

## The Investigation of the Performance of Reanalyzed Global Forecast System (GFS( Data for Identifying evening thunderstorms in Iran

Mohammadali Nasr Isfahani<sup>1\*</sup> , Ahmad reza Ghasemi<sup>2</sup>

1. *Corresponding Author*, Assistant Professor, Department of Water Engineering, Shahrekord University, Iran.  
2. Associate Professor, Department of Water Engineering, Shahrekord University, Iran.

---

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**

**Received:** 30 May 2022

**Revised:** 03 June 2023

**Accepted:** 10 June 2023

**Keywords:**

Iran, Reanalysis, GFS,  
Thunderstorm, Instability  
indices.

### ABSTRACT

Thunderstorms, also known as electrical storms or lightning storms, are one of the most damaging weather hazards and often damaging to the environment, crops, cities, and property. Therefore, forecasting them is very important for decreasing the possible damages. To forecast these phenomena, investigating the thermodynamic structure of the atmosphere and analyzing instability indices is necessary. The purpose of this study is to investigate the general characteristics of thunderstorms and the ability of GFS reanalysis data in identifying the spatial distribution of thunderstorms in Iran. For this aim in addition to GFS data, 8-year thunderstorm reports (2008 to 2015) in 361 weather stations in Iran from April to May were also used. At first, based on the thunderstorm frequency, each data series was divided into 4 quarters. Then, 10 atmospheric instability indices were calculated for daily GFS data and the results were analyzed. The results showed that the CIN index has the best performance. However, this index showed more error in Quarter-4 which had strong instability. The KI index showed moderate performance in forecasting weak instabilities but showed better results as instability increased in the fourth quarter. Both TT and 4LFTX indices had the same results and showed strong instabilities in the western parts of the country. Investigation of the average ability of the indices, induced that the four indices, including CIN, TT, 4LFTX, and KI had good performance in detecting instability. This performance varies from 90% in the CIN index to 60% in the KI index. The other investigated indices did not have an acceptable performance. It is recommended to redefine the threshold values of the instability indices according to the climate type in the studied stations.

---

**Cite this article:** Nasr Isfahani, M., & Ghasemi, A. R. (2023). The Investigation of the Performance of Reanalyzed Global Forecast System (GFS( Data for Identifying evening thunderstorms in Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 12(37), 39-56. DOI: 10.22111/jneh.2023.42534.1906



© Mohammadali Nasr Isfahani

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

DOI: 10.22111/jneh.2023.42534.1906

---

\* Corresponding Author Email: [mnasr@sku.ac.ir](mailto:mnasr@sku.ac.ir)

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۲، شماره ۳۷، مهر ۱۴۰۲

## بررسی عملکرد داده‌های باز تحلیل شبکه‌ای (GFS) برای شناسایی توفان‌های تندری عصرگاهی در ایران

محمد علی نصر اصفهانی<sup>۱\*</sup>، احمد رضا قاسمی<sup>۲</sup>

۱. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد (نویسنده مسئول)

۲. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	این پژوهش با هدف بررسی ویژگی‌های کلی توفان‌های تندری عصرگاهی در کشور براساس تعداد رخداد و همچنین بررسی توانایی داده‌های بازتحلیل شبکه‌ای GFS در شناسایی توزیع مکانی آن‌ها انجام شده است. به این منظور در یک دوره ۹ ساله (۲۰۱۵-۲۰۰۸) گزارش‌های رعدوبرق ثبت شده در ۳۶۱ ایستگاه همدیدی کشور در ماه‌های آوریل (فروردین) و می (اردیبهشت)، به عنوان ماه‌هایی که بیشترین توفان تندری در آن‌ها رخ داده است، مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا روزها از نظر تعداد توفان‌های تندری به چهار چارک تقسیم شدند. در گام بعدی ده شاخص نشانگر ناپایداری جوی از داده‌های بازتحلیل ساعت ۱۲ گرینویچ استخراج و یا محاسبه شدند. در نهایت نقشه پهنه-بندی میانگین این شاخص‌ها در هر چارک و انطباق نقطه‌ای در ایستگاه‌هایی که دارای رعدوبرق ثبت شده بوده‌اند، مورد بررسی دقیق‌تر قرار گرفت. نتایج نشان داد که بهترین عملکرد را شاخص CIN یا شاخص سرکوب همرفت داشته است. میزان دقت این شاخص در پیش‌بینی ناپایداری‌ها حدود ۹۰ درصد برآورد گردید. شاخص KI در ناپایداری‌های ضعیف عملکرد متوسطی داشته ولی با تشدید ناپایداری و سامان‌مندشدن آن در چارک چهارم عملکرد آن بهبود قابل ملاحظه‌ای پیدا کرده است. دو شاخص TT و LFTX <sub>4</sub> نیز عملکرد مشابه به هم داشته و ناپایداری‌های شدید را در غرب کشور به خوبی آشکار کرده‌اند. سایر شاخص‌ها عملکرد مناسبی نداشته و نیاز است که مقادیر آستانه آن با توجه به وضعیت اقلیمی کشور بازتعریف شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۹	
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۳	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۰	
واژه‌های کلیدی: ایران، بازتحلیل، پهنه بندی، توفان تندری، شاخص ناپایداری.	

استناد: نصر اصفهانی، محمد علی، قاسمی، احمد رضا. (۱۴۰۲). بررسی عملکرد داده‌های باز تحلیل شبکه‌ای (GFS) برای شناسایی توفان‌های تندری عصرگاهی در ایران. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۲(۳۷)، ۵۶-۳۹. DOI: 10.22111/jneh.2023.42534.1906

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© محمد علی نصر اصفهانی\*، احمد رضا قاسمی.



## مقدمه

طوفان‌های تندری معمولاً یا بر اثر گرم شدن سطح زمین و صعود سریع توده‌های هوای بالای آن و یا در امتداد و به همراه جبهه‌های هوا، به ویژه در جبهه‌های سرد ظهور می‌کنند (کاوایانی و علیجانی، ۱۳۹۱). تمام ویژگی‌های یک طوفان تندری مانند مشاهده برق، وزش باد شدید، بارش تگرگ و بارش‌های رگباری، در نتیجه فعالیت و شکل‌گیری سلول‌های همرفتی در جو زمین ایجاد می‌شوند (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۰). معمولاً آزاد شدن گرمای نهان همرفتی عامل مهمی در تسریع فرآیند همرفت از طریق افزایش ناپایداری هوا است، که ممکن است با ظهور سامانه‌های رعدوبرقی همراه باشد (رسولی و جوان، ۱۳۹۱).

توفان‌های تندری یکی از مخاطرات هواشناسی محسوب می‌شوند که در شرایط خاص به دلیل ناگهانی بودن، آسیب‌های جبران‌ناپذیر جانی و مالی بر مناطق مسکونی، ساخت و سازها، هوانوردی، زمین‌ها و فرآورده‌های کشاورزی، مناطق جنگلی، دامپروری، حیات وحش و ... وارد می‌کنند. برای نمونه آسیب‌های جانی ناشی از توفان تندری در استان خوزستان در طول دوره ۲۰۰۶-۲۰۰۱ منجر به مرگ ۲۳ نفر شده است (عسگری و محبی، ۱۳۸۹).

ابره‌های مربوط به توفان‌های همرفتی در بیشتر مناطق مشاهده می‌شوند، اما درصد کوچکی از این توفان‌های همرفتی، منجر به تولید شرایط هوای سخت<sup>۱</sup> شامل پیچند، تگرگ با قطر بیش از ۲۰ میلی‌متر و بادهای شدید با سرعت بیش از ۲۶ متر بر ثانیه، می‌شوند. به علاوه درصد بیشتری از این توفان‌های همرفتی می‌تواند بارانی ایجاد کنند که به خصوص در حوزه‌های مستعد، باعث ایجاد سیل‌های ناگهانی<sup>۲</sup> شود (بارنز، ۲۰۱۰).

رخداد این پدیده‌ها و پدیده‌های مشابه با وجود ناپایداری در جو کره زمین ارتباط نزدیک دارد. از این رو برای شناسایی و جهت پیش‌بینی این وقایع از شاخص‌هایی که بیانگر ناپایداری جو کره زمین هستند استفاده می‌شود. این شاخص‌ها بسیار متنوع و کاربرد بسیار گسترده‌ای دارند که در مطالعات زیادی نیز مورد استفاده و پژوهش قرار گرفته‌اند. گاتلیب (۲۰۰۹) در پژوهشی به تحلیل شاخص‌های ناپایداری برای توفان‌های تندری شدید در شمال شرق ایالات متحده آمریکا در فاصله زمانی بین ژوئن تا آگوست ۲۰۰۷-۱۹۹۸ پرداخت. او شاخص‌های ناپایداری SI، KI، CIN، CAPE، TT و تراز تعادل فشار (equilibrium level pressure) را با استفاده از داده‌های ۸ ایستگاه جو بالا محاسبه کرد و در پایان بیان داشت که LI و CAPE برای پیش‌بینی این توفان‌ها در شمال شرق آمریکا دارای عملکرد بهتری هستند.

فلورین (۲۰۱۰)، تغییرات فعالیت و فراوانی رخداد توفان تندری در واسلوی رومانی را بررسی و دریافت که زمان شروع توفان تندری از ۱۷ آوریل تا ۲۸ ماه می است. به طور کلی، در غرب واسلو طول فصل وقوع توفان تندری کمتر از شرق است، ولی شدت آن در غرب واسلو بیشتر است. نیسی و همکاران (۲۰۱۲) از ترکیب داده‌های ماهواره‌ای، رادار و مدل‌های پیش‌بینی عددی برای تشخیص و پیش‌بینی توفان‌های همرفتی شدید در منطقه آلپ استفاده کردند. هدف آن‌ها از انجام این پژوهش افزایش دقت پیش‌بینی توفان‌های همرفتی بر روی مناطق دارای توپوگرافی پیچیده بوده است. آن‌ها با این داده‌ها توانستند این توفان را تا ۲۰ دقیقه قبل از رسیدن به درجه شدید پیش‌بینی کنند.

