



باسمه تعالی

مدین وسیله کوہمی می شود مقاله خانم ہائیدہ محمود موسوی، دکتر آذر زین، آقای دکتر عباس مفیدی و خانم سیدہ فاطمہ حسینی با عنوان بررسی ارتباط بین فراوانی

و وقوع توفان ہائی تندی و روند ہا در شہر مشهد در کنفرانس بین المللی برنامه ریزی و مدیریت شہر مشهد ۲۰۱۷ کہ در تاریخ ۵ و ۶ اردیبهشت ماہ ۱۳۹۶ در

دانشگاہ فردوسی مشہد برگزار کردید، بہ صورت سخنرانی ارائه شد و برای چاپ در کتابچہ چکیدہ مقالات و دوج دولج ضرورہ مجموعہ مقالات مورد پذیرش کتبہ علمی

کنفرانس قرار گرفت.

دکتر یادی اعظمی

رئیس مرکز پژوهش ہائی شورای اسلامی شہر مشهد و

دیر کنفرانس

دکتر امید علی خوارزمی

دیر علمی کنفرانس

امید علی خوارزمی

## بررسی ارتباط بین فراوانی وقوع توفان‌های تندری و روند دما در شهر مشهد

سیده محبوبه موسوی<sup>۱</sup>، آذر زرین<sup>۲</sup>، عباس مفیدی<sup>۳</sup>، سیده فاطمه حسینی<sup>۴</sup>

گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد

m.moosavi@stu.um.ac.ir

### چکیده

هدف پژوهش حاضر بررسی رابطه فراوانی وقوع توفان‌های تندری در شهر مشهد و روند میانگین دما می‌باشد. برای این منظور از داده‌های میانگین ماهانه و سالانه فراوانی وقوع توفان‌های تندری و میانگین ماهانه و سالانه دما در طی شصت سال (۲۰۱۰-۱۹۵۱ میلادی) استفاده شد. با بهره‌گیری از داده‌های مذکور مشخص شد که حداکثر فراوانی رخداد توفان تندری در شهر مشهد در ماه می (فصل بهار) اتفاق افتاده است و حداکثر میانگین ماهانه دما در دوره مورد بررسی، متعلق به ماه جولای است. نتایج بررسی و تحلیل داده‌ها و نمودارها نشان داد که میانگین سالانه دما با وجود تغییرپذیری نسبی، افزایش محسوسی داشته است. همچنین میانگین سالانه فراوانی رخداد توفان‌های تندری در شهر مشهد نیز با وجود افت و خیزهای زیاد، به‌طور کلی روند افزایشی دارد. در نهایت مشخص شد بین میانگین سالانه دما و فراوانی رخداد توفان‌های تندری در منطقه مورد مطالعه، همبستگی و ارتباط مستقیم وجود دارد؛ بدین معنی که با افزایش میانگین دما، تعداد وقوع توفان‌های تندری نیز افزایش یافته است. همچنین نتیجه شبیه‌سازی یک مورد توفان تندری بر روی منطقه توسط مدل WRF نشان داد که این مدل توانایی قابل قبولی در پیش‌بینی و نمایش توفان‌های مذکور دارد و می‌توان از این مدل برای پیش‌بینی توفان‌های تندری در آینده استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: توفان تندری، روند دما، مشهد، مدل WRF

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۲</sup> استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۳</sup> استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۴</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب، گروه علوم و مهندسی آب، مهندسی منابع آب، دانشگاه فردوسی مشهد



# Investigating Relationship between Frequency of Thunderstorms and Temperature Trends in Mashhad

Seyyede Mahboobeh Moosavi<sup>1,\*</sup>, Azar Zarrin<sup>2</sup>, Abbas Mofidi<sup>3</sup>, Seyyede Fatemeh Hosseini<sup>4</sup>,  
Geography Department, Ferdowsi University of Mashhad  
m.moosavi@stu.um.ac.ir

## Abstract

This study examines the relationship between the frequency of thunderstorms and the mean temperature in the city of Mashhad. For this purpose, the average of monthly and annual temperatures data and the average of monthly and annual frequency of thunderstorms for a sixty-year period (1951-2010) were used. The results reveal that in the study period, the maximum frequency of occurrence of thunderstorms in the city of Mashhad occurs in May (Spring) and the maximum average monthly temperature is seen in July. It also showed that despite the relative fluctuation, the mean annual temperature reveals an increasing trend. Generally, despite large fluctuations, the mean annual frequency of thunderstorm events shows an increasing trend in Mashhad. Finally, it is found that there is a direct correlation between the mean annual temperature and the frequency of thunderstorm events in the study area. That is, by increasing temperature, the number of thunderstorm events also rises. Simulating a sample thunderstorm event over the area with the Weather Research and Forecast Model (WRF) shows the capability of this model to simulate the corresponding future thunderstorm over the region.

**Keywords:** Thunderstorm, Temperature trend, Mashhad, WRF

1,\* Corresponding author: MA student of Climatology

2 Assistant professor, Climatology

3 Assistant Professor, Climatology

4 MS student of Water Engineering

## ١. مقدمه

توفان تندری از جمله پدیده‌های هواشناسی است که در اغلب نقاط دنیا مشاهده می‌شود. این رخداد طبیعی در عین دارا بودن مزایایی از جمله در پی داشتن بارش در بیشتر موارد و جذابیت بصری به دلیل همراه داشتن آذرخش، جزو شدیدترین و مخرب‌ترین بلاهای طبیعی است که همه ساله علاوه بر خسارات شدید در بخش‌های مختلف اقتصادی، باعث تلفات انسانی نیز می‌گردد. دلیل نام‌گذاری پدیده مذکور نشأت گرفته از ماهیت مخاطره‌آمیز و آسیب‌رسان آن و هم چنین تظاهرات جوئی خاصی است که همراه با آن رخ می‌دهند، که شامل: رعدوبرق (صاعقه، آذرخش)، تگرگ، رگبارهای شدید و سیل‌آسا، وزش بادهای شدید می‌باشند.

