



Synoptic and Thermodynamic Analysis of Thunder Storms in Plateau of Iran

Seyed Asaad Hosseini ^{a*}, Alireza Karbalaee ^b

^a Department of Climatology, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran

^b Department of Climatology, Kharazmi University, Tehran, Iran.

Received: 16 April 2021

Revise: 24 May 2021

Accepted: 20 June 2021

Abstract

Iran is a country that is faced with storms, thunderstorms, hail and floods every year. Therefore, in the present study, the temporal and spatial distribution and synoptic and thermodynamic analysis of the thunder storm occurrence in a large part of the Iran have been addressed. For this purpose, the data related to days with a thunderstorm of 20 synoptic stations in the eastern part of the Iran and geopotential heights (hgt), omega and specific moisture content (shum) data were used during the statistical period (2010-2015). After extraction of days with thunderstorms, ArcGIS software and IDW method were used for the temporal and spatial distribution maps. Then, using GrADS software synoptic maps were prepared and analyzed for different levels of atmosphere. Also, for the thermodynamic analysis, the Skew-t charts and CAPE and PWAT indices were used. The results of the temporal and spatial distribution have showed that from Jiroft city in the province of Kerman to the high latitudes in April and May, the highest frequency of thunder storms is observed and to the lower latitudes from December to February, there are a lot of thunder storms. In the northern part of the study area, the most frequent occurrence is in the spring and in the southern part of the region, the most occurrences occur in the winter. In total, in all the study areas throughout the year, there is shortly thunderstorm event. The results of the synoptic analysis also showed that during the days with thunderstorms, the negative omega and the ascending and unstable air, and on the other hand, the influence of moisture on the atmosphere of the area and the placement under the cut of low and the front of the Trough, conditions for the occurrence of this Provides a phenomenon. Investigating the skew-t charts and the CAPE and PWAT indices also indicate that there is more humidity in storm day than the day before the storm and the instability resulting from a severe convective rise (about twice) on the day of thunderstorm.

Keywords: Iran, Temporal and Spatial Distribution, Thunder storm, Synoptic analysis, Thermodynamic analysis, skew-t

*. Corresponding author: Seyed Asaad Hosseini E-mail: Hosseini.asad8@gmail.com Tel:+98937840280

How to cite this Article: Hosseini,S.,Karbalaee,A.(2021). Synoptic and Thermodynamic Analysis of Thunder Storms in Plateau of Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 10(3), 59-81.
doi: 10.22067/geoeh.2021.70450.1061



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant with open access mandates, by publishing its articles under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 10, Issue 3 - Number 39, Fall 2021

<https://geoeh.um.ac.ir>

doi : <https://dx.doi.org/10.22067/geoeh.2021.70450.1061>

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال دهم، شماره سی و نهم، پاییز ۱۴۰۰، صص ۸۱-۵۹
مقاله پژوهشی

واکاوی همدیدی و ترمودینامیکی وقوع طوفان‌های تندری در فلات ایران

سید اسعد حسینی^۱ - دکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
علیرضا کربلایی درئی - دکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱/۲۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۳/۳ تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۳/۳۰

چکیده

ایران کشور است که هر ساله با طوفان‌های تندری زیادی روبه‌رو است. لذا در پژوهش حاضر به توزیع زمانی و مکانی و همچنین واکاوی همدیدی و ترمودینامیکی وقوع طوفان‌های تندری در بخش وسیعی از فلات ایران پرداخته شد. بدین منظور از داده‌های مربوط به روزهای همراه با طوفان تندری، ۲۰ ایستگاه همدید در فلات ایران با تأکید بر نیمه شرقی کشور و همچنین داده‌های ارتفاع ژئوپتانسیل (hgt)، امگا (Omega) و رطوبت ویژه (Shum) در طول دوره آماری ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵ استفاده شد. پس از استخراج روزهای همراه با طوفان تندری، با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS و روش IDW نقشه‌های توزیع زمانی و مکانی تهیه گردید. سپس با استفاده از نرم‌افزار GrADS نقشه‌های همدیدی لازم در ترازهای مختلف جو تهیه و تحلیل گردید. بررسی‌های ترمودینامیکی نیز با استفاده از نمودارهای Skew-t و شاخص‌های CAPE و PWAT انجام شد. نتایج حاصل از توزیع زمانی و مکانی نشان داد که در مقیاس ماهانه، از ایستگاه جیرفت در استان کرمان به سمت عرض‌های بالا در ماه‌های آوریل و می، بیشترین فراوانی طوفان تندری وجود داشته و به طرف عرض‌های پایین‌تر از ماه دسامبر تا فوریه فراوانی طوفان‌های تندری بیشتر می‌گردد. در مقیاس فصلی نیز در نیمه شمالی منطقه مورد مطالعه بیشترین رخداد طوفان‌های تندری در فصل بهار دیده می‌شود؛ در حالی که در نیمه جنوبی بیشترین فراوانی مربوط به فصل زمستان است. در مجموع در همه

Email: Hosseini.asad8@gmail.com

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۳۷۸۴۰۲۸۰۴

نحوه ارجاع به این مقاله :

حسینی، سید اسعد، کربلایی، علیرضا. (۱۴۰۰). واکاوی همدیدی و ترمودینامیکی وقوع طوفان‌های تندری در فلات ایران. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۰(۳)، صص ۸۱-۵۹.
<https://dx.doi.org/10.22067/geoeh.2021.70450.1061>

مناطق مورد مطالعه در طول سال کم و بیش پتانسیل رخداد طوفان تندری وجود دارد. نتایج حاصل از واکاوی همدیدی نیز نشان داد که در روزهای همراه با طوفان تندری، اُمگای منفی و صعود و ناپایدار هوا حاکم بوده و از سوی دیگر، نفوذ رطوبت به جو منطقه و قرارگیری در زیر سرد چال‌ها و جلوی ناوه، شرایط را برای رخداد این پدیده فراهم می‌کند. بررسی نمودارهای skew-t و شاخص‌های CAPE و PWAT نیز بیانگر وجود رطوبت بیشتر در روز طوفان نسبت به روز قبل از طوفان و ناپایداری ناشی از صعود همرفتی شدید (حدود دو برابر) در روز رخداد طوفان تندری است.

کلیدواژه‌ها: ایران، توزیع زمانی و مکانی، طوفان تندری، تحلیل همدیدی، تحلیل ترمودینامیکی، Skew-t

۱- مقدمه

طوفان تندری یکی از مخاطرات آب و هوایی است که ویژگی آن حضور آذرخش و اثر صوتی آن در جو زمین به نام تندر است. طوفان‌های تندری یکی از جلوه‌های خشن طبیعت هستند که هم برای هواپیماها و کشتی‌ها و هم برای ساکنین روی خشکی خطرناک هستند. تمام خصوصیات بارز یک طوفان تندری مانند باد شدید، تگرگ، رعدوبرق و رگبار بسیار شدید تماماً حاصل ایجاد یک سلول همرفتی بزرگ در جو است. نتیجه قابل رؤیت این سلول تنوره‌ای از ابرهای کومولونیمبوس است که ابتدا از یک ابر کومولوس شروع شده و به سرعت صعود نموده و به ابر کومولونیمبوس تبدیل می‌گردد. قسمت فوقانی این ابر تا بخش تحتانی آن ممکن است چندین کیلومتر فاصله داشته باشد (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۲). امروزه این پدیده‌های حدی در مقیاس محلی به‌ویژه در مناطقی که وقوع آن‌ها معمول نیست، گسترش یافته و می‌تواند از مظاهر تغییر اقلیم به شمار آید (امیدوار و همکاران، ۱۳۹۲). بدین لحاظ بررسی این پدیده از اهمیت ویژه برخوردار است. بررسی‌ها نشان داده است که علاوه بر شرایط همدیدی، محل وقوع و دمای سطح دریا که دو عامل اصلی تشکیل طوفان می‌باشند رشد و تکامل و مسیر حرکت طوفان‌ها، می‌توان به شدت تحت تأثیر دینامیک و ترمودینامیک طوفان قرار گیرد (صلاحی، ۱۳۸۹). بنابراین روش‌های پیش‌بینی مرسوم مانند روش‌های همدیدی در بیشتر موارد قادر به تشخیص این نوع پدیده‌ها نبوده و نیاز به استفاده از روش‌های دیگر مانند تحلیل‌های ترمودینامیکی و تحلیل شاخص‌های ناپایداری نیز ضروری به نظر می‌رسد (ایرانپور و همکاران، ۱۳۹۴). در زمینه طوفان‌های تندری پژوهش‌های زیادی در داخل و خارج کشور صورت گرفته است. به نظر می‌رسد اولین بار چانگنون و سو^۱ (۱۹۸۴) به واکاوی مکانی و زمانی روزهای تندری در جهان پرداخته‌اند. هدف اصلی پژوهش آنان توصیف نوسان‌های فصلی و سالانه بوده است. ولی در مورد ناپایداری، قبل از چانگنون و سو (۱۹۸۴) نیز پژوهش‌هایی انجام شده است. شوالتر^۲ (۱۹۵۳) شاخصی را برای تعیین میزان ناپایداری و پیش‌بینی وقوع

1 Changnon and Hsu

2 Showalter

رعدوبرق و تگرگ معرفی کرد که به نام شاخص شوالتر^۱ مشهور است. مطالعات گالوی^۲ (۱۹۵۶) منجر به معرفی شاخص صعود (LI)^۳ شد که با تفاوت کمی به شیوه شاخص شوالتر محاسبه می‌شود. جرج^۴ (۱۹۶۰) به وسیله یک فرمول ساده شاخص K را با استفاده از دما و نقطه شبنم سطوح مختلف جو تعیین و معرفی کرد. میلر^۵ (۱۹۷۵) پس از انجام مطالعاتی با ترکیب چندین متغیر، شاخص‌های جدیدی به نام شاخص خطر هوای مخرب^۶ و شاخص مجموع مجموعه‌ها^۷، برای پیش‌بینی ناپایداری‌های منجر به طوفان تندری و تورنادو معرفی کرد. مانکریف و میلر^۸ (۱۹۷۶) شاخص جامع و بسیار با ارزش انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی^۹ را معرفی کردند که نشانگر میزان احتمال و شانس فعالیت طوفان‌های تندری است. هنری^{۱۰} (۲۰۰۰)، کراوس و سانتوس^{۱۱} (۲۰۰۴) و کورالتو^{۱۲} (۲۰۰۷) نیز شناسایی ناپایداری‌های جوی را برای برخی پدیده‌های جوی نظیر رگبارها، طوفان‌های تندری و تورنادوها ضروری می‌دانند. گوتلیب^{۱۳} (۲۰۰۹) مجموعه‌ای از شاخص‌های ناپایداری را در محیط طوفان‌های تندری به‌طور ویژه برای شمال شرق ایالات متحده محاسبه و آزمون کرد و نشان داد طوفان‌های تندری در ماه‌های ژوئن تا اوت رخ داده‌اند و بهترین پیش‌بینی کننده در اغلب موارد شاخص صعود و شاخص CAPE عنوان شد. چاودری و میدی^{۱۴} (۲۰۱۴) با مقایسه ویژگی‌های دینامیکی و ترمودینامیکی طوفان‌های تندری در عرض‌های میانه و حاره‌ای پرداختند و نشان دادند که توده‌های هوا و فعالیت‌های جبهه‌ای باعث ایجاد سامانه همرفتی شدید حتی با انرژی همرفتی کم روی دنور (ایستگاه معرف عرض‌های میانه) می‌شود؛ درحالی‌که تحریک رطوبت و دینامیک جو^{۱۵}، طوفان‌های تندری شدید را در کلکته (ایستگاه معرف عرض‌های حاره‌ای) ایجاد می‌کند. تامپسون^{۱۵} (۲۰۰۴) با استفاده از تفاضل شاخص K و شاخص صعود، شاخص جدیدی را به نام خود معرفی و مقادیر این شاخص را به‌صورت تجربی بر روی شرق و غرب کوه‌های راکی بررسی کرد. لانز^{۱۶} (۲۰۲۰) به تحلیل لاگرانژی طوفان‌های تندری در سوئیس پرداخت و با استفاده از مدل WRF مسیرهای طوفان تندری را برای ماه می سال ۲۰۱۸ شبیه‌سازی نمود.