1 Severe Weather  
2 Flash Floods

گالاناکي و همکاران (۲۰۱۸) با مطالعه یک دوره ۱۰ ساله از طوفان‌های تندری در منطقه مدیترانه نشان دادند که برای طوفان‌های تندری که بر روی خشکی اتفاق می‌افتند، هرچه طول عمر طوفان بالاتر باشد، انتظار می‌رود در اوایل روز رخ دهد. گوروا و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی به طبقه‌بندی توفان‌های تندری در فصول گرم بر اساس شاخص‌های ناپایداری در دشت صوفیه پرداختند.

کلاشنیکوف و همکاران (۲۰۲۰) با مطالعه یک دوره ۳۰ ساله روزهای رعد و برقی و الگوهای هواشناسی مرتبط با آنها در غرب آمریکا، نشان دادند که این الگوها تحت تاثیر مونسون آمریکای شمالی قرار دارد. تاسزاريک و همکاران (۲۰۲۰a) با مطالعه توفان‌های شدید در آمریکا و اروپا نشان دادند که حوادث شدید بر روی آمریکا دارای فراوانی بیشتری نسبت به اروپا هستند. تاسزاريک و همکاران (۲۰۲۰b) همچنین در ادامه مطالعه قبل نشان دادند زمانی که یک طوفان توندري توسعه پیدا کند، احتمال شدید شدن آن در آمریکا بسیار بیشتر از اروپا است.

تسنوا و بوگانچيیو (۲۰۲۰) ناپایداری جوی بر روی بلغارستان به کمک چهار شاخص ناپایداری جو و مدل‌های عددی پیش‌بینی آب و هوا<sup>۱</sup> را بررسی کرده و نشان دادند که این مدل‌ها توانایی نسبتاً خوبی در تشخیص موارد طوفان تندری از غیر تندری دارند.

میرموسوی و اکبرزاده (۱۳۸۸) به مطالعه شاخص‌های ناپایداری در تشکیل تگرگ در ایستگاه هواشناسی تبریز پرداختند. آن‌ها این پژوهش را با استفاده از شاخص‌های CCL، LCL و KI به انجام رسانده‌اند و نتیجه گرفتند که هر اندازه سطح انجماد کمتر از ۳۰۰۰ متر باشد، احتمال وقوع تگرگ کمتر و هر چقدر فاصله سطح یخبندان تا قله ابر زیاد باشد، احتمال وقوع تگرگ بیشتر خواهد شد.

موسوی بايگی و اشرف (۱۳۸۹) به مطالعه و بررسی نمایه قائم هوای منجر به بارندگی‌های مخرب تابستانه در مشهد پرداخته و مقادیر شاخص‌های ناپایداری CAPE، SI و KI را برای یکی از نمونه‌های شدید به ترتیب ۹۵۳/۴، ۴/۶۷، ۳۵/۳۰ به دست آوردند که هر سه معرف ناپایداری شدید هوا هستند. برنا و فاخر نسب (۱۳۹۱) نیز با استفاده از شاخص‌های ناپایداری KI، LI و LCL به بررسی وقوع توفان‌های تندری در ایستگاه دزفول پرداخته‌اند. صالحی و همکاران (۱۳۹۳) در پژوهشی با استفاده از داده‌های جو بالای مشهد به بررسی شاخص‌های ناپایداری، هنگام وقوع ناپایداری‌های شدید پرداخته و نتیجه گرفتند که بهترین شاخص‌های ترکیبی برای مشخص کردن توفان‌های تندری شدید، ترکیب شاخص صعود (LI) و انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی (CAPE) و همچنین شاخص صعود و سطح تعادل است.

عزیزی و همکاران (۱۳۹۶)، تحلیل مکانی طوفان‌های تندری در ایران را بررسی و نشان داد که بیشترین طوفان‌های تندری در شمال غرب و کمترین در نواحی مرکزی و شرقی ایران رخ می‌دهد. فلک و همکاران (۱۳۹۹) با تحلیل ماهانه فراوانی توفان‌های تندری در غرب کشور نشان دادند که ماه فروردین با ۷۵ روز بیشترین و ماه مرداد با ۲ روز کمترین فراوانی را دارند. خوش اخلاق و ماهوتچی (۱۳۹۹) با واکاوی همیدی بارش‌های تندری مخرب در مشهد نشان دادند منابع تامین رطوبت این طوفان‌ها دریای عرب، دریای عمان، خلیج فارس و دریای سرخ هستند. حسینی و کربلایی (۱۴۰۰) با بررسی طوفان‌های تندری در فلات ایران نشان دادند که همه مناطق مورد مطالعه در طول

<sup>1</sup> Numerical Weather Prediction

سال کم و بیش پتانسیل رخداد طوفان تندری وجود دارند. همچنین با بررسی نمودارهای skew-t و شاخص‌های CAPE و PWAT بیان کردند که رطوبت در روز طوفان نسبت به روز قبل از طوفان بیشتر و ناپایداری ناشی از صعود همرفتی حدود دو برابر است.

با توجه به مطالعات انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از شاخص‌های ناپایداری تا حدودی می‌تواند وضعیت ناپایداری جو را مشخص کند. ولی برای محاسبه شاخص‌های ناپایداری نیاز به داده‌های جو بالا دارد که به ویژه در منطقه خاورمیانه از تراکم مناسبی برخوردار نیستند. برای حل این مشکل می‌توان از داده‌های شبکه‌ای بازتحلیل که امروزه با قدرت تفکیک مناسبی برای کل کره زمین در دسترس هستند، استفاده کرد. از جمله این داده‌ها می‌توان به داده‌های بازتحلیل GFS<sup>۱</sup> نام برد که در حال حاضر یکی از منابع اصلی تحلیل وضعیت هوا در مراکز هواشناسی به شمار می‌روند.

سامانه پیش بینی جهانی (GFS)، یک مدل پیش بینی وضعیت جو است که توسط مراکز ملی برای پیش‌بینی محیطی<sup>۲</sup> توسعه داده شده است. ده‌ها مورد از متغیرهای جوی و خاک مانند درجه حرارت، باد، مقدار، رطوبت خاک و ... از طریق این مجموعه داده‌ها در دسترس هستند. کل جو کره زمین و پوسته آن به وسیله GFS در یک شبکه افقی با تفکیک افقی ۲۸ کیلومتر، بین نقاط شبکه پوشش داده شده است که توسط مراکز پیش بینی عملیاتی برای پیش بینی وضعیت هوا تا ۱۶ روز آینده به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ناسلار و همکاران (۲۰۱۳)، از دو مدل GFS و NAM برای پیش‌بینی طوفان‌های تندری در نواحی غربی آمریکا استفاده کردند و نشان دادند که علی‌رغم برخی تفاوت‌ها در نتایج، هر دو مدل توانایی نسبتاً مناسبی دارند. دولینگر (۲۰۱۸)، در تحقیق با استفاده از داده‌های مدل سامانه پیش بینی جهانی (GFS) در آفریقا جهت پیش‌بینی طوفان‌های تندری، نتایج امیدوارکننده‌ای به‌ویژه در طول ماه‌های دو فصل بهار تا پاییز بدست آورد.

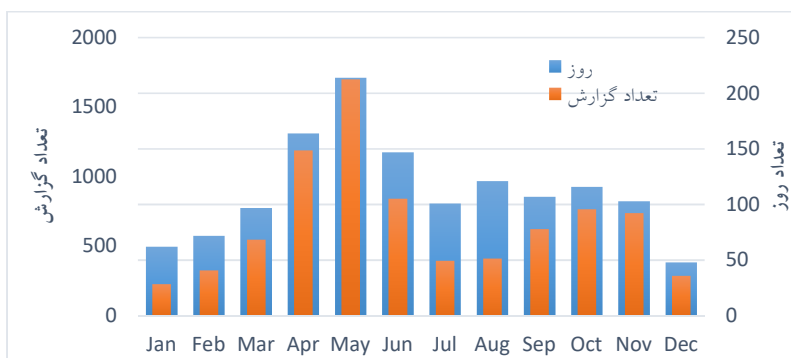
در بین پژوهشگران داخلی مجرد و همکاران (۱۳۹۶) از داده‌های بازتحلیل ERA5 مرکز اروپایی پیش بینی میان مدت وضعیت هوا (ECMWF) برای تحلیل ناپایداری‌های کشور استفاده کردند. ایشان تنها دو پارامتر CAPE و VWS را به کار گرفتند و نتیجه گرفتند که عملکرد شاخص CAPE برای بیان شدت طوفان چندان مناسب نیست. در پژوهش حاضر، توانایی و عملکرد داده‌های بازتحلیل GFS در شناسایی توفان‌های تندری با استفاده از ده پارامتر ناپایداری مورد آزمون قرار گرفته است که علاوه بر استفاده از داده‌های متفاوت، تعداد شاخص‌های ناپایداری به کار گرفته شده در مقایسه با پژوهش مجرد و همکاران (۱۳۹۶) بسیار متنوع تر است. در صورت عملکرد مثبت این داده‌ها می‌توان از آنها برای محاسبه شاخص‌های ناپایداری در مناطقی که داده‌های جو بالا وجود ندارد، استفاده کرد. همچنین شناسایی و یا درک عدم قطعیت این داده در شناسایی توفان تندری می‌تواند به شناختن منابع خطای داده‌های خروجی مدل‌های هواشناسی و پیش‌بینی‌های مراکز هواشناسی کمک کند.

