

## تحلیل همدیدی و ترمودینامیکی توفان‌های تندری در ایستگاه‌های هواشناسی همدان

فخرالدین ایرانپور<sup>۱</sup> - کارشناس ارشد آب و هواشناسی سینوپتیک، مرکز تحقیقات هواشناسی همدان، همدان، ایران

حجت‌الله یزدان پناه - دانشیار آب و هواشناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

علی حنفی - دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۱۷ تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱۰/۶

### چکیده

توفان‌های تندری به‌طور گسترده‌ای بر انسان، ثروت و سرمایه او، به‌ویژه در بخش کشاورزی، هوانوردی، دریایی و غیره اثر می‌گذارد. در پژوهش حاضر به‌منظور بررسی توفان‌های تندری، داده‌های مربوط به توفان‌های تندری در یک دوره آماری ۱۵ ساله (۲۰۰۶-۱۹۹۲) از مرکز تحقیقات هواشناسی همدان دریافت گردید. همچنین به‌منظور تحلیل همدیدی الگوهای توفان، داده‌های مربوط به فشار تراز دریا (Slp) و ۵۰۰ هکتوپاسکال از سایت مرکز پیش‌بینی محیطی آمریکا دریافت و نقشه‌های موردنیاز در محیط نرم‌افزاری گرس ترسیم و مورد تحلیل قرار گرفت. نمودارهای ترمودینامیک موسوم به ۱۰ آوریل ۲۰۰۵ و ۳۱ اکتبر ۲۰۰۶، از وب‌سایت دانشگاه وایومینگ جهت مطالعه اخذ گردید. برای تحلیل دینامیک فعالیت‌های همرفتی از شاخص‌های ناپایداری استفاده شده است. رخدادهای توفان تندری با استفاده از نرم‌افزار Spss به شش خوشه تقسیم گردید. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که در هر دو ایستگاه فرودگاه و نوزه به‌صورت هم‌دید توفان تندری به همراه بارش رگباری رخ داده و این توفان‌ها ماهیت جبهه‌ای و همدیدی داشته است؛ اما در تاریخ ۱۰ آوریل ۲۰۰۵ در ایستگاه فرودگاه توفان تندری به همراه بارش رگباری به میزان ۱۶ میلی‌متر و در تاریخ ۳۱ اکتبر ۲۰۰۶ در ایستگاه نوزه به میزان ۹ میلی‌متر گزارش شده است که علت این رخدادها همدیدی نبوده و دارای ساختار ترمودینامیکی می‌باشد. پرفشار سرد و ریزش هوای سرد به لایه‌های میانی جو در شمال غرب کشور و وجود کم‌فشار جنوبی در لایه زیرین جو که جریان‌های گرم و مرطوب عربستان را به منطقه وارد می‌کند، باعث رشد ابرهای کومولوس و کومولونیمبوس و ایجاد توفان تندری، بارش تگرگ و نیز باران‌های سیل‌آسا می‌گردد.

**کلیدواژه‌ها:** توفان تندری، همدید، ترمودینامیک، شاخص‌های ناپایداری، همدان.

## ۱. مقدمه

توفان‌های تندری 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 اقصی نقاط کره زمین می‌شوند. تنها در بین سال‌های ۱۹۵۳ تا ۱۹۵۷ خسارت‌های مالی ناشی از توفان در آمریکا بالغ بر ۳/۶ میلیون دلار برآورد شده است (چانگنون<sup>۱</sup>، ۲۰۰۳: ۱۲۳۱). توفان تندری پدیده‌ای میان مقیاس است که تقریباً در تمام نقاط دنیا رخ می‌دهد و در مقیاس جهانی رخداد آن در فصول گرم به مراتب بیشتر از فصول سرد است، واگرایی باد سطوح فوقانی همراه با همگرایی باد سطحی و بالا رفتن هوا شرایط مناسبی را برای بسط و توسعه توفان فراهم می‌آورد. دیوباده‌ها، فروپیکش‌ها، بادهای بسیار شدید و سیلاب‌های لحظه‌ای از جمله شرایط جوی خطرناکی است که با توفان همراه می‌شوند؛ از این رو به نظر می‌رسد که پیش‌بینی آن در حکم یکی از اصولی‌ترین وظایف مراکز پیش‌بینی برای برطرف ساختن نیازهای جوامع اجتماعی گوناگون از جمله هوانوردی، کشاورزی، دریایی و مانند آن مطرح باشد (تاجبخش و همکاران، ۱۳۸۸: ۱۴۷). برای مطالعه و پیش‌بینی توفان از شاخص‌های ناپایداری استفاده می‌شود. این شاخص‌ها روابطی هستند که به کمک آن‌ها می‌توان ناپایداری همرفتی منطقه‌های مختلف جو را بررسی کرد. شاخص‌های ناپایداری در پیش‌بینی فعالیت‌های همرفتی به کار می‌روند و بیشتر به کمک نمودارهای ترمودینامیک و داده‌های رادیوسوند محاسبه می‌شوند (حسینی و رضائیان، ۱۳۸۵: ۸۳). توفان‌ها با شدت‌های متفاوتی شناسایی شده‌اند و به‌طور میانگین گستره افقی این توفان‌ها چند ده کیلومتر، گستره قائم آن‌ها حدود ۱۰/۰۰۰ متر و طول عمر آن‌ها ۳۰ دقیقه است (هندرسن<sup>۲</sup>، ۲۰۰۶). این توفان‌ها اغلب با ابرهای کومه‌ای، کومه‌ای باران‌زا و برجی شکل همراه می‌شوند. تندررها معمولاً یا بر اثر گرم شدن زیاد سطح زمین در داخل توده‌های هوایی و یا در جبهه‌های هوا، به‌ویژه در جبهه سرد، به وجود می‌آیند؛ بنابراین، تندر یا ناشی از توده‌هوا است و یا منشأ جبهه‌ای دارد. از برجسته‌ترین مطالعات انجام‌گرفته در این خصوص می‌توان از تحقیق ویتمن<sup>۳</sup> (۲۰۰۳) یاد کرد که در آن با رویکردی سینوپتیک، پدیده‌های اقلیمی کوهستانی به‌ویژه توفان‌های رعدوبرقی، تگرگ، بارش سنگین و دیگر پدیده‌های نواحی مرتفع مطرح شده است. مطالعه‌ای در آمریکا نشان می‌دهد که صاعقه‌های ناشی از توفان‌های تندری مهم‌ترین عامل طبیعی آتش‌سوزی‌های جنگل‌ها و مراتع آمریکا است. مطالعه یادشده با توجه به خصوصیات توزیع زمانی و مکانی آذرخش‌های ایالات متحده آمریکا از نظر خطر آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع انجام‌گرفته است (گشونوف<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۳: ۵۹۵). (حجازی زاده، ۱۳۷۹: ۵) به‌منظور بررسی توفان‌ها و رعدوبرق در غرب کشور با توجه به شرایط سینوپتیک حاکم بر منطقه در ماه ژوئن از دوره گرم سال و ماه‌های ژانویه و فوریه از دوره سرد به‌صورت نرمال (۳۰ ساله)، نوسان دو مؤلفه مهم

