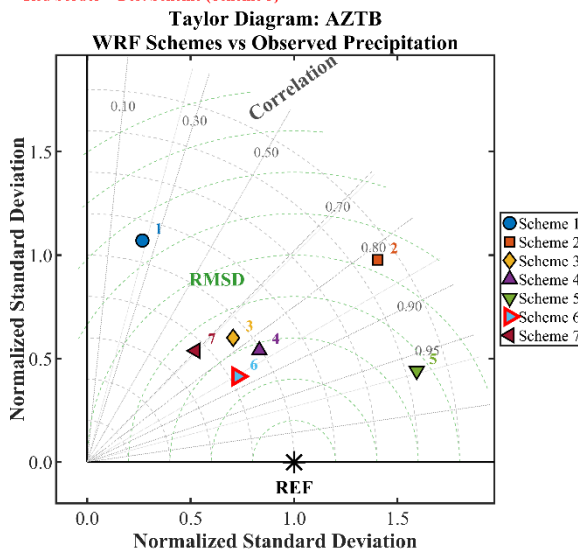
نیز طرحواره‌های ۵ و ۷ نتایج قابل قبولی ارائه داده‌اند. این تفاوت‌های مکانی نشان می‌دهد که پاسخ مدل WRF به انتخاب طرحواره‌های فیزیکی به شرایط محلی از جمله توپوگرافی، رطوبت و نوع سیستم‌های بارشی بسیار حساس است. طرحواره‌هایی که شامل شبیه‌سازی دقیق‌تر فرآیندهای میکروفیزیکی و همرفت هستند (نظیر Scheme 3 و Scheme 4) در مناطق کوهستانی عملکرد بهتری داشته‌اند، در حالی که طرحواره‌های با تنظیمات ساده‌تر (مانند Scheme 1 و ۲) در مناطق پست‌تر یا نزدیک دریا ضعیف‌تر عمل کرده‌اند. بر اساس تحلیل آماری مجموع ایستگاه‌ها، میانگین ضریب همبستگی طرحواره‌ها در بازه ۰/۷ تا ۰/۹۵



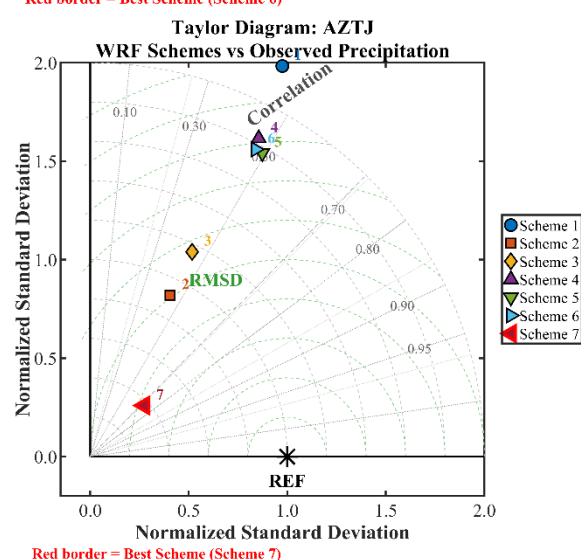
Red border = Best Scheme (Scheme 3)



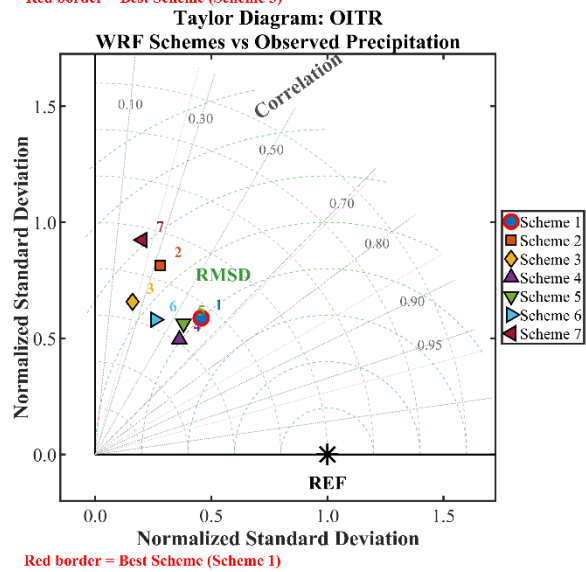
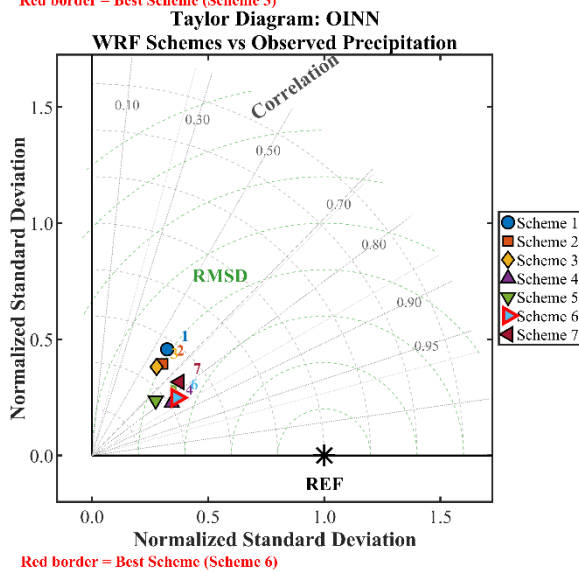
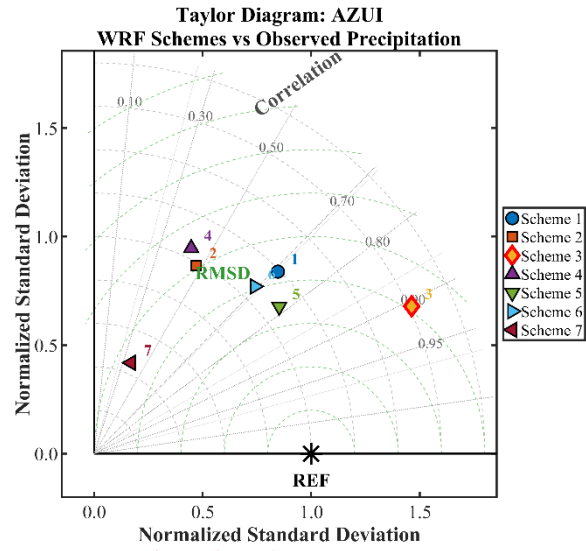
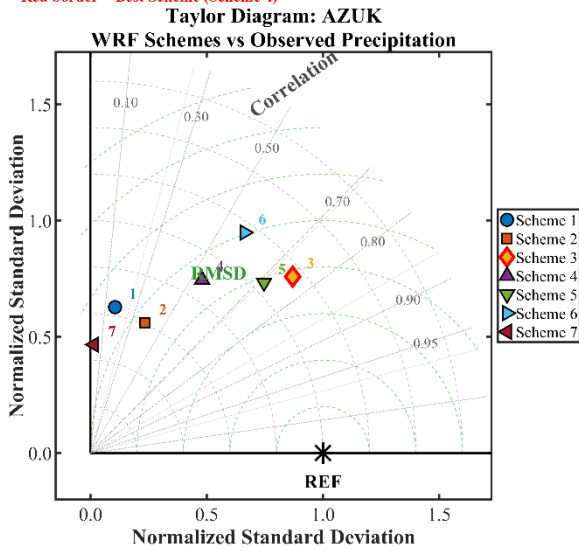
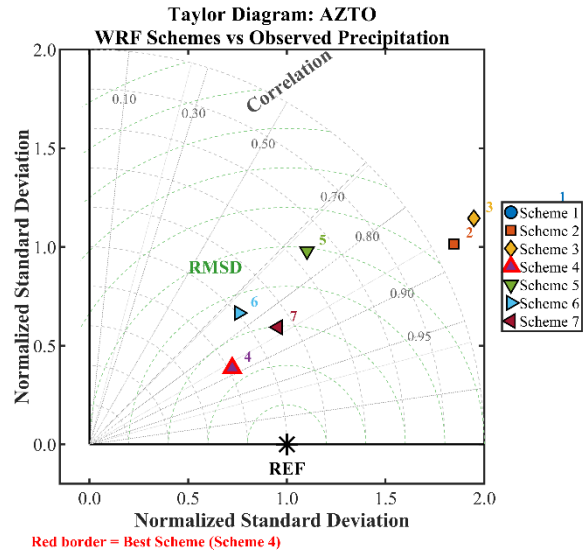
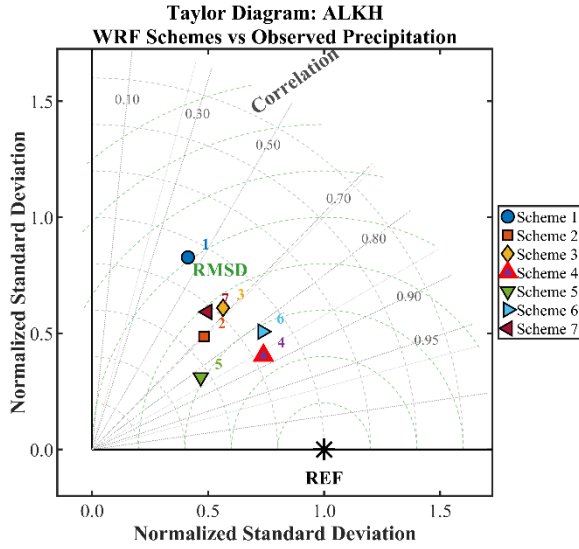
Red border = Best Scheme (Scheme 6)

