







## Feasibility study of predicting severe storms with a down burst mechanism over Tehran city

Mirzaei Shiri, R.<sup>1</sup>  | Mortezaipoor, S.<sup>1</sup>  | Ghader, S.<sup>1</sup>  | Siahtiri, M.<sup>2</sup>  | Nasiri, A.<sup>3</sup>  | Salimi, E.<sup>4</sup> 

1. Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran.

2. Education teacher, Tehran, Iran.

3. Department of Health in Disasters and Emergencies, School of Health Management and Information Sciences, Baqiyatallah University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

4. Tehran Disaster Mitigation and Management Organization, Tehran, Iran.

**Corresponding Author E-mail:** [sghader@ut.ac.ir](mailto:sghader@ut.ac.ir)

(Received: 25 Sep 2023, Revised: 21 Oct 2023, Accepted: 21 May 2024, Published online: 6 July 2024)

### Summary

In the warm seasons of the year, some storms occur that are difficult and complicated to predict. These strong winds that are usually accompanied by dust are known as Haboob in some countries. In the last decade, some of the storms that have occurred over Tehran area, which have caused numerous damages, have included the mechanism of the Haboob event. In this study, a method is introduced for the feasibility of predicting the potential of storms with a down burst structure, that provides defined warning levels for this phenomenon. In this method, by using a post-processing on the output of a numerical weather prediction model, according to the dynamics and thermodynamic conditions of the weather, a level of warnings is issued for the potential of storm events with down burst mechanism. In the present work, an ensemble forecasting system developed for the WRF model, is used to provide short term predictions of such storms over Tehran area. Five different thermodynamic indices were calculated for the grid points and the process of calculating the potential of a storm event with a down burst structure was carried out by considering the temperature near the earth's surface, the thermodynamic conditions of the atmosphere, the vertical profile of relative humidity, and also checking the presence of dynamic conditions for air ascent. If the thermodynamic conditions and the instabilities of the atmosphere identified by the relevant indicators are conducive and the temperature of the earth's surface and the vertical profile of the relative humidity are appropriate, then the potential of a storm with a down burst structure can be considered probable. The humidity conditions were considered in such a way that the lower levels of the atmosphere have low relative humidity and the higher levels have more relative humidity so that the probability of evaporation of rain before it reaches the earth's surface is high. By combining these conditions for the output of the numerical model, in all of the time steps, three warning levels of the model output for the potential of a storm with a down burst mechanism were presented in the form of yellow, orange and red color zones. Four cases of strong winds and storm, as well as the famous storm that occurred on June the second, 2014, were investigated for the city of Tehran. Various forecasting maps of the output of model run include the mean sea level pressure, the thickness of the layer between the levels of 500 and 1000 hPa, wind speed, the relative vorticity of the level of 500 hPa, geopotential heights of some levels, thermodynamic indices, relative humidity in some pressure levels and the skew-T diagram was prepared at the grid points to analyze the dynamics, thermodynamic and synoptic conditions of the atmosphere. According to the information of the Meteorological Organization of Iran, winds with speeds between 80 to 120 kilometers per hour have been recorded in the meteorological stations of Tehran on these dates. In all these cases, the recorded wind speeds is significantly higher than the direct prediction of numerical weather forecasting models. In fact, it could not be recognized and predicted only by the output of these models. The maps for forecasting the warning level of the feasibility of a storm with a down burst mechanism in all cases investigated in this work during the calculations related to the probability of the occurrence are presented in this study. It seems that the presented method is able to predict the potential of the occurrence of strong winds and storms with down burst structure for the city and province of Tehran.

**Keywords:** Down burst, Haboob, Storm, Thermodynamic indices.

**Cite this article:** Mirzaei Shiri, R., Mortezaipoor, S., Ghader, S., Siahtiri, M., Nasiri, A., & Salimi, E. (2024). Feasibility study of predicting severe storms with a down burst mechanism over Tehran city. *Journal of the Earth and Space Physics*, 50(2), 499-519. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2024.365582.1007561>

**E-mail:** (1) [r\\_mirzaei@ut.ac.ir](mailto:r_mirzaei@ut.ac.ir) | [mortezaipoor.saman@yahoo.com](mailto:mortezaipoor.saman@yahoo.com) (2) [m\\_siahtiri@yahoo.com](mailto:m_siahtiri@yahoo.com) (3) [alinasiri58814@gmail.com](mailto:alinasiri58814@gmail.com) (4) [es.salimi81@gmail.com](mailto:es.salimi81@gmail.com)



## امکان‌سنجی پیش‌بینی توفان‌های شدید با سازوکار فروپیکشی (هبوب) در محدوده شهر تهران

رسول میرزائی شیرزی<sup>۱</sup> | سامان مرتضی پور<sup>۱</sup> | سردمد قادر<sup>۱</sup> | منظر سیاه‌تیری<sup>۲</sup> | علی نصیری<sup>۳</sup> | اسماعیل سلیمی<sup>۴</sup>

۱. گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. آموزش و پرورش، تهران، ایران.

۳. گروه سلامت در حوادث و بلایا و پدافند غیرعامل در نظام سلامت، دانشگاه علوم پزشکی بقیه الله، تهران، ایران.

۴. سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: [sgheader@ut.ac.ir](mailto:sgheader@ut.ac.ir)

(دریافت: ۱۴۰۲/۷/۳، بازنگری: ۱۴۰۲/۷/۲۹، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۳/۱، انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۴/۱۶)

### چکیده

تندبادهای شدید با سازوکار فروپیکشی که معمولاً با گردوخاک همراه هستند در برخی کشورها با نام هبوب شناخته می‌شوند. در دهه اخیر برخی از توفان‌های اتفاق افتاده در شهر تهران که خسارات متعددی به وجود آورده شامل سازوکار رخداد هبوب بوده‌اند. در این مطالعه روشی برای امکان‌سنجی پیش‌بینی پتانسیل رخداد توفان‌های با ساختار فروپیکشی معرفی شد که سطوح تعریف شده هشدار برای این پدیده را ارائه می‌دهد. در کار حاضر مدل WRF به صورت یک سامانه همدادی در چهار حوزه تودرتو با تفکیک‌های افقی مختلف به کار گرفته شده است. پنج شاخص ترمودینامیکی مختلف برای نقاط شبکه محاسبه شد و فرایند محاسبه پتانسیل رخداد تندباد با ساختار فروپیکشی با در نظر گرفتن شرایط دمایی در سطح زمین، شرایط ترمودینامیکی جو، نمایه قائم رطوبت نسبی و همچنین بررسی وجود شرایط دینامیکی برای صعود هوا انجام گرفت. با ترکیب این شرایط برای برونداد مدل عددی در همه گام‌های زمانی، سه سطح هشدار برای پتانسیل رخداد توفان با سازوکار فروپیکشی به صورت پهنه‌بندی رنگ‌های زرد، نارنجی و قرمز ارائه شد. چهار مورد رخداد تندباد و توفان از جمله توفان معروف رخ داده در دوم ژوئن ۲۰۱۴ (دوازدهم خردادماه ۱۳۹۳) برای شهر تهران مطالعه شد. مطابق اطلاعات سازمان هواشناسی در این تاریخ‌ها در ایستگاه‌های هواشناسی شهر تهران بادهایی با حداکثر سرعت بین ۸۰ تا ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت ثبت شده است. در تمامی این موارد مقدار سرعت باد ثبت شده به اندازه قابل ملاحظه‌ای بیشتر از پیش‌بینی مستقیم مدل‌های پیش‌بینی عددی هواشناسی هستند و در واقع توسط خروجی این مدل‌ها قابل تشخیص و پیش‌بینی نبوده است. نقشه‌های پهنه‌بندی پیش‌بینی سطح هشدار احتمال رخداد توفان با سازوکار فروپیکشی در تمامی موارد بررسی شده طی محاسبات مربوط به احتمال رخداد ارائه شده در این مطالعه، توانسته است احتمال آغاز همرفت و شروع رخداد فروپیکش را در برخی از نواحی استان تهران یا در مناطقی در استان‌های همجوار پیش‌بینی کند که با توجه به احتمال انتقال توفان به تهران پتانسیل رخداد وزش تندبادهای با سرعت زیاد را برای محدوده شهر و استان تهران نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: توفان، سازوکار فروپیکشی، شاخص‌های ترمودینامیکی، هبوب.

### ۱. مقدمه

شوند، می‌توانند آسیب‌هایی در پی داشته و سبب خسارات زیادی شوند. مقادیر آستانه برای این پدیده‌ها برای هر منطقه با توجه به شرایط آن متفاوت است. در حال حاضر، استاندارد خاصی برای آستانه هر کمیت هواشناسی در مناطق مختلف کشور به طور رسمی توسط سازمان هواشناسی کشور تعیین نشده است و این آستانه‌ها بر اساس تجربیات کارشناسان پیش‌بینی برای هر منطقه به دست

جولوگیری از رخداد برخی پدیده‌های طبیعی کاملاً غیرممکن است اما اگر امکان پیش‌بینی این پدیده‌ها وجود داشته باشد، می‌توان با اتخاذ تدابیر مناسب از برخی خسارات احتمالی آن پیشگیری کرد. تغییرات دما، بارش باران و برف و وزیدن باد به طور معمول رویدادهایی طبیعی و مطلوب برای بیشتر مردم محسوب می‌شوند، اما همین تغییرات اگر از یک مقدار معینی بیشتر یا کمتر

استناد: میرزائی شیرزی، رسول؛ مرتضی پور، سامان؛ قادر، سردمد؛ سیاه‌تیری، منظر؛ نصیری، علی و سلیمی، اسماعیل (۱۴۰۳). امکان‌سنجی پیش‌بینی توفان‌های شدید با سازوکار فروپیکشی (هبوب) در محدوده شهر تهران. *مجله فیزیک زمین و فضا*, ۵۰(۲), ۴۹۹-۵۱۹. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2024.365582.1007561>

رایانامه: (۱) [r\\_mirzaei@ut.ac.ir](mailto:r_mirzaei@ut.ac.ir) | (۲) [mortezapoor.saman@yahoo.com](mailto:mortezapoor.saman@yahoo.com) | (۳) [m\\_siahtiri@yahoo.com](mailto:m_siahtiri@yahoo.com) | (۴) [alinasiri58814@gmail.com](mailto:alinasiri58814@gmail.com) | [es.salimi81@gmail.com](mailto:es.salimi81@gmail.com)



(Downburst) گفته می‌شود (فارکوهارسون، ۱۹۳۷؛ لاوسون، ۱۹۷۱؛ ممبری، ۱۹۸۵). محل وقوع هبوب در حوالی عرض ۳۰ درجه شمالی و جنوبی و روی زمین‌های خاکی فاقد پوشش گیاهی مناسب است (چن و فرای‌ریر، ۲۰۰۲). گستره افقی هبوب به چند کیلومتر و در ازای آن به چند صد کیلومتر می‌رسد. با عبور این پدیده تغییراتی در فراسنج‌های هواشناسی در محل عبور آن رخ می‌دهد. یکی از این تغییرات کاهش دما است که تا ۱۵ درجه سانتیگراد هم می‌رسد (ویتوسک، ۱۹۹۷). با توجه به همراهی توده گردو خاک در پدیده هبوب، معمولاً رادارها امکان شناسایی و رهگیری آن را خواهند داشت (ترایان و همکاران، ۱۳۹۶). مدت زمان توسعه هبوب از زمان شکل‌گیری شرایط دینامیکی و ترمودینامیکی آن تا نابودی کامل آن حدود ۶ ساعت است (چن و فرای‌ریر، ۲۰۰۲). همچنین، مدت زمان اوج فعالیت آن حدود نیم تا یک ساعت است (ایدسو و همکاران، ۱۹۷۲). سرعت وزش باد در این پدیده می‌تواند تا ۳۰ و حتی ۴۰ متر بر ثانیه نیز برسد (سیمپسون، ۱۹۹۷).

در دهه اخیر توفان‌های متعددی با منشأهای مختلف در تهران رخ داده‌اند که موجب خسارات در سطوح مختلف شده‌اند. برخی از این توفان‌های رخ داده مشمول شرایط سازوکار رخداد هبوب هستند.

در این مطالعه برای امکان‌سنجی پیش‌بینی توفان‌ها با سازوکار شرایط هبوب در شهر تهران، از مدل میان‌مقیاس (Mesoscale) پیش‌بینی عددی وضع هوا استفاده شده است. برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی عملیاتی میدان‌های هواشناسی از جمله باد، دما و غیره در محدوده محیط‌های شهری همچون شهر تهران نیاز است تا از یک مدل میان‌مقیاس پیش‌بینی عددی وضع هوا استفاده شود. در واقع برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی کمیت‌های هواشناسی با تفکیک مکانی بالا در حد چند کیلومتر نیاز به یک مدل هواشناسی میان‌مقیاس است که به کمک آن معادلات تراکم‌پذیر و ناآب‌ایستای جو با در نظر گرفتن جملات کامل نیروی کوریولیس به صورت سه‌بعدی حل شوند. هر مدل هواشناسی میان‌مقیاس دارای دو بخش اساسی است.

آمده‌اند و در شرایط مختلف ممکن است متفاوت باشند. همچنین در سطح جهانی نیز استاندارد ثابت و تعریف‌شده‌ای برای این آستانه‌ها وجود ندارد و در هر کشور با توجه به شرایط اقلیمی هر منطقه سازمان‌ها و مراکز تصمیم‌گیر در زمینه هواشناسی ممکن است استاندارد خاصی برای صدور هشدارهای مربوطه تعریف کرده باشند که لزوماً این آستانه‌های صدور هشدار در دو شهر مختلف باهم یکسان نیست.