1 Changnon

2 Henderson

3 Whitman

4 Geshunove

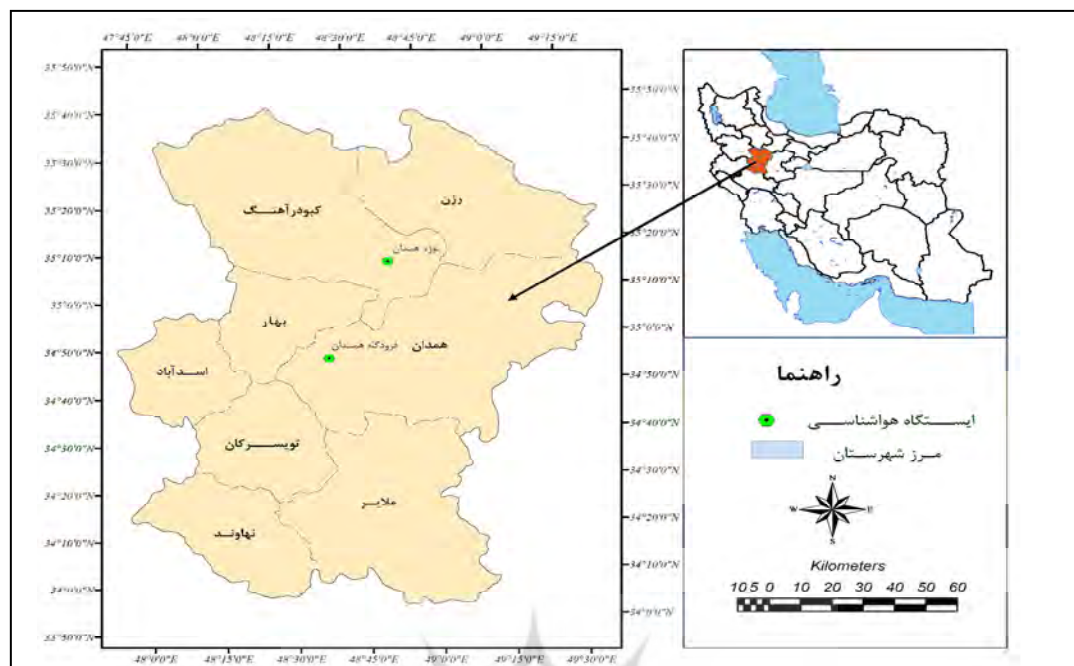
گردش عمومی جو یعنی پرفشار جنب‌حاره‌ای و چرخندگی مثبت تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال را در اولویت مطالعه قرار داده و نتایج به‌دست‌آمده را با بارندگی ۱۸ ایستگاه شمال غرب و غرب کشور برحسب عرض جغرافیایی مورد مقایسه قرار داده است. (غیبی و همکاران، ۲۰۰۵:۳۲۹) در مطالعه‌ای با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و شبکه‌های عصبی اقدام به تعیین ویژگی‌ها و طبقه‌بندی توفان‌ها مناطق جنوب و جنوب غرب ایران نموده است. (ساری صراف و همکاران، ۱۳۸۸:۱۲۳) در پژوهشی بارش‌های رگباری حوضه جنوبی رود ارس را مورد مطالعه قرار داده و به این نتیجه رسیده‌اند که مهم‌ترین علل وقوع بارش‌های رگباری در این منطقه عمدتاً دو عامل ناپایداری محلی (در فصول گرم سال) و ورود جبهه سرد (در فصول سرد) است. مخاطره اقلیمی توفان تندی به‌عنوان بخشی از ماهیت اقلیم منطقه شمال غرب ایران، هر ساله خسارات فراوان اقتصادی اجتماعی و زیست‌محیطی را متوجه مردم به‌ویژه کشاورزان و دامداران می‌کند (خوشحال و قویدل رحیمی، ۱۳۸۶:۱۰۱). هواشناسان با بررسی جو در مدت‌زمان شکل‌گیری توفان‌ها، پی به وجود عواملی برده‌اند که این عوامل مناسب بودن یا نبودن شرایط برای تشکیل توفان و همچنین چگونگی ناپایداری جو و یا احتمال همرفت را نشان می‌دهند. هوای سرد ترازهای بالا، هوای گرم ترازهای پایین و فراوانی رطوبت، همگی از عوامل ناپایداری جو است. بر این اساس از بعد دینامیک جو، استفاده از شاخص‌های ناپایداری، مهم‌ترین روش علمی مطالعه ناپایداری‌های جوی منجر به توفان محسوب می‌شود.

## ۲. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

استان همدان با وسعتی در حدود ۱۹۵۴۵/۸۲ کیلومترمربع، در بین مدارهای (۳۳ درجه و ۳۳ دقیقه) تا (۳۵ درجه و ۳۸ دقیقه) عرض شمالی و در بین نصف‌النهارهای (۴۷ درجه و ۴۵ دقیقه) تا (۴۹ درجه و ۳۶ دقیقه) طول شرقی قرار گرفته است. این استان از شمال به استان‌های زنجان و قزوین و از جنوب به استان لرستان و از شرق با استان مرکزی و از غرب با استان‌های کرمانشاه و کردستان محدود می‌شود و بر پایه آخرین تقسیمات کشوری شامل ۸ شهرستان، ۲۱ شهر، ۲۰ بخش، ۷۱ دهستان و ۱۱۲۰ روستا است. ارتفاع متوسط این استان از سطح آب‌های آزاد حدود ۱۸۰۰ متر است. بلندترین نقطه استان همدان قله الوند با ارتفاع ۳۵۸۴ متر و پست‌ترین نقطه آن زمین‌های عمرآباد با ارتفاع ۱۶۰۰ متر است. مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول (۱) و موقعیت جغرافیایی آن‌ها نیز در شکل (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱ مشخصات ایستگاه‌های همدید مورد مطالعه

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع ایستگاه
فرودگاه همدان	۴۸/۳۲	۳۴/۵۲	۱۷۴۱/۵
نوزه کبودرآهنگ	۴۸/۷۱	۳۵/۲۰	۱۶۷۹/۷



شکل ۱ موقعیت منطقه و ایستگاه‌های مورد مطالعه

### ۳. مواد و روش‌ها

جهت بررسی رخداد توفان از داده‌های همدید دو ایستگاه فرودگاه و نوژه همدان در طی دوره آماری ۱۵ ساله (۱۹۹۲-۲۰۰۶ میلادی) استفاده شده است (جدول ۱). در این بررسی، ابتدا داده‌های اولیه از اداره کل هواشناسی همدان در دوره ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۶ اخذ گردید. بعد از کنترل داده‌ها، آزمون‌های اولیه صورت گرفته و داده‌های مربوط به توفان از روی کدهای هوای حاضر و گذشته در مقیاس ساعتی استخراج گردید. با بررسی‌های صورت گرفته مشخص گردید که در طول دوره آماری ۱۵ ساله، تعداد ۲۷۰ توفان تندی در منطقه به وقوع پیوسته است. در ادامه به منظور شناسایی الگوهای همدید ایجادکننده توفان در منطقه، یک تحلیل خوشه‌ای روی ۲۷۰ روز همراه با توفان تندی صورت گرفته و توفان‌های رخ داده در همدان خوشه‌بندی گردید و ساعاتی که از نظر شدت و تداوم توفان و بارش‌های رگباری قابل توجه بودند مورد بررسی همدیدی قرار گرفت. برای تحلیل توفان به وقوع پیوسته در طول دوره آماری، ابتدا به روش همدید نقشه‌های وضعیت جوی سطح زمین و سطح ۵۰۰ میلی بار روزانه و سپس روش ترمودینامیک مورد بررسی واقع شده است. برای رسم آن‌ها، داده‌های خام سطح زمین و تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال از سایت مرکز پیش‌بینی‌های محیطی اخذ گردیده و سپس توسط نرم‌افزار گرادس نقشه روزهای مربوطه ترسیم شد. همچنین نمودارهای ترمودینامیک موسوم به ۱۰ آوریل ۲۰۰۵ و ۳۱ اکتبر ۲۰۰۶، به علت وقوع توفان تندی شدید در

این روزها، به‌عنوان نمونه از وب‌سایت دانشگاه وایومینگ<sup>۱</sup> جهت مطالعه تهیه و استفاده شده است. نمودارهای ترمودینامیکی اسکیتوتی (جو بالا) و میانگین‌های ماهانه، فصلی و سالانه برای هر دو ایستگاه محاسبه گردید و ناپایداری‌های جوی به کمک شاخص‌های ناپایداری موردبررسی قرار گرفت. این شاخص‌ها، همگی نشان‌دهنده احتمال بالای وقوع ناپایداری و به‌طور ویژه توفان‌ها در روزهای یادشده است. در تاریخ ۱۰ آوریل ۲۰۰۵ در ایستگاه فرودگاه، توفان به همراه بارش رگباری به میزان ۱۶ میلی‌متر و در تاریخ ۳۱ اکتبر ۲۰۰۶ در ایستگاه نوژه توفان به همراه بارش رگباری به میزان ۹ میلی‌متر گزارش شده است که این رخدادها به‌صورت همدید و همزمان نبوده و لذا دینامیکی و محلی بوده است. داده‌های این دو ایستگاه و نمودارهای مربوط به تغییرات سالانه، فصلی، ماهانه و ساعتی توفان همراه با بارش رگباری و دما، رطوبت در هر دو ایستگاه موردبررسی واقع شده و نمودارهای آن ترسیم شده است.

عوامل ناپایداری بالقوه برای توفان‌ها را می‌توان از طریق شاخص‌های ناپایداری به دست آورد که در این مطالعه برای تحلیل دینامیک فعالیت‌های همرفتی از چند شاخص ترمودینامیک متداول به شرح زیر استفاده شده است:

### ۳.۱. شاخص ناپایداری شوالتر<sup>۲</sup>

شاخص شوالتر از متداول‌ترین شاخص‌های ناپایداری می‌باشد که نشانگر تفاوت بین دمای مشاهده شده در ۵۰۰ هکتوپاسکال و دمایی است که یک بسته هوا در ۵۰۰ هکتوپاسکال خواهد داشت، به شرطی که از لایه مرزی به این سطح صعود کند. این فرایند صعود، هرگونه تراکم و آزاد شدن گرمای نهان را در بردارد، بنابراین تفاوت دما در ۵۰۰ هکتوپاسکال تأثیر رطوبت را نیز بیان می‌کند. اگر دمای مشاهده شده ۵۰۰ پاسکال سردتر از دمای بسته‌هوای صعودکننده به آن سطح باشد، آنگاه شاخص صعود منفی بوده و احتمال توفان وجود دارد. ارتباط بین شاخص صعود و شدت توفان در جدول (۲) آمده است که هر چه میزان شاخص شوالتر کوچک‌تر باشد احتمال ناپایداری در سطوح پایین جو بیشتر است.

