

S. M. Moosavi

سیده محبوبه موسوی، دانشجوی کارشناسی ارشد اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد

Dr.A. Zarrin

دکتر آذر زرین، استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد

Dr.A. Mofidi

دکتر عباس مفیدی، استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد

S. F. Hosseini

سیده فاطمه حسینی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

[zarrin@um.ac.ir](mailto:zarrin@um.ac.ir)

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

پذیرش نهایی: ۹۶/۷/۲۷

دریافت مقاله: ۹۶/۴/۲۴

DOI:10.18869/acadpub.geores.32.3.74

### 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 (۱۹۵۱-۲۰۱۰ 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 موردنظری، 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، به طور کلی روند افزایشی دارد. در نهایت مشخص شد بین میانگین سالانه دما و فراوانی رخداد توفان‌های تندری در منطقه موردمطالعه، 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 وُرف<sup>1</sup> نشان داد که این مدل توانایی قابل قبولی در پیش‌بینی و نمایش توفان‌های مذکور دارد و خروجی‌های مدل قابل اعتماد هستند. البته هر چه پارامترهایی مانند قدرت تفکیک انتخاب شده مقدار بیشتر و بهتری داشته باشند، ارزش و دقّت خروجی‌های مدل نیز قابل ملاحظه‌تر خواهد بود. بر همین اساس می‌توان از قابلیت این مدل برای پیش‌بینی رخداد توفان‌های تندری در آینده نیز استفاده نمود.

واژگان کلیدی: توفان تندری، روند دما، مشهد، مدل وُرف (WRF)

### مقدمه

توفان تندری ازجمله پدیده‌های هواشناسی است که در اغلب نقاط دنیا مشاهده می‌شود. این رخداد طبیعی در عین دارا بودن مزایایی ازجمله در پی داشتن بارش در بیشتر موارد و جذابیت بصری به دلیل همراه داشتن آذرخش، جزو شدیدترین و مخرب‌ترین بلایای طبیعی است که همه ساله علاوه بر خسارات شدید در بخش‌های مختلف اقتصادی، باعث تلفات انسانی نیز می‌گردد. دلیل

1 WRF: Weather Research and Forecasting Model

نامگذاری پدیده مذکور نشأت گرفته از ماهیت مخاطره‌آمیز و آسیب‌رسان آن و همچنین ظاهرات جوی خاصی است که همراه آن رخ می‌دهند که شامل: رعدوبرق (صاعقه، آذرخش)، تنگرگ، رگبارهای شدید و سیل‌آسا، وزش بادهای شدید می‌باشد. در سال‌های اخیر با گسترش شهرنشینی و دست‌اندازی انسان به نظام طبیعت، میزان آسیب‌پذیری جوامع انسانی از مخاطرات طبیعی افزایش یافته است. توفان‌های تندri یکی از مخاطرات هواشناسی محسوب می‌شوند که اکثر اوقات به دلیل ناگهانی بودن رخداد پدیده، آسیب‌های جبران ناپذیر جانی و مالی در زمینه مناطق مسکونی، ساخت‌وسازها، زمین‌ها و فرآوردهای کشاورزی، مناطق جنگلی، دامپروری و حیات وحش و... وارد کرده‌اند (حالصی، ۱۳۹۳: ۴۸). به صورت کلی به دلیل همراهی توفان تندri با رگبارهای باران و برف و تنگرگ و نقش مؤثر آن در ایجاد سیل‌های ناگهانی، هم از جنبه کشاورزی و هم از نظر خسارات جانی و مالی، این پدیده همواره مورد توجه محققان بوده است (لشگری، حاجتی، ۱۳۹۱: ۱۴). پدیده توفان تندri، هر ساله موجب خسارات جانی و مالی در نقاط مختلف ایران می‌شود. از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۶ (به استثنای سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۴)، ۷۹ مورد توفان تندri مغرب گزارش شده است که خسارات جانی و مالی داشته‌اند؛ به طوری که در دوره آماری پیش‌گفته، بر اثر این پدیده در سطح کشور، ۹۴ 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 حدود ۶ تن بر اثر این رخداد در سطح کشور جان خود را از دست داده‌اند (خزایی، ۱۳۹۳: ۲۰۸). در ایران، روزهای تندri (همراه با توفان تندri و آذرخش که نماینده ناپایداری‌های شدید است) چندان فراوان نیست و میانگین سالانه آن به ده روز هم نمی‌رسد؛ ولی در برخی مناطق مانند شمال غرب کشور، تندri شاخصه اقلیم بوده و این منطقه به عنوان اولین قلمرو تندri کشور ایران با میانگین ۵۰ روز و بیشتر، شناخته می‌شود (فرجی و همکاران، ۱۳۹۴: ۴۲).

در منطقه شمال شرق کشور با وجود محدود بودن نسبی رخداد، توفان‌های تندri یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد سیلاب‌های خطرساز هستند. با توجه به اقلیم غالب نسبتاً گرم و خشک و شکل زمین‌شناسی خاص این مناطق، در صورت وقوع بارش‌های سنگین و شدید تولیدشده توسط این توفان‌ها -که زمینه‌ساز وقوع سیلاب‌های لحظه‌ای<sup>۱</sup> می‌باشد- وارد آمدن خسارات فراوان به بخش‌های کشاورزی و مسکونی بسیار محتمل خواهد بود. به عنوان یک نمونه شاخص این رخداد در شهر مشهد، می‌توان از توفان تندri و رگبار بی‌سابقه یک دهه اخیر، مورخ ۱۷ اردیبهشت ۱۳۹۴ نام برد. این توفان گسترده، ۴۷۱ مورد آب‌گرفتگی در استان را رقم زد؛ ۳۲۹ منزل و ۱۴۲ خیابان شهر دچار آب‌گرفتگی 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 میلی‌متر باران بارید. سرعت وزش باد در مشهد در برخی ساعات شب، به ۹۰ کیلومتر در ساعت هم رسید (سایت خبرگزاری تابناک، ۱۳۹۴/۲/۱۹).