در سطح جهانی مطالعات بسیاری در زمینه تعریف استانداردهای طبقه‌بندی شده برای آستانه‌های هشدار پدیده‌های هواشناسی انجام شده است (مثلاً یوگا و واژدا، ۲۰۱۲). این طبقه‌بندی‌ها یا به صورت کلی و جهان‌شمول و غیرالزام‌آور بوده و یا برای هر منطقه بر اساس اقلیم، کوهساری و حتی پوشش گیاهی آن منطقه و عوامل مؤثر دیگر طراحی شده‌اند.

پدیده جوی باد می‌تواند به صورت یک نسیم ملایم باشد و یا به صورت یک توفان شدید ظاهر شود و خسارات مختلفی به بار آورد، همچنین ممکن است طی فرایند شکل‌گیری توفان و گردباد، جنگل‌ها آتش بگیرند و زمین‌لغزش رخ دهد. پیش‌بینی برخی از توفان‌ها در فصول گرم سال بسیار سخت بوده و ساختار پیچیده‌ای دارند. یکی از انواع این بادهای شدید که معمولاً با گردو خاک همراه هستند در برخی کشورها با نام هبوب (Haboob) شناخته می‌شود. ساختار این پدیده هواشناسی وابسته به شکل‌گیری شرایط دینامیکی مناسب برای صعود هوا در جو گرم و خشک است. در عین حال این پدیده از پدیده‌های خردمقیاس هواشناسی محسوب می‌شود (کوک و همکاران، ۲۰۱۲). بخش قابل‌توجهی از بارش ناشی از صعود هوا در اثر گرمای هوا تبخیر می‌شود و گرمای لازم برای تبخیر را از هوای اطراف خود می‌گیرد. این هوای سردتر ایجاد شده با داشتن چگالی بیشتر نسبت به هوای گرم محیط اطراف به سرعت سقوط می‌کند و سبب ایجاد جبهه‌های ثانویه در اثر برخورد با هوای گرمی می‌شود که در جریان همگرایی درون سلول همرفتی قرار دارد. به این سقوط، سقوط انفجاری یا فروپکشی

تشخیص مخاطره و شرایط هشدار هستند و تنها در بازه زمانی کوتاه قادر به پیش‌بینی هستند. با روش معرفی شده در این مطالعه، چون از خروجی مدل پیش‌بینی هواشناسی استفاده می‌شود، امکان تحلیل شرایط ترمودینامیکی و دینامیکی جو در سطوح مختلف در بازه زمانی چند روزه و تشخیص مخاطره توفان هبوب وجود دارد و این باعث افزایش توانایی زمانی در صدور هشدار خواهد شد. استفاده از این روش در کنار استفاده از روش‌های کنونی می‌تواند تأثیر به‌سزایی در افزایش کیفیت پیش‌بینی‌های هواشناسی برای پدیده مخربی مانند هبوب باشد.

استفاده از شاخص‌های ترمودینامیکی و سایر محصولات محاسباتی برای تشخیص برخی از ناپایداری‌های موجود در جو بسیار مؤثر است (شاتا، ۲۰۰۸).

در تهران به‌ویژه در ساعات بعدازظهر و شب غالباً در فصل‌های گرم سال گاهی احتمال رخداد توفان‌های شدید ناشی از فروپیکش هوا (Downburst) یا حتی در صورت وجود رطوبت کافی در جو، امکان رخداد بارش‌های رگباری و سیل‌آسای باران یا تگرگ همراه با رعدوبرق شدید وجود دارد. این موضوع در بسیاری مواقع با توجه به پیچیدگی‌های ذاتی آن قابلیت پیش‌بینی توسط عمده مدل‌های عددی پیش‌بینی هوا را ندارد. در کار حاضر، سامانه‌ای طراحی و معرفی شده است که پیش‌بینی پتانسیل رخداد تندباد و توفان با سازوکار هبوب را برای تمام ساعات خروجی اجرای مدل ارائه می‌دهد.

## ۲. روش انجام کار

شهر تهران و بخش‌های زیادی از استان تهران در جنوب رشته‌کوه البرز واقع شده است. مجاورت شهر تهران از شمال با دامنه‌های جنوبی البرز و شرایط کوهپایه‌ای آن و نزدیکی آن از جنوب به مناطق خشک و کویری مرکز کشور اقلیم خاصی را برای این منطقه ایجاد کرده است. در کار حاضر برای پیش‌بینی پتانسیل رخداد تندباد و توفان با ساختار فروپیکشی در منطقه تهران از برون‌داد مدل منطقه‌ای پیش‌بینی عددی وضع هوا با عنوان اختصاری

بخش اول هسته دینامیکی مدل است که به حل عددی معادلات تراکم‌پذیر و ناآب‌ایستای جو می‌پردازد. بخش دوم و بسیار اساسی به پارامترسازی فرایندهای فیزیکی اختصاص دارد. در پارامترسازی فیزیکی، فرایندهای فیزیکی کوچک‌مقیاس و یا بسیار پیچیده مانند تابش، فرایندهای لایه مرزی و همرفت، به کمک یک رابطه تجربی و منطبق با قوانین فیزیکی تا حدی ساده‌شده، بیان می‌شوند (خیمز و دادها، ۲۰۱۳؛ چنگ و همکاران، ۲۰۱۳؛ هو و همکاران، ۲۰۱۰؛ سالامانکا و همکاران، ۲۰۱۱؛ دوویویر و کاسانو، ۲۰۱۳).

در سطح دنیا غالب کشورها از مدل‌های معتبر توسعه‌یافته در مراکز معتبر بین‌المللی به‌صورت بومی برای منطقه مورد نظرشان استفاده می‌کنند. به‌همین دلیل است که اغلب مدل‌های هواشناسی میان‌مقیاس معتبر از جمله WRF، MM5، ARPS و RAMS به‌صورت متن باز بوده و در واقع این امکان فراهم شده که مدل‌های مذکور توسط تمامی کشورهای علاقه‌مند به‌صورت پژوهشی و عملیاتی مورد استفاده قرار گیرند. از میان چهار مدل مورد اشاره، مدل WRF (Weather Research and Forecasting) برای رسیدن به اهداف کار حاضر توانایی مناسبی را داشته و از آن استفاده شده است. مدل WRF در بسیاری از مراکز معتبر داخلی و خارجی به‌صورت عملیاتی برای پیش‌بینی وضع هوا برای مقیاس‌های منطقه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد (خیمز و دادها، ۲۰۱۳؛ بائو و همکاران، ۲۰۰۸؛ روئیز و همکاران، ۲۰۱۰؛ سالامانکا و همکاران، ۲۰۱۱؛ دوویویر و کاسانو، ۲۰۱۳؛ ژنگ و ژنگ، ۲۰۱۳؛ اشرفی و همکاران، ۱۳۸۸؛ سلطان‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱؛ قادر و همکاران، ۲۰۱۶؛ قادر و همکاران، ۱۳۹۹).

کنون‌بینی (Nowcasting) معمولاً برای مخاطرات در محدوده زمانی ۲ تا ۶ ساعت تعریف می‌شود و با استفاده از داده‌های ابزارهایی نظیر رادار، ماهواره و غیره، برای تشخیص و پیش‌بینی وضعیت‌های مخرب هوایی، بارش‌ها و توفان‌های شدید جوی و تعیین مسیر و پیش‌بینی مسیر حرکت توفان‌ها و بارش‌ها انجام می‌شود (WMO، ۲۰۱۹؛ براونینگ، ۱۹۸۱). این روش‌ها شامل محدودیت زمانی در

در کار حاضر عدد ۳۰ به‌عنوان آستانه برای سطح هشدار زرد برای این شاخص در نظر گرفته شده و هر چه عدد بزرگ‌تر باشد احتمال وقوع توفان تندی در منطقه مورد نظر افزایش می‌یابد. یادآوری می‌شود، آستانه‌های مورد استفاده در کار حاضر فقط در این مطالعه اعمال شده و در مراجع دیگر ممکن است برای مناطق دیگر و یا حتی برای تهران عدد متفاوتی در نظر گرفته شده باشد. لازم به یادآوری است که آستانه‌های مورد استفاده برای این شاخص و سایر شاخص‌های ترمودینامیکی در مطالعه حاضر برای هر یک از سطوح هشدار به این صورت به‌دست آمده‌اند که از سال ۱۳۹۳ تا پایان چهارماهه اول ۱۴۰۲ تعداد سی مورد از رخداد بادهای با سرعت بیش از ۲۰ متربرثانیه که توسط یکی از ایستگاه‌های فرودگاه‌های مهرآباد و امام خمینی که در ماه‌های فروردین تا آبان گزارش شده است انتخاب شده‌اند و شاخص‌های ترمودینامیکی در تمام نقاط شبکه در حوزه سوم اجرای مدل غیر از مناطق شمال رشته‌کوه البرز و مناطقی که ارتفاع سطح آنها بالاتر از تراز ۸۵۰ هکتوپاسکالی قرار گرفته‌اند محاسبه شده است. دست‌کم در ۹۰ درصد این موارد، حداقل تعداد بیش از ۲۰ نقطه از نقاط شبکه در حوزه سوم اجرای مدل، از مقدار آستانه موردنظر برای سطح هشدار زرد باید بیشتر شده باشند. همچنین برای تعیین آستانه هشدار برای سطح نارنجی از بین ۱۵ مورد از مواردی که سرعت باد در این مدت در یکی از ایستگاه‌های فرودگاه‌های مهرآباد و امام خمینی به بیش از ۲۵ متربرثانیه رسیده است، دست‌کم در ۱۳ مورد از موارد حداقل تعداد ۱۰ نقطه از نقاط شبکه در حوزه سوم اجرای مدل باید به مقدار آستانه هشدار رسیده باشند. در مورد آستانه هشدار برای رنگ قرمز نیز تعداد هشت مورد از مواردی که سرعت وزش باد حداقل در یکی از دو ایستگاه ذکرشده به بیش از ۳۰ متربرثانیه رسیده بود، انتخاب شدند و آستانه طوری انتخاب شد که دست‌کم در هفت مورد از هشت مورد حداقل سه نقطه از نقاط شبکه در حوزه سوم اجرای مدل به مقدار آستانه رسیده باشند.

WRF استفاده شده است. پیکربندی مدل WRF به شکل سامانه همادی (ensemble) در چهار حوزه تودرتو به‌ترتیب با تفکیک‌های افقی ۲۷، ۹، ۳ و یک کیلومتر به‌کار گرفته شده است. شکل ۱ این چهار حوزه را نشان می‌دهد. همچنین روش ایجاد پریشیدگی در شرایط اولیه مدل برای ایجاد سامانه همادی به‌صورت ترکیبی از روش مونت کارلو و استفاده از پارامترسازی‌های فیزیکی متفاوت می‌باشد. در این روش با توجه به وجود عدم قطعیت در مدل‌سازی و تغییرات قابل توجه نتایج با کوچک‌ترین تغییر جزئی در شرایط اولیه بر اساس نظریه آشوب، و با توجه به غیرخطی بودن شدید معادلات حاکم بر جو، مدل با شرایط اولیه تغییر یافته توسط ایجاد پریشیدگی‌های متقارن (ترکیبی از پریشیدگی در شرایط اولیه و استفاده از پارامترسازی‌های فیزیکی متفاوت) چندین بار اجرا می‌شود و هر اجرا به‌عنوان عضوی از سامانه همادی در نظر گرفته می‌شود (جزئیات بیشتر مربوط به سامانه همادی توسط قادر و همکاران، ۲۰۱۶؛ قادر و همکاران، ۱۳۹۹، قادر و همکاران، ۱۳۹۴ ارائه شده است).

برای تحلیل شرایط ترمودینامیکی و شناسایی ناپایداری‌های موجود در جو از جمله از شاخص‌های ترمودینامیکی تعریف شده استفاده می‌شود (جورج، ۱۹۶۰؛ مینز، ۱۹۵۲؛ میلر، ۱۹۷۲؛ شوالتر، ۱۹۵۳). تعدادی از این شاخص‌ها شامل شاخص  $K$  (K index)، شاخص شوالتر (Showalter index)، شاخص  $TT$  (Total totals index)، شاخص  $S$  (S index) و شاخص هشدار هوای مخرب با علامت اختصاری  $SWEAT$  (Severe weather threat) هستند. شاخص  $K$  ترکیبی از رطوبت در دو تراز ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکالی و تغییرات دما در ترازهای ۸۵۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکالی است. این شاخص برای تعیین احتمال رخداد توفان تندی در فصول گرم سال تعریف شده است و روش محاسبه آن در رابطه (۱) آورده شده است. نکته مهم این است که برای هر شاخص ترمودینامیکی استاندارد کلی و جهان‌شمولی برای انتخاب آستانه هشدار وجود ندارد و برای هر منطقه با اقلیم خاص خود می‌توان این آستانه‌ها را تعیین کرد (مثلاً شاتا، ۲۰۰۸).



شکل ۱. حوزه‌های اجرای مدل WRF در مطالعه حاضر به ترتیب با تفکیک‌های افقی ۲۷، ۹، ۳ و یک کیلومتر.