این نوع توفان‌ها زمینه‌ساز چندین سازوکار مثبت طبیعی هستند که تبادل انرژی الکتریکی بین جو و زمین و هم‌چنین به جریان انداختن چرخه طبیعی هیدرولوژی از آن جمله می‌باشند. با این حال به دلیل ساختار و ماهیت خاص رخداد مورد اشاره، همواره جنبه‌های منفی و خطرناک آن به‌عنوان اولین ویژگی به ذهن متبادر می‌گردد. مطابق تعریف سازمان هواشناسی جهانی (WMO) روز همراه با تندر، روزی است که حداقل یک‌بار صدای رعد شنیده‌شده و درخشش برق مشاهده شود. بارش تندری نیز بارشی است که هنگام وقوع پدیده تندر نازل شود (جلالی و جهانی ١٣٨٧: ٤١).

توفان‌های رعدوبرق از نظر پیدایش و توسعه در کره زمین در انواع مختلفی مشاهده می‌گردند، که از آن میان می‌توان توفان‌های رعدوبرق توده‌هوا، توفان‌های رعدوبرق جبهه‌ای و باد توفانی را نام برد (جعفری‌پور ١٣٨٦: ٩٨). توفان‌های رعدوبرق توده‌هوا (همرفتی) اغلب در هنگام بعدازظهر به علت مقدار بیشینه ناپایداری در لایه مرزی جو، ناشی از گرم شدن سطح زمین و در فصولی که میزان رطوبت سطح زمین بالا باشد (برای مثال بهار و اوایل تابستان) رخ می‌دهند (علی اکبری بیدختی و همکاران ١٣٨٣: ٩٧). توفان‌های تندری جبهه‌ای در هوای گرمی که بر روی شیب جبهه سرد سیکلون صعود می‌کند، تشکیل می‌شوند. اگر هوا در ابتدا ناپایدار باشد، ممکن است این اثر باعث شود که هوا تا ارتفاع زیادی بالا رود. توفان‌های جبهه‌ای ممکن است در هر زمان و هر فصلی اتفاق بیافتند، اما در بعدازظهرهای تابستان، که گرم شدن شدید هوا سبب ناپایداری هوای گرم در جلو جبهه سرد می‌شود، معمول‌تر است (علیزاده و همکاران ١٣٩١: ١٥٠).

پدیده توفان تندری، هر ساله موجب خسارات جانی و مالی در نقاط مختلف ایران می‌شود. از سال ١٩٩١ تا ٢٠٠٦ (به استثنای سال‌های ٢٠٠٠ و ٢٠٠٤)، ٧٩ مورد توفان تندری مخرب گزارش شده است که خسارات جانی و مالی داشته‌اند؛ به طوری که در دوره آماری پیش‌گفته، بر اثر این پدیده در سطح کشور، ٩٤

تن کشته و ۱۳ تن زخمی شدند و به ۱۳۹ خانه خسارت وارد شد. با توجه به آمار گزارش شده در طی چهارده سال، به طور متوسط در هر سال در حدود ۶ تن بر اثر این رخداد در سطح کشور جان خود را از دست داده اند (خزایی ۱۳۹۳: ۲۰۸).

در ایران، روزهای تندری (همراه با توفان تندری و آذرخش که نماینده ناپایداری های شدید است) چندان فراوان نیست و میانگین سالانه آن به ده روز هم نمی رسد؛ ولی در برخی مناطق مانند شمال غرب کشور، تندر شاخصه اقلیم بوده و این منطقه به عنوان اولین قلمرو تندری کشور ایران با میانگین ۵۰ روز و بیشتر، شناخته می شود (فرجی و همکاران ۱۳۹۴: ۴۲). در منطقه شمال شرق کشور با وجود محدود بودن نسبی رخداد، توفان های تندری یکی از مهم ترین عوامل ایجاد سیلاب های خطرناک می باشند. با توجه به اقلیم غالب نسبتاً گرم و خشک و شکل زمین شناختی خاص این مناطق، در صورت وقوع بارش های سنگین و شدید تولید شده توسط این توفان ها - که زمینه ساز وقوع سیلاب های لحظه ای (Flash Flood) می باشند - وارد آمدن خسارات فراوان به بخش های کشاورزی و مسکونی بسیار محتمل خواهد بود.

در سال های اخیر با گسترش شهرنشینی و دست اندازی انسان به نظام طبیعت، میزان آسیب پذیری جوامع انسانی از مخاطرات طبیعی افزایش یافته است. توفان های تندری یکی از مخاطرات هواشناسی محسوب می شوند که اکثر اوقات به دلیل ناگهانی بودن رخداد پدیده، آسیب های جبران ناپذیر جانی و مالی در زمینه مناطق مسکونی، ساخت و سازها، زمین ها و فرآورده های کشاورزی، مناطق جنگلی، دامپروری و حیات وحش و... وارد کرده اند (خالصی ۱۳۹۳: ۴۸). به صورت کلی به دلیل همراهی توفان تندری با رگبارهای باران و برف و تگرگ، و نقش موثر آن در ایجاد سیل های ناگهانی، هم از جنبه کشاورزی و هم از نظر خسارات جانی و مالی، این پدیده همواره مورد توجه محققان بوده است (لشگری و حجتی ۱۳۹۱: ۱۴).

به عنوان یک نمونه شاخص این رخداد در شهر مشهد، می توان از توفان تندری و رگبار بی سابقه یک دهه اخیر، مورخ ۱۷ اردیبهشت ۱۳۹۴ نام برد. این توفان گسترده، ۴۷۱ مورد آب گرفتگی در استان را رقم زد؛ ۳۲۹ منزل و ۱۴۲ خیابان شهر دچار آب گرفتگی شدند و ۵۳۹ شکستگی و سقوط درخت، ۲ مصدوم و ۱۱ نجات یافته در مشهد داشت. در مدت تقریباً یک ساعت و نیم و به استناد آمار هواشناسی خراسان رضوی، به طور متوسط حدود ۱۵/۸ میلی متر باران بارید. سرعت وزش باد در مشهد در برخی ساعات شب، به ۹۰ کیلومتر در ساعت هم رسید (منبع: تابناک). با توجه به رخداد موارد مشابه فراوان در سال های اخیر در این شهر و اثبات روند افزایشی میانگین دما در اکثر مناطق کره زمین، در مقاله پیش رو تلاش می شود به سؤالاتی از این قبیل پاسخ داده شود که روند وقوع توفان های تندری در شهر مشهد چگونه است؟ و آیا این روند با افزایش یا کاهش میانگین دما ارتباطی دارد؟