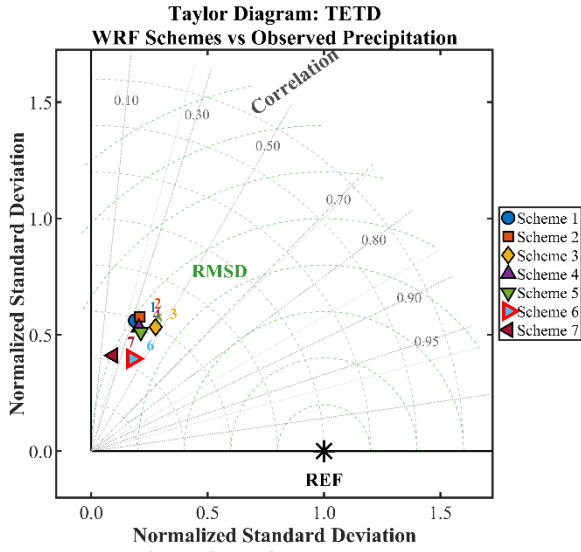


Red border = Best Scheme (Scheme 6)

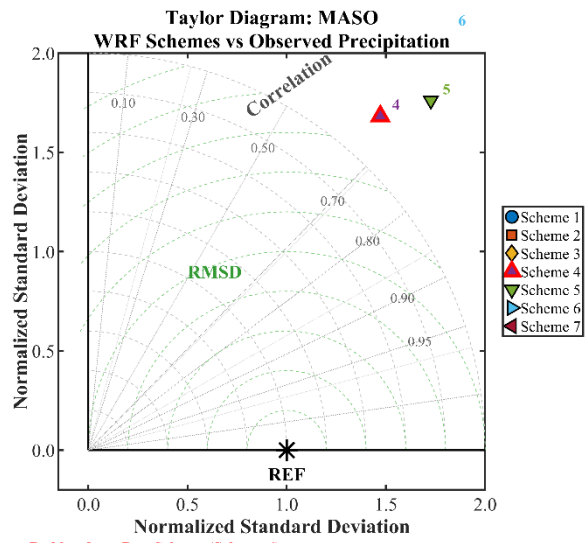


Red border = Best Scheme (Scheme 7)

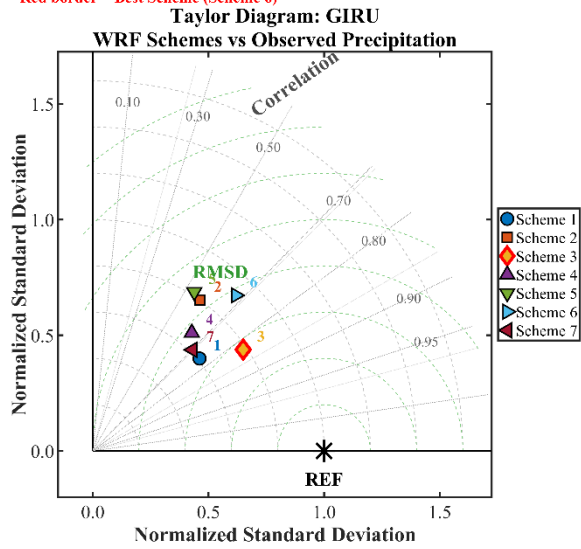




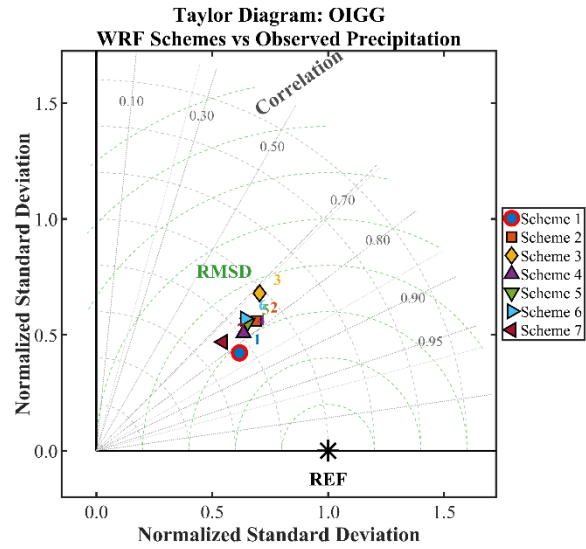
Red border = Best Scheme (Scheme 6)



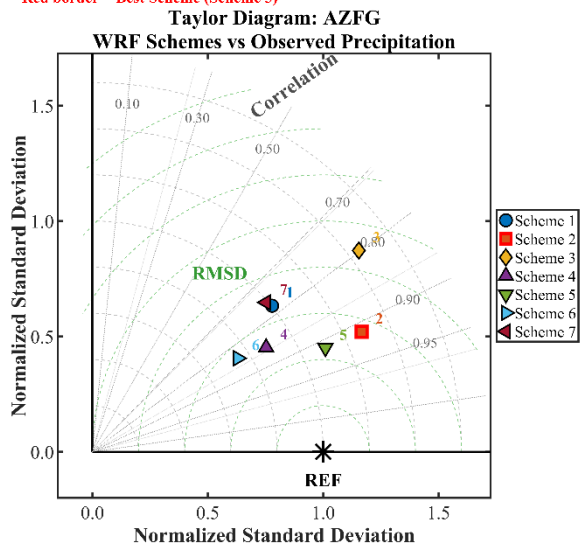
Red border = Best Scheme (Scheme 4)