- 1 Showalter Index (SI)
- 2 Galway
- 3 Lifted Index (LI)
- 4 GEORGE
- 5 Miller
- 6 Severe Weather Treat Index (SWEAT)
- 7 Total Totals (TT)
- 8 Moncrieff and Miller
- 9 Convective Available Potential Energy (CAPE)
- 10 Henry
- 11 Krauss and Santos
- 12 Queralt et al
- 13 Gottlieb
- 14 Chaudhuri and Middey
- 15 Thompson
- 16 Lanz

پیزیوت و همکاران^۱ (۲۰۲۱) نیز به واکاوی رخداد طوفان‌های تندری با استفاده از شاخص‌های ترمودینامیکی در شمال اروپا پرداختند. هلالی و همکاران (۲۰۲۱) به واکاوی همدیدی و دینامیکی ناهنجاری‌های بارش در ایران پرداختند. نتایج نشان داد که استقرار پرفشار عربستان در دریای عرب، فرارفت گرما و رطوبت به سمت ایران و گسترش تراف در خاورمیانه باعث افزایش شدت و گسترش بارش‌ها در ایران شده است. صلاحی (۱۳۸۹) به بررسی ویژگی‌های آماری و همدیدی طوفان‌های تندری در استان اردبیل پرداخت و نشان داد بیشترین رخداد طوفان تندری متعلق به اردیبهشت‌ماه است. میراحمدی (۱۳۹۱) به بررسی و شناسایی ویژگی‌های آماری طوفان تندری در کوه‌رنگ استان چهارمحال و بختیاری پرداخت و نشان داد بیشترین رخداد این طوفان در فصل بهار و در ماه فروردین است. امیدوار و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی و تحلیل همدیدی سه رخداد تگرگ شدید در استان فارس پرداختند و نشان دادند که در هر سه دوره انتخابی ریزش تگرگ در استان، در فروردین‌ماه و در اثر تشکیل و تقویت کم‌فشار بریده (سرد چال) در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال و ایجاد کم‌فشار و ناپایداری در سطح دریا است. صفری (۱۳۹۳) به تحلیل آماری طوفان‌های تندری و الگوهای همدیدی توأم با آن در استان زنجان پرداخت. نتایج نشان داد مهم‌ترین سیستم‌های همدیدی حاکم بر منطقه، زبانه‌هایی از کم‌فشارهای مدیترانه‌ای و سودانی هستند. ایرانپور و همکاران (۱۳۹۴) به تحلیل همدیدی و ترمودینامیکی طوفان‌های تندری در همدان پرداختند. نتایج نشان داد پرفشار سرد و ریزش هوای سرد به لایه‌های میانی جو و وجود کم‌فشار جنوبی در لایه زیرین جو که جریانات گرم و مرطوب عربستان را به منطقه وارد می‌کند باعث رشد ابر و ایجاد طوفان‌های تندری می‌گردد. معصوم پور و همکاران (۱۳۹۵) به واکاوی آماری و همدیدی طوفان‌های تندری در استان‌های بوشهر و هرمزگان پرداختند. نتایج همدیدی حاکی از نفوذ بادهای غربی تا جنوب عربستان و قرارگیری ناحیه واگرایی و منطقه فرارفت تاوایی مثبت روی منطقه مطالعاتی است که شرایط ناپایداری و صعود هوا را ایجاد می‌کند. فلک و همکاران (۱۳۹۹) به تحلیل زمانی و مکانی طوفان‌های تندری در جنوب غرب ایران پرداختند. نتایج نشان داد بیشترین و کمترین فراوانی طوفان‌های تندری مربوط به ایستگاه دزفول با ۴۷۹ رخداد و رامهرمز با ۲۵۲ رخداد است. خوش‌اخلاق و ماهوتچی (۱۳۹۹) به واکاوی همدیدی بارش‌های تندری مخرب در مشهد پرداختند. نتایج نشان داد منابع رطوبتی بارش‌های تندری صورت گرفته در مشهد؛ دریای عرب، دریای سرخ، خلیج فارس و دریای عمان است.

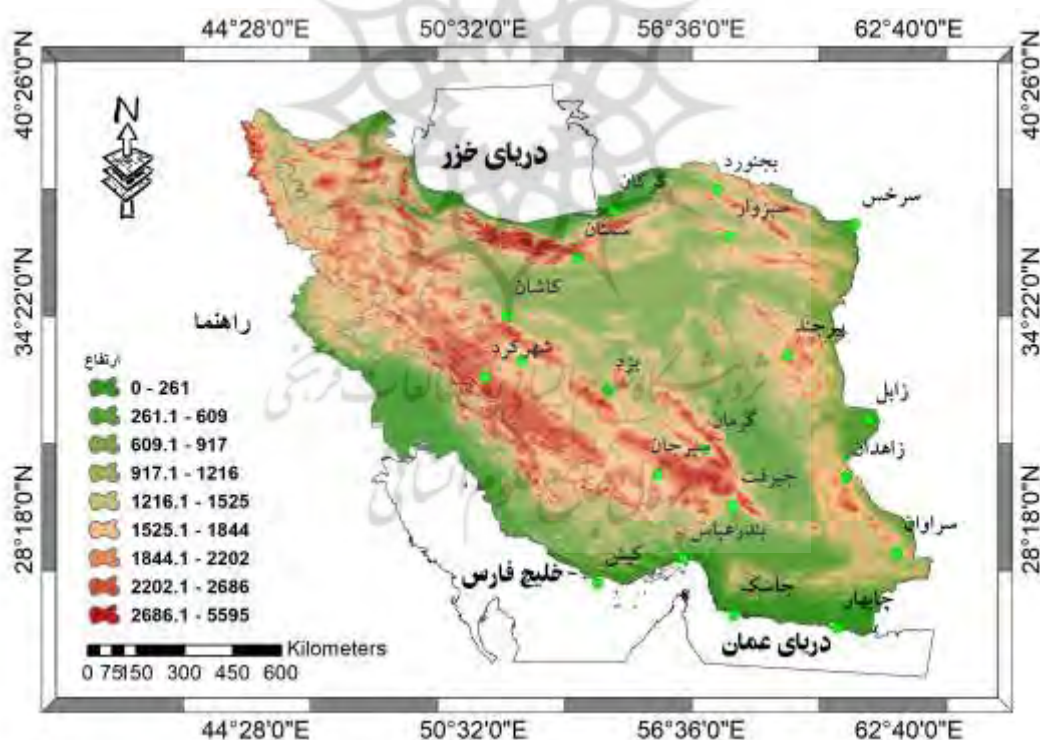
فلات ایران به دلیل قرارگیری در عرض‌های میانی محل ورود سامانه‌های برون حاره، جنب حاره و حاره‌ای در زمان‌های خاصی است که ورود برخی از این سامانه‌ها، فراوانی رخداد پدیده طوفان تندری را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین به دلیل تغییر دمای سطح زمین در طول شبانه‌روز فراوانی رخداد این پدیده در ساعت‌های خاصی به‌ویژه در ساعت‌های پس از نیم‌روز افزایش می‌یابد. بررسی پیشینه‌های پژوهش نشان داد که پژوهش‌های

صورت گرفته در کشور در زمینه طوفان‌های تندری بیشتر به صورت موردی و بر روی نیمه غربی کشور انجام گرفته است و پژوهشی جامع در نیمه شرقی کشور صورت نگرفته است، بنابراین هدف این پژوهش واکاوی هم‌دیدگی و ترمودینامیکی طوفان‌های تندری و تبیین ویژگی‌های مکانی و زمانی این پدیده در نیمه شرقی فلات ایران است.

۲- مواد و روش

۲-۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه پژوهش بخش وسیعی از فلات ایران در شمال شرق، شرق، مرکز و جنوب شرق کشور را دربرمی‌گیرد که استان‌های سیستان و بلوچستان، هرمزگان، کرمان، یزد، خراسان جنوبی، خراسان شمالی، خراسان رضوی، اصفهان، سمنان و گلستان و چهارمحال و بختیاری را شامل می‌شود. جهت بررسی منطقه مورد مطالعه از نظر رخداد زمانی و مکانی طوفان‌های تندری، تعداد ۲۰ ایستگاه هم‌دید با توزیع مناسب در سطح منطقه انتخاب گردید که موقعیت جغرافیایی آن‌ها در شکل (۱) آمده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