## ۲. پیشینه موضوع

تاکنون تحقیقات و پژوهش‌های متنوعی برای درک ویژگی‌ها و مکانیسم رخداد توفان‌های تندری انجام شده است. موارد زیر از آن جمله‌اند: بیل تافت (۱۹۷۴) در تحقیق خود به بررسی پتانسیل توفان تندری در ابرهای کومولونیمبوس در شمال اروپا پرداخته است. وی در این پژوهش با بررسی ابرهای مذکور در جبهه سرد با کمک آزمون‌های آماری از جمله آزمون «کای دو» نشان داد که برخی از انواع آن‌ها از توسعه و گسترش کافی برای ایجاد توفان تندری برخوردار نیستند. بلواشتاین و همکاران (۱۹۸۳) با بررسی همدیدی و مشاهده عینی توفان‌های تندری شدید اما کم بارش در دشت‌های جنوبی آمریکا که در تصاویر راداری قابل شناسایی نیستند، و بررسی دقیق ۱۱ مورد از آن‌ها نشان دادند که الزاماً این رخداد همراه با ریزش هوای سرد نخواهد بود. پرلر و مارک‌اند (۲۰۰۹) در پژوهشی با نگرشی جدید بر مدل‌های ارتقا، از یک الگوریتم انطباقی برای طبقه‌بندی خروجی فرایند شناسایی پتانسیل توفان‌های تندری استفاده کردند. هم‌چنین در پژوهشی دیگر دو و همکاران (۲۰۱۵) با در نظر گرفتن ویژگی‌های اقلیمی شهر بیجینگ چین تحت تأثیر توفان‌های تندری تابستانی، جزیره گرمایی این شهر و مشخصات آن را در طی وقوع این توفان‌ها بررسی کردند. نتایج نشان داد برای ماه‌های گرم سال، میانگین دمای شبانه جزیره گرمایی این شهر مقادیر بیشتری نسبت به میانگین دمای روزانه دارد و بر اساس محاسبات، پارامترهایی مانند نم ویژه در این منطقه مقادیر کمتری نسبت به نواحی اطراف شهر را نشان می‌دهند. در ادامه بیان شد همانند تأثیر پذیری بادهای ورودی به شهر و تغییر جهت و چند شاخه شدن جهت وزش آن‌ها به دلیل نقش بناهای مرتفع شهری، مسیر حرکت توفان‌های تندری تابستانه نیز تحت تأثیر این عامل قرار می‌گیرد.

در اولین مطالعه انجام شده بر روی توفان‌های تندری در ایران، علیجانی (۱۳۷۴) بیان کرده است که حداکثر فراوانی توفان‌های رعدوبرق در شمال غربی ایران اتفاق می‌افتد. ایشان محل بیشینه روزهای توأم با این توفان‌ها را منطقه کوهستانی غرب کشور می‌داند. در ادامه چنین بیان کرده است که از نظر توزیع زمانی بیشترین فراوانی توفان‌های رعدوبرق در ماه اردیبهشت و از نظر توزیع مکانی، بیشترین فراوانی در ارتفاعات آذربایجان، کردستان و خراسان رخ می‌دهد، سپس تعداد آن‌ها به طرف جنوب کاسته شده و به حداقل خود در سواحل جنوبی و دشت لوت می‌رسد. جلالی و همکاران (۱۳۸۴) در پژوهشی به بررسی تغییرات بلند مدت فراوانی و میزان بارش‌های توفان‌های تندری در شهر اهر در استان آذربایجان شرقی پرداخته‌اند. ایشان با تحلیل بارش‌های دوره آماری ۱۳۶۵ تا ۱۳۸۰ به وسیله روش‌های آماری از جمله روش ریاضی-گرافیکی NRM که میزان تغییرات معنی‌دار در روند بارش سالانه را نشان می‌دهد، به این نتیجه رسیدند که اغلب بارش‌های ذکر شده در فصول بهار و تابستان و در ساعات عصر و اوایل شب اتفاق

می‌افتند. همچنین ایشان دریافتند که بارش‌های سیل‌آسا در یک زمان خاص می‌تواند حاصل همکاری چند سامانه تندری باشد. با بررسی نتایج تحلیل‌های آماری ثابت شد که الگوهای جوی سینوپتیک و شرایط توپوگرافی منطقه هر دو می‌توانند بر چگونگی بارش‌های ناشی از توفان‌های تندری تأثیرگذار باشند.

در پژوهش دیگری خوشحال دستجردی و قویدل رحیمی (۱۳۸۶) با استفاده از آمار فراوانی وقوع توفان‌های تندری در تبریز به بررسی ویژگی‌های این پدیده پرداخته‌اند. در این پژوهش با به کارگرفتن روش‌های تحلیل آماری از جمله تحلیل روند خطی و تحلیل خوشه‌ای فراوانی و نیز با استفاده از مدل گرافیک جریان، وقوع توفان‌ها در طی سال طبقه‌بندی شده‌اند. بر همین اساس چنین نتیجه گرفته شد که ماه می و فصل بهار به ترتیب دارای بیشترین فراوانی وقوع ماهانه و فصلی هستند. در ادامه، ثنایی نژاد و همکاران (۱۳۸۹) به منظور بهبود پیش‌بینی پدیده‌های همرفتی محلی، به تحلیل سینوپتیکی-دینامیکی توفان و تگرگ روز ۶ مرداد ۱۳۸۸ در شهر مشهد پرداخته‌اند. ایشان با استفاده از داده‌های جوی بالا که توسط رادیوسوند برداشت شده‌اند، نمودار ترمودینامیکی Skew-T (اسکیوتی) را برای دو روز ۲۸ و ۲۹ جولای (ششم و هفتم مرداد ماه) رسم و شاخص‌های ناپایداری را محاسبه نمودند. سپس با بررسی نقشه‌های سینوپتیکی ترازهای سطح زمین و ۵۰۰ هکتوپاسکال و پارامترهایی مانند فشار، رطوبت و دما نشان دادند که با استقرار یک مرکز کم فشار بر روی مرکز کشور و یک پرفشار بر فراز دریای خزر، و در نتیجه ایجاد گرادیان فشاری شدید در این نواحی، شرایط برای ایجاد ناپایداری فراهم شده است.