جدول ۲ مقیاس طبقه‌بندی شاخص شوالتر برای تعیین میزان ناپایداری و احتمال وقوع توفان

ردیف	محدوده شاخص شوالتر	وضعیت احتمالی جو
۱	مساوی و بیشتر از ۳	عدم وقوع بارش همرفتی
۲	۱ تا ۳	احتمال وقوع رگبار
۳	۱ تا -۲	احتمال وقوع توفان تندی
۴	کمتر از -۳	احتمال وقوع پیچند

- شاخص احتمال وقوع K

1 Wyoming

2 shovalter

شاخص K نیز از اطلاعات اسکیتوی به دست آمده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K \text{ Index (KI)} = (T850-T500) + D850 - (T700-D700)$$

این شاخص تفسیر فیزیکی ساده‌ای دارد. جمله اول آهنگ کاهش دما بین سطوح ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال است که اگر یک مقدار مثبت و بزرگ باشد، نشانه‌ای از ناپایداری است. جمله دوم رطوبت در ۸۵۰ هکتوپاسکال را بیان کرده که اگر این جمله زیاد باشد، تأثیر آن در ناپایداری زیاد است. جمله سوم، خشکی هوا را در ۷۰۰ هکتوپاسکال اندازه گرفته که اگر مقدار درون پراتز زیاد باشد، هوا در آن سطح خشک بوده و تأثیر این جمله در ناپایداری منفی است؛ بنابراین اگر جو رطوبت زیاد داشته و آهنگ کاهش دما بزرگ باشد، شاخص K نیز بزرگ بوده و احتمال وقوع توفان توده‌هوا زیاد است. در جدول (۳) ارتباط بین K و احتمال وقوع توفان توده‌هوا نشان داده شده است. با توجه به جدول فوق هر چه میزان KI بزرگ‌تر باشد، ناپایداری در سطوح میانی جو بیشتر است. برای پیش‌بینی توفان نقشه K را رسم کرده و خطوط هم‌مقدار را با فواصل ۵ تایی می‌کشیم. اگر در منطقه همگرایی، سرعت باد در سطوح ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال از ۱۰ m/s بیشتر نباشد، آنگاه احتمال توفان در جدول k، یک مرحله افزایش می‌یابد و اگر سرعت باد در این سطوح بیشتر از ۱۰ m/s باشد، این احتمال دو مرحله افزایش می‌یابد. حال اگر در منطقه واگرایی سرعت باد در سطوح فوق از ۱۰ m/s بیشتر نباشد، احتمال توفان یک مرحله کاهش می‌یابد (آبرامو<sup>۱</sup>، ۱۹۷۲).

جدول ۳ شاخص احتمال وقوع (KI)

شاخص K	احتمال وقوع توفان تندی به درصد
کمتر از ۱۵	نزدیک ۰٪
۱۵ تا ۲۰	۲۰
۲۰ تا ۲۵	۴۰ تا ۶۰
۲۵ تا ۳۰	۶۰ تا ۸۰
۳۰ تا ۳۵	۸۰ تا ۹۰
۳۵ تا ۴۰	۹۰ تا ۱۰۰
بیشتر از ۴۰	نزدیک ۱۰۰

### ۲.۳. شاخص ناپایداری (SWEAT)<sup>۲</sup>

این شاخص بیشتر برای تحلیل بالقوه شدت توفان‌ها به کار می‌رود و طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

1 Abramov

2 Severe Weather Threat indicator

3 Miller

$$SW=20(tt-49) +12 D850+2 v850+v500+125[\sin (\Delta v500-850) +0.2]$$

در این رابطه:  $tt$  همان شاخص مجموع است و اگر از ۴۹ کوچک‌تر باشد، مقدار آن منفی می‌شود.  $D850$  دمای نقطه شبنم تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال،  $V$  تفاوت سرعت باد در دو تراز ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال،  $\Delta V$  اختلاف جهت باد در دو تراز ۵۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال می‌باشد. مقادیر این رابطه همیشه بوده و مقادیر بیشتر از چهارصد نشان‌دهنده وقوع تورنادو می‌باشد (مایلر<sup>۱</sup>، ۱۹۷۲).

جدول ۴ شاخص احتمال وقوع sweat

ارزش sweat	میزان ناپایداری و وقوع توفان
۳۰۰-۱۵۰	ضعیف
۴۰۰-۳۰۰	متوسط
۴۰۰ و بیشتر	قوی و احتمال تورنادو

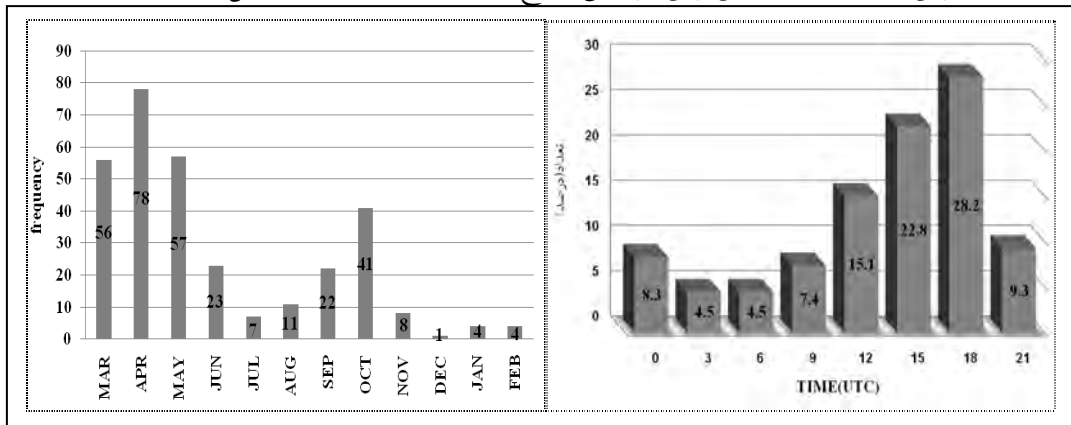
#### ۴. بحث و نتایج

##### ۴.۱. بررسی تغییرات توفان در ایستگاه‌های مورد مطالعه

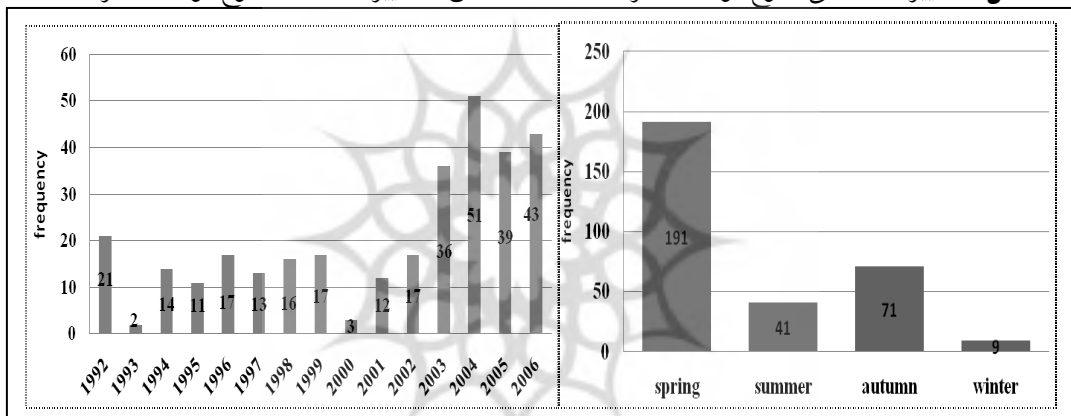
تغییرات ساعتی وقوع توفان تندری در ایستگاه فرودگاه در شکل (۲) نشان داده شده است. بیش‌ترین وقوع توفان در این ایستگاه به ترتیب بین ساعات ۱۵ و ۱۸ می‌باشد و پس از آن‌ها ساعت‌های همدیدی ۱۲ و ۲۱ بیش‌ترین وقوع توفان را به خود اختصاص داده‌اند. تغییرات ماهانه تعداد روزهای تندری در ایستگاه فرودگاه به‌گونه‌ای است که بیش‌ترین فراوانی وقوع آن در ماه‌های آوریل و می و کمترین فراوانی وقوع آن در ماه دسامبر می‌باشد (شکل ۳). در بین فصول نیز، فصل بهار بیش‌ترین فراوانی روزهای تندری و فصل زمستان کمترین فراوانی را به خود اختصاص داده است. بیش از نیمی از توفان‌ها در فصل بهار گزارش شده است، پس از آن فصل پاییز بیش‌ترین وقوع این پدیده را به خود اختصاص داده است (شکل ۴)، همچنین روند تغییرات سالانه وقوع توفان در منطقه مورد مطالعه، تقریباً روندی رو به رشد را دارد، سال ۱۹۹۳ کمترین وقوع را در کل منطقه نشان می‌دهد و سال ۲۰۰۴ به‌عنوان شاخص‌ترین از نظر فراوانی وقوع این پدیده گزارش شده است (شکل ۵).

