


Evaluation of the performance of ERA5 reanalysis data in estimating multiple types of CAPE and CIN convective parameters in upper-air stations in Iran

Pegahfar, N.¹ 

1. Atmospheric Science Research Center, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: pegahfar@inio.ac.ir

(Received: 21 March 2023, Revised: 20 May 2023, Accepted: 26 Sep 2023, Published online: 5 May 2024)

Summary

Estimation of thunderstorm characteristics is important worldwide. Due to scattered nature of upper-air soundings data, reanalysis data is used as another approach. However, using reanalysis data without any evaluation process can lead to increased uncertainty. Iran with its diverse climate conditions, experiences thunderstorms in different parts of the country in different seasons. In this research, around 90,000 sounding measurements were used to evaluate the accuracy of ECMWF Reanalysis v5 (ERA5) in determining all types of the two convective parameters of Convective Available Potential Energy (CAPE) and Convective Inhibition (CIN). The investigation area are limited to nine upper-air stations located in various climate regions including dry, coastal, mountainous and urban areas. The stations are in Tabriz, Mashhad, Tehran, Kermanshah, Esfahan, Ahwaz, Kerman, Shiraz and Zahedan. The analysis was done over a 31-yr period (from the beginning of 1990 to the end of 2020). Data measured at both 00:00 and 12:00 UTC were used. Four calculated types of CAPE parameter were (a) CAPE, (b) surface-based convective available potential energy (SB-CAPE), (c) 0–500 m mixed layer convective available potential energy (ML-CAPE) and (d) most-unstable convective available potential energy (MU-CAPE). Four computed types of CIN parameter were (a) CIN, (b) surface-based convective inhibition (SB-CIN), (c) 0–500 m mixed-layer convective inhibition (ML-CIN) and (d) most-unstable convective inhibition (MU-CIN). The main difference between various types of each convective parameter is referred to that of the focused parcel. The analysis was done using the statistical indices of correlation coefficient (R), mean error (ME), absolute mean error (AME) and root mean square error (RMSE). To filter incomplete and unreal observational profiles, some criteria were imposed on the observational data for quality control. The criteria were as (a) both profiles of temperature and dew point temperature should be measured, (b) the sounding should pass the 6-km height above the surface, (c) the profiles should contain measurements at more than 10 pressure levels, (d) lapse rate in mid-troposphere should be less than 9 K/km, and (e) lapse rate in low-troposphere should be less than 11 K/km. Some criteria were imposed after the calculation of the convective parameters including (a) MU-CAPE values that should be less than 8000 J/kg, (b) ML-CAPE values should be less than 6000 J/kg, and (c) CIN values should be more than -1000 J/kg. The results showed that the two parameters of ML-CAPE and ML-CIN in most stations produced the highest values of correlation coefficient for calculated convective parameters using observational and reanalysis data. Based on ME and MAE indices, ML-CAPE, ML-CIN, and SB-CIN parameters generated the least error in most stations. The RMSE index showed that ML-CAPE and ML-CIN produced the lowest values of error in most stations. In a conclusion, the obtained results indicated that the two convective parameters of CAPE and CIN calculated using air mass in the mixed layer (ML-CAPE and ML-CIN) from ERA5 reanalysis data provided the most reliable values over most stations compared to that of the observational data. Hence, it is suggested that the last mentioned type for the two studied convective parameters be considered for future research studies, especially in simulation of thunderstorms.

Keywords: Convective parameters, ERA5 reanalysis dataset, CAPE, CIN.

Cite this article: Pegahfar, N. (2024). Evaluation of the performance of ERA5 reanalysis data in estimating multiple types of CAPE and CIN convective parameters in upper-air stations in Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 50(1), 231-249. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.356847.1007514>



ارزیابی عملکرد داده‌های ERA5 در برآورد انواع مختلف CAPE و CIN در ایستگاه‌های جو بالا در ایران

نفسه پگاه‌فر^۱ ✉

۱. پژوهشکده علوم جوی، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: pegahfar@inio.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۲/۱/۱، بازنگری: ۱۴۰۲/۲/۳۰، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۷/۴، انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۲/۱۶)

چکیده

یکی از ابزارهای مطالعه توفان‌های تندری داده‌های گمانه‌زنی است که پراکندگی مکانی دارد. با توجه به تفکیک مناسب و پوشش جهانی داده‌های بازتحلیل ERA5، استفاده از نمایه‌های قائم تولیدشده توسط این مجموعه داده در تحقیقات بسیاری مورد استقبال واقع شده است. البته در صورتی داده‌های بازتحلیل در یک مکان می‌تواند اطلاعات مفیدی در اختیار کاربر قرار دهد که قبل از استفاده اعتبارسنجی شده باشد. در این تحقیق اعتبار داده‌های بازتحلیل ERA5 در برآورد دو پارامتر همرفتی CAPE و CIN با استفاده از نود هزار داده مشاهداتی (در نه ایستگاه جو بالا در منطقه ایران) و در بازه زمانی ۳۱ ساله (از ابتدای ۱۹۹۰ تا انتهای ۲۰۲۰) و با استفاده از چهار شاخص آماری R ، ME ، MAE و $RMSE$ ارزیابی شد. در این راستا، انواع پارامتر همرفتی CAPE اعم از CAPE، SB-CAPE، ML-CAPE و MU-CAPE و همچنین انواع پارامتر همرفتی CIN اعم از CIN، SB-CIN، ML-CIN و MU-CIN بررسی شدند. ایستگاه‌ها عبارت بودند از ایستگاه تبریز، مشهد، تهران، کرمانشاه، اصفهان، اهواز، کرمان، شیراز و زاهدان. نتایج نشان داد که پارامترهای ML-CAPE و ML-CIN در ایستگاه‌های بیشتری توانسته‌اند بالاترین همبستگی و کمترین خطا میان مقادیر محاسبه‌شده مشاهداتی و بازتحلیل را تولید کنند. از این‌رو، نتیجه‌گیری می‌شود که با استفاده از داده‌های بازتحلیل ERA5، دو پارامتر همرفتی ML-CAPE و ML-CIN در برآورد CAPE و CIN در بیشتر ایستگاه‌ها عملکرد بهتری داشته و پیشنهاد می‌شود برای محاسبه CAPE و CIN با استفاده از داده‌های بازتحلیل ERA5 در ایستگاه‌های مذکور از دو پارامتر فوق استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: CAPE، CIN، اعتبارسنجی، ERA5.

۱. مقدمه

نماینده‌ای برای احتمال وقوع شرایط مختلف آب‌وهوایی به کار برده شوند (آلن و کارولی، ۲۰۱۴). درک صحیحی از مشخصه‌های هواشناسی پارامترهای همرفتی موجب برآورد دقیق‌تر مکان و زمان وقایع مرتبط می‌شود. از این‌رو، شناخت کیفیت ارتباط میان هموردایی پارامترهای همرفتی برای شناخت بیشتر ویژگی‌های این وقایع و حتی پیش‌بینی به هنگام آنها از اهمیت بالایی برخوردار است.

در مطالعات بسیاری از اطلاعات حاصل از گمانه‌زنی‌ها استفاده شده تا پارامترهایی که به‌عنوان پیش‌نشانگرهای مطلوب توفان تندری هستند، تشخیص داده شوند. این نکته که احتمال مخاطرات همرفتی تابع ناپایداری

توفان‌های تندری سالانه خسارت‌های سنگین اقتصادی و جانی بر مناطق مختلف جهان وارد می‌کنند. علی‌رغم پیشرفت ابزار پیش‌بینی عددی توفان‌های تندری، ناهمگنی فضایی و مدت زمان کوتاه نمونه‌برداری پدیده توفان تندری موجب شده تا تأمین داده معتبر اغلب با مشکل مواجه شود. برای غلبه بر این موارد بسیاری از محققان از هموردایی (Covariance) (<https://glossary.ametsoc.org/wiki/Covariance>)

پارامترهای همرفتی که مبین شرایط محیطی مناسب برای توفان تندری هستند، استفاده کرده‌اند (دُسول و همکاران، ۱۹۹۶). ارتباط میان این پارامترها و وقوع توفان‌های تندری موجب شده تا این پارامترها به‌عنوان

داده‌های بازتحلیل انجام می‌شود، می‌توان به اهمیت داده‌های بازتحلیل در این مورد پی برد. هدف از تولید داده‌های بازتحلیل فراهم آوردن تصویر اقلیمی از شرایط است به گونه‌ای که به واقعیت نزدیک باشند (تورن و ووس، ۲۰۱۰). با وجود عدم قطعیت‌های ذاتی در مدل‌های پیش‌بینی، در داده‌های ورودی و در داده‌گذاری، مهم است که کیفیت داده‌های بازتحلیل ارزیابی شود (هدگس و همکاران، ۲۰۱۱). اهمیت این امر از آنجایی بسیار بالاست که پارامترهای همرفتی اطلاعاتی از کمیت‌های پایه همانند دما، رطوبت و بادها در تازهای مختلف را در بر می‌گیرند و این بررسی آزمون مناسبی برای کیفیت داده‌های بازتحلیل هستند. در کاربست داده‌های بازتحلیل برای مطالعه پارامترهای همرفتی می‌توان به تحقیق بروکس و همکاران (۲۰۰۳) اشاره کرد که از داده‌های جهانی بازتحلیل NCEP-NCAR (National Center for Atmospheric Research/United States National Centers for Environmental Prediction) استفاده کردند تا متغیرهای کمکی متمایزی توسعه دهند که میزان احتمال محیط مستعد برای تولید توفان‌های تندی شدید و پیچندهای شدید را تعیین می‌کنند. آنها مناطق مستعد برای توفان‌های تندی شدید را در طول نوار مداری روی اروپای جنوبی و مرکزی شناسایی کردند. جنسینی و همکاران (۲۰۱۴) داده‌های بازتحلیل NCEP-NCAR را برای ایالت متحده آمریکا، آلن و کارولی (۲۰۱۴) داده‌های بازتحلیل ERA-Interim از مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های جوی میان مدت (ECMWF) را برای استرالیا و پیستوتینیک و همکاران (۲۰۱۶) و تازارک و همکاران (۲۰۱۸) داده‌های بازتحلیل ERA-Interim را برای اروپا بررسی کردند. تازارک و همکاران (۲۰۱۸) نزدیک به یک میلیون گمانه‌زنی از ERA-Interim در بازه سی و هشت ساله ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۶ را استفاده کردند و نشان دادند که داده‌های ERA-Interim پارامترهای رطوبت لایه مرزی و آهنگ کاهش دما در وردسپهرمیان را با ضریب همبستگی ۰/۹۴ به خوبی برآورد می‌کند. البته ERA-Interim مقدار CAPE در لایه آمیخته را به طور

ترمودینامیکی است در تحقیقات بسیاری تأیید شده است (پوسیک و همکاران، ۲۰۱۵؛ تازارک و همکاران، ۲۰۱۷). یکی از این پارامترهای ترمودینامیکی انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر همرفتی (Convective Available Potential Energy) است که وقوع توفان تندی به شدت به آن وابسته است. مقدار این پارامتر در توفان‌های تندی با و بدون آذرخش بین 100 J/kg تا 200 J/kg تفاوت دارد (تازارک و همکاران، ۲۰۱۷). طبق یافته‌های وسترمایر و همکاران (۲۰۱۷) احتمال آذرخش در زمانی که CAPE بیش از 400 J/kg باشد و مقدار بازدارنده همرفتی (Convective Inhibition) CIN کمتر از 50 J/kg نباشد به مراتب بیشتر است. البته وابستگی مکانی ایمن مقادیر بایستی مورد توجه قرار گیرد، برای نمونه، گروندوالد و بروکس (۲۰۱۱) نشان دادند که در اروپا پیچندها اغلب با CAPE کمتری نسبت به ایالات متحده آمریکا شکل می‌گیرند.

