

Sensitivity Analysis of the WRF Model in Simulating the Lightning Potential Index (LPI) in Tehran

Khansalari, S.¹  | Gharaylou, M.² 

1. Assistant Professor, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Sciences (RIMAS).
2. Associate Professor, Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran.

Corresponding Author E-mail: gharaylo@ut.ac.ir

(Received: 30 Jun 2025, Revise: 22 Jul 2025, Accepted: 27 Jul 2025, Published online: 23 Sep 2025)

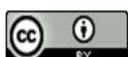
Abstract

This study investigates the sensitivity of the Weather Research and Forecasting (WRF) model in simulating lightning activity, with a focus on the Lightning Potential Index (LPI), a commonly used parameter for estimating lightning occurrence. The research was conducted over the Tehran region, where ten well-documented lightning events from 2015 to 2022 were selected based on data from the Earth Networks Total Lightning Network (ENTLN), which provides comprehensive detection of total lightning (both intra-cloud and cloud-to-ground). To evaluate the influence of microphysical parameterizations on lightning simulation, seven distinct model configurations were implemented, including three single-moment and four double-moment cloud microphysics schemes. These configurations were chosen based on their usage in previous studies and their theoretical capabilities in resolving cloud microstructure and electrification processes. The LPI was computed for each simulation to represent lightning potential on a 10-minute temporal resolution. Model outputs were compared against ENTLN observations through both graphical and statistical methods. Boxplot analyses were used to assess the distribution, variability, and median values of simulated LPI across different days and configurations. In addition, four quantitative verification metrics were calculated for each case: Probability of Detection (POD), Success Ratio (SR), Bias, and Critical Success Index (CSI). These metrics enabled an objective assessment of how well each microphysics scheme captured the observed lightning events. The results indicate a substantial sensitivity of LPI simulations to the choice of microphysics scheme. No single configuration consistently outperformed the others across all events. However, Configuration 2, which employs the Goddard microphysics scheme, demonstrated relatively superior performance in several case studies, offering a better balance between detection rate and false alarms. The findings suggest that the microphysical treatment of hydrometeors and charge separation processes can significantly influence lightning prediction skill. Overall, this study highlights the necessity of carefully selecting microphysics schemes tailored to local convective environments. Moreover, it underscores the value of ensemble-based approaches using multiple model configurations to better capture the uncertainty inherent in lightning forecasting.

Keywords: Lightning, WRF model, LPI index, Microphysics, Sensitivity analysis, Tehran

Cite this article: Khansalari, S. and Gharaylou, M. (2025). Sensitivity Analysis of the WRF Model in Simulating the Lightning Potential Index (LPI) in Tehran. (e226100). Nivar, 49(130-131), 137-159. doi: 10.30467/nivar.2025.531870.1342

E-mail: (1) khansalari@yahoo.com



حساسیت‌سنجی مدل WRF در شبیه‌سازی شاخص پتانسیل رخداد آذرخش (LPI) در منطقه تهران

سکینه خان‌سالاری^۱ | مریم قرایلو^۲ ✉

۱. استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران.

۲. دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: gharaylo@ut.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹، بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۳۱، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۵، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱)

چکیده

در این پژوهش، عملکرد مدل پیش‌بینی عددی هواشناسی WRF در شبیه‌سازی شاخص پتانسیل رخداد آذرخش (LPI) در منطقه تهران مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، ده رخداد آذرخش از سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ با استفاده از داده‌های شبکه جهانی آذرخش ENTLN شناسایی و تحلیل شد. شبیه‌سازی‌ها با بهره‌گیری از هفت پیکربندی مختلف مدل، شامل سه طرحواره خردفیزیکی تک‌مؤلفه‌ای و چهار طرحواره دو مؤلفه‌ای، انجام گرفت. شاخص LPI به‌عنوان نمایه اصلی برای تخمین پتانسیل آذرخش مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل، از تحلیل آماری داده‌های شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با مشاهدات واقعی با استفاده از نمودارهای جعبه‌ای و چهار شاخص آماری شامل احتمال تشخیص (POD)، نرخ موفقیت (SR)، شاخص آریبی (Bias) و شاخص موفقیت بحرانی (CSI) استفاده شد. نتایج نشان داد که عملکرد مدل به‌طور قابل توجهی به نوع طرحواره خردفیزیکی وابسته است و هیچ پیکربندی خاصی در همه رخدادها عملکرد برتری نداشت. با این حال، پیکربندی دوم مبتنی بر طرحواره Goddard در چندین رخداد عملکرد مطلوب‌تری از نظر دقت پیش‌بینی و تعادل بین پیش‌بینی و مشاهدات از خود نشان داد. این یافته‌ها بر اهمیت انتخاب دقیق طرحواره خردفیزیکی بر پایه شرایط محلی تأکید دارد و ضرورت بهره‌گیری از رویکردهای پیش‌بینی همادی برای کاهش عدم قطعیت در پیش‌بینی آذرخش را برجسته می‌سازد.

کلیدواژه‌ها: آذرخش، مدل WRF، شاخص LPI، خردفیزیک، حساسیت‌سنجی، تهران.

۱. مقدمه

هوایی، کشاورزی و برنامه‌ریزی شهری دارد. شاخص پتانسیل رخداد آذرخش (LPI) که توسط یابر و همکاران (۲۰۱۰) معرفی شده معیاری از تفکیک بار الکتریکی در ابرها است که منجر به آذرخش در ابرها می‌شود و بر پایه فرانسج‌های همرفتی نظیر ناپایداری و رطوبت تعریف می‌شود. در دهه‌های گذشته، این شاخص که هم بر گرفته از خردفیزیک ابرها و هم صعود بزرگ مقیاس است، به‌طور گسترده‌ای به‌منظور پیش‌بینی فعالیت آذرخش و برای اندازه‌گیری احتمال و شدت

آذرخش پاسخی مستقیم به همرفت شدید در جو است و یکی از نمودهای چشمگیر و مخاطره‌آمیز سامانه‌های جوی به‌شمار می‌رود. این پدیده با ماهیتی کوتاه‌مدت، انرژی بسیار بالا و پیچیدگی دینامیکی، تهدیدی جدی برای جان انسان‌ها، زیرساخت‌ها و پایداری محیط‌زیست ایجاد می‌کند (دوایر و اومان، ۲۰۱۴). پیش‌بینی دقیق این پدیده به‌ویژه در مناطق مستعد، نقش حیاتی در ارتقاء ایمنی عمومی، حمل‌ونقل

استناد: خان‌سالاری، سکینه و قرایلو، مریم. (۱۴۰۴). حساسیت‌سنجی مدل WRF در شبیه‌سازی شاخص پتانسیل رخداد آذرخش (LPI) در منطقه تهران. (e226100). نیوار.

DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2025.531870.1342> ، ۱۳۷-۱۵۹ ، (۱۳۰-۱۳۱)۴۹

رایانامه: (۱) khansalari@yahoo.com



خردفیزیک ابر، در مقایسه با فراسنج‌های دینامیکی بهتر پیش‌بینی شده است. همچنین حسینی و همکاران (۱۳۹۷) به منظور مطالعه اثر برخی خصوصیات دینامیکی و خردفیزیکی ابر بر میدان الکتریکی و آذرخش درون‌ابری از مدل WRF برای شبیه‌سازی دو رخداد توفان تندی با مقادیر CAPE متفاوت در منطقه تهران استفاده نمودند. نتایج دو مطالعه موردی نشان داد که قرارگیری بیشینه مقادیر سرعت قائم بالارو مابین ارتفاع بیشینه تجمع گویچه‌های برف و بلورهای یخ تأثیر بیشتر و بارزتری بر بار انتقال یافته و میزان فعالیت آذرخش درون‌ابری دارد. قرایلو و همکاران (۲۰۲۰) تأثیر شرایط اولیه در پیش‌بینی فعالیت آذرخش با استفاده از مدل پیش‌بینی عددی میان‌مقیاس WRF با بسته اضافی الکتریکی معروف به مدل ELEC را بررسی کردند. در این مطالعه شدت و برخی از خواص فیزیکی و دینامیکی آذرخش رخ داده در طول ۱۱ سال (۲۰۰۴-۲۰۱۴) در نظر گرفته شده و چهار رویداد توفان تندی با ویژگی‌های متمایز در منطقه تهران برای مطالعه دقیق انتخاب شده است. در این پژوهش شبیه‌سازی‌های WRF-ELEC با داده‌های مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های هواشناسی میان‌برد ECMWF-ERA Interim، مراکز ملی تحلیل نهایی پیش‌بینی محیط‌زیست (NCEP-FNL) و سیستم پیش‌بینی جهانی عملیاتی (NCEP-GFS)، برای به دست آوردن تعداد آذرخش مرتبط با هر مطالعه موردی انجام شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در اکثر موارد تطابق خوبی بین الگوهای افقی میانگین زمانی شبیه‌سازی شده LPI به دست آمده از آزمایش‌های مبتنی بر ERA-Interim و مکان‌های وقوع آذرخش WWLLN و همچنین داده‌ها و مشاهدات LIS وجود دارد. علاوه بر این، شبیه‌سازی‌های مبتنی بر GFS عملکرد کمی بهتری در پیش‌بینی تعداد رخداد آذرخش نسبت به شبیه‌سازی‌های مبتنی بر FNL و ERA-Interim از نظر مقادیر انحراف معیار (SD) و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) دارند. نتایج تحلیل‌های آماری بیشتر با استفاده از معیارهای مختلف نشان می‌دهد که استفاده از ERA-Interim به عنوان شرایط اولیه و مرزی بهترین عملکرد را در فعالیت آذرخش دارد. صالح و همکاران

وقوع آذرخش در سامانه‌های همرفتی استفاده شده است و در چندین مطالعه موردی همبستگی قوی LPI با مشاهدات واقعی آذرخش نشان داده شده است (لین و یایر، ۲۰۱۰؛ لاگاسیو و همکاران، ۲۰۱۷؛ قرایلو و همکاران، ۲۰۲۰؛ ربانی و همکاران، ۲۰۲۲؛ صالح و همکاران، ۲۰۲۴). شبیه‌سازی LPI عمدتاً وابسته به مدل‌های عددی پیشرفته‌ای چون مدل تحقیق و پیش‌بینی آب‌وهوا (WRF) است که یکی از پرکاربردترین مدل‌ها در سطح جهان به‌شمار می‌رود. مدل WRF از مجموعه‌ای از طرحواره‌های فیزیکی شامل خردفیزیک، لایه مرزی سیاره‌ای، همرفت کومه‌ای و فرایندهای سطحی بهره می‌برد که نقش کلیدی در دینامیک و ترمودینامیک جو و در نهایت شکل‌گیری آذرخش دارند. با این حال، واکنش شاخص‌هایی مانند LPI به این پارامترسازی‌های فیزیکی همچنان موضوعی پرتوجه در حوزه تحقیقات باقی مانده است. تفاوت در انتخاب این طرحواره‌ها می‌تواند به تغییرات زیادی در خروجی مدل منجر شود و این موضوع ضرورت بررسی‌های حساسیت‌سنجی مدل به انتخاب این طرحواره‌ها و انطباق آن با شرایط منطقه‌ای را پررنگ‌تر می‌سازد.

در ایران، تنوع اقلیمی قابل توجه، فرایند مدل‌سازی و پیش‌بینی آذرخش را پیچیده‌تر می‌سازد. از نواحی نیمه‌خشک مرکز کشور با آذرخش‌های پراکنده گرفته تا سواحل شمالی مرطوب حاشیه دریای خزر که در آن‌ها فعالیت‌های همرفتی گسترده‌تر و شدیدتر رخ می‌دهند، نیاز به ابزارهای دقیق پیش‌بینی منطقه‌ای را بیش از پیش نمایان می‌سازد. به‌ویژه با افزایش وقوع توفان‌های شدید که احتمالاً تحت تأثیر تغییرات اقلیمی در حال افزایش‌اند، توسعه چنین ابزارهایی ضروری است. مطالعات داخلی اخیر این چالش را در کانون توجه قرار داده‌اند. قرایلو و همکاران (۱۳۹۵)، شاخص LPI را با استفاده از شبیه‌سازی جریان‌های بالارو و فراسنج‌های خردفیزیک ابر (نسبت اختلاط برف، گویچه برف و یخ) با استفاده از مدل میان‌مقیاس WRF در منطقه ایران با تمرکز بر ناحیه تهران در دو مطالعه موردی محاسبه نمودند. در این مطالعه نشان داده شده است که مکان رخداد آذرخش با استفاده از فراسنج‌های

با وجود این پیشرفت‌ها، هنوز شکاف مهمی در تحلیل حساسیت اختصاصی مدل WRF برای شبیه‌سازی LPI در ایران وجود دارد. این پژوهش در پی پر کردن همین خلأ است و می‌کوشد با بررسی اثر طرحواره‌های فیزیکی مختلف بر پیش‌بینی شاخص پتانسیل آذرخش، پیشنهادهایی برای بهبود تنظیمات مدل در قالب سیستم‌های هشدار و پیش‌بینی عملیاتی ارائه دهد. از آنجا که مدل WRF از طرحواره‌های مختلف خردفیزیکی برای شبیه‌سازی ابر و بارش استفاده می‌کند، بررسی حساسیت LPI نسبت به این طرحواره‌ها می‌تواند در انتخاب بهینه پیکربندی مدل مؤثر واقع شود. در ادامه، در بخش «داده‌ها و روش کار»، جزئیات پیکربندی‌های مدل، داده‌های مورد استفاده و روش ارزیابی پیش‌بینی‌ها شرح داده شده و در بخش «نتایج»، نتایج حاصل از مقایسه عملکرد پیکربندی‌ها ارائه و تحلیل شده است. در پایان نیز در بخش «نتیجه‌گیری»، جمع‌بندی یافته‌ها و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده ارائه می‌گردد.