هاشمی دوین و الهی گل (۱۳۹۱) با تحلیل و بررسی سه توفان تندری سال ۲۰۱۱ در شهر بجنورد با استفاده از داده‌های سودار، نشان دادند که در هنگام وقوع این توفان‌ها، پارامترهای جوی دچار تغییرات کاملاً واضحی می‌گردند، از جمله: کاهش ۳ تا ۱۳ درجه‌ای دما، تغییر ۶۰ تا ۸۰ درجه‌ای جهت باد و ... در ادامه، خالصی (۱۳۹۳) در پژوهش خود با استفاده از داده‌های ساعتی ۴۶ ایستگاه سینوپتیک کشور در دوره آماری ۱۳۶۵ تا ۱۳۸۸ فراوانی رخداد این توفان‌ها را مورد بررسی قرار داد و چنین بیان کرد که حداکثر فراوانی رخداد پدیده در فصل بهار و در مقیاس ساعتی در ساعات بعد از ظهر اتفاق می‌افتد. در بررسی دیگری در سال ۱۳۹۴ که توسط قویدل رحیمی و همکاران انجام شد، روند تغییرات زمانی مخاطره توفان‌های تندری در کشور ایران مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در این پژوهش با استفاده از داده‌های آماری سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۰ و همچنین با بهره‌گیری از روش‌های آماری، روند تغییرات بررسی و سه ناحیه اقلیمی شناسایی شد. در این پژوهش مشخص شد بیشترین فراوانی وقوع در ماه‌های می، آوریل، ژوئن و اکتبر، یعنی در فصول بهار و پاییز، و کمترین فراوانی در فصل تابستان قرار دارد. همچنین در نهایت

مشخص شد روند تغییرات کلی در تمام بازه‌های مورد بررسی به صورت محسوسی به شکل افزایشی است.

با توجه به پژوهش‌های انجام شده می‌توان گفت تاکنون مطالعه شاخصی در مورد ارتباط فراوانی رخداد توفان تندی و روند دما به خصوص برای شهر مشهد صورت نگرفته است. نظر به این که یکی از دو پارامتر اساسی مؤلف این پدیده خسارت بار، دماهای بالا می‌باشد و با عنایت به گسترش شهرنشینی و افزایش جمعیت شهر مشهد که خود منجر به تشدید افزایش دمای جزیره گرمایی شهر می‌گردد، ضرورت انجام این تحقیق اثبات می‌شود.

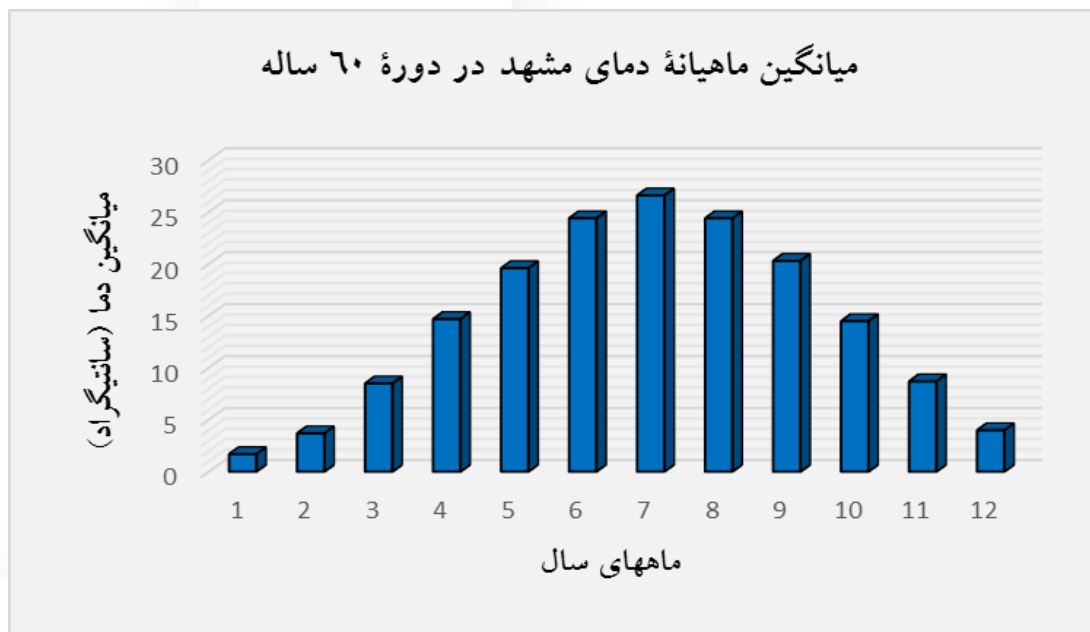
### ٣. داده‌ها و روش کار

برای بررسی موضوع پژوهش حاضر، با استفاده از روش‌های توصیفی و آماری به تجزیه و تحلیل داده‌ها پرداخته شده است. برای این منظور، داده‌های فراوانی روزهای همراه با توفان تندی و همچنین میانگین ماهیانه دما در شهر مشهد برای دوره آماری ٦٠ ساله ١٩٥١ تا ٢٠١٠ میلادی، از سایت سازمان هواشناسی کشور اخذ شد. سپس نتایج به دست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همچنین با بهره‌گیری از مدل WRF (Weather Research and Forecasting Model) که یک مدل مقیاس منطقه‌ای پیش‌بینی عددی جو است، شبیه‌سازی و نمایش رخداد یک توفان تندی منتخب انجام گرفت. این مدل می‌تواند برای شبیه‌سازی در مقیاس مکانی چند صد متر تا چند کیلومتر و مقیاس زمانی چند ساعت تا چند روز به کار رود. مدل فوق کاربردهای متعددی دارد؛ از جمله: پیش‌بینی اوضاع جوی، توفان‌های تندی، آلودگی هوا و بررسی مسائل هیدرولوژیکی. داده‌های مورد نیاز برای اجرای این مدل شامل داده‌های شرایط مرزی اولیه و داده‌های شرایط مرزی ثانویه می‌باشند. شرایط مرزی اولیه، نمایشگر متغیرهای سطح زمین است و شرایط مرزی ثانویه شامل داده‌های هواشناسی با گام زمانی ٦ ساعته می‌باشد که این داده‌ها در آدرس اینترنتی <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/free-data.html> در دسترس می‌باشند. در انتها به منظور نمایش خروجی اجرای مدل WRF، از نرم افزار تحت لینوکس NCL بهره‌گیری شد.