کارایی بالای پارامترهای همرفتی در درک درصد احتمال رویداد یک پدیده خاص در مناطق مختلف موجب شده تا در بررسی‌های اقلیمی نیز مورد توجه واقع شوند. برای نمونه، بررسی چرخه سالانه پارامترهای همرفتی در مکان‌های متنوع اروپا نشان داد که شرایط مطلوب برای توفان‌های تندی شدید اغلب طی بهار و تابستان رخ می‌دهد (بروکس و همکاران، ۲۰۰۷) و بیشترین مقدار متوسط CAPE در نیمه جنوبی و جنوب شرقی اروپا در تابستان و در نیمه غربی در زمستان رخ داده است (ریمن-کامپ و همکاران، ۲۰۰۹). اهمیت پارامترهای همرفتی از دید اقلیم‌شناسان هم پنهان نمانده و در بسیاری از مطالعات پدیده همرفت و توفان‌های همرفتی با استفاده از برون‌دادهای مدل‌های اقلیمی بررسی شده و افزایش تعداد محیط‌هایی با توفان‌های تندی شدید در شبیه‌سازی‌ها به ثبت رسیده است، برای نمونه، مارش و همکاران (۲۰۰۹) برای اروپا، پوسیک و همکاران (۲۰۱۷) برای مرکز و شرق اروپا و ویستو و همکاران (۲۰۱۷) برای شبه جزیره ایبری.

از آنجا که اعتبارسنجی اغلب مدل‌های اقلیمی به کمک

میانگین فروتخمین کرده بود، در حالی که اغلب CAPE های محاسبه شده با استفاده از ناپایداریترین بسته هوا را فراتخمین کرده بود. تازارک و همکاران (۲۰۲۱ب) نیز با بررسی ۴ دهه گذشته داده های بازتحلیل نسل پنجم (ERA5) از مرکز اروپایی پیش بینی میان مدت وضع هوا دریافتند که در منطقه عرض های میانی میزان CAPE افزایش یافته در حالی که برای منطقه حاره و جنب حاره کاهش یافته است. علی رغم این که وانگ و همکاران (۲۰۲۱) اعتبار داده های بازتحلیل در شناسایی توزیع CAPE را زیر سؤال بردند، اما پیلگوج و همکاران (۲۰۲۲) در منطقه ایالت متحده آمریکا در بازه ۲۰۱۸-۱۹۸۰، عملکرد داده های ERA5 در شناسایی روند CIN را مناسب ارزیابی کردند. عملکرد مختلف داده های بازتحلیل در برآورد مشخصه های انواع پارامترهای مختلف، نیاز به اعتبارسنجی آنها در هر منطقه و برای هر نوع پارامتر را بیش از پیش آشکار می سازد.

در ایران نیز شاخص های ناپایداری مورد توجه هواشناسان واقع شده اند. برای نمونه، صادقی حسینی و رضائیان (۱۳۸۵) با بررسی شاخص CAPE در اصفهان در دوره ۱۹۹۱-۲۰۰۲ مقدار 100 J/kg را برای منطقه اصفهان به عنوان آستانه مناسب برای بارورسازی ابر معرفی کردند. مجرد و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از ERA-Interim برای ۴۵۴۲ رخداد توفان تندری نشان دادند که داده های بازتحلیل مقدار CAPE را اندکی بیش از مقادیر مشاهداتی تخمین می زند و بیشترین میزان CAPE را در استان های جنوبی و جنوب غرب سواحل خزر به دست آوردند. قویدل رحیمی و همکاران (۱۳۹۷) شاخص های ترمودینامیکی CAPE و CIN را در دوره وقوع چرخند حاره ای نیلوفر بررسی کردند و نشان دادند که مقدار این دو کمیت در آن زمان در بهترین وضعیت ممکن برای شکل گیری و توسعه چرخند حاره ای بوده است. صالح و همکاران (۲۰۲۳) عملکرد شاخص مخاطره آذرخش متشکل از پارامتر CAPE را در شناسایی مناطق رخداد آذرخش برای ۷ رخداد در منطقه تهران بررسی کردند و نشان دادند که شاخص مذکور عملکرد قابل قبولی در

پیش بینی مکان های رخداد آذرخش برای موارد مطالعاتی در تهران دارد. طهماسبی پاشا و همکاران (۱۴۰۰) با بررسی ارتباط میان دورپیوندها و شاخص های همرفتی در منطقه غرب آسیا نشان دادند که بیشترین افزایش شاخص CAPE طی فاز منفی NAO (شرق اطلس/غرب روسیه) نسبت به فاز مثبت آن در دریای عمان (شرق هند) به بیش از 250 J/kg و 450 J/kg و طی فاز مثبت دوقطبی اقیانوس هند (نوسان مادر- جولیان) نسبت به فاز منفی آن در غرب هند (دریای عمان) به بیش از 450 J/kg و 600 J/kg می رسد. با این حال تاکنون در هیچ تحقیقی عملکرد داده های بازتحلیل در برآورد پارامترهای همرفتی در ایران انجام نشده است. در این پژوهش سعی شده تا اعتبار داده های بازتحلیل ERA5 برای برآورد دو پارامتر همرفتی CAPE و CIN در تمامی ایستگاه های گمانه زنی ایران ارزیابی شود. با توجه به تنوع اقلیمی ایستگاه های مورد نظر و مقادیر متفاوت ارتفاع از سطح دریا در هر ایستگاه تمامی انواع این پارامترها مورد توجه قرار گرفت. در ادامه بعد از بیان داده ها و روش کار (بخش ۲)، نتایج عینی و تحلیل های آماری در بخش ۳ و سپس نتیجه گیری در بخش ۴ ارائه می شود.

۲. داده ها و روش کار

در این بخش به ترتیب داده های مورد استفاده، پارامترهای همرفتی ارزیابی شده و شاخص های آماری به کار رفته بیان خواهد شد.

۲-۱. داده ها

داده های به کار رفته در این تحقیق شامل دو دسته داده بازتحلیل و مشاهداتی است که در ادامه ویژگی های آنها بیان خواهد شد.

۲-۱-۱. داده های بازتحلیل ERA5

در این تحقیق از داده های بازتحلیل ERA5 (برگرفته از <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=overview>) در بازه زمانی ۳۱ ساله (از ابتدای ۱۹۹۰ تا انتهای ۲۰۲۰)

۲-۲. پارامترهای CAPE و CIN

برای محاسبه CAPE و CIN از رابطه پیشنهادشده توسط هویز و والاس (۱۹۷۷) به صورت ذیل استفاده شده است:

$$CAPE = -R_d \int_{LFC}^{EL} (T_{parcel} - T_{env}) dln(p) \quad (1)$$

$$CIN = -R_d \int_{SFC}^{LFC} (T_{parcel} - T_{env}) dln(p) \quad (2)$$

که در آن LFC (Level of Free Convection)، EL، T_{parcel} ، R_d ، (Surface) SFC، (Equilibrium Level) و T_{env} به ترتیب فشار تراز همرفت آزاد، فشار تراز تعادل، تراز سطح یا شروع مسیر بسته هوا، ثابت گاز برای هوای خشک، دمای بسته هوا، دمای محیط و فشار جو را نشان می‌دهند. در جدول ۲ فهرست انواع CAPE و CIN محاسبه شده در این تحقیق نمایش داده شده است. انتخاب نوع بسته هوا و مسیر آن برای مثال این که آیا از سطح زمین شروع به بالاروی کند و یا این که ناپایدارترین بسته هوا مورد بررسی قرار گیرد، موجب شده تا این پارامتر در انواع مختلفی تعریف شود (بونکر و همکاران، ۲۰۰۲). انواع CAPE و CIN فهرست شده در جدول ۲ ارائه شده است. این که کدام نوع پارامتر مورد بررسی قرار گیرد بر حسب نوع تحقیق می‌تواند متفاوت باشد. برای نمونه، برخی محققان معتقدند که MLCAPE برای تشخیص ویژگی‌های میانگین بسته هوایی که با همرفت آغازگری می‌شود، مناسب‌تر است و MU CAPE ویژگی‌های حدی همرفت را بهتر به نمایش می‌گذارد (کراون و همکاران، ۲۰۰۲؛ بونکر و همکاران، ۲۰۰۲؛ بروکس و همکاران، ۲۰۰۳). اما وانگ و همکاران (۲۰۲۱) ترجیح دادند که از پارامتر SB CAPE استفاده کنند، زیرا معتقد بودند که این پارامتر در جامعه اقلیمی بیشتر استفاده شده است (برای نمونه، سینگ و همکاران، ۲۰۱۷) و این که چندین پارامترسازی همرفت با بستار CAPE-relaxing از این پارامتر استفاده می‌کنند (وانگ و همکاران، ۲۰۱۵). در ادامه هر پارامتر به اختصار توضیح داده می‌شود.

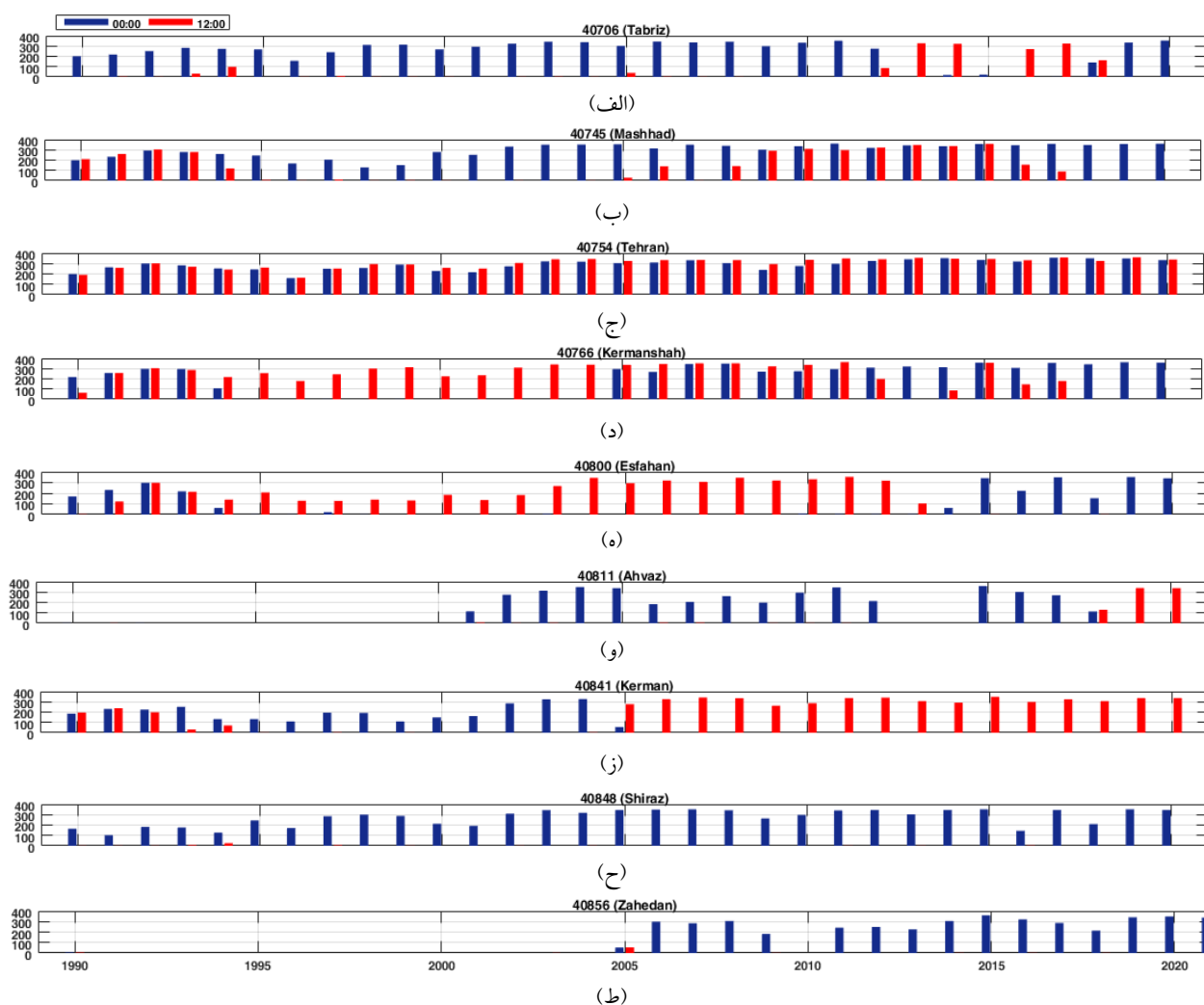
استفاده شد. تفکیک داده‌های بازتحلیل ۰/۲۵ درجه در راستای طول و عرض جغرافیایی است. داده‌های دما، بردار باد، ارتفاع ژئوپتانسیلی، رطوبت نسبی و رطوبت ویژه در ترازهای فشاری از ۱۰۰۰ hPa تا ۱ hPa استفاده شدند. همچنین از داده‌های دما و دمای نقطه شبنم در ارتفاع ۲ متری و سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری نیز استفاده شده است. از تقریب نزدیک‌ترین نقطه شبکه‌ای برای استخراج اطلاعات در مکان هر ایستگاه استفاده شده است.