۲. داده‌ها و روش کار

۲-۱. داده‌ها و منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه، از داده‌های مربوط به ایستگاه‌های همدیدی هواشناسی ایران و داده‌های شبکه جامع آذرخش موقعیت‌یابی آذرخش برای شناسایی و انتخاب رویدادهای آذرخش در منطقه تهران (محدوده عرض جغرافیایی ۳۴/۵ تا ۳۶/۵ و طول جغرافیایی ۴۹/۵ تا ۵۳/۲۵) استفاده شده است. این محدوده داخلی‌ترین حوزه شبیه‌سازی آذرخش با مدل WRF با استفاده از داده‌های GFS نیم درجه است که در شکل ۲ نشان داده شده است. داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی شامل اندازه‌گیری متغیرهای جوّی مختلف مانند دما، رطوبت، فشار هوا، سرعت و جهت باد و پدیده هواشناسی می‌باشد که به صورت پیوسته و در مقیاس‌های زمانی یک‌ساعته یا سه-ساعته ثبت می‌شوند. این داده‌ها برای ارزیابی شرایط جوّی حاکم بر وقوع آذرخش استفاده شدند. همچنین در این پژوهش، از داده‌های شبکه جامع آذرخش Earth Networks با عنوان مخفف ENTLN استفاده شده است.

(۲۰۲۳)، با بررسی مقادیر شاخص‌های LPI و LTI و $CAPE \times P$ عملکرد مدل WRF را در پیش‌بینی آذرخش در تهران مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه آنها بر اساس داده‌های مشاهداتی WWLLN، شاخص LPI عملکرد بهتری را برای پیش‌بینی آذرخش نشان می‌دهد. آنها همچنین دریافتند از آنجایی که LPI مبتنی بر خردفیزیک ابر است و LTI و $CAPE \times P$ روش‌های مبتنی بر ترمودینامیک ابر هستند، LPI عملکرد بهتری در پیش‌بینی آذرخش نشان می‌دهد.

در سطح جهانی نیز مطالعاتی در زمینه تحقیق حاضر صورت گرفته‌اند. برای مثال، ربانی و همکاران (۲۰۲۲) عملکرد پیش‌بینی‌های آذرخش تشخیصی و صریح را برای رویدادهای جوّی منتخب بر فراز بنگلادش بررسی کردند. شاخص LPI با استفاده از محتویات گویچه برف و یخ محلی و پیش‌بینی صریح میدان‌های الکتریکی با استفاده از مدل WRF-ELEC برای پنج رویداد آذرخش که در دوم آوریل ۲۰۱۹، ۱۷ مه ۲۰۱۹، ۲۰ آوریل ۲۰۲۰، ۲۶ مه ۲۰۲۰ و ۲۰ مه ۲۰۲۱ رخ داده‌اند به کار رفته‌اند. تجزیه و تحلیل نتایج کیفی مطالعه آنها نشان می‌دهد که در اکثر موارد مورد مطالعه، توافق خوبی بین مشاهدات و شبیه‌سازی‌های مبتنی بر WRF-ELEC از نظر تشخیص مناطق اولیه فعالیت آذرخش وجود دارد. پیش‌بینی‌های مبتنی بر LPI نیز بسیار خوب عمل می‌کنند. همچنین، بابونکووا اولیرووا و همکاران (۲۰۲۲) و نیز موندال و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهش‌های خود به ترتیب در اروپای مرکزی و در منطقه شمال شرق هند نشان دادند که به کارگیری انواع مختلف طرحواره‌های پارامترسازی خردفیزیک، می‌تواند دقت مدل‌هایی همچون WRF را در پیش‌بینی وقوع آذرخش به‌طور چشمگیری افزایش دهد. این طرحواره‌ها با در نظر گرفتن دقیق‌تر ویژگی‌های هواآب‌ها، از جمله اندازه و غلظت آنها، موجب بهبود بازنمایی فرایندهای مربوط به الکتروسیته‌سازی در ابرها می‌شوند. در مناطق مستعد توفان‌های همرفتی شدید، این دقت بالاتر می‌تواند نقشی کلیدی در هشدارهای زود هنگام و مدیریت خطرات جوّی ایفا کند.

این شبکه از بیش از ۱۶۰۰ حس‌گر باند-پهن در بیش از ۴۰ کشور تشکیل شده و با بهره‌گیری از فناوری پیشرفته موقعیت‌یابی مبتنی بر اختلاف زمان دریافت (TOA)، قادر به آشکارسازی دقیق هر دو نوع آذرخش درون‌ابری (IC) و ابر به زمین (CG) می‌باشد. الگوریتم‌های چندپارامتری این سامانه امکان تمایز دقیق بین پالس‌های IC و CG را فراهم می‌کنند و به‌صورت گسترده در مطالعات مرتبط با توفان‌های همرفتی، نرخ آذرخش، مسیر و سرعت حرکت سلول‌های توفانی، و هشدارهای زود هنگام مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در سال‌های اخیر، چندین مطالعه نیز عملکرد این سامانه را از نظر کارایی شناسایی و دقت مکانی/زمانی آن ارزیابی کرده‌اند و نتایج نشان‌دهنده پایداری و دقت بالای ENTLN در بازه‌های زمانی مختلف بوده است (تامپسون و همکاران، ۲۰۱۴؛ رادلااسکی، ۲۰۱۵؛ بویی و همکاران، ۲۰۱۵؛ لاپیر و همکاران، ۲۰۱۹؛ زو و همکاران، ۲۰۲۲).

۲-۲. روش کار

۲-۲-۱. انتخاب رخداد‌های آذرخش در منطقه تهران

در این پژوهش، برای انتخاب رویدادهای آذرخش نسبتاً قوی در منطقه تهران در دهه اخیر، تمرکز اصلی بر فصل بهار بوده است. دلیل این تمرکز، تفاوت‌های عمده در سازوکارهای دینامیکی و ترمودینامیکی ابرهای همرفتی و سامانه‌های جوئی در فصول مختلف می‌باشد. فصل بهار به دلیل وجود گرمایش سطحی شدید و ناپایداری‌های جوئی مرتبط با آن، بستر مناسبی برای شکل‌گیری توفان‌های تندری و رویدادهای شدید آذرخش فراهم می‌کند. این تفاوت‌ها در سازوکار دینامیکی و ترمودینامیکی باعث می‌شود که در این فصل، احتمال وقوع آذرخش‌های قوی‌تر و شدیدتر نسبت به فصول دیگر بیشتر باشد.

بنابراین، در این مطالعه، رویدادهای آذرخش قوی با استفاده از داده‌های ENTLN و داده‌های ایستگاه‌های همدمیدی هواشناسی در منطقه تهران شناسایی شدند. این ایستگاه‌ها شامل ایستگاه‌های آبعلی، چیتگر، دماوند، دوشان تپه،

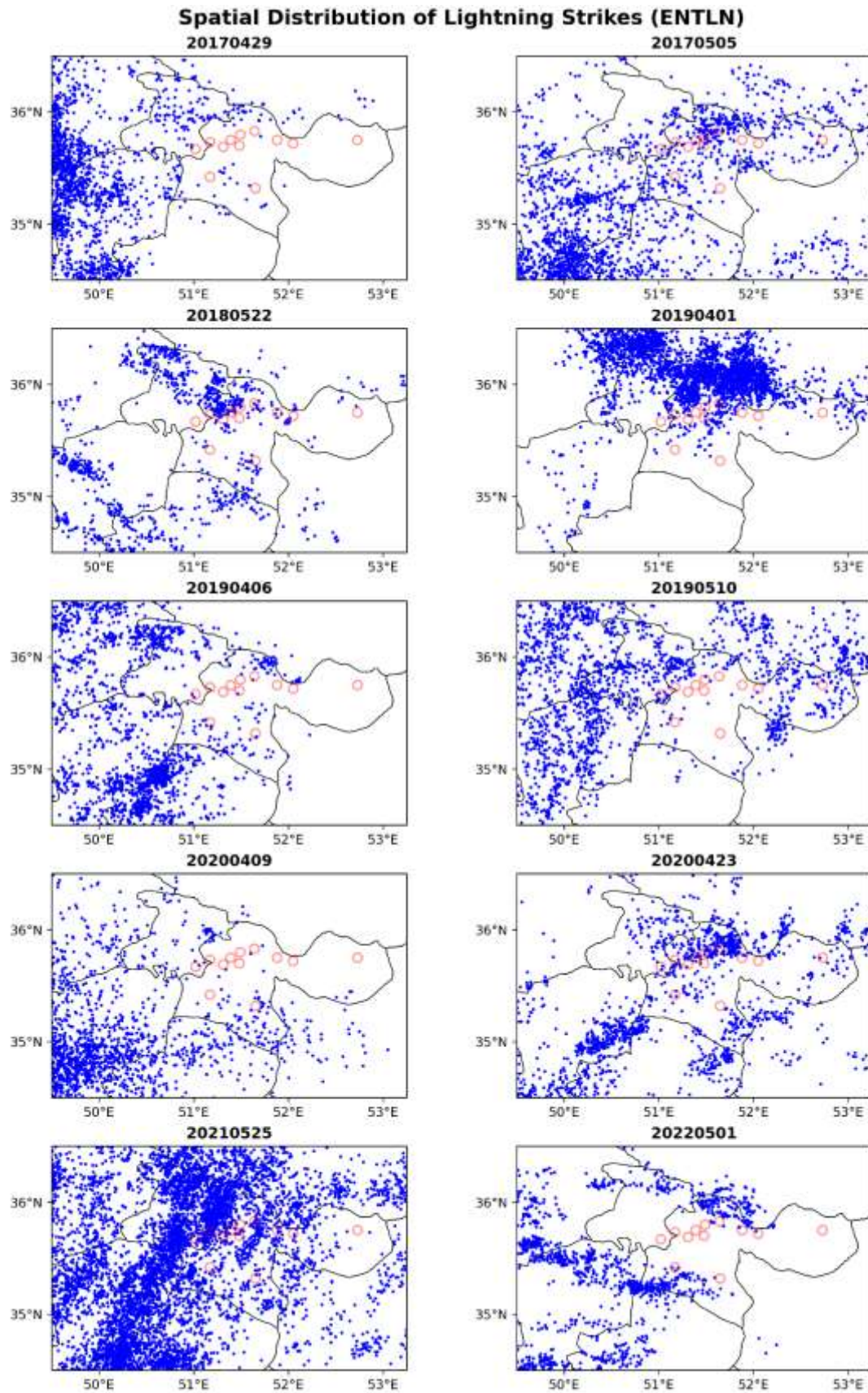
فیروزکوه، فرودگاه بین‌المللی امام خمینی، لواسان، شهریار، ژئوفیزیک، فرودگاه مهرآباد، شمیران و ورامین هستند که در شکل ۱ موقعیت مکانی آنها نشان داده شده است. داده‌های ایستگاه هواشناسی شامل اندازه‌گیری متغیرهای کلیدی جوئی مانند دما، رطوبت، فشار هوا، سرعت و جهت باد و کُد وضع هوای حاضر است. لازم به توضیح است که در این مطالعه به‌منظور شناسایی رویدادهای آذرخش از کُد وضع هوای حاضر استفاده شده است. بر این اساس مشخصات ده رویداد آذرخش منتخب در منطقه تهران (با توزیع مکانی در شکل ۱) در جدول ۱ نشان داده شده است. بیشترین تعداد آذرخش در روز ۲۵ مه سال ۲۰۲۱ با ۶۴۵۹ رخداد ثبت شده است. این نشان‌دهنده فعالیت شدید آذرخش در این روز است که از نظر مقیاس به‌طور قابل توجهی بیشتر از سایر موارد است. پس از آن، بیشترین تعداد آذرخش مربوط به روز اول آوریل سال ۲۰۱۹ با ۵۵۱۵ رخداد است. این مورد نیز فعالیت بالایی را نشان می‌دهد. در مقابل، کمترین تعداد آذرخش مربوط به روز ۲۹ آوریل سال ۲۰۱۹ با ۹۲۹ رخداد است که نشان‌دهنده فعالیت کمتری نسبت به سایر موارد است. در جدول ۱، دوره اوج فعالیت آذرخش در رویدادهای منتخب بر اساس پیوستگی زمانی و بیشینه رخداد‌های آذرخش در یک روز مشخص شده است. طولانی‌ترین دوره اوج فعالیت مربوط به روز دهم مه سال ۲۰۱۹ است که بین ساعت ۸ UTC تا ۲۲ UTC یعنی به مدت ۱۴ ساعت بوده است. این نشان‌دهنده یک روز با فعالیت مداوم و گسترده آذرخش است. کوتاه‌ترین دوره اوج فعالیت مربوط به روز اول مه سال ۲۰۲۲ و روز پنجم مه سال ۲۰۱۷ بوده است که اوج فعالیت این دو مورد به مدت ۵ ساعت بوده است. بررسی جدول ۱ نشان می‌دهد در روزهایی که تعداد زیادی آذرخش رخ داده است اغلب دوره‌های اوج فعالیت نیز طولانی‌تری بوده است (۱۲ ساعت یا بیشتر). این امر نشان می‌دهد که فعالیت مداوم در این روزها منجر به افزایش تعداد کل آذرخش‌ها شده است. در مقابل، مواردی که تعداد کمتری از رخداد آذرخش‌ها را ثبت کرده‌اند، دوره‌های اوج فعالیت کوتاه‌تری دارند (۵ تا ۶ ساعت). بیشتر موارد اوج فعالیت آذرخش در