هکتوپاسکال را در نظر بگیرد نحوه محاسبه این شاخص در رابطه (۳) آمده است. عدد ۵۰ درجه سلسیوس به عنوان آستانه هشدار زرد برای این شاخص در کار حاضر در نظر گرفته شده است. هر چه عدد این شاخص بزرگتر باشد احتمال وقوع توفان تندی در منطقه مورد نظر افزایش پیدا می‌کند. انتخاب آستانه‌ها برای این شاخص نیز مشابه با دو شاخص ذکر شده بوده است.

$$TTI = T_{850} + T_{d850} - 2T_{500} \quad (3)$$

شاخص  $K$  نیز شاخص شناخته شده‌ای برای بیان احتمال رخداد توفان‌های تندی است و از رابطه (۴) به دست می‌آید. در رابطه (۴) مقدار  $A$  به تفاضل دمای ترازهای ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکالی بستگی دارد. مقدار  $A$  برای اختلاف بیش از ۲۵ درجه سلسیوس برابر صفر، برای اختلاف کمتر از ۲۲ درجه سلسیوس برابر ۶ و برای اختلاف‌های بین این دو برابر ۲ در نظر گرفته می‌شود. در کار حاضر عدد ۴۰ به عنوان آستانه هشدار زرد برای این شاخص در نظر گرفته شده است و هر چه عدد بزرگتر باشد احتمال وقوع توفان تندی در منطقه مورد نظر را افزایش می‌دهد. نحوه انتخاب آستانه‌های این شاخص نیز

$$K = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T_{700} - T_{d700}) \quad (1)$$

در رابطه‌های (۱) تا (۵)،  $T$  نماد دما با واحد درجه سلسیوس و زیرنویس  $d$  نشان‌دهنده دمای نقطه شبنم است. عددهای زیرنویس بیان‌کننده تراز فشاری برحسب هکتوپاسکال هستند. شاخص شوالتر معرف میزان پایداری ترمودینامیکی جو است. این شاخص از تفاضل دمای محیط در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی با دمای بسته هوای صعود یافته از تراز ۸۵۰ هکتوپاسکالی در شرایط بی‌دررو به تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی به دست می‌آید (این شاخص با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود). هر چه این شاخص عدد کمتری باشد احتمال ناپایداری بیشتر خواهد بود و هر چه مقدار آن منفی‌تر باشد، احتمال وقوع توفان‌های تندی افزایش می‌یابد. در کار حاضر آستانه مورد نظر برای سطح هشدار زرد برای این شاخص ۲ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. انتخاب این آستانه نیز مشابه با شاخص  $K$  بوده است.

$$SSI = T_{500} - T_{parcel} \quad (2)$$

شاخص  $TT$  نیز می‌تواند قدرت توفان تندی را ارزیابی کند، اما نمی‌تواند ناپایداری پایین‌تر از تراز ۸۵۰

مشابه آستانه‌های شاخص‌های قبل بوده است.

$$SI = TTI - (T_{700} - T_{d700}) - A \quad (۴)$$

شاخص *SWEAT* نیز برای تعیین میزان احتمال وقوع توفان تندری به کار می‌رود. مقدار این شاخص از رابطه (۵) محاسبه می‌شود. در رابطه (۵)،  $f$  اندازه سرعت باد و  $d$  سمت باد در تراز مشخص شده می‌باشد. در این رابطه در صورت منفی شدن هر یک از جملات سمت راست معادله، آن جمله صفر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین طبق این تعریف نباید تحت هیچ شرایطی مقدار این شاخص منفی شود. عدد ۳۰۰ در کار حاضر به‌عنوان آستانه هشدار زرد برای این شاخص در نظر گرفته شده است و هر چه عدد بزرگ‌تر باشد احتمال وقوع توفان تندری در منطقه مورد نظر افزایش پیدا می‌کند. آستانه‌های مربوط به این شاخص نیز مشابه سایر شاخص‌ها تعیین شده‌اند.

$$SWEAT = 12T_{d850} + 20(TTI - 49) + 2f_{850} + f_{500} + 125[\sin(d_{500} - d_{850}) + 0.2] \quad (۵)$$

شاخص‌های ترمودینامیکی به نوعی سنج‌های ناپایداری ترمودینامیکی در جو هستند و اگر این شاخص‌ها شرایط ناپایداری ترمودینامیکی را نشان دهند و با شرایط ناوه برای ارتفاع ژئوپتانسیلی در ترازهای میانی و بالای جو همراه باشند (فرافت تاوایی مثبت در منطقه وجود داشته باشد)، احتمال تشکیل سلول‌های همرفتی و تشکیل ابرهای کومه‌ای بار بار زیاد خواهد بود. با تعریف آستانه برای این شاخص‌ها و ترکیب این آستانه‌ها برای پنج شاخص معرفی شده، طبقه‌بندی شرایط ناپایداری ترمودینامیکی جو لحاظ شده است. برای دمای هوا نیز شرط حداقل دمای ۱۵ درجه سلسیوس برای تراز دو متری سطح زمین در منطقه در نظر گرفته شد که همخوان با سازوکار هوب باشد. طبق پرونداد میانگین همادی مدل بررسی تندبادهای رخ داده در بازه زمانی فروردین تا پایان آبان که تعداد سی مورد از آنها در مطالعه حاضر بررسی شده است، نشان می‌دهد در حوزه سوم اجرای مدل این آستانه دما در همه این موارد برای بیش از ۹۰ درصد نقاط شبکه در جنوب رشته‌کوه البرز و دارای ارتفاع پایین‌تر از تراز ۸۵۰ هکتوپاسکالی در زمان آغازش همرفت وجود

داشته است. شرایط میزان رطوبت در ترازهای مختلف فشاری برای فرایند فروپکشی حائز اهمیت است و باید طوری باشد که احتمال تبخیر باران قبل از رسیدن آن به سطح زمین، قابل توجه باشد. نکته مهم در نمایه قائم رطوبت این است که مقدار رطوبت نسبی در ترازهای پایین کم و در ترازهای بالا بیشتر باشد و در ترازهای میانی و بالای جو مقدار رطوبت نسبی نزدیک به ۱۰۰ درصد باشد. از خروجی مدل پیش‌بینی عددی اجرا شده، رطوبت ترازهای مختلف فشاری استخراج شده و در شرط تشخیص پیش‌یابی پتانسیل رخداد توفان اعمال شد. با ترکیب شرایط آستانه برای شاخص‌های ترمودینامیکی و لحاظ شرایط دما و رطوبت با در نظر گرفتن شرایط دینامیکی جو برای امکان صعود هوا، برای گام‌های زمانی خروجی مدل پیش‌بینی هواشناسی سه سطح هشدار برای پتانسیل رخداد توفان با پهنه‌بندی رنگ‌های زرد، نارنجی و قرمز ارائه شد. برخی از سازمان‌های هواشناسی در سراسر دنیا از جمله در ایران (در حال حاضر) برای صدور هشدار از سه مفهوم آگاهی با هشدار رنگ زرد، آمادگی با هشدار رنگ نارنجی و اقدام با هشدار رنگ قرمز استفاده می‌کنند. در این طبقه‌بندی هشدارهای زرد (آگاه باشید) برای طیف وسیعی از شرایط وضع هوا هنگامی صادر می‌شوند که احتمالاً اثرات منفی کمی ایجاد شود. در هشدارهای نارنجی (آماده باشید) احتمال تأثیرات منفی ناشی از هوای مخرب نسبت به حالت هشدار زرد بیشتر است و می‌تواند برنامه زندگی برخی از مردم را مختل کند. در هشدارهای قرمز (اقدام کنید) هوای خطرناک پیش‌بینی می‌شود و برای در امان نگه داشتن خود و دیگران از اثرات هوای بد باید اقدام شود. رنگ هشدارها در کار حاضر بیانگر احتمال و شدت رخداد هستند.

با توجه به این که اغلب حرکت امواج جوی از غرب به سمت شرق بوده و محاسبه مسیر حرکت تندباد از محل ایجاد آن به شدت پیچیده است، احتمال رخداد تندباد در شهر تهران در ناحیه ای بزرگ‌تر از استان تهران در نظر گرفته شده است. به این ترتیب احتمال آغازش همرفت در مناطق خارج از شهر و استان تهران و در ادامه ایجاد

شرایط رخداد هبوب با توجه به احتمال انتقال آن به تهران در پیش‌بینی لحاظ شده است. این سامانه قابلیت اجرای عملیاتی به صورت سامانه هشدار را نیز دارد.

### ۳. بررسی چند رخداد هبوب در تهران

موردهای مطالعاتی شامل تاریخ‌های رخداد ۲ ژوئن ۲۰۱۴ (۱۲ خرداد ۱۳۹۳)، ۲۲ مارس ۲۰۲۲ (۲ فروردین ۱۴۰۱)، ۲۳ اکتبر ۲۰۲۲ (۱ آبان ۱۴۰۱) و دو روز متوالی ۷ و ۸ آگوست ۲۰۲۳ (۱۶ و ۱۷ مرداد ۱۴۰۲) برای شهر تهران هستند. در این تاریخ‌ها رخداد‌های تندباد با ساختار فروپیکشی در شهر تهران اتفاق افتاده است که در ادامه به بررسی و تحلیل آنها پرداخته شده است. یادآوری می‌شود که انتخاب این موارد به این دلیل بوده است که خصوصیات ظاهری این تندبادها بر اساس گزارش‌های سازمان محترم مدیریت بحران شهرداری تهران و همچنین داده‌های بازتحلیل Era5 محصول مرکز اروپایی ECMWF مانند ایجاد گردوخاک، شکسته شدن برخی از درختان و سقوط برخی از تابلوهای تبلیغاتی و شرایط دینامیکی و ترمودینامیکی مانند دما، ارتفاع ژئوپتانسیلی در ترازهای میانی و بالای جو و نمایه قائم رطوبت مطابق با تعاریف ارائه شده برای رخداد هبوب بوده است.

۳-۱. مورد اول، ۲۲ مارس ۲۰۲۲ (دوم فروردین ۱۴۰۱) در روز دوم فروردین سال ۱۴۰۱ شمسی مصادف با ۲۲ ماه مارس سال ۲۰۲۲ میلادی توفانی با سرعت‌های تا حدود ۹۰ کیلومتر بر ساعت در تهران در حوالی ظهر و بعد از ظهر رخ داد (جدول ۱). بررسی‌های همدیدی، عبور سامانه‌ای بارشی از تهران را نشان می‌دهد. میزان بارش در ایستگاه مهرآباد طی این روز ۵ میلی‌متر گزارش شده است.

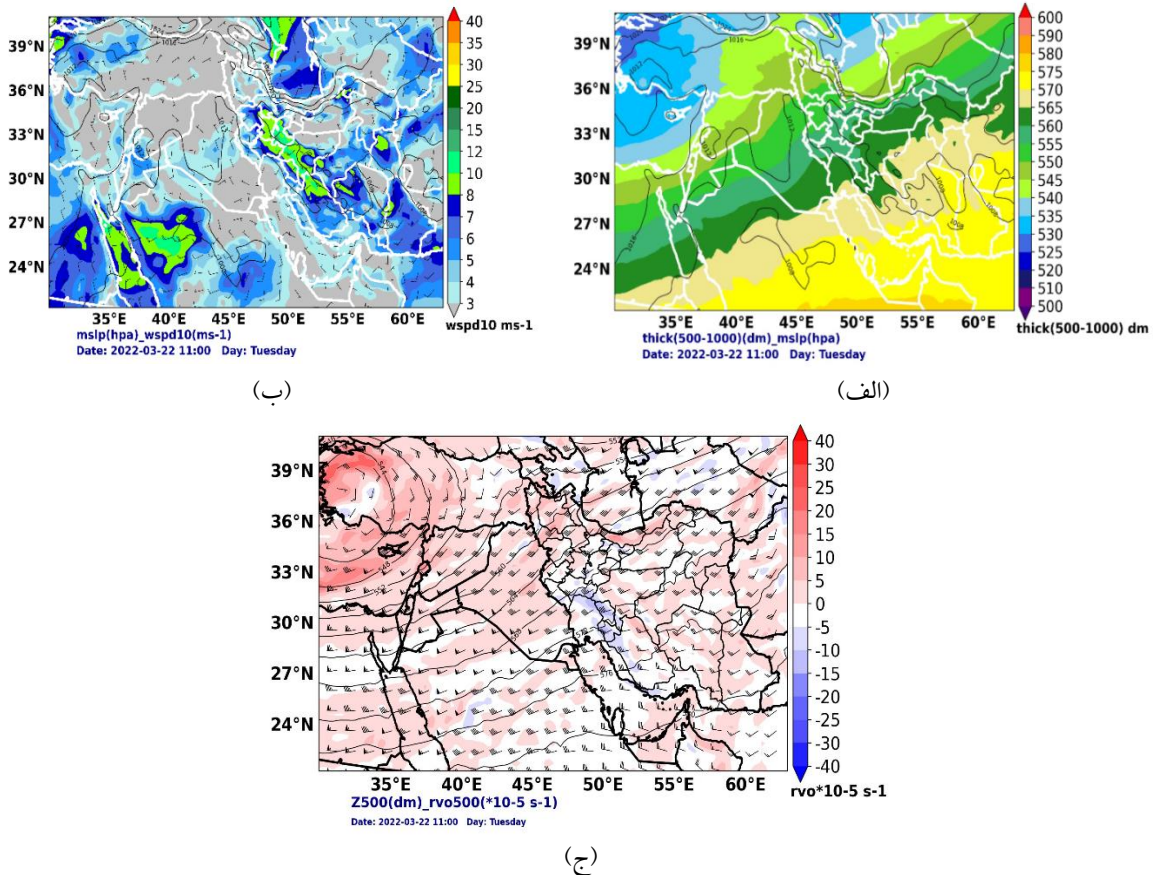
داده‌های سرعت باد بیشینه گزارش شده در برخی از ایستگاه‌های هواشناسی در جدول ۱ برحسب متر بر ثانیه نشان داده شده است. این داده‌ها از سازمان هواشناسی کشور اخذ شده است. در بعضی از نقاط شهر تهران که شامل ایستگاه‌های متعلق به سازمان هواشناسی نیستند، سرعت‌های بالاتر تا بیش از ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت نیز وجود داشته است.