۲-۱-۲. داده‌های مشاهداتی

داده‌های رادیوگمانه از داده‌های گمانه‌زنی دانشگاه وایومینگ از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ برای ساعت‌های UTC ۰۰:۰۰ و ۱۲:۰۰ برای ۹ ایستگاه جو بالا در کشور ایران استفاده شدند. مشخصات طول و عرض جغرافیایی ایستگاه و نزدیک‌ترین نقطه شبکه‌ای به ایستگاه و تعداد داده‌های برداشت شده در کل دوره به تفکیک برای ساعت‌های یادشده در جدول ۱ آورده شده است. عواملی همچون (۱) تنوع اقلیمی ایستگاه‌های مورد مطالعه، (۲) فصلی بودن پدیده‌ها در هر منطقه و نبود تحقیق جامعی از زمان واقعی پدیده‌های توفان تندری (همچون پیچند، تگرگ بزرگ و بادهای جستی شدید) در هر ایستگاه موجب شد تا هر دو زمان UTC ۰۰:۰۰ و ۱۲:۰۰ برای بررسی مورد آزمون قرار گیرد. همان‌طور که جدول ۱ نشان می‌دهد، تعداد داده‌های برداشت شده در ساعت‌های UTC ۰۰:۰۰ و ۱۲:۰۰ یکسان نبوده و با توجه به محدودیت‌های موردنیاز برای محاسبه پارامترهای CAPE و CIN تعداد گمانه‌زنی‌ها بعد از فرایند کنترل کیفی که در ادامه شرح داده شده است، از ۸۹۲۴۰ عدد به ۵۲۰۰۵ عدد کاهش یافت. توزیع داده‌های هر ایستگاه در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌ها.

ردیف	نام ایستگاه	شناسه ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی نزدیک‌ترین نقطه شبکه	عرض جغرافیایی نزدیک‌ترین نقطه شبکه	تعداد داده‌ها در UTC ۰۰:۰۰	تعداد داده‌ها در UTC ۱۲:۰۰	تعداد کل	تعداد داده بعد از کنترل کیفیت
۱	تبریز	۴۰۷۰۶	۴۶/۲۸	۳۸/۰۸	۴۶/۲۵	۳۸/۰	۷۵۲۸	۱۶۹۶	۹۲۲۴	۵۲۱۳
۲	مشهد	۴۰۷۴۵	۵۹/۶۳	۳۶/۲۶	۵۹/۷۵	۳۶/۲۵	۹۱۹۵	۴۰۱۰	۱۳۲۰۵	۸۱۸۴
۳	تهران	۴۰۷۵۴	۵۱/۳۵	۳۵/۶۸	۵۱/۲۵	۳۵/۷۵	۸۹۶۹	۹۴۱۷	۱۸۳۸۶	۱۰۹۹۳
۴	کرمانشاه	۴۰۷۶۶	۴۷/۱۱	۳۴/۲۶	۴۷/۰	۳۴/۲۵	۶۲۹۹	۷۲۳۹	۱۳۵۳۵	۷۸۷۷
۵	اصفهان	۴۰۸۰۰	۵۱/۷۱	۳۲/۴۶	۵۱/۷۵	۳۲/۵	۲۸۴۰	۵۳۰۸	۸۱۴۸	۴۵۲۸
۶	اهواز	۴۰۸۱۱	۴۸/۶۷	۳۱/۳۳	۴۸/۷۵	۳۱/۲۵	۴۱۳۵	۸۳۰	۴۹۶۵	۳۲۸۴
۷	کرمان	۴۰۸۴۱	۵۶/۹۶	۳۰/۲۵	۵۷/۰	۳۰/۰	۳۰۶۳	۵۷۹۸	۸۸۶۱	۴۴۳۲
۸	شیراز	۴۰۸۴۸	۵۲/۵۸	۲۹/۵۳	۵۲/۵	۲۹/۵	۸۴۳۹	۵۰	۸۴۸۹	۴۱۶۴
۹	زاهدان	۴۰۸۵۶	۶۰/۸۸	۲۹/۴۶	۶۱/۰	۲۹/۵	۴۳۵۷	۷۰	۴۴۲۷	۳۳۳۰



شکل ۱. میزان برداشت داده در ساعت‌های UTC ۰۰:۰۰ (میل‌های آبی) و UTC ۱۲:۰۰ (میل‌های قرمز) در هر سال برای ایستگاه‌های (الف) تبریز، (ب) مشهد، (ج) تهران، (د) کرمانشاه، (ه) اصفهان، (و) اهواز، (ز) کرمان، (ح) شیراز و (ط) زاهدان از ابتدای ۱۹۹۰ تا انتهای ۲۰۲۰.

جدول ۲. انواع CAPE و CIN محاسبه شده.

ردیف	پارامتر	حروف اختصاری	واحد
۱	انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر همرفتی	CAPE	
۲	انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر همرفتی برای بسته هوا از سطح زمین	Surface based CAPE (SB CAPE)	J/ kg
۳	ناپایدارترین انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر همرفتی	Most Unstable CAPE (MU CAPE)	J/ kg
۴	انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر همرفتی لایه آمیخته از سطح زمین تا ۵۰۰ متری	Mixed Layer CAPE (ML CAPE)	J/ kg
۵	بازدارنده همرفت	CIN	J/ kg
۶	بازدارنده همرفت در سطح زمین	Surface based CIN (SB CIN)	J/ kg
۷	بازدارنده همرفت برای بسته هوای ناپایدار	Most Unstable CIN (MU CIN)	J/ kg
۸	بازدارنده همرفت در لایه آمیخته (از سطح زمین تا ۵۰۰ متری)	Mixed Layer CIN (ML CIN)	J/ kg

SB-CAPE .۲-۲-۱

پارامتر SB-CAPE (Surface Based Convective) میزان ناپایداری در وردسپهر را نشان می‌دهد. این پارامتر مقدار کلی انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر همرفتی را برای بسته هوایی نشان می‌دهد که از سطح زمین به سمت بالا حرکت می‌کند و تا تراز همرفت آزاد بالا می‌رود. این بسته هوا هیچ درون‌آمیزی با محیط بیرون ندارد و بر اساس تصحیح دمای مجازی محاسبه می‌شود. برای محاسبه SB-CAPE بین تراز همرفت آزاد و تراز تعادل انتگرال‌گیری انجام می‌شود و نقاط تقاطع نیمرخ دمای مشاهداتی و نیمرخ دمای بسته به‌طور لگاریتمی درون‌یابی می‌شود. تازارک و همکاران (۲۰۱۸) دریافتند که ضریب همبستگی میان SB-CAPE مشاهداتی و بازتحلیل ERA5 تقریباً ۰/۷ است. همچنین نشان دادند که در اروپای شرقی خطای مطلق ناشی از کاربست SB-CAPE تقریباً یک دهم میزان خطای مطلق تولیدشده توسط ML-CAPE است در حالی که در غرب و جنوب اروپا و اروپای مرکزی و بالکان چنین نبوده است. وارگا و بروئر (۲۰۲۲) نشان دادند که در شرق و مرکز اروپا همبستگی میان SB-CAPE حاصل از مشاهداتی و داده‌های بازتحلیل ERA5 بیش از سایر انواع CAPE است و نتایج آنها حتی در شبیه‌سازی‌های با استفاده از مدل Weather Research and Forecasting Model نیز اثبات شد.

ML-CAPE .۲-۲-۲

پارامتر ML-CAPE (Mixed Layer Convective) میزان دسترس‌پذیر همرفتی لایه آمیخته نامیده می‌شود، میزان ناپایداری در وردسپهر را نشان می‌دهد. این پارامتر مقدار متوسط انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر همرفتی را برای بسته هوایی که در ۱۰۰ hPa ابتدایی جو قرار دارد نشان می‌دهد که تا تراز همرفت آزاد بالا می‌رود. این بسته هیچ درون‌آمیزی با محیط ندارد و بر اساس تصحیح دمای مجازی محاسبه می‌شود. با توجه به تغییرات فصلی و شبانه‌روزی ارتفاع لایه آمیخته، پارامترهای موردنیاز در تمام موارد از ۵۰۰ متر ابتدایی این لایه استخراج و استفاده شد (مشابه با روش کار تازارک و همکاران، ۲۰۱۸). برای محاسبه ML-CAPE بین تراز همرفت آزاد و تراز تعادل انتگرال‌گیری انجام می‌شود و نقاط تقاطع نیمرخ دمای مشاهداتی و نیمرخ دمای بسته به‌طور لگاریتمی درون‌یابی می‌شود.

MU-CAPE .۲-۲-۳

پارامتر MU-CAPE (Most Unstable Convective) که ناپایدارترین انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر همرفتی نامیده می‌شود، میزان ناپایداری در وردسپهر را نشان می‌دهد. این پارامتر مبین مقدار کلی انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر برای بسته هوایی

است که بیشینه دمای پتانسیل هم‌ارز (Equivalent Potential Temperature) را در ۳۰۰ هکتوپاسکال ابتدایی جو دارد و تا تراز LFC بالا می‌رود. این بسته هیچ درون‌آمیزی با محیط ندارد و بر اساس تصحیح دمای مجازی محاسبه می‌شود. برای محاسبه MU-CAPE بین تراز همرفت آزاد و تراز تعادل انتگرال‌گیری انجام می‌شود و نقاط تقاطع نیمرخ دمای مشاهداتی و نیمرخ دمای بسته به‌طور لگاریتمی درون‌یابی می‌شود.

۴-۲-۲. CIN

پارامتر CIN که بازدارنده همرفت نامیده می‌شود، منطقه‌ای منفی در دیاگرام ترمودینامیک است. بازدارنده همرفت مقدار انرژی جنبشی است که باید به بسته هوا داده شود تا بتواند خود را به تراز همرفت آزاد برساند. از این‌رو، بایستی قبل از آغازگری توفان بر آن غلبه شود. برای محاسبه انواع پارامتر CIN از همان شرایط که برای پارامتر CAPE گفته شد، استفاده می‌شود. البته برای محاسبه CIN از سطح تا تراز همرفت آزاد انتگرال گرفته می‌شود. برای محاسبه پارامترهای ذکرشده از گمانه‌زنی‌های مشاهداتی و بازتحلیل استفاده شد. برای هر گمانه‌زنی نیمرخ‌های قائم فشار، ارتفاع، دما، دمای نقطه شبنم و بردار باد در راستای قائم به‌طور خطی درون‌یابی شد. بعد از استخراج پارامترهای موردنیاز از ۵۰۰ متر ابتدایی لایه آمیخته، تصحیح دمای مجازی انجام شد (دسول و راسموسن، ۱۹۹۴).