در ایستگاه نوژه بیش‌ترین فراوانی وقوع توفان به ترتیب بین ساعات ۱۵ و ۱۸ می‌باشد و پس از آن‌ها ساعت‌های همدیدی ۱۲ و ۲۱ بیش‌ترین وقوع را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۶). در بین ماه‌های سال نیز، ماه‌های آوریل و می بیش‌ترین و ماه‌های دسامبر و فوریه کمترین فراوانی وقوع توفان تندری را دارا می‌باشند (شکل ۷). در بین فصول نیز، فصل بهار بیش‌ترین فراوانی را نشان می‌دهد. بیش از نیمی از توفان‌ها در فصل بهار گزارش شده است، پس از آن فصل پاییز بیش‌ترین وقوع را به خود اختصاص داده است (شکل

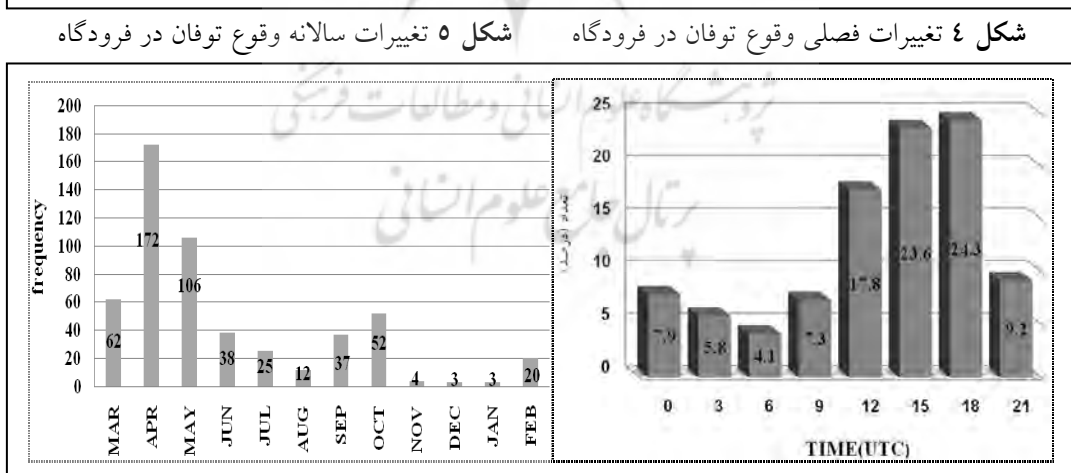
۸)، همچنین روند تغییرات سالانه وقوع این پدیده در منطقه مورد مطالعه، تقریباً روندی رو به رشد را دارد، سال ۱۹۹۳ کمترین و سال ۲۰۰۳ بیشترین فراوانی وقوع توفان تندری را دارد (شکل ۹).



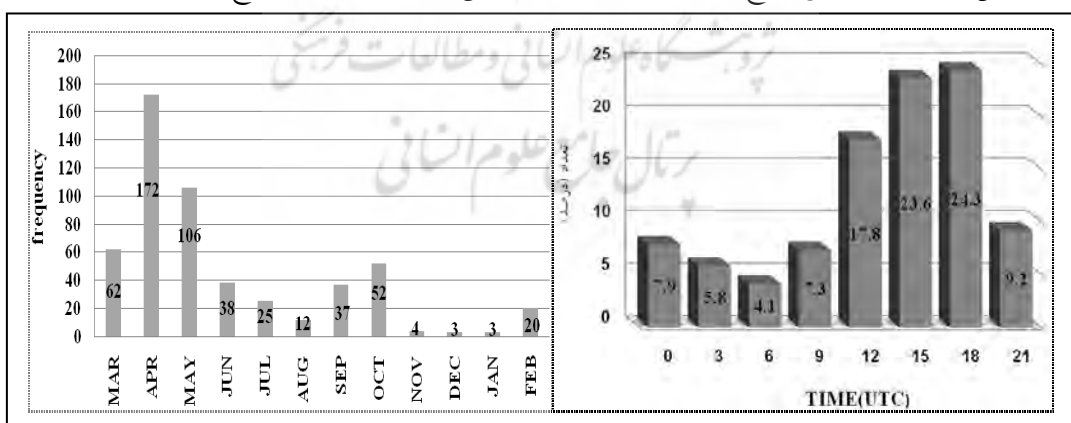
شکل ۲ تغییرات ساعتی وقوع توفان در فرودگاه



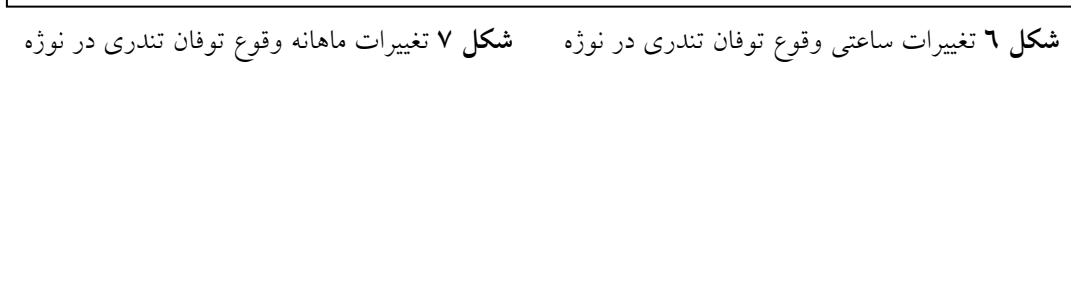
شکل ۳ تغییرات ماهانه وقوع توفان در فرودگاه



شکل ۴ تغییرات فصلی وقوع توفان در فرودگاه



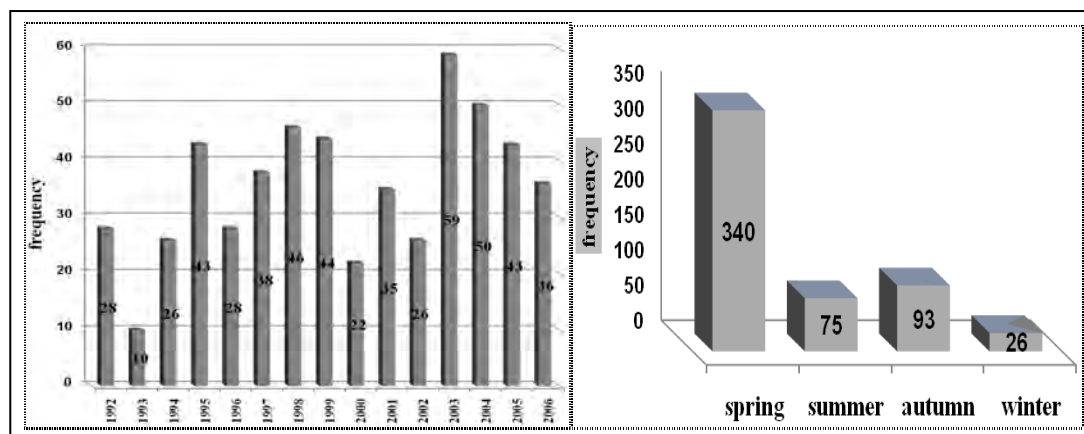
شکل ۵ تغییرات سالانه وقوع توفان در فرودگاه



شکل ۶ تغییرات ساعتی وقوع توفان تندری در نوزه

شکل ۷ تغییرات ماهانه وقوع توفان تندری در نوزه





شکل ۸ تغییرات فصلی وقوع توفان تندی در نوزه  
 شکل ۹ تغییرات سالانه وقوع توفان تندی در نوزه

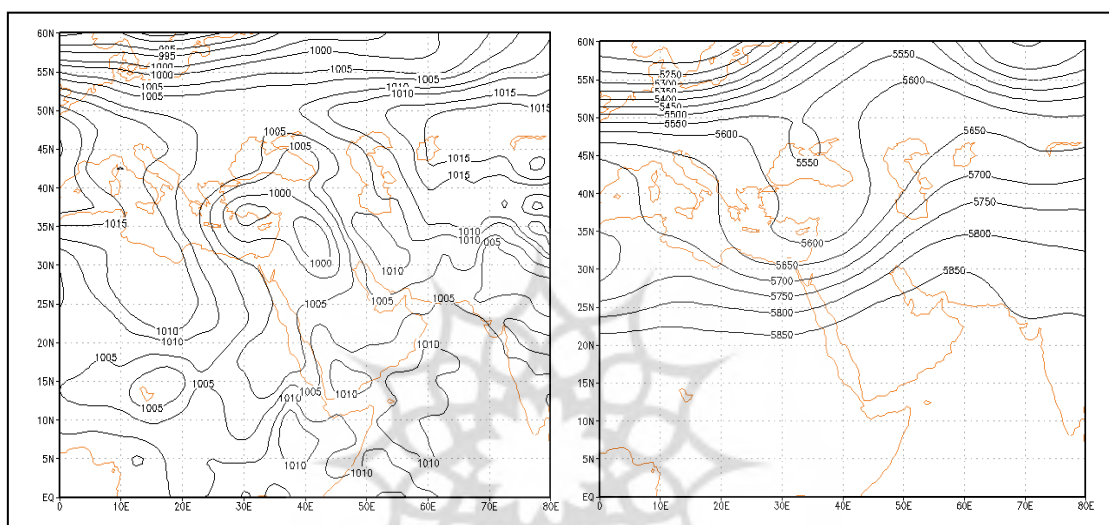
### بررسی الگوهای گردشی توفان و بارش‌های رگباری

به‌منظور شناسایی الگوهای ایجادکننده توفان‌های رگباری و شناسایی روزهای شاخص، یک تحلیل خوشه‌ای بر روی ۲۷۰ روز همراه با توفان تندی در منطقه صورت گرفت و این روزها در شش خوشه تقسیم‌بندی گردید. سپس از روزهای موجود در هر خوشه یک روز که دارای ناپایداری شدیدتری بود، به‌عنوان روز نماینده انتخاب گردید و الگوی هم‌دید آن روز به‌عنوان نمونه مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی نقشه‌های سطح زمین و تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال الگوهای درازمدت نشان می‌دهد که در طی وقوع توفان‌های رگباری چندین سامانه متوالی از سمت شمال غرب و از روی کشور عراق وارد ایران شده و باعث ایجاد توفان و بارش رگباری در این ناحیه شده است. در سطح زمین هم از سمت جنوب غرب ایران و از طریق شبه‌جزیره عربستان کم‌فشار سودانی وارد ایران شده و عامل ایجاد توفان و بارش رگباری شده است. برای رسم نقشه‌های ایزو باری و پربندی سطح زمین و تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، داده‌های خام سطح زمین و تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال از سایت مرکز پیش‌بینی محیطی آمریکا اخذ گردید و سپس توسط نرم‌افزار گرس نقشه روزهای مربوطه ترسیم شد؛ که در زیر به تفسیر این توفان‌ها پرداخته می‌شود.