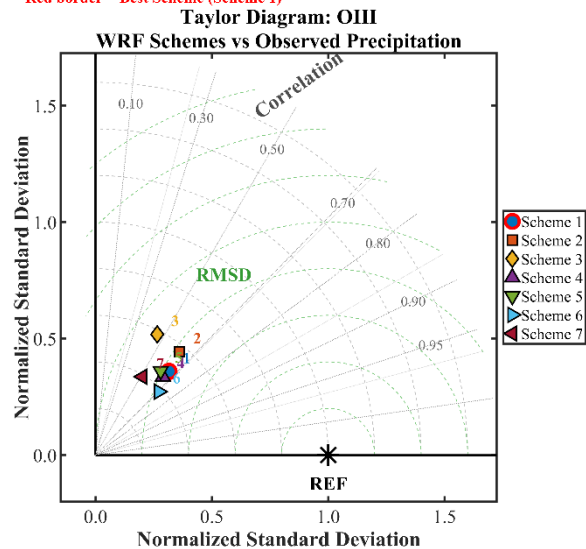
Red border = Best Scheme (Scheme 3)



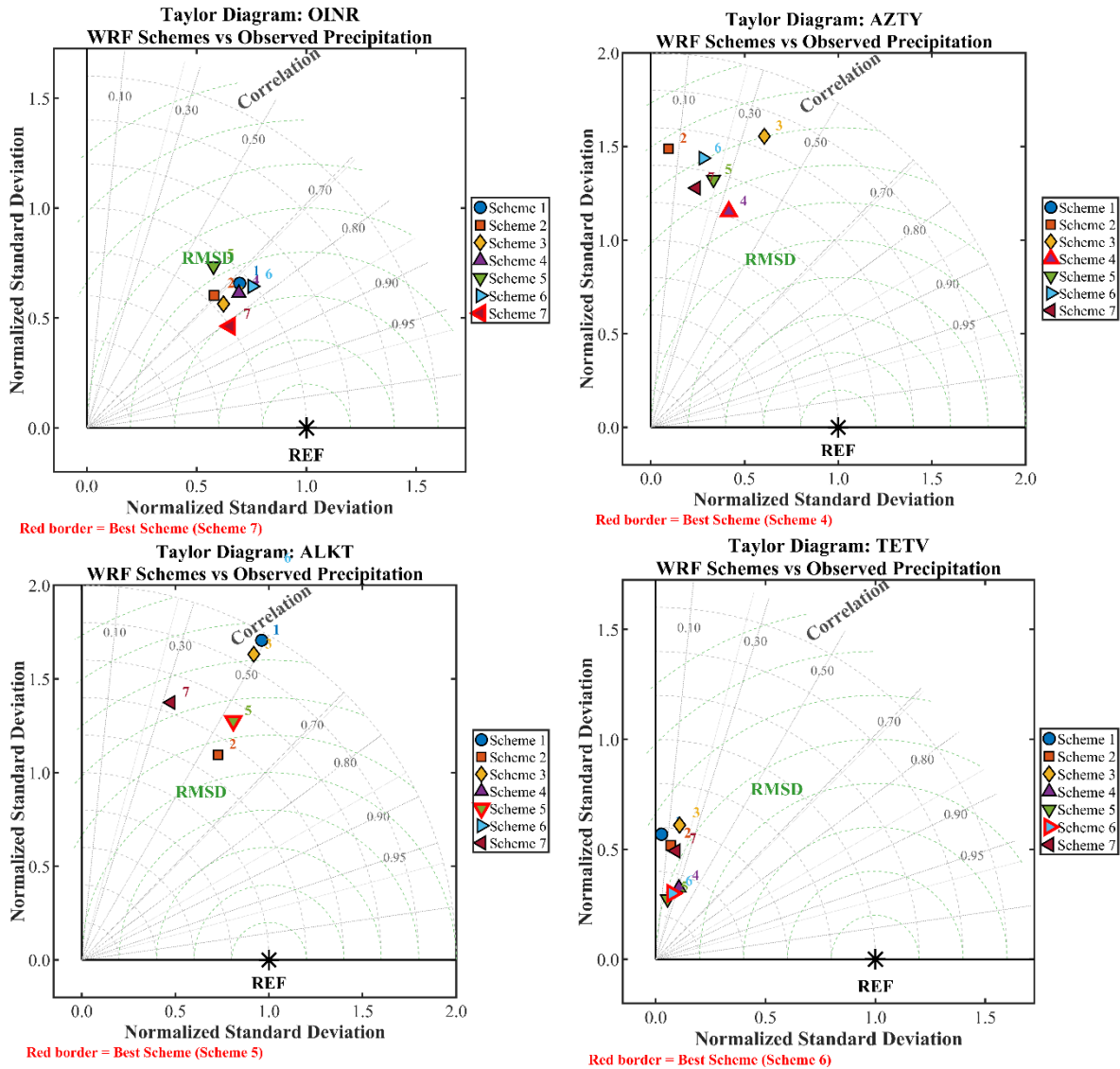
Red border = Best Scheme (Scheme 1)



Red border = Best Scheme (Scheme 2)



Red border = Best Scheme (Scheme 1)



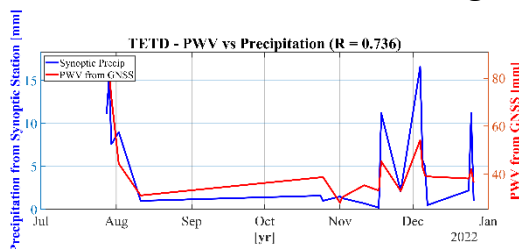
شکل ۶. نمودار تیلور مقایسه عملکرد طرحواره‌های فیزیکی مختلف مدل WRF در شبیه‌سازی بارش نسبت به مشاهدات ایستگاه‌های همدیدی در شمال و شمال‌غرب ایران.

جدول ۳. مقادیر ضریب همبستگی اسپیرمن (ρ_s)، خطای میانگین مربعات نسبی (nRMSE)، خطای قدر مطلق نسبی (nMAE) و طرحواره فیزیکی برتر برای هر ایستگاه همدیدی در شمال و شمال‌غرب ایران.