۳-۲. کنترل کیفی داده‌ها

با توجه به بازه مورد بررسی و حجم وسیع داده، احتمال وجود خطاهای متنوع اعم از نیمرخ‌های ناقص و مقادیر غیرواقعی یا نامعتبر در مجموعه داده دور از انتظار نیست. از این‌رو نیاز است تا قبل از شروع کار کیفیت مجموعه داده کنترل شود. برای این منظور ابتدا داده‌های ناقص از مجموعه داده حذف شدند. برای نمونه، تاریخ‌هایی که در آن نیمرخ قائم دما اندازه‌گیری شده ولی نیمرخ قائم دمای نقطه شبنم اندازه‌گیری نشده بود، حذف شدند. سپس

گمانه‌زنی‌هایی که تا قبل از رسیدن به ارتفاع ۶ کیلومتری از سطح زمین متوقف شده بودند و یا در کمتر از ۱۰ تراز فشاری مقادیر اندازه‌گیری را ثبت کرده بودند، کنار گذاشته شدند. در ادامه گرادیان‌های دما و باد بررسی شدند. طبق روش تحقیق تازارک و همکاران (۲۰۱۸) گمانه‌زنی‌هایی که شامل موارد زیر بودند نیز حذف شدند: الف) چنانچه آهنگ کاهش دما در وردسپهر میانی بیش از ۹ درجه کلون در هر کیلومتر باشد، ب) چنانچه آهنگ کاهش دما در وردسپهر پایین بیش از ۱۱ درجه کلون در هر کیلومتر باشد، ج) چنانچه مقدار MU-CAPE بیش از 8000 J/kg به‌دست آمده باشد، د) چنانچه مقدار ML-CAPE بیش از 6000 J/kg به‌دست آمده باشد، ه) چنانچه مقدار CAPE بیش از 6500 kg به‌دست آمده باشد و و) چنانچه مقدار CIN کمتر از 1000 J/kg به‌دست آمده باشد.

تعداد گمانه‌زنی‌های کنترل کیفی‌شده در هر ایستگاه در شکل ۱ و جدول ۱ نشان داده شده است. از جمله محدودیت‌های این تحقیق تغییر کیفیت اندازه‌گیری‌ها به‌ویژه رطوبت در گذر زمان است. محدودیت دیگر محاسبه شبه‌گمانه‌زنی (Pseudo Sounding) با استفاده از داده‌های ERA5 است، زیرا در مناطق کوهستانی و ساحلی امکان دارد مکان انتخاب‌شده (با استفاده از نزدیک‌ترین نقطه شبکه‌ای) به‌خوبی نماینده ایستگاه موردنظر نباشد. البته در این تحقیق طبق جدول ۱ فاصله نزدیک‌ترین نقطه شبکه‌ای به ایستگاه‌ها در حد صدم درجه بوده که با توجه به استانداردهای موردنیاز برای تأسیس ایستگاه هواشناسی و همچنین مشابه با روش تحقیق استفاده‌شده توسط وارگا و بروئر (۲۰۲۲) و همچنین تازارک و همکاران (۲۰۱۸)، می‌توان از خطای ناشی از این امر صرف‌نظر کرد. همچنین تغییر نمایش لایه مرزی و محدودیت تعداد تراز در راستای قائم در داده‌های ERA5 (۳۰ تراز) نسبت به گمانه‌زنی‌های مشاهداتی (به‌طور میانگین تا ۴۷ تراز) نیز می‌تواند بر نتایج اعتبارسنجی تاثیر داشته باشد که با توجه به پارامتر انتخابی و تمرکز بر ۶ کیلومتر ابتدایی جو می‌توان از این خطا نیز چشم‌پوشی

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{n}}, \quad (5)$$

$$R = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{O_i - \bar{O}}{\sigma_O} \right) * \left(\frac{M_i - \bar{M}}{\sigma_M} \right) \right), \quad (6)$$

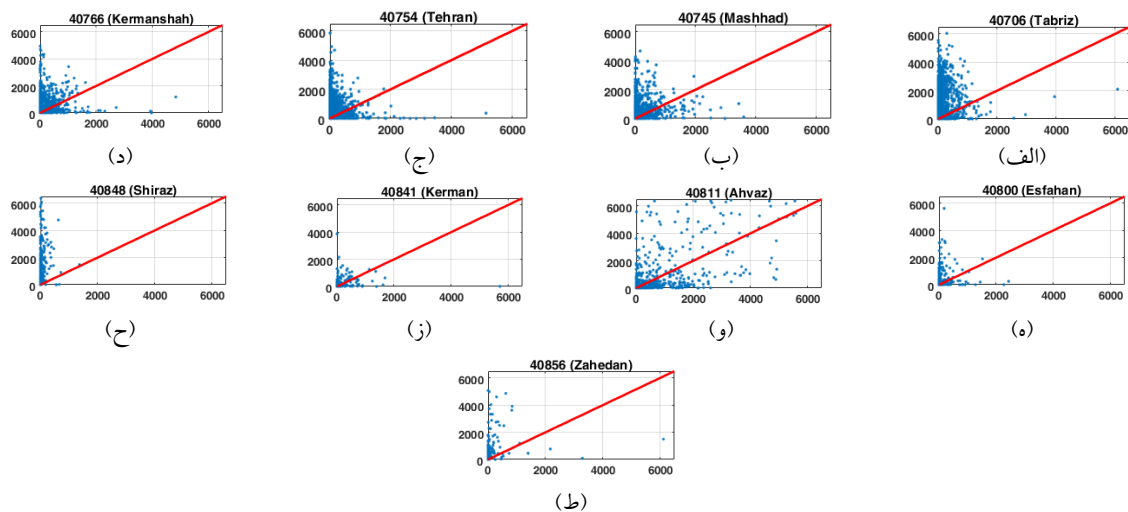
که در آن O و M به ترتیب مقادیر مشاهداتی و ERA5 را نشان می‌دهند. زیرنویس \bar{O} معرف رویداد مطالعاتی و n تعداد رویداد مورد استفاده در هر ایستگاه و σ نشانه انحراف معیار می‌باشد.

۳. نتایج

در این مقاله از داده‌های گمانه‌زنی مشاهداتی به‌عنوان پایه‌ای برای ارزیابی داده‌های بازتحلیل استفاده خواهد شد.

۳-۱. تحلیل عینی

به‌منظور فراهم‌آوردن درک واضح‌تر و همچنین مقایسه عینی از میزان دقت مقادیر انواع CAPE و CIN و محاسبه‌شده با استفاده از داده‌های بازتحلیل نسبت به مقادیر مشاهداتی در ایستگاه‌های مختلف، شکل‌های ۲ تا ۹ ترسیم شد. در شکل‌های ۲ تا ۵ به ترتیب مقادیر محاسبه‌شده SB-CAPE، CAPE، ML-CAPE و MU-CAPE با استفاده از داده‌های گمانه‌زنی مشاهداتی و بازتحلیل برای تمامی ایستگاه‌ها به تصویر کشیده شده است.



شکل ۲. مقادیر محاسبه‌شده CAPE با استفاده از داده‌های بازتحلیل (محور قائم) بر حسب مقادیر محاسبه‌شده با استفاده از داده‌های مشاهداتی (محور افقی) برای ایستگاه‌های (الف) تبریز، (ب) مشهد، (ج) تهران، (د) کرمانشاه، (ه) اصفهان، (و) اهواز، (ز) کرمان، (ح) شیراز و (ط) زاهدان.

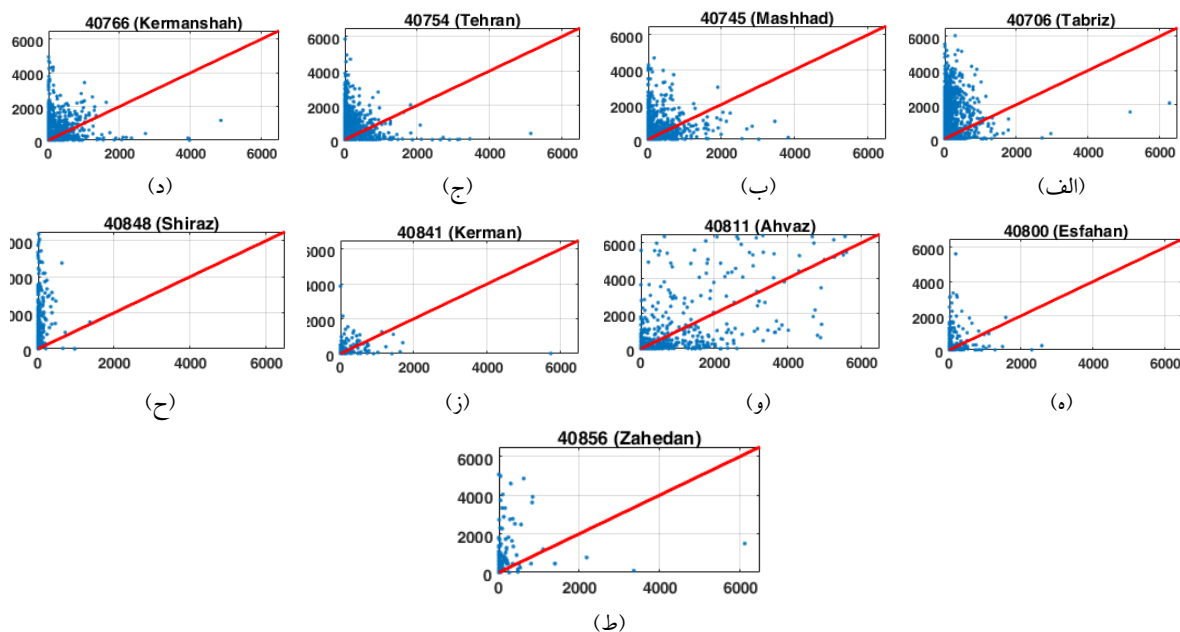
کرد. البته طبق یافته‌های تازارک و همکاران (۲۰۱۸) برای منطقه شرق و جنوب اروپا، به‌طور میانگین داده‌های بازتحلیل نسبت به مشاهداتی نماینده بهتری هستند. از طرفی به دلیل تفکیک افقی داده‌های بازتحلیل، در مدل تولیدکننده داده‌های بازتحلیل از پارامترسازی همرفت استفاده می‌شود که به دلیل تقریب‌های مرتبط با پارامترسازی می‌تواند منجر به تولید خطا در نمایه قائم دما و رطوبت و نهایتاً CAPE شود. از طرف دیگر کمیت‌های مرتبط با ترازهای پایین می‌توانند تحت تأثیر طرحواره‌های پارامترسازی لایه مرزی واقع شوند که بررسی دقیق تأثیر آن بر نتایج فراتر از اهداف این مقاله است.

۴-۲. شاخص‌های آماری

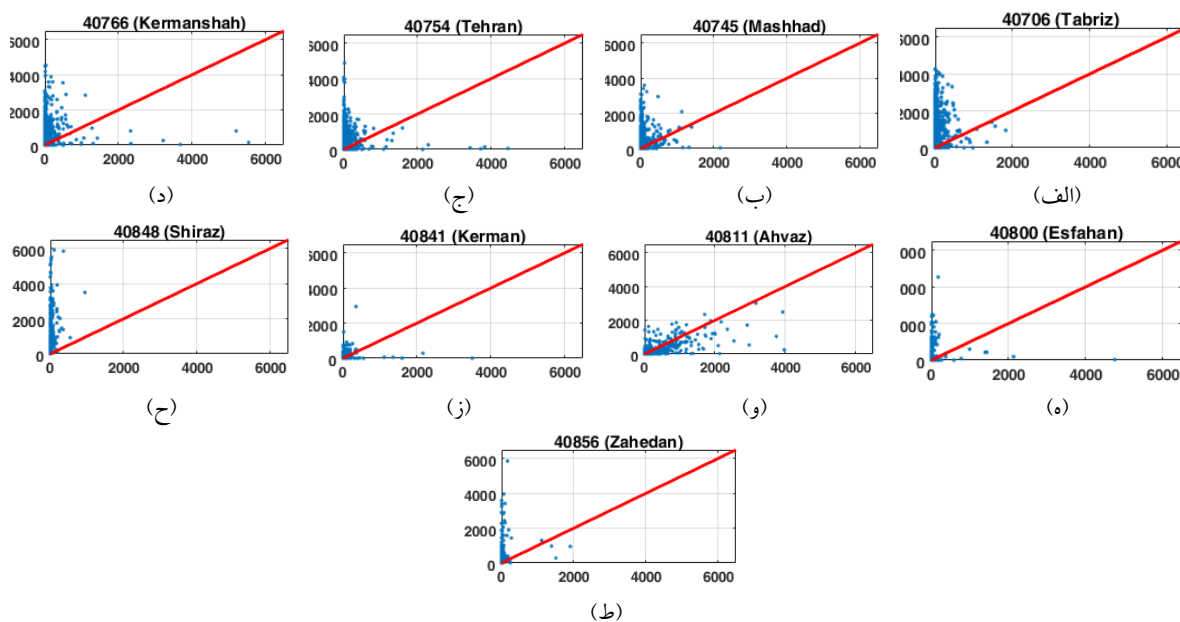
شاخص‌های آماری استفاده‌شده در این تحقیق عبارت‌اند از خطای متوسط (Mean Error, ME)، خطای مطلق متوسط ((Mean Absolut Error, MAE)، همبستگی با سطح اطمینان ۹۵ درصد (Correlation, R) و ریشه میانگین مربع خطا (Root Mean Square Error, RMSE) که روابط استفاده‌شده برای محاسبه آنها در ذیل آورده شده است:

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)}{n}, \quad (3)$$

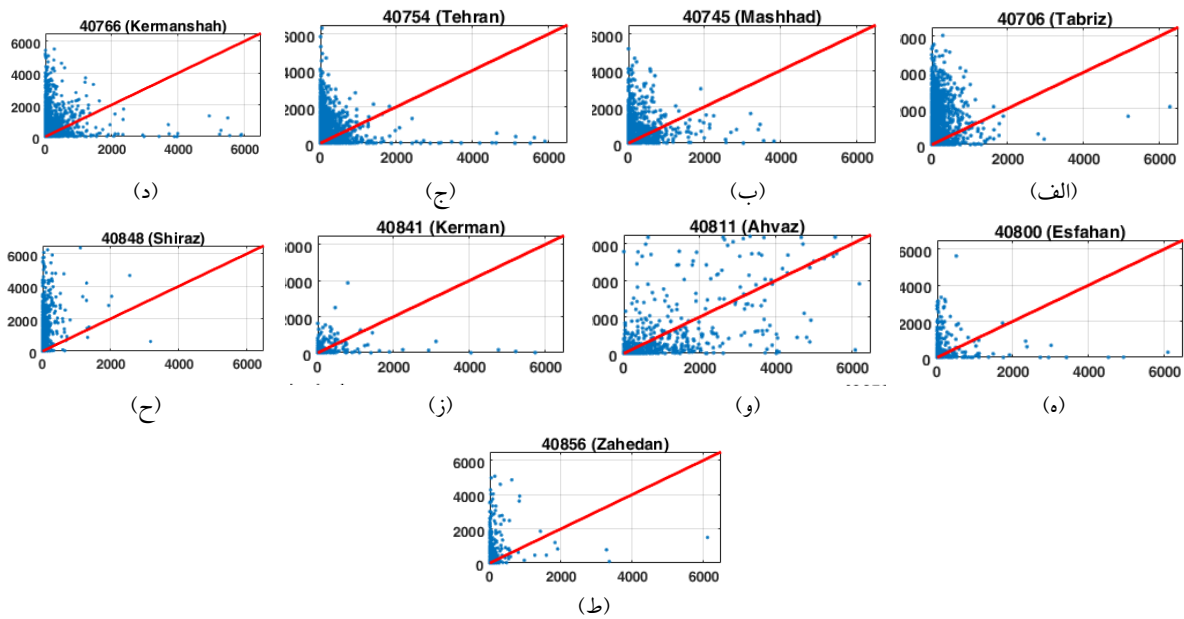
$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |M_i - O_i|}{n}, \quad (4)$$



شکل ۳. مقادیر محاسبه شده SB-CAPE با استفاده از داده‌های بازتحلیل (محور قائم) بر حسب مقادیر محاسبه شده با استفاده از داده‌های مشاهداتی (محور افقی) برای ایستگاه‌های (الف) تبریز، (ب) مشهد، (ج) تهران، (د) کرمانشاه، (ه) اصفهان، (و) اهواز، (ز) کرمان، (ح) شیراز و (ط) زاهدان.

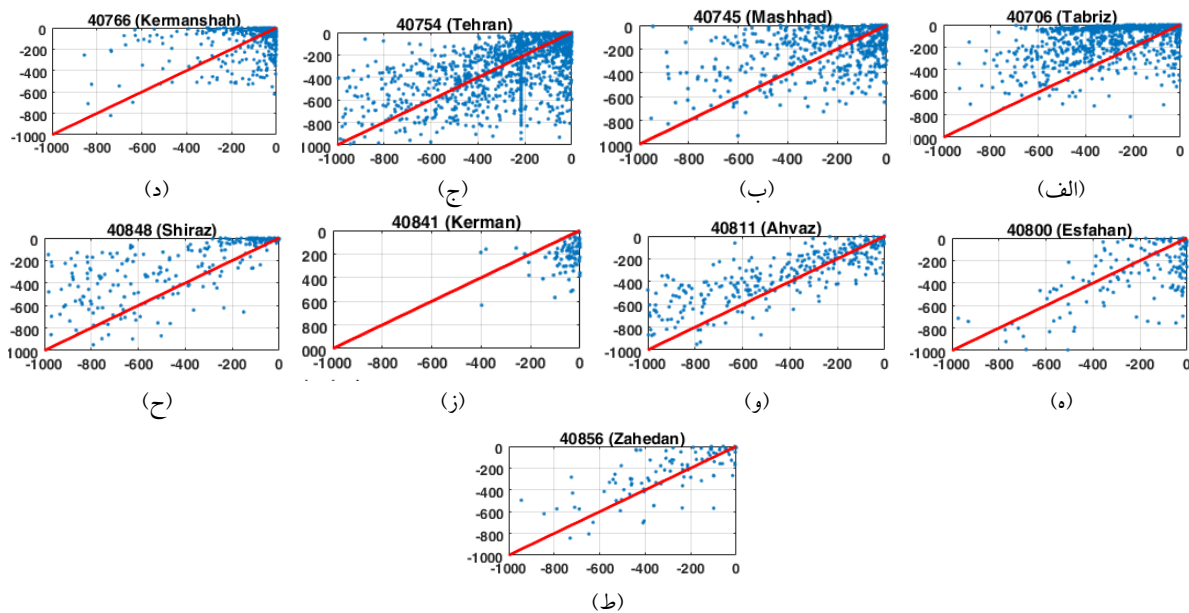


شکل ۴. مقادیر محاسبه شده ML-CAPE با استفاده از داده‌های بازتحلیل (محور قائم) بر حسب مقادیر محاسبه شده با استفاده از داده‌های مشاهداتی (محور افقی) برای ایستگاه‌های (الف) تبریز، (ب) مشهد، (ج) تهران، (د) کرمانشاه، (ه) اصفهان، (و) اهواز، (ز) کرمان، (ح) شیراز و (ط) زاهدان.

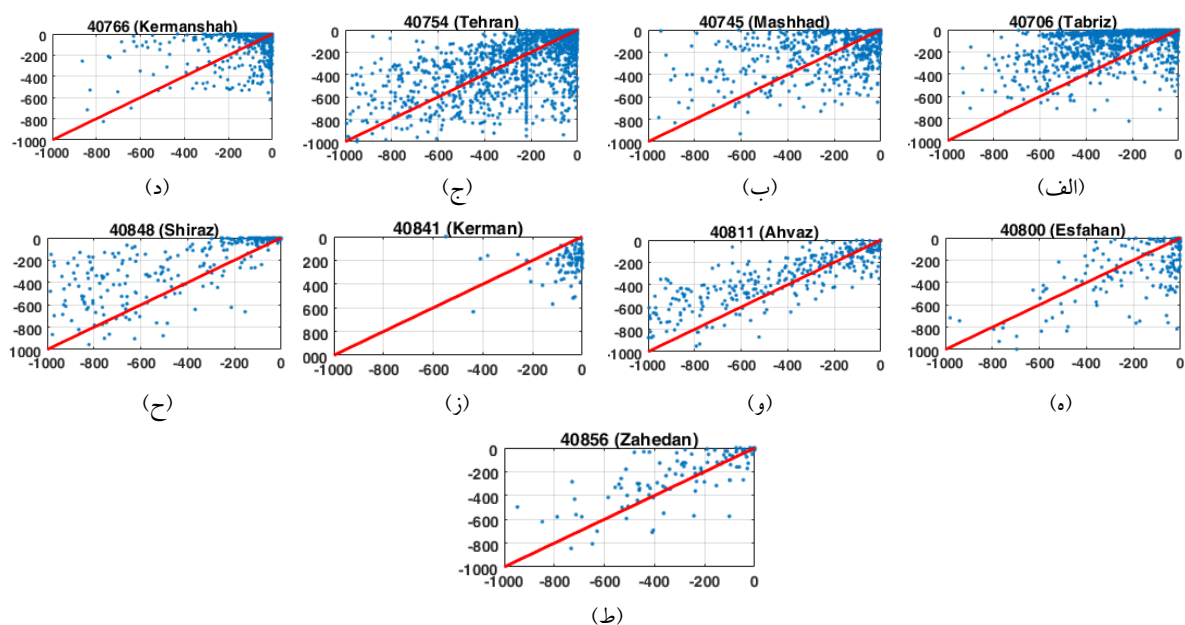


شکل ۵. مقادیر محاسبه شده MU-CAPE با استفاده از داده‌های بازتحلیل (محور قائم) بر حسب مقادیر محاسبه شده با استفاده از داده‌های مشاهداتی (محور افقی) برای ایستگاه‌های (الف) تبریز، (ب) مشهد، (ج) تهران، (د) کرمانشاه، (ه) اصفهان، (و) اهواز، (ز) کرمان، (ح) شیراز و (ط) زاهدان.

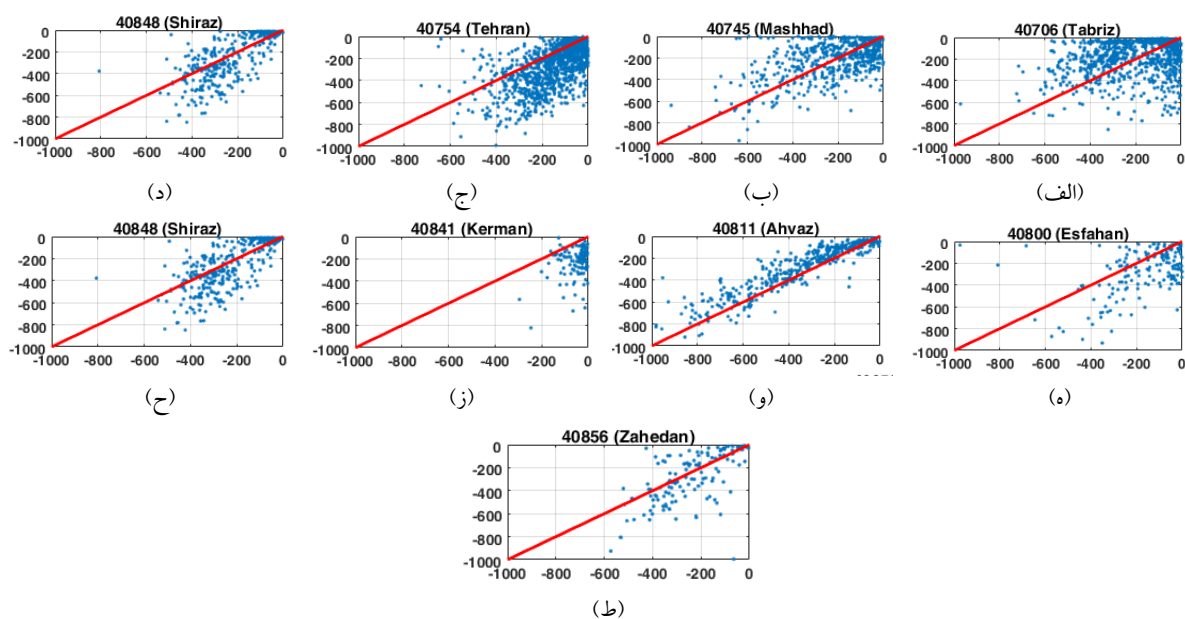
در شکل‌های ۶ تا ۹ نیز به ترتیب مقادیر محاسبه شده CIN، SB-CIN، ML-CIN و MU-CIN برای هر یک از ایستگاه‌ها به تفکیک ترسیم شده است.