تعدادی از نقشه‌های پیش‌یابی پرونداد مدل برای روز ۲۲ مارس ۲۰۲۲ در شکل ۲ نشان داده شده است. دمای سطح زمین در این روز و در ساعت رخداد تندباد بیشتر از ۱۵ درجه سلسیوس ثبت شده است. در شکل ۲-ج مشاهده می‌شود که ناوه گسترده‌ای که مرکز آن در غرب ترکیه است از غرب وارد کشور ایران شده و مناطق زیادی از کشور را تحت تأثیر قرار داده است. در پایین دست این موج از جمله برای تهران تاوایی نسبی مثبت و ناپایداری ناشی از فرارفت تاوایی مثبت وجود دارد. بررسی مسیر بادها در ترازهای مختلف فشاری در لایه‌های پایین جو، انتقال رطوبت را هم از اقیانوس هند و هم از دریای سرخ و مدیترانه برای تهران نشان می‌دهد. در شکل ۲-الف کم‌فشار سطح زمین نشان‌دهنده کج شدگی غرب‌سوی محور فضایی ناوه و فاز تقویت آن است و همچنین ماهیت کژفشاری آن را مشخص می‌کند. همان‌طور که در شکل ۲-ب دیده می‌شود برای شهر تهران بادهای همدیدی پیش‌بینی شده توسط مدل، در بیشتر نقاط تا ۴ متر بر ثانیه است و تنها در شمال استان تهران مناطقی با بادهای تا ۶ متر بر ثانیه وجود دارد. این موضوع نشان می‌دهد که ساز و کار هسته دینامیکی مدل قادر به تشخیص و توضیح بادهای ثبت شده در سطح زمین نبوده است.

جدول ۱. اطلاعات سرعت بیشینه باد در تعدادی ایستگاه‌های سازمان هواشناسی برای روز ۲۰۲۲/۳/۲۲ (دوم فروردین ۱۴۰۱).

تاریخ	ایستگاه	ساعت (UTC)	بیشینه سرعت باد (متر بر ثانیه)	کمینه دید افقی (متر)
۲۰۲۲/۳/۲۲ (۱۴۰۱/۱/۲)	تهران	۱۰:۳۲	۲۲	۳۰۰
۲۰۲۲/۳/۲۲ (۱۴۰۱/۱/۲)	ژئوفیزیک	بیشینه روزانه	۲۲	-
۲۰۲۲/۳/۲۲ (۱۴۰۱/۱/۲)	شمیرانات	بیشینه روزانه	۲۰	-
۲۰۲۲/۳/۲۲ (۱۴۰۱/۱/۲)	فرودگاه امام	۱۱:۰۳	۱۴	۷۰۰۰
۲۰۲۲/۳/۲۲ (۱۴۰۱/۱/۲)	فیروزکوه	بیشینه روزانه	۱۶	-

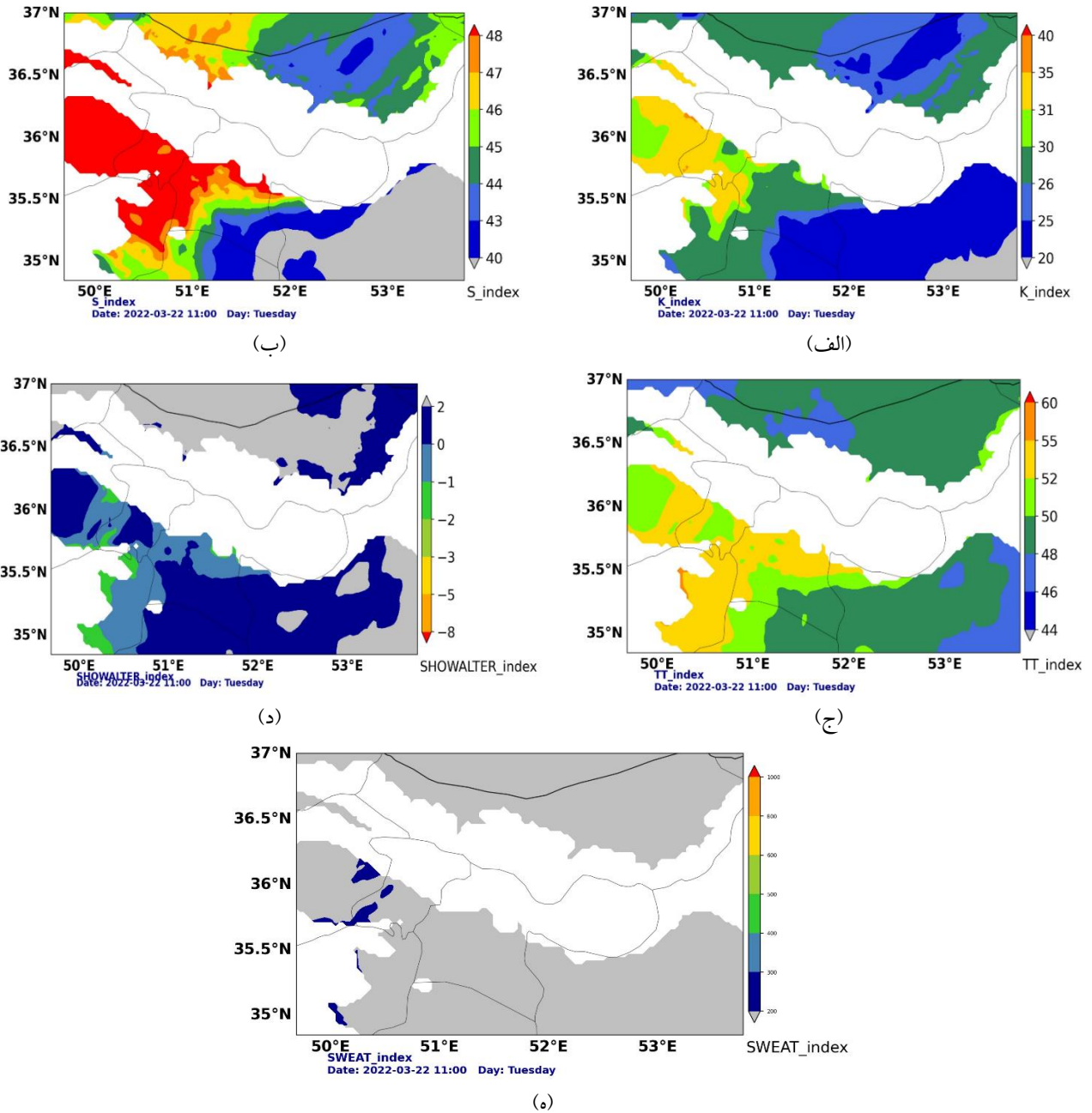




شکل ۲. پیش‌بینی برای روز ۲۲ مارس ۲۰۲۲ ساعت ۱۱ گرینویچ برنوداد مدل، (الف) پربندهای فشار میانگین سطح دریای آزاد با واحد هکتوپاسکال و پهنه‌بندی ضخامت ارتفاع ژئوپتانسیلی بین سطوح ۵۰۰ و ۱۰۰۰ هکتوپاسکال با واحد ژئوپتانسیل دکامتر (ب) پربندهای فشار میانگین سطح دریای آزاد با واحد هکتوپاسکال و اندازه سرعت باد با واحد متربرثانیه در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین همراه با پرچم‌های باد برحسب نات در تراز ده متری سطح زمین و (ج) پربندهای ارتفاع ژئوپتانسیلی با واحد ژئوپتانسیل دکامتر و تاوایی نسبی با واحد بر ثانیه با مضرب  $10^{-5}$  در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال همراه با پرچم‌های باد برحسب نات در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی. (اجرای ساعت ۱۲ روز ۲۱ ماه مارس ۲۰۲۲، حوزه اول)

بخش‌هایی از شمال‌غرب استان مرکزی نشان می‌دهند. این مقادیر با شرایط همیدی اشاره شده و عبور سامانه ناپایدار و تاثیر ناوه بر ناحیه مورد بررسی همخوانی دارد و نشان‌دهنده این است که عامل ترمودینامیکی برای ناپایداری و صعود همرفتی هوا در جو وجود دارد. شاخص showalter برخلاف چهار شاخص دیگر، هرچقدر مقدار کمتری داشته باشد نشان‌دهنده ناپایداری بیشتر است. این نتایج بیان‌کننده این است که شرایط لازم از نظر شاخص‌های ترمودینامیکی برای احتمال رخداد تندباد با ساختار فروپکشی وجود دارد.

شکل ۳، پهنه‌بندی شاخص‌های ترمودینامیکی را با تمرکز بر ناحیه اطراف تهران نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تقریباً تمام پنج شاخص محاسبه شده برای منطقه غرب و جنوب غرب استان تهران شرایط ناپایداری را نشان می‌دهند. بیشینه مقدار شاخص K در کل محدوده تا ۳۵، بیشینه شاخص S در حوزه نقشه بیشتر از ۴۸، بیشینه مقدار شاخص TT در محدوده نقشه تا ۶۰، کمینه مقدار شاخص Showalter در کل منطقه نشان‌داده شده تا ۳- و بیشینه مقدار شاخص sweat در پهنه نقشه تا ۳۰۰ را برای مناطقی از جنوب غرب استان تهران، جنوب استان البرز و



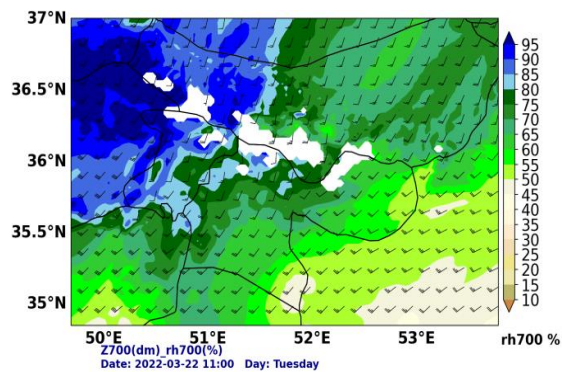
شکل ۳. پیش‌بینی برای روز ۲۲ مارس ۲۰۲۲ ساعت ۱۱ گرینویچ، (الف) پهنه‌بندی شاخص ترمودینامیکی K، (ب) پهنه‌بندی شاخص ترمودینامیکی S، (ج) پهنه‌بندی شاخص ترمودینامیکی TT، (د) پهنه‌بندی شاخص ترمودینامیکی showalter و (ه) پهنه‌بندی شاخص ترمودینامیکی sweat (اجرای ساعت ۱۲ روز ۲۱ ماه مارس ۲۰۲۲).

مقادیر به نسبت کمتر تا ۵۰ درصد است (شکل ۴-ب). در شکل ۴-ج رطوبت نسبی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال دارای مقادیر باز به نسبت کمتر، تا ۲۵ درصد دارد. این مقادیر رطوبت، شمای کلی از نمایه قائم رطوبت نسبی جو را نشان می‌دهد. رطوبت نسبی در ترازهای بالاتر بیشتر و در ترازهای پایین‌تر به نسبت کمتر است و در این شرایط با توجه به دمای بالای هوا در سطوح پایین احتمال تبخیر

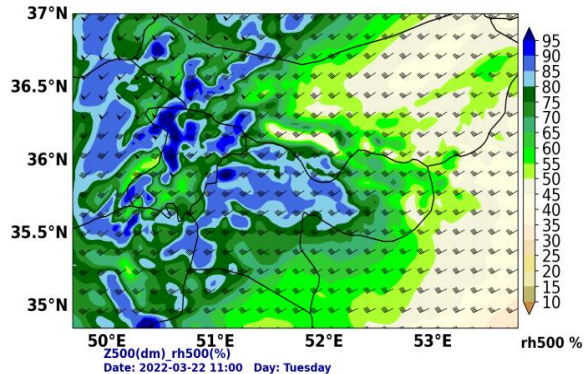
در شکل ۴ رطوبت نسبی جو در ترازهای فشاری ۵۰۰، ۷۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال نشان داده شده است. در شکل ۴-الف در غرب ناحیه مورد مطالعه و در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال رطوبت نسبی بالایی وجود دارد. در بعضی از نقاط شبکه در غرب و جنوب غربی استان تهران این رطوبت تا بیش از ۹۵ درصد وجود دارد. در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال در جنوب غرب نقشه رطوبت نسبی دارای

در این ترازها است و از همین تراز ۶۵۰ هکتوپاسکالی به سمت ترازهای پایین‌تر این خطوط از هم فاصله گرفته و بیانگر رطوبت نسبی کمتر است. این نتایج بیان‌کننده این موضوع است که شرایط لازم از نظر رطوبت نسبی موجود در ترازهای مختلف جو، برای احتمال رخداد تندباد فروپیکشی وجود دارد. در شکل ۵-ب نیز نمودار Skew-T ترسیم شده توسط وبگاه دانشگاه ایومینگ برای ساعت ۱۲ گرینویچ روز ۲۲ مارس ۲۰۲۲ که بر اساس گزارش ایستگاه جو بالای مهرآباد تهران تهیه شده است، نشان داده شده است. در این زمان البته توفان در مهرآباد پایان یافته است. در همین نمودار نیز دو منحنی دما و دمای نقطه شبنم از تراز ۶۵۰ هکتوپاسکالی به سمت پایین از هم دور می‌شوند.