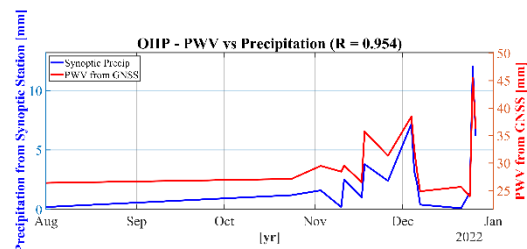
| تعداد مشاهدات | نسبی MAE (%) | نسبی RMSE (%) | ضریب همبستگی اسپیرمن | بهترین طرحواره | ایستگاه همدید |
|---------------|--------------|---------------|----------------------|----------------|---------------|
| ۲۰ | ۷۲٫۲۸ | ۱۱۱٫۲۹ | ۰٫۲۶ | ۳ | TETD |
| ۱۶ | ۵۷٫۸۰ | ۸۳٫۸۰ | ۰٫۷۱ | ۶ | OIIP |
| ۱۱ | ۵۱٫۳۶ | ۶۲٫۴۴ | ۰٫۶۰ | ۵ | AZTB |
| ۱۰ | ۷۰٫۸۰ | ۱۰۷٫۲۸ | ۰٫۶۴ | ۴ | AZTJ |
| ۱۵ | ۵۳٫۸۴ | ۶۵٫۰۳ | ۰٫۵۸ | ۴ | ALKH |
| ۱۴ | ۵۰٫۱۸ | ۶۴٫۰۱ | ۰٫۵۳ | ۴ | AZTO |
| ۱۲ | ۷۶٫۶۷ | ۱۰۲٫۲۹ | ۰٫۴۸ | ۳ | AZUK |
| ۱۵ | ۷۸٫۳۴ | ۱۱۲٫۴۶ | ۰٫۳۶ | ۳ | AZUI |

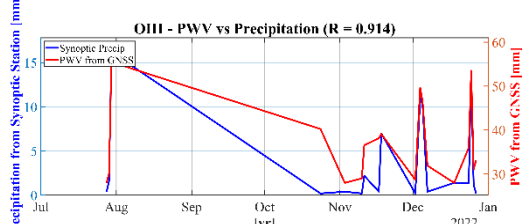
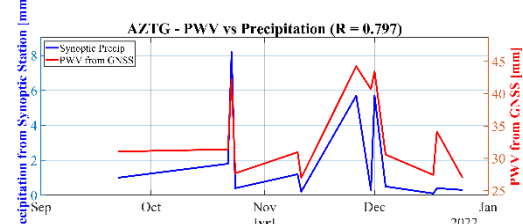
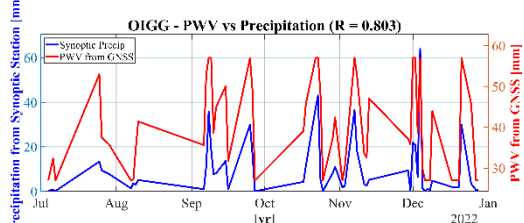
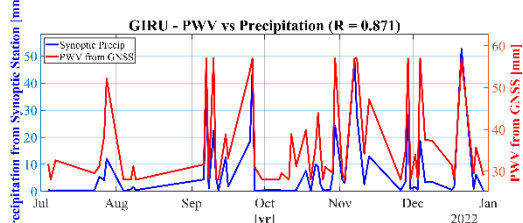
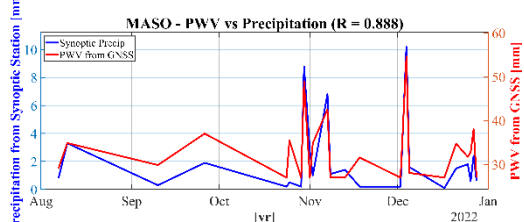
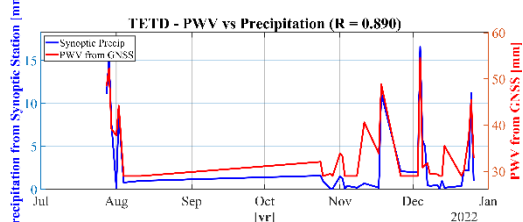
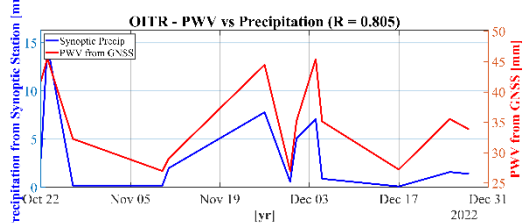
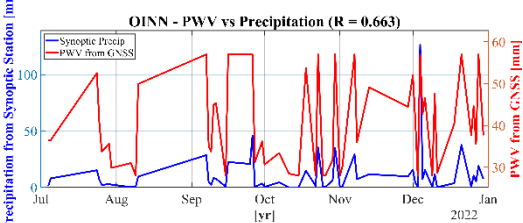
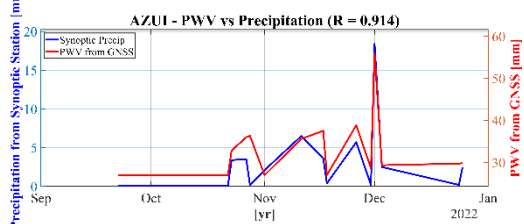
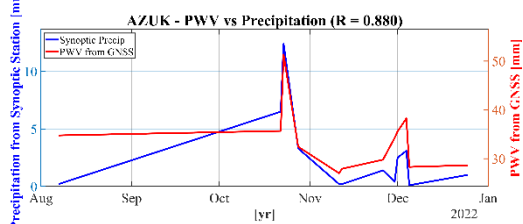
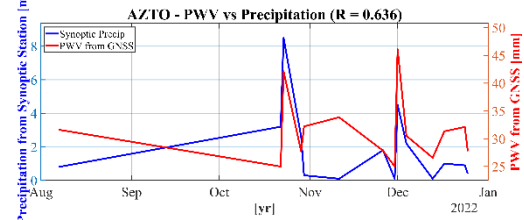
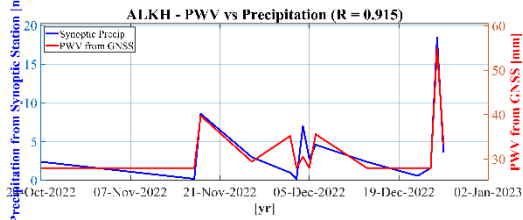
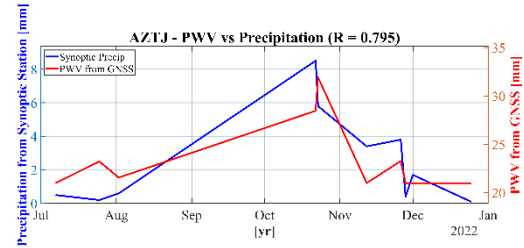
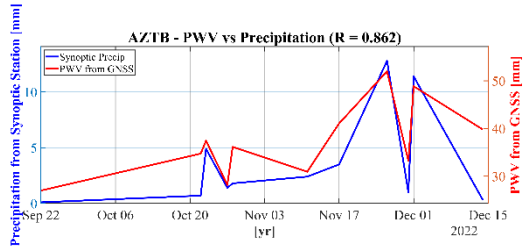
| | | | | | |
|----|--------|--------|------|---|------|
| ۵۴ | ۶۸٫۶۱ | ۱۳۰٫۹۵ | ۰٫۶۰ | ۶ | OINN |
| ۱۳ | ۷۵٫۴۴ | ۱۰۱٫۸۴ | ۰٫۵۶ | ۱ | OITR |
| ۳۵ | ۸۳٫۶۵ | ۱۴۴٫۹۰ | ۰٫۶۰ | ۴ | TETD |
| ۲۳ | ۲۱۸٫۰۴ | ۳۱۰٫۰۱ | ۰٫۶۴ | ۴ | MASO |
| ۶۰ | ۵۶٫۰۳ | ۹۶٫۳۰ | ۰٫۶۱ | ۳ | GIRU |
| ۵۳ | ۵۰٫۹۳ | ۷۹٫۲۶ | ۰٫۶۷ | ۱ | OIGG |
| ۱۳ | ۵۱٫۵۵ | ۷۱٫۴۰ | ۰٫۶۹ | ۲ | AZTG |
| ۱۹ | ۶۹٫۱۰ | ۱۱۵٫۷۶ | ۰٫۶۷ | ۱ | OIII |
| ۴۴ | ۵۳٫۰۷ | ۹۷٫۰۹ | ۰٫۶۸ | ۷ | OINR |
| ۱۴ | ۷۵٫۶۱ | ۱۱۵٫۰۸ | ۰٫۱۴ | ۴ | AZTY |
| ۲۲ | ۸۰٫۶۷ | ۱۲۴٫۰۳ | ۰٫۷۶ | ۵ | ALKT |
| ۱۱ | ۷۹٫۳۵ | ۱۳۱٫۳۷ | ۰٫۵۱ | ۶ | TETV |