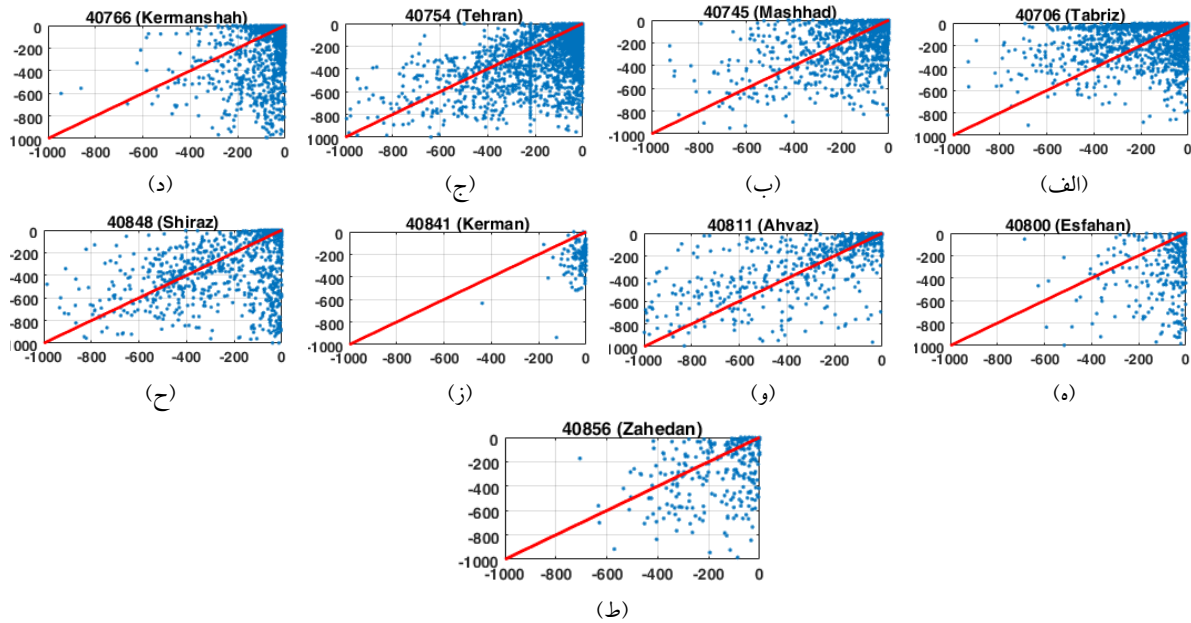
شکل ۶. مقادیر محاسبه شده CIN با استفاده از داده‌های بازتحلیل (محور قائم) بر حسب مقادیر محاسبه شده با استفاده از داده‌های مشاهداتی (محور افقی) برای ایستگاه‌های (الف) تبریز، (ب) مشهد، (ج) تهران، (د) کرمانشاه، (ه) اصفهان، (و) اهواز، (ز) کرمان، (ح) شیراز و (ط) زاهدان.



شکل ۷. مقادیر محاسبه شده SB-CIN با استفاده از داده‌های بازتحلیل (محور قائم) برحسب مقادیر محاسبه شده با استفاده از داده‌های مشاهداتی (محور افقی) برای ایستگاه‌های (الف) تبریز، (ب) مشهد، (ج) تهران، (د) کرمانشاه، (ه) اصفهان، (و) اهواز، (ز) کرمان، (ح) شیراز و (ط) زاهدان.



شکل ۸. مقادیر محاسبه شده ML-CIN با استفاده از داده‌های بازتحلیل (محور قائم) برحسب مقادیر محاسبه شده با استفاده از داده‌های مشاهداتی (محور افقی) برای ایستگاه‌های (الف) تبریز، (ب) مشهد، (ج) تهران، (د) کرمانشاه، (ه) اصفهان، (و) اهواز، (ز) کرمان، (ح) شیراز و (ط) زاهدان.



شکل ۹. مقادیر محاسبه شده MU-CIN با استفاده از داده‌های بازتحلیل (محور قائم) برحسب مقادیر محاسبه شده با استفاده از داده‌های مشاهداتی (محور افقی) برای ایستگاه‌های (الف) تبریز، (ب) مشهد، (ج) تهران، (د) کرمانشاه، (ه) اصفهان، (و) اهواز، (ز) کرمان، (ح) شیراز و (ط) زاهدان.

داده‌های بازتحلیل در برخی موارد که مقدار CAPE کمتر از 100 J/kg بوده مقادیر بیش از 1000 J/kg را تولید کرده است (شکل ۲-ب). این رفتار برای ML-CAPE (شکل ۴-ب) از شدت کمتری برخوردار است، اما برای SB-CAPE (شکل ۳-ب) و MU-CAPE (شکل ۵-ب) همچنان برقرار است. در این ایستگاه داده بازتحلیل توانسته ML-CIN (شکل ۸-ب) را با پراکندگی کمتری نسبت به سایر انواع CIN تولید کند.

(ج) ایستگاه تهران: در این ایستگاه، که تعداد داده‌های ثبت شده در آن قابل توجه بوده است، برای برآورد مقادیر CAPE کمتر از 200 J/kg و برای CAPE‌های بیش از 1000 J/kg به ترتیب فراتخمین و فروتخمین شده است (شکل ۲-ج). این رفتار در مورد ML-CAPE (شکل ۴-ب) با شدت کمتری برقرار بوده است. داده بازتحلیل در این ایستگاه با فروتخمین چشم‌گیری مقادیر ML-CIN (شکل ۸-ج) و MU-CIN (شکل ۹-ج) را تولید کرده است.

(د) ایستگاه کرمانشاه: در این ایستگاه مقادیر CAPE کمتر از 1000 J/kg به شدت فراتخمین شده است و در برخی

نتیجه تحلیل عینی شکل‌های ۲ تا ۹ برای هر ایستگاه عبارت است از: (الف) ایستگاه تبریز: داده‌های بازتحلیل در این مکان مقدار انواع CAPE را فراتخمین کرده که این رفتار برای مقادیر کمتر از 2000 J/kg به مراتب بیشتر است در حالی که مقادیر بیش از 2000 J/kg توسط داده‌های بازتحلیل فروتخمین شده است (شکل‌های ۲-الف، ۳-الف، ۴-الف و ۵-الف). این رفتار برای سایر CAPE‌ها نیز مشاهده می‌شود با این تفاوت که در مورد ML-CAPE (شکل ۴-الف) مقادیر بیش از 2000 J/kg در واقعیت رؤیت نشده است. مقدار CIN بازتحلیل نسبت به مشاهداتی با فراتخمین همراه بوده (شکل ۶-الف) به‌ویژه برای مقادیر کوچک‌تر از 200 J/kg . این امر در SB-CIN (شکل ۷-الف) نیز روی داده است. البته پراکندگی داده در ML-CIN (شکل ۸-الف) و MU-CIN (شکل ۹-الف) به مراتب از دو نوع دیگر CIN مقارن‌تر بوده است.

(ب) ایستگاه مشهد: در این ایستگاه با مقادیر در بازه $500-2000 \text{ J/kg}$ پراکندگی کمتری میان داده‌های مشاهداتی و بازتحلیل مشاهده می‌شود (شکل ۲-ب).

(ح) ایستگاه شیراز: در این ایستگاه با تراکم مقادیر کمتر از 500 J/kg ، برای تمام انواع CAPE فراتخمین داده‌های بازتحلیل قابل مشاهده است (شکل‌های ۲-ح، ۳-ح، ۴-ح و ۵-ح). داده‌های بازتحلیل CIN (شکل ۶-ح) و SB-CIN (شکل ۷-ح) را با فراتخمین برای این ایستگاه تولید کرده و پراکندگی چشم‌گیری برای MU-CIN (شکل ۹-ح) تولید کرده است. البته داده‌های بازتحلیل مقدار ML-CIN را در این ایستگاه با پراکندگی قابل‌قبولی تولید کرده است (شکل ۶-ح).

(ط) ایستگاه زاهدان: در این ایستگاه همچون ایستگاه شیراز به غیر از سه مورد که CAPE بیش از 2000 J/kg توسط داده‌های بازتحلیل فروتخمین شده است، داده‌های بازتحلیل مقادیر کمتر از 500 J/kg را با فراتخمین تولید کرده است (شکل ۲-ط). داده‌های بازتحلیل در این ایستگاه CIN (شکل ۶-ط)، SB-CIN (شکل ۷-ط) و ML-CIN (شکل ۸-ط) را با پراکندگی قابل‌قبولی تولید کرده است، هرچند برای MU-CIN بیشترین پراکندگی تولید شده است (شکل ۹-ط).

۲-۳. تحلیل آماری

به‌منظور تحلیل کمی بررسی عملکرد و دقت داده‌های بازتحلیل در برآورد مقدار انواع CAPE و CIN در ایستگاه‌های مختلف، مقدار R ، ME ، MAE و $RMSE$ برای هر ایستگاه و برای پارامترهای همرفتی جدول ۲ به‌ترتیب در جدول‌های ۳ تا ۶ فهرست شده است. تحلیل جدول ۳ نشان می‌دهد که در ایستگاه‌های تبریز، اصفهان پارامتر SB-CAPE، در ایستگاه‌های مشهد، تهران، اهواز، کرمان و زاهدان پارامتر ML-CAPE، در ایستگاه‌های کرمانشاه و شیراز پارامتر MU-CAPE بیشترین همبستگی را تولید کرده‌اند. برای ایستگاه‌های تبریز، اصفهان، شیراز و زاهدان پارامتر SB-CIN، برای ایستگاه‌های مشهد، تهران، کرمانشاه، اهواز و شیراز پارامتر ML-CIN و برای ایستگاه‌های کرمان و شیراز پارامتر MU-CIN بیشترین همبستگی را تولید کرده است.

موارد که مقدار CAPE بیش از 2000 J/kg بوده به‌شدت فروتخمین شده است (شکل ۲-د). در این ایستگاه داده‌های بازتحلیل مقدار ML-CIN (شکل ۸-د) را با خطای کمتری نسبت به CIN (شکل ۶-د) و SB-CIN (شکل ۷-د) تولید کرده، هرچند MU-CIN را به‌شدت با فروتخمین تولید کرده است (شکل ۹-د).

(ه) ایستگاه اصفهان: در این ایستگاه با توجه به تعداد کمتر داده نسبت به سایر ایستگاه‌ها و با توجه به این که در این ایستگاه از نظر اقلیمی امکان مشاهده ناپایداری کمتر است، به‌ندرت CAPE بیش از 2000 J/kg دیده شده که آن هم با فروتخمین شدید توسط داده‌های بازتحلیل همراه تولید شده است (شکل ۲-ه) در حالی که مقادیر کمتر از 500 J/kg فراتخمین شده‌اند. داده‌های بازتحلیل مقدار CIN و SB-CIN را با پراکندگی قابل‌قبولی برای این ایستگاه تولید کرده است (شکل‌های ۶-ه و ۷-ه).

(و) ایستگاه اهواز: در این ایستگاه مقادیر CAPE بیشتر از 1000 J/kg و کمتر از 2000 J/kg فروتخمین شده در حالی که پراکندگی بیشتری برای مقادیر بیش از 2000 J/kg مشاهده می‌شود (شکل ۲-و). این رفتار برای MU-CAPE و SB-CAPE نیز مشاهده می‌شود (شکل‌های ۳-و و ۵-و). البته برای ML-CAPE این پراکندگی دیده نمی‌شود (شکل ۴-و). در این ایستگاه به غیر از MU-CIN (شکل ۹-و) سایر انواع CIN (شکل‌های ۶-و، ۷-و و ۸-و) با پراکندگی قابل‌قبولی توسط داده‌های بازتحلیل تولید شده است.

(ز) ایستگاه کرمان: در این ایستگاه مقادیر CAPE بیش از 2000 J/kg به غیر از دو مورد رؤیت نشده و برای مقادیر کمتر نیز پراکندگی قابل‌قبولی مشاهده می‌شود (شکل ۲-ز). البته پارامتر MU-CAPE مقادیر مشاهداتی بیش از 2000 J/kg بیش از سایر انواع CAPE تولید مشاهده می‌شود (شکل ۵-ز). در این ایستگاه داده‌های بازتحلیل تمام انواع CIN با فروتخمین تولید کرده است (شکل‌های ۶-ز، ۷-ز، ۸-ز و ۹-ز).