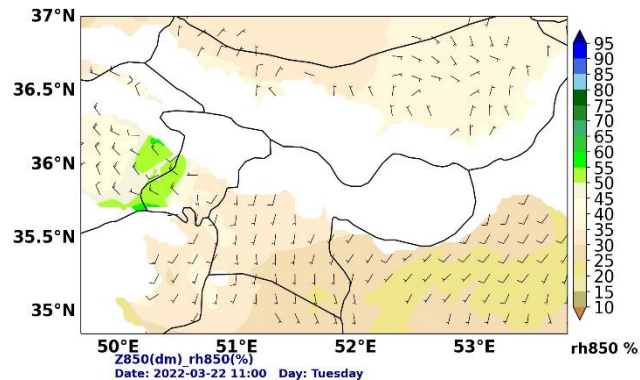
باران ناشی از ناپایداری همرفتی قوی، قبل از رسیدن آن به سطح زمین زیاد است. این تبخیر باعث سرمایش هوا در داخل ابر همرفتی شده و می‌تواند منجر به ریزش هوای سرد و رخداد تندباد شود. شکل ۵-الف نمودار Skew-T را برای ایستگاه مهرآباد در ساعت ۱۱ گرینویچ در روز مربوطه نشان می‌دهد. حالت همگرایی با افزایش ارتفاع از سطح تا تراز ۶۵۰ هکتوپاسکالی بین منحنی‌های دما و دمای نقطه شبنم محیط (به ترتیب منحنی‌های قرمز و سبز) بیانگر رطوبت نسبی بالا در ترازهای بالاتر و رطوبت نسبی کمتر در ترازهای پایین‌تر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود از تراز حدود ۶۵۰ هکتوپاسکال به سمت ترازهای بالاتر تا حدود ۵۰۰ هکتوپاسکالی این خطوط به هم نزدیک هستند و نشان‌دهنده رطوبت نسبی بالا و وجود ابر



(ب)

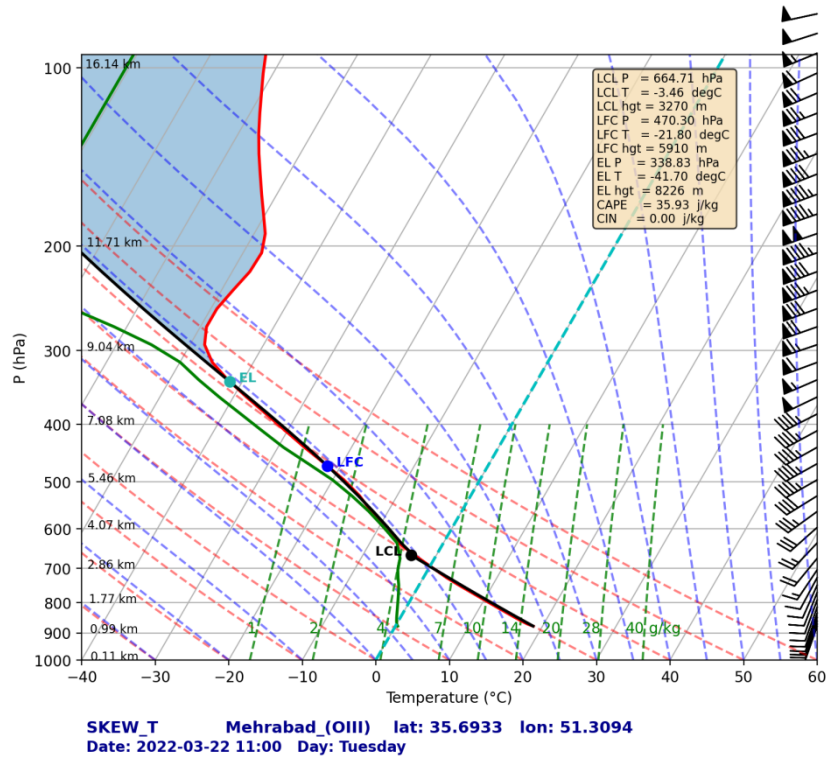


(الف)

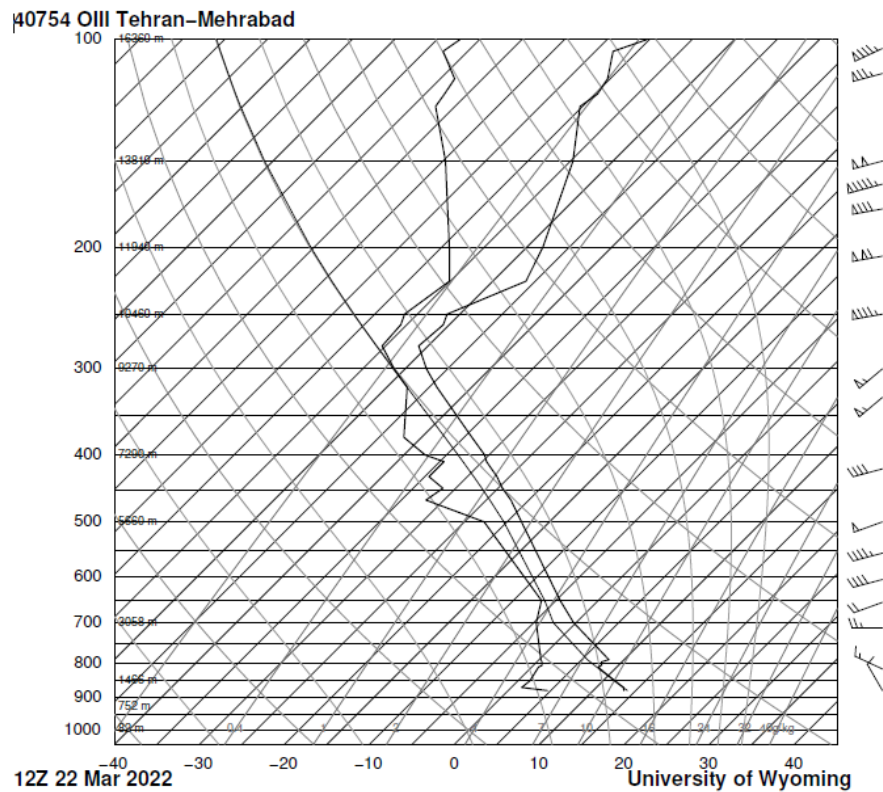


(ج)

شکل ۴. پیش‌بینی برای روز ۲۲ مارس ۲۰۲۲ ساعت ۱۱ گرینویچ برون‌داد مدل، رطوبت نسبی با واحد درصد و پرچم‌های باد برحسب نات در ترازهای (الف) ۵۰۰ هکتوپاسکال، (ب) ۷۰۰ هکتوپاسکال و (ج) ۸۵۰ هکتوپاسکال.



(الف)



(ب)

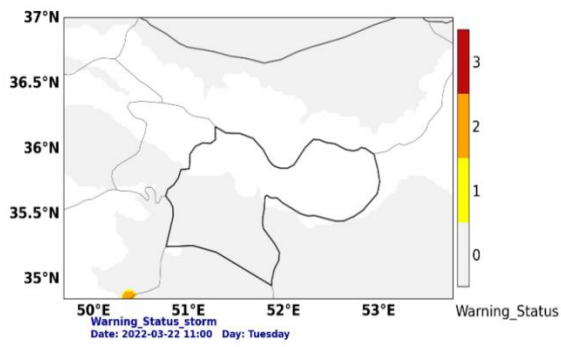
شکل ۵. (الف) پیش‌بینی برای روز ۲۲ مارس ۲۰۲۲ ساعت ۱۱ گرینویچ، نمودار Skew-T برونداد مدل برای ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد تهران. خطوط نمایه قائم دما بر حسب درجه سلسیوس، قرمز دمای محیط، سبز دمای نقطه شبنم و مشکی دمای بسته هوای صعودی (ب) نمودار Skew-T بر اساس داده‌های گزارش ایستگاه جو بالای مهرآباد تهران در ساعت ۱۲ گرینویچ روز ۲۲ مارس ۲۰۲۲ تهیه‌شده توسط وبگاه دانشگاه وایومینگ.

و در حداقل سه اجرای دیگر نیز که از بیش از ۶۰ ساعت قبل از رخداد آغازش همرفت هر ۱۲ ساعت یک‌بار انجام یافته هشدار آغازش همرفت توسط این سامانه به رنگ نارنجی صادر شده است.

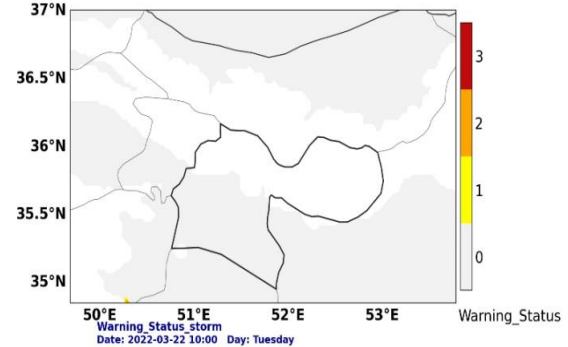
### ۲-۳. مورد دوم، ۲۳ اکتبر ۲۰۲۲ (۱ آبان ۱۴۰۱)

طبق اطلاعات سازمان هواشناسی در روز ۲۳ اکتبر ۲۰۲۲ مطابق با اول آبان سال ۱۴۰۱ هجری خورشیدی در بازه زمانی نزدیک به ساعت ۱۳ گرینویچ ایستگاه‌های هواشناسی فرودگاه مهرآباد، فرودگاه امام و شهریار از ایستگاه‌های هواشناسی استان تهران سرعت بادهای به ترتیب ۶۰، ۳۵ و ۳۴ نات را ثبت کرده‌اند. برون‌داد اغلب مدل‌های هواشناسی مورد استفاده مانند GFS و ECMWF برای این روز چنین سرعت بادی را در تهران پیش‌بینی نکرده بودند. با روش ارائه شده در این مطالعه، این رخداد وزش باد شدید پیش‌بینی شده و به صورت پهنه‌بندی هشدار وجود احتمال پتانسیل رخداد تندباد فروپکشی در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود از ساعت ۱۰ گرینویچ هشدار احتمال پتانسیل رخداد توفان یا در واقع هشدار آغازش همرفت با احتمال رخداد هبوب با رنگ‌های هشدار نارنجی و زرد در غرب محدوده حوزه سوم اجرای مدل دیده می‌شود. برای ساعت‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ گرینویچ هم این هشدارها با گسترده‌تر شدن پهنه هشدار ادامه داشته و پیش‌بینی شده است. در ساعت ۱۴ گرینویچ این هشدار پیش‌بینی شده ضعیف‌تر شده و برای ساعات بعدی از بین می‌رود. با توجه به جهت شرق‌سوی حرکت سیستم و زمان لازم برای انتقال آن در سطح زمین به سمت شهر تهران، هشدارهای پیش‌بینی شده، به خوبی پتانسیل رخداد وزش تندباد را برای شهر تهران پیش‌بینی کرده است. با توجه به این‌که در این مورد هم شرایط دینامیکی و همدیدی و ترمودینامیکی مشابه با مورد اول با توضیحات ارائه شده همخوان بوده از ارائه نقشه‌ها و تحلیل‌های مرتبط خودداری شده است.

همان‌طور که اشاره شد در این مطالعه با لحاظ کردن شرایط لازم از نظر وجود شرایط دینامیکی لازم جهت صعود هوا مانند فرارفت تاوایی مثبت در ترازهای میانی و بالای جو، دمای سطح زمین، مقادیر پنج شاخص ترمودینامیکی و وضعیت نمایه قائم رطوبت نسبی جو، پهنه‌بندی هشدار وجود احتمال پتانسیل رخداد تندباد فروپکشی با سه رنگ هشدار زرد، نارنجی و قرمز برای شهر تهران تهیه شد. در هر گام زمانی اجرای مدل، با داشتن مقادیر پیش‌بینی شده کمیت‌های جوی در نقاط شبکه و ترازهای مختلف و با پس‌پردازش و محاسبه کمیت‌های مورد نیاز دیگر مانند شاخص‌های ترمودینامیکی، این پهنه‌بندی به صورت پیش‌بینی در اختیار قرار می‌گیرد. شکل ۶ نتایج این محاسبات را برای اجرای مدل نشان می‌دهد. پیش‌بینی اجرای مدل هشدار احتمال رخداد تندباد از نوع فروپکشی را برای ساعت‌های ۱۰ و ۱۱ گرینویچ روز دوم فروردین ۱۴۰۱ در مناطقی از استان‌های مرکزی و قم را نشان می‌دهد. با توجه به عبور امواج غربی و زمان لازم برای انتقال تندباد، این پیش‌بینی با اطلاعات ثبت شده سطح زمین و رخداد تندباد در روز موردنظر در تهران مطابقت دارد. منطقه هشدار با رنگ نارنجی در جنوب غرب حوزه سوم اجرای مدل نشان می‌دهد که احتمال تندباد فروپکشی در منطقه‌ای دورتر از تهران وجود داشته است و شهر تهران به دلیل احتمال انتقال تندباد حائز شرایط صدور هشدار نارنجی بوده است. با توجه به عبور امواج جوی، مناطق کمی دورتر از استان تهران هم که به‌ویژه در سمت غرب یا جنوب‌غرب ناحیه وجود دارند می‌توانند در رخداد تندباد فروپکشی برای تهران مؤثر باشند. لازم به ذکر است که این مقادیر رخداد باد ثبت‌شده، در خروجی مدل و با محاسبات باد همدیدی هسته دینامیکی آن قابل تشخیص و پیش‌بینی نبوده است و طی محاسبات مربوط به پتانسیل رخداد تندباد ارائه شده در این مطالعه قابل‌ردیابی در پیش‌بینی‌های خروجی مدل شده است. نکته دیگر این‌که اجرای مدل در ساعت ۱۲ روز اول فروردین ۱۴۰۱ به وقت گرینویچ انجام شده است