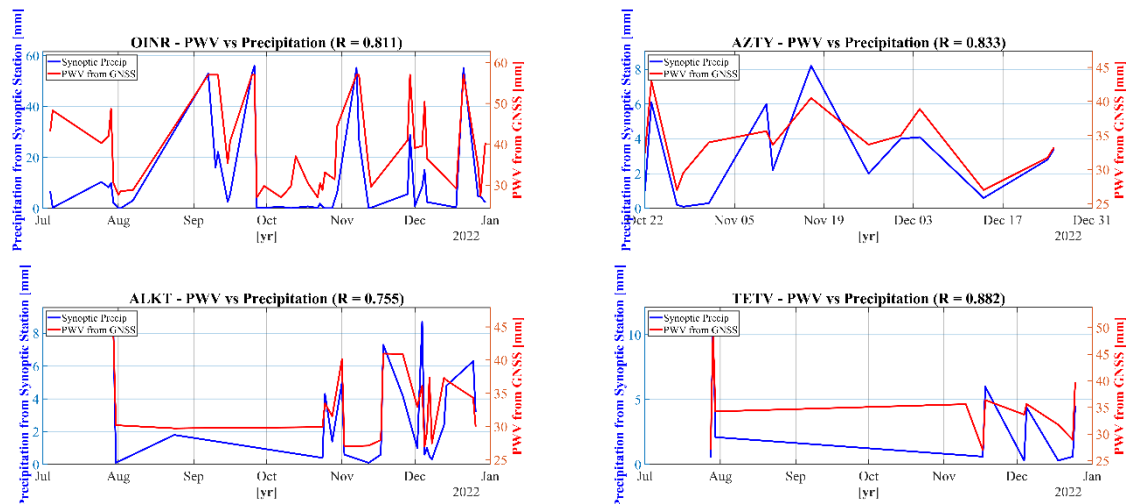
دینامیک جو در این نواحی باشد. مقایسه سری‌های زمانی نشان می‌دهد که در بسیاری از موارد، افزایش PWV به‌عنوان یک سیگنال پیش‌نگر نسبت به وقوع بارش قابل شناسایی است. به‌طور خاص در ایستگاه‌هایی با همبستگی بالا، قله‌های PWV پیش از بارش‌های شدید ظاهر شده و بنابراین می‌تواند به‌عنوان شاخصی کارآمد برای پایش و پیش‌بینی کوتاه‌مدت بارش مورد استفاده قرار گیرد. نتایج شکل (۶) تأیید می‌کند که ترکیب داده‌های GNSS و ایستگاه‌های زمینی می‌تواند درک بهتری از فرآیندهای رطوبتی جو فراهم آورد و موجب بهبود مدل‌سازی و پیش‌بینی بارش شود. این موضوع به‌ویژه در نواحی با شبکه مشاهداتی محدود می‌تواند نقش مهمی در افزایش قابلیت اطمینان سامانه‌های هشدار سیل و مدیریت منابع آب ایفا کند.



در شکل (۷) بررسی رابطه بین بارش‌های ثبت شده در ایستگاه‌های همدید و تغییرات PWV حاصل از داده‌های GNSS در ایستگاه‌های متناظر نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در اغلب ایستگاه‌ها همبستگی معنی‌داری بین تغییرات PWV و رخداد بارش وجود دارد، به‌گونه‌ای که ضرایب همبستگی در بازه‌ای بین ۰٫۶۳ تا ۰٫۹۵ تغییر می‌کنند. ایستگاه‌هایی مانند OIIP، ALKH و OIII بالاترین ضرایب همبستگی (بیش از ۰٫۹) را نشان می‌دهند. این یافته بیانگر توان بالای پارامتر PWV در شناسایی رخداد‌های بارشی و هم‌زمانی نوسانات آن با شروع و اوج بارش‌ها است. در مقابل، در ایستگاه‌هایی مانند OINN و AZTO مقادیر همبستگی پایین‌تر (حدود ۰٫۶-۰٫۷) مشاهده شد که می‌تواند ناشی از عوامل محلی، کیفیت داده‌های GNSS یا پیچیدگی‌های







شکل ۷. مقایسه سری زمانی بارش مشاهده‌ای در ایستگاه‌های همدید با PWV استخراج‌شده از ایستگاه‌های GNSS متناظر و ضریب همبستگی بین آن‌ها در نیمه دوم سال ۲۰۲۲.

جدول (۴) نتایج مقایسه همبستگی بین مقادیر PWV استخراج‌شده از ایستگاه‌های GNSS و خروجی طرحواره‌های مختلف مدل WRF را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان همبستگی در ایستگاه‌های مختلف متغیر بوده و از مقدار نسبتاً پایین ۰٫۴۱ در ایستگاه PLOR تا مقدار بسیار بالا ۰٫۹۱ در ایستگاه VRMN تغییر می‌کند. در بسیاری از ایستگاه‌ها مانند AKHT، MMKN و TEHN همبستگی بیش از ۰٫۸۵ به دست آمده است که بیانگر توانایی بالای مدل در بازنمایی تغییرات رطوبتی جو در این نقاط است. در مقابل، در ایستگاه‌هایی نظیر NKAD و PLOR میزان همبستگی ۰٫۶ گزارش شده که می‌تواند به دلیل کیفیت پایین داده‌های محلی، شرایط اقلیمی متفاوت یا محدودیت مدل در بازنمایی ویژگی‌های خاص جو در این مناطق باشد.

نتایج سری زمانی بارش مشاهده‌ای در ایستگاه‌های همدید با PWV استخراج‌شده از ایستگاه‌های GNSS متناظر نشان می‌دهد که در اکثر ایستگاه‌ها همبستگی قابل توجهی بین دو متغیر وجود دارد؛ به طوری که مقادیر ضریب همبستگی در بازه‌ای بین ۰٫۶۴ تا ۰٫۹۵ قرار گرفته‌اند. بیشترین میزان همبستگی در ایستگاه‌های OIIP، ALKH و OIII مشاهده شد که بیانگر توان بالای داده‌های GNSS در بازنمایی تغییرات رطوبتی جو و ارتباط مستقیم آن‌ها با رخداد بارش است. در مقابل، ایستگاه‌هایی مانند AZTO و OINN همبستگی پایین‌تری نسبت به سایر نقاط نشان داده‌اند که می‌تواند ناشی از عوامل محلی، ویژگی‌های اقلیمی و یا کیفیت داده‌های GNSS در این ایستگاه‌ها باشد.