1 Global Forecast System

2 National Center for Environmental Prediction

## داده‌ها

محدوده مورد بررسی در این پژوهش، کل کشور ایران است که وسعت آن بیش از  $1/648/000$  کیلومتر مربع می‌باشد. برای رسیدن به هدف پژوهش از دو سری داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های بازتحلیل شبکه بندی شده استفاده شده است. داده‌های مشاهده‌ای شامل گزارش ساعتی رعدو برق مربوط به ۳۶۱ ایستگاه هواشناسی همدیدی کشور طی دوره ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵ می‌باشد. در این مطالعه تنها به وقایعی که در ساعت‌های ۱۲، ۱۵ و ۱۸ گرینویچ گزارش شده اند، پرداخته شده است تا رخدادهایی که احتمالاً به دلیل عبور جبهه سرد در طول شب و یا صبح اتفاق می‌افتند در تحلیل‌ها وارد نشوند. **Error! Reference source not found.** تعداد رخداد ثبت شده و تعداد روز را برای هر یک از ماه‌های سال نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که تعداد گزارش رعدو برق و روزهای آن از زمستان به سمت ماه‌های گرم سال افزایش می‌یابد که دلیل آن گرم شدن سطح زمین و افزایش ناپایداری ایستایی درون جو است. بیشترین روزهای رعدوبرقی و تعداد گزارش متعلق به ماه‌های آوریل و می می‌باشد که تعداد آنها به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به سایر ماه‌ها بیشتر است. از ماه جولای تا نوامبر تعداد روزهای همراه با رعدوبرق تقریباً ثابت بوده ولی تعداد گزارش‌های ماهانه ابتدا کاهش و در فصل پاییز افزایش می‌یابند که به دلیل افزایش تعداد سامانه‌های کم فشار و فعالیت جبهه سرد همراه با آنها است. کمترین تعداد گزارش و روز همراه با رعدوبرق در ماه دسامبر به چشم می‌خورد که دلیل آن پایداری جو به دلیل سرد بودن زمین و جو در آخرین ماه پاییز است.



شکل ۱: تعداد گزارش رعدوبرق (محور سمت چپ) و روز آن (محور سمت راست) برای ماه‌های مختلف سال

از آنجا که در این مطالعه اثر ناپایداری‌های نقطه‌ای بر ایجاد رعدوبرق بیشتر مورد نظر بوده است بر روزهای منتخب دو ماه آوریل و می تمرکز شده است و تنها گزارشات این دو ماه مورد بررسی قرار گرفت. توزیع مکانی ایستگاه‌هایی که در دوره مورد مطالعه رخداد رعدوبرق را گزارش کرده اند نشان می‌دهد که تقریباً همه نقاط کشور در اثر ناپایداری بهاری دارای رعدوبرق بوده‌اند (شکل نشان داده نشده است) که با نتایج حسینی و کربلایی (۱۴۰۰) همخوانی دارد. بیشترین تعداد گزارش ایستگاهی روزانه ۴۴ ایستگاه بوده است که در تاریخ ۲۳ آوریل ۲۰۱۰ (۳ اردیبهشت ۱۳۸۹) ثبت شده است. همچنین ۵۹ روز از دوره مورد مطالعه تنها یک گزارش رعدوبرق ثبت شده است.

برای بررسی میزان انطباق شاخص‌های ناپایداری با رخداد رعدوبرق، دوره مورد مطالعه بر حسب تعداد گزارش ثبت شده در یک روز به چهار چارک ۱-۱۱، ۱۲-۲۲، ۲۳-۳۳ و ۳۴-۴۴ تقسیم بندی شده‌اند که در هر چارک به ترتیب ۲۷۶، ۲۶۴، ۱۷۸ و ۸۷ ایستگاه گزارش رعدوبرق داشته‌اند. دلیل این تقسیم بندی آن است به ترتیب از چارک یک به بالا گستره مکانی ناپایداری های جوی بیشتر می شود و به این صورت می توان شرایط ناپایدار را در حالت های مختلف مورد آزمون قرار داد.

برای شناسایی توانایی آشکارسازی ناپایداری های جوی در داده های GFS، از داده های بازتحلیل این مجموعه با قدرت تفکیک ۰/۵ درجه در راستاهای طول و عرض جغرافیایی استفاده شده است و ده شاخص معیار ناپایداری که در ادامه آمده است از این داده ها استخراج و یا محاسبه شده اند (جدول ۱). این شاخص ها در ساعت ۱۲ گرینویچ در تمام روزهای منتخب و برای نزدیک ترین نقطه شبکه به ایستگاه، به دست آمده و تحلیل های آماری برای هر چارک به طور جداگانه برای آن انجام شده است.

### شاخص KI

برای محاسبه این شاخص از کمیت های دما و دمای نقطه شبنم در سه تراز مشخص ۵۰۰، ۷۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال استفاده می شود. این شاخص برای پیش بینی توفان های تندی توده هوا یا توفان های تندی که ساز و کار دینامیکی در آن نقش ندارد، کاربرد دارد و به صورت زیر تعریف می شود (زاهدی و چوبدار، ۱۳۸۶):

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

در این رابطه T معرف دما (°C)، اندیس ها گویای تراز فشاری آن بر حسب هکتوپاسکال و T<sub>d</sub> نشان دهنده دمای نقطه شبنم (°C) است.

### شاخص TTI

شاخص TTI<sup>۱</sup> شاخصی رایج بوده و با استفاده از رابطه (۲) تعریف می شود (میلر، ۱۹۷۲):

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

که متغیرها مشابه با رابطه (۱) می باشند. از مزایای این شاخص تشخیص ساختار دمایی و رطوبتی ستون جو و عیب آن عدم تشخیص دقیق صعود توده هوا می باشد. براساس این شاخص هرچه اختلاف دمای سطح پایین و میانی جو بیشتر باشد شرایط ناپایداری شدیدتر بوده و مستعد شکل گیری یک طوفان تندی می باشد. واحدهای دما بر حسب درجه سلسیوس می باشند.

### شاخص LI

گالوی در سال ۱۹۵۶ شاخص LI<sup>۲</sup> را معرفی کرد که براساس اختلاف دمای محیط و بسته هوا در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال است. با این فرض که بسته اولیه از لایه مرزی و ۵۰۰ متری از سطح زمین حرکت خود را شروع کرده باشد (به نقل از تاجبخش و همکاران، ۱۳۸۸):

$$LI = T_{500}^e - T_{500}^p \quad (3)$$

<sup>1</sup>Totals Total index

<sup>2</sup>Lifted index

که در این رابطه  $T_{500}^e$  دمای محیط در ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال و  $T_{500}^p$  دمای بسته هوا در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال است در زمانی که از ارتفاع ۵۰۰ متری سطح زمین حرکت خود را شروع کرده باشد.

در داده‌های GFS دمای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال موجود است. برای به دست آوردن دمای بسته هوا در این تراز ابتدا فرض می‌شود که بسته هوا از ارتفاع ۵۰۰ متری سطح زمین به صورت بی دررو خشک تا سطح LCL (سطحی که بسته هوای نمناک غیر اشباع بر اثر صعود بی در روی خشک در آن سطح اشباع می‌شود) صعود کرده و سپس به صورت بی دررو اشباع تا تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ادامه مسیر می‌دهد. بنابراین در قسمت اول حرکت میزان افت دمای آن با ارتفاع به اندازه افتاهنگ خشک ( $\Gamma_d$ ) بوده و سپس از مقدار افتاهنگ اشباع ( $\Gamma_s$ )، که مقدار آن ثابت نبوده و به محتوای رطوبت آن بستگی دارد، پیروی می‌کند. مقدار ارتفاع و فشار تراز LCL از روابط ۴ و ۵ به دست می‌آیند (استال، ۲۰۱۵):

$$Z_{LCL} = a \times (T - T_d) \quad (۴)$$

$$P_{LCL} = P \left[ 1 - b \left( \frac{T - T_d}{T} \right) \right]^{C_p/R} \quad (۵)$$

که در روابط بالا  $a$  و  $b$  به ترتیب برابر با  $0.125 \text{ km/C}^\circ$  و  $1/225$  (بدون بعد) می‌باشند. سایر متغیرها مفهوم معمول خود را دارند و مربوط به بسته هوا در سطح زمین می‌باشد. بنابراین دمای بسته هوایی که با دمای  $T_0$  از ارتفاع ۵۰۰ متری سطح زمین ( $Z_0$ ) حرکت کرده است در سطح LCL از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T_{lcl}^p = T_0 - \Gamma_d \times (Z_{lcl} - Z_0) \quad (۶)$$

در این رابطه اندیس  $p$  در بالا بیانگر بسته هوا است. پس از سطح LCL ادامه حرکت بسته هوا تا تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال براساس افتاهنگ بی‌دررو اشباع صورت می‌گیرد. برای محاسبه این مقدار که ثابت نیست از رابطه (۷) استفاده شده است (استال، ۲۰۱۵):

$$\Gamma_s = \Gamma_d \times \frac{1 + m r_s / T}{1 + n r_s / T^2} \quad (۷)$$

که در اینجا  $m$  و  $n$  دو ضریب ثابت و برابر با  $8711 \text{ K}$  و  $10^7 \times 1/35 \text{ K}^2$  و  $r_s$  نسبت اختلاط است. با داشتن دمای بسته هوا و فشار در سطح LCL از رابطه (۸) می‌توان برای به دست آوردن دمای بسته هوا در هر تراز فشاری (در این جا ۵۰۰ هکتوپاسکال) تحت فرایند بی درروی اشباع استفاده کرد:

$$T_{500}^p = T_{lcl} - \Gamma_s \times (Z_{lcl} - Z_{500}) \quad (۸)$$

شاخص LI با تعریف استاندارد به صورت پیش فرض در داده‌های GFS وجود ندارد و در این مطالعه محاسبه شده است. با این حال دو شاخص مشابه با نام‌های LFTX و 4LFTX در این داده‌ها وجود دارد که اولی همان شاخص LI استاندارد است با این فرض که بسته هوا از سطح زمین حرکت کرده است و دومی شروع حرکت بسته هوا از سطحی در نظر گرفته شده است که بیشترین دمای پتانسیل معادل را در لایه آمیخته دارا می‌باشد. در این مطالعه کارایی هر سه شاخص با یکدیگر مقایسه شده است.