تاکنون تحقیقات و پژوهش‌های متنوعی برای درک ویژگی‌ها و مکانیسم رخداد توفان‌های تندri انجام شده است. موارد زیر از آن جمله‌اند: بیل تافت<sup>۲</sup> (۱۹۷۴) در تحقیق خود به بررسی پتانسیل توفان تندri 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 تندri برخوردار نیستند. بلواشتاین<sup>۳</sup> و همکاران (۱۹۸۳) با بررسی همیدی و مشاهده عینی توفان‌های تندri شدید اما کم بارش در دشت‌های جنوبی آمریکا که در تصاویر راداری قابل‌شناسایی نیستند و بررسی دقیق ۱۱ مورد از آن‌ها نشان دادند که الزاماً این رخداد همراه با ریزش هوای سرد نخواهد بود. پرلر<sup>۴</sup> و

<sup>1</sup> Flash Floods

<sup>2</sup> Biltoft

<sup>3</sup> Bluestein

<sup>4</sup> Perler, Marchand,



مارکاند (۲۰۰۹) در پژوهشی با نگرشی جدید بر مدل‌های ارتقاء، از یک الگوریتم انطباقی برای طبقه‌بندی خروجی فرایند شناسایی پتانسیل توفان‌های تندری استفاده کردند. همچنین در پژوهشی دیگر دو<sup>۱</sup> 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 کمتری 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 تأثیرپذیری بادهای ورودی به شهر و تغییر جهت و چند شاخه شدن جهت وزش آن‌ها به دلیل نقش بنهای مرتفع شهری، مسیر حرکت توفان‌های تندری تابستانه نیز تحت تأثیر این عامل قرار می‌گیرد.

دریکی از اولین مطالعات انجام‌شده 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 (۱۳۸۵) در پژوهشی به بررسی تغییرات بلندمدت 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 می‌افتد. همچنین ایشان دریافتند که بارش‌های سیل آسا در یک زمان خاص می‌تواند حاصل همکاری چند سامانه تندری باشد.

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 کار گرفتن 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، ثناوی 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 جوّ بالا که توسط رادیوسوند برداشت شده‌اند، نمودار ترمودینامیکی اسکیوتی<sup>۲</sup> 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 هکتار پاسکال و پارامترهایی مانند فشار، رطوبت و دما نشان دادند 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

<sup>1</sup>Dou et al  
<sup>2</sup>Skew-T

با استفاده از داده‌های ساعتی ۴۶ ایستگاه سینوپتیک کشور در دوره آماری ۱۳۶۵ تا ۱۳۸۸ فراوانی رخداد این توفان‌ها را موردنبررسی قرارداد و چنین بیان کرد که حداکثر فراوانی رخداد پدیده در فصل بهار و در مقیاس ساعتی در ساعات بعدازظهر اتفاق می‌افتد. در بررسی دیگری که توسط قویدل رحیمی و همکاران (۱۳۹۴) 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 موردنبررسی به صورت محسوسی به شکل افزایشی است.

با توجه به پژوهش‌های انجام شده می‌توان گفت تاکنون مطالعه شاخصی در مورد ارتباط فراوانی رخداد توفان تندری و روند دما به خصوص برای شهر مشهد انجام نگرفته است. نظر به این که یکی از دو پارامتر اساسی مولّد این پدیده خسارت‌بار، دماهای بالا می‌باشد و با عنایت به گسترش شهرنشینی و افزایش جمعیت شهر مشهد که خود منجر به تشديد افزایش دمای جزیره گرمایی شهر می‌گردد، ضرورت انجام این تحقیق اثبات می‌شود. در مقاله پیش رو تلاش می‌شود به سؤالاتی از این قبیل پاسخ داده شود که روند وقوع توفان‌های تندری در شهر مشهد چگونه است؟ و آیا این مورد با دما ارتباطی دارد؟ با توجه به معلومات قبلی می‌توان گفت سیر وقوع توفان‌های تندری در شهر مشهد سعودی بوده و این روند با افزایش دما، ارتباط مستقیم دارد. بر همین مبنای در این پژوهش تلاش شده است رابطه فراوانی وقوع توفان‌های تندری و روند دما در شهر مشهد شناسایی شود تا در صورت وجود ارتباط و سیر صعودی رخداد توفان در طی زمان، با هشدار به دستگاه‌های مسئول و مرتبه، ضرورت انجام اقدامات و پیش‌بینی‌های لازم جهت آمادگی برای روبرو شدن با این پدیده جوی و خسارات ناشی از آن در سطح شهر اثبات گردد.