این شبکه از بیش از ۱۶۰۰ حس‌گر باند-پهن در بیش از ۴۰ کشور تشکیل شده و با بهره‌گیری از فناوری پیشرفته موقعیت‌یابی مبتنی بر اختلاف زمان دریافت (TOA)، قادر به آشکارسازی دقیق هر دو نوع آذرخش درون‌ابری (IC) و ابر به زمین (CG) می‌باشد. الگوریتم‌های چندپارامتری این سامانه امکان تمایز دقیق بین پالس‌های IC و CG را فراهم می‌کنند و به‌صورت گسترده در مطالعات مرتبط با توفان‌های همرفتی، نرخ آذرخش، مسیر و سرعت حرکت سلول‌های توفانی، و هشدارهای زود هنگام مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در سال‌های اخیر، چندین مطالعه نیز عملکرد این سامانه را از نظر کارایی شناسایی و دقت مکانی/زمانی آن ارزیابی کرده‌اند و نتایج نشان‌دهنده پایداری و دقت بالای ENTLN در بازه‌های زمانی مختلف بوده است (تامپسون و همکاران، ۲۰۱۴؛ رادلااسکی، ۲۰۱۵؛ بویی و همکاران، ۲۰۱۵؛ لاپیر و همکاران، ۲۰۱۹؛ زو و همکاران، ۲۰۲۲).

بعدازظهر تا شب رخ داده‌اند که این مسئله معمولاً به دلیل ناپایداری‌های جوّی و فعالیت همرفتی در ساعات بعدازظهر است که شرایط مناسبی برای وقوع آذرخش فراهم می‌کند.

جدول ۱. تعداد کل آذرخش‌های ثبت‌شده توسط ENTLN و ساعات اوج فعالیت برای داخلی‌ترین حوزه شبیه‌سازی

ردیف	مورد مطالعاتی	دوره اوج فعالیت آذرخش	تعداد کل آذرخش‌ها در یک روز
۱	April 29, 2017	۱۲-۲۴ UTC	۹۲۹
۲	May 5, 2017	۱۰-۱۵ UTC	۱۹۵۹
۳	May 22, 2018	۹-۱۵ UTC	۱۳۴۴
۴	April 1, 2019	۱۴-۲۲ UTC	۵۵۱۵
۵	April 6, 2019	۱۱-۱۷ UTC	۲۴۷۳
۶	May 10, 2019	۸-۲۲ UTC	۲۵۹۰
۷	April 9, 2020	۱۸-۲۴ UTC	۱۳۷۰
۸	April 23, 2020	۹-۲۱ UTC	۱۴۱۵
۹	May 25, 2021	۱۲-۲۴ UTC	۶۴۵۹
۱۰	May 1, 2022	۱۱-۱۶ UTC	۱۵۱۷



شکل ۱. توزیع مکانی نقاط وقوع آذرخش در ۱۰ رخداد متفاوت بر اساس داده‌های ENTLN. دایره‌های صورتی رنگ، موقعیت مکانی ایستگاه‌های هم‌دید در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهند.

۲-۲-۲. شاخص پتانسیل رخداد آذرخش

برای پیش‌بینی آذرخش در این مطالعه از مدل WRF استفاده شده است. داده‌های ورودی این مدل از مجموعه داده‌های GFS با دقت مکانی نیم درجه تأمین شده است. GFS یک مدل پیش‌بینی عددی وضع هوا است که توسط مرکز ملی پیش‌بینی‌های محیطی (NCEP) توسعه یافته و به‌طور گسترده در شبیه‌سازی‌های جوّی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل در چهار بعد مکانی (سه بعد فضایی و زمان) وضعیت جوّی را پیش‌بینی می‌کند. داده‌های GFS که با تفکیک مکانی نیم درجه استفاده شده‌اند، نمایی کلی و به‌نسبت دقیق از وضعیت جوّ ارائه می‌دهند که برای شبیه‌سازی‌های منطقه‌ای با مدل WRF مناسب است. تفکیک نیم درجه به معنای فاصله‌ای حدود ۵۵ کیلومتر است که در بازه زمانی مختلف با دقت ۶ ساعته به‌روزرسانی می‌شود. از این داده‌ها برای شبیه‌سازی فرایندهای جوّ در مقیاس‌های مختلف از جمله فرایندهای مربوط به ایجاد و توسعه آذرخش استفاده شده است.

در این پژوهش، با توجه به حساسیت پیش‌بینی آذرخش به طرحواره‌های خردفیزیکی (مک کال، ۲۰۲۰)، مدل WRF با طرحواره‌های مختلف خردفیزیکی اجرا شده و با استفاده از شاخص LPI پدیده آذرخش پیش‌بینی می‌شود. درستی-سنجی نتایج با استفاده از داده‌های آذرخش ENTLN انجام می‌شود.

شاخص پتانسیل رخداد آذرخش (LPI) فراسنج مفیدی برای پیش‌بینی آذرخش و همچنین ابزاری برای بهبود پیش‌بینی توفان‌های همرفتی و بارش‌های سنگین است. این شاخص توسط یایر و همکاران (۲۰۱۰) که معیاری از قابلیت و پتانسیل تولید و تفکیک بار در درون ابر است که به صورت رابطه ۱ تعریف شده است:

$$LPI = 1/V \iiint \epsilon w^2 dx dy dz \quad (1)$$

که در آن V حجم هوا در لایه بین ۰ درجه تا ۲۰- درجه سلسیوس است، w مولفه قائم باد بر حسب متر بر ثانیه است. انتگرال در حجم ابر از ارتفاع سطح انجماد (بر حسب کیلومتر از سطح زمین) تا ارتفاع خط همدمای ۲۰- درجه سلسیوس

محاسبه می‌شود. ϵ یک عدد بی بعد است که مقداری بین ۰ تا ۱ دارد و به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود:

$$\epsilon = 2\sqrt{Q_i Q_g} / (Q_i + Q_g) \quad (2)$$

که در آن Q_i نسبت اختلاط جرم آب مایع کل و Q_g نسبت اختلاط کسری یخ بر حسب کیلوگرم بر کیلوگرم هستند که Q_i مطابق با رابطه ۳ به‌دست می‌آید:

$$Q_i = q_g [(\sqrt{q_s q_g} / (q_s + q_g)) + (\sqrt{q_i q_g} / (q_i + q_g))] \quad (3)$$

که در آن q_g ، q_s و q_i به ترتیب نسبت‌های اختلاط جرم محاسبه شده توسط مدل برای گویچه برف، برف و یخ ابر بر حسب کیلوگرم بر کیلوگرم هستند.

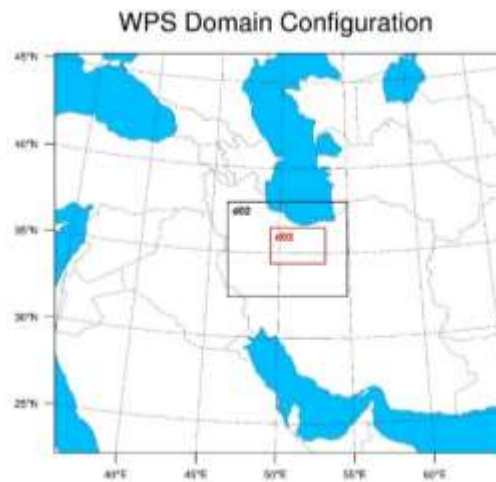
۲-۲-۳. حوزه شبیه‌سازی آذرخش با کاربرد مدل

WRF و پیکربندی آن

شکل ۲ منطقه شبیه‌سازی را نمایش می‌دهد که شامل سه دامنه تو در تو با تفکیک مکانی ۲۷ کیلومتر، ۹ کیلومتر و ۳ کیلومتر است. این ساختار چنددامنه‌ای امکان تمرکز بیشتر بر ناحیه مورد مطالعه و افزایش دقت پیش‌بینی در مقیاس‌های کوچک‌تر را فراهم می‌کند. با توجه به تأثیر بالای طرحواره‌های خردفیزیکی ابر بر پیش‌بینی آذرخش، در این مطالعه از هفت پیکربندی با طرحواره‌های خردفیزیکی مختلف، که جزئیات آن‌ها در جدول ۲ آورده شده، استفاده شده است. لازم به ذکر است که تعداد ۷۰ شبیه‌سازی با پیکربندی‌های متفاوت برای ده رویداد آذرخش منتخب انجام شده است. این پیکربندی‌ها شامل گزینه‌های مختلفی برای مدل‌سازی فرایندهای خردفیزیکی درون ابر هستند که نقش مهمی در شبیه‌سازی تشکیل و توزیع آذرخش دارند. انتخاب این طرحواره‌ها مبتنی بر دو رویکرد اصلی بوده است: نخست، استفاده از طرحواره‌هایی که در مطالعات پیشین مرتبط با شبیه‌سازی آذرخش در منطقه یا شرایط مشابه کاربرد داشته‌اند (مانند قرایلو و همکاران، ۲۰۲۰؛ صالح و همکاران، ۲۰۲۳)؛ و دوم، بهره‌گیری از طرحواره‌های خردفیزیکی دو مؤلفه‌ای که

واقع‌گرایانه‌تر شبیه‌سازی می‌کنند و در برخی مطالعات عملکرد بهتری در پیش‌بینی بارش و آذرخش داشته‌اند. با این حال، برای ارزیابی جامع و مقایسه‌پذیر عملکرد مدل در شرایط مختلف، طرحواره‌های تک‌مؤلفه‌ای نیز در شبیه‌سازی‌ها منظور شده‌اند. همچنین در تنظیمات مدل، تعداد ۳۵ تراز در راستای قائم در نظر گرفته شده که فشار در بالاترین تراز برابر 50 hPa است.

در ادبیات علمی به توانایی بالاتر آن‌ها در بازنمایی فرایندهای خردفیزیکی و بهبود شبیه‌سازی شاخص‌های همرفتی مانند LPI اشاره شده است (وانی و همکاران، ۲۰۲۲؛ بیونکوا اوه‌لیژووا و همکاران، ۲۰۲۲؛ موندال و همکاران، ۲۰۲۳). طرحواره‌های خردفیزیکی دو مؤلفه‌ای (Milbrandt–Yau, Morrison, WDM6, NSSL-2) با امکان تفکیک پیش‌بینی اندازه و تعداد ذرات، توزیع اندازه ذرات ابر را



شکل ۲. منطقه شبیه‌سازی با مدل WRF شامل سه دامنه تو در تو با تفکیک مکانی ۲۷ کیلومتر، ۹ کیلومتر و ۳ کیلومتر

جدول ۲. پیکربندی مورد استفاده در اجرای مدل WRF

WSM6 (Hong and Lim, 2006)	۱	
Goddard (Tao et al., 2016)	۲	
Thompson (Thompson et al., 2008)	۳	
Milbrandt–Yau (Milbrandt and Yau, 2005)	۴	طرحواره خردفیزیکی
Morrison (Morrison et al., 2009)	۵	
WDM6 (Lim and Hong, 2010)	۶	
NSSL-2 (Mansell et al., 2010)	۷	
<hr/>		
RRTM (Mlawer et al., 1997)		طرحواره تابش موج بلند
Dudhia (Dudhia, 1989)		طرحواره تابش موج کوتاه
Revised MM5 (Jimenez et al., 2012)		طرحواره لایه سطحی
Unified Noah (Tewari et al, 2004)		طرحواره سطح زمین
YSU (Hong et al., 2006)		طرحواره لایه مرزی
Kain–Fritsch (Kain, 2004)		طرحواره همرفتی

۲-۲-۴. روش ارزیابی

برای ارزیابی و درستی‌سنجی نتایج شبیه‌سازی آذرخش با مدل WRF از شاخص‌های احتمال تشخیص (POD)، موفقیت بحرانی (CSI)، نرخ موفقیت (SR) و اریبی (bias) استفاده شد. این شاخص‌ها به بررسی دقت مدل در پیش‌بینی آذرخش پرداخته و نشان می‌دهند که چقدر مدل در پیش‌بینی رویدادها موفق بوده است. همچنین به منظور تحلیل حساسیت، نمودارهای جعبه‌ای برای مقادیر LPI شبیه‌سازی شده در هر یک از هفت طرحواره برای ده رخداد آذرخش ترسیم شدند. محورهای آماری شامل میانه، چارک بالا و پایین، دامنه تغییرات و نقاط پرت هستند. لازم به توضیح است که برای ترسیم نمودار جعبه‌ای، ابتدا داده‌ها جمع‌آوری و پنج برآورد اصلی (کمینه مقدار، چارک اول، میانه، چارک سوم، بیشینه مقدار) مشخص می‌شود. چارک اول و سوم به ترتیب نقاطی هستند که ۲۵٪ و ۷۵٪ داده‌ها کمتر از آنها هستند و میانه مقداری را نشان می‌دهد که در وسط داده‌ها قرار دارد. سپس جعبه‌ای از چارک اول تا سوم ترسیم شده و خط میانه درون آن قرار می‌گیرد. خطوط قائم از طرفین جعبه به سمت کمینه و بیشینه مقدار کشیده می‌شود و نقاط خارج از این محدوده نشان‌دهنده داده‌های پرت است. داده‌های پرت، در واقع به داده‌هایی اطلاق می‌شود که بر اساس شدت پدیده، خارج از آستانه‌های تعریف شده قرار دارند و لزوماً به معنای داده‌های نادرست یا خطای محاسباتی نیستند.