#### ٤. یافته‌ها و نتایج

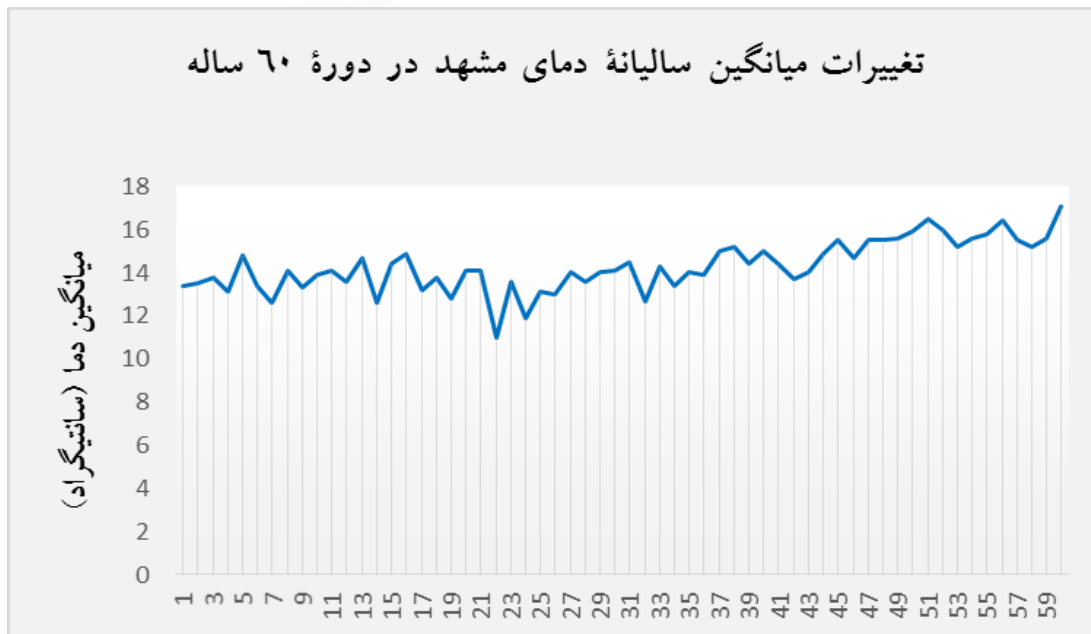
ابتدا با استفاده از داده‌ها، نمودار میانگین ماهیانه دما در دوره مورد نظر رسم شد. چنان که مشاهده می‌شود حداکثر میانگین دما در طی شصت سال، در ماه جولای (که در میانه تابستان واقع است) به ثبت رسیده است. در تقویم شمسی، ماه جولای مطابق با یازده تیر تا ده مرداد می‌باشد که در اغلب سال‌ها، حداکثر دماهای ثبت شده در فصل تابستان در همین بازه زمانی رخ داده‌اند (شکل ١).



شکل ١- نمودار میانگین ماهیانه دمای شهر مشهد در طی سال‌های ١٩٥١-٢٠١٠

سپس با استفاده از نمودار خطی، تغییرات میانگین سالانه دما در دوره آماری مورد بررسی رسم شده است. در این نمودار، روند افزایشی ملایمی به خصوص در دو دهه اخیر قابل مشاهده است و میانگین سالانه دما از ١٣/٤ درجه سانتیگراد در سال ١٩٦١ به ١٧/١ درجه سانتیگراد در سال ٢٠١٠ میلادی رسیده است. این افزایش ٤ درجه‌ای در میانگین دما بسیار قابل تأمل هست (شکل ٢).

### تغییرات میانگین سالیانه دمای مشهد در دوره ٦٠ ساله



شکل ٢- نمودار تغییرات میانگین سالانه دمای شهر مشهد در طی سالهای ٢٠١٠-١٩٥١

در ادامه، میانگین ماهیانه فراوانی رخداد توفانهای تندری در منطقه به وسیله نمودار نشان داده شده است. همانطور که انتظار می رود بیشینه فراوانی رخداد با رقم میانگین ٤/٢ در ماه می (مطابق با ١١ اردیبهشت تا ده خرداد ماه) واقع شده است. دلیل این امر را می توان چنین بیان کرد که همراهی گرمای روزهای بهاری و وجود رطوبت کافی و در نتیجه وقوع جریانهای همرفتی محلی ناشی از این عوامل، موجب می شود فراوانی این رخداد در این ماه به اوج خود برسد (شکل ٣).