## روش تحقیق

توفان‌های تندری زمینه‌ساز چندین سازوکار مثبت طبیعی هستند که تبادل انرژی الکتریکی بین جو<sup>۱</sup> و زمین و همچنین به جریان اندامتن چرخنده طبیعی هیدرولوژی از آن جمله می‌باشد. با این حال به دلیل ساختار و ماهیت خاص رخداد مورد اشاره، همواره جنبه‌های منفی و خطرساز آن به عنوان اولین ویژگی به ذهن متبار می‌گردد. مطابق تعریف سازمان هواشناسی جهانی<sup>۱</sup> روز هماه با تندر، روزی است که حداقل یک بار صدای رعد شنیده شده و درخشش برق مشاهده شود. بارش تندری نیز بارشی است که هنگام وقوع پدیده تندر نازل شود (جالی، جهانی، ۱۳۸۷: ۴۱). توفان‌های رعدوبرق از نظر پیدایش و توسعه در کره زمین در انواع مختلفی مشاهده می‌گردد که از آن میان می‌توان توفان‌های رعدوبرق توده هوا، توفان‌های رعدوبرق جبهه‌ای و باد توفانی را نام برد (جعفر پور، ۱۳۸۶: ۹۸). توفان‌های رعدوبرق توده هوا (همرفتی) اغلب در هنگام بعدازظهر به علت مقدار بیشینه ناپایداری در لایه مرزی (علی‌اکبری بیدختی و همکاران، ۱۳۸۳: ۹۷). توفان‌های رعدوبرق 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 (علی‌اکبری بیدختی و همکاران، ۱۳۸۳: ۹۷). توفان‌های تندری جبهه‌ای در هوای گرمی که بر روی شب 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 بیافتد، اما در بعدازظهرهای تابستان که گرم شدن شدید هوا سبب ناپایداری هوای گرم در جلو جبهه سرد می‌شود، معمول‌تر است (علیزاده و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۵۰). به طور کلی یک توفان تندری در پاسخ به واداشت‌های بزرگ مقیاس و متوسط مقیاس اتمسفر رخ می‌دهد و برای توسعه و گسترش یک توفان معمولاً به هوای گرم و مرتبط



در ترازهای زیرین و هوای سرد و خشک در ترازهای بالایی جو، به اضافه یک اختلاط بزرگ مقیاس مناسب نیاز است (Tajbakhsh et al, 2012: 405) پژوهش حاضر بر مبنای اطلاعات فوق انجام شده است.

#### منطقه مورد مطالعه

شهر مشهد مرکز شهرستانی به همین نام در استان خراسان رضوی است که به لحاظ موقعیت در حدود ۵۹ تا ۶۰ درجه طول شرقی و ۳۵ تا ۳۶ درجه عرض شمالی قرار گرفته و از شمال به شهرستان کلات، از شمال غرب به درگز، از غرب به چناران و نیشابور و از شرق به سرخس و تربت جام محدود می‌گردد. این شهر در انتهای جنوبی دشت توپ واقع شده و جزئی از حوضه آبریز کشف رود محسوب می‌گردد. رشته کوه هزارمسجد در شمال شرقی و رشته کوه بینالود در غرب و جنوب غربی آن قرار دارد. مهم‌ترین رشته کوهی که با جهت شمال غربی-جنوب شرقی این ناحیه را در برمی‌گیرد از در کوه با ارتفاع تقریبی ۳۰۰۰ متر است. وسعت کل حوضه آبریز کشف رود ۱۶۵۰۰ کیلومتر مربع است که حدود ۵۰۰۰ کیلومتر مربع آن دشت است، و بقیه را ارتفاعات تشکیل می‌دهند. بلند ترین نقطه در قله بینالود واقع است و حدود ۳۳۰۰ متر از سطح دریا ارتفاع دارد. پایین ترین نقطه در محل خروجی حوضه (پل خاتون) قرار گرفته و ۵۸۰ متر از سطح دریا بلندتر است. از نظر آب و هوایی حوضه آبریز رودخانه کشف رود دارای اقلیمی خشک تا نیمه خشک است. مقادیر متوسط سالانه نزولات جوی آن بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر و متوسط دمای هوا در ایستگاه هواشناسی مشهد ۱۳,۵ درجه سانتی گراد گزارش شده است. متوسط حداقل و حداکثر دما در سرددترین ماه سال، دی، ۴,۷ درجه سانتی گراد و متوسط حداکثر آن در گرم‌ترین ماه سال، تیر، ۳۳,۹ درجه سانتی گراد می‌باشد. متوسط حداقل دمای هوا در ۳ ماه سال زیر صفر است. تعداد روزهای یخ‌بندان در طول سال به طور متوسط ۱۰۰ روز می‌باشد (صادقی و همکاران، ۱۳۹۳: ۸-۹).

#### داده‌ها و روش انجام کار

پژوهش حاضر از نوع بنیادی می‌باشد و برای بررسی موضوع تحقیق حاضر، با استفاده از روش‌های توصیفی و آماری به تجزیه و تحلیل داده‌ها پرداخته شده است. بدین منظور، ابتدا داده‌های فراوانی روزهای همراه با توفان تندری و همچنین میانگین ماهانه دما در شهر مشهد برای دوره آماری ۶۰ ساله ۱۹۵۱ تا ۲۰۱۰ میلادی، از سایت سازمان هواشناسی کشور اخذ شد. سپس نتایج به دست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مراحل انجام کار به این صورت است که ابتدا با استفاده از داده‌های موجود، نمودارهای میانگین ماهانه دما، تغییرات میانگین سالانه دما، میانگین ماهانه فراوانی رخداد توفان‌های تندری و تغییرات سالانه فراوانی رخداد توفان‌های تندری رسم گردید. در ادامه به منظور نمایش همبستگی و روند تغییرات دو عامل در ارتباط باهم نمودار مقایسه‌ای فراوانی رخداد توفان تندری و روند دما در شهر مشهد ترسیم شد و با استفاده از همین نمودار به نتیجه‌گیری پرداخته شد.