۳. نتایج

برای درستی‌سنجی نتایج شبیه‌سازی آذرخش با مدل WRF برای هر یک از ۱۰ روز مورد مطالعه برای هر یک از ۷ پیکربندی شاخص‌های احتمال تشخیص (POD)، موفقیت بحرانی (CSI)، نرخ موفقیت (SR) و اریبی (bias) بررسی شد و در نهایت، جمع‌بندی کلی از عملکرد هر پیکربندی در جدول ۳ ارائه شد. برای بررسی پیش‌بینی و یا عدم پیش‌بینی رخداد آذرخش در منطقه مورد مطالعه (داخلی‌ترین حوزه شبیه‌سازی آذرخش با مدل WRF) با کنار گذاشتن زمان

تنظیم اولیه^۱ که ۱۲ ساعت در نظر گرفته شده است، در هر بازه زمانی ۱۰ دقیقه میانگین شاخص پتانسیل آذرخش (LPI) در منطقه مورد مطالعه با مقدار بیش از ۵ ژول بر کیلوگرم به‌عنوان پیش‌بینی رخداد آذرخش و کمتر از این آستانه به‌عنوان عدم رخداد آن در نظر گرفته شد. علت انتخاب این آستانه، این است که هر چند داده‌های ENTLN پوشش جهانی ارائه می‌دهد، اما به دلیل تکیه بر امواج VLF، این شبکه به نسبت برخی از سامانه‌های محلی حساسیت کمتری به آذرخش‌های ضعیف یا مواردی که در ارتفاعات بالا رخ می‌دهند، دارد. به همین دلیل، این شبکه بیشتر برای ردیابی آذرخش‌های بزرگتر و شدیدتر کاربرد دارد (بویی و همکاران، ۲۰۱۵). بنابراین با این نحوه بررسی پیش‌بینی رخداد یا عدم رخداد آذرخش یا عدم پیش‌بینی آن، در بازه زمانی ۱۰ دقیقه‌ای با استفاده از شاخص‌های معرفی شده، به درستی‌سنجی نتایج شبیه‌سازی در مقایسه با داده‌های ENTLN پرداخته می‌شود. نتایج این درستی‌سنجی در جدول ۳ نشان داده شده است.

به‌طور کلی، می‌توان گفت که برخی پیکربندی‌ها (مثلاً پیکربندی‌های دوم و هفتم) در بیشتر موارد مقدار POD بالاتری نسبت به سایر پیکربندی‌ها داشته‌اند. این نشان می‌دهد که این پیکربندی‌ها توانایی بهتری در تشخیص رخدادها و واقعی آذرخش داشته‌اند. اما این نتیجه‌گیری به صورت کلی و برای تمام تاریخ‌ها برقرار نیست و ممکن است در برخی موارد استثنایی (مانند مورد مطالعاتی سوم و هفتم) وجود داشته باشد. شاخص نرخ موفقیت (SR) بیشتر، به معنای دقت بالا در شناسایی آذرخش‌های رخ داده و هشدار نادرست کمتر است. به‌طور کلی پیکربندی‌های اول و چهارم در کاهش پیش‌بینی‌های مثبت نادرست عملکرد خوبی داشته‌اند؛ یعنی این پیکربندی‌ها تعداد هشدار نادرست کمتر داشته‌اند. شاخص اریبی (bias) در مطالعات مختلف و برای پیکربندی‌های متفاوت، نوسانات قابل توجهی داشته است. به‌طور کلی، در چهار مورد مطالعاتی، هفت پیکربندی مورد بررسی فراتخمین داشته‌اند. در چهار مورد مطالعاتی، این

¹ Spin-up time

پیکربندی‌ها فروتخمین داشته‌اند و در دو مورد دیگر نیز فروتخمین و هم فروتخمین مشاهده شده است. به‌طور کلی، پیکربندی دوم در بیشتر موارد مطالعاتی آریبی کمتری نسبت به سایر پیکربندی‌ها داشته است. این نشان می‌دهد که پیکربندی دوم در برآورد پدیده مورد مطالعه، به تعادل بهتری بین پیش‌بینی‌ها و رخداد‌های واقعی رسیده‌اند. شاخص موفقیت بحرانی (CSI) که تعداد پیش‌بینی منفی درست را در نظر نمی‌گیرد، تمرکز بیشتری روی قابلیت مدل در پیش‌بینی رخداد‌های مهم و نادر دارد. پیکربندی اول و دوم در موارد مطالعاتی نسبت به سایر پیکربندی‌ها نتایج بهتری دارند.

همچنین برای مقایسه دقیق‌تر نتایج پیش‌بینی رخداد آذرخش مدل با داده‌های ENTLN، از نمودار جعبه‌ای استفاده شده است که به ترتیب در شکل‌های ۳ تا ۱۲ ارائه شده‌اند. این نمودارها کمک می‌کنند تا تفاوت‌ها و شباهت‌های میان مقادیر شبیه‌سازی‌شده توسط مدل WRF و داده‌های مشاهده‌شده ENTLN به صورت آماری و چشمی نمایش داده شوند. با توجه به اینکه داده‌های ENTLN به عنوان معیار مشاهداتی در نظر گرفته می‌شوند، عملکرد هر پیکربندی شبیه‌سازی باید به ENTLN نزدیک باشد. به این ترتیب، می‌توان با استفاده از معیارهای مختلف نظیر میانه، محدوده بین چارک‌ها و چارک بالا و پایین میزان دقت هر پیکربندی را در پیش‌بینی آذرخش‌ها ارزیابی کرد. به‌طور خلاصه، این ارزیابی به دنبال یافتن نزدیک‌ترین شبیه‌سازی‌ها به داده‌های واقعی است و با تحلیل‌های آماری انجام‌شده مشخص می‌شود که کدام پیکربندی‌ها در پیش‌بینی آذرخش‌ها بهتر عمل کرده‌اند.

۳-۱. مورد مطالعاتی اول: ۲۹ آوریل ۲۰۱۷

در شکل ۳ مربوط به رخداد آذرخش روز ۲۹ آوریل ۲۰۱۷، مقایسه میان داده‌های مشاهده‌ای شبکه ENTLN و خروجی مدل WRF در قالب هفت پیکربندی مختلف صورت گرفته است. این نمودار با هدف بررسی توانایی هر پیکربندی در

شبیه‌سازی چگالی آذرخش در سطح منطقه طراحی شده و اطلاعات ارزشمندی درباره دقت طرحواره‌های خردفیزیکی در بازنمایی ساختار مکانی و شدت آذرخش‌ها فراهم می‌آورد. بر اساس این نمودار، داده‌های ENTLN نسبت به تمامی شبیه‌سازی‌ها، تعداد بیشتری از رخداد‌های آذرخش را ثبت کرده‌اند. این تفاوت از طریق بازه تغییرات میان چارکی (IQR) یا فاصله بین چارک اول و سوم و تعداد داده‌های پرت کاملاً قابل مشاهده است. بازه بین چارکی ENTLN گسترده‌تر است، به‌طوری‌که پراکندگی داده‌ها و تنوع مکانی چگالی آذرخش در داده‌های مشاهده‌ای، نسبت به نتایج حاصل از مدل بسیار بیشتر است. این موضوع از نظر فیزیکی منطقی به نظر می‌رسد، زیرا مدل‌های عددی اغلب در بازنمایی موضعی‌ترین رخدادها دچار محدودیت هستند و رفتار هموارسازی‌شده‌تری نسبت به داده‌های مشاهده‌ای دارند. در میان پیکربندی‌های مدل WRF، پیکربندی دوم عملکرد بهتری نسبت به سایر گزینه‌ها از خود نشان داده است و بازه تغییرات میان چارکی آن با مشاهدات مطابقت بیشتری دارد. این موضوع حاکی از آن است که این پیکربندی در بازتولید تنوع آماری آذرخش عملکرد بهتری داشته است. چنین رفتاری می‌تواند ناشی از استفاده از یک طرحواره خردفیزیکی مناسب در این پیکربندی باشد که توانایی بیشتری در شبیه‌سازی فرایندهای همرفتی و تولید بار الکتریکی در ابر دارد. در مقابل، سایر پیکربندی‌ها در اغلب موارد، مقادیر کمتری از آذرخش را نسبت به داده‌های ENTLN تولید کرده‌اند. این مطلب در کاهش قابل توجه در IQR، و محدود بودن دامنه مقادیر نسبت به داده‌های مشاهده‌ای به‌وضوح دیده می‌شود. این ویژگی‌ها بیان‌گر آن است که مدل در این پیکربندی‌ها تمایل دارد پدیده آذرخش را کمتر از واقع تخمین بزند. محدود شدن خروجی‌ها به یک بازه باریک و بدون وجود مقادیر فراتر از آستانه‌های بالا، ضعف در بازنمایی بیشینه‌های محلی را آشکار می‌سازد.

پیکربندی‌ها فروتخمین داشته‌اند و در دو مورد دیگر نیز فروتخمین و هم فروتخمین مشاهده شده است. به‌طور کلی، پیکربندی دوم در بیشتر موارد مطالعاتی آریبی کمتری نسبت به سایر پیکربندی‌ها داشته است. این نشان می‌دهد که پیکربندی دوم در برآورد پدیده مورد مطالعه، به تعادل بهتری بین پیش‌بینی‌ها و رخداد‌های واقعی رسیده‌اند. شاخص موفقیت بحرانی (CSI) که تعداد پیش‌بینی منفی درست را در نظر نمی‌گیرد، تمرکز بیشتری روی قابلیت مدل در پیش‌بینی رخداد‌های مهم و نادر دارد. پیکربندی اول و دوم در موارد مطالعاتی نسبت به سایر پیکربندی‌ها نتایج بهتری دارند.

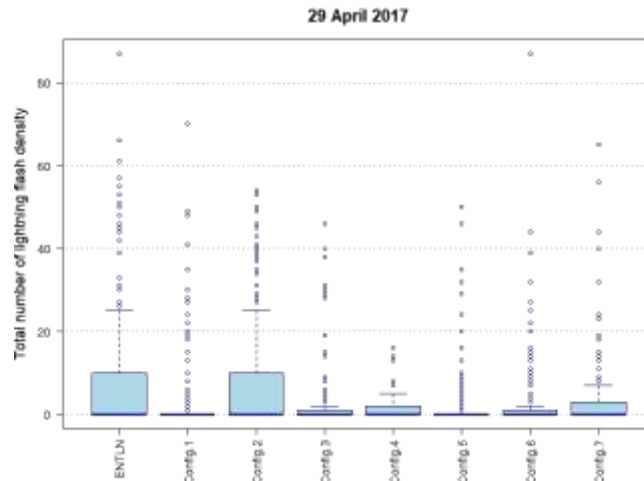
همچنین برای مقایسه دقیق‌تر نتایج پیش‌بینی رخداد آذرخش مدل با داده‌های ENTLN، از نمودار جعبه‌ای استفاده شده است که به ترتیب در شکل‌های ۳ تا ۱۲ ارائه شده‌اند. این نمودارها کمک می‌کنند تا تفاوت‌ها و شباهت‌های میان مقادیر شبیه‌سازی‌شده توسط مدل WRF و داده‌های مشاهده‌شده ENTLN به صورت آماری و چشمی نمایش داده شوند. با توجه به اینکه داده‌های ENTLN به عنوان معیار مشاهداتی در نظر گرفته می‌شوند، عملکرد هر پیکربندی شبیه‌سازی باید به ENTLN نزدیک باشد. به این ترتیب، می‌توان با استفاده از معیارهای مختلف نظیر میانه، محدوده بین چارک‌ها و چارک بالا و پایین میزان دقت هر پیکربندی را در پیش‌بینی آذرخش‌ها ارزیابی کرد. به‌طور خلاصه، این ارزیابی به دنبال یافتن نزدیک‌ترین شبیه‌سازی‌ها به داده‌های واقعی است و با تحلیل‌های آماری انجام‌شده مشخص می‌شود که کدام پیکربندی‌ها در پیش‌بینی آذرخش‌ها بهتر عمل کرده‌اند.