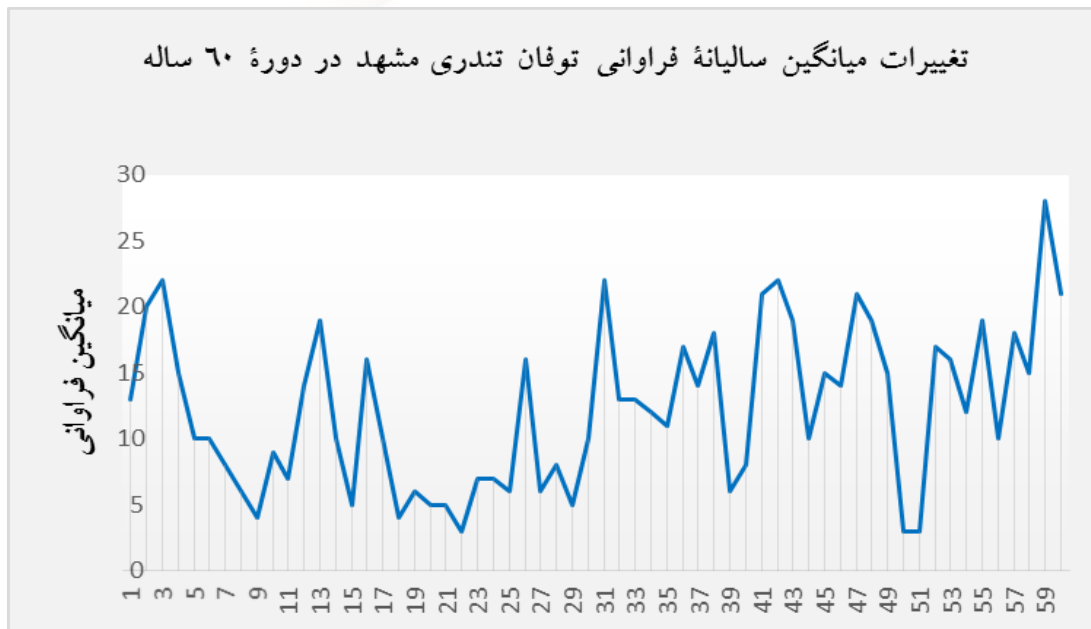


### میانگین ماهیانه فراوانی توفان تندری مشهد در دوره ۶۰ ساله



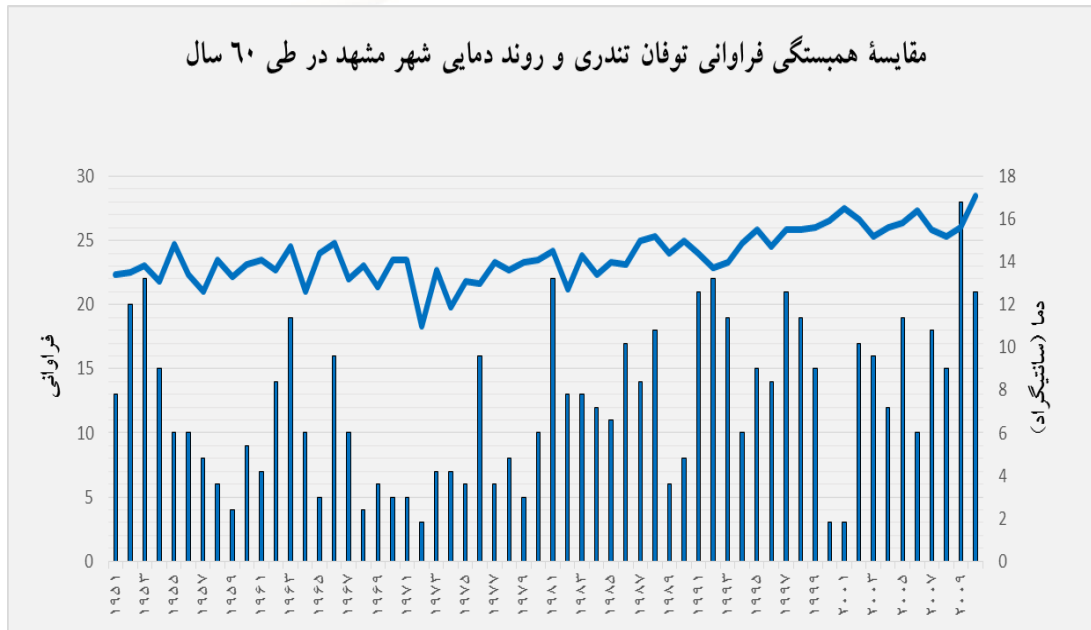
شکل ۳- نمودار میانگین ماهیانه فراوانی توفان تندری شهر مشهد در طی سال‌های ۱۹۵۱-۲۰۱۰

سپس به وسیله نمودار خطی، تغییرات میانگین سالانه فراوانی رخداد در دوره مورد بررسی رسم شد. علی‌رغم وجود افت و خیزهای فراوان در طی سال‌های متمادی، و به طور خاص پس از کاهش شدید تعداد رخداد توفان در دو سال ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ میلادی به سه مورد در سال، یک سیر افزایشی محسوس در نمودار مشاهده می‌شود. نکته جالب در این مورد، افزایش ناگهانی تعداد رخداد توفان تندری در سال ۲۰۰۹ میلادی (۱۳۸۸ شمسی) به رقم قابل توجه ۲۸ مورد در سال می‌باشد که لااقل در طی شش دهه اخیر کاملاً بی‌سابقه است (شکل ۴).



شکل ٤- نمودار تغییرات میانگین سالانه فراوانی توفان تندری شهر مشهد در طی سالهای ١٩٥١-٢٠١٠

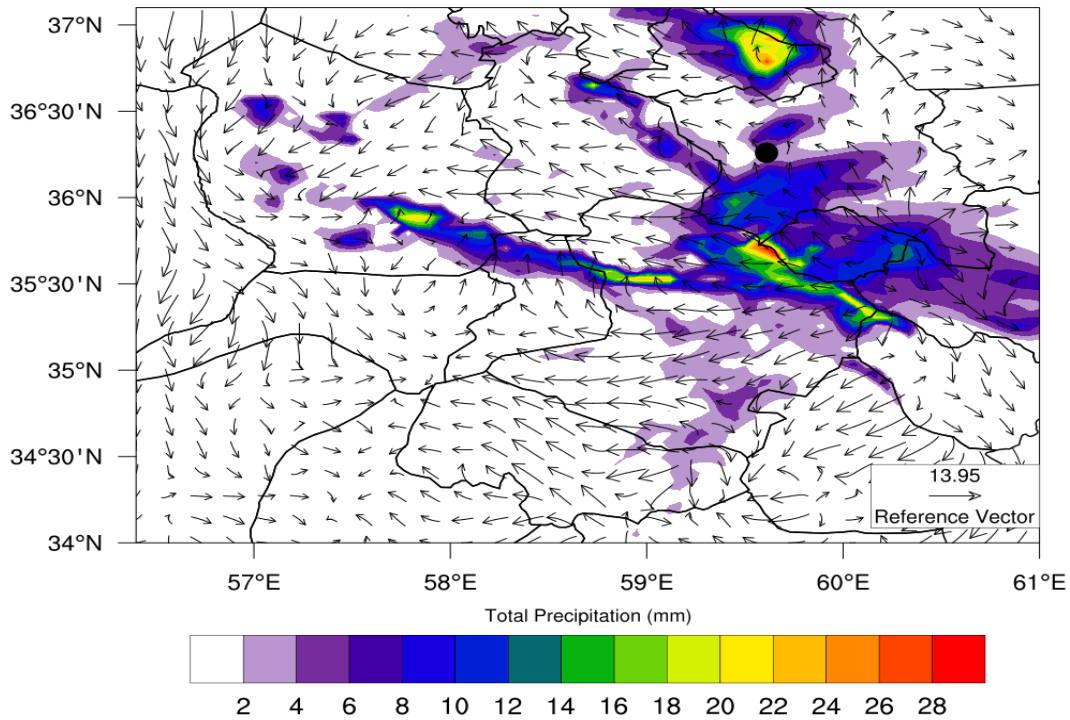
در انتها در نمودار مقایسه‌ای فراوانی رخداد توفان تندری (نمودار میله‌ای) و روند دمایی (نمودار خطی) شهر مشهد مشاهده می‌شود که روند صعودی میانگین سالانه دما در مدت شصت سال به صورت تقریبی با روند افزایشی میانگین سالانه فراوانی توفان‌های تندری هماهنگی و ارتباط مستقیم دارد (شکل ٥).