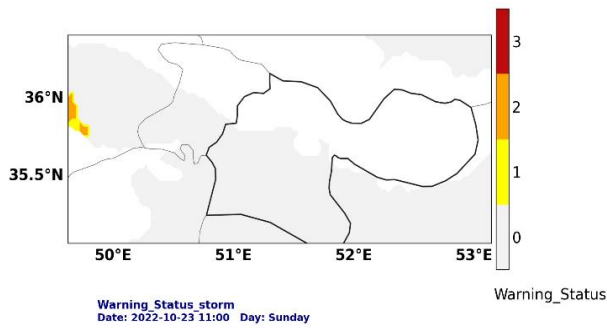


(ب)

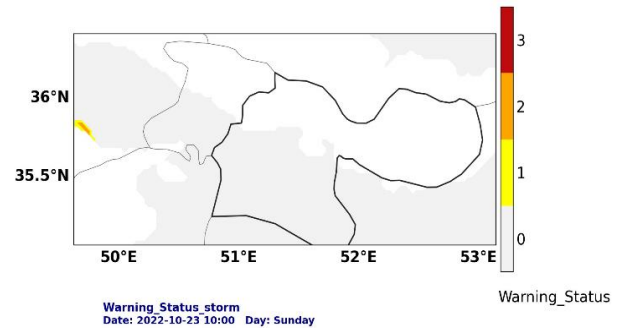


(الف)

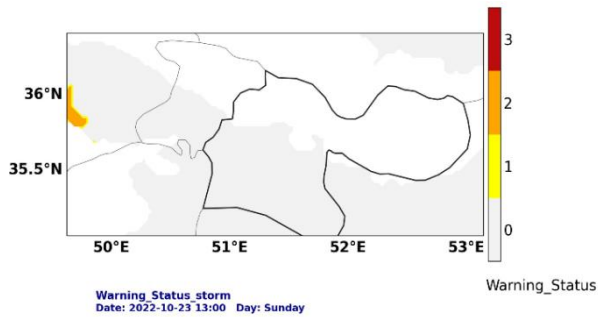
شکل ۶. پیش‌بینی بهینه‌بندی سطح هشدار احتمال پتانسیل رخداد تندباد فرورپکشی برای ۲۲ مارس ۲۰۲۲ (الف) ساعت ۱۰ گرینویچ، (ب) ساعت ۱۱ گرینویچ، (اجرای ساعت ۱۲ روز ۲۱ ماه مارس ۲۰۲۲)



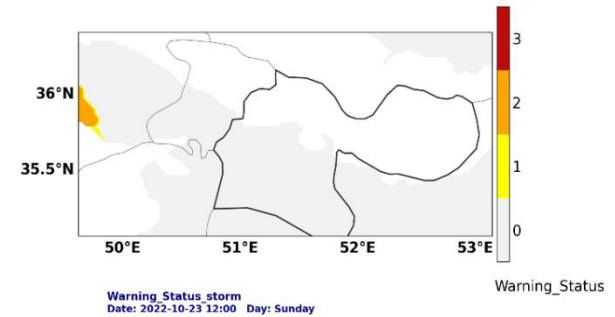
(ب)



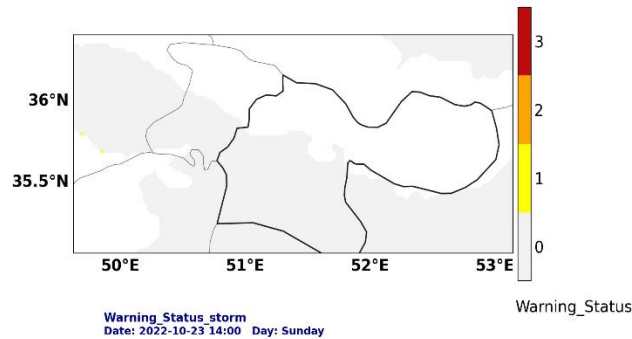
(الف)



(د)



(ج)



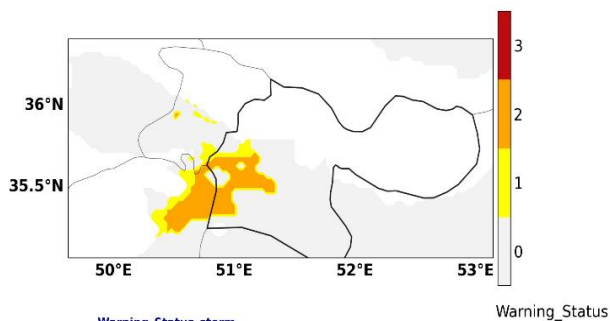
(ه)

شکل ۷. بهینه‌بندی پیش‌بینی سطح هشدار احتمال پتانسیل رخداد تندباد فرورپکشی برای ۲۳ اکتبر ۲۰۲۲ (الف) ساعت ۱۰ گرینویچ، (ب) ساعت ۱۱ گرینویچ، (ج) ساعت ۱۲ گرینویچ، (د) ساعت ۱۳ گرینویچ، (ه) ساعت ۱۴ گرینویچ (اجرای ساعت ۱۲ روز ۲۲ اکتبر ۲۰۲۲).

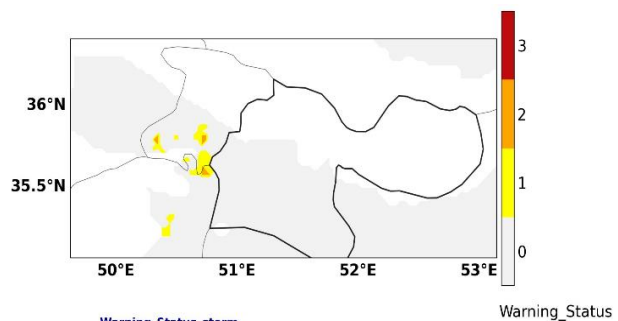
۲۰۲۳ در شکل‌های ۸-د تا ۸-و آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در این مورد نیز پیش‌بینی احتمال رخداد توفان با سازوکار فروپکشی پیش‌بینی مناسبی ارائه داشته است. یادآوری می‌شود که در این مورد نیز شرایط همدیدی، دینامیکی و ترمودینامیکی در جو منطقه با توضیحات ارائه‌شده برای رخداد هبوب همخوان بوده است که با توجه به مشابهت با موارد قبلی از ارائه نقشه‌ها و تحلیل‌های مرتبط خودداری شده است. نکته مهم در این مورد آن است که اجرای مدل مربوط به ساعت ۰۰ روز ششم اوت سال ۲۰۲۳ است و این پیش‌بینی زمان لازم برای هرگونه اقدام توسط دستگاه‌های مسئول برای پیشگیری از خسارات احتمالی را در اختیار قرار می‌دهد. لازم به یادآوری می‌باشد که در همه موارد ذکرشده اجرای همه سیکل‌های مدل (هر ۱۲ ساعت یک بار) از ۷۲ ساعت پیش از رخداد تندباد، هشدار نارنجی را برای ساعات نزدیک به رخداد تندباد نشان داده‌اند و در کار حاضر فقط نتایج مربوط به یک اجرا ارائه شده است.

۳-۳. مورد سوم، ۷ و ۸ اوت ۲۰۲۳ (۱۶ و ۱۷ مرداد ۱۴۰۲)

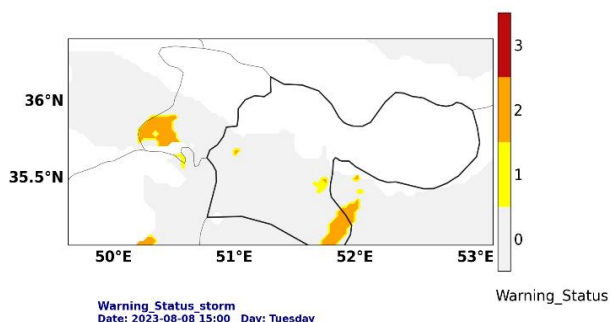
در ساعات بعدازظهر روز ۷ اوت ۲۰۲۳ داده‌های ثبت شده سازمان هواشناسی کشور برای ایستگاه‌های فرودگاه مهرآباد و فرودگاه امام بیشینه سرعت باد را به ترتیب تا ۴۰ و ۳۴ نات نشان می‌دهد. همچنین در روز ۸ اوت ۲۰۲۳ داده‌های ثبت شده این دو ایستگاه در بازه زمانی بین ۱۶ تا ۱۷ گرینویچ بیشینه سرعت باد تا ۳۴ نات را نشان می‌دهد. در این مورد نیز برون‌داد اغلب مدل‌های هواشناسی برای این روزها چنین سرعت بادی را در تهران پیش‌بینی نکرده بودند. با روش ارائه شده، احتمال رخداد این وزش باد شدید پیش‌بینی شده و به صورت پهنه‌بندی هشدار وجود احتمال پتانسیل رخداد تندباد فروپکشی در شکل ۸ نشان داده شده است. در شکل‌های ۸-الف تا ۸-ج هشدارهای رخداد پتانسیل رخداد توفان فروپکشی برای ساعت‌های ۱۶ تا ۱۸ گرینویچ روز ۷ اوت ۲۰۲۳ نشان داده شده است. این هشدارها برای ساعات ۱۵ تا ۱۷ گرینویچ روز ۸ اوت



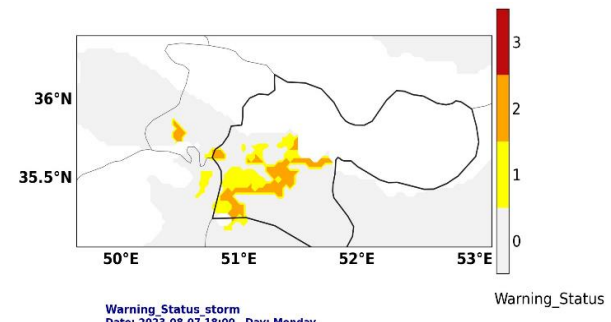
(ب)



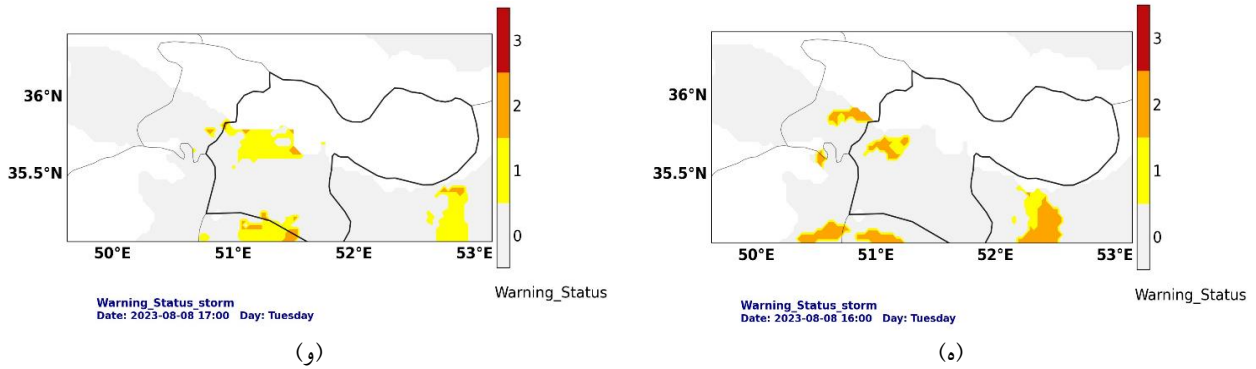
(الف)



(د)



(ج)



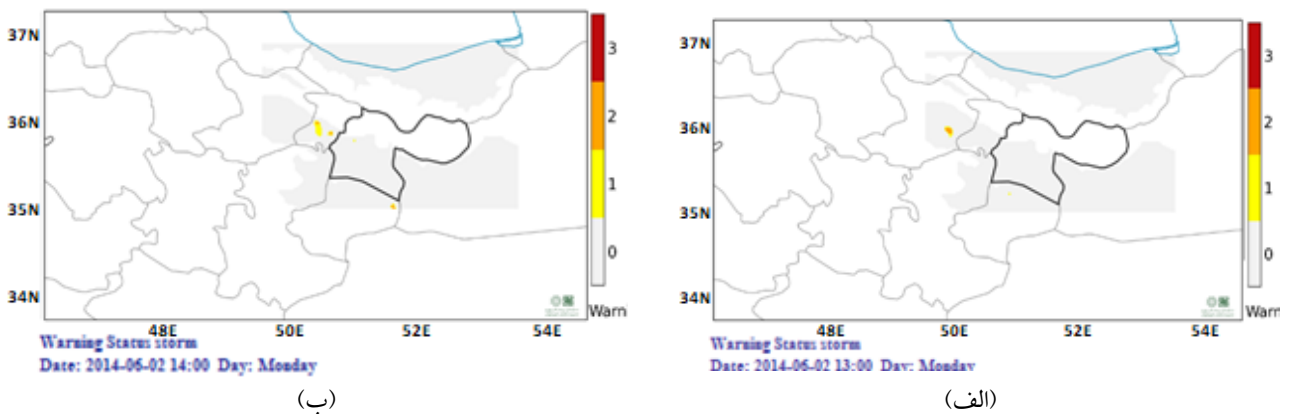
شکل ۸. پهنه‌بندی سطح هشدار احتمال پتانسیل رخداد تندباد فروپکشی برای ۷ و ۸ اوت ۲۰۲۳ (الف) ۷ اوت ساعت ۱۶ گرینویچ، (ب) ۷ اوت ساعت ۱۷ گرینویچ، (ج) ۷ اوت ساعت ۱۸ گرینویچ، (د) ۸ اوت ساعت ۱۵ گرینویچ، (ه) ۸ اوت ساعت ۱۶ گرینویچ، (و) ۸ اوت ساعت ۱۷ گرینویچ. (اجرای ساعت ۰۰ روز ششم ماه اوت ۲۰۲۳)

هشدار مربوط به تندباد و توفان که توضیح داده شد، برای این مورد و با استفاده از داده‌های تحلیل FNL محصول مرکز NCEP برای اعمال شرایط اولیه و مرزی، مدل WRF اجرا شد و نقشه‌های هشدار مربوطه تولید شد (شکل ۹). شکل ۹-الف نشان می‌دهد که در ساعت ۱۳ گرینویچ روز ۱۲ خرداد ۱۳۹۳ لکه‌های رنگ هشدار نارنجی در بخش‌هایی از استان‌های قزوین و قم دیده می‌شوند. در شکل ۹-ب لکه‌های هشدار نارنجی رنگ در مناطقی از استان‌های البرز و تهران نیز دیده می‌شوند. برای این روزها چنین سرعت بادی در تهران توسط برونداد مدل‌های هواشناسی پیش‌بینی نشده بود. پیش‌بینی احتمال رخداد توفان با سازوکار فروپکشی در این مورد نیز پیش‌بینی مناسبی ارائه داشته است.