۳-۱. مورد مطالعاتی اول: ۲۹ آوریل ۲۰۱۷

در شکل ۳ مربوط به رخداد آذرخش روز ۲۹ آوریل ۲۰۱۷، مقایسه میان داده‌های مشاهده‌ای شبکه ENTLN و خروجی مدل WRF در قالب هفت پیکربندی مختلف صورت گرفته است. این نمودار با هدف بررسی توانایی هر پیکربندی در

جدول ۳. نمرات مهارت پیش‌بینی POD، SR، bias و CSI برای ۷ پیکربندی مورد استفاده در شبیه‌سازی آذرخش با مدل WRF در هر یک از ۱۰ مورد مطالعاتی، مقادیر بهتر هر شاخص با رنگ زرد مشخص شده‌اند.

Case study	Configuration	POD	SR	Bias	CSI	Case study	Configuration	POD	SR	Bias	CSI
۱-۲۰۱۷۰۴۹	Config.1	۰/۵۴	۰/۹	۰/۶	۰/۵۱	۲-۲۰۱۷۰۵۵	Config.1	۰/۴۷	۰/۷	۰/۶۷	۰/۳۹
	Config.2	۰/۷۸	۰/۹۱	۰/۸۶	۰/۷۲		Config.2	۰/۴۸	۰/۶۷	۰/۷۱	۰/۳۹
	Config.3	۰/۳۲	۰/۸۴	۰/۳۸	۰/۳		Config.3	۰/۴۱	۰/۷۱	۰/۵۸	۰/۳۵
	Config.4	۰/۲۴	۰/۸	۰/۳	۰/۲۳		Config.4	۰/۴	۰/۷۵	۰/۵۳	۰/۳۵
	Config.5	۰/۸۲	۰/۸۲	۰/۴۴	۰/۳۳		Config.5	۰/۴۲	۰/۷۲	۰/۵۹	۰/۳۶
	Config.6	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۴۸	۰/۴۵		Config.6	۰/۴۷	۰/۶۶	۰/۷۱	۰/۳۸
	Config.7	۰/۹۱	۰/۹۱	۰/۶۴	۰/۵۵		Config.7	۰/۴۴	۰/۷۲	۰/۶۱	۰/۳۸
Case study	Configuration	POD	SR	Bias	CSI	Case study	Configuration	POD	SR	Bias	CSI
۳-۲۰۱۸۰۵۲	Config.1	۰/۷۴	۰/۹۲	۰/۸	۰/۶۹	۴-۲۰۱۹۰۴۱	Config.1	۰/۹۳	۰/۷۱	۱/۳	۰/۶۷
	Config.2	۰/۷۶	۰/۹۲	۰/۸۳	۰/۷۱		Config.2	۰/۶۹	۰/۶۴	۱/۰۹	۰/۵
	Config.3	۰/۸۳	۰/۸۴	۰/۹۸	۰/۷۲		Config.3	۰/۹	۰/۶۸	۱/۳۳	۰/۶۳
	Config.4	۰/۶۷	۱	۰/۶۷	۰/۶۷		Config.4	۰/۹۶	۰/۶۴	۱/۴۹	۰/۶۳
	Config.5	۰/۷۴	۰/۹۴	۰/۷۸	۰/۷۱		Config.5	۰/۷۷	۰/۶۷	۱/۱۵	۰/۵۵
	Config.6	۰/۶۱	۰/۹۷	۰/۶۳	۰/۶		Config.6	۰/۸۳	۰/۶۸	۱/۲۱	۰/۶
	Config.7	۰/۶۷	۰/۹۱	۰/۷۴	۰/۶۳		Config.7	۰/۹۷	۰/۶۴	۱/۵۱	۰/۶۳
Case study	Configuration	POD	SR	Bias	CSI	Case study	Configuration	POD	SR	Bias	CSI
۵-۲۰۱۹۰۴۰۶	Config.1	۰/۹۵	۰/۵۹	۱/۶	۰/۵۸	۶-۲۰۱۹۰۵۱۰	Config.1	۰/۸	۰/۸۸	۰/۹۱	۰/۷۲
	Config.2	۰/۹۵	۰/۶۱	۱/۵۶	۰/۵۹		Config.2	۰/۷۶	۰/۷۲	۱/۰۶	۰/۵۹
	Config.3	۰/۹۳	۰/۷	۱/۳۳	۰/۶۷		Config.3	۰/۷۵	۰/۶۳	۱/۱۹	۰/۵۲
	Config.4	۰/۹۵	۰/۴۲	۲/۲۶	۰/۴۱		Config.4	۰/۸	۰/۶۴	۱/۲۴	۰/۵۶
	Config.5	۰/۹۳	۰/۶۹	۱/۳۵	۰/۶۶		Config.5	۰/۸	۰/۶۶	۱/۲	۰/۵۷
	Config.6	۰/۹۵	۰/۵۴	۱/۷۷	۰/۵۳		Config.6	۰/۸	۰/۸۳	۰/۹۶	۰/۶۹
	Config.7	۰/۹۸	۰/۳۸	۲/۵۶	۰/۳۸		Config.7	۰/۸	۰/۵۹	۱/۳۵	۰/۵۲
Case study	Configuration	POD	SR	Bias	CSI	Case study	Configuration	POD	SR	Bias	CSI
۷-۲۰۲۰۰۴۰۹	Config.1	۰/۷۳	۰/۷	۱/۰۴	۰/۵۶	۸-۲۰۲۰۰۴۳۳	Config.1	۰/۹	۰/۵۴	۱/۶۷	۰/۵۱
	Config.2	۰/۷۲	۰/۶۳	۱/۱۴	۰/۵		Config.2	۰/۹۲	۰/۵۴	۱/۷	۰/۵۱
	Config.3	۰/۴۲	۰/۴۷	۰/۹	۰/۲۹		Config.3	۰/۸۲	۰/۵۷	۱/۴۳	۰/۵۱
	Config.4	۰/۷۵	۰/۵۵	۱/۳۵	۰/۴۶		Config.4	۰/۸۲	۰/۵۲	۱/۵۹	۰/۴۶
	Config.5	۰/۴۵	۰/۵۱	۰/۸۹	۰/۳۱		Config.5	۰/۸	۰/۵۴	۱/۴۸	۰/۴۸
	Config.6	۰/۶۳	۰/۶۳	۱	۰/۴۶		Config.6	۰/۹	۰/۵۷	۱/۵۷	۰/۵۴
	Config.7	۰/۶۵	۰/۴۷	۱/۳۸	۰/۳۷		Config.7	۰/۹۵	۰/۴۷	۲/۰۲	۰/۴۶
Case study	Configuration	POD	SR	Bias	CSI	Case study	Configuration	POD	SR	Bias	CSI
۹-۲۰۲۱۰۵۲۵	Config.1	۰/۶۹	۰/۹۶	۰/۷۲	۰/۶۷	۱۰-۲۰۲۲۰۵۰۱	Config.1	۰/۹۶	۰/۵۸	۱/۶۴	۰/۵۷
	Config.2	۰/۷۶	۰/۹۸	۰/۷۸	۰/۷۵		Config.2	۰/۹۶	۰/۴۷	۲/۰۲	۰/۴۶
	Config.3	۰/۷۲	۰/۹۹	۰/۷۳	۰/۷۲		Config.3	۰/۸۴	۰/۴	۲/۰۸	۰/۳۸
	Config.4	۰/۵۹	۱	۰/۵۹	۰/۵۹		Config.4	۰/۷۶	۰/۳۸	۲	۰/۳۴
	Config.5	۰/۶۶	۰/۹۷	۰/۶۷	۰/۶۴		Config.5	۰/۸۹	۰/۴۳	۲/۰۶	۰/۴۱
	Config.6	۰/۶۳	۰/۹۴	۰/۶۷	۰/۶		Config.6	۰/۹۱	۰/۴۷	۱/۹۳	۰/۴۵
	Config.7	۰/۶۶	۰/۹۶	۰/۶۸	۰/۶۴		Config.7	۰/۹۶	۰/۴۹	۱/۹۶	۰/۴۸

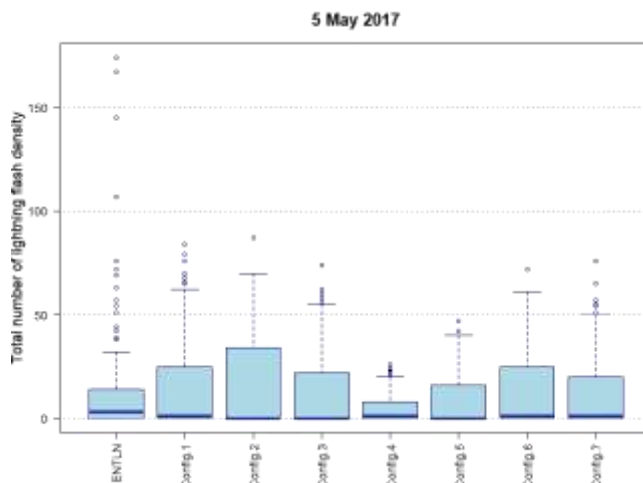


شکل ۳. نمودار جعبه‌ای برای مورد مطالعاتی ۲۹ آوریل ۲۰۱۷ در هفت پیکربندی مختلف در مقایسه با داده ENTLN

عموماً از دید مدل‌های عددی پنهان می‌مانند مگر آنکه پیکربندی مدل به‌خوبی طراحی شده باشد. از نظر فاصله میان چارکی (IQR)، داده‌های ENTLN نسبت به اغلب پیکربندی‌های مدل دارای بازه کوچک‌تری است. به بیان دیگر، بخش عمده‌ای از داده‌های واقعی در یک بازه نسبتاً محدود متمرکز شده‌اند، اما با این حال دارای نقاط پرت شدیدی نیز هستند. این ترکیب نشان‌گر آن است که اکثر مناطق درگیر آذرخش‌های متوسط بوده‌اند، اما در کنار آن‌ها مناطق خاصی با چگالی بسیار بالا نیز وجود داشته‌اند. تنها پیکربندی چهارم است که IQR آن تقریباً مشابه داده‌های مشاهده‌ای است. در سایر پیکربندی‌ها، نه تنها مقدار میانه کمتر از مقدار واقعی ثبت شده است، بلکه IQR آن‌ها نیز گسترده‌تر است. این رفتار می‌تواند نشان‌دهنده عدم تمرکز مدل بر نواحی واقعاً مستعد وقوع آذرخش و در عوض توزیع پراکنده‌تری از چگالی در سطح منطقه باشد. به عبارت دیگر، مدل در این پیکربندی‌ها آذرخش را به‌طور گسترده‌تری پخش کرده ولی شدت آن را تضعیف نموده است. این نوع خطا معمولاً در شرایطی رخ می‌دهد که طرحواره‌های خردفیزیکی یا فراسنج‌های صعود قائم، نتوانند سیگنال‌های همرفتی متمرکز را به‌درستی استخراج کنند.

۲-۳. مورد مطالعاتی دوم: ۵ مه ۲۰۱۷

در نمودار جعبه‌ای مربوط به رخداد روز ۵ مه ۲۰۱۷ (شکل ۴)، داده‌های چگالی آذرخش ثبت شده توسط شبکه ENTLN با نتایج شبیه‌سازی شده از سوی مدل WRF در قالب هفت پیکربندی متفاوت مقایسه شده‌اند. تحلیل این نمودار اطلاعات قابل توجهی در خصوص تفاوت رفتاری مدل و واقعیت مشاهده‌شده در آن روز فراهم می‌آورد. در گام نخست، آنچه از نمودار مشاهده می‌شود، بیشتر بودن مقدار میانه در داده‌های ENTLN نسبت به تمام پیکربندی‌های مدل است. این نکته نشان می‌دهد که در میانگین مکانی، شبکه ردیابی آذرخش ENTLN چگالی بیشتری از رخدادها را ثبت کرده است. این وضعیت می‌تواند حاکی از عدم کفایت مدل در بازنمایی شدت یا گستره واقعی سامانه همرفتی فعال در آن روز باشد. علاوه بر این، در داده‌های ENTLN تعداد قابل ملاحظه‌ای داده خارج از آستانه بالا (outlier) دیده می‌شود که به شکل نقاطی در بالای نمودار پراکنده‌اند. این مسئله به روشنی نشان می‌دهد که در برخی نواحی خاص، آذرخش‌هایی با چگالی بسیار بالا به وقوع پیوسته‌اند و به واسطه وجود ناپایداری شدید محلی، الگوهای غیرهمگن از توزیع آذرخش شکل گرفته است. این رخدادها

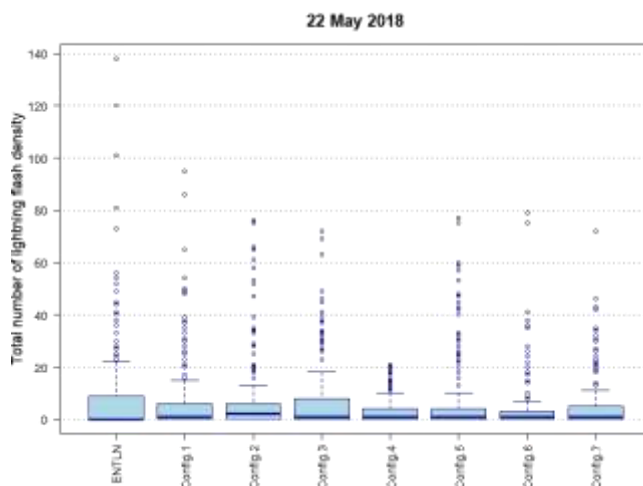


شکل ۴. نمودار جعبه‌ای برای مورد مطالعاتی ۵ مه ۲۰۱۷ در هفت پیکربندی مختلف در مقایسه با داده ENTLN

۳-۳. مورد مطالعاتی سوم: ۲۲ مه ۲۰۱۸

در نمودار جعبه‌ای مربوط به رخداد آذرخش روز ۲۲ مه ۲۰۱۸ (شکل ۵)، داده‌های مشاهده‌شده توسط شبکه ENTLN با خروجی‌های مدل WRF در قالب هفت پیکربندی مختلف مقایسه شده‌اند. هدف از این مقایسه، ارزیابی دقت مدل در بازنمایی توزیع مکانی چگالی آذرخش در سطح منطقه و تحلیل میزان توانمندی هر پیکربندی در بازسازی ویژگی‌های این پدیده است. در این رخداد، مقادیر پرت فراوانی در داده‌های ENTLN و خروجی مدل دیده

می‌شود که بیانگر وقوع نقاط با شدت بالا یا ساختارهای همرفتی موضعی قوی در این روز است. یکی از ویژگی‌های جالب توجه این رخداد، اندازه کوچک فاصله میان چارکی (IQR) در داده‌های ENTLN است. این بازه، که از چارک اول تا سوم را پوشش می‌دهد، نسبت به اغلب پیکربندی‌های مدل کمی بیشتر است. در میان پیکربندی‌های مدل، پیکربندی سوم دارای IQR مشابه‌تری به داده‌های ENTLN است، که نشان می‌دهد در بازنمایی تنوع آماری داده‌ها موفق‌تر از سایر پیکربندی‌ها عمل کرده است.