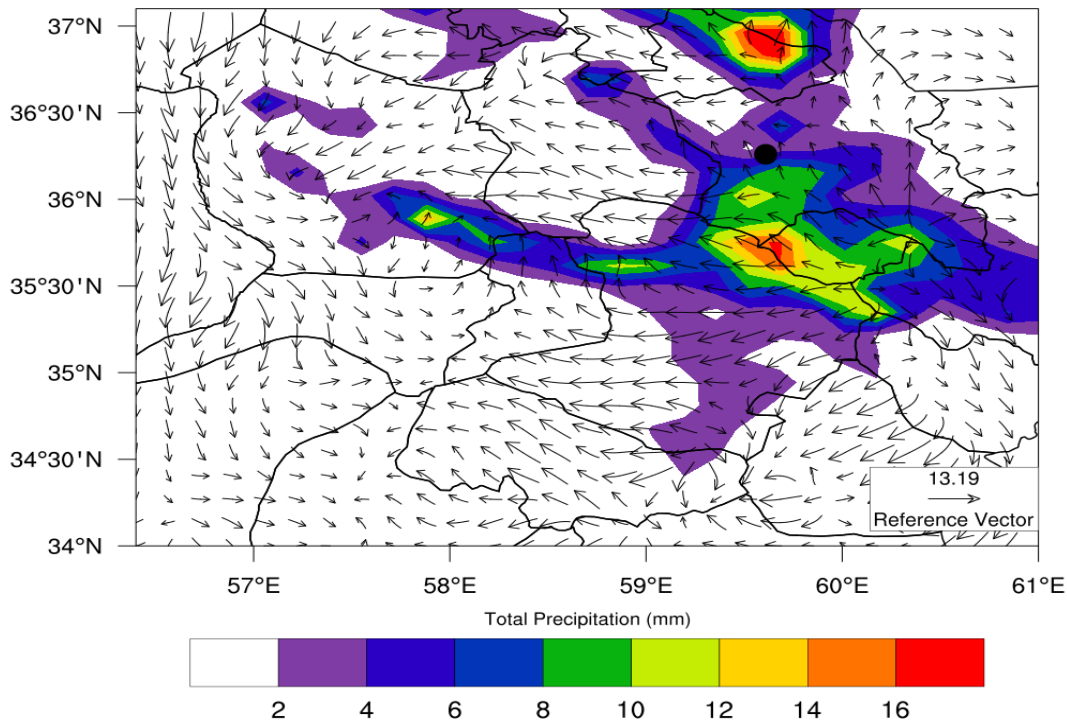
شکل ٥- نمودار مقایسه همبستگی میانگین سالانه فراوانی توفان تندری (میله ای) و روند تغییرات میانگین سالانه دمای شهر مشهد (خطی) در طی سال های ٢٠١٠-١٩٥١

#### ٤-١ شبیه سازی یک مورد توفان تندری منتخب و اجرای مدل WRF

به منظور سنجش توانایی مدل مقیاس منطقه ای WRF در نمایش رخداد توفان های تندری منطقه، یک مورد توفان به عنوان نمونه انتخاب و اجرا شد. توفان مورد اشاره در روز نهم ماه جولای سال ٢٠١١ میلادی به وقوع پیوسته است و در طی آن ناحیه وسیعی از استان خراسان رضوی تحت تأثیر قرار گرفت. در این روز ایستگاه هواشناسی سبزوار در ساعت دوازده، کد ٩٩ (توفان رعد سنگین همراه با تگرگ در زمان مشاهده) و ایستگاه های مشهد و تربت حیدریه در ساعت ١٨ همان روز، کد ٩٥ (توفان رعد سبک تا متوسط همراه با باران یا برف در زمان مشاهده، ولی بدون تگرگ) را گزارش نموده اند. همچنین میزان بارش ثبت شده در این روز بر اساس داده های سازمان هواشناسی، برای ایستگاه سبزوار ١٤.٠١ میلی متر، مشهد ٢ میلی متر و تربت حیدریه ٣ میلی متر می باشد. بر این اساس مدل با دو قدرت تفکیک ٥ و ١٥ کیلومتر اجرا و نتایج با استفاده از نرم افزار NCL تحلیل گردید (شکل ٦ و ٧).



شکل ۶- خروجی اجرای مدل با قدرت تفکیک ۵ کیلومتر- نمایش میزان بارش (سایه رنگ) به میلی متر و بردار باد در ساعت ۱۸ روز ۹ جولای ۲۰۱۱ (محدوده شهر مشهد با دایره توپر مشکی مشخص شده است).



شکل ٧- خروجی اجرای مدل با قدرت تفکیک ١٥ کیلومتر- نمایش میزان بارش (سایه رنگ) به میلی متر و بردار باد در ساعت ١٨ روز ٩ جولای ٢٠١١ (محدوده شهر مشهد با دایره توپر مشکی مشخص شده است).

به طوری که در شکلها مشاهده می شود مدل WRF توانایی نسبتاً خوبی را برای نمایش و شبیه سازی توفان های تندری دارا می باشد. بر همین اساس می توان از قابلیت این مدل برای پیش بینی رخداد توفان تندری استفاده نمود.

### ٥. جمع بندی و نتیجه گیری

نتایج بررسی و تحلیل داده ها و نمودارها نشان می دهد که میانگین سالانه دما با وجود تغییرپذیری نسبی در طی دوره مورد بررسی، افزایش محسوسی دارد. همچنین میانگین سالانه فراوانی رخداد توفان های تندری در این منطقه نیز با وجود افت و خیزهای زیاد، به طور کلی روند افزایشی دارد. حداکثر فراوانی وقوع این توفانها با ٢٨ مورد در سال ٢٠٠٩ میلادی، مطابق با ١٣٨٨ شمسی واقع شده است که منطبق با شیب افزایشی در نمودار میانگین دما می باشد. یافته ها بیانگر آن است که بین میانگین سالانه دما و فراوانی رخداد توفان های تندری در منطقه مورد مطالعه، همبستگی و ارتباط مستقیم وجود دارد؛ بدین معنی که با افزایش میانگین دما، فراوانی رخداد توفان



نیز افزایش یافته است. برای فهم دلایل و ساز و کارهای این همبستگی نیاز به تحلیل و بررسی دیگر پارامترها و نیز مطالعه الگوهای جوی مؤثر بر موارد فوق وجود دارد که در آینده به این موضوعات پرداخته خواهد شد.