همچنین در انتها با بهره‌گیری از مدل وُرف نسخه ۱,۶,۳ که یک مدل مقیاس منطقه‌ای پیش‌بینی عددی جو است، شبیه‌سازی و نمایش رخداد یک توفان تندری منتخب انجام گرفت. توفان مورد اشاره در روز نهم ماه می سال ۲۰۱۱ میلادی به وقوع پیوسته است. به دلیل تأثیرپذیری ناحیه وسیعی از استان خراسان رضوی و همچنین شدت وقوع توفان و میزان بارش نسبتاً قابل توجه، مورد فوق برای شبیه‌سازی برگزیده شد. به طور کلی با استفاده از مدل می‌توان برای یک منطقه محدود، خروجی باکیفیت بالا تولید کرد. روش کار مدل‌های اقلیمی بر اساس ریزمقیاس نمایی است که روشنی برای استخراج داده‌های باقدرت تفکیک بالا از داده‌های باقدرت تفکیک پایین می‌باشد. مدل وُرف 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 تندری، آلودگی هوا و بررسی

مسائل هیدرولوژیکی. مدل وُرف حاصل کار گروهی و جمعی شامل مرکز ملی پژوهش‌های جوی<sup>۱</sup>، مدیریت ملی جوی و اقیانوسی<sup>۲</sup>، مرکز ملی پیش‌بینی‌های محیطی<sup>۳</sup>، آزمایشگاه سامانه‌های پیش‌بینی<sup>۴</sup>، آژانس هوایی نیروی هوایی آمریکا<sup>۵</sup>، آزمایشگاه تحقیقات ناوبری، دانشگاه اوکلاهما و مدیریت هوانوردی ملی<sup>۶</sup> است. مدل وُرف به پژوهشگران اجازه می‌دهد تا شبیه‌سازی‌هایی را انجام دهند که هم منعکس کننده داده‌های واقعی است و هم شرایط آرمانی را در بر می‌گیرد. از طریق این مدل، پیش‌بینی و عملیات آن بسیار انعطاف‌پذیر و محاسبات کارآمد است؛ ضمن این که از داده‌ها و گزینه‌های فیزیکی و عددی پیشرفته‌ای نیز بهره می‌گیرد (شمسی‌پور، ۱۳۹۳: ۲۰۲-۲۰۳). داده‌های موردنیاز برای اجرای این مدل شامل داده‌های شرایط مرزی اوّلیه و داده‌های شرایط مرزی ثانویه می‌باشند. شرایط مرزی اوّلیه، نمایشگر متغیرهای سطح زمین است و شرایط مرزی ثانویه شامل داده‌های هواشناسی با گام زمانی ۶ ساعته می‌باشد که این داده‌ها در اینترنت<sup>۷</sup> در دسترس می‌باشند.

در پژوهش حاضر بهمنظور سنجش توفان‌های تندری، مدل با دو قدرت تفکیک ۱۵ و ۵ کیلومتر و دو دامین اصطلاحاً تودرتو به اجرا گذاشته شد. در این مورد از یک ویژگی مهم مدل وُرف استفاده شده است که به کاربر اجازه می‌دهد به صورت همزمان برای دامین اصلی و دامین‌های کوچکتر فقط یک‌بار اجرای مدل داشته باشد. این فرایند، لانه‌گزینی<sup>۸</sup> نامیده می‌شود. برای این شبیه‌سازی، هسته ARW<sup>۹</sup> مدل به کار گرفته شد. از ویژگی‌های این هسته قابلیت دوگانه تفسیر رخداد و پیش‌بینی وقوع سیستم‌های متوجه مقیاس در تحقیقات پیشرفته علوم جوی می‌باشد (Singh et al, 2015: 15) جزئیات و اطلاعات بیشتر از اجرای مدل در این پژوهش در جدول ۱ به نمایش گذاشته شده است.

#### جدول ۱- جزئیات اجرای مدل وُرف برای یک مورد توفان تندری با دو قدرت

تفکیک ۱۵ و ۵ کیلومتر (ساعت ۱۸ به وقت گرینویچ، روز ۹ می ۲۰۱۱)

عنوانیں	دامین ۱ (بزرگ)	دامین ۲ (کوچک)
سیستم تصویر	lambert	lambert
قدرت تفکیک افقی	۱۵ کیلومتر	۵ کیلومتر
عرض جغرافیایی	۲۸,۸۸ - ۴۲,۵۳	۳۰,۰۶ - ۳۷,۳۱
طول جغرافیایی	۴۸,۵۲ - ۶۷,۴۷	۵۱,۵۷ - ۶۴,۲۸
تعداد ترازهای قائم	۲۷	۲۷
تعداد نقطه-شبکه		
e-we	۱۰۰	۹۲
e-sn	۲۲۰	۱۵۱
گام زمانی داده‌های هواشناسی	۶ ساعته	۶ ساعته

<sup>۱</sup> NCAR: National Center of Atmospheric Research

<sup>۲</sup> NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

<sup>۳</sup> NCEP :National Center for Environment Prediction

<sup>۴</sup> FSL: Forecast System Laboratory

<sup>۵</sup> AFWA:Air Force Weather Agency

<sup>۶</sup> FAA: Federal Aviation Administration

<sup>۷</sup> <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/free-data.html>