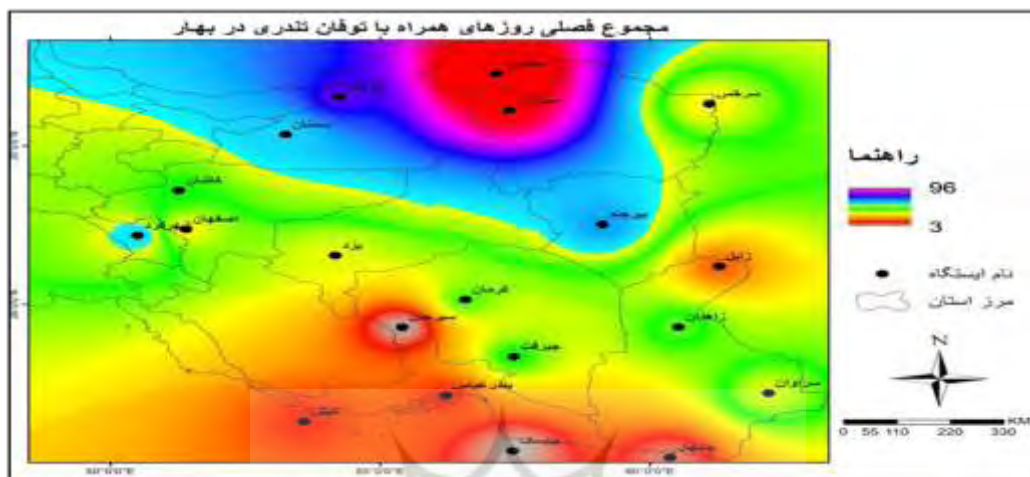
۲-۲- روش انجام پژوهش

برای شناسایی پدیده اقلیمی مخرب طوفان تندری در این پژوهش، ابتدا برای دوره آماری ۶ ساله (۲۰۱۵-۲۰۱۰)، داده‌های روزهای همراه با طوفان تندری، از سازمان هواشناسی کشور تهیه گردید. سپس ۲۰ ایستگاه همدید با توزیع مناسب در سطح منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید. در ادامه با فراخوانی داده‌ها به نرم‌افزار اکسل، داده‌ها به صورت میانگین ماهانه، فصلی و سالانه برای ایستگاه‌های مورد بررسی استخراج گردید. در ادامه با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS 10.6 و روش میانابی IDW به تهیه نقشه توزیع زمانی و مکانی طوفان تندری منطقه مورد مطالعه پرداخته شد. سپس روزهای نماینده همراه با طوفان تندری در چهار ایستگاه بجنورد (نماینده شمال شرق)، اصفهان (نماینده ایران مرکزی)، کیش (نماینده جنوب) و جیرفت (نماینده جنوب شرق) جهت واکاوی همدیدی انتخاب شدند و در ادامه نقشه‌های اُمگا، ارتفاع ژئوپتانسیل و نقشه‌های رطوبت ویژه با استفاده از داده‌های بازکاوی اخذ شده از تارنمای اداره ملی اقیانوسی و جوی ایالات متحده (NOAA) برای روزهای نماینده با استفاده از نرم‌افزار GrADS ترسیم گردید. برای اینکه منطقه مورد نظر به صورت همدیدی مورد بررسی قرار گیرد، نقشه‌های همدیدی برای طول ۲۵ درجه شرقی تا ۷۵ درجه شرقی و عرض ۱۰ درجه شمالی تا ۵۰ درجه شمالی انتخاب گردید. همچنین نمودار اسکوتی (-Skew t) که جهت تحلیل‌های ترمودینامیک به کار می‌رود از سایت دانشگاه آیومینگ برای تنها ایستگاه دارای آمار و اطلاعات جو بالای منطقه مورد مطالعه یعنی ایستگاه همدید اصفهان اخذ گردید. این نمودار در محاسبه کمیت‌های مختلفی که رادیوسوند نمی‌تواند آن‌ها را اندازه‌گیری کند به کار می‌رود. روی این نمودار دو منحنی دما و نقطه شبنم رسم می‌شود که سوندینگ نامیده شده و تصویر عمودی از شرایط جوی دیده‌بانی را ارائه خواهد کرد و اجازه محاسبات چندین کمیت مختلف ترمودینامیکی و شاخص ناپایداری مورد نیاز جهت پیش‌بینی‌ها را می‌دهد که در این پژوهش بر شاخص‌های انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی (CAPE) و شاخص آب قابل بارش (PWAT) تأکید شد که در تشخیص و پیش‌بینی طوفان‌های تندری مفید است. شاخص CAPE نشان‌دهنده انرژی جنبشی ممکن بسته هوای ناپایدار بدون در نظر گرفتن اثر بخار آب متراکم شده در اثر صعود است. مقادیر بالاتر از صفر شاخص CAPE نشان‌دهنده وجود ناپایداری است و هرچه مقادیر آن زیادتر باشد، اختلاف دمای محیط و دمای بسته‌هوای بالارونده نیز بیشتر است و نیروی شناوری قوی‌تر و در نتیجه شتاب بالارو بیشتر خواهد شد و به این معنی است که طوفان به سرعت در راستای قائم در حال توسعه است.

۳- نتایج و بحث

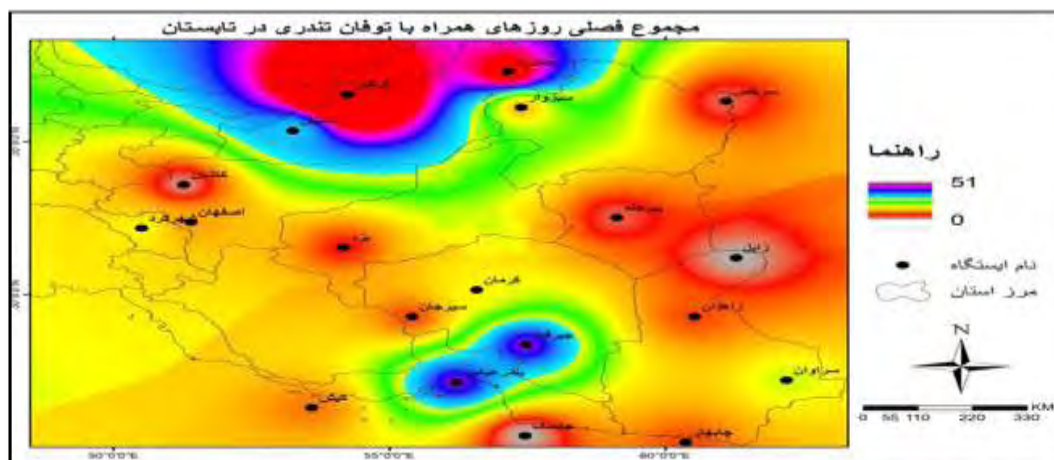
بررسی توزیع زمانی و مکانی وقوع طوفان‌های تندری نشان می‌دهد که بهار فصل وقوع طوفان‌های تندری در منطقه مورد مطالعه به‌ویژه برای نیمه شمالی است که هسته آن در مناطق اطراف استان خراسان شمالی و شمال استان

خراسان رضوی و شرق استان گلستان است. به‌صورت تدریجی از شدت رخداد این پدیده به عرض‌های پایین کاسته می‌شود و مناطق سیرجان، چابهار و جاسک از مناطق نسبتاً آرام این فصل به‌شمار می‌روند (شکل ۲).



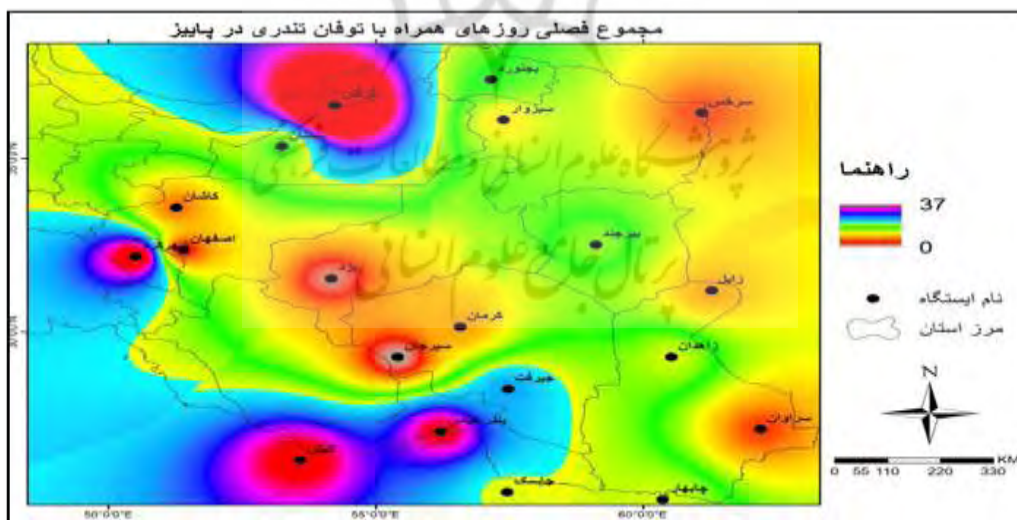
شکل ۲- توزیع مکانی روزهای همراه با طوفان تندرین در فصل بهار طی دوره مورد مطالعه

توزیع رخداد طوفان تندرین در فصل تابستان نسبت به فصل بهار کمی متفاوت است. در این فصل در کل از تعداد رخداد طوفان‌های تندرین کاسته شده است. هسته حداکثری وقوع این پدیده کمی به سمت عرض‌های بالاتر عقب‌نشینی کرده به‌طوری‌که از استان سمنان به عرض‌های پایین به‌شدت از تعداد روزهای همراه با طوفان تندرین کاسته شده است که در زابل و کاشان تا ۲ مورد رسیده است. بخش جنوبی و سواحل مکران هم به‌جز منطقه جیرفت و بندرعباس که دو هسته حداکثری‌اند، در کل جزو منطقه کم رخداد این پدیده به‌شمار می‌روند. بر اساس نتایج حاصل، در این فصل دو هسته بیشینه تعداد روزهای همراه با طوفان‌های تندرین در مجاورت دو پهنه آبی دریای خزر و خلیج فارس واقع شده‌اند (شکل ۳).



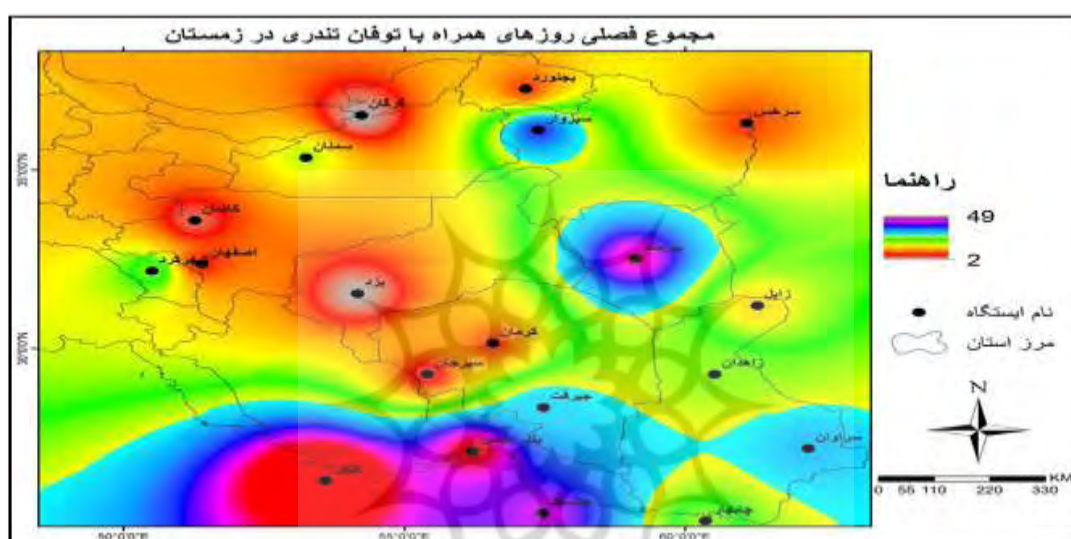
شکل ۳- توزیع مکانی روزهای همراه با طوفان تندری در فصل تابستان طی دوره مورد مطالعه

در فصل پاییز کم کم پرفشار جنب حاره به عرض‌های پایین‌تر عقب‌نشینی می‌کند و بادهای غربی و توده‌هواهای مختلف وارد منطقه جنوبی و غربی و شمال غربی کشور می‌شوند و در صورت مهیا بودن شرایط، ناپایداری و طوفان‌های تندری رخ می‌دهد. زبانه‌ای از این گسترش‌ها از سمت شهرکرد و زبانه‌ی دیگر از سمت بندرعباس وارد کشور می‌شوند. در این فصل بخش مرکزی و استان‌های شرقی کشور دارای تعداد روزهای همراه با طوفان تندری کمتری می‌باشند (شکل ۴).