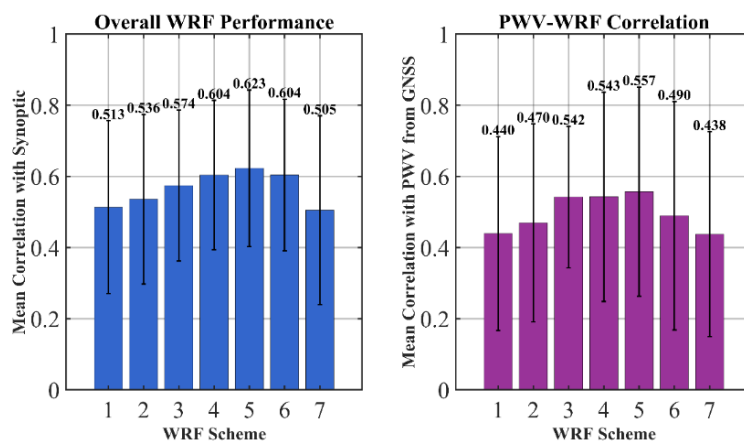
جدول ۴. بهترین طرحواره‌های فیزیکی مدل WRF در ایستگاه‌های GNSS بر اساس بیشترین میزان همبستگی با PWV طی نیمه دوم سال ۲۰۲۲.

| ایستگاه GNSS | بهترین طرحواره | PWV همبستگی با |
|--------------|----------------|----------------|
| absd | ۳ | ۰٫۶ |
| akht | ۵ | ۰٫۸۹ |
| bnab | ۵ | ۰٫۸۵ |
| bsof | ۱ | ۰٫۷۹ |
| hsgd | ۴ | ۰٫۸۸ |
| hstd | ۵ | ۰٫۸۸ |

| | | |
|------|---|------|
| ۰٫۸۹ | ۵ | mmkn |
| ۰٫۸۸ | ۳ | mndb |
| ۰٫۵۷ | ۴ | nkad |
| ۰٫۱۴ | ۳ | oryh |
| ۰٫۴۱ | ۳ | plor |
| ۰٫۷۰ | ۵ | pool |
| ۰٫۶۶ | ۱ | roud |
| ۰٫۶۲ | ۱ | rsht |
| ۰٫۸۶ | ۷ | tabz |
| ۰٫۶۳ | ۱ | tehn |
| ۰٫۵۷ | ۷ | tkbn |
| ۰٫۷۹ | ۴ | tkce |
| ۰٫۴۸ | ۲ | tlgn |
| ۰٫۹۱ | ۴ | vrnm |

طرحواره‌های ۳ و ۴ با طرحواره ۵ همپوشانی قابل ملاحظه‌ای دارند. بنابراین، اگرچه طرحواره ۵ از نظر مقدار میانگین در رتبه نخست قرار می‌گیرد، برتری آن نسبت به طرحواره‌های ۳ و ۴ از نظر آماری در سطح ۰٫۰۵ قابل اثبات نیست؛ اما نسبت به طرحواره‌های ۱، ۲ و ۷ اختلاف روشن‌تری مشاهده می‌شود. این الگو با نتایج ایستگاه‌محور (شکل ۵ و جدول ۳) همخوان است و نشان می‌دهد که انتخاب طرحواره در کنار ویژگی‌های محلی و ناهمگنی بارش، عامل مهمی در کارایی مدل WRF است.

در شکل (۸)، میله‌ها میانگین همبستگی ایستگاه‌محور هر طرحواره را نشان می‌دهند و خطوط باریک سیاه بازه اطمینان ۹۵٪ پیرامون همان میانگین‌ها (بر مبنای توزیع ایستگاه‌ها) هستند. پانل سمت چپ میانگین همبستگی بین بارش مشاهده‌ای همدید و خروجی WRF و پانل سمت راست میانگین همبستگی بین PWV مشتق شده از GNSS و بارش شبیه‌سازی شده را نمایش می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، طرحواره ۵ در هر دو معیار میانگین بالاتری نسبت به سایر طرحواره‌ها دارد؛ با این حال بازه‌های اطمینان ۹۵٪



شکل ۸. ارزیابی عملکرد کلی هفت طرحواره پارامترسازی فیزیکی مدل WRF در ۲۰ ایستگاه همدید شمال و شمال غرب ایران.

بیشترین تعداد ایستگاه (۶ ایستگاه) بهترین عملکرد را داشته که نشان می‌دهد این طرحواره در شرایط خاص محلی بسیار خوب عمل می‌کند. طرحواره‌های ۴ و ۶ با همبستگی یکسان (۰/۶۰) با بارش همدید، تفاوت قابل توجهی در ارتباط با PWV دارند (۰/۵۴ در مقابل ۰/۴۹) که نشان می‌دهد طرحواره ۴ نمایش فیزیکی بهتری از فرآیندهای رطوبتی دارد. انحراف معیار بالا در همه طرحواره‌ها (۰/۲۱-۰/۲۹) حاکی از تأثیر قابل توجه شرایط محلی بر عملکرد مدل است و لزوم بهینه‌سازی منطقه‌ای پارامترها را نشان می‌دهد.

جدول (۵) خلاصه‌ای جامع از عملکرد ۷ طرحواره پارامترسازی فیزیکی مدل WRF در ۲۰ ایستگاه همدید و GNSS منطقه مطالعه ارائه می‌دهد. بر اساس این نتایج، طرحواره ۵ به عنوان طرحواره برتر شناسایی شد با دستیابی به بالاترین میانگین همبستگی هم با داده‌های همدید (۰/۶۲) \pm (۰/۲۱) و هم با PWV از GNSS (۰/۵۶ \pm ۰/۲۹). این طرحواره در ۲۰٪ ایستگاه‌ها (۴ از ۲۰) بهترین پیش‌بینی بارش و در ۲۵٪ ایستگاه‌ها (۵ از ۲۰) بهترین ارتباط با رطوبت جو را نشان داد. نکته جالب توجه این است که طرحواره ۳ علی‌رغم داشتن میانگین همبستگی متوسط (۰/۵۷)، در

جدول ۵. عملکرد جامع طرحواره‌های پارامترسازی فیزیکی WRF در ۲۰ ایستگاه همدید و GNSS.

| تعداد دفعات بهترین برای PWV | انحراف معیار همبستگی PWV | میانگین همبستگی با PWV | تعداد دفعات بهترین برای همدید | انحراف معیار همبستگی همدید | میانگین همبستگی با همدید | طرحواره |
|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------|
| ۴ | ۰/۲۷ | ۰/۴۴ | ۳ | ۰/۲۴ | ۰/۵۱ | ۱ |
| ۱ | ۰/۲۸ | ۰/۴۷ | ۱ | ۰/۲۳ | ۰/۵۳ | ۲ |
| ۴ | ۰/۲۰ | ۰/۵۴ | ۶ | ۰/۲۱ | ۰/۵۷ | ۳ |
| ۴ | ۰/۲۹ | ۰/۵۴ | ۳ | ۰/۲۰ | ۰/۶۰ | ۴ |
| ۵ | ۰/۲۹ | ۰/۵۶ | ۴ | ۰/۲۲ | ۰/۶۲ | ۵ |
| ۰ | ۰/۳۲ | ۰/۴۹ | ۱ | ۰/۲۱ | ۰/۶۰ | ۶ |
| ۲ | ۰/۲۸ | ۰/۴۴ | ۲ | ۰/۲۶ | ۰/۵۰ | ۷ |

عملکرد هفت طرحواره فیزیکی مدل WRF در بازتولید بارش‌های نیمه دوم سال ۲۰۲۲ برای ۲۰ ایستگاه همدید در شمال و شمال‌غرب ایران با استفاده از داده‌های همدید و پارامتر بخار آب بارش شو (PWV) حاصل از مشاهدات GNSS ارزیابی شد. پس از حذف داده‌های پرت و کنترل کیفیت، مقایسه‌های آماری با استفاده از شاخص‌های ضریب همبستگی اسپیرمن (ρ_s)، ریشه میانگین مربعات خطای نسبی (nMAE) و میانگین قدر مطلق خطای نسبی (nRMSE) انجام گرفت.