#### ۲. خوشه ۱ رخداد توفان در روز نهم می سال ۱۹۹۲

در این روز توفان به همراه بارش رگباری در ایستگاه فرودگاه (ساعات ۱۲، ۱۸، ۱۵) و در ایستگاه نوزه در (ساعات ۲۱، ۱۸، ۱۲، ۰۰) گزارش شده است. بارش رگباری در ایستگاه فرودگاه به میزان ۱۲ میلی‌متر و در ایستگاه نوزه به میزان ۲۱ میلی‌متر گزارش شده است. با توجه به شکل‌های (۱۰ و ۱۱) در این روز مرکز سلول بسته کم‌فشار با ایزوبار ۱۰۰۰ هکتوپاسکال بر روی کشور عراق قرار گرفته است، استقرار این سامانه با تراف لایه فوقانی جو هماهنگی لازم را جهت نزولات جوی فراهم نموده است، در نقشه موجود چند مرکز کم‌فشار نمایان است که یکی از این مراکز در روی ایران با منحنی ایزوبار ۱۰۱۰ هکتوپاسکال واقع شده است. در روی

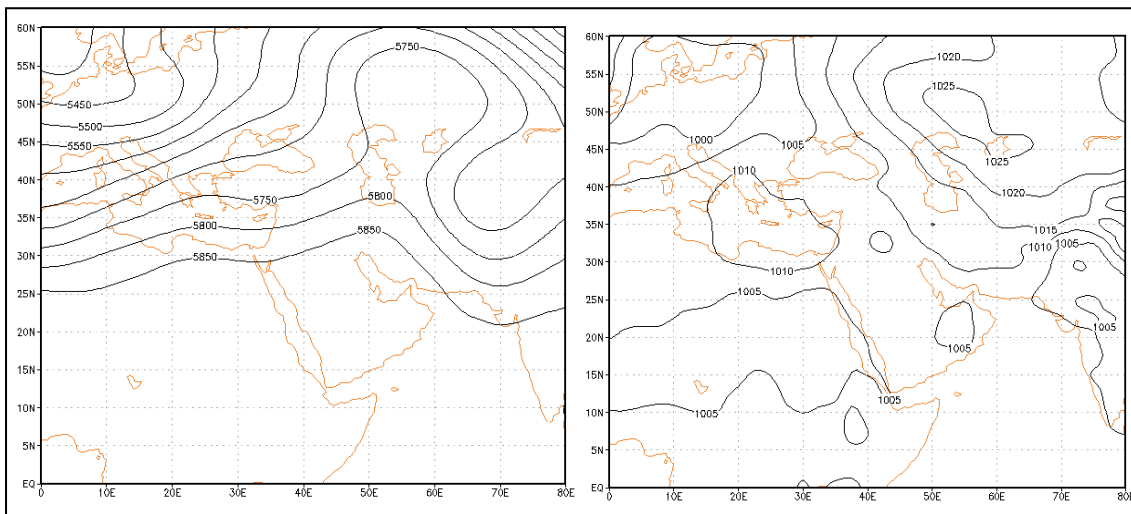
نقشه ۵۰۰ هکتوپاسکالی تراز یک مرکز کم ارتفاع با ارتفاع ۵۵۵۰ ژئوپتانسیل متر در روی شمال دریای سیاه واقع است که خط تراف آن تا عرض‌های پایین و نیمه غربی کشور کشیده شده است، از طرفی مرکز ناپایدار دیگری که عمده آن روی شمال عربستان و بخش‌هایی از جنوب غربی عراق را فراگرفته است، با توجه به اینکه سامانه‌های بارشی در نیمکره شمالی همراه با حرکت وضعی زمین از غرب به شرق حرکت می‌کنند و با توجه به نقشه کم‌فشار سطح زمین در این روز نوار غربی کشور و ایستگاه‌های هواشناسی فرودگاه و نوژه را تحت تأثیر قرار داده است.



شکل ۱۰ الگوی سطح زمین در ۹ می ۱۹۹۲ شکل ۱۱ الگوی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال در ۹ می ۱۹۹۲

#### b. خوشه ۲ رخداد توفان در روز چهارم می سال ۱۹۹۶

در این روز توفان به همراه بارش رگباری در ساعات ۱۸ و ۲۱ در ایستگاه فرودگاه و در ساعات ۱۵، ۱۸، ۲۱ در ایستگاه نوژه گزارش شده است. مقدار بارش رگباری در ایستگاه فرودگاه به میزان ۳ میلی‌متر و در ایستگاه نوژه به میزان ۱۴ میلی‌متر ثبت شده است. با توجه به شکل‌های (۱۲ و ۱۳)، همان‌طوری که در نقشه سطح زمین دیده می‌شود یک سامانه پرفشار بر روی دریاچه آرال و جنوب روسیه مستقر شده و فشار مرکزی آن ۱۰۲۵ میلی‌بار می‌باشد و زبانه‌های آن به داخل ایران نفوذ کرده است. همچنین در نقشه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی دیده می‌شود که ناوه ای با ارتفاع ۵۷۰۰ ژئوپتانسیل متر در شرق ایران و افغانستان واقع شده است که به نظر می‌رسد در روزهای قبل در مرکز ایران واقع شده بود. به علت رطوبت موجود در منطقه ناپایداری‌های ضعیفی به صورت همرفتی و رگبارهای پراکنده همراه با توفان در منطقه رخ داده است.



شکل ۱۲ الگوی سطح زمین در ۴ می ۱۹۹۶ شکل ۱۳ الگوی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال در ۴ می ۱۹۹۶

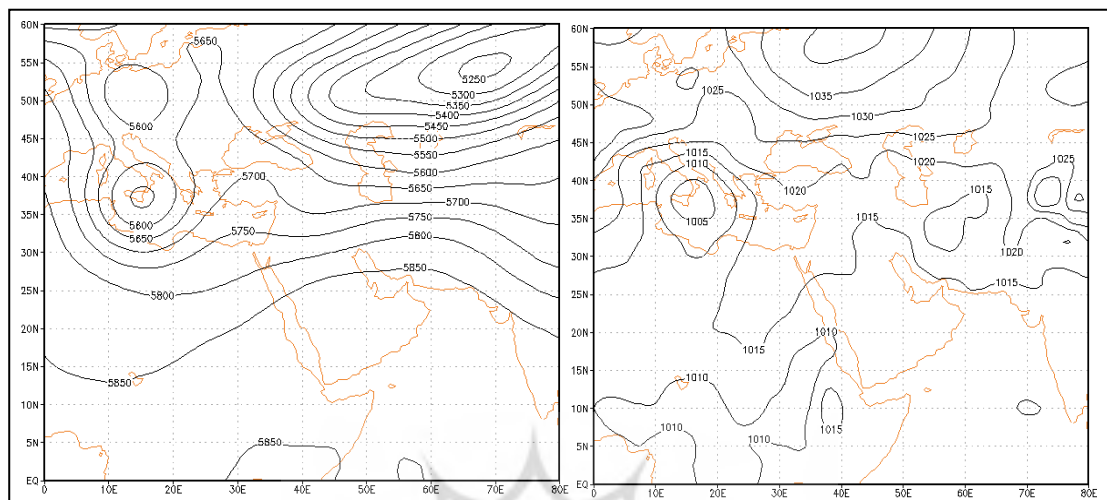
### c. خوشه ۳ رخداد توفان در روز چهارم آوریل سال ۱۹۹۷

در این روز توفان به همراه بارش رگباری در ساعات ۰۰،۰۳،۱۸ در ایستگاه فرودگاه و در ساعات ۱۵ و ۱۸ در ایستگاه نوزه گزارش شده است. مقدار بارش رگباری در ایستگاه فرودگاه به میزان ۱۴ میلی‌متر و در ایستگاه نوزه به میزان ۱۱ میلی‌متر ثبت شده است. بررسی نقشه ایزوباری سطح زمین در روز ۴ آوریل نشان‌دهنده سلول‌های بسته کم‌فشار با ایزوبارهای ۱۰۰۵ و ۱۰۱۰ هکتوپاسکال در مناطق مختلف می‌باشد (شکل ۱۴). از طرفی در نقشه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در روز ۴ آوریل سال ۱۹۹۷، یک سامانه کم‌ارتفاع با کنتور مرکزی ۵۴۰۰ ژئوپتانسیل متر در روی دریای سیاه بسته شده است. ناوه (تراف) این سامانه کم‌ارتفاع از شمال به جنوب از دریای سیاه و دریای مدیترانه عبور کرده و در غرب دریای سرخ تا عرض حدود ۲۰ درجه امتداد یافته است. نیمه غربی کشور در جلو این سامانه کم‌ارتفاع قرار گرفته و شرایط برای ناپایداری در این منطقه مهیا می‌باشد (شکل ۱۵).