<sup>۸</sup> Nesting

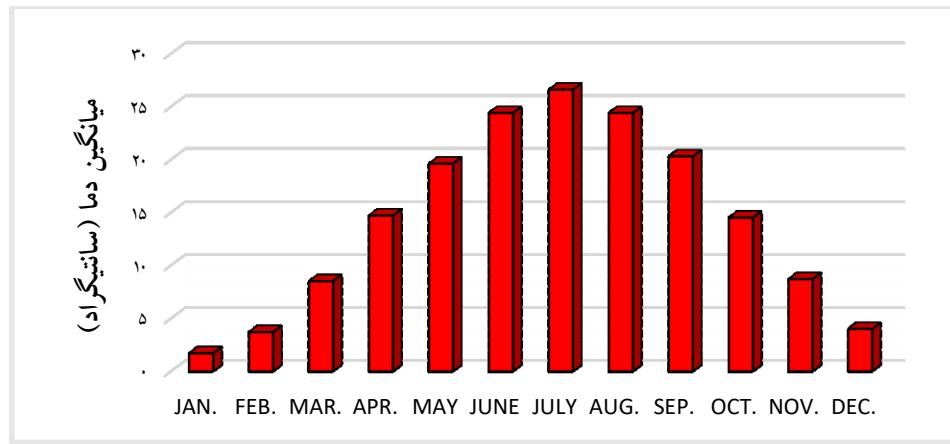
<sup>۹</sup> Advanced Research WRF



## نتایج

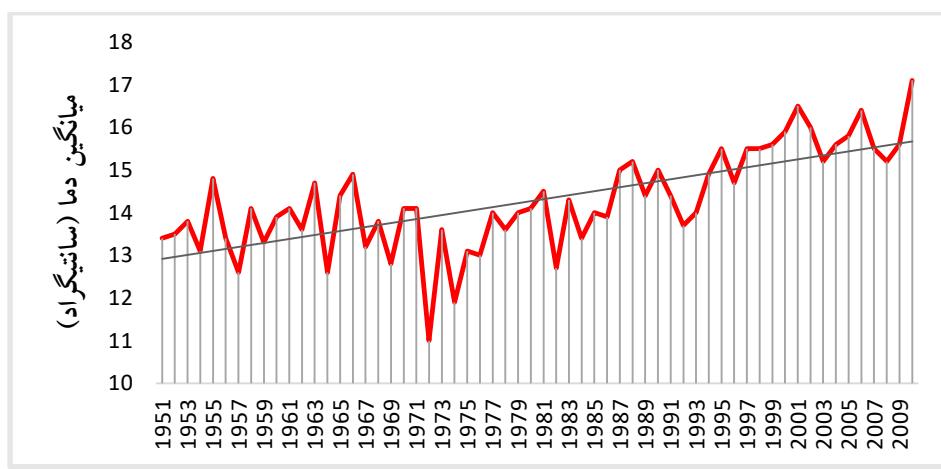
## یافته‌های توصیفی

ابتدا با استفاده از داده‌ها، نمودار میانگین ماهانه دما در دوره مورد نظر رسم شد. چنان که در شکل ۱ مشاهده می‌شود حداقل میانگین دما در طی شصت سال، در ماه جولای به ثبت رسیده است. در تقویم شمسی، ماه جولای مطابق با ۱۱ تیر تا ۱۰ مرداد می‌باشد که در اغلب سال‌ها، حداقل دماهای ثبت شده در فصل تابستان در همین بازه زمانی رخداده‌اند.



شکل ۱- نمودار میانگین ماهانه دمای شهر مشهد در طی سال‌های ۱۹۵۱-۲۰۱۰

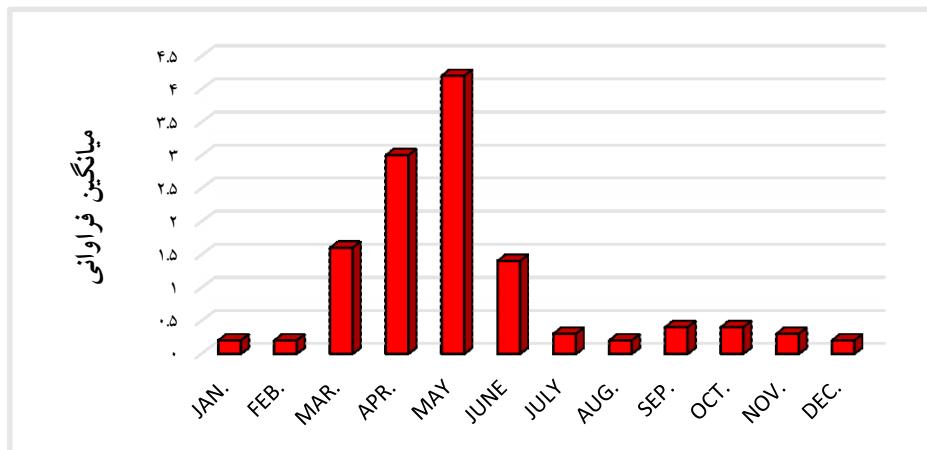
سپس با استفاده از نمودار خطی، تغییرات میانگین سالانه دما در دوره آماری مورد بررسی رسم شده است. در این نمودار، روند افزایشی ملایمی به خصوص در دو دهه اخیر(سال‌های ۱۹۹۲-۲۰۱۰) مشاهده می‌شود و میانگین سالانه دما از  $13\frac{3}{4}$  درجه سانتی‌گراد در سال ۱۹۵۱ به  $17\frac{1}{2}$  درجه سانتی‌گراد در سال ۲۰۱۰ میلادی رسیده است. این افزایش ۴ درجه‌ای در میانگین دما بسیار قابل تأمل می‌باشد (شکل ۲).



شکل ۲- نمودار تغییرات میانگین سالانه دمای شهر مشهد به همراه خط روند، سال‌های ۱۹۵۱-۲۰۱۰