۴. نتیجه‌گیری

پایش و پیش‌بینی بارش به‌ویژه در مناطق شهری و کوهستانی، به دلیل ناهمگنی مکانی و نقش بارز آن در مدیریت منابع آب و کاهش خسارات ناشی از سیلاب، اهمیت ویژه‌ای دارد. در این راستا، استفاده از مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا نظیر مدل WRF به‌عنوان یکی از ابزارهای پرکاربرد در شبیه‌سازی دینامیک جو و فرایندهای فیزیکی مرتبط با بارش مطرح شده است. مدل عددی WRF به‌دلیل توانایی در شبیه‌سازی فرآیندهای دینامیکی و ترمودینامیکی جو، یکی از ابزارهای پرکاربرد در پیش‌بینی بارش به‌شمار می‌رود. در این پژوهش

اقلیمی خاص و نواحی کوهستانی یا مرطوب می‌توانند نتایج قابل‌رقابتی ارائه دهند.

یافته‌های این پژوهش بیانگر آن است که انتخاب طرحواره فیزیکی مناسب و استفاده‌ی هم‌زمان از داده‌های GNSS-PWV و ایستگاه‌های همدیدی می‌تواند بهبود چشمگیری در دقت شبیه‌سازی بارش مدل WRF ایجاد کند. ترکیب داده‌های زمینی و ژئودزی در نواحی دارای شبکه‌ی مشاهداتی محدود، ابزار ارزشمندی برای ارتقای سامانه‌های هشدار سیل، پایش رطوبت جوی و مدیریت منابع آب فراهم می‌سازد. با این وجود، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده ضمن بررسی ترکیب چند طرحواره، از داده‌های ماهواره‌ای و راداری نیز برای اعتبارسنجی مدل استفاده شود تا قابلیت کاربرد مدل در مناطق با توپوگرافی پیچیده بیش از پیش بهبود یابد.

۵. تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب قدردانی و سپاس خود را از سازمان نقشه‌برداری کشور بابت در اختیار قرار دادن مشاهدات ایستگاه‌های شبکه دائم GNSS ایران و همچنین از سازمان هواشناسی کشور و پژوهشگاه هواشناسی و علوم جوی به دلیل فراهم‌سازی داده‌های بارش ایستگاه‌های همدیدی کشور ابراز می‌دارند.

منابع

1. Aghajany, S. H., & Amerian, Y. (2017). Three dimensional ray tracing technique for tropospheric water vapor tomography using GPS measurements. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 164, 81–88.
2. Avolio, E., Federico, S., Miglietta, M. M., Feudo, T. Lo, Calidonna, C. R., & Sempreviva, A. M. (2017). Sensitivity analysis of WRF model PBL schemes in simulating boundary-layer variables in southern Italy: An experimental campaign. *Atmospheric Research*, 192, 58–71.
3. Banks, R. F., & Baldasano, J. M. (2016). Impact of WRF model PBL schemes on air quality simulations over Catalonia, Spain. *Science of the Total Environment*, 572, 98–

نتایج نشان داد مدل WRF قادر است الگوی زمانی وقوع بارش را در بیشتر ایستگاه‌ها با دقت مناسب بازتولید کند، هرچند در برآورد شدت بارش اختلاف‌هایی مشاهده شد. ضریب همبستگی اسپیرمن بین بارش شبیه‌سازی‌شده و مقادیر مشاهده‌ای در محدوده ۰/۲۶ تا ۰/۷۱ متغیر بود که بیانگر توان متوسط تا نسبتاً خوب مدل در شناسایی رخداد‌های بارشی است. مقادیر nRMSE و nMAE به ترتیب در بازه‌های ۵۰ تا ۱۴۵ درصد و ۵۰ تا ۹۰ درصد قرار گرفتند؛ به طوری که در ایستگاه‌هایی با بارش‌های ضعیف، خطای نسبی بزرگ‌تر مشاهده شد. بر اساس این نتایج، طرحواره‌های فیزیکی شماره ۴ و ۶ در بیشترین تعداد ایستگاه‌ها عملکرد بهتری از خود نشان دادند، در حالی که طرحواره شماره ۵ در بیشترین میانگین کلی، بهترین دقت را در بازتولید بارش و همبستگی با داده‌های PWV ارائه کرد.

بررسی رابطه بین PWV حاصل از داده‌های GNSS و بارش‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌های همدیدی نشان داد که در اغلب ایستگاه‌ها، همبستگی مثبت و معناداری بین نوسانات PWV و رخداد بارش وجود دارد. ضریب همبستگی اسپیرمن بین این دو متغیر در بازه ۰/۶۳ تا ۰/۹۵ متغیر بود. ایستگاه‌های OIIP، ALKH، OIII و AZUI بالاترین مقادیر همبستگی را نشان دادند، که بیانگر نقش قابل توجه افزایش PWV در بروز رخداد بارش است. در مقابل، ایستگاه‌هایی مانند AZTO و OINN همبستگی ضعیف‌تری داشتند که می‌تواند ناشی از کیفیت داده‌های GNSS، عوامل محلی و یا تغییرات سریع رطوبت در لایه‌های جو باشد.

نتایج تلفیقی (شکل ۷ و جدول ۵) نشان داد که طرحواره شماره ۵ در هر دو معیار میانگین همبستگی با بارش مشاهده‌ای و همبستگی با PWV بالاترین مقدار را به دست آورده است (به ترتیب 0.62 ± 0.21 و 0.56 ± 0.29). با این حال، بازه‌های اطمینان ۹۵٪ طرحواره‌های ۳ و ۴ با طرحواره ۵ همپوشانی داشته و برتری آماری آن در سطح اطمینان ۰/۰۵ قطعی نیست. این موضوع نشان می‌دهد که در کنار عملکرد کلی مناسب طرحواره ۵، طرحواره‌های ۳ و ۴ نیز در شرایط