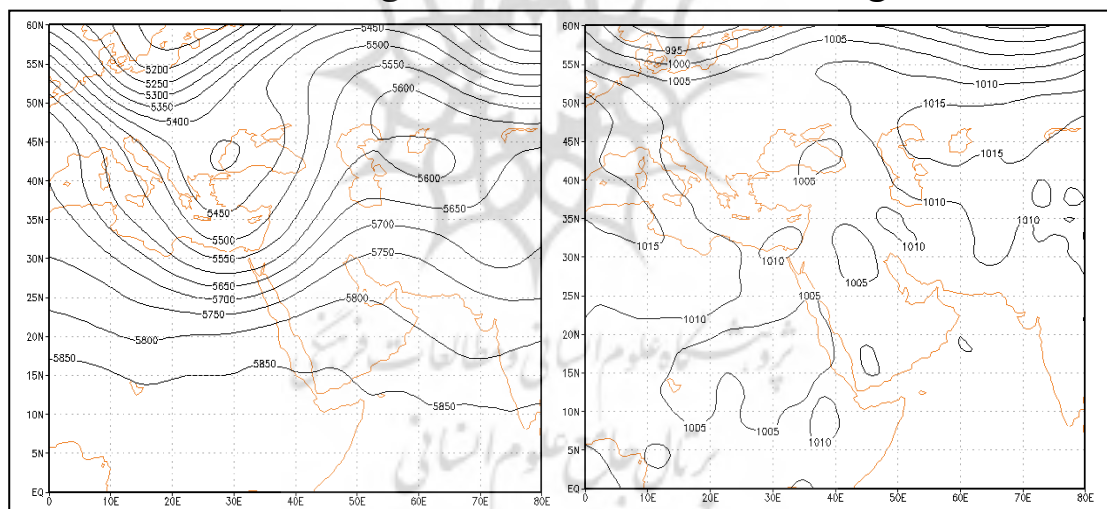
### d. خوشه ۴ رخداد توفان در روز هشتم نوامبر سال ۱۹۹۹

در این روز توفان به همراه بارش رگباری در ساعات ۰۰ و ۱۵ از ایستگاه فرودگاه و در ساعات ۱۲،۱۵،۱۸ از ایستگاه نوزه گزارش شده است. بارش رگباری در ایستگاه فرودگاه به میزان ۱۰ میلی‌متر و در ایستگاه نوزه به میزان ۳ میلی‌متر ثبت گردیده است. بررسی نقشه سطح زمین نشان می‌دهد که یک سامانه پرفشار با فشار مرکزی ۱۰۴۰ هکتوپاسکال بر روی شمال شرق دریای سیاه به سمت نواحی شمال ایران در حال گسترش است و زبانه‌های آن به داخل کشور کشیده شده است. از طرفی در شمال غرب دریای مدیترانه یک سلول بسته کم‌فشار با فشار مرکز ۱۰۰۵ هکتوپاسکال در روی نقشه نمایان است. الگوی پربندی تراز سطح میانی جو در این روز نشان‌دهنده ناوه نسبتاً عمیقی در غرب دریای مدیترانه با کنتور مرکزی ۵۵۵۰

ژئوپتانسیل مترو ناوه دیگری بر روی دریاچه آرال با کنتور مرکزی ۵۲۵۰ ژئوپتانسیل متر در حال فعالیت می‌باشد که زبانه‌های آن به داخل ایران نفوذ کرده است و از طرفی یک سامانه کم‌فشار با فشار مرکزی ۱۰۱۵ هکتوپاسکال بر روی مناطق غربی فعال می‌باشد (شکل ۱۶ و ۱۷).



شکل ۱۴ الگوی سطح زمین در ۴ آوریل ۱۹۹۷ شکل ۱۵ الگوی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال در ۴ آوریل ۱۹۹۷

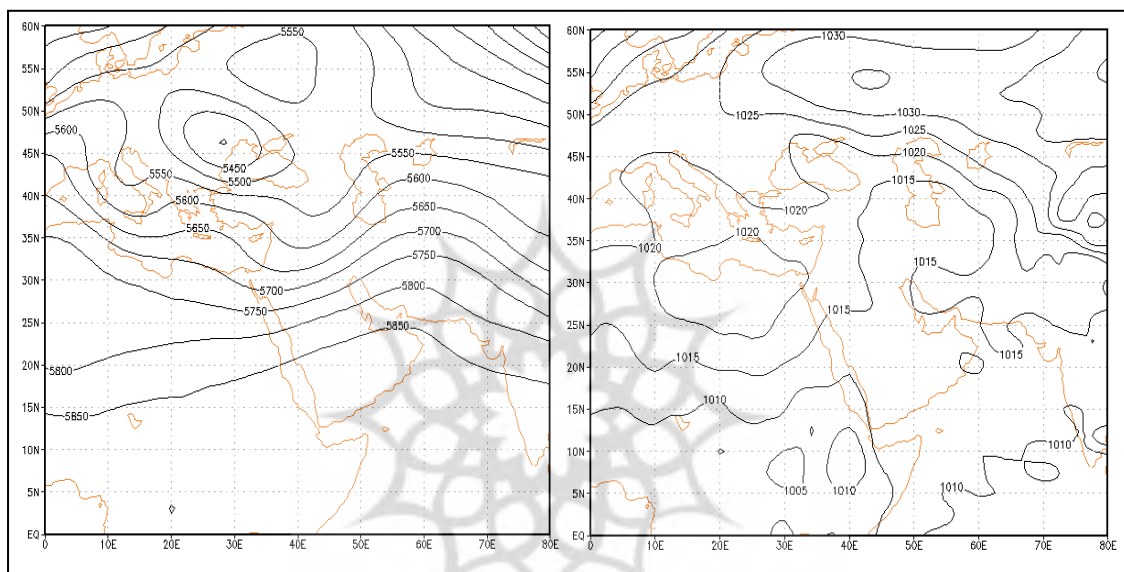


شکل ۱۶ الگوی سطح زمین در ۸ نوامبر ۱۹۹۹ شکل ۱۷ الگوی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال در ۸ نوامبر ۱۹۹۹

#### ع. خوشه ۵ رخداد توفان در روز هفتم مارس سال ۲۰۰۳

در این روز از ایستگاه فرودگاه توفان به همراه بارش برف در ساعات ۱۵ و ۱۸ و از ایستگاه نوژه توفان همراه با بارش رگباری در ساعات ۱۲ و ۱۵ گزارش شده است. مقدار بارش رخ داده در ایستگاه فرودگاه به میزان ۲۸ میلی‌متر و در ایستگاه نوژه به میزان ۱۱ میلی‌متر بوده است. نقشه ایزوباری سطح زمین در این

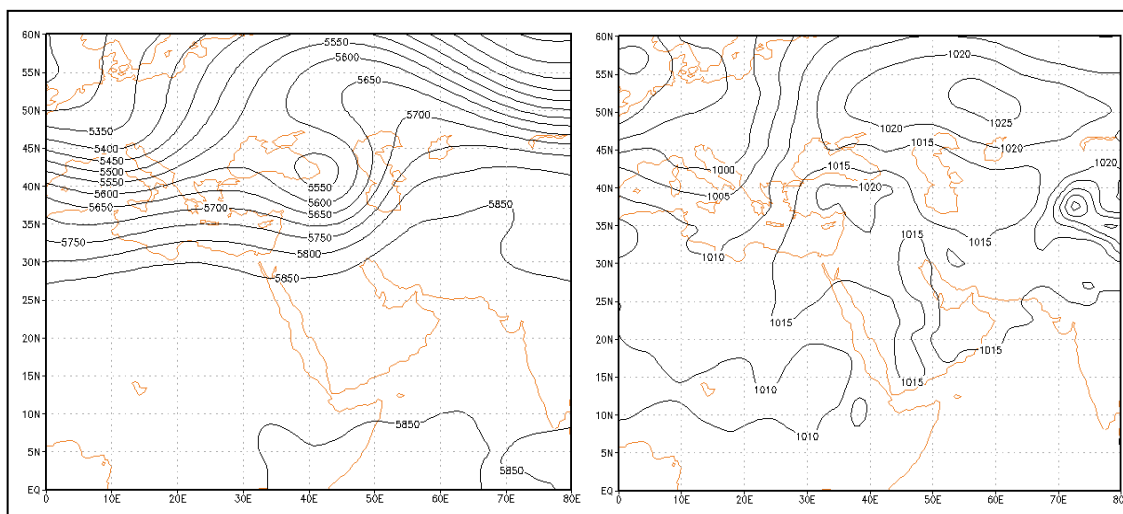
روزنشان دهنده یک سلول بسته کم‌فشار با فشار مرکزی ۱۰۱۰ هکتوپاسکال در شمال عربستان و جنوب عراق قرار می‌باشد (شکل ۱۸). همچنین در نقشه سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال در این روز، تراف (ناوه) نسبتاً عمیقی با کنتور مرکزی ۵۴۰۰ ژئوپتانسیل متر در حال فعالیت می‌باشد که محور آن از جهت شمال شرق- جنوب غرب از روی دریای مدیترانه گذشته و تا روی آفریقا امتداد یافته است. با گسترش این ناهه، شرایط ناپایداری به داخل کشور نفوذ کرده و از طرفی زبانه‌های پرفشار سرد از سمت شمال غرب به تدریج مناطق ایران را تحت تأثیر قرار داده و باعث افت دما و سرمایش هوا گردیده است (شکل ۱۹). در این روز توفان به همراه رگبار برف و افت دما به صفر درجه سانتی گراد گزارش شده است.