شکل ۵. نمودار جعبه‌ای برای مورد مطالعاتی ۲۲ مه ۲۰۱۸ در هفت پیکربندی مختلف در مقایسه با داده ENTLN

۳-۴. مورد مطالعاتی چهارم: ۱ آوریل ۲۰۱۹

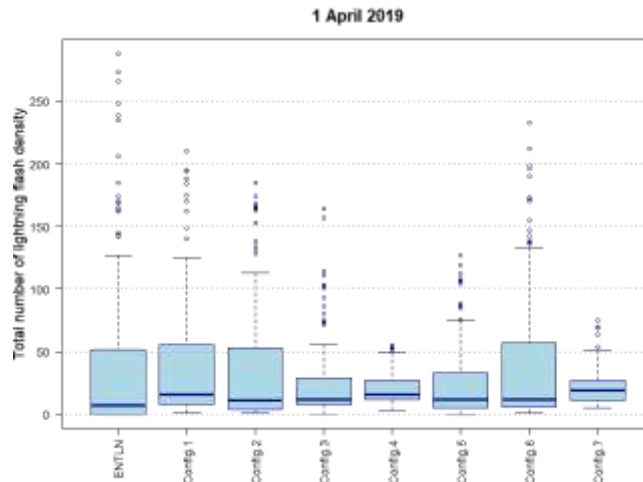
در شکل ۶ نمودار جعبه‌ای مربوط به روز ۱ آوریل ۲۰۱۹ توزیع چگالی آذرخش در داده‌های مشاهده‌ای ENTLN با

خروجی مدل WRF در قالب هفت پیکربندی مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است. این نمودار به وضوح نشان می‌دهد که در این روز فعالیت آذرخش در سطح منطقه بسیار گسترده

تنوع مکانی قابل توجه در چگالی آذرخش طی این رخداد است. در میان پیکربندی‌ها، پیکربندی‌های اول، دوم و ششم بیشترین شباهت به ENTLN را از نظر IQR دارند. این شباهت به معنای آن است که این سه پیکربندی توانسته‌اند تا حدودی پراکندگی مکانی رخداد‌های آذرخش را مشابه واقعیت بازتولید کنند، هرچند که مقدار میانه آن‌ها همچنان بیش از مقدار مشاهده‌شده است. مقدار میانه پیکربندی دوم نیز بیشترین شباهت را به داده‌های ENTLN دارد. این ویژگی بیانگر آن است که این پیکربندی‌ها از نظر بازه نوسانات عملکرد بهتری دارند، اما همچنان نیازمند اصلاح در میزان برآورد چگالی هستند.

و شدید بوده است، به گونه‌ای که داده‌های ENTLN دارای میانه‌ای در حدود ۱۰ هستند و در عین حال مقادیر بسیار زیادی از آذرخش‌های شدیدتر نیز در قالب داده‌های پرت در بخش بالایی نمودار ثبت شده‌اند. این پراکندگی شدید نشان‌دهنده حضور ساختارهای همرفتی ناپایدار و توسعه‌یافته در منطقه است که در برخی نواحی منجر به افزایش چشمگیر چگالی آذرخش شده‌اند.

در میان پیکربندی‌های مدل WRF، نکته قابل توجه آن است که میانه خروجی تمامی پیکربندی‌ها بالاتر از میانه ENTLN قرار دارد. در کنار موقعیت میانه، بررسی بازه میان چارکی (IQR) نیز اطلاعات مهمی در اختیار قرار می‌دهد. داده‌های ENTLN دارای IQR گسترده‌ای هستند که نشان‌دهنده



شکل ۶. نمودار جعبه‌ای برای مورد مطالعاتی ۱ آوریل ۲۰۱۹ در هفت پیکربندی مختلف در مقایسه با داده ENTLN

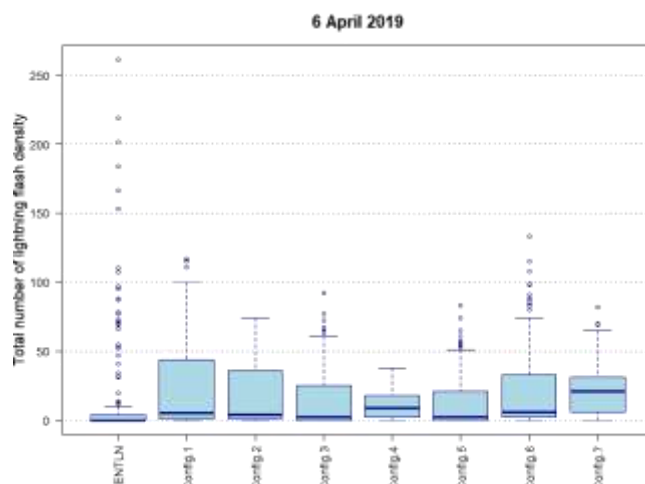
قرار داشته است. با این حال، یکی از نکات قابل توجه در داده‌های مشاهده‌ای، وجود تعداد قابل ملاحظه‌ای از داده‌های خارج از آستانه بالا است که به صورت نقاط پرت در بخش فوقانی نمودار قابل مشاهده‌اند. این نکته نشان‌دهنده آن است که اگرچه توزیع کلی آذرخش در منطقه متراکم و محدود بوده، اما در برخی نواحی خاص، چگالی آذرخش به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و ساختارهای همرفتی موضعی قوی شکل گرفته‌اند. این الگو برای سامانه‌هایی با اوج ضعیف متوسط اما نقاط بیشینه شدید کاملاً متداول است. در مقایسه با داده‌های مشاهده‌شده، تمامی پیکربندی‌های مدل WRF در این روز دچار بیش‌برآورد در مقدار میانه شده‌اند. این بدان

۳-۵. مورد مطالعاتی پنجم: ۶ آوریل ۲۰۱۹

مقایسه توزیع چگالی آذرخش در داده‌های مشاهده‌ای ENTLN و خروجی مدل WRF در هفت پیکربندی مختلف با یکدیگر در شکل ۷ نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که برخلاف بسیاری از رخداد‌های دیگر، داده‌های واقعی ثبت‌شده توسط ENTLN در این روز دارای دامنه تغییرات کوچک‌تری هستند، به طوری که فاصله میان چارکی (IQR) در این مجموعه داده محدود و متراکم است. این امر دلالت بر آن دارد که در این روز، گستره مکانی آذرخش‌ها به‌طور نسبی محدود و متمرکز بوده و شدت عمومی سامانه همرفتی فعال در سطح منطقه در حد متوسط

پیکربندی‌های سوم و پنجم به‌عنوان نزدیک‌ترین گزینه‌ها از لحاظ مقدار میانه به داده‌های واقعی ظاهر شده‌اند. این دو پیکربندی در مقایسه با سایر موارد، مقدار میانه‌ای تولید کرده‌اند که به میانه ENTLN نزدیک‌تر است، اگرچه همچنان دارای IQR گسترده‌تری هستند. بنابراین می‌توان گفت که این دو پیکربندی در بازنمایی شدت کلی بهتر عمل کرده‌اند، اما همچنان در بازتاب محدودیت مکانی پدیده ضعف دارند.

معناست که مدل چگالی آذرخش را بیشتر از واقعیت تخمین زده است. در حالی که IQR در ENTLN بسیار متراکم و محدود است، اکثر پیکربندی‌های مدل دارای بازه میان چارکی گسترده‌تری هستند که از پراکندگی بالاتر در خروجی مدل حکایت دارد. این وضعیت بیانگر آن است که مدل نه تنها تمایل به افزایش مقدار پیش‌بینی شده دارد، بلکه آن را در سطح وسیع‌تری از منطقه توزیع کرده است. این امر معمولاً به عملکرد طرحواره‌های خردفیزیکی در تولید گسترش همرفتی بیش از حد مرتبط می‌شود. در این میان،



شکل ۷. نمودار جعبه‌ای برای مورد مطالعاتی ۶ آوریل ۲۰۱۹ در هفت پیکربندی مختلف در مقایسه با داده ENTLN

آذرخش در سطح منطقه بوده است. در مقابل، باریک بودن جعبه در پیکربندی چهارم بیانگر تمرکز خروجی‌ها در بازه‌ای محدود و رفتار محافظه‌کارانه‌تر مدل در این پیکربندی است.

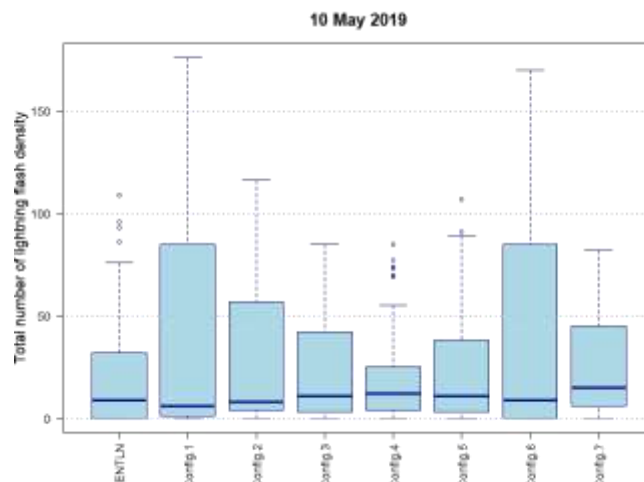
در ارتباط با میانه‌ها، مشاهده می‌شود که پیکربندی‌های سوم تا ششم عملکرد قابل قبولی در بازتولید مقدار میانه چگالی آذرخش دارند. در این چهار پیکربندی، موقعیت میانه در نزدیکی میانه ENTLN قرار گرفته و این تطابق نشان می‌دهد که مدل در این موارد توانسته است شدت متوسط پدیده را به‌درستی تخمین بزند. این موضوع از آن جهت اهمیت دارد که در بسیاری از کاربردهای عملیاتی، توانایی مدل در بازسازی مقدار مرکزی (نظیر میانه یا میانگین) نقش مهمی در صدور هشدار و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی دارد. با این حال، لازم به ذکر است که گستردگی زیاد جعبه در پیکربندی‌هایی

۳-۶. مورد مطالعاتی ششم: ۱۰ مه ۲۰۱۹

شکل ۸ نمودار جعبه‌ای مربوط به روز ۱۰ مه ۲۰۱۹، مقایسه داده‌های مشاهده‌شده توسط شبکه ENTLN با خروجی مدل WRF در هفت پیکربندی مختلف، تصویری از میزان تطابق مدل با واقعیت در این رخداد همرفتی ارائه می‌دهد. یکی از نکات بارز این نمودار، تفاوت در گستردگی جعبه‌ها (یا همان فاصله بین چارکی) میان پیکربندی‌های مختلف است. بجز پیکربندی چهارم که دارای جعبه نسبتاً باریکی است، سایر پیکربندی‌ها بازه تغییرات گسترده‌تری را نشان می‌دهند. این مسئله نشان می‌دهد که در اغلب پیکربندی‌ها، خروجی مدل دارای تنوع آماری بیشتری نسبت به پیکربندی چهارم بوده است. به عبارت دیگر، در بیشتر پیکربندی‌ها پراکندگی مکانی آذرخش به‌صورت وسیع‌تری شبیه‌سازی شده و مدل در آن‌ها قادر به تولید مقادیر متنوع‌تری از چگالی

نه‌چندان استثنایی است، که مدل باید قادر باشد بدون بزرگ‌نمایی بیش‌ازحد آن را بازتولید کند. به‌طور کلی، تحلیل نمودار جعبه‌ای روز ۱۰ مه ۲۰۱۹ نشان می‌دهد که مدل WRF در پیکربندی‌های سوم تا ششم به‌خصوص پیکربندی پنجم توانسته است تا حد زیادی شدت متوسط پدیده را بازسازی کند و در عین حال، گستردگی خروجی در بیشتر پیکربندی‌ها بیانگر تلاش مدل برای بازتاب تنوع مکانی چگالی آذرخش بوده است.