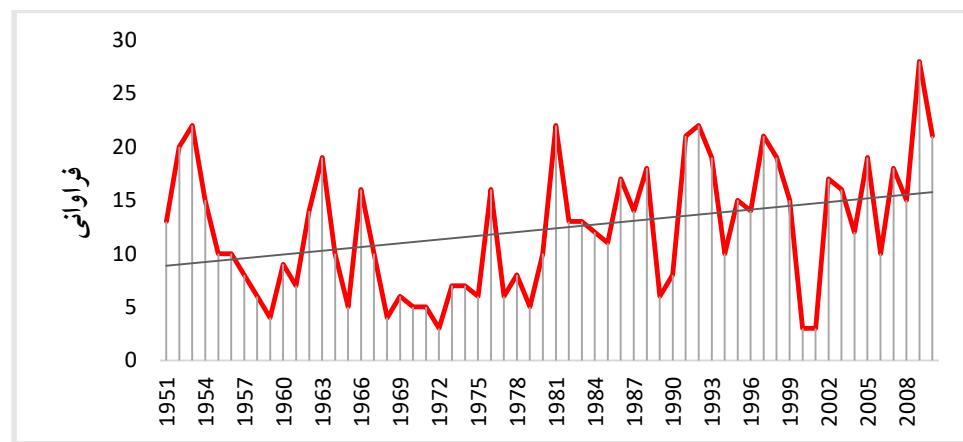
در ادامه، میانگین ماهانه فراوانی رخداد توفان‌های تندri در منطقه به وسیله نمودار نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود بیشینه فراوانی رخداد با رقم میانگین  $4\frac{1}{2}$  در ماه می (مطابق با ۱۱ اردیبهشت تا ده خردادماه) واقع شده است. دلیل این امر را

می‌توان چنین بیان کرد که همراهی گرمای روزهای بهاری و وجود رطوبت کافی و در نتیجه وقوع جریان‌های همرفتی محلی ناشی از این عوامل، موجب می‌شود فراوانی این رخداد در این ماه به اوج خود برسد (شکل ۳).



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

سپس بهوسیله نمودار خطی، تغییرات سالانه فراوانی رخداد در دوره موردنبررسی رسم شد. علی‌رغم وجود افت و خیزهای فراوان در طی سال‌های متتمدی 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 لاقل در طی شش دهه اخیر کاملاً بی‌سابقه است (شکل ۴).



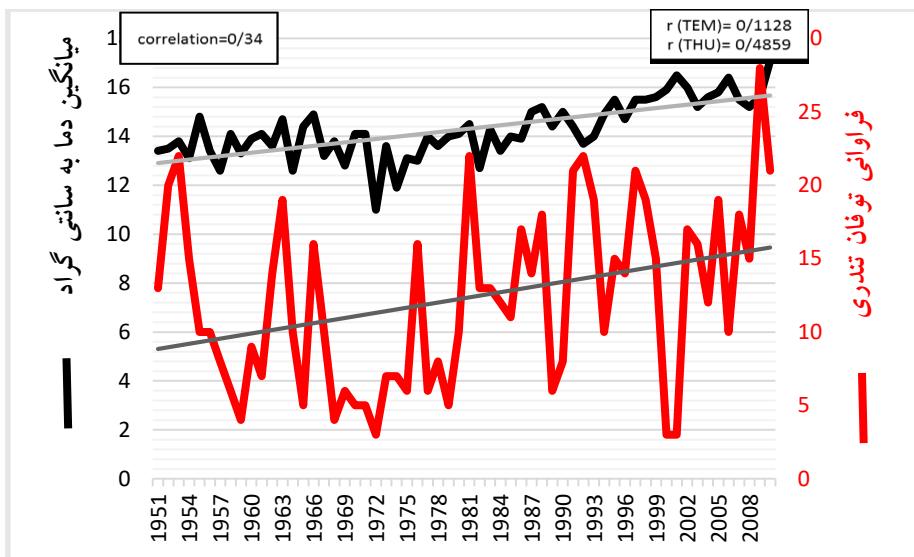
شکل ۴- تغییرات سالانه فراوانی توفان تندری شهر مشهد به همراه خط روند، سال‌های ۱۹۵۱-۲۰۱۰

#### یافته‌های استنباطی

در انتها بهمنظور اثبات فرضیات، نمودار مقایسه‌ای فراوانی رخداد توفان تندری (نمودار میله‌ای) و روند دما (نمودار خطی) شهر مشهد رسم گردید. هم‌چنین برای بررسی بیشتر خط روند هر دو عامل نیز قرار داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود سیر صعودی میانگین سالانه دما در مدت شصت سال به صورت تقریبی با سیر افزایشی میانگین سالانه فراوانی توفان‌های تندری هماهنگی و ارتباط



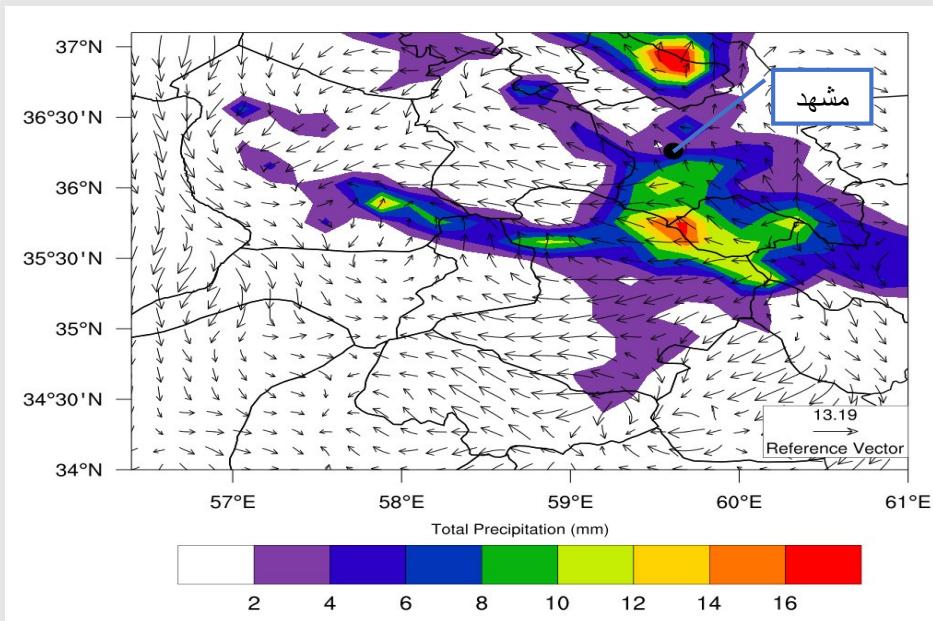
مستقیم دارد (شکل ۵). در این مورد ضریب همبستگی دو عامل موردنبررسی نیز محاسبه شده است. بر همین اساس عدد  $r = 0.34$  مقدار همبستگی نسبتاً قابل ملاحظه‌ای را به نمایش می‌گذارد.