در ادامه، به تحلیل و بررسی توفان معروف تهران در روز دوازدهم خردادماه سال ۱۳۹۳ هجری خورشیدی پرداخته شده است. این تندباد خسارات قابل توجهی در تهران و کرج ایجاد کرد.

### ۳-۴. مورد چهارم، دوم ژوئن ۲۰۱۴ (۱۲ خرداد ۱۳۹۳)

در روز دوشنبه مورخ ۱۲ خرداد سال ۱۳۹۳ در ساعات بعدازظهر توفان شدیدی رخ داد که باعث خسارات قابل توجهی شد و در رسانه‌ها و محاوره جامعه تا مدت‌ها با عنوان توفان تهران از آن یاد می‌شد. با بررسی و تحلیل نقشه‌های همدیدی به نظر می‌رسد که این توفان در اثر پدیده فروپکشی رخ داده باشد. با توجه به نحوه صدور



شکل ۹. پهنه‌بندی پیش‌بینی سطح هشدار احتمال پتانسیل رخداد تندباد فروپکشی برای دوم ژوئن ۲۰۱۴ (الف) ساعت ۱۳ گرینویچ، (ب) ساعت ۱۴ گرینویچ.

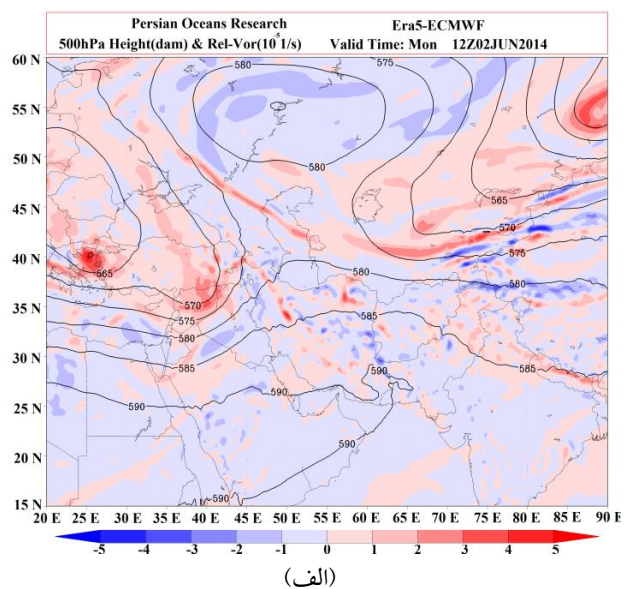
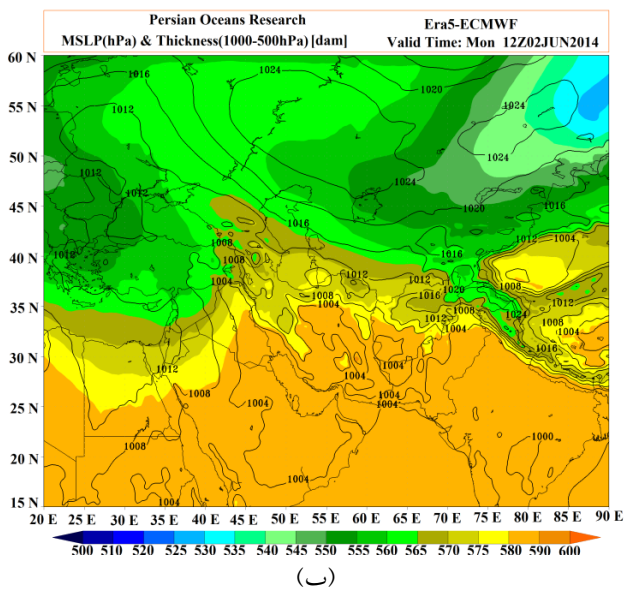


نمایش داده شده است. بررسی این نقشه نیز وجود زبانه کم‌فشاری که از مرکز ایران روی استان تهران کشیده شده است را نشان می‌دهد. البته زبانه کم‌فشار دیگری نیز که از دریای سرخ تا محدوده‌های غرب و شمال‌غرب کشور کشیده شده است در شکل دیده می‌شود. با توجه به شکل ۱۰ می‌توان شرایط دینامیکی را برای صعود هوا در زمان ذکر شده روی منطقه مناسب دانست. شرایط ترمودینامیکی نیز با بررسی شاخص‌های ترمودینامیکی وضعیت ناپایداری را برای محدوده تهران نشان می‌دهد که به دلیل مشابهت با موارد پیشین از ارائه نقشه‌ها خودداری شده است.

#### ۴. درستی‌سنجی نتایج

برای درستی‌سنجی کار حاضر در پیش‌بینی احتمال رخداد توفان می‌توان با استفاده از جدول توافقی دو در دویی مطابق جدول ۲ و کمیت‌های مربوطه را محاسبه کرد. نمونه ای از یک جدول توافقی در جدول ۲ نشان داده شده است. در این جدول توافقی اگر پیش‌بینی کاملاً درست باشد مقادیر b و c صفر خواهند شد.

شرایط هم‌مدیدی، دینامیکی و ترمودینامیکی برای این مورد نیز کمابیش مشابه با موارد اشاره شده قبلی نشان‌دهنده آمادگی جو برای تشکیل سلول‌های همرفتی در محدوده تهران بوده است و شرایط دما و رطوبت در ترازهای مختلف جو نیز نشان می‌دهد که امکان تبخیر بارش‌ها در طول مسیر بارش وجود دارد. برای بررسی و تحلیل وضعیت جوی در روز حادثه از داده‌های بازتحلیل ERA5 محصول مرکز اروپایی استفاده شده است. شکل ۱۰-الف ارتفاع ژئوپتانسیلی و تاوایی نسبی جو در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکالی را در ساعت ۱۲ گرینویچ روز دوم ژوئن ۲۰۱۴ نشان می‌دهد. بررسی این نقشه گذر ناوه با طول موج کوچکی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی از محدوده استان تهران را نشان می‌دهد. وجود تاوایی نسبی مثبت در همین تراز و در محدوده جنوب‌غربی استان و همچنین در محدوده شهرستان ساوه در استان مرکزی نشان از فرارفت تاوایی مثبت در منطقه دارد. در شکل ۱۰-ب فشار سطح میانگین دریا در تاریخ یادشده همراه با ضخامت جو بین ترازهای ۵۰۰ و ۱۰۰۰ هکتوپاسکالی



شکل ۱۰. الف) ارتفاع ژئوپتانسیلی و تاوایی نسبی جو در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکالی (ب) فشار سطح میانگین دریا و ضخامت جو بین دو تراز ۵۰۰ و ۱۰۰۰ هکتوپاسکالی در ساعت ۱۲ UTC روز دوم ژوئن ۲۰۱۴ بر اساس داده‌های بازتحلیل ERA5 محصول مرکز اروپایی ECMWF

جدول ۲. جدول توافقی ۲ در ۲ و هر کدام از متغیرها عبارت‌اند از: a: تعداد مواردی که پیش‌بینی شده و اتفاق افتاده، b: مواردی که پیش‌بینی شده ولی اتفاق نیفتاده، c: مواردی که پیش‌بینی نشده ولی اتفاق افتاده، d: مواردی که پیش‌بینی نشده و اتفاق نیفتاده است.

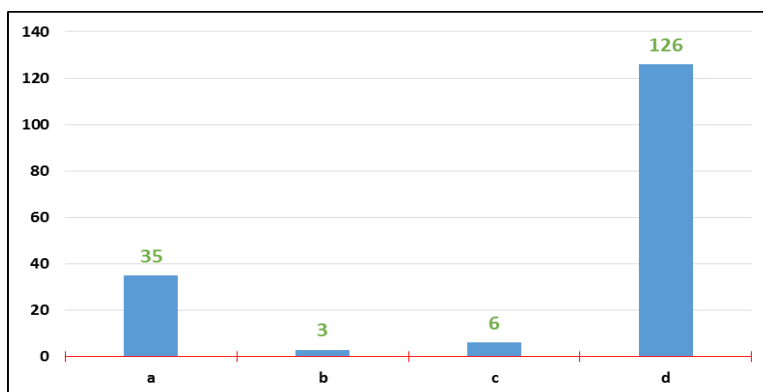
		پیش‌بینی		
		بله	خیر	
مشاهده	بله	<b>a</b> (hits)	<b>c</b> (misses)	<b>a+c</b>
	خیر	<b>b</b> (false alarms)	<b>d</b> (correct negative)	<b>b+d</b>
		<b>a+b</b>	<b>c+d</b>	<b>n=a+b+c+d</b>

بین صفر و ۱ هستند. شاخص H هر چه بیشتر و شاخص F هر چه کمتر باشد نشان‌دهنده پیش‌بینی بهتر هستند. امتیازهای مهارتی HSS، PSS و GSS حداکثر دارای مقدار ۱ هستند و هرچه بیشتر باشند نشان‌دهنده پیش‌بینی بهتر هستند.

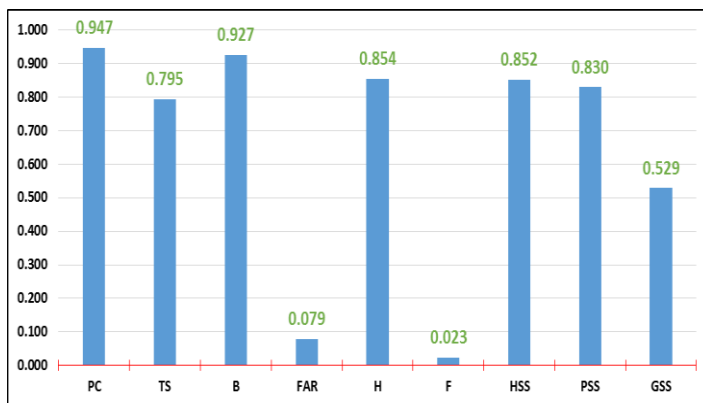
برای درستی‌سنجی پیش‌بینی‌های مربوط به پتانسیل رخداد تندباد و توفان از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی متعلق به سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران برای یک دوره ۱۷۰ روزه از روز ششم فروردین ۱۴۰۱ تا روز یکشنبه بیستم شهریورماه ۱۴۰۱ استفاده شده است. مقادیر a، b، c و d با توجه به پیش‌بینی‌های انجام شده و داده‌های ایستگاه‌های شهرداری و بر اساس جدول توافقی نشان داده شده در جدول ۲، به دست آمده است. این مقادیر در شکل ۱۱ آورده شده است.

با محاسبه مقادیر جدول دودویی، شاخص‌های مهارتی و امتیازهای پیش‌بینی برای دوره زمانی موردنظر محاسبه شد. مقادیر این محاسبات در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

شاخص‌هایی که برای بررسی دقت و صحت پیش‌بینی تعریف و محاسبه می‌شود شامل PC (Proportion Correct)، TS (Threat Score)، B (Bias)، FAR (False Alarm Rate)، H (Hit Rate)، F (False Alarm Rate)، HSS (Heidke Skill Score)، PSS (Pearce's Skill Score)، GSS (Gilbert Skill Score) است (برابر و آلن، ۱۹۵۱؛ جولیف و استفنسون، ۲۰۰۳؛ هارت و همکاران، ۲۰۰۴؛ داسویل، ۱۹۹۶؛ استفانو و کاسایولی، ۲۰۰۸؛ مورفی و وینکلر، ۱۹۸۷). شاخص PC برای پیش‌بینی کاملاً درست ۱ و برای پیش‌بینی کاملاً غلط صفر است. مقادیر PC و TS هرچقدر بیشتر باشند، نشان‌دهنده پیش‌بینی بهتر است. شاخص B (اریبی) برای پیش‌بینی کاملاً درست برابر ۱ است ولی عکس آن لزوماً برقرار نیست. اریبی بزرگ‌تر از ۱ نشان‌دهنده فراییش‌بینی و اریبی کمتر از ۱ نشان‌دهنده فرو پیش‌بینی است. شاخص FAR برای پیش‌بینی کاملاً غلط مقدار ۱ دارد و هرچه کمتر باشد بهتر است. شاخص H بر روی پدیده‌های رخ داده و شاخص F بر روی عدم رخداد تمرکز داشته و مقادیر آنها



شکل ۱۱. مقادیر a، b، c و d برای بازه ۱۷۰ روزه.