شکل ۱۸ الگوی سطح زمین در ۷ مارس ۲۰۰۳ شکل ۱۹ الگوی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال در ۷ مارس ۲۰۰۳

#### f. خوشه ۶ رخداد توفان در روز سی‌ام اکتبر سال ۲۰۰۳

در این روز توفان به همراه رگبار شدید در ساعات ۱۵،۰۶،۰۹،۱۲،۰۳ از ایستگاه فرودگاه و در ساعات ۰۳،۰۶،۰۹،۱۲،۱۵،۱۸ از ایستگاه نوزه گزارش گردیده است. همچنین میزان بارش رگباری در ایستگاه فرودگاه به میزان ۴۷ میلی‌متر و در ایستگاه نوزه به میزان ۳۷ میلی‌متر بوده است. نقشه ایزوباری سطح زمین در این روزنشان دهنده سلول‌های بسته کم‌فشار با فشار مرکزی ۱۰۱۰ و ۱۰۱۵ هکتوپاسکال بر روی ایران می‌باشد که شرایط ناپایداری را در داخل کشور فراهم نموده است. همچنین در نقشه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در این روز، تراف (ناوه) نسبتاً عمیقی با کنتور مرکزی ۵۵۵۰ ژئوپتانسیل متر در شرق دریای سیاه شکل گرفته است که محور آن از جهت شمال به جنوب از روی دریای سیاه و دریای مدیترانه عبور کرده و تا روی دریای سرخ تا عرض ۳۰ درجه امتداد یافته است. به علت وجود گرادیان فشاری شدید در نیمه غربی کشور، شرایط برای وقوع توفان و ناپایداری شدید در منطقه فراهم گردیده است (شکل‌های ۲۰ و ۲۱).



شکل ۲۰ الگوی سطح زمین در ۳ اکتبر ۲۰۰۳      شکل ۲۱ الگوی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال در ۳ اکتبر ۲۰۰۳

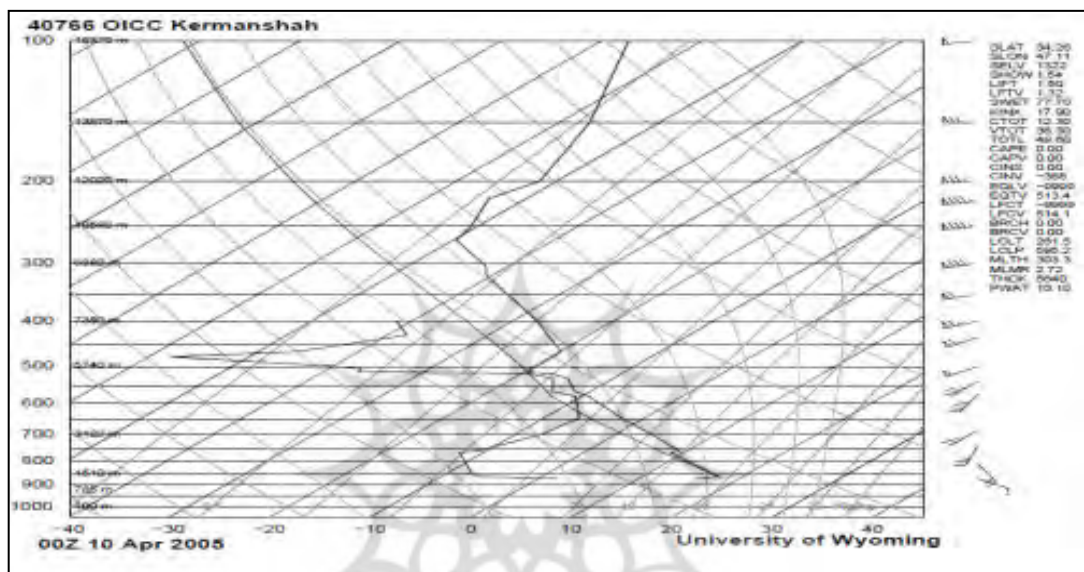
### ۸ بررسی شاخص‌های ناپایداری و داده‌های ترمودینامیک

برای مطالعه خصوصیات ترمودینامیکی هوایی که منطقه را مورد تهاجم قرار می‌دهد و بررسی ویژگی‌های دینامیکی از نظر امکان تقویت و تضعیف سیستم‌های فشاری و جبهه‌ها در ناحیه، به سبب نبودن داده‌های جو بالای ایستگاه همدید همدان، از داده‌های جو بالای ایستگاه کرمانشاه استفاده گردید. به منظور بررسی شاخص‌های ناپایداری در ایستگاه مورد مطالعه، نقشه‌های اسکویوتی روزهای مورد نظر آورده شده است (شکل‌های ۲۲ و ۲۳). همچنین داده‌های جو بالا مربوط به ایستگاه کرمانشاه در روزهای فوق از فرم‌های مربوط به دست آمده و در سطح استاندارد سطوح برجسته PTH (فشار، دما، رطوبت) استخراج شده است. در مرحله بعدی نقاط CCL، LCL، فشار و ارتفاع این نقاط تعیین شده است. با توجه به جداول و نقشه‌ها می‌توان دریافت که چون شاخص صعود بین ۰ تا ۲ قرار داشته و شاخص K بین ۱۷ تا ۳۴، بنابراین برای مقادیر مثبت شاخص صعود حتی با مقادیر کوچک شاخص K (حدود ۲۰) و برای K‌های بیشتر از ۳۰ با مقادیر نزدیک به صفر شاخص صعود، احتمال وقوع توفان شدید وجود دارد. شاخص sweat بیشتر برای وقوع توفان و تورنادو در هنگام حرکت‌های همرفتی شدید به کار می‌رود. طبق جدول (۵) مقدار این شاخص بین ۷۵ تا ۱۶۰ بوده است و با مقایسه تقسیم‌بندی جدول (۴)، در گروه توفان‌های ضعیف جای می‌گیرد. اگر ناپایداری شدید نباشد، یعنی در واقع K حدود ۲۰ و مقدار شاخص صعود نیز بزرگ باشد (بیشتر از ۳)، آنگاه نقشه‌های اسکویوتی ساعت ۰۰ بارشی را که ممکن است بعد از ساعت ۱۸ اتفاق افتد، را نشان می‌دهد در صورتی که اگر ناپایداری شدید باشد، مقادیر K بیش از ۳۰ و مقادیر شاخص صعود زیر ۳ باشد احتمال وقوع بارش ۱۸ الی ۲۰ ساعت بعد نیز وجود دارد. اگر مقدار K بین ۲۰ تا ۲۵ بوده و مقدار شاخص صعود بیش از ۳ باشد، ناپایداری موقتی بوده به احتمال زیاد تا ساعت ۱۲ توفان به همراه رگبار باران

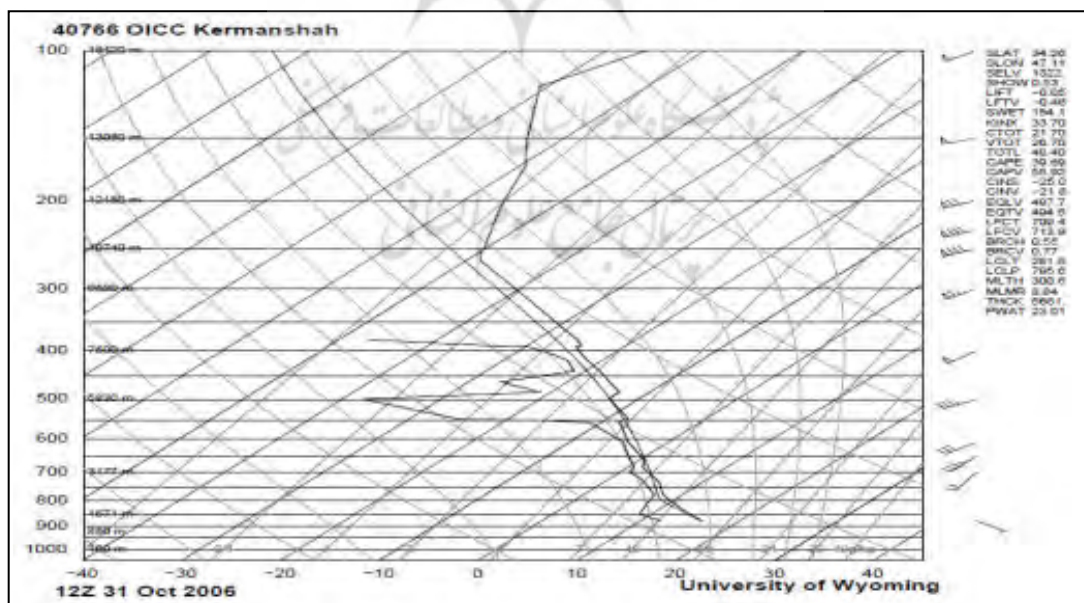
واقع شده و بعد از آن مقادیر K و شاخص صعود به سرعت تغییر می‌کنند (پایداری). اگر مقدار K بین ۲۰ تا ۲۵ بوده ولی مقدار شاخص صعود کمتر از ۳ باشد، ناپایداری عمیق تر بوده و زمان احتمال توفان را بیشتر در نظر گرفت.