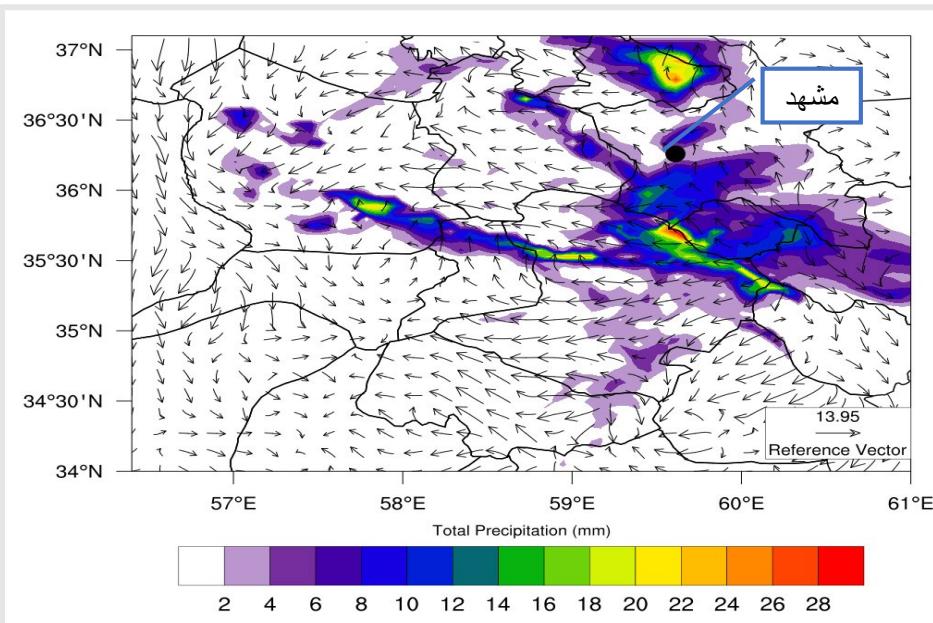
شکل ۵- نمودار مقایسه همبستگی میانگین سالانه فرآونی توفان تندری (میله‌ای) و روند تغییرات میانگین سالانه دمای شهر مشهد (خطی) به همراه خطوط روند در طی سال‌های ۱۹۵۱-۲۰۱۰

### شبیه‌سازی یک مورد توفان تندری منتخب و اجرای مدل وُرف

به منظور سنجش توانایی مدل مقیاس منطقه‌ای وُرف در نمایش رخداد توفان‌های تندری منطقه، یک مورد توفان به عنوان نمونه انتخاب و اجرا شد. توفان مورد اشاره در روز نهم ماه می سال ۲۰۱۱ 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 ۱۲، کد ۹۹ (توفان رعد سنگین همراه با تگرگ در زمان مشاهده) و ایستگاه‌های مشهد و تربت حیدریه در ساعت ۱۸ همان روز، کد ۹۵ (توفان رعد سبک تا متوسط همراه با باران یا برف در زمان مشاهده، ولی بدون تگرگ) را گزارش نموده‌اند. همچنین میزان بارش ثبت شده در این روز بر اساس داده‌های سازمان هواشناسی، برای ایستگاه سبزوار  $14.01$  میلی‌متر، مشهد  $2$  میلی‌متر و تربت حیدریه  $3$  میلی‌متر می‌باشد. بر این اساس مدل با دو قدرت تفکیک  $15$  و  $5$  کیلومتر اجرا و نتایج تحلیل گردید (شکل ۶ و ۷).

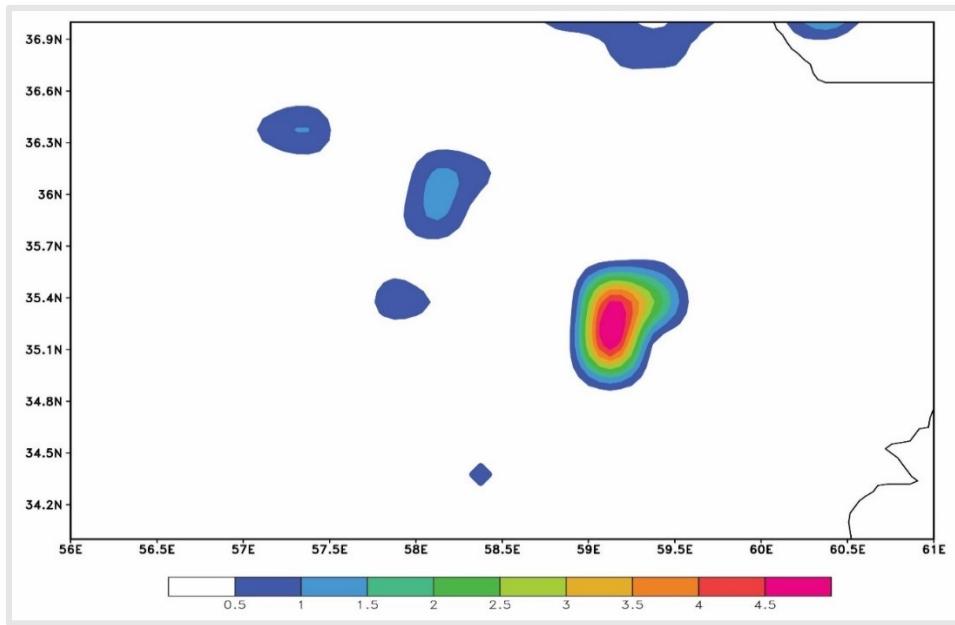


شکل ۶- خروجی اجرای مدل با قدرت تفکیک ۱۵ کیلومتر - نمایش میزان بارش (سایه رنگ)  
به میلی‌متر و بردار باد در ساعت ۱۸ روز ۹ می ۲۰۱۱