جدول ۳. مقدار R برای انواع CAPE و CIN محاسبه شده با استفاده از داده‌های مشاهداتی و بازتحلیل.

ردیف	نام ایستگاه	شناسه ایستگاه	CAPE	CIN	SB-CAPE	SB-CIN	ML-CAPE	ML-CIN	MU-CAPE	MU-CIN
۱	تبریز	۴۰۷۰۶	۰/۸۷	۰/۴۴	۰/۹۵	۰/۴۵	۰/۷۹	۰/۲۴	۰/۵۴	۰/۲۵
۲	مشهد	۴۰۷۴۵	۰/۱۸	۰/۴۶	۰/۱۸	۰/۵۴	۰/۳۱	۰/۵۷	۰/۰۹	۰/۴۴
۳	تهران	۴۰۷۵۴	۰/۱۴	۰/۵۵	۰/۰۸	۰/۵۵	۰/۵۳	۰/۶۱	۰/۰۳	۰/۵۰
۴	کرمانشاه	۴۰۷۶۶	۰/۰۷	۰/۳۰	۰/۰۶	۰/۳۱	۰/۳۲	۰/۶۲	۰/۴۲	۰/۳۲
۵	اصفهان	۴۰۸۰۰	۰/۷۰	۰/۶۳	۰/۷۴	۰/۶۴	۰/۶۰	۰/۴۷	۰/۲۶	۰/۲۱
۶	اهواز	۴۰۸۱۱	۰/۵۵	۰/۸۱	۰/۵۵	۰/۸۲	۰/۶۶	۰/۹۲	۰/۶۶	۰/۶۷
۷	کرمان	۴۰۸۴۱	۰/۴۳	۰/۳۰	۰/۳۸	۰/۱۸	۰/۸۹	۰/۳۰	۰/۵۳	۰/۳۵
۸	شیراز	۴۰۸۴۸	۰/۱۲	۰/۷۳	۰/۱۰	۰/۷۵	۰/۲۴	۰/۷۵	۰/۲۵	۰/۳۷
۹	زاهدان	۴۰۸۵۶	۰/۳۴	۰/۷۲	۰/۳۶	۰/۷۵	۰/۵۹	۰/۶۴	۰/۱۱	۰/۳۳

جدول ۴. مقدار ME برای انواع CAPE و CIN محاسبه شده با استفاده از داده‌های مشاهداتی و بازتحلیل.

ردیف	نام ایستگاه	شناسه ایستگاه	CAPE	CIN	SB-CAPE	SB-CIN	ML-CAPE	ML-CIN	MU-CAPE	MU-CIN
۱	تبریز	۴۰۷۰۶	۱۱۰۴/۹۸	۱۴۳/۰۲	۱۱۰۱/۵۲	۱۴۵/۰۸	۹۳۴/۹۶	۲۰/۳۱	۱۰۹۲/۰۸	۱۴/۸۴
۲	مشهد	۴۰۷۴۵	۲۳۴/۴۳	۲۰/۱۳	۲۲۹/۱۴	۱۷/۷۱	۳۸۱/۹۳	۳/۲۲	۴۲۴/۹۶	-۴۸/۲۹
۳	تهران	۴۰۷۵۴	۳۷۲/۰۰	-۳۹/۰۰	۳۶۵/۹۲	-۳۴/۸۹	۳۳۹/۷۴	-۱۱۳/۴۶	۳۸۸/۹۸	-۱۳۷/۹۲
۴	کرمانشاه	۴۰۷۶۶	۳۵۷/۴۸	۲/۲۴	۳۵۰/۶۱	۶/۰۵	۴۷۰/۹۸	-۴۹/۵۳	۵۳۷/۲۸	-۱۳۸/۷۱
۵	اصفهان	۴۰۸۰۰	۳۰۵/۲۵	-۹۱/۰۲	۲۹۸/۷۶	-۸۵/۸۲	۳۲۸/۶۹	-۱۰۳/۷۶	۲۵۶/۰۲	-۲۱۱/۰۹
۶	اهواز	۴۰۸۱۱	۱۲۹/۰۵	۸۳/۱۲	۱۲۷/۵۸	۸۰/۷۳	-۸۵/۷۵	۵۷/۷۲	-۱۸/۷۳	۲۸/۷۷
۷	کرمان	۴۰۸۴۱	۶۲/۸۴	-۵۰/۶۷	۴۸/۷۳	-۴۰/۷۰	۵۲/۷۰	-۱۶۹/۱۹	-۷۰/۸۹	-۱۹۱/۰۸
۸	شیراز	۴۰۸۴۸	۱۳۴۲/۴۹	۱۴۹/۵۱	۱۳۴۴/۳۳	۱۴۸/۳۴	۱۱۰۲/۵۲	-۳۴/۹۲	۱۲۳۶/۱۴	-۱۱۰/۰۸
۹	زاهدان	۴۰۸۵۶	۷۵۳/۰۹	۴۹/۴۲	۷۵۶/۹۳	۴۹/۰۶	۷۰۷/۸۷	-۴۸/۴۵	۷۳۲/۶۹	-۱۲۳/۰۷

فروتن‌ترین کردن پارامترها در جدول ۴ نشان داده شده است. مقدار مطلق خطا میان انواع پارامترهای CAPE و CIN محاسبه شده با استفاده از داده‌های مشاهداتی و بازتحلیل در جدول ۵ قابل مقایسه است.

طبق جدول ۶، محاسبه جذر میانگین مربع خطا برای انواع پارامترهای CAPE و CIN برای هر ایستگاه نشان می‌دهد که برای سه ایستگاه تبریز، مشهد و تهران پارامترهای ML-CAPE و ML-CIN، برای ایستگاه کرمانشاه پارامترهای CAPE و ML-CIN، برای ایستگاه اصفهان پارامترهای CAPE و SB-CIN، برای ایستگاه اهواز پارامترهای ML-CAPE و ML-CIN، برای ایستگاه کرمان پارامترهای CAPE و CIN، برای ایستگاه

مقایسه مقدار خطای تولید شده توسط داده‌های بازتحلیل در برآورد انواع CAPE و CIN در مقایسه با مقادیر مشاهداتی (جدول ۴) نشان می‌دهد که در ایستگاه‌های مشهد، کرمانشاه و کرمان پارامتر SB-CAPE، در ایستگاه‌های تبریز، تهران، شیراز و زاهدان پارامتر ML-CAPE، در ایستگاه‌های اصفهان و اهواز پارامتر MU-CAPE کمترین خطا را تولید کرده است. همچنین در ایستگاه کرمانشاه پارامتر CIN، در ایستگاه‌های تهران، اصفهان و کرمان پارامتر SB-CIN، در ایستگاه‌های مشهد، شیراز و زاهدان پارامتر ML-CIN و در ایستگاه‌های تبریز و اهواز پارامتر MU-CIN کمترین خطا را تولید کرده است. عملکرد داده‌های بازتحلیل در فراتخمین کردن یا

حالی که خطا در برآورد انواع پارامترهای CAPE برای ایستگاه کرمان کمتر از 80 J/kg بوده است. برای برآورد انواع پارامتر CIN، ایستگاه‌های شیراز و تبریز و کرمان بیشترین خطا (در حدود 150 J/kg) و ایستگاه‌های کرمانشاه و مشهد کمترین خطا را داشته‌اند.

شیراز پارامترهای ML-CAPE و ML-CIN و برای ایستگاه زاهدان پارامترهای SB-CIN و ML-CAPE کمترین مقادیر خطا را تولید کرده‌اند. همچنین ایستگاه‌های تبریز و شیراز برای انواع پارامتر CAPE بیشترین مقدار خطا (بیش از 1000 J/kg) را داشته‌اند، در

جدول ۵. مقدار MAE برای انواع CAPE و CIN محاسبه شده با استفاده از داده‌های مشاهداتی و بازتحلیل.

ردیف	نام ایستگاه	شناسه ایستگاه	CAPE	CIN	SB-CAPE	SB-CIN	ML-CAPE	ML-CIN	MU-CAPE	MU-CIN
۱	تبریز	۴۰۷۰۶	۱۱۰۴/۹۸	۱۴۳/۰۲	۱۱۰۱/۵۲	۱۴۵/۰۸	۹۳۴/۹۶	۲۰/۳۱	۱۰۹۲/۰۸	۱۴/۸۴
۲	مشهد	۴۰۷۴۵	۲۳۴/۴۳	۲۰/۱۳	۲۲۹/۱۴	۱۷/۷۱	۳۸۱/۹۳	۳/۲۲	۴۲۴/۹۶	۴۸/۲۹
۳	تهران	۴۰۷۵۴	۳۷۲/۰۰	۳۹/۰۰	۳۶۵/۹۲	۳۴/۸۹	۳۳۹/۷۴	۱۱۳/۴۶	۳۸۸/۹۸	۱۳۷/۹۲
۴	کرمانشاه	۴۰۷۶۶	۳۵۷/۴۸	۲/۲۴	۳۵۰/۶۱	۶/۰۵	۴۷۰/۹۸	۴۹/۵۳	۵۳۷/۲۸	۱۳۸/۷۱
۵	اصفهان	۴۰۸۰۰	۳۰۵/۲۵	۹۱/۰۲	۲۹۸/۷۶	۸۵/۸۲	۳۲۸/۶۹	۱۰۳/۷۶	۲۵۶/۰۲	۲۱۱/۰۹
۶	اهواز	۴۰۸۱۱	۱۲۹/۰۵	۸۳/۱۲	۱۲۷/۵۸	۸۰/۷۳	۸۵/۷۵	۵۷/۷۲	۱۸/۷۳	۲۸/۷۷
۷	کرمان	۴۰۸۴۱	۶۲/۸۴	۱۵۰/۶۷	۴۸/۷۳	۱۴۰/۷۰	۵۲/۷۰	۱۶۹/۱۹	۷۰/۸۹	۱۹۱/۰۸
۸	شیراز	۴۰۸۴۸	۱۳۴۲/۴۹	۱۴۹/۵۱	۱۳۴۴/۳۳	۱۴۸/۳۴	۱۱۰۲/۵۲	۳۴/۹۲	۱۲۳۶/۱۴	۱۱۰/۰۸
۹	زاهدان	۴۰۸۵۶	۷۵۳/۰۹	۴۹/۴۲	۷۵۶/۹۳	۴۹/۰۶	۷۰۷/۸۷	۴۸/۴۵	۷۳۲/۶۹	۱۲۳/۰۷

جدول ۶. مقدار RMSE برای انواع CAPE و CIN محاسبه شده با استفاده از داده‌های مشاهداتی و بازتحلیل.