## شاخص CIN

شاخص CIN و یا شاخص سرکوب همرفت، کل کار لازم برای حرکت بسته هوا از بالای لایه آمیخته تا سطح LFC است که با رابطه زیر نشان داده می‌شود (استال، ۲۰۱۵):

$$CIN = \sum_{z_i}^{LFC} \frac{g}{T_{ve}} (T_{vp} - T_{ve}) \cdot \Delta z \quad (9)$$

که در آن  $T_{vp}$  و  $T_{ve}$  به ترتیب دمای مجازی بسته هوا و محیط در سطوح مختلف می‌باشند. CIN معمولاً دارای مقدار منفی می‌باشد و بیانگر یک لایه مقاومت برای صعود هوا بر بالای لایه آمیخته می‌باشد. برای تشکیل ابر CB جرقه اولیه حرکت صعودی هوا، باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا بتواند بر این لایه مقاومت غلبه کند. چنانچه اندازه CIN بزرگتر از ۶۰ باشد شرایط برای تشکیل ابر CB نامحتمل است.

شاخص انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی<sup>۱</sup>

از شاخص‌های عمده برای پیش بینی‌های یک یا دو روزه ناپایداری است که فقط ناپایداری را نشان می‌دهد و نمی‌تواند عامل ناپایداری را مشخص کند. مقادیر زیاد CAPE گویای اختلاف بیشتر بین دمای محیط و دمای بسته هوای در حال صعود است. هر چه این اختلاف بیشتر باشد، نیروی شناوری قوی‌تر و شتاب بالا رو بیشتر خواهد شد (صادقی حسینی، ۱۳۸۵). این شاخص به صورت پیش زمینه به سه شکل در داده‌های GFS وجود دارند. این سه حالت شامل SBCAPE که فرض می‌کند بسته هوا از سطح زمین حرکت کرده است، BLCAPE که فرض بر این است بسته هوا با شرایط میانگین لایه مرزی شروع به حرکت کند و MLCAPE که در آن فرض می‌شود بسته هوا با شرایط میانگین لایه آمیخته صعود کند. در این مطالعه هر سه شاخص تحلیل شده‌اند.

شاخص تهدید کننده هوای بد<sup>۲</sup> (SWEAT)

این شاخص در سال ۱۹۷۲ توسط میلر معرفی شده است. این نمایه مانند نمایه‌های پیشین برای ارزیابی و تحلیل خطرات بالقوه ناپایداری‌های جوی و احتمال وقوع توفان‌های مختلف از تندر گرفته تا تورنادو به کار می‌رود و با رابطه (۱۰) معرفی می‌شود:

$$SW = 12T_{d850} + 20(TTI - 49) + 4FF_{850} + 2FF_{500} + 125(\sin(dd_{500} - dd_{850}) + 0.2) \quad (10)$$

که در این رابطه FF و dd به ترتیب تندی و جهت باد، و اندیس‌ها سطح فشاری را نشان می‌دهند. شاخص TTI در رابطه (۲) معرفی شد. محاسبه جملات در این رابطه دارای شرایطی است که برای توضیحات بیشتر می‌توان به استال (۲۰۱۵) مراجعه کرد.

<sup>1</sup> Convective Available Energy

<sup>2</sup> Severe Weather Threat Indicator

برای همه شاخص‌های ناپایداری یک آستانه در نظر گرفته شده است که براساس آن‌ها توفان تندی محتمل درجه بندی می‌شود. مقادیر این آستانه‌ها در جدول ۱ ذکر شده‌اند.

جدول ۱: محدوده‌های شاخص‌های دینامیکی مورد استفاده (استال، ۲۰۱۵)

شاخص	میزان ناپایداری و همرفت			
<b>KI</b>	کمتر از ۲۰ جو پایدار	۲۰ تا ۳۰ کمی ناپایدار	۳۰ تا ۴۰ نسبتاً ناپایدار	بیشتر از ۴۰ ناپایداری شدید
<b>TTI</b>	کمتر از ۴۵ جو پایدار	۴۵ تا ۵۰ کمی ناپایدار	۵۰ تا ۵۵ احتمال توفان تندی شدید	بیشتر از ۵۵ توفان تندی شدید
<b>LI, LFTX, 4LFTX</b>	بیشتر از ۲ جو پایدار	۰ تا ۲ ناپایداری ضعیف	۰ تا ۳ ناپایداری کم	۳- تا ۶- نسبتاً ناپایدار
<b>SWEAT</b>	کمتر از ۳۰۰ جو پایدار	بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ CB پراکنده	۴۰۰ تا ۵۰۰ ناپایداری شدید	بیشتر از ۵۰۰ احتمال تورنادو
<b>CIN</b>	بیشتر از صفر همرفت ضعیف	صفر تا ۲۰- امکان وجود رعدوبرق	۲۰- تا ۶۰- شرایط ایده آل برای CB	۶۰- تا ۱۰۰- لایه مقاومت شدید احتمال ضعیف CB
<b>CAPE</b>	۰ پایدار	۱ تا ۱۵۰۰ کمی ناپایدار	۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ نسبتاً ناپایدار	بیشتر از ۲۵۰۰ بسیار ناپایدار
<b>MLCAPE BLCAPE</b>	۰ تا ۳۰۰ جو پایدار	۳۰۰ تا ۱۰۰۰ ابر CB ضعیف	۱۰۰۰ تا ۲۵۰۰ ابر CB متوسط	بیشتر از ۲۵۰۰ بسیار ناپایدار احتمال تورنادو

## نتایج و بحث

جدول ۲ میانگین هر شاخص را در نزدیک‌ترین نقطه به محل گزارش توفان‌های تندی برای هر چارک نشان می‌دهد. اگرچه میانگین‌گیری در پهنه‌ای به وسعت ایران نمی‌تواند مؤید اثرات محلی باشد (به عبارت دیگر آثار محلی ناپایداری در میانگین‌گیری ناپدید می‌شوند) ولی توانایی کلی شاخص را می‌تواند نمایان سازد. در این جدول شاخص‌هایی که در ناحیه ناپایداری متوسط و ضعیف قرار داشته‌اند (براساس مقادیر پیشنهادی جدول ۱) به ترتیب با دو ستاره و یک ستاره مشخص شده‌اند. در زیر هر شاخص درصد صحت هر شاخص نسبت به کل رخدادها در هر چارک آورده شده است. با توجه به مقادیر به دست آمده، سه شاخص KI، TT و CIN به طور میانگین برای همه چارک‌ها

ناپایداری متوسط و بالاتر را در نزدیکی محل ایستگاه نشان داده‌اند و در چارک‌های بالاتر ناپایداری شدیدتری نیز نشان داده است. شاخص CIN بیشترین تطبیق را در بین این سه شاخص دارد که به طور میانگین بیش از ۸۰ درصد برای همه چارک‌ها می‌باشد. این عملکرد مناسب حتی در چارک اول که ناپایداری ضعیف‌تری وجود داشته است، نیز دیده می‌شود.

جدول ۲: میانگین شاخص‌های ناپایداری برای هر چارک در نزدیک‌ترین نقطه به ایستگاه‌هایی که توفان‌های تندری را ثبت کرده‌اند

BLCAPE	MLCAPE	CAPE	CIN	4LFTX	LFTX	LI	SW	TT	KI	
۱۹۲/۵۵ ۱	۲۲۱/۵۷ ۱	۲۰۶/۰۲ ۰	-۲۷/۶۲** ۸۹	-۰/۸۳* ۷۳	-۰/۷۵* ۷۲	۲/۱۰ ۹	۱۶۲/۴۷ ۰	۵۱/۹۶** ۷۸	۳۰/۱۸** ۵۶	چارک اول ۱۲۸۱
۲۰۱/۴۷ ۱	۲۶۶/۹۹ ۱	۲۱۰/۳۶ ۰	-۲۴/۴۶** ۸۸	-۰/۹۳* ۷۷	-۰/۶۵* ۷۵	۲/۱۷ ۱۲	۱۷۳/۵۹ ۰	۵۱/۹۱** ۷۷	۳۰/۶۸** ۶۱	چارک دوم ۱۰۴۴
۱۹۸/۴۵ ۱	۲۳۴/۳۲ ۰	۲۳۵/۳۹ ۰	-۲۸/۳۰** ۸۸	-۱/۰۲* ۷۶	-۰/۸۶* ۷۳	۱/۷۴ ۱۱	۱۸۸/۱۳ ۰	۵۲/۱۹** ۷۷	۳۰/۳۱** ۵۹	چارک سوم ۴۱۳
۳۰۰/۳* ۲	۱۱۱/۱۷ ۰	۳۴۵/۱۹ ۰	-۲۸/۳۳** ۸۰	-۱/۴۵* ۸۷	-۱/۴۷* ۸۵	۱/۹۹ ۴	۲۳۳/۴۹ ۵	۵۲/۲۱** ۸۰	۳۴/۷۸** ۸۰	چارک چهارم ۱۲۳