شکل ۷- خروجی اجرای مدل با قدرت تفکیک ۵ کیلومتر - نمایش میزان بارش (سایه رنگ)  
به میلی‌متر و بردار باد در ساعت ۱۸ روز ۹ می ۲۰۱۱

همچنین با هدف مقایسه نتایج خروجی اجرای مدل با واقعیت موجود، میزان و محل وقوع بارش با استفاده از داده‌های ماهواره TRMM به نمایش گذاشته شده است (شکل ۸). محدوده انتخابی، همان منطقه مورد نظر در اجرای مدل WRF (شمال شرق کشور- محدوده استان خراسان رضوی) می‌باشد. چنان‌که مشاهده می‌شود نتایج نمایش داده‌شده توسط مدل با تقریب خوبی با مکان واقعی ثبت بارش توسط ماهواره همسان است (حداکثر بارش ثبت شده: بین ۵۹ تا ۶۰ درجه طول شرقی). میزان بارش (به میلی‌متر) نیز تقریباً به میزان واقعی بارش نزدیک است.



**شکل ۸- میزان ثبت شده بارش در محدوده مورد بررسی با استفاده از داده های ماهواره TRMM**

با توجه به نتایج مشاهده می شود مدل ور ف توفانی نسبتاً خوبی را برای نمایش و شبیه سازی توفان های تندري دارا می باشد و خروجی های مدل قابل اعتماد هستند. البته لازم به ذکر است هر چه پارامترهایی مانند قدرت تفکیک انتخاب شده مقدار بیشتر و بهتری داشته باشند، ارزش و دقیق خروجی های مدل نیز قابل ملاحظه تر خواهد بود. همچنین نتایج به دست آمده به دیگر عوامل مانند وسعت منطقه تحت پوشش پدیده و نیز دقیق داده های ورودی بستگی خواهند داشت. بر همین اساس می توان از قابلیت این مدل برای پیش بینی رخداد توفان تندري نیز استفاده نمود.

### نتیجه گیری

پژوهش حاضر باهدف بررسی رابطه فراوانی وقوع توفان های تندري در شهر مشهد و روند میانگین دما صورت گرفته است؛ بنابراین برای دستیابی به هدف تحقیق از داده های میانگین ماهانه و سالانه فراوانی وقوع توفان های تندري و میانگین ماهانه و سالانه دما در طی شصت سال (۱۹۵۱-۲۰۱۰ میلادی) استفاده شد و نمودارهای مربوطه رسم گردیدند. نتایج بررسی و تحلیل داده ها و نمودارها نشان می دهد که میانگین سالانه دما در شهر مشهد با وجود تغییر پذیری نسبی در طی دوره موربد بررسی، افزایش محسوسی دارد؛ به طوری که در طی ۶۰ سال حدود ۴ درجه سانتی گراد افزایش داشته است. همچنین میانگین سالانه فراوانی رخداد توفان های تندري در این منطقه نیز با وجود افت و خیزهای زیاد، به طور کلی روند افزایشی دارد. حداکثر فراوانی وقوع این توفان ها با ۲۸ مورد در سال ۲۰۰۹ میلادی، (۱۳۸۸ شمسی) واقع شده است که منطبق با شبیه افزایشی در نمودار میانگین دما می باشد.

یافته ها بیانگر آن است که بین میانگین سالانه دما و فراوانی رخداد توفان های تندري در منطقه موربد مطالعه، همبستگی و ارتباط مستقیم وجود دارد؛ بدین معنی که با افزایش میانگین دما، فراوانی رخداد توفان نیز افزایش یافته است. بر همین مبنای فرضیات موربد بررسی این پژوهش به اثبات می رستند. البته برای فهم دلایل و سازو 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.

چنان که در این پژوهش مشخص شد با گذشت زمان هم تعداد رخداد توفان تندری و هم شدت و میزان آسیب‌رسانی این رخداد، متأثر از بالا رفتن دما و پدیده گرمایش جهانی افزایش می‌یابد. با عنایت به مطالعات انجام شده و اثبات روند صعودی میانگین دما در شهر مشهد و در نتیجه افزایش احتمال رخداد توفان‌های تندری شدید که در اغلب موارد باعث ایجاد خسارات مالی و حتی جانی می‌گردد، انجام اقدامات و پیش‌بینی‌های لازم توسط دستگاه‌های مسئول و مدیران و برنامه‌ریزان شهری، جهت آمادگی برای روبرو شدن با این پدیده جوی و خسارات ناشی از آن در سطح شهر ضروری به نظر می‌رسد.

در نهایت بهمنظور سنجش توانایی مدل مقیاس منطقه‌ای وُرف در نمایش رخداد توفان‌های تندری منطقه، یک مورد توفان به عنوان نمونه انتخاب و مدل با دو قدرت تفکیک ۱۵ و ۵ کیلومتر اجرا گردید. همچنین با هدف مقایسه خروجی اجرای مدل با واقعیت موجود، میزان و محل وقوع بارش ثبت شده توسط ماهواره TRMM نیز به نمایش گذاشته شد. در انتها مشخص شد نتایج خروجی مدل به طور تقریبی با مکان واقعی و میزان ثبت شده بارش توسط ماهواره یکسان است. بر این اساس می