- International Journal of Remote Sensing, 39(10), 3094–3110. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1437298>
13. Haji-Aghajany, S., Amerian, Y., & Verhagen, S. (2020). B-spline function-based approach for GPS tropospheric tomography. *GPS Solutions*, 24(3), 88.
 14. Haji-Aghajany, S., Izanlou, S., Tasan, M., Rohm, W., & Kryza, M. (2025). High-resolution GNSS troposphere tomography through explainable deep learning-based downscaling framework. *Satellite Navigation*, 6(1), 22.
 15. Izanlou, S., Haji-Aghajany, S., & Amerian, Y. (2024). Enhanced Troposphere Tomography: Integration of GNSS and Remote Sensing Data With Optimal Vertical Constraints. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17, 3701–3714. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3354884>
 16. Jänicke, B., Meier, F., Fenner, D., Fehrenbach, U., Holtmann, A., & Scherer, D. (2017). Urban–rural differences in near-surface air temperature as resolved by the Central Europe Refined analysis (CER): sensitivity to planetary boundary layer schemes and urban canopy models. *International Journal of Climatology*, 37(4), 2063–2079.
 17. Lauvaux, T., & Davis, K. J. (2014). Planetary boundary layer errors in mesoscale inversions of column-integrated CO₂ measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(2), 490–508.
 18. Lauvaux, T., Pannekoucke, O., Sarrat, C., Chevallier, F., Ciais, P., Noilhan, J., & Rayner, P. J. (2009). Structure of the transport uncertainty in mesoscale inversions of CO₂ sources and sinks using ensemble model simulations. *Biogeosciences*, 6(6), 1089–1102.
 19. Mantovani Júnior, J. A., Aravéquia, J. A., Carneiro, R. G., & Fisch, G. (2023). Evaluation of PBL parameterization schemes in WRF model predictions during the dry season of the central Amazon Basin. *Atmosphere*, 14(5), 850.
 20. Martilli, A., Clappier, A., & Rotach, M. W. (2002). An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models. 113.
 4. Benevides, P., Catalao, J., Nico, G., & Miranda, P. M. A. (2018). 4D wet refractivity estimation in the atmosphere using GNSS tomography initialized by radiosonde and AIRS measurements: results from a 1-week intensive campaign. *GPS Solutions*, 22(4), 91. <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0755-5>
 5. Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., & Ware, R. H. (1992). GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *Journal of Geophysical Research*, 97(D14), 15787–15801. <https://doi.org/10.1029/92jd01517>
 6. Davis, J. L., Herring, T. A., Shapiro, I. I., Rogers, A. E. E., & Elgered, G. (1985). Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Science*, 20(6), 1593–1607. <https://doi.org/10.1029/RS020i006p01593>
 7. Ding, M. (2018). A neural network model for predicting weighted mean temperature. *Journal of Geodesy*, 92(10), 1187–1198. <https://doi.org/10.1007/s00190-018-1114-6>
 8. Fei Chen, N. (2006). Current status of urban modeling in the community Weather Research and Forecast (WRF) model. Sixth Symposium on the Urban Environment.
 9. García-Díez, M., Fernández, J., Fita, L., & Yagüe, C. (2013). Seasonal dependence of WRF model biases and sensitivity to PBL schemes over Europe. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139(671), 501–514. <https://doi.org/10.1002/qj.1976>
 10. Geng, J., Chen, X., Pan, Y., Mao, S., Li, C., Zhou, J., & Zhang, K. (2019). PRIDE PPP-AR: an open-source software for GPS PPP ambiguity resolution. *GPS Solutions*, 23(4), 1–10. <https://doi.org/10.1007/S10291-019-0888-1/METRICS>
 11. Gholami, S., Ghader, S., Khaleghi-Zavareh, H., & Ghafarian, P. (2021). Sensitivity of WRF-simulated 10 m wind over the Persian Gulf to different boundary conditions and PBL parameterization schemes. *Atmospheric Research*, 247, 105147.
 12. Gong, S., Hagan, D. F. T., Wu, X., & Wang, G. (2018). Spatio-temporal analysis of precipitable water vapour over northwest China utilizing MERSI/FY-3A products.

- Applied Meteorology and Climatology, 50(5), 1107–1128.
28. Sam-Khaniani, A., Azadi, M., & Zakeri, Z. (2017). Impact of Iranian permanent GPS network precipitable water estimates on numerical weather prediction. *Earth Observation and Geomatics ...*, 1(2), 100–111. <https://doi.org/10.22059/eoge.2017.243645>. 1013
 29. Sam-Khaniani, A., & Naeijian, R. (2024). Comparison of tropospheric delay models using ground based GPS ZTD values in the atmosphere of Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 50(1), 23–36. <https://doi.org/10.22059/JESPHYS.2023.353897.1007493>
 30. Sharifi, M. A., Azadi, M., & Khaniani, A. S. (2016). Numerical simulation of rainfall with assimilation of conventional and GPS observations over north of Iran. *Annals of Geophysics*, 59(3). <https://doi.org/10.4401/ag-6919>
 31. Tayfehrostami, A., & Amerian, Y. (2025). Analysis of Tropospheric Precipitable Water Vapor Variations Using GNSS Radio Occultation Data and Radiosonde Observations (Case Study: Iran). *Journal of the Earth and Space Physics*. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2025.396147.1007694>
 32. Wang, W., Beezley, C., Duda, M., & others. (2012). WRF ARW V3: user's guide. Wang, C. Beezley, M. Duda, et Al. URL: <Http://Www.Mmm.Ucar.Edu/Wrf/Users> (Accessed: 11.01. 2013).
 33. Zakeri, Z., azadi, majid, & Ghader, S. (2018). Impact of assimilation of satellite, prepbufr and GPSro data on wind speed and dust concentration forecasts in WRF-Chem model. *Iranian Journal of Geophysics*, 12(2), 1–22. https://www.ijgeophysics.ir/article_67494.html
 34. Zhang, W., Zhang, H., Liang, H., Lou, Y., Cai, Y., Cao, Y., Zhou, Y., & Liu, W. (2019). On the suitability of ERA5 in hourly GPS precipitable water vapor retrieval over China. *Journal of Geodesy*, 93(10), 1897–1909. <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01290-6>
 - Boundary-Layer Meteorology, 104(2), 261–304.
 21. Mohamadi, A., & Azadi, M. (2022). Effect of the Ensemble System Size on the Precipitation Forecast Accuracy. *Nivar*, 46(118–119), 73–84.
 22. Munassar, S., Monteil, G., Scholze, M., Karstens, U., Rödenbeck, C., Koch, F.-T., Totsche, K. U., & Gerbig, C. (2023). Why do inverse models disagree? A case study with two European CO₂ inversions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(4), 2813–2828.
 23. Neyestani, A., Ghader, S., & Mohebalhojeh, alireza. (2017). Application of data assimilation using WRF model to simulate precipitations caused by synoptic systems in the western regions of Iran. *Iranian Journal of Geophysics*, 11(1), 101–123. https://www.ijgeophysics.ir/article_46718.html
 24. Ohyama, H., Frey, M. M., Morino, I., Shiomi, K., Nishihashi, M., Miyauchi, T., Yamada, H., Saito, M., Wakasa, M., Blumenstock, T., & others. (2023). Anthropogenic CO₂ emission estimates in the Tokyo metropolitan area from ground-based CO₂ column observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(23), 15097–15119.
 25. Pilz, L., Lüken-Winkels, C., Gałkowski Michałand Ho, D., Gerbig, C., Chen, F., & Vardag, S. N. (2025). Evaluation of high-resolution WRF simulation in urban areas-Effect of different physics schemes on simulation performance in the Rhine-Main-Neckar area. *Atmospheric Research*, 108435.
 26. RISANTO, C. B., CASTRO, C. L., ARELLANO, A. F., MOKER, J. M., & ADAMS, D. K. (2021). The impact of assimilating gps precipitable water vapor in convective-permitting wrf-arw on north american monsoon precipitation forecasts over northwest mexico. *Monthly Weather Review*, 149(9), 3013–3035. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-20-0394.1>
 27. Salamanca, F., Martilli, A., Tewari, M., & Chen, F. (2011). A study of the urban boundary layer using different urban parameterizations and high-resolution urban canopy parameters with WRF. *Journal of*