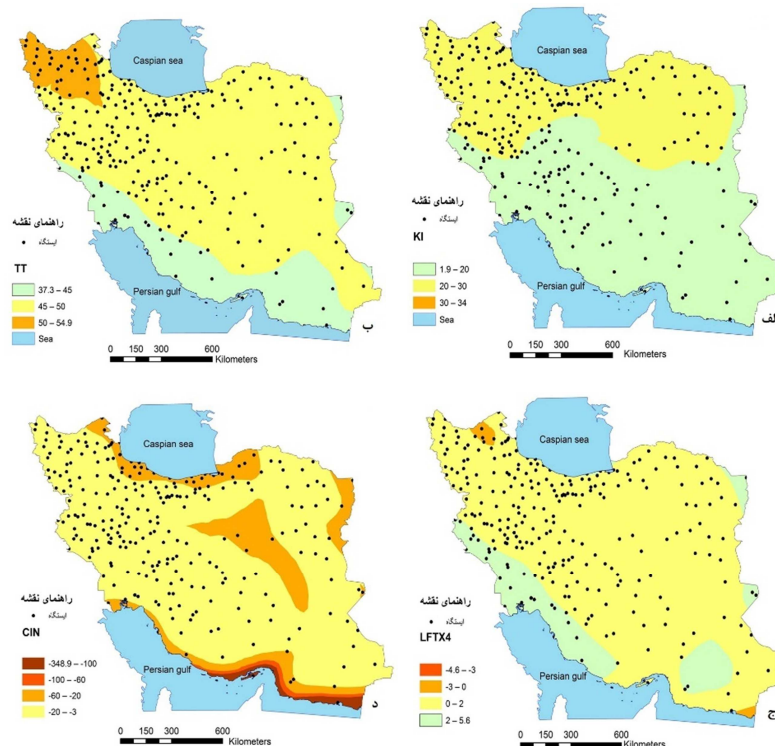
دو شاخص LFTX و 4LFTX ناپایداری ضعیف را در زمان رخداد توفان‌های تندری نشان داده‌اند و در چارک‌های بالاتر (که ناپایداری قوی تر بوده است) مقدار شاخص نیز ناپایداری بیشتری را نشان می‌دهد (منفی تر شده است) ولی به مرتبه ناپایداری قوی وارد نشده است. میانگین انطباق این دو شاخص با رخداد توفان‌های تندری بیش از ۷۰ درصد بوده و با تشدید ناپایداری این مقدار افزایش یافته است. در مقابل شاخص‌های دیگر LI استاندارد و SW در بیان مقدار ناپایداری بسیار ضعیف عمل کرده‌اند. سه شاخص بیان کننده انرژی پتانسیل در دسترس (CAPE) نیز براساس حدود پیشنهادی (جدول ۱) عملکرد مناسبی را برای فلات کشور ایران نداشته‌اند. عملکرد نامناسب شاخص CAPE براساس آستانه‌های استاندارد در مطالعه موردی که توسط صادقی حسینی و رضاییان (۱۳۸۵) و حسینی و کربلایی (۱۴۰۰) انجام شده است، انطباق دارد. همچنین مجرد و همکاران (۱۳۹۶) نیز به پایین بودن مقادیر کمیت CAPE در فلات ایران نسبت مناطق دیگر نظیر قاره اقیانوسیه و آمریکا اشاره کرده‌اند.

با توجه به نتایج جدول ۱، در ادامه تنها به شاخص‌هایی که به صورت میانگین عملکرد مناسبی داشته‌اند (شاخص‌های KI، TT، CIN، LFTX و 4LFTX) پرداخته می‌شود. از این رو میانگین چهار شاخص بالا در هر چارک به صورت نقشه‌های پهنه بندی برای کل کشور تحلیل می‌شود. دو شاخص LFTX و 4LFTX عملکرد مشابهی داشته‌اند و تنها اختلاف جزئی بین آنها دیده می‌شود که به دلیل خلاصه نویسی تنها نتایج 4LFTX که عملکرد مناسب‌تری داشته است در اینجا آورده شده است.

## چارک اول

مقادیر شاخص‌های ناپایداری و ایستگاه‌ها (دایره‌های سیاه‌رنگ) در روزهای مربوط به چارک اول در شکل ۲ نشان داده شده است. براساس این شکل تقریباً همه ایستگاه‌های کشور دارای حداقل یک تا ۱۲ گزارش رعدوبرق ثبت شده بوده‌اند و توزیع مکانی آنها در همه کشور دیده می‌شود. این گستردگی بیانگر سهم بیشتر ناپایداری‌های محلی در رخداد توفان‌های تندری می‌باشد که می‌توان ساختار ضعیف ناپایداری جوی را نیز از آن نتیجه گرفت. در شکل برای هر شاخص ناپایداری‌های منجر به رعدوبرق با رنگ زرد و ناپایداری‌های شدیدتر با رنگ قهوه‌ای نمایش داده شده است. براساس شکل ۲ب و شکل ۲ج دو شاخص TT و 4LFTX وضعیت نسبتاً مشابهی را به لحاظ ناپایداری نمایش داده‌اند به ویژه برای ناپایداری متوسط، هر دو شاخص برای کل کشور به جز نوار جنوبی ناپایدار نشان داده‌اند. با این حال این دو شاخص در تشخیص ناپایداری‌های شدید در شمال غرب عملکرد متفاوتی داشته‌اند. شاخص KI (شکل ۲الف) نیمه جنوبی کشور را پایدار و نیمه شمالی کشور را ناپایدار متوسط نشان داده است. این در حالی است که گزارش رعدوبرق در نیمه جنوبی کشور به وفور دیده می‌شود و بیانگر عملکرد نامناسب این شاخص است. شاخص CIN کل کشور را ناپایدار متوسط و برخی نقاط کویر مرکزی ایران و سواحل جنوبی و شمالی کشور را ناپایدار قوی نشان داده است. می‌توان گفت این مناطق نه به دلیل وضعیت جوی، بلکه به دلیل کم ارتفاع بودن در وضعیت ناپایداری شدید قرار گرفته‌اند. در

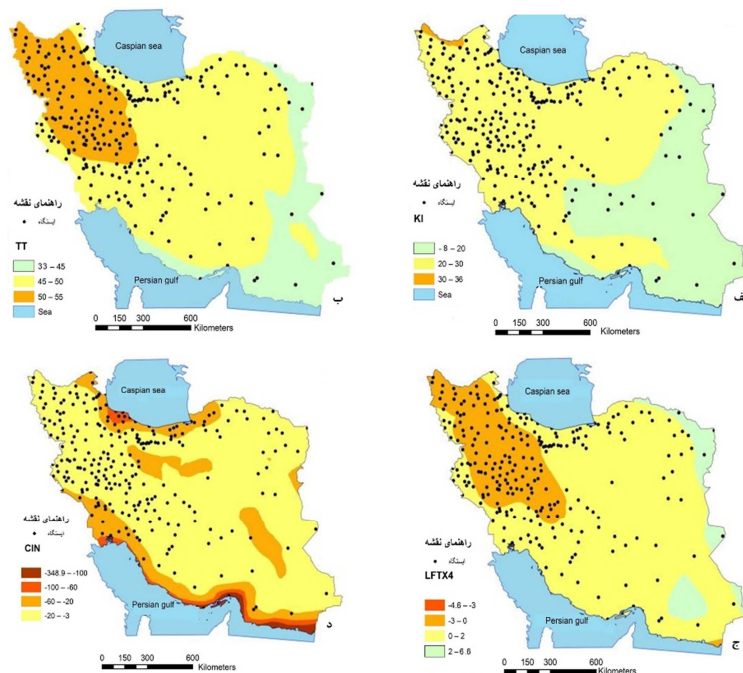
جدول ۲ هم ملاحظه می‌شود که این شاخص در ۸۹ درصد موارد موفق بوده است.



شکل ۲: توزیع مکانی میانگین شاخص‌های ناپایداری و محل گزارش توفان‌های تندری در دوره زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵ در چارک اول. الف) شاخص TT، ب) شاخص KI، ج) شاخص CIN و د) شاخص 4LFTX