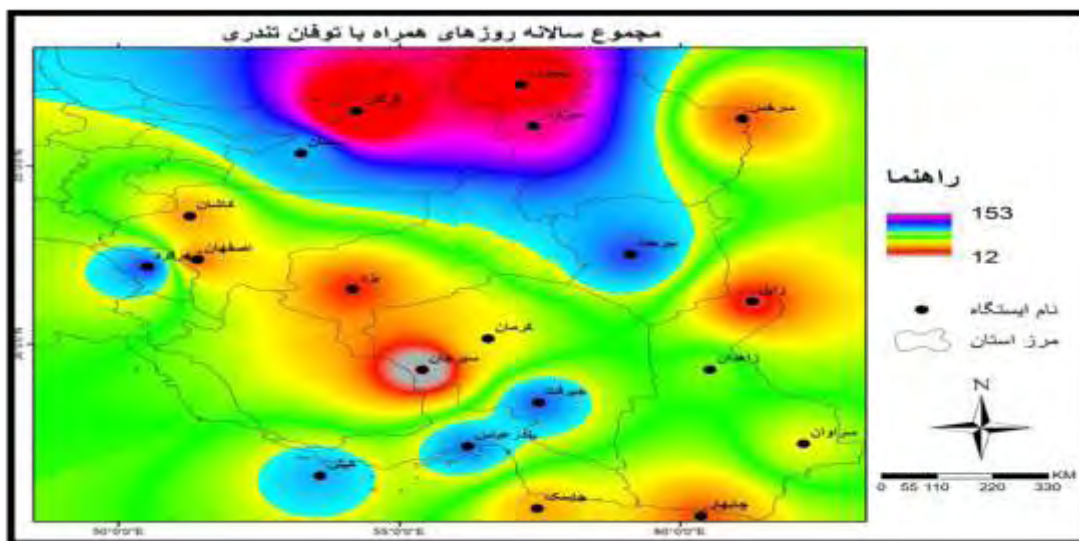
شکل ۴- توزیع مکانی مجموع روزهای همراه با طوفان تندری در فصل پاییز طی دوره مورد مطالعه

در فصل زمستان، بیشترین فراوانی رخداد طوفان‌های تندری به بخش جنوبی کشور گسترش پیدا می‌کند و کمی ضعیف‌تر، نواحی شرقی کشور را نیز پوشش داده است. حداقل رخداد طوفان تندری زمستانه در مناطق کویری و بیابان‌های نواحی مرکزی ایران و همچنین خراسان شمالی رخ داده است. در بخش شرقی دو هسته حداکثری نیز وجود دارد که مربوط به شهرهای سبزوار و بیرجند است و عمدتاً دلیل آن ناپایداری‌های همرفتی ناشی از شار هوای نسبتاً گرم و مرطوب از عرض‌های جنوبی در مقایسه با مناطق شمالی است که در اواخر زمستان اتفاق می‌افتد (شکل ۵).



شکل ۵- توزیع مکانی روزهای همراه با طوفان تندری در فصل زمستان طی دوره مورد مطالعه

توزیع مکانی مجموع سالانه رخداد طوفان تندری طی بازه زمانی مورد بررسی (۲۰۱۰-۲۰۱۵) نشان داد که شدت طوفان‌های تندری در نیمه شمالی منطقه مورد مطالعه و در استان‌های سمنان و خراسان شمالی و رضوی و در بخشی از استان‌های خراسان جنوبی و یزد بیشتر از دیگر مناطق است. بر اساس نتایج حاصل از شمال به جنوب کشور از شدت این رخداد به‌طور کلی، کاسته می‌شود و فقط در یک مسیری نواری شکل از کیش به بندرعباس و جیرفت، دوباره این رخداد تشدید می‌شود (شکل ۶).



شکل ۶- توزیع مکانی مجموع سالانه روزهای همراه با طوفان تندری طی دوره مورد مطالعه

با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه نیمی از کشور ایران را در بر می گیرد جهت بررسی و واکاوی همیدی، از بخش شمال شرقی کشور (ایستگاه بجنورد)، از بخش مرکزی (ایستگاه اصفهان)، از بخش جنوب شرقی (جیرفت) و از بخش جنوبی (ایستگاه کیش) به عنوان ایستگاه های نماینده انتخاب شدند. برای هر ایستگاه نیز یک روز طوفان تندری که همراه با رعدوبرق، سیل و تگرگ در منطقه بودند جهت بررسی الگوها و شرایط جوی همیدی حاکم، انتخاب و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (جدول ۱).

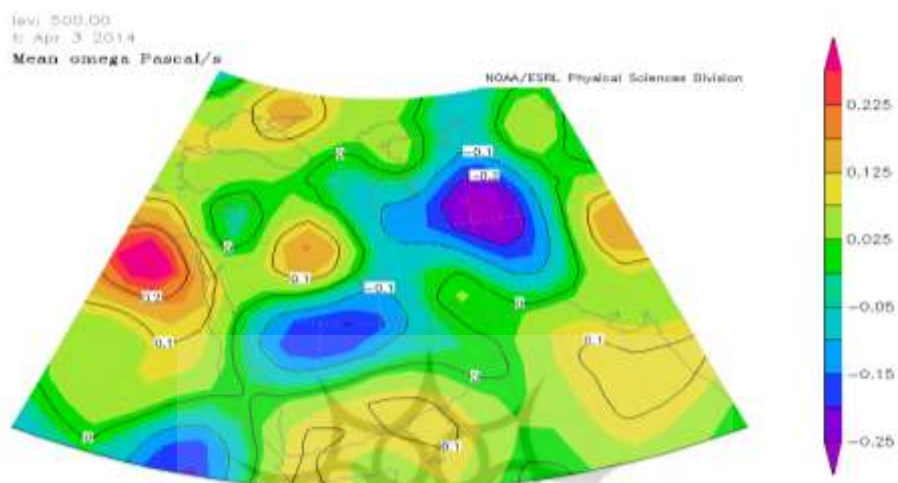
جدول ۱ - روزهای نماینده طوفان های تندری در طول دوره مورد بررسی در ایستگاه های منتخب

ایستگاه	تاریخ وقوع طوفان تندری	پدیده های مخرب
جیرفت	۱۳۹۳/۰۱/۱۴ (۳ آوریل ۲۰۱۴)	تگرگ، سیلاب، رعدوبرق های شدید
کیش	۱۳۹۴/۰۸/۲۰ (۱۱ نوامبر ۲۰۱۵)	تگرگ، سیلاب، رعدوبرق های شدید
اصفهان	۱۳۸۹/۰۱/۰۷ (۲۷ مارس ۲۰۱۰)	تگرگ، سیلاب، رعدوبرق های شدید
بجنورد	۱۳۹۴/۰۸/۲۳ (۱۴ نوامبر ۲۰۱۵)	تگرگ، سیلاب، رعدوبرق های شدید

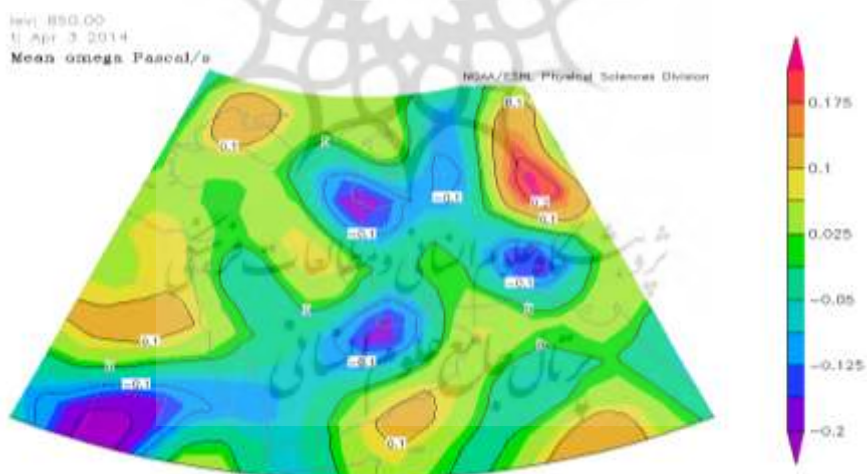
۳-۱- تحلیل همیدی طوفان تندری بخش جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه

شکل های ۷ و ۸ نقشه میانگین اُمگای سطح ۵۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکالی را برای ۳ آوریل ۲۰۱۴ نشان می دهند. در این روز در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی، دو مرکز اُمگای منفی در شمال شرق ایران و کشور عربستان قرار گرفته است. تأثیرات این دو مرکز بخش میانی کشور را به صورت جوی ناپایدار در آورده است. در تراز پایین تر یا ۸۵۰ هکتوپاسکالی سه مرکز اُمگای منفی مشاهده می شود که یک مرکز روی بندر انزلی، دومی روی کشور پاکستان و

سومی در جنوب خلیج فارس قرار گرفته است. در بررسی این نقشه شهر جیرفت به‌عنوان نماینده جنوب شرق منطقه مورد نیز در مرز شرایط ناپایداری قرار دارد. در مجموع در دو تراز ۵۰۰ و ۸۵۰ جیرفت و مناطق هم‌جوار در گستره اُمگای منفی قرار گرفته‌اند که شرایط مساعدی را برای صعود هوا و وقوع طوفان‌های تندی در این منطقه مهیا کرده است.