ردیف	نام ایستگاه	شناسه ایستگاه	CAPE	CIN	SB-CAPE	SB-CIN	ML-CAPE	ML-CIN	MU-CAPE	MU-CIN
۱	تبریز	۴۰۷۰۶	۱۵۹۸/۲۱	۲۳۷/۵۵	۱۶۰۰/۰۸	۲۳۹/۲۲	۱۲۹۶/۴۰	۲۰۴/۷۴	۱۵۸۳/۴۰	۲۱۰/۷۱
۲	مشهد	۴۰۷۴۵	۸۰۸/۲۰	۲۱۳/۸۰	۸۱۲/۴۱	۱۹۵/۸۳	۷۶۹/۳۳	۱۶۳/۵۵	۱۰۰۷/۹۴	۲۰۹/۸۱
۳	تهران	۴۰۷۵۴	۸۵۷/۷۷	۲۳۰/۰۷	۸۶۱/۵۵	۲۲۹/۲۸	۷۲۲/۲۱	۱۸۸/۹۶	۹۷۲/۹۴	۲۵۳/۹۹
۴	کرمانشاه	۴۰۷۶۶	۹۲۱/۲۱	۱۸۲/۴۵	۹۲۵/۱۹	۱۷۶/۴۰	۹۲۳/۱۳	۱۵۶/۰۶	۱۲۳۵/۱۶	۲۷۶/۶۵
۵	اصفهان	۴۰۸۰۰	۸۶۵/۷۳	۲۱۹/۸۱	۸۶۶/۶۱	۲۱۳/۱۶	۸۶۷/۴۶	۲۲۳/۵۶	۱۱۰۳/۷۸	۳۴۳/۹۶
۶	اهواز	۴۰۸۱۱	۱۳۶۰/۵۶	۱۹۳/۶۹	۱۳۶۱/۳۰	۱۹۰/۱۶	۴۶۷/۳۴	۱۰۷/۰۹	۱۲۷۵/۸۰	۲۱۲/۳۹
۷	کرمان	۴۰۸۴۱	۶۵۲/۸۸	۱۹۵/۰۱	۶۴۹/۵۴	۱۹۷/۸۴	۵۲۴/۴۵	۲۱۲/۹۶	۸۷۷/۹۸	۲۳۲/۰۹
۸	شیراز	۴۰۸۴۸	۱۸۹۱/۰۴	۲۶۰/۰۲	۱۸۹۴/۷۴	۲۵۵/۷۲	۱۵۸۲/۳۳	۱۴۵/۲۴	۱۸۶۲/۲۸	۳۰۰/۹۳
۹	زاهدان	۴۰۸۵۶	۱۵۱۶/۱۲	۱۶۹/۵۱	۱۵۲۳/۶۹	۱۶۳/۴۳	۱۲۴۰/۴۳	۱۷۵/۵۰	۱۴۰۳/۳۰	۲۶۲/۶۵

۴. نتیجه‌گیری

داده‌های مشاهداتی رادیوگمانه از بیشترین همخوانی و کمترین خطا نسبت به سایر کمیت‌های بررسی شده برخوردارند. همچنین، بسته هوای کاملاً آمیخته نماینده کامل‌تری از جو حاکم بر ایستگاه‌ها بوده است. به عبارتی می‌توان این گونه بیان کرد که در اغلب موارد جو حاکم بر ایستگاه‌های ذکر شده به جو کاملاً آمیخته نزدیک‌تر بوده است. نتایج حاصل شده از اعتبارسنجی ML-CAPE و ML-CIN حاصل از داده‌های ERA5 در ایستگاه‌های ایران، مشابه نتایج تازارک و همکاران (۲۰۲۱الف) برای اروپا و شمال آمریکا است که این دو پارامتر را از سایر پارامترهای بررسی شده دقیق‌تر معرفی کردند. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود در صورت نیاز به محاسبه CAPE و CIN با استفاده از داده‌های بازتحلیل ERA5 از دو پارامتر ML-CAPE و ML-CIN استفاده شود.

مراجع

صادقی حسینی، س.ع. و رضائیان، م. (۱۳۸۵). بررسی تعدادی از شاخص‌های ناپایداری و پتانسیل بارورسازی ابرهای همرفتی منطقه اصفهان. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۳۲(۲)، ۸۳-۹۸.

طهماسبی‌پاشا، ا.؛ میرزایی، م. و محب‌الحججه، ع. (۱۴۰۰). ارتباط شاخص‌های همرفتی و دورپیوندی در منطقه غرب آسیا. *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۵(۳)، ۱-۲۶.

قوبدل رحیمی، ی.؛ عباسی، ا. و فرج‌زاده، م. (۱۳۹۷). واکاوی دینامیک و ترمودینامیک شدیدترین چرخند حاره‌ای مؤثر بر سواحل جنوبی ایران. *نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۵(۱)، ۹۷-۱۱۲.

مجرد، ف.؛ کوشکی، س.؛ معصوم‌پور، ج. و میری، م. (۱۳۹۶). تحلیل شاخص‌های ناپایداری توفان‌های تندری در ایران با استفاده از داده‌های بازتحلیل. *نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۴، ۳۳-۴۸.

در این تحقیق سعی شد تا اعتبار داده‌های بازتحلیل ERA5 در برآورد انواع پارامترهای همرفتی CAPE اعم از CAPE، SB-CAPE، ML-CAPE و MU-CAPE و همچنین انواع پارامتر همرفتی CIN اعم از CIN، SB-CIN، ML-CIN و MU-CIN در مقایسه با داده‌های مشاهداتی ارزیابی شود. برای این منظور از داده‌های گمانه‌زنی ۹ ایستگاه جو بالا در تبریز، مشهد، تهران، کرمانشاه، اصفهان، اهواز، کرمان، شیراز و زاهدان استفاده شد. این ارزیابی در بازه زمانی ۳۱ ساله از ابتدای ۱۹۹۰ تا انتهای ۲۰۲۰ انجام شد. البته بازه زمانی برای هر ایستگاه بر حسب داده‌های مشاهداتی در دسترس در آن ایستگاه متغیر بوده است. برای ارزیابی از ۴ شاخص آماری R، ME، MAE و RMSE استفاده شد. نتایج نشان داد که پارامتر ML-CAPE و ML-CIN در ایستگاه‌های بیشتری توانسته بالاترین همبستگی میان داده‌های مشاهداتی و بازتحلیل را تولید کند. همچنین ارزیابی شاخص آماری ME و MAE نشان داد که پارامتر ML-CAPE، SB-CIN و ML-CIN در ایستگاه‌های بیشتری توانسته کمترین خطا را تولید کند. بررسی شاخص آماری جذر میانگین مربع خطا برای انواع پارامترهای CAPE و CIN در ایستگاه‌ها نشان داد که در صورت استفاده از داده‌های بازتحلیل پارامترهای ML-CAPE و ML-CIN در ایستگاه‌های بیشتری کمینه خطا را تولید می‌کنند. بنابراین، نتیجه‌گیری می‌شود که با استفاده از داده‌های بازتحلیل ERA5، دو پارامتر همرفتی ML-CAPE و ML-CIN در برآورد CAPE و CIN در بیشتر ایستگاه‌ها عملکرد بهتری داشته و خطای کمتری را تولید کرده‌اند. روشن است که برای محاسبه ML-CAPE و ML-CIN نیاز است تا بسته هوایی که کاملاً آمیخته است، مورد توجه قرار گیرد. از این‌رو، می‌توان به این نتیجه رسید که در جو ایستگاه‌های مورد بررسی، شاخص ناپایداری ML-CAPE حاصل از داده‌های بازتحلیل و

Journal of Climatology, 34, 81-97.

Brooks, H.E., Anderson, A.R., Riemann, K., Ebberts, I., & Flachs, H. (2007). Climatological aspects of convective

Allen, J.T., & Karoly, D.J. (2014). A climatology of Australian severe thunderstorm environments 1979-2011: Inter-annual variability and ENSO influence. *International*

- parameters from the NCAR/NCEP reanalysis. *Atmospheric Research*, 83, 294–305.
- Brooks, H.E., Lee, J.W., & Craven, J.P. (2003). The spatial distribution of severe thunderstorms and tornado environments from global reanalysis data. *Atmospheric Research*, 67–68, 73–94.
- Bunkers, M.J., Klimowski, B.A., & Zeitler, J.W., (2002). The importance of parcel choice and the measure of vertical wind shear in evaluating the convective environment, Preprints, 21st Conf. Severe Local Storms, San Antonio. *American Meteorological Society*, J117–J120, 11-16.
- Craven, J. P., Jewell, R. E., & Brooks, H. E. (2002). Comparison between observed convective cloud-base heights and lifting condensation level for two different lifted parcels. *Weather and Forecasting*, 17(4), 885–890.
- Doswell, III.C. A., & Rasmussen, E.N. (1994). The effect of neglecting the virtual temperature correction on CAPE calculations. *Weather Forecasting*, 9, 625–629.
- Doswell, III, C. A., Brooks, H. E., & Maddox, R.A. (1996). Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. *Weather Forecasting*, 11, 560–581.
- Gensini, V. A., Mote, T. L., & Brooks, H. E. (2014). Severe-thunderstorm reanalysis environments and collocated radiosonde observations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53, 742–751.
- Grünwald, S., & Brooks, H. E. (2011). Relationship between sounding derived parameters and the strength of tornadoes in Europe and the USA from reanalysis data. *Atmospheric Research*, 100, 479–488.
- Hobbs, P. V., & Wallace, J. M., (1977). *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. Academic Press, 350 pp.
- Hodges, K. I., Lee, R. W. & Bengtsson, L. (2011). A comparison of extratropical cyclones in recent reanalyses ERA-Interim, NASA MERRA, NCEP CFSR, and JRA-25. *Journal of Climate*, 24, 4888–4906.
- Marsh, P. T., Brooks, H. E., & Karoly, D. J. (2009). Preliminary investigation into the severe thunderstorm environment of Europe simulated by the Community Climate System Model 3. *Atmospheric Research*, 93, 607–618.
- Pilguy, N., Taszarek, M., Allen, J. T., & Hoogewind, K. A. (2022). Are trends in convective parameters over the United States and Europe consistent between reanalyses and observations?. *Journal of Climate*, 35(12), 3605–3626.
- Pistotnik, G., Groenemeijer, P., & Sausen, R. (2016). Validation of convective parameters in MPI-ESM decadal hindcasts (1971–2012) against ERA-Interim reanalyses. *Meteorology*, 25, 753–766.
- Púčik, T., Groenemeijer, P., Rýva, D., & Kolár, M. (2015). Proximity soundings of severe and nonsevere thunderstorms in central Europe. *Monthly Weather Review*, 143, 4805–4821.
- Púčik, T., Groenemeijer, P., Rädler, A.T., Tijssen, L., Nikulin, G., Prein, A.F., van Meijgaard, E., Fealy, R., Jacob, D., & Teichmann, C. (2017). Future changes in European severe convection environments in a regional climate model ensemble. *Journal of Climate*, 30, 6771–6794.
- Riemann-Campe, K., Fraedrich, K., & Lunkeit, F. (2009). Global climatology of convective available potential energy (CAPE) and convective inhibition (CIN) in ERA-40 reanalysis. *Atmospheric Research*, 93, 534–545.
- 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.
- Singh, M. S., Kuang, Z., Maloney, E. D., Hannah, W. M., & Wolding, B. O. (2017). Increasing potential for intense tropical and subtropical thunderstorms under global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(44), 11657–11662.
- Taszarek, M., Brooks, H. E., & Czernecki, B. (2017). Sounding-derived parameters associated with convective hazards in Europe. *Monthly Weather Review*, 145, 1511–1528.
- Taszarek, M., Brooks, H. E., Czernecki, B., Szuster, P., & Fortuniak, K. (2018). Climatological aspects of convective parameters over Europe: A comparison of ERA-Interim and sounding data. *Journal of Climate*, 31(11), 4281–4308.
- Taszarek, M., Pilguy, N., Allen, J. T., Gensini, V., Brooks, H. E., & Szuster, P. (2021a). Comparison of convective parameters derived from ERA5 and MERRA-2 with rawinsonde data over Europe and North America. *Journal of Climate*, 34(8), 3211–3237.
- Taszarek, M., Allen, J. T., Marchio, M., & Brooks, H. E. (2021b). Global climatology and trends in convective environments from ERA5 and rawinsonde data. *NPJ climate and atmospheric science*, 4(1), p.35.
- Thorne, P. W., & Vose, R. S. (2010). Reanalyses suitable for characterizing long-term trends. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 353–361.
- Varga, Á. J., & Breuer, H. (2022). Evaluation of convective parameters derived from pressure level and native ERA5 data and different resolution WRF climate simulations over Central Europe. *Climate Dynamics*, 58(5-6), 1569–1585.

- Viceto, C., Marta-Almeida, M., & Rocha, A. (2017). Future climate change of stability indices for the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 37, 4390–4408.
- Wang, Y. C., Pan, H.L., & Hsu, H. H. (2015). Impacts of the triggering function of cumulus parameterization on warm-season diurnal rainfall cycles at the Atmospheric Radiation Measurement Southern Great Plains site. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(20), 10-681.
- Wang, Z., Franke, J. A., Luo, Z., & Moyer, E. J. (2021). Reanalyses and a high-resolution model fail to capture the “high tail” of CAPE distributions. *Journal of Climate*, 34(21), 8699-8715.
- Westermayer, A. T., Groenemeijer, P., Pistotnik, G., Sausen, R., & Faust, E. (2017). Identification of favorable environments for thunderstorms in reanalysis data. *Meteorology*, 26, 59–70.