### چارک دوم

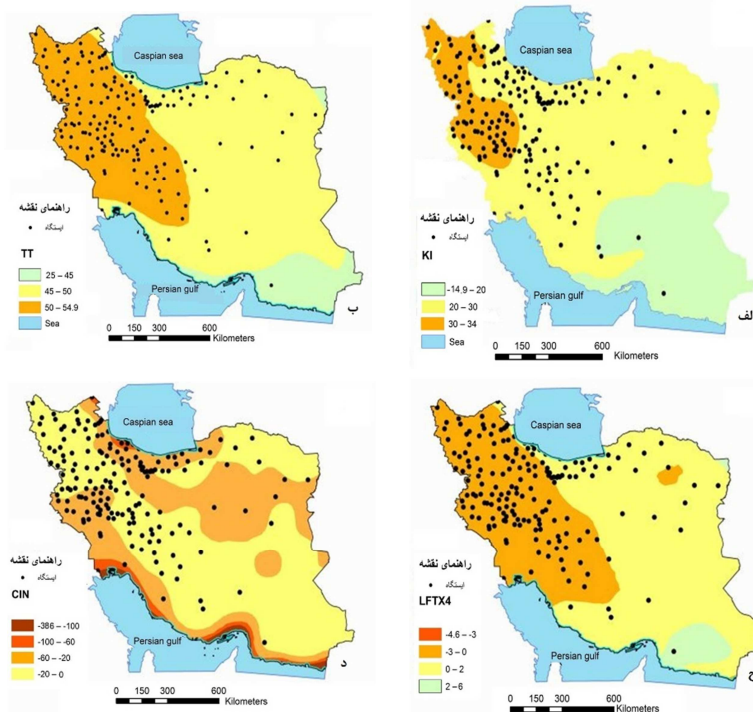
در چارک دوم تعداد گزارش توفان‌های تندری در کل ایستگاه‌های کشور بین ۱۲ تا ۲۴ گزارش بوده است که میانگین شاخص‌های ناپایداری در این روزها در شکل ۳ نمایش داده شده است. بیشتر تراکم گزارش در این چارک در نیمه غرب کشور بوده است. اگرچه در نیمه شرقی کشور نیز تعداد ایستگاه قابل توجه است. در این شکل نیز رنگ زرد نشانگر ناپایداری ضعیف و رنگ قهوه ای بیانگر ناپایداری متوسط و قوی است. با توجه به شکل ۳ شاخص TT و 4LFTX الگوی مشابهی دارند. براساس این دو شاخص، شمال غرب تا غرب کشور به طور میانگین دارای ناپایداری شدید هستند. سایر مناطق کشور نیز به جز نوار شرق کشور ناپایداری ضعیف وجود داشته است. شاخص KI نیمه غربی کشور را به طور میانگین در روزهای منتخب این چارک ناپایدار ضعیف و شرقی و جنوب شرق کشور را پایدار توصیف کرده است. شاخص CIN تمام مناطق کشور را ناپایدار ضعیف تا متوسط (رنگ زرد) و برخی مناطق را ناپایدار قوی (قهوه ای روشن) نشان داده است که با گزارشات ثبت شده نطابق زیادی ندارد. براساس این شاخص نوار ساحلی شمال و جنوب کشور به طور میانگین در این روزها پایدار بوده‌اند.



شکل ۳: توزیع مکانی میانگین شاخص‌های ناپایداری و محل گزارش توفان‌های تندری در دوره زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵ در چارک دوم. الف) شاخص TT، ب) شاخص KI، ج) شاخص CIN و د) شاخص 4LFTX

### چارک سوم

شکل ۴ توزیع میانگین شاخص‌های ناپایداری را به همراه ایستگاه‌های دارای گزارش توفان‌های تندری در چارک سوم نشان می‌دهد. توزیع یکنواخت ایستگاه‌ها در نیمه غربی کشور حاکی از آن است که سهم عوامل سامان‌مند در رخداد توفان‌های تندری در روزهای مربوط به چارک سوم بیشتر از عوامل محلی بوده است. در همه شکل‌ها رنگ زرد و قهوه‌ای به ترتیب ناپایداری متوسط و قوی را که می‌تواند منجر به رخداد توفان‌های تندری شود، نشان می‌دهد. به لحاظ الگو سه شاخص KI، TT و 4LFTX در تشخیص ناحیه ناپایداری مشابه بوده و تنها مقداری در وسعت مناطق تحت پوشش با یکدیگر اختلاف دارند (به ویژه شاخص‌های TT و 4LFTX). هر سه شاخص مناطق جنوب شرق کشور را مستعد رخداد توفان‌های تندری تشخیص نداده‌اند. اگرچه برای شاخص CIN (شکل ۴د) نیز رنگ زرد و قهوه‌ای مناطق مستعد ابرهای CB را نشان می‌دهند ولی الگوی آن کاملاً با سه شاخص دیگر متفاوت است و تقریباً کل مناطق خشکی کشور را مناسب تشخیص داده است و در واقع به این دلیل است که عملکرد این شاخص در جدول ۲ حدود ۸۸ درصد می‌باشد. در این چارک بیشترین گزارش توفان‌های تندری در نیمه غربی کشور دیده می‌شود و انطباق خوبی با وضعیت شاخص‌ها دارد با این حال بیشترین عدم تطبیق در جنوب شرق دیده می‌شود. البته این بدان معنا نیست که شاخص در این مناطق عملکرد مناسبی نداشته است بلکه ممکن است در زمان گزارش ناپایداری را هم نشان داده باشد و بالعکس انطباق شاخص با رخداد به طور میانگین در غرب به این معنی نیست که این شاخص صددرصد عملکرد مناسبی داشته است.



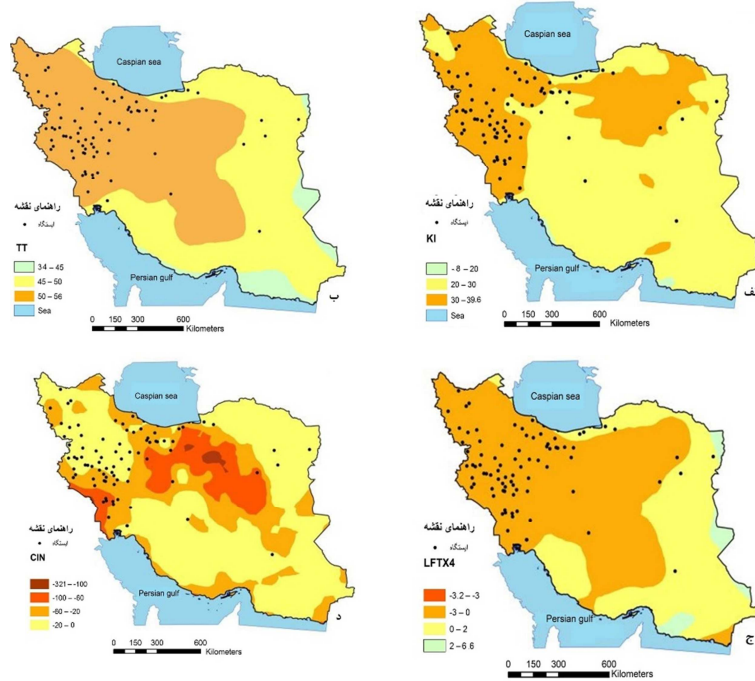
شکل ۴. توزیع مکانی میانگین شاخص‌های ناپایداری و محل گزارش توفان‌های تندری در دوره زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵ در چارک سوم. الف) شاخص TT، ب) شاخص KI، ج) شاخص CIN و د) 4LFTX.

### چارک چهارم

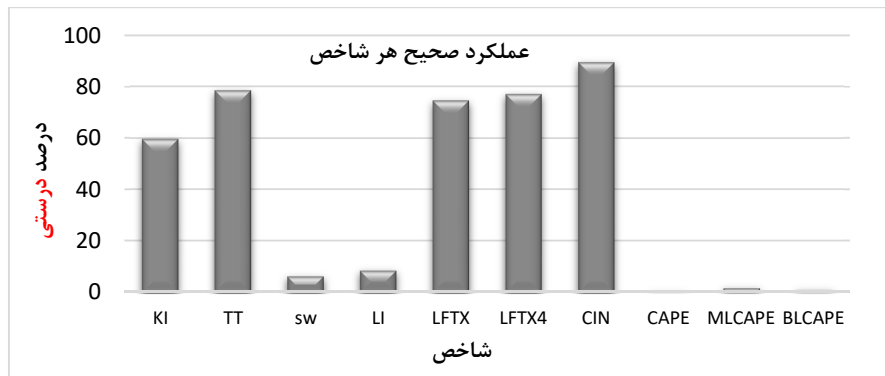
در چارک چهارم بیشتر گزارش های توفان های تندری از ایستگاه های واقع در نیمه غربی و در نواری از غرب که تا جنوب رشته البرز ادامه دارد، بوده است (شکل ۵). این الگو می تواند نشان دهنده تلفیق شرایط جوی مناسب با ناپایداری های محلی برای رخداد این تعداد رعدوبرق در چارک چهارم باشد. شکل ۵ الف تا د وضعیت شاخص های ناپایداری را برای این دسته از ایستگاه ها نشان می دهد. در اینجا نیز رنگ زرد بیانگر ناپایداری متوسط و رنگ قهوه ای ناپایداری شدید می باشد. با توجه به شکل در این چارک بیشتر ایستگاه هایی که گزارش رعدوبرق داشته اند براساس همه شاخص ها در ناحیه ناپایداری شدید قرار می گیرند. نکته قابل توجه آن است که سه شاخص KI، TT و 4LFTX به طور میانگین تمام مناطق کشور را ناپایدار و بیشتر مناطق نیمه غربی کشور را ناپایدار شدید نشان می دهند (شکل ۵ الف تا شکل ۵ ج) که با موقعیت رخدادهای مشاهده شده همخوانی دارد. ولی شاخص CIN (شکل ۵ د) وضعیت ناپایداری را با جزئیات بیشتری نشان می دهد. ناحیه قرمز رنگ و قهوه ای تیره در این شکل بیانگر پایداری جو است و احتمال رخداد ناپایداری در این نواحی نامحتمل است. با توجه به شکل تنها تعداد معدودی از ایستگاه ها (بیشتر در جنوب غرب) در ناحیه پایدار قرار گرفته اند که از لحاظ بیان جزئیات می تواند نشانگر برتری این شاخص نسبت به سایر شاخص ها باشد.

### بررسی کارایی شاخص ها

جهت بررسی صحت پیش بینی های شاخص های ناپایداری، نتایج شاخص ها با رخدادهای رعد و برق گزارش شده در ایستگاه های هواشناسی، مورد مقایسه قرار گرفت. در **Error! Reference source not found.** درصد عملکرد درست هر شاخص در تشخیص ناپایداری در نزدیکترین نقطه به ایستگاه گزارش دهنده، آورده شده است. با توجه به شکل بهترین شاخص از نظر عملکرد شاخص CIN یا شاخص سرکوب همرفت بوده است که تقریباً در ۹۰ درصد موارد توانسته ناپایداری را به درستی تشخیص دهد. این شاخص اغلب مناطق کشور را ناپایدار پیش بینی کرده و بخش هایی از نوار ساحلی جنوبی و شمالی و همچنین جنوب غرب کشور را برای شکل گیری ابرهای CB ایده آل نشان داده بود. توانایی سه شاخص TT، 4LFTX و LFTX در تشخیص ناپایداری تقریباً در یک سطح و بین ۷۵ تا ۸۰ درصد است. اما عملکرد سایر شاخص ها (SW، LI، CAPE، MLCAPE و BLCAPE) با توجه به آستانه های استاندارد که برای آنها تعریف شده است، در نشان دادن ناپایداری بسیار عملکرد نامناسبی داشته اند.