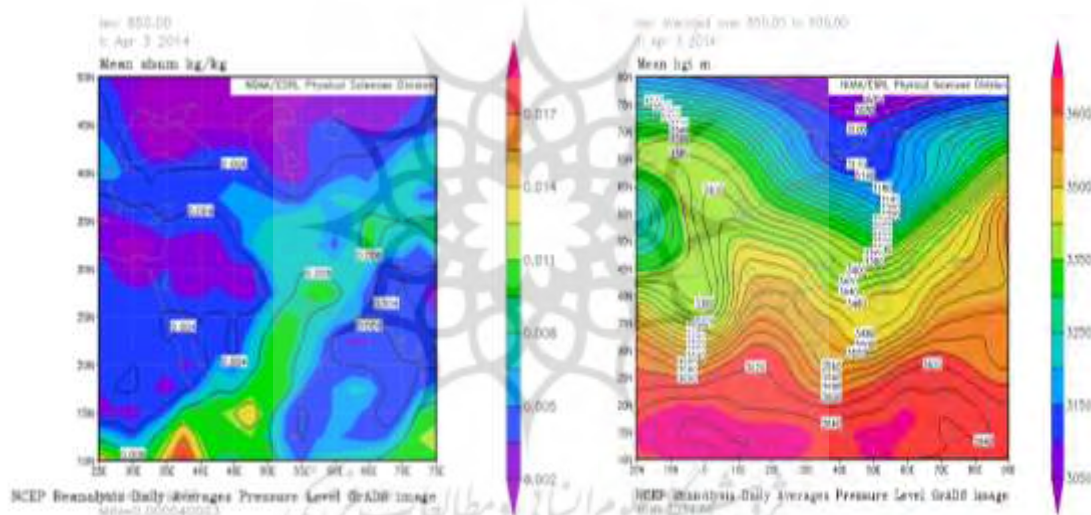
شکل ۷- میانگین امگای سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال (۳ آوریل ۲۰۱۴)



شکل ۸- میانگین امگای سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال (۳ آوریل ۲۰۱۴)

شکل ۹ نقشه متوسط ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۸۵۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکال را در ۳ آوریل ۲۰۱۴ نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که منطقه مورد مطالعه در جلوی یک ناوه قرار گرفته است. ناوه‌ها دو نوع منطقه اقلیمی متفاوت ایجاد می‌کنند و خط ناوه آن را در واقع تقسیم می‌کند در عقب خط ناوه جریان نزولی و واگرایی همراه است و در جلوی

ناوه ناپایداری و همگرایی و جو ناپایدار و در صورت وجود رطوبت معمولاً بارش را سبب می‌شوند. در این شکل می‌توان احتمال وقوع بارش را برای جنوب شرق ایران انتظار داشت؛ زیرا در منطقه ناپایداری هوا قرار گرفته است. مطابق شکل، ناه اصلی مستقر بر روی ایران دارای سه شکستگی یا موج کوتاه در غرب خزر، جنوب غرب ایران و غرب عربستان است که استان کرمان و مناطق هم‌جوار آن به دلیل واقع شدن در جلوی شاخه جنوب غربی ناه از شرایط مساعدی برای وقوع ناپایداری و طوفان‌های تندی برخوردار هستند. نقشه رطوبت ویژه این روز برای تراز ۸۵۰ هکتوپاسکالی نشان از وجود یک جریان مرطوب جوی است که رطوبت شمال شرق آفریقا، عربستان، دریای سرخ و خلیج فارس را وارد بخش جنوب شرق ایران کرده است. مقدار رطوبت موجود به ۱۰ گرم در هر کیلوگرم هوای مرطوب می‌رسد و رطوبت نسبتاً خوبی را به ارمغان آورده است (شکل ۱۰). شکل مذکور به خوبی گسترش منحنی رطوبت ۱۰ گرم بر کیلوگرم را از استان‌های ساحلی جنوب غرب کشور به استان کرمان نشان می‌دهد.

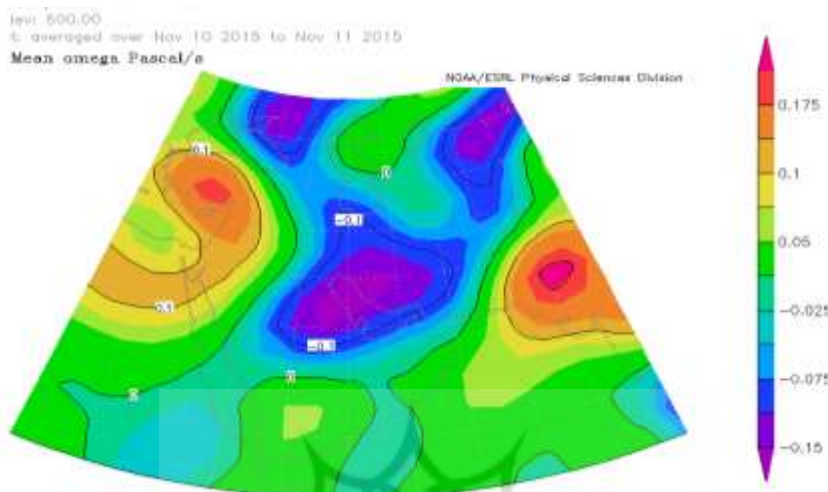


شکل ۹- میانگین ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۵۰۰ - شکل ۱۰- میانگین رطوبت ویژه سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال
 ۸۵۰ هکتوپاسکال (۳ آوریل ۲۰۱۴) - میانگین ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۵۰۰ (۳ آوریل ۲۰۱۴)

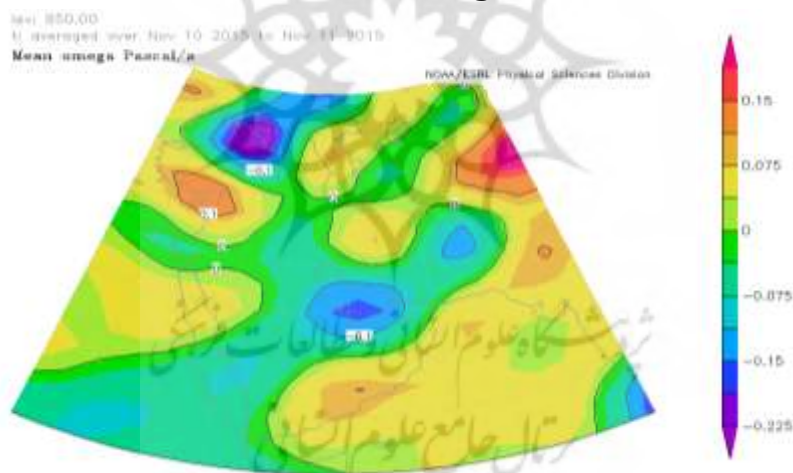
۳-۲- تحلیل همدیدی طوفان تندی بخش جنوبی منطقه مورد مطالعه

نقشه‌های اُمگای سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال و سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال برای طوفان تندی ۱۱ نوامبر ۲۰۱۵ بخش جنوبی منطقه مورد مطالعه در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ آورده شده است. نقشه اُمگای سطح ۵۰۰ هکتوپاسکالی بیانگر وجود یک هسته اُمگای منفی شدید در جنوب ایران است و شرایط ناپایداری شدید را برای خلیج فارس و حاشیه آن

و شهر کیش فراهم کرده است. در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکالی نیز مرکز اُمگای منفی با شدت ضعیف‌تری نسبت به تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی دقیقاً بر روی کیش و اطراف آن قرار گرفته است که موجب جوی ناپایدار شده است.



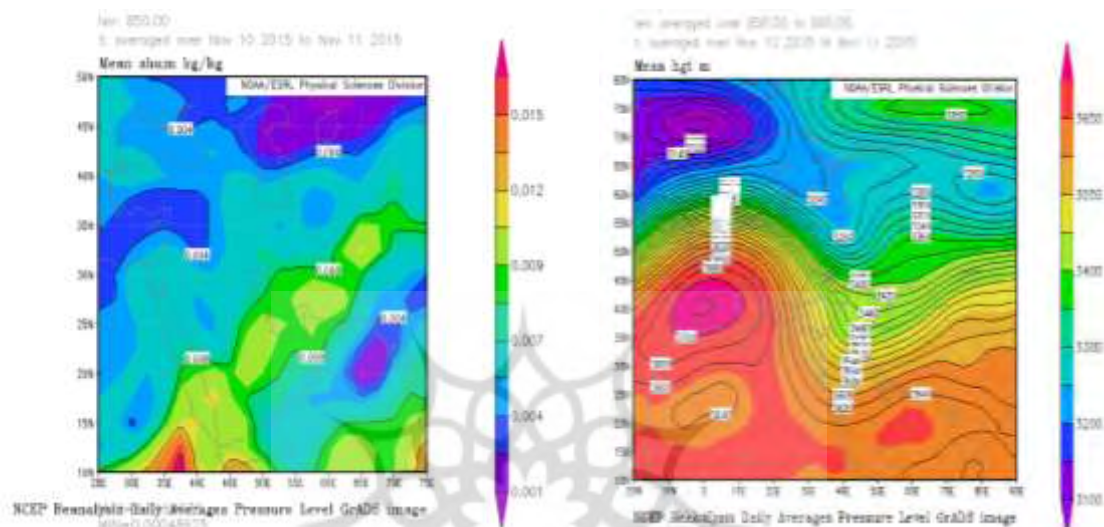
شکل ۱۱- میانگین امگای سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال (۱۰-۱۱ نوامبر ۲۰۱۵)



شکل ۱۲- میانگین امگای سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال (۱۰-۱۱ نوامبر ۲۰۱۵)

شکل ۱۳ نقشه میانگین ارتفاع ژئوپتانسیل ۱۰-۱۱ نوامبر ۲۰۱۵ را نشان می‌دهد؛ که بر اساس آن، یک پشته روی شرق دریای مدیترانه قرار گرفته است و هوای سرد عرض‌های بالا و رشته‌کوه‌های آلپ را به ناحیه غربی پشته، یعنی کشورهای ترکیه عراق و غرب ایران نفوذ داده است و در شرق این پشته یک ناوه قرار گرفته است که مرکز آن در شمال عربستان قرار گرفته و رطوبت دریای سرخ و خلیج فارس را وارد ایران کرده است. همچنین جزیره کیش در

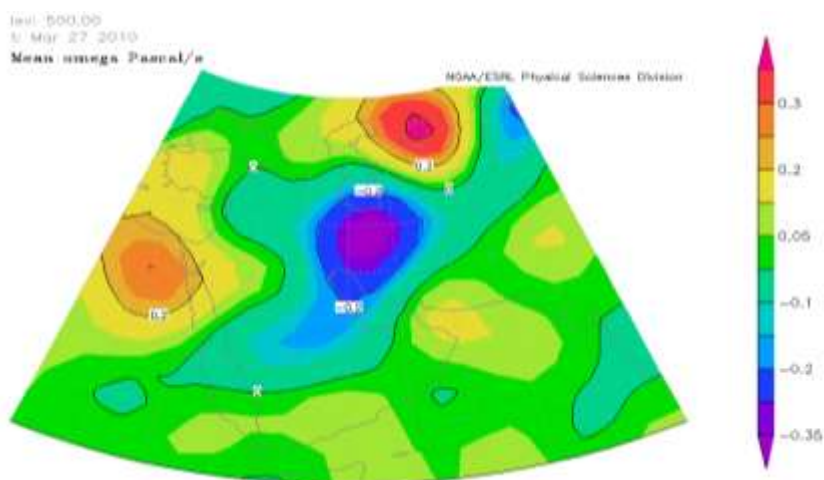
جلوی این ناوه و در منطقه ناپایداری آن قرار دارد و باعث سیل و بارش تگرگ و برکندن مجسمه‌ها در جزیره کیش شد. در نقشه رطوبت ویژه، زبانه‌ای نسبتاً قوی از رطوبت از سمت دریای سرخ و بخش جنوبی ایران به کشور نفوذ کرده و از مرزهای خراسان جنوبی از کشور خارج شده است این شاخه رطوبت در روز وقوع طوفان تندی همراه با شرایط ناپایداری حاکم، سبب رخداد طوفان تندی و تگرگ برای شهر کیش گردیده است (شکل ۱۴).