شکل ۱۲. مقادیر به‌دست‌آمده برای هر کدام از شاخص‌های مهارتی در بازه زمانی ۱۷۰ روزه.

استفاده شد. اگر شرایط ترمودینامیکی و ناپایداری‌های جو که توسط شاخص‌های مربوطه شناسایی می‌شود مساعد باشند، در صورت مساعد بودن وضعیت دمایی سطح زمین و همچنین وضعیت نمایه قائم رطوبت نسبی در زمان‌هایی که شرایط دینامیکی لازم برای صعود هوا وجود داشته باشد یا دست‌کم شرایط پایداری دینامیکی وجود نداشته باشد، می‌توان پتانسیل رخداد تندباد فروپیکشی را محتمل دانست. دمای هوا در تراز دو متری زمین در محدوده شهر و استان تهران بیش از ۱۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد. شرایط رطوبتی به گونه‌ای در نظر گرفته شد که ترازهای پایین‌تر جو دارای رطوبت نسبی کم و ترازهای بالاتر رطوبت نسبی بیشتری دارند تا احتمال تبخیر باران قبل از رسیدن آن به سطح زمین بالا باشد. برای شاخص‌های ترمودینامیکی و شرایط دما و رطوبت شرایط آستانه تعریف شد و با ترکیب این شرایط برای گام‌های زمانی خروجی مدل پیش‌بینی هواشناسی سه سطح هشدار برای احتمال پتانسیل رخداد توفان با پهنه‌بندی رنگ‌های زرد، نارنجی و قرمز ارائه شد. چهار مورد رخداد تندباد و توفان در تاریخ‌های ۲۲ مارس ۲۰۲۲ (۲ فروردین ۱۴۰۱)، ۲۳ اکتبر ۲۰۲۲ (۱ آبان ۱۴۰۱) و دو روز متوالی ۷ و ۸ اوت ۲۰۲۳ (۱۶ و ۱۷ مرداد ۱۴۰۲) و همچنین توفان معروف رخ داده در دوم ژوئن ۲۰۱۴ (دوازدهم خردادماه ۱۳۹۳) برای شهر تهران مطالعه شد. مطابق اطلاعات سازمان هواشناسی در این تاریخ‌ها در ایستگاه‌های هواشناسی شهر تهران بادهایی با سرعت‌های تا حداکثر بین ۸۰ تا ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت ثبت شده است. نقشه‌های مختلف

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر بسیار خوبی برای امتیازها و شاخص‌های مهارتی پیش‌بینی در کار حاضر به دست آمده است.

#### ۵. نتیجه‌گیری

در فصول گرم سال پیش‌بینی برخی از توفان‌ها دشوار و پیچیده است. از جمله این بادهای شدید که معمولاً با گردوخاک همراه هستند در برخی کشورها با نام هبوب شناخته می‌شود. برای رخداد این پدیده هواشناسی شرایط دینامیکی مساعد جهت صعود در هوای گرم و نسبتاً خشک باید برقرار باشد. در دهه اخیر برخی از توفان‌های اتفاق افتاده در شهر تهران که خسارات متعددی به وجود آورده شامل سازوکار رخداد هبوب بوده‌اند. در این مطالعه روشی برای امکان‌سنجی پیش‌بینی پتانسیل رخداد توفان‌های با ساختار دارای شرایط هبوب معرفی شد که سطوح تعریف شده هشدار برای احتمال آغاز همرفت در منطقه‌ای بزرگ‌تر از استان تهران و رخداد این پدیده و همچنین احتمال انتقال آن به تهران را ارائه می‌دهد. پیش‌بینی و شبیه‌سازی عملیاتی میدان‌های هواشناسی از جمله باد، دما و غیره توسط مدل میان‌مقیاس پیش‌بینی وضع هوا WRF انجام شد. پیکربندی مدل WRF به شکل سامانه همادی (ensemble) در چند حوزه تودرتو با تفکیک‌های افقی مختلف و گام زمانی یک ساعته بکار گرفته شد. از پنج شاخص ترمودینامیکی K، S، TT، Showalter و SWEAT برای تحلیل شرایط ترمودینامیکی و شناسایی ناپایداری‌های موجود در جو

در اختیار قراردادن برخی از داده‌های مورد نیاز و همچنین همکاری در فراهم شدن بستر اجرای این مطالعه سپاسگزاری و قدردانی می‌شود.

#### مراجع

اشرفی، خ.، قادر س.، صداقت‌کردار ع. (۱۳۸۸). اعمال روش پیش‌بینی همادی Breeding به مدل تحقیقاتی- عملیاتی WRF، هشتمین کنفرانس پیش‌بینی عددی وضع هوا، تهران، ۲ دی ۱۳۸۸.

ترایان، م. ج.؛ جغتایی، م. و زارع، ی. (۱۳۹۶). آشکارسازی و مسیریابی هبوب تهران، چهارمین همایش ملی فرسایش بادی و توفان‌های گردوغبار، یزد.

سلطان‌زاده، ا.؛ بیدختی، ع. ع. و زوارضا، پ. (۱۳۹۱). بررسی جریان‌های محلی روی تهران با استفاده از یک مدل شهر تک لایه جفت شده با مدل میان مقیاس WRF در حضور شرایط جوی ایده‌ال، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۸ (۴)، ۲۰۷ تا ۲۲۱.

قادر، س.؛ صفر، م. و جوان‌نژاد، ر. (۱۳۹۹). ارزیابی عملکرد اعضای یک سامانه همادی توسعه داده شده برای مدل WRF، نوزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۱۴ و ۱۵ آبان ۱۳۹۹.

قادر، س.؛ یازجی، د.؛ سلطان‌پور، م. و نعمتی، م. (۱۳۹۴). به کارگیری یک سامانه همادی توسعه داده شده برای مدل WRF جهت پیش‌بینی میدان باد سطحی در محدوده خلیج فارس، فصلنامه هیدروفیزیک، ۱۱ (۱)، ۴۱ تا ۵۴.

پیش‌بینی اجرای مدل شامل فشار میانگین سطح دریای آزاد، ضخامت ارتفاع ژئوپتانسیل بین سطوح ۵۰۰ و ۱۰۰۰ هکتوپاسکال، سرعت باد، تاوایی نسبی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال، پربندهای ارتفاع ژئوپتانسیلی، شاخص‌های ترمودینامیکی، رطوبت نسبی در سطوح فشاری و نمودار Skew-T در نقاط ایستگاهی برای تحلیل شرایط دینامیکی، ترمودینامیکی و همیدی جو تهیه شد. در تمامی این موارد مقدار باد ثبت شده به اندازه قابل ملاحظه‌ای بیشتر از پیش‌بینی مستقیم مدل‌های پیش‌بینی عددی هواشناسی هستند و توسط خروجی این مدل‌ها قابل تشخیص و پیش‌بینی نبوده است. نقشه‌های پهنه‌بندی پیش‌بینی سطح هشدار احتمال رخداد توفان با سازوکار فروپکشی در تمامی موارد ارائه شده در کار حاضر طی محاسبات مربوط به احتمال رخداد ارائه شده در این مطالعه، توانسته است به خوبی پتانسیل آغازش همرفت و رخداد وزش تندبادهای با سرعت زیاد را برای محدوده شهر و استان تهران پیش‌بینی کند. استفاده از این روش برای پیش‌بینی پتانسیل رخداد هبوب در کنار سایر روش‌های موجود مانند استفاده از روش‌های کنون‌بینی (پیش‌بینی‌های خیلی کوتاه‌مدت) می‌تواند فرصت بسیار مناسبی را برای انجام تمهیدات لازم جهت پیشگیری از خسارات مالی و جانی احتمالی در تهران و اطراف آن در اختیار مسئولان مربوطه در سازمان‌ها و دستگاه‌های مربوطه قرار دهد.

#### تشکر و قدردانی

از سازمان هواشناسی کشور و سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران و مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران برای

Bao, J-W., Michelson, S. A., Persson, P. O. G., Djalalova, I. V., Wilczak, J. M. (2008). Observed and WRF-simulated low-level winds in a high-ozone episode during the central California ozone study. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47, 2372-2394.

Brier, G. W., & Allen, R. A. (1951). Verification of weather forecasts. In *Compendium of Meteorology*, Malone, T. F., Ed., American Meteorological Society, Boston, 841-848.

Browning, K.A. (1981). Forward to: Nowcasting: Mesoscale observations and short-range

prediction (B. Battrick and J. Mort, eds). *Proceedings of an International Symposium, Hamburg, Germany, 25-28 August*. European Space Agency SP-16.

Chen, W., & Fryrear, D. W. (2002). Sedimentary characteristics of a haboob dust storm. *Atmospheric Research*, 61, 1.

Cheng, F., Hsu, Y-C., Lin, P., & Lin, T-H. (2013). Investigation of the effects of different land use and land cover patterns on mesoscale meteorological simulations in the Taiwan area, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 52, 570-587.

- Doswell III, C. A. (1996). Verification of forecasts of convection: Uses, abuses, and requirements. Proc. of the 5th Australian Sever Thunderstorm Conference, Avoca Beach, New South Wales, Australia.
- DuVivier, A., Cassano, J. (2013). Evaluation of WRF model resolution on simulated mesoscale winds and surface fluxes near Greenland. *Mon. Wea. Rev.*, 141, 941-963.
- Farquharson, J. S. (1937). Haboobs and instability in the Sudan. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 63(271), 393 – 414.
- George, J.J. (1960). Weather Forecasting for Aeronautics, New York City: Academic Press., 673.
- Ghader, S., Yazgi, D., Soltanpour, M., & Nemati, M.H. (2016). On the use of an ensemble forecasting system for prediction of surface wind over the Persian Gulf, in proceedings of the 12th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures (ICOPMAS 2016), Tehran, Iran, 31 Oct. 2 Nov. 2016.
- Hart, K. A., Steenburgh, W. J. , Onton, D. J., & Siffert, A. J. (2004). An evaluation of mesoscale-model-based output statistics (MOS) during the 2002 Olympic and Paralympic games. *Wea. Forecasting*, 19, 200–218.
- Hu, X., Nielsen-Gammon, J., & Zhang, F. (2010). Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the wrf model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49, 1831–1844.
- Idso, S. B., Ingram, R. S., & Pritchard, J. M. (1972). An American haboob. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 53(10), 930-935.
- Jiménez, P. A., & Dudhia, J. (2013). On the ability of the WRF model to reproduce the surface wind direction over complex terrain. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 52, 1610–1617.
- Jolliffe, I. T., & Stephenson, D. B. (2003). Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science. *John Wiley and Sons*, 240pp.
- Juga I., & Vajda A. (2012). The effect of weather on transportation: Assessing the impact thresholds for adverse weather phenomena, SIRWEC 2012, Helsinki, 23-25 May 2012.
- Kok, J. F., Parteli, E. J., Michaels, T. I., & Karam, D. B. (2012). The physics of wind-blown sand and dust. *Reports on Progress in Physics*, 75(10), 106901.
- Lawson, T. J. (1971). Haboob structure at Khartoum. *Weather*, 26, 105–112.
- Means, L. L. (1952). On thunderstorm forecasting in the central United States. *Mon. Wea. Rev.*, 80, 165-189.
- Membery, D. (1985). A gravity-wave haboob?. *Weather*, 40(7), 214–221.
- Miller, R. C. (1972). Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central. Tech. Rept. 200(R). Headquarters, Air Weather Service, USAF, 190 pp.
- Murphy, A. H., & Winkler, R. (1987). A general framework for forecast verification. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 1330–1338.
- Ruiz, J. J., Saulo, C., & Nogues-paegle, J. (2010). WRF model sensitivity to choice of parameterization over South America: validation against surface variables. *Mon. Wea. Rev.*, 138, 3342–3355.
- 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. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50, 1107-1128.
- Shata, A.S.A. (2008). Theoretical investigation and mathematical modeling of a wind energy system case study for Mediterranean and Red sea. *Ph.D. Thesis*, Technische Universität Berlin, Berlin, Germany.
- Showalter, A.K. (1953). A stability indices for thunderstorm forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 34, 250-252.
- Simpson, J. E. (1997). *Gravity currents: In the environment and the laboratory*. Cambridge University press.
- Stefano, M., & Casaioli, M. (2008). Forecast verification: A summary of common approaches and examples of application. FORALPS Technical Report, 5. Università degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Trento, Italy, 60 pp.
- Vitousek Peter, M. (1997). Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences, Ecological applications 7.3.
- Zhang, H., Pu., Z., & Zhang, X. (2013). Examination of errors in near-surface temperature and wind from WRF numerical simulations in regions of complex terrain. *Wea. Forecasting*, 28, 893–914.
- WMO. (2019). 4th African Ministerial Conference On Meteorology (AMCOMET-4): Integrated African Strategy on Weather and Climate Services. WMO: Geneva, Switlerland. [https://amcomet.wmo.int/sites/default/files/field/doc/events/draft\\_africanstrategy-on-weather\\_climate\\_services\\_ver\\_5\\_clean\\_0.pdf](https://amcomet.wmo.int/sites/default/files/field/doc/events/draft_africanstrategy-on-weather_climate_services_ver_5_clean_0.pdf) [accessed 9 February 2021].