نظیر سوم و ششم می‌تواند نشانه‌ای از وجود عدم قطعیت بالا نیز باشد. اگرچه تطابق میانه ارزشمند است، اما نوسانات شدید در خروجی مدل می‌تواند چالش‌برانگیز باشد، به‌ویژه اگر مدل مقادیر افراطی غیرواقعی تولید کند. در نهایت، داده‌های ENTLN نیز در این رخداد دارای دامنه متوسطی از تغییرات هستند، به‌گونه‌ای که وجود چند داده پرت (outlier) در بالای نمودار قابل مشاهده است اما به میزان قابل توجه رخدادهای شدید در برخی روزهای دیگر نمی‌رسد. این الگو بیانگر وجود یک سامانه همرفتی فعال اما با شدت

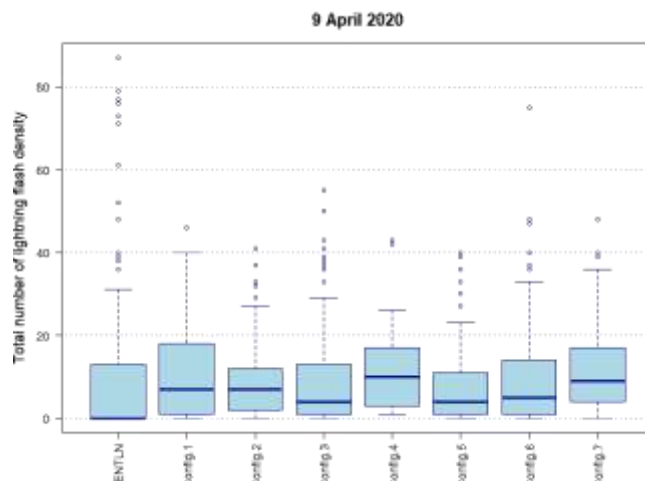


شکل ۸. نمودار جعبه‌ای برای مورد مطالعاتی ۱۰ مه ۲۰۱۹ در هفت پیکربندی مختلف در مقایسه با داده ENTLN

عملکرد نسبتاً باثباتی داشته است. با این حال، با وجود این تطابق در تنوع، یک نکته کلیدی در نتایج مدل به چشم می‌خورد و آن، موقعیت بالاتر میانه در تمامی پیکربندی‌ها نسبت به مقدار میانه داده‌های مشاهده‌ای است. در واقع، در تمامی مدل‌سازی‌ها، مقدار مرکزی پیش‌بینی‌شده بالاتر از واقعیت قرار گرفته که نشان‌دهنده نوعی فراتخمین سیستماتیک از سوی مدل است. این وضعیت به آن معناست که هرچند مدل موفق به بازنمایی حدود و پراکندگی داده‌ها شده، اما شدت متوسط پدیده را بیشتر از واقع برآورد کرده است. در این شبیه‌سازی بیشترین تطابق با داده‌های ENTLN مربوط به پیکربندی سوم است.

۳-۷. مورد مطالعاتی هفتم: ۹ آوریل ۲۰۲۰

در شکل ۹، توزیع چگالی آذرخش ثبت‌شده توسط شبکه ENTLN با خروجی مدل WRF در هفت پیکربندی مختلف برای روز ۹ آوریل ۲۰۲۰، مقایسه شده است. آنچه از این نمودار به‌وضوح قابل استنتاج است، شباهت نسبی در الگوی پراکندگی و تنوع آماری داده‌ها میان پیکربندی‌های مدل و داده‌های مشاهده‌ای است. به بیان دیگر، دامنه تغییرات و گستره فاصله میان چارکی (IQR) در اکثر پیکربندی‌ها با داده‌های ENTLN هم‌خوانی داشته و بیانگر آن است که مدل در بازتولید تنوع مکانی و دامنه تغییرات چگالی آذرخش

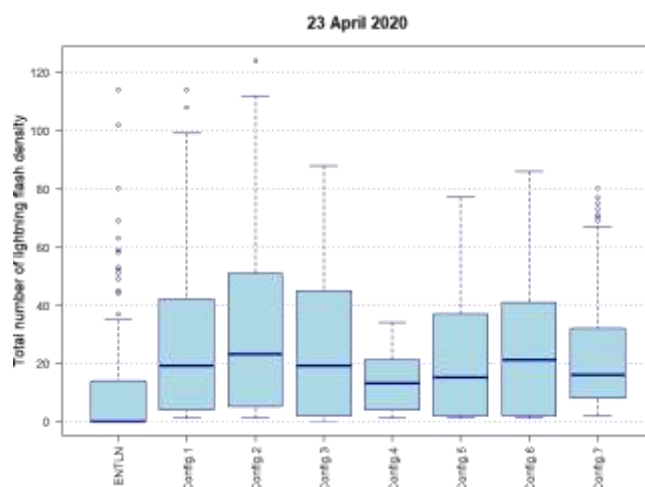


شکل ۹. نمودار جعبه‌ای برای مورد مطالعاتی ۹ آوریل ۲۰۲۰ در هفت پیکربندی مختلف در مقایسه با داده ENTLN

ENTLN نسبتاً محدودتر است، در حالی که در شبیه‌سازی‌ها، جعبه‌ها ارتفاع بیشتری داشته و نشان‌دهنده پراکندگی گسترده‌تری از داده‌ها هستند. این موضوع، به‌ویژه در پیکربندی‌های اول، دوم، سوم، ششم و هفتم مشهود است که در آن‌ها مدل نه تنها شدت پدیده را بیشتر از واقع برآورد کرده، بلکه این شدت را در سطح وسیع‌تری از منطقه توزیع کرده است. با وجود این الگوی عمومی، پیکربندی چهارم از سایر پیکربندی‌ها عملکرد نزدیک‌تری به داده‌های واقعی از خود نشان داده است. در این پیکربندی، هم مقدار میانه به مقدار مشاهده‌شده در ENTLN نزدیک‌تر است و هم بازه میان چارکی تا حدی با آن همپوشانی دارد.

۳-۸. مورد مطالعاتی هشتم: ۲۳ آوریل ۲۰۲۰

در مورد مطالعاتی هشتم که مربوط به روز ۲۳ آوریل ۲۰۲۰ است، چگالی آذرخش مشاهده‌شده توسط شبکه ENTLN با خروجی مدل WRF در هفت پیکربندی متفاوت در شکل ۱۰ مورد مقایسه قرار گرفته است. آنچه از این نمودار به‌وضوح قابل مشاهده است، بیش‌برآورد قابل توجه مدل در همه پیکربندی‌ها نسبت به واقعیت است، به‌طوری که هم میانه و هم بازه تغییرات میان چارکی (IQR) در تمامی پیکربندی‌ها بیشتر از مقادیر متناظر در داده‌های مشاهده‌ای قرار دارد. مقدار میانه در داده‌های ENTLN پایین‌تر از همه پیکربندی‌هاست و همچنین دامنه تغییرات داده‌ها در

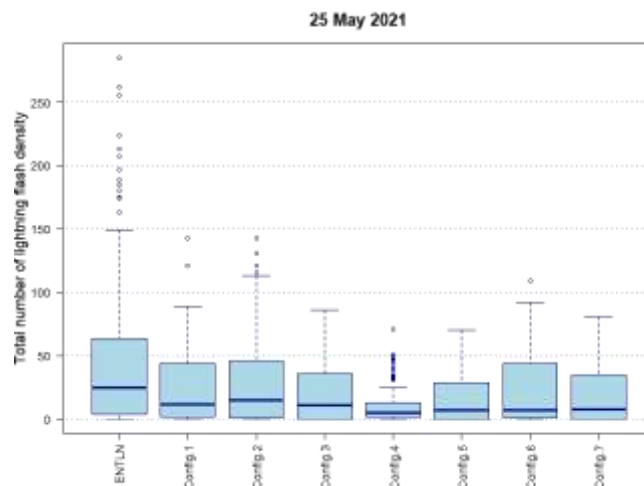


شکل ۱۰. نمودار جعبه‌ای برای مورد مطالعاتی ۲۳ آوریل ۲۰۲۰ در هفت پیکربندی مختلف در مقایسه با داده ENTLN

۳-۹. مورد مطالعاتی نهم: ۲۵ مه ۲۰۲۱

در نمودار جعبه‌ای مربوط به رخداد روز ۲۵ مه ۲۰۲۱ (شکل ۱۱)، توزیع چگالی آذرخش حاصل از داده‌های مشاهده‌ای شبکه ENTLN با خروجی مدل WRF در هفت پیکربندی مختلف مقایسه شده است. آنچه از این نمودار به‌وضوح مشهود است، تفاوت در تمرکز و شدت پیش‌بینی شده آذرخش میان داده‌های مدل و واقعیت مشاهده‌شده است. داده‌های ENTLN در این روز نشان‌دهنده رخدادی شدید از نظر چگالی آذرخش است. همچنین، مقدار میانه ENTLN به‌صورت محسوس بالاتر از میانه خروجی‌های مدل در تمامی پیکربندی‌ها قرار دارد. این ویژگی نشان می‌دهد که سامانه همرفتی در این روز، از نظر مشاهدات، دارای شدت متوسط بالاتر و ساختارهایی با هسته‌های

الکتریکی متمرکز بوده است. در مقابل، خروجی مدل در اکثر پیکربندی‌ها گرایش به تمرکز در مقادیر پایین‌تر دارد. هم موقعیت میانه پایین‌تر و هم تراکم داده‌ها در بازه‌های پایین‌تر نمودار نشان می‌دهد که مدل در بازنمایی شدت متوسط آذرخش دچار فروتخمین شده است. از بین هفت پیکربندی بررسی شده، پیکربندی دوم عملکرد نسبتاً بهتری در بازسازی شدت آذرخش دارد. در این پیکربندی، مقدار میانه به داده‌های ENTLN نزدیک‌تر است و گستره تغییرات نیز به‌نسبت متوازن و منطبق با الگوی مشاهده‌شده است. اگرچه همچنان اختلاف با واقعیت وجود دارد، اما در مقایسه با سایر پیکربندی‌ها، مدل در این حالت توانسته است هم شدت متوسط و هم حدودی از پراکندگی مکانی پدیده را بهتر بازتولید کند.



شکل ۱۱. نمودار جعبه‌ای برای مورد مطالعاتی نهم: ۲۵ مه ۲۰۲۱ در هفت پیکربندی مختلف در مقایسه با داده ENTLN

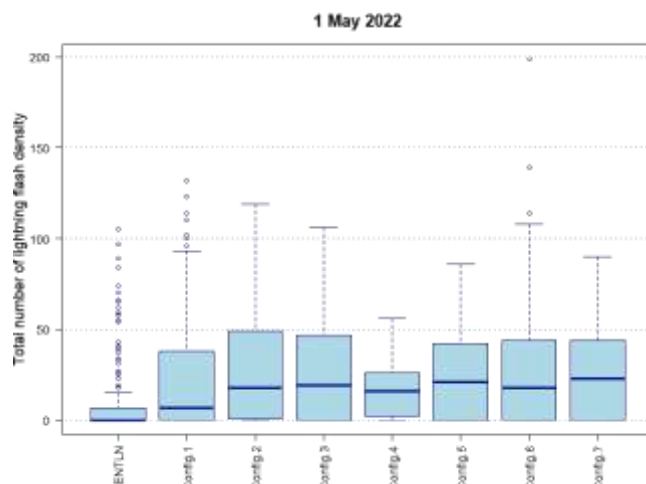
۳-۱۰. مورد مطالعاتی دهم: ۱ مه ۲۰۲۲

در شکل ۱۲ مربوط به روز ۱ مه ۲۰۲۲، توزیع چگالی آذرخش ثبت‌شده توسط شبکه ENTLN و مقادیر شبیه‌سازی‌شده توسط مدل WRF در هفت پیکربندی مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است. بر اساس تحلیل چشمی نمودار، مشخص است که در این روز مدل در اکثر پیکربندی‌ها دچار فراتخمین شده است. این مسئله هم از طریق موقعیت بالاتر میانه‌ها در پیکربندی‌های مختلف نسبت به داده‌های ENTLN و هم از طریق تراکم داده‌های شبیه‌سازی‌شده در مقادیر بالاتر قابل مشاهده است. در

داده‌های ENTLN، مقدار میانه نسبتاً پایین‌تر بوده و چگالی آذرخش در بیشتر نواحی در حد متوسط گزارش شده است، هرچند که نقاطی با آذرخش شدید نیز در قالب داده‌های پرت در بالای نمودار دیده می‌شود. در مقابل، شبیه‌سازی‌های مدل در اغلب پیکربندی‌ها مقادیر بالاتری از آذرخش را در سطح منطقه تولید کرده‌اند و نه تنها میانه افزایش یافته، بلکه دامنه تغییرات میان چارکی نیز به سمت بالا جابه‌جا شده است. این بدان معناست که مدل در تفسیر شدت پدیده هم در مقدار مرکزی و هم در پراکندگی آماری، به‌طور سیستماتیک دچار بزرگ‌نمایی شده است. در میان پیکربندی‌های بررسی‌شده،

بوده و گستره تغییرات نیز تا حدی قابل قبول تر از سایر پیکربندی‌ها است.