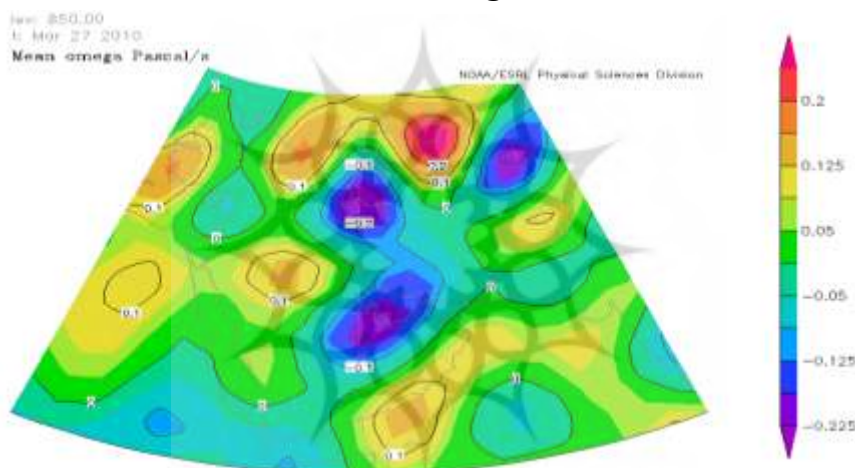
شکل ۱۳- میانگین ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۵۰۰- شکل ۱۴- میانگین رطوبت ویژه سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال (۱۰-۱۱ نوامبر ۲۰۱۵)

۳-۳- تحلیل همدیدی طوفان تندی بخش مرکزی منطقه مورد مطالعه

بررسی نقشه‌های امگای یا جریان سرعت قائم بالاسو و پایین‌سو سطح ۵۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکالی در ۲۷ مارس ۲۰۱۰ حاکی از وجود یک هسته امگای منفی در ایران مرکزی دارند. در این روز شهر اصفهان به‌عنوان نماینده این بخش، جوی ناپایدار را داشته است. مرکز امگای منفی در تراز ۵۰۰ خیلی قوی‌تر از تراز ۸۵۰ هکتوپاسکالی است این مرکز کل ایران مرکزی را تقریباً در برگرفته و مرکز اصلی آن روی شهر اصفهان قرار گرفته است. در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکالی دو مرکز امگای منفی وجود دارد که یکی در جنوب غرب دریای خزر و دیگری در جنوب خلیج فارس و کشور عربستان قرار گرفته است. زبانه‌ای از امگای منفی هم که از روی اصفهان گذر کرده این دو مرکز امگا را به هم وصل کرده است. در کل در هر دو تراز شرایط جوی ناپایدار در منطقه فراهم است (شکل‌های ۱۵ و ۱۶).

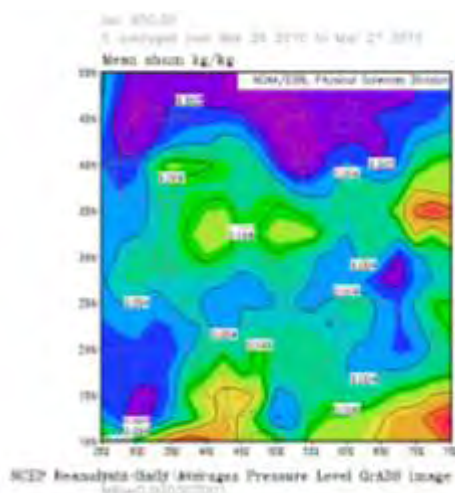


شکل ۱۵- میانگین امگای سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال (۲۷ مارس ۲۰۱۰)

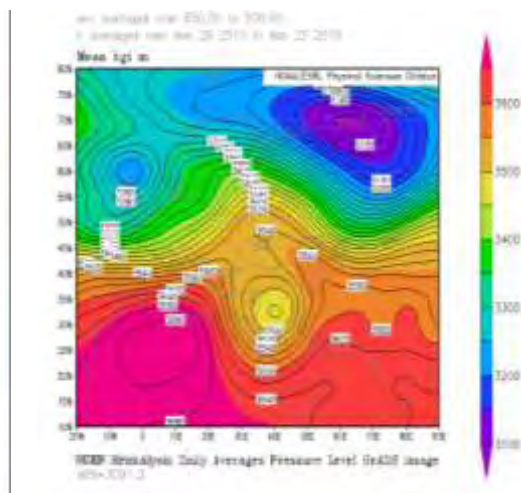


شکل ۱۶- میانگین امگای سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال (۲۷ مارس ۲۰۱۰)

بررسی نقشه میانگین ارتفاع ژئوپتانسیل نشان می‌دهد که به دلیل عمیق بودن موج بادهای غربی یک مرکز کم ارتفاع در جنوب جریانات اصلی در سطح ۵۰۰-۸۵۰ در مرز کشور عراق و عربستان شکل گرفته است. پیدایش هم‌زمان بریده‌های کم ارتفاع روی نقشه‌های تراز ۵۰۰-۸۵۰ هکتوپاسکال سبب ایجاد یک هسته سرد می‌شود (قویدل رحیمی، ۱۳۸۹). کشور ایران در شرق این ناوه و هسته هوای سرد قرار گرفته است که هوای نواحی مرکزی کشور را به‌صورت ناپایدار درآورده است (شکل ۱۷). با توجه به شرایط ناپایداری مذکور در نقشه‌های بالا، هم‌زمان یک مرکز رطوبتی نسبتاً خوب نیز از سمت غرب وارد کشور ایران شده است این رطوبت از دو منبع دریای سرخ و خلیج فارس در جنوب و دریای مدیترانه در عرض‌های بالاتر نشأت گرفته است؛ بنابراین رطوبت این روز که هسته رطوبت آن روی اصفهان نیز قرار گرفته از چندین منبع تأمین شده است (شکل ۱۸).



شکل ۱۸- میانگین رطوبت ویژه سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال
(۲۶-۲۷ مارس ۲۰۱۰)



شکل ۱۷- میانگین ارتفاع ژئوپتانسیل سطح
۵۰۰-۸۵۰ هکتوپاسکال (۲۶-۲۷ مارس ۲۰۱۰)

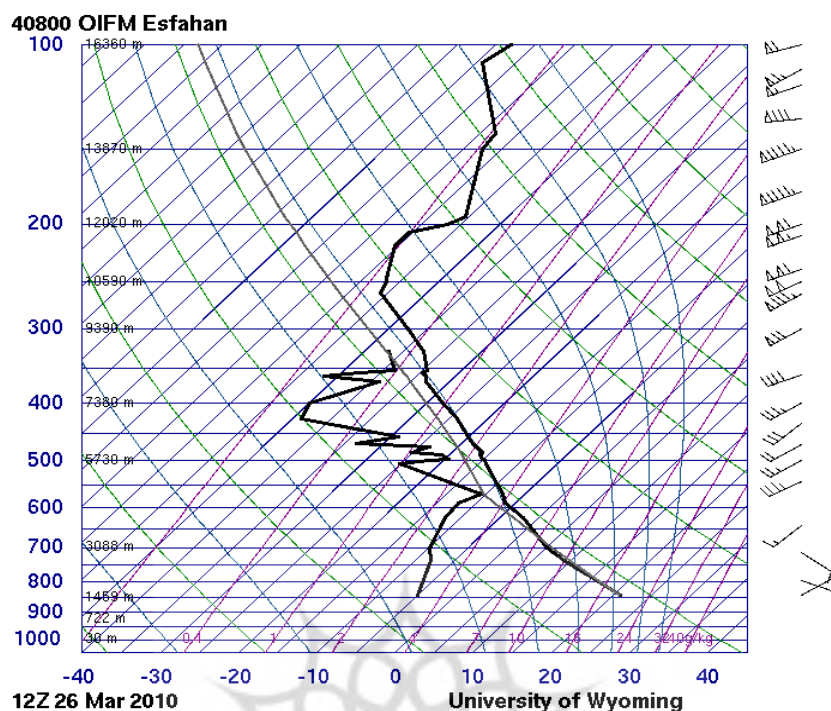
جهت بررسی واکاوی ترمودینامیکی طوفان تندری ۲۶ و ۲۷ مارس ۲۰۱۰ در اصفهان از نمودار skew-t و شاخص‌های مختلف آن نیز استفاده شد که نتایج آن در جدول (۲) آورده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد در روز قبل از طوفان (۲۶ مارس ۲۰۱۰) در شهر اصفهان، این مقدار صفر بوده و برای روز طوفان (۲۷ مارس) به ۵/۱۲ ژول بر کیلوگرم رسیده است که نشان‌دهنده ناپایداری همرفتی شدید برای این روز است. شاخص PWAT آب چگالیده شده موجود در یک ستون هوای نمناک (آب قابل بارش) برحسب گرم بر سانتی متر مربع است در روز قبل از طوفان مقدار این شاخص برابر با ۹/۸۲ گرم بر سانتی متر مربع است که در روز وقوع طوفان این مقدار به ۱۷/۲۵ گرم بر سانتی متر مربع رسیده است و حاکی از وجود و نفوذ رطوبت مناسب در جو منطقه است.