شکل ۵: توزیع مکانی میانگین شاخص‌های ناپایداری و محل گزارش توفان‌های تندری در دوره زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵ در چارک چهارم. (الف) شاخص TT، (ب) شاخص KI، (ج) شاخص CIN و (د) شاخص LFTX4.



شکل ۶: درصد پیش بینی درست برای هر شاخص در نزدیک ترین نقطه به ایستگاه دارای توفان تندری

### نتیجه گیری

هدف اصلی مطالعه حاضر بررسی عملکرد داده‌های باز تحلیل شبکه‌ای GFS با قدرت تفکیک ۵/۵×۵/۵ در تشخیص توفان‌های تندری عصرگاهی در کشور ایران است. برای این منظور تمام گزارشات توفان‌های تندری در ساعت‌های ۱۲، ۱۵ و ۱۸ گرینویچ در ماه‌های آپریل و می از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۵ مورد بررسی قرار گرفتند و براساس تعداد

گزارش در یک روز، توفان‌های تندری در چهار چارک دسته‌بندی شدند و چند شاخص ناپایداری جو شامل TTI, KI, SWEAT, LI, LIFTX, LIFTX4, CIN, BLCAPE, MLCAPE و CAPE برای این داده‌ها استخراج و یا محاسبه شد. در نهایت انطباق مقدار هر شاخص با نتایج گزارش‌های ثبت شده در ایستگاه‌های زمینی بررسی شد.

بررسی عملکرد شاخص‌های ناپایداری CIN, TT, 4LFTX و KI نشان داد این شاخص‌ها عملکرد مناسبی در آشکارسازی ناپایداری جو دارند (عملکرد شاخص LFTX تقریباً مشابه با 4LFTX بود). نتایج حاصل از توزیع مکانی توفان‌های تندری در چارک‌های مختلف نشان داد که در چارک‌های بالاتر (روزهای با گزارش بیشتر توفان‌های تندری) توزیع مکانی این پدیده محدودتر شده و مناطق کمتری از کشور را که بیشتر شامل غرب کشور می‌شود، پوشش می‌دهد. نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص‌ها نیز نشان می‌دهند دو شاخص TT و 4LFTX دارای الگوی تقریباً مشابهی هستند. این دو شاخص به خوبی در چارک چهارم مناطق ناپایداری شدیدی که در ایستگاه‌های زمینی گزارش شده را تشخیص داده‌اند. شاخص KI در چارک‌های پایین عملکرد متوسطی در تشخیص ناپایداری دارد ولی در چارک‌های بالاتر عملکرد آن افزایش یافته و ۸۰ درصد ناپایداری‌های گزارش شده در ایستگاه‌های زمینی را به درستی تشخیص داده است. شاخص CIN در چارک‌های پایین تقریباً تمام نقاط کشور را ناپایدار نشان می‌دهد ولی در چارک چهارم مناطقی در فلات مرکزی و جنوب غرب کشور را پایدار نشان داده است.

بررسی شاخص‌ها نشان داد که چهار شاخص منتخب در ناپایداری‌های قوی‌تر عملکرد مناسب‌تری داشته‌اند. در انتها این مسأله قابل ذکر است که کوهستانی بودن کشور ایران بر عملکرد برخی شاخص‌ها مانند SW که نیاز به مؤلفه باد دارد، تأثیرگذار است و توانایی آن را در تشخیص ناپایداری‌های جو را کاهش می‌دهد. اگرچه موسوی بایگی و اشرف (۱۳۸۹) عملکرد شاخص SW را برای مشهد تأیید کرده‌اند ولی در مطالعه ایشان از داده‌های جو بالا که مقادیر دقیق تری از پارامترهای هواشناسی و از جمله باد را به دست می‌دهد، استفاده کرده‌اند. شاخص LI استاندارد، بر مبنای صعود هوا تا رسیدن به میانه جو است و فرض شروع حرکت از ارتفاع ۵۰۰ متری سطح زمین است که این مسأله می‌تواند منشا خطا باشد. در حالی که شاخص متناظر آن یعنی دو شاخص LFTX و 4LFTX که سطح شروع صعود هوا را متفاوت در نظر می‌گیرند به مراتب عملکرد بهتری نشان داده‌اند. پیشنهاد این پژوهش این است که با تعریف مجدد مقادیر آستانه شاخص‌های مورد بررسی (ارائه شده در جدول ۱) با توجه به وضعیت اقلیمی کشور عملکرد این شاخص‌های ناپایداری و توانایی داده‌های پیش‌یابی GFS دوباره مورد ارزیابی قرار گیرد که قبلاً در مطالعه زاهدی و چوبدار (۱۳۸۶) مورد تأکید قرار گرفته بود.

## منابع

- برنا، رضا؛ فاخر نسب، احمد. (۱۳۹۱). بررسی شاخص‌های ناپایداری JCL, LI و KI در وقوع توفان‌های تندری در ایستگاه دزفول. اولین همایش ملی جغرافیا، مخاطرات محیطی و توسعه پایدار، دانشگاه آزاد اسلامی اهواز، ۴۲-۳۳. [https://jm.um.ac.ir/article\\_29948.html](https://jm.um.ac.ir/article_29948.html)
- تاج بخش، سحر؛ غفاریان، پروین؛ میرزایی، ابراهیم. (۱۳۸۸). روشی برای پیش‌بینی رخداد توفان‌های تندری با طرح دو بررسی موردی. مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۵(۴)، ۱۶۶-۱۴۷.
- حسینی، سید اسعد؛ کربلایی، علیرضا (۱۴۰۰). واکاوی همدیدی و ترمودینامیکی وقوع طوفان‌های تندری در فلات ایران. نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۰(۳۹)، ۵۹-۸۱.

- خوش اخلاق، فرامرز؛ ماهوتچی، محمدحسن (۱۳۹۸). واکای همدیدی بارش‌های تندری مخرب مشهد. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۱(۹۱)، ۲۳۵-۲۴۹.
- رسولی، علی اکبر؛ خدیجه، جوان (۱۳۹۱). تحلیل روند وقوع توفان‌های رعدوبرقی در نیمه غربی ایران با کاربرد آزمونهای ناپارامتری. فضای جغرافیایی، ۱۲(۳۸)، ۱۱۱-۱۲۶۹.
- زاهدی، مجید؛ چوبدار، اصغر. (۱۳۸۶). مقایسه شاخص‌های ناپایداری جوی حوضه آبریز آجی چای با استانداردهای ناپایداری جوی و تعیین الگو برای حوضه. جغرافیا و توسعه ناحیه ای، ۹۵(۹)، ۲۳-۴۴.
- صادقی حسینی، علیرضا؛ رضائیان، مهتاب. (۱۳۸۵). بررسی تعدادی از شاخص‌های ناپایداری و پتانسیل بارور سازی ابرهای همرفتی منطقه اصفهان. مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۲(۲)، ۹۸-۸۳.
- صالحی، حسن؛ ثنائی نژاد، سید حسین؛ موسوی بایگی، محمد. (۱۳۹۳). بررسی شاخص‌های ناپایداری هنگام وقوع پدیده‌های آب و هوایی مخرب در مشهد. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۹(۳)، ۱۲۳-۱۱۳.
- عزیزی، قاسم؛ گرامی، محمد صالح؛ شریفی، لیلا (۱۳۹۶). تحلیل فضایی طوفان‌های تندری در گستره کشور ایران. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۷(۴۷)، ۲۴۳-۲۵۹.
- عسگری، احمد؛ محبی، فرشته. (۱۳۸۹). مطالعه آماری، همدیدی توفان‌های تندری در استان خوزستان. چهارمین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم، ۱۱۹ - ۱۱۱.
- علیزاده، امین؛ کمالی، غلامعلی؛ موسوی، فرهاد؛ موسوی بایگی، محمد (۱۳۹۱). هوا و اقلیم شناسی. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، چاپ پانزدهم. ۳۹۲ صفحه.
- فلک، عسل؛ برنا، رضا؛ اسدیان، فریده (۱۳۹۹). تحلیل زمانی و مکانی توفان‌های تندری جنوب غربی ایران. جغرافیایی سرزمین، ۱۷(۶۷) ۹۰-۱۰۳.
- کاویانی، محمدرضا، علیجانی، بهلول (۱۳۹۱). مبانی آب و هواشناسی. انتشارات سمت، چاپ دوم. ۵۹۲ صفحه.
- مجرد، فیروز؛ کوشکی، سمیرا؛ معصوم پور، جعفر؛ میری، مرتضی. (۱۳۹۶). تحلیل شاخص‌های ناپایداری توفان‌های تندری در ایران با استفاده از داده‌های بازتحلیل. نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۴(۴)، ۳۳-۴۸.
- موسوی بایگی، محمد؛ اشرف، بتول. (۱۳۸۹). بررسی و مطالعه نمایه قائم هوای منجر به بارندگی‌های مخرب تابستانه: مطالعه موردی، مشهد. نشریه آب و خاک، ۳۴(۳)، ۱۰۴۸ - ۱۰۳۶.
- میرموسوی، سید علی؛ اکبرزاده، یونس. (۱۳۸۸). مطالعه شاخص‌های ناپایداری در تشکیل تگرگ در ایستگاه هواشناسی تبریز، مجله فضای جغرافیایی، ۲۵(۹)، ۱۰۸-۹۵.
- Barnes, G. M. (2010). Meteorological hazards in the Tropics, Severe convective storms and flash floods, Chapter in Tropical Meteorology, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS) (www.eolss.net): sponsored by the UNESCO, 109 pp.
- Florin Necula, M. (2010). Recent Changes in Thunderstorm Activity in Vaslui, Present Environment and Sustainable Development. 4, 407-414. <http://pesd.ro/articole/nr.4/Necula%202.pdf>
- Galanaki, E., Lagouvardos, K., Kotroni, V., Flaounas, E., Argiriou, A. (2018). Thunderstorm climatology in the Mediterranean using cloud-to-ground lightning observations. Atmospheric Research, 207, 136-144. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169809517309948>
- Galway, J.G. (1956). The lifted index is a predictor of latent instability. Bulletin of the American Meteorological Society, 37, 528-529. [https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/37/10/1520-0477-37\\_10\\_528.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/37/10/1520-0477-37_10_528.xml)
- Gottlieb, R. (2009). Analysis of stability indices for severe thunderstorms in the Northeastern United States. Cornell University, Ithaca, New York. 23pp.
- Kalashinkov, D., Loikith, P., Catalano, A., Waliser, D. Lee, H. Abatzoglou J. (2020). A 30-year climatology of meteorological conditions associated with lightning days in the interior western United States. Journal of Climate, 33(9), 3771-3785. DOI:10.1175/JCLI-D-19-0564.1.
- Miller, R. C. (1972). Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central. Tech, Rep, 200 (Rev), AWS, USAF.
- Nisi, L., Ambrosetti, P., Clementi, L., (2012). Combining satellite, radar, and NWP data for severe convection nowcasting over the Alpine area, The Seventh European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, France.
- Stull, R. (2015). Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science, The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 880 pp.