پیکربندی اول بیشترین شباهت به داده‌های ENTLN را نشان می‌دهد. در این پیکربندی، مقدار میانه به واقعیت نزدیک تر



شکل ۱۲. نمودار جعبه‌ای برای مورد مطالعاتی ۱ مه ۲۰۲۲ در هفت پیکربندی مختلف در مقایسه با داده ENTLN

(POD)، نرخ موفقیت (SR)، شاخص اریبی (Bias) و شاخص موفقیت بحرانی (CSI) محاسبه گردید. این شاخص‌ها به تفکیک برای هر روز و هر پیکربندی استخراج شده و مبنای مقایسه عملکرد مدل در شرایط مختلف قرار گرفتند. در مجموع، ۱۷۰ اجرای مستقل مدل مورد بررسی قرار گرفت.

یکی از یافته‌های مهم این مطالعه آن است که هیچ‌یک از پیکربندی‌ها در تمامی رخدادها عملکرد یکنواختی نداشتند. در برخی روزها، پیکربندی‌های خاصی توانستند به مقادیر واقعی نزدیک شوند، در حالی که در سایر روزها، همان پیکربندی‌ها دچار خطای بیشتر شدند. این رفتار غیرخطی نشان می‌دهد که پاسخ مدل به شرایط همرفتی به شدت وابسته به ویژگی‌های ترمودینامیکی، دینامیکی و ساختار سامانه جوی در هر رخداد است. از میان پیکربندی‌های بررسی شده، عملکرد قابل توجه پیکربندی دوم (مبتنی بر طرحواره خردفیزیکی Goddard) یکی از یافته‌های برجسته این تحقیق محسوب می‌شود. این پیکربندی در چندین رخداد شاخص، به ویژه در مقایسه با سایر پیکربندی‌ها، توانست به مقادیر POD و CSI بالاتر دست یابد و در عین حال مقدار Bias آن نیز کمتر و متعادل تر بود. چنین عملکردی نشان می‌دهد که این طرحواره تک‌گانه، برخلاف انتظار، در برخی شرایط

در مجموع، نتایج نشان می‌دهند که برخی از پیکربندی‌ها در برخی از روزهای مورد مطالعه عملکرد بهتری داشته‌اند و به مشاهدات نزدیک تر هستند. پیکربندی دوم در چندین مورد نزدیک‌ترین نتایج به داده‌های واقعی و دقت مناسبی را در مقایسه با سایر پیکربندی‌ها نشان داد. تحلیل نمودارهای جعبه‌ای نیز نشان می‌دهد که در ده روز شبیه‌سازی شده با مدل WRF و با استفاده از هفت پیکربندی مختلف، میانه‌ها و دامنه تغییرات چارکی تقریباً در چهار روز شبیه‌سازی فراتخمین، در چهار روز فروتخمین و در دو مورد تطابق نسبی با داده‌های شبکه ENTLN مشاهده شده است.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با هدف ارزیابی عملکرد مدل WRF در شبیه‌سازی پتانسیل رخداد آذرخش، شاخص LPI در قالب هفت پیکربندی مختلف خردفیزیکی برای ۱۰ رخداد واقعی آذرخش در منطقه تهران شبیه‌سازی شد. برای اعتبارسنجی مدل، از داده‌های مشاهداتی شبکه ENTLN استفاده گردید و از تحلیل‌های آماری مبتنی بر نمودارهای جعبه‌ای جهت بررسی مقادیر میانه، پراکندگی، و داده‌های پرت استفاده شد. همچنین، برای ارزیابی عددی دقت پیش‌بینی مدل در هر پیکربندی، چهار شاخص آماری شامل احتمال تشخیص

- COSMO NWP model. Atmospheric Research, 268, 106025.
2. (EN) Bui, V. Y., Chang, L. C., & Heckman, S. (2015, December). A performance study of earth networks total lightning network (ENTLN) and worldwide lightning location network (WWLLN). In 2015 international conference on computational science and computational intelligence (CSCI) (pp. 386-391). IEEE.
 3. (EN) Dudhia, J. (1989). Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. Journal of Atmospheric Sciences, 46(20), 3077-3107.
 4. (EN) Dwyer, J. R., & Uman, M. A. (2014). The physics of lightning. Physics Reports, 534(4), 147-241.
 5. (EN) Gharaylou, M., Farahani, M. M., Mahmoudian, A., & Hosseini, M. (2020). Prediction of lightning activity using WRF-ELEC model: Impact of initial and boundary conditions. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 210, 105438.
 6. (FA) Gharaylou, M., Sabetghadam, S. and Ghader, S. (2016). Feasibility study of lightning event prediction using WRF mesoscale model in Iran. Journal of the Earth and Space Physics, 42(1), 213-220.
 7. (EN) Hong, S. Y., & Lim, J. O. J. (2006). The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 42(2), 129-151.
 8. (EN) Hong, S. Y., Noh, Y., & Dudhia, J. (2006). A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. Monthly weather review, 134(9), 2318-2341.
 9. (FA) Hosseini, M., Gharaylou, M. and M. Farahani, M. (2018). Case study of the impact of some of dynamical and microphysical properties of cloud on the intra-cloud lightning using WRF model. Journal of the Earth and Space Physics, 44(2), 423-437.
 10. (EN) Jiménez, P. A., Dudhia, J., González-Rouco, J. F., Navarro, J., Montávez, J. P., & García-Bustamante, E. (2012). A revised scheme for the WRF surface layer

منطقه‌ای توان رقابت با طرحواره‌های دوگانه را دارد. این اختلاف بر اهمیت انجام آزمون‌های محلی برای انتخاب طرحواره مناسب تأکید دارد و نشان می‌دهد که انتخاب پیش‌فرض یک طرحواره به‌عنوان گزینه بهینه برای تمام مناطق می‌تواند گمراه‌کننده باشد. تحلیل شاخص SR نیز نشان داد که پیکربندی‌های اول و چهارم در کاهش هشدارهای نادرست عملکرد مناسبی داشته‌اند. در مقابل، بررسی نمودارهای جعبه‌ای برای ده روز شبیه‌سازی شده نشان داد که مدل WRF در چهار مورد دچار فراتخمین، در چهار مورد فروتخمین و در دو مورد تطابق نسبی با مشاهدات ENTLN بوده است. در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که مدل عددی WRF در شبیه‌سازی شاخص پتانسیل آذرخش (LPI) در منطقه تهران قابلیت مناسبی دارد، اما نتایج آن به‌طور محسوس به نوع طرحواره خردفیزیکی مورد استفاده وابسته است. یافته‌ها نشان می‌دهند که هیچ پیکربندی خاصی به‌تنهایی قادر به ارائه عملکرد بهینه در همه رخدادها نیست. این مسئله ضرورت پرهیز از اتکا به یک اجرای منفرد از مدل را برجسته می‌سازد. در این راستا، نتایج پژوهش حاضر به‌روشنی ضرورت حرکت به‌سوی رویکردهای پیش‌بینی همادی را نشان می‌دهد؛ رویکردی که در آن چندین اجرای مدل با پیکربندی‌های فیزیکی متفاوت به‌طور هم‌زمان استفاده می‌شوند تا بازه‌ای از سناریوهای ممکن ترسیم شود. در چنین چارچوبی، با تحلیل آماری خروجی‌های همادی، می‌توان به برآوردی احتمالاتی از پتانسیل آذرخش دست یافت که از نظر عملیاتی در هشداردهی و تصمیم‌سازی بسیار مؤثرتر است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود که مطالعات آینده بر توسعه سامانه‌های پیش‌بینی همادی شاخص LPI مبتنی بر مدل WRF متمرکز شوند تا از طریق بهره‌گیری از تنوع پیکربندی‌ها، عدم قطعیت‌های موجود کاهش یافته و دقت و قابلیت اعتماد پیش‌بینی‌های همیدی آذرخش ارتقا یابد.

منابع

1. (EN) Babuňková Uhlířová, I., Popová, J., & Sokol, Z. (2022). Lightning Potential Index and its spatial and temporal characteristics in

- India and three lightning hotspots: A climatological study. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 252, 106149.
- 20.(EN) Mondal, U., Panda, S. K., Terao, T., Kumar, M., & Sharma, D. (2024). Evaluating the performance and detection efficiency of Weather Research Forecasting model with lightning parameterization schemes for identifying lightning hotspots over Northeast region in India. *Climate Dynamics*, 1-24.
- 21.(EN) Morrison, H., Thompson, G., & Tatarskii, V. (2009). Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one-and two-moment schemes. *Monthly weather review*, 137(3), 991-1007.
- 22.(EN) Rabbani, K. M. G., Islam, M. J., Fierro, A. O., Mansell, E. R., & Paul, P. (2022). Lightning forecasting in Bangladesh based on the lightning potential index and the electric potential. *Atmospheric Research*, 267, 105973.
- 23.(EN) Rodger, C. J., Werner, S., Brundell, J. B., Lay, E. H., Thomson, N. R., Holzworth, R. H., & Dowden, R. L. (2006, December). Detection efficiency of the VLF World-Wide Lightning Location Network (WWLLN): initial case study. In *Annales Geophysicae* (Vol. 24, No. 12, pp. 3197-3214). Copernicus GmbH.
- 24.(EN) Rudlosky, S. D. (2015). Evaluating ENTLN performance relative to TRMM/LIS. *Journal of Operational Meteorology*, 3(2).
- 25.(EN) Saleh, N., Gharaylou, M., Farahani, M. M., & Alizadeh, O. (2023). Performance of lightning potential index, lightning threat index, and the product of CAPE and precipitation in the WRF model. *Earth and Space Science*, 10(9), e2023EA003104.
- 26.(EN) Tao, W. K., Wu, D., Lang, S., Chern, J. D., Peters-Lidard, C., Fridlind, A., & Matsui, T. (2016). High-resolution NU-WRF simulations of a deep convective-precipitation system during MC3E: Further improvements and comparisons between Goddard microphysics schemes and formulation. *Monthly weather review*, 140(3), 898-918.
- 11.(EN) Kain, J. S. (2004). The Kain-Fritsch convective parameterization: an update. *Journal of applied meteorology*, 43(1), 170-181.
- 12.(EN) Lagasio, M., Parodi, A., Procopio, R., Rachidi, F., & Fiori, E. (2017). Lightning Potential Index performances in multimicrophysical cloud-resolving simulations of a back-building mesoscale convective system: The Genoa 2014 event. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(8), 4238-4257.
- 13.(EN) Lapierre, J., Hoekzema, M., Stock, M., Merrill, C., & Thangaraj, S. C. (2019, June). Earth networks lightning network and dangerous thunderstorm alerts. In 2019 11th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL) (pp. 1-5). IEEE.
- 14.(EN) Lim, K. S. S., & Hong, S. Y. (2010). Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. *Monthly weather review*, 138(5), 1587-1612.
- 15.(EN) Lynn, B., & Yair, Y. (2010). Prediction of lightning flash density with the WRF model. *Advances in Geosciences*, 23, 11-16.
- 16.(EN) Mansell, E. R., Ziegler, C. L., & Bruning, E. C. (2010). Simulated electrification of a small thunderstorm with two-moment bulk microphysics. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 67(1), 171-194.
- 17.(EN) McCaul, E. W., Priftis, G., Case, J. L., Chronis, T., Gatlin, P. N., Goodman, S. J., & Kong, F. (2020). Sensitivities of the WRF lightning forecasting algorithm to parameterized microphysics and boundary layer schemes. *Weather and Forecasting*, 35(4), 1545-1560.
- 18.(EN) Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., & Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 16663-16682.
- 19.(EN) Mondal, U., Sreelekshmi, S., Panda, S. K., Kumar, A., Das, S., & Sharma, D. (2023). Diurnal variations in lightning over

- 30.(EN) Vani K, G., Mohan, G. M., Hazra, A., Pawar, S. D., Pokhrel, S., Chaudhari, H. S., ... & Rajeevan, M. (2022). Evaluation and usefulness of lightning forecasts made with lightning parameterization schemes coupled with the WRF model. *Weather and Forecasting*, 37(5), 709-726.
- 31.(EN) Yair, Y., Lynn, B., Price, C., Kotroni, V., Lagouvardos, K., Morin, E., ... & Llasat, M. D. C. (2010). Predicting the potential for lightning activity in Mediterranean storms based on the Weather Research and Forecasting (WRF) model dynamic and microphysical fields. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D4).
- 32.(EN) Zou, Q., Cui, X., Zhang, D. L., Zheng, D., & Chen, L. (2022). A statistical analysis of total lightning flashes and peak current from high-resolution ENTLN measurements in South China during 2017. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 61(7), 780-799.
- observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(3), 1278-1305.
- 27.(EN) Tewari, M., F. Chen, Wang, W., Dudhia, J., LeMone, M. A., Mitchell, K., Ek, M., Gayno, G., Wegiel, J., & Cuenca, R. H. (2004). Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction, pp. 11–15.
- 28.(EN) Thompson, G., Field, P. R., Rasmussen, R. M., & Hall, W. D. (2008). Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization. *Monthly weather review*, 136(12), 5095-5115.
- 29.(EN) Thompson, K. B., Bateman, M. G., & Carey, L. D. (2014). A comparison of two ground-based lightning detection networks against the satellite-based Lightning Imaging Sensor (LIS). *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31(10), 2191-2205.