جدول ۲- مقادیر شاخص‌های مختلف در نمودار اسکیتوی مربوط به طوفان تندری اصفهان

ردیف	شاخص	۲۶ مارس ۲۰۱۰ (روز قبل از طوفان)	۲۷ مارس ۲۰۱۰ (روز طوفان تندری)
۱	SLAT	۳۲,۴۶	۳۲,۴۶
۲	SLON	۵۱,۷۱	۵۱,۷۱
۳	SELV	۱۵۵۰	۱۵۵۰
۴	SHOW	-۹۹۹۹	-۹۹۹۹
۵	LIFT	۲,۴۲	۰,۰۹
۶	LFTV	۲,۳۲	-۰,۰۸
۷	SWET	-۹۹۹۹	-۹۹۹۹

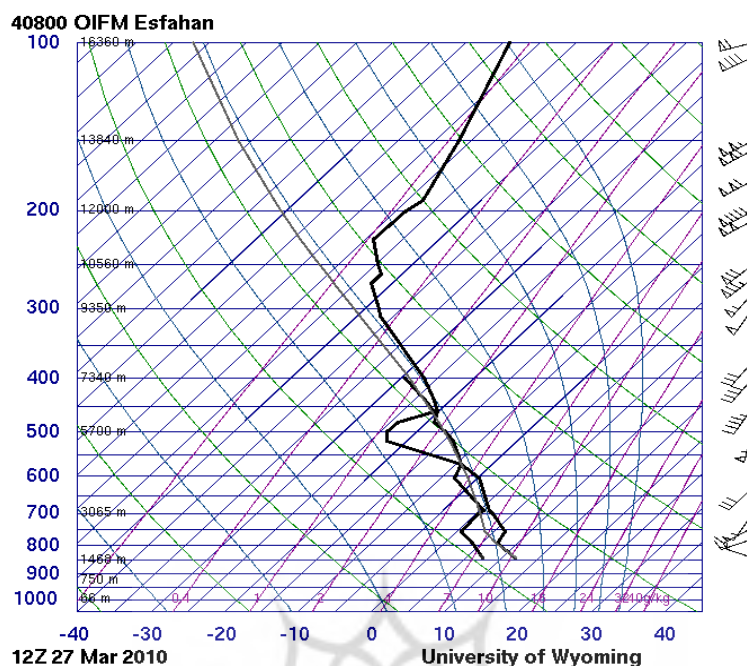
ردیف	شاخص	۲۶ مارس ۲۰۱۰ (روز قبل از طوفان)	۲۷ مارس ۲۰۱۰ (روز طوفان تندی)
		z12-00(utc)	z12-00(utc)
۸	KINX	-۹۹۹۹	-۹۹۹۹
۹	CTOT	-۹۹۹۹	-۹۹۹۹
۱۰	VTOT	-۹۹۹۹	-۹۹۹۹
۱۱	TOTL	-۹۹۹۹	-۹۹۹۹
۱۲	CAPE	۰	۵,۱۲
۱۳	CAPV	۰	۷,۴۵
۱۴	CINS	۰	-۱۴۵
۱۵	CINV	۰	-۱۳۸
۱۶	EQLV	-۹۹۹۹	۴۷۰
۱۷	EQTV	-۹۹۹۹	۴۶۹,۴
۱۸	LFCT	-۹۹۹۹	۵۷۲
۱۹	LFCV	-۹۹۹۹	۵۷۲
۲۰	BRCH	۰	۰,۰۶
۲۱	BRCV	۰	۰,۰۹
۲۲	LCLT	۲۶۲,۷	۲۷۷,۸
۲۳	LCLP	۵۶۸,۱	۷۶۹,۳
۲۴	MLTH	۳۰۸,۸	۲۹۹,۵
۲۵	MLMR	۳,۰۸	۷,۰۵
۲۶	THCK	۵۷۰۰	۵۶۳۴
۲۷	PWAT	۹,۸۲	۱۷,۲۵

نمودار Skew-t روز ۲۶ مارس ۲۰۱۰ در ساعت ۱۲ نیز نشان می‌دهد که منحنی‌های دما و دمای نقطه شبنم از هم‌دیگر دور هستند و فقط در تراز ۶۰۰ هکتوپاسکالی به هم نزدیک شده‌اند که نشان‌دهنده افزایش رطوبت در این تراز جوی است و ناپایداری در این روز رخ نداده است (شکل ۱۹).



شکل ۱۹- نمودار اسکیتوتی ۲۶ مارس ۲۰۱۰ (۱۲z) ایستگاه اصفهان

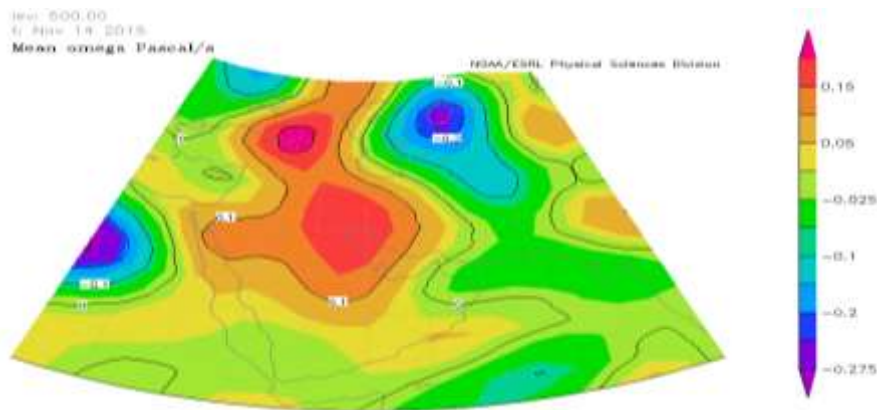
نمودار Skew-t ساعت ۱۲ در روز ۲۷ مارس ۲۰۱۰ نیز نشان می‌دهد که در این روز منحنی‌های دما و دمای نقطه شبنم در تراز ۶۰۰ هکتوپاسکالی یکدیگر را قطع نموده‌اند که بیانگر افزایش چگالش رطوبت و شناوری مثبت بسته‌هوا و صعود قائم بسته‌هوا است و اصلاحات ناپایداری جوی در این تراز جوی است که سرعت باد نیز در این تراز حدود ۵۵ نات است. از ارتفاع مذکور دو منحنی از هم دور شده و مجدد در بالای تراز ۴۵۰ هکتوپاسکالی یکدیگر را قطع کرده‌اند که می‌تواند بیانگر دو اوج بارشی در این روز باشد. در این روز دو منحنی مذکور به هم نزدیک هستند که نشان‌دهنده جوی سرشار از رطوبت در این روز است (شکل ۲۰).



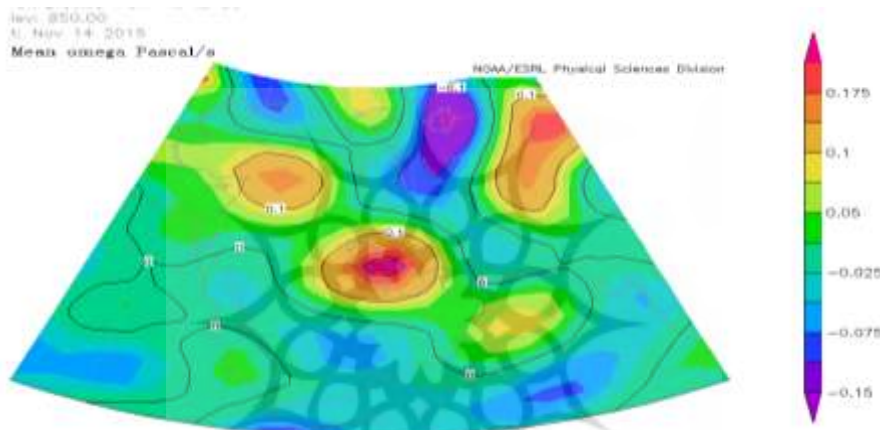
شکل ۲۰ - نمودار اسکینیونی ۲۷ مارس ۲۰۱۰ (۱۲z)

۳-۴- تحلیل همدیدی طوفان تندری بخش شمال شرقی منطقه مورد مطالعه

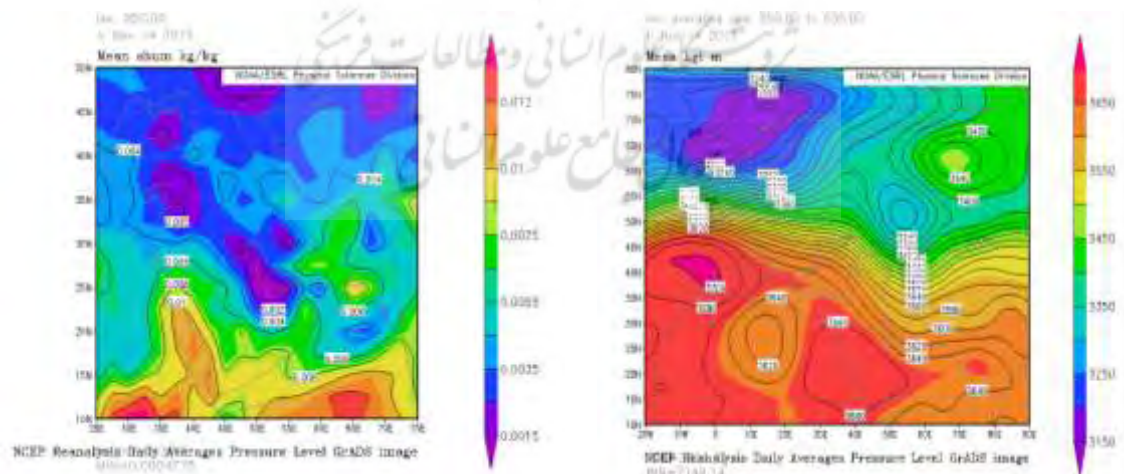
بررسی شرایط ناپایداری برای این بخش در روز ۱۴ نوامبر ۲۰۱۵، بیانگر آن است که در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال یک مرکز اُمگای شدید منفی در نزدیک دریاچه بایکال قزاقستان و ازبکستان قرار گرفته است که زبانه آن سمت مرزهای بیرونی خراسان رضوی کشیده شده است (شکل ۲۱). نقشه اُمگای سطح ۸۵۰ هکتوپاسکالی نیز حاکی از شدت گرفتن این زبانه در این تراز جوی است (شکل ۲۲) که باعث شده در دو تراز ۵۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکالی شرایط جوی ناپایدار وجود داشته باشد. بررسی نقشه میانگین ارتفاع ژئوپتانسیل برای سطح ۵۰۰-۸۵۰ هکتوپاسکالی نیز نشان می‌دهد که یک ناوه بر روی شمال و شمال شرق کشور قرار گرفته است که مرکز بریده آن در شمال دریای خزر و کشور قزاقستان قرار گرفته است. این ناوه سبب ایجاد ناپایداری برای بخش منتهی شمال شرقی کشور شده است (شکل ۲۳). بررسی نقشه رطوبت ویژه نشان می‌دهد که رطوبت نسبتاً ضعیفی از سمت دریای خزر وارد این منطقه شده است که نقش اصلی را در بارش تگرگ ندارد و دلیل اصلی رخداد تگرگ در این بخش، ورود هوای سرد از عرض‌های بالاتر است که به دلیل کاهش دما، رطوبت کمی لازم است تا بارش و یا تگرگ اتفاق بیافتد؛ بنابراین در مناطقی که تحت تأثیر نفوذ هوای سرد قرار دارند در صورت وجود شرایط ناپایداری، با رطوبت کم نیز انتظار وقوع تگرگ فراهم می‌شود (شکل ۲۴).