با عنایت به مطالعات انجام شده و اثبات روند صعودی میانگین دما در شهر مشهد و در نتیجه افزایش احتمال رخداد توفان‌های تندی شدید که در اغلب موارد باعث ایجاد خسارات مالی و حتی جانی می‌گردد، انجام اقدامات و پیش‌بینی‌های لازم جهت آمادگی برای روبه‌رو شدن با این پدیده جوی و خسارات ناشی از آن در سطح شهر، ضروری به نظر می‌رسد.

یکی از راهکارهای عملی و علمی به منظور آمادگی برای رو به رو شدن با این نوع توفان‌ها، استفاده از مدل‌های اقلیمی با قابلیت پیش‌بینی پدیده‌های جوی می‌باشد. با توجه به نتیجه قابل قبولی که در شبیه‌سازی یک مورد توفان تندی توسط مدل WRF به دست آمد پیشنهاد می‌گردد که از این مدل با قدرت تفکیک بالا استفاده شود تا بتوان توفان‌های تندی شهر مشهد و پیرامون آن را پیش‌بینی نمود.



## ٦. منابع

١. ثنایی نژاد، سید حسین؛ صالحی، حسن؛ بابائیان، ایمان، (اردیبهشت ١٣٨٩)، «تحلیل سینوپتیکی و دینامیکی پدیده‌های همرفتی محلی به منظور بهبود پیش بینی آن‌ها (مطالعه موردی: توفان و تگرگ مورخه ٦ مرداد ١٣٨٨ در مشهد)»، چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران، مؤسسه ژئوفیزیک، مقالات پوستری، مجله فیزیک فضا
٢. جعفرپور، ابراهیم، (چاپ هشتم ١٣٨٦)، مبانی اقلیم شناسی، انتشارات دانشگاه پیام نور: تهران
٣. جلالی، اورج و جهانی، مقصود، (١٣٨٧)، بررسی پراکنش مکانی بارش‌های تندری شمال غرب ایران، مجله فضای جغرافیایی، سال هشتم، شماره ٢٣
٤. جلالی، اورج؛ رسولی، علی اکبر؛ ساری صراف، بهروز، (١٣٨٤)، توفان‌های تندری و بارش‌های ناشی از آن در محدوده شهر اهر، مجله جغرافیا و برنامه ریزی، شماره ٢٤
٥. خالصی، فریده، (١٣٩٣)، واکاوی زمانی توفان‌های تندری در ایران، دو فصلنامه آب و هواشناسی کاربردی، شماره ١
٦. خزایی، مهدی؛ مدیری، احسان؛ مدیری، مهدی، (١٣٩٣)، تحلیل همیدی توفان‌های مخاطره‌آمیز اصفهان، نشریه دانش مخاطرات، دوره ١، شماره ٢
٧. خوشحال دستجردی، جواد و قویدل رحیمی، یوسف، (١٣٨٦)، شناسایی ویژگی‌های سوانح محیطی منطقه شمال غرب ایران (نمونه مطالعاتی: خطر توفان‌های تندری تبریز)، مجله مدرس علوم انسانی، شماره ٥٣
٨. علی اکبری بیدختی، عباسعلی؛ بیوک، ندا؛ ثقفی، محمد، (١٣٨٣)، بررسی ساختار چند جریان جستانک توفان‌های همرفتی تهران با استفاده از داده‌های سودار، نشریه فیزیک زمین و فضا، جلد ٣٠، شماره ٢
٩. علیجانی، بهلول، (١٣٧٤)، آب و هوای ایران. انتشارات دانشگاه پیام نور: تهران
١٠. علیزاده، امین؛ کمالی، غلامعلی؛ موسوی، فرهاد؛ موسوی بایگی، محمد، (چاپ پانزدهم ١٣٩١)، هوا و اقلیم شناسی، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد
١١. قویدل رحیمی، یوسف؛ باغبانان، پرستو؛ فرج زاده اصل، منوچهر، (١٣٩٤)، روند تغییرات زمانی مخاطره توفان‌های تندری در ایران، مجله برنامه ریزی و آمایش فضا، دوره نوزدهم، شماره ٢
١٢. فرجی، عبدالله؛ دوستکامیان، مهدی؛ صفری، زهرا، (١٣٩٤)، واکاوی همیدی الگوهای زمانی و مکانی بارش‌های تندری (مطالعه موردی: استان زنجان)، فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی، سال چهارم، شماره ١٤
١٣. لشکری، حسن و حجّتی، زهرا، (١٣٩١)، تحلیل سینوپتیکی - دینامیکی توفان‌های تندری در جنوب غرب کشور، فصلنامه اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، دوره بیست و یکم، شماره ٨٢



۱۴. هاشمی دوین، مه‌ری و الهی گل، مه‌دی، (اردیبهشت ۱۳۹۱)، «تحلیل چند توفان تندی بجنورد با استفاده از داده‌های سودار»، چهاردهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، دانشگاه بیرجند

15. C.A. Biltoft, Thunderstorm Potential of Cold Air Cumulonimbi, Journal of Applied Meteorology, vol.13 (1974) 22-26.
16. H.B. Bluestein, Parks. R. Carlton, A Synoptic and Photographic Climatology of Low-Precipitation Severe Thunderstorm in the Southern Plains, Monthly Weather Review, vol.111 (1983) 2034-2046.
17. D. Perler, O. Marchand, A Study in Weather Model Output Postprocessing: Using the Boosting Method for Thunderstorm Detection, Weather and Forecasting, vol.24 (2009) 211-222.
18. J. Dou, Y. Wang, R. Bornstein, S. Miao, Observed Spatial Characteristics of Beijing Urban Climate Impacts on Summer Thunderstorms, Journal of Applied Meteorology and Climatology, vol.54 (2015) 94-105.