جدول ۵ شاخص‌های ناپایداری در تشکیل توفان، ایستگاه هواشناسی همدان

روز	ماه	سال	شاخص k	شاخص صعود (Si)	شاخص sweat
۱۰	آوریل	۲۰۰۵	۱۷/۹	۱/۵	۷۷/۷
۳۱	اکتبر	۲۰۰۶	۳۳/۷	۰/۵	۱۵۴/۱



شکل ۲۲ نمودار اسکویوتی ایستگاه جو بالا کرمانشاه در روز ۱۰ آوریل ۲۰۰۵



شکل ۲۳ نمودار اسکویوتی ایستگاه جو بالا کرمانشاه در روز ۳۱ اکتبر ۲۰۰۶

## ۵. نتیجه‌گیری

استان همدان از جمله مناطقی است که به دلیل وقوع توفان‌های شدید، علاوه بر نابود کردن مقدار زیادی از محصولات کشاورزی، ممکن است سبب تلفات انسانی نیز بشود؛ بنابراین شناخت سازوکار تشکیل، توسعه و پیش‌بینی رخداد توفان تندی و پدیده‌های ناشی از آن مانند تگرگ، بارش سنگین و سیل‌آسا، صاعقه و باد شدید، می‌تواند کمک فراوانی را در جهت کاهش خسارات این توفان‌ها فراهم کند. لذا در این پژوهش به تحلیل هم‌پدیدی و ترمودینامیکی توفان‌های تندی در استان همدان پرداخته شد. تحلیل و خروجی نقشه‌ها و الگوهای جوی نشان می‌دهند که از مهم‌ترین شاخص‌های بزرگ‌مقیاس وقوع توفان می‌توان به گرادیان شدید فشار در سطح زمین، خشک بودن لایه میانی جو و ابرهای کومه‌ای باران‌زا که کم‌وبیش مشابه دیگر ناپایداری‌های جوی است، اشاره کرد. لذا الگوهای بزرگ‌مقیاس کمک مؤثری در شناسایی دقیق این پدیده ندارد و فقط می‌توان به صورت کیفی وقوع این‌گونه پدیده‌های جوی را پیش‌بینی کند. از طرفی شاخص‌های ناپایداری مانند  $S_{w}$ ,  $S_{i}$ ,  $K_i$  و آستانه‌های عددی این شاخص‌ها راهنمای مناسبی برای پیش‌بینی وقوع توفان در منطقه است. رخداد این توفان‌ها در استان از روند خاصی پیروی می‌کند، بیشینه رخداد توفان در ایستگاه نوژه ۵۳۴ بار و ایستگاه فرودگاه با ۳۱۲ (در طی ۱۵ سال) شاهد کمترین رخداد توفان بوده است. اکثر این توفان‌ها ماهیت جبهه‌ای و هم‌پدیدی داشته و به دلیل نفوذ سامانه‌های باران‌زا به منطقه می‌باشد، زیرا در ایستگاه فرودگاه تعداد رخداد توفان ۸۱ درصد و در ایستگاه نوژه ۷۱ درصد به صورت هم‌پدیدی و جبهه‌ای بوده و بقیه وقوع توفان‌ها، ایستگاه فرودگاه ۱۹ درصد و ایستگاه نوژه ۲۹ درصد ماهیت ترمودینامیکی و محلی بوده است. بیش‌ترین وقوع توفان‌ها در هر دو ایستگاه در فصل بهار و ماه آوریل و در بعدازظهر و اوایل شب اتفاق افتاده است، رخداد این پدیده در مواقعی که کم‌فشار جنوبی بر روی منطقه فعال بوده و حاوی جریانات گرم و مرطوب جنوبی بوده، خود را به عرض‌های بالا می‌کشد که این شرایط در فصل بهار مشاهده می‌شود و توأمأ در نواحی غرب، شمال غرب کشور مراکز پرفشار سرد فعال بوده و به طرف عرض‌های پایین حرکت می‌کند که از برخورد این دوهوای متفاوت، جبهه‌های جوی مؤثری بر روی مناطق شمال، غرب و جنوب غرب کشور تشکیل گردیده و تولید ابرهای کومولوس و کومولونیمبوس می‌کند؛ که اکثراً همراه با بارش‌های سیل‌آسا بر روی مناطق مذکور مشاهده شده است. در زمان وقوع این توفان‌ها در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی نیز یک ناوه ناپایدار عمیق بر روی دریای سیاه تشکیل می‌گردد.

## کتابنامه

- اداره کل هواشناسی استان همدان. مرکز تحقیقات و آمار  
 تاج‌بخش، سحر. غفاریان، پروین؛ میرزایی، ابراهیم؛ ۱۳۸۸. روشی برای پیش‌بینی رخداد توفان‌های تندی با طرح دو  
 بررسی موردی. مجله فیزیک زمین و فضا. دوره ۳۵. شماره ۴. صص ۱۶۶-۱۴۷.



- حجازی زاده، زهرا؛ ۱۳۷۹. بررسی عوامل سینوپتیکی بارش و طوفان‌های توأم با رعد و برق در غرب کشور. مجله دانشکده ادبیات و علوم انسانی دانشگاه تربیت معلم. شماره ۸. صص ۲۶-۵.
- خوشحال دستجردی، جواد؛ قویدل رحیمی، یوسف؛ ۱۳۸۶. شناسایی ویژگی‌های سوانح محیطی منطقه شمال غرب ایران (نمونه مطالعاتی: خطر توفان‌های تندری در تبریز). فصلنامه مدرس علوم انسانی. شماره ۵۳. صص ۱۰۱-۱۱۵.
- زاهدی، مجید؛ چویدار، اصغر؛ ۱۳۸۶. مقایسه شاخص‌های ناپایداری جوی حوضه آبریز آجی چای با استانداردهای ناپایداری جوی و تعیین الگو برای حوضه. جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای. شماره ۹. صص ۴۴-۲۳.
- ساری صراف، بهروز؛ رسولی، علی‌اکبر؛ کیانی، طاهره؛ ۱۳۸۸. تحلیل هم‌دید بارش‌های رگباری در حوضه جنوبی رود ارس. فضای جغرافیایی. شماره ۲۴. صص ۱۴۶-۱۲۳.
- صادقی حسینی، علیرضا؛ رضائیان، مهتاب؛ ۱۳۸۵. بررسی تعدادی از شاخص‌های ناپایداری و پتانسیل بارورسازی ابرهای همرفتی منطقه اصفهان. مجله فیزیک زمین و فضا. شماره ۳۲. صص ۸۳-۹۸.
- قائم‌ی، هوشنگ؛ عدل، محمود؛ ۱۳۷۱. ناپایداری و طوفان‌های رعد و برق. سازمان هواشناسی کشور.
- Abramov. A., 1972. "Practical work in synoptic meteorology", House Leningrad Pub.
- Changnon, S, A. 2003. "Measures of economic impacts of weather extremes", *Bull. Amer. Meteor. Soc*, 84(12): 1231-1235.
- Gheiby, A; N, Sen, D, Puranik; R, Karekar., 2005. "Thunderstorm identification from AMSU-B data using an artificial neural network", *Meteorological Applications*, 10:329-336.
- Geshunove, A; L, Westerling, T, Brown., 2003. "Climate and wildfire in the Western United States", *Bull. Amer. Meteor. Soc*, 84(5): 595-604.
- Henderson, A., 2006. Thundestorms, <http://www.caem.wmo.int/moodle/login/index.php>.
- Miller, R.C. 1972. *Notes on Analysis and Severe Storm Forecasting Procedures of the Air Force Global Weather Central. Tech. Rept. 200(R)*. Headquarters. Air Weather Service. USAF. 190 pp.
- Osborn, H. B. and W. Reynolds., 1963. Convective Storm Patterns in the outwestern U.S. *Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol*, 8(3):71-83.
- Pissimanis, K, Notaridou A, Spyrou C., 2006. On the main characteristics of synoptic weather conditions associated with thunderstorm activity during the months of July and August in the city of Thessaloniki (Northern Greece); *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 83.
- Senesi, Stephan et al., 1996. The vaison-La-Romaine Flash-Flood. American Meteorological Society.
- Waguespack, M., 2006. Reconciling garbage cans and rational actors: explaining organizational decisions about environmental hazard management; *Social Science Research*, vol. 35.
- Whitman, C, D., 2003. "Mountain meteorology", Oxford University Press. <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
- [www.cdc.noaa.gov](http://www.cdc.noaa.gov)
- [www.physics.isfahanmetportal.ir](http://www.physics.isfahanmetportal.ir)