شکل ۲۱- میانگین امگای سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال (۱۴ نوامبر ۲۰۱۵)



شکل ۲۲- میانگین امگای سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال (۱۴ نوامبر ۲۰۱۵)



شکل ۲۴- میانگین رطوبت ویژه سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال (۱۴ نوامبر ۲۰۱۵)

شکل ۲۳- میانگین ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۵۰۰- ۸۵۰ هکتوپاسکال (۱۴ نوامبر ۲۰۱۵)

۴- جمع‌بندی

فلات ایران به دلیل قرارگیری در عرض‌های میانی در معرض توده‌هواهای گوناگون در طول سال قرار دارد بسیاری از این توده‌هاها به صورت ریزش‌های جوی و یک نگاه مثبت، قابل شناخت است؛ اما در مواردی از این توده‌هاها می‌توان شاهد پدیده‌های ویرانگر و مخربی باشیم که امنیت جانی و مالی را با مخاطره جدی روبرو سازد. یکی از این پدیده‌ها، طوفان‌های تندری است که یکی از مهم‌ترین، فراوان‌ترین و شدیدترین مخاطرات جوی هستند که هر ساله علاوه بر نابود کردن مقدار زیادی از محصولات کشاورزی و تأسیسات عمرانی، موجب تلفات انسانی نیز در بسیاری از مناطق کره زمین می‌شوند؛ بنابراین با توجه به اهمیت آن، در این پژوهش به واکاوی همدیدی و ترمودینامیکی و توزیع زمانی و مکانی آن در بخش وسیعی از فلات ایران شامل مناطق شرقی، جنوبی، مرکزی و شمال شرقی پرداخته شد. نتایج حاصل از واکاوی زمانی و مکانی وقوع طوفان‌های تندری بیانگر آن است که منطقه مورد مطالعه در طول دوره آماری مورد بررسی همواره در معرض رخداد این پدیده قرار دارد که بیشترین فراوانی وقوع آن در منطقه مورد مطالعه مربوط به فصل بهار است که هسته آن در مناطق اطراف استان خراسان شمالی و شمال استان خراسان رضوی و شرق استان گلستان است. در فصل زمستان، مناطق جنوبی و سواحل مکران، هسته رخداد طوفان تندری را دارا می‌باشند و دو هسته پیشینه نیز در شرق کشور، یکی در منطقه خراسان جنوبی و دیگری در سبزوار واقع در استان خراسان شمالی قرار دارد. در تابستان بیشترین رخدادها در منطقه مورد مطالعه، مربوط به سمنان، شمال خراسان شمالی، اطراف جیرفت و بندرعباس است و در فصل پاییز شمال سمنان دارای بیشترین رخداد طوفان‌های تندری است. در مجموع بر اساس نتایج واکاوی زمانی و مکانی حاصل می‌توان بیان کرد که هیچ منطقه‌ای از نظر رخداد این پدیده مخرب به دور نیست فقط مناطق نسبتاً آرام و کم رخداد تر طوفان تندری در طول دوره مورد مطالعه، کرمان و نواحی اطراف شهرستان سیرجان است. واکاوی همدیدی و ترمودینامیکی طوفان‌های تندری نیز بیانگر وجود ناپایداری شدید در روزهای همراه با بارش سیل و تگرگ در منطقه مورد مطالعه است و در بیشتر موارد، ورود جریانات نصف‌النهاری عمیق همراه با سرد چال و قرارگیری منطقه در زیر سرد چال یا جلوی ناوه و وجود امگای منفی، شرایط ناپایداری فراهم شده که در صورت وجود و ورود رطوبت ویژه به منطقه احتمال رخداد پدیده تگرگ و سیل وجود دارد. نمودارهای اسکیتوتی نیز بیانگر وجود، جوی ناپایدار و سرشار از رطوبت است که در آن منحنی‌های دما و دمای نقطه شبنم به هم نزدیک شده و تأیید کننده ناپایداری جو است. همچنین دو شاخص CAPE و PWAT نیز در روز قبل و بعد طوفان تغییرات قابل ملاحظه‌ای داشتند؛ به طوری که شاخص CAPE قبل از طوفان تندری صفر ژول بر کیلوگرم بوده که در روز طوفان به ۵/۱۲ ژول رسیده است همچنین میزان شاخص PWAT در روز طوفان تندری به حدود دو برابر روز قبل از طوفان رسیده و بیانگر شرایط جوی مناسب برای طوفان

تندری در اصفهان است. نتایج حاصل از این پژوهش مطالعات صلاحی (۱۳۸۹)، میراحمدی (۱۳۹۱)، امیدوار و همکاران (۱۳۹۲)، معصوم پور و همکاران (۱۳۹۵) و خوش اخلاق و ماهوتچی (۱۳۹۹) را مورد تأیید قرار می‌دهد.

کتابنامه

- امیدوار، کمال؛ صفر پور، فرشاد؛ زنگنه، اسماعیل؛ ۱۳۹۲. بررسی و تحلیل همیدی سه رخداد تگرگ شدید در استان فارس. *جغرافیا و توسعه*. ۳۰: ۱۵۷-۱۷۸.
- ایرانپور، فخرالدین؛ یزدان پناه، حجت‌الله؛ حنفی، علی؛ ۱۳۹۴. تحلیل همیدی و ترمودینامیکی طوفان‌های تندری در ایستگاه‌های هواشناسی همدان. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۱۳: ۱۱۵-۱۳۱.
- خوش اخلاق، فرامرز؛ ماهوتچی، محمدحسن؛ ۱۳۹۸. واکاوی همیدی بارش‌های تندری مخرب مشهد. *فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست*. ۲۱(۱۲): ۲۳۵-۲۴۹.
- سیف، مهرزاد؛ ۱۳۷۵. بررسی توزیع بارش تگرگ در ایران و مطالعه موردی آن. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. موسسه ژئوفیزیک. دانشگاه تهران.
- صفری، زهرا؛ ۱۳۹۳. تحلیل آماری طوفان‌های تندری و الگوهای سینوپتیکی توام با آن در استان زنجان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد اقلیم‌شناسی. دانشگاه زنجان.
- صلاحی، برومند؛ ۱۳۸۹. بررسی ویژگی‌های آماری و همیدی طوفان‌های تندری استان اردبیل. *پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی*. ۷۲: ۱۲۹-۱۴۱.
- علیزاده، امین؛ کمالی، غلامعلی؛ موسوی، فرهاد؛ موسوی بایگی، محمد؛ ۱۳۸۶. *هوا و اقلیم‌شناسی*. چاپ دهم. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.
- فلک، عسل؛ برنا، رضا؛ اسدیان، فریده؛ ۱۳۹۹. تحلیل زمانی و مکانی طوفان‌های تندری جنوب غربی ایران. *جغرافیایی سرزمین*. ۱۷(۶۷): ۹۰-۱۰۳.
- معصوم پور سماکوش، جعفر؛ میری، مرتضی؛ رحیمی، مجتبی؛ ۱۳۹۵. واکاوی آماری-همیدی طوفان‌های تندری سواحل جنوبی ایران. *فیزیک زمین و فضا*. ۳: ۷۰۸-۶۹۷.
- میراحمدی، اکبر؛ ۱۳۹۱. بررسی ویژگی‌های آماری طوفان‌های تندری در کوه‌رنگ بختیاری. همایش ملی انتقال آب بین حوضه‌ای (چالش‌ها و فرصت‌ها). ۶ ص.

Changnon Jr, S.A. and Hsu, C.F., 1984. Temporal distributions of global thunder days. Illinois State Water Survey.

Chaudhuri, S. and Middey, A., 2014. Comparison of tropical and midlatitude thunderstorm characteristics anchored in thermodynamic and dynamic aspects. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 50(2):179-189.

Galway, J.G., 1956. The lifted index as a predictor of latent instability. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 37(10):528-529.

George, J., 1960. *Weather Forecasting for Aeronautics*-Academic Press. New York :41.

- Gottlieb, R., 2009. Analysis of stability indices for severe thunderstorms in the northeastern united states. M.Sc. Thesis, Cornell University, Ithaca, USA118.
- Helali, J., Momenzadeh, H., Salimi, S. Hosseini, S.A., Mohamadi, S.M., Maghami Moghim. Gh., Pazhoh, F., Ahmadi, M., 2021. Synoptic-dynamic analysis of precipitation anomalies over Iran in different phases of ENSO. Arab J Geosci 14, 2322.
- Henry, N.L., 2000. A static stability index for low-topped convection. Weather and forecasting, 15(2) :246-254.
- Krauss, T.W. and Santos, J.R., 2004. Exploratory analysis of the effect of hail suppression operations on precipitation in Alberta. Atmospheric research, 71(1-2):35-50.
- Lanz, T.M. and Romppainen-Martius, O., 2020, Lagrangian Analysis of Thunderstorms in Switzerland.
- Miller, R.C., 1975. Notes on analysis and severe-storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central (Vol. 200). Air Weather Service (AWS), Scott Air Force Base, USAF: 190.
- Mohee, F.M. and Miller, C., 2010. Climatology of thunderstorms for North Dakota, 2002–06. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 49(9): 1881-1890.
- Moncrieff, M.W. and Miller, M.J., 1976. The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 102(432): 373-394.
- Pizzuti, A., Soula, S., Mlynarczyk, J., Bennett, A. and Fullekrug, M., 2020, May. Analysis of sprite events during small-scale winter thunderstorms in northern Europe. In EGU General Assembly Conference Abstracts: 20065.
- Queralt, S., Hernandez, E., Gallego, D. and Iturrioz, I., 2007. Atmospheric instability analysis and its relationship to precipitation patterns over the western Iberian Peninsula. Advances in Geosciences, 10: 39-44.
- Showalter, A.K., 1953. A stability index for thunderstorm forecasting. Bulletin of the American Meteorological Society, 34(6): 250-252.
- Thompson, R.L., Edwards, R. and Mead, C.M., 2004, October. An update to the supercell composite and significant tornado parameters. In Preprints, 22nd Conf. on Severe Local Storms, Hyannis, MA, Amer. Meteor. Soc.