- Taszarek, M., Allen, J., Groenemeijer, Edwards, R., Brooks, H., Chmielewski, V. Enno, S. (2020a). Severe convective storms across Europe and the United States. Part 1: Climatology of lightning, large hail, 3 severe winds, and tornadoes. *Journal of Climate*, 33(23), 10239-10261. DOI:10.1175/JCLI-D-20-0345.1.
- Taszarek, M., Allen, J., Púčík, T., Hoogewind, K. Brooks, H. (2020b). Severe convective storms across Europe and the United States. Part 2: ERA5 environments associated with lightning, large hail, severe wind, and tornadoes. *Journal of Climate*, 33(23), 10263-10286. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0346.1.
- Tsenova, B., Bogatchev, A. (2020). On the use of atmospheric instability indices based on NWP model production for thunderstorm forecast. *Bulgarian Journal of Meteorology and Hydrology*. 24, 1-23. [http://meteorology.meteo.bg/global-change/files/2020/BJMH\\_2020\\_V24\\_N2/BJMH\\_24\\_2\\_2.pdf](http://meteorology.meteo.bg/global-change/files/2020/BJMH_2020_V24_N2/BJMH_24_2_2.pdf).

## References

### References (in Persian)

- Alizadeh, A., Kamali, G., Mousavi, A., Mousavi, F., Baighi, M. (2013). Weather and climatology. Ferdowsi University Press. 392 pages. [In Persian].
- Asgari, A., Mohebi, F. (2010). Stistical-Synoptic Study of Thunderstorms in Khozestan Province. 4th Regional Conference on Climate Change, Tehran, 111-119. [In Persian]
- Azizi, Q., Garami, M., Sharifi, L. (2016). Spatial analysis of thunderstorms in Iran. Applied research of geographical sciences. 17 (47), 243-257. [In Persian].
- Borna, R., Fakhernasab, A. (2012). Analysis of Instability index of LCL, LI, and KI in thunderstorm occurrences in Dezful station. 1st national conference on Geography, Natural Hazards, and Sustainable Development. Azad Islamic University, Ahvaz, 33-42. [https://jm.um.ac.ir/article\\_29948.html](https://jm.um.ac.ir/article_29948.html). [In Persian]
- Falak, A., Barna, R., Asadian., F. (2019). Temporal and spatial analysis of thunderstorms in southwestern Iran. Geographical quarterly of the land. 17 (67), 93-103. [In Persian].
- Hosseini, A., Karbalaee, A. (2021). Synoptic and Thermodynamic Analysis of Thunder Storms in Plateau of Iran. [In Persian]. Geography and environmental hazards. 10(39), 59-81. [In Persian].
- Kaviani, M.R., Alijani, B. (2013). Basics of Meteorology. Publications of Organization for the Study and Compilation of Human Sciences Books. 592 pages. [In Persian].
- Khoshakhlagh, F., Mahoutchi, M. (2020). Synoptic Analysis of Mashhad Severe Thunderstorms. Environment science and technology. 21(91), 235- 249. [In Persian].
- Mojarrad, F., Koshki, S., Masoom pour, J., Miri, M. (2018). Analysis of Thunderstorm Instability Indexes in Iran Using Reanalysis Data. Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards, 4(4 ), 33-48. [In Persian]. <https://sid.ir/paper/264731/en>.
- Mousavi Baygi, M., Ashraf, B. (2010). The Investigation of Vertical Profile of Weather that Caused Destroyer Summer Rainfall (Case Study: Mashhad). Water and Soil, doi: 10.22067/jsw.v0i0.6241. [In Persian].
- Mirmousavi, S.A., Akbarzadeh, Y. (2009). Study of instability index for hail production in Tabriz station. Geographic Space, 25(9), 95-108. [In Persian].
- Rasouli, A., Khadijah, J. (2018). Analysis of the trend and intensity of thunderstorms in western Iran using non-parametric tests. Geographical space, 12 (38), 111-126. [In Persian].
- Sadeghi-Hosseini, A.L., Rezaeyan, M. (2006). Study of a few instability indices and potential of convective clouds for the Esfahan area. Earth and Space Physics, 32(2), 83-98. [In Persian]
- Salehi, H., Saneinejad, H., Mousavi Baygi, M. (2014). Analysis of Instability Indices during Severe Weathers, in Mashhad Metropolis. Journal of Geography and Environmental Hazards, 3(1), 113-123. [In Persian]
- Tajbakhsh, S., Ghafarian, P., Mirzaei, E. (2010). Two case studies introduce a method for thunderstorm forecasting. Earth and Space Physics, 35(4), 147-166. [In Persian]
- Zahedi, M., Choobdar, A. (2007). Comparison of Ajichai basin instability indices with the standards of air instability and developing a model for the catchment. Journal of Geography and Regional Development, doi: 10.22067/GEOGRAPHY.V5I9.4236. [In Persian]

### References (in English)

- Barnes, G. M. (2010). Meteorological hazards in the Tropics, Severe convective storms and flash floods, Chapter in Tropical Meteorology, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS) ([www.eolss.net](http://www.eolss.net)): sponsored by the UNESCO, 109 pp.
- Florin Necula, M. (2010). Recent Changes in Thunderstorm Activity in Vaslui, Present Environment and Sustainable Development. 4, 407-414. <http://pesd.ro/articole/nr.4/Necula%202.pdf>
- Galanaki, E., Lagouvardos, K., Kotroni, V., Flaounas, E., Argiriou, A. (2018). Thunderstorm climatology in the Mediterranean using cloud-to-ground lightning observations. Atmospheric Research, 207, 136-144. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169809517309948>
- Galway, J.G. (1956). The lifted index is a predictor of latent instability. Bulletin of the American Meteorological Society, 37, 528-529. [https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/37/10/1520-0477-37\\_10\\_528.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/37/10/1520-0477-37_10_528.xml)
- Gottlieb, R. (2009). Analysis of stability indices for severe thunderstorms in the Northeastern United States. Cornell University, Ithaca, New York. 23pp.
- Kalashinkov, D., Loikith, P., Catalano, A., Waliser, D. Lee, H. Abatzoglou J. (2020). A 30-year climatology of meteorological conditions associated with lightning days in the interior western United States. Journal of Climate, 33(9), 3771-3785. DOI:10.1175/JCLI-D-19-0564.1.
- Miller, R. C. (1972). Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central. Tech, Rep, 200 (Rev), AWS, USAF.
- Nisi, L., Ambrosetti, P., Clementi, L., (2012). Combining satellite, radar, and NWP data for severe convection nowcasting over the Alpine area. The Seventh European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, France.
- Stull, R. (2015). Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science, The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 880 pp.

Taszarek, M., Allen, J., Groenemeijer, Edwards, R., Brooks, H., Chmielewski, V. Enno, S. (2020a). Severe convective storms across Europe and the United States. Part 1: Climatology of lightning, large hail, 3 severe winds, and tornadoes. *Journal of Climate*, 33(23), 10239-10261. DOI:10.1175/JCLI-D-20-0345.1.

Taszarek, M., Allen, J., Půčik, T., Hoogewind, K. Brooks, H. (2020b). Severe convective storms across Europe and the United States. Part 2: ERA5 environments associated with lightning, large hail, severe wind, and tornadoes. *Journal of Climate*, 33(23), 10263-10286. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0346.1.

Tsenova, B., Bogatchev, A. (2020). On the use of atmospheric instability indices based on NWP model production for thunderstorm forecast. *Bulgarian Journal of Meteorology and Hydrology*. 24, 1-23. [http://meteorology.meteo.bg/global-change/files/2020/BJMH\\_2020\\_V24\\_N2/BJMH\\_24\\_2\\_2.pdf](http://meteorology.meteo.bg/global-change/files/2020/BJMH_2020_V24_N2/BJMH_24_2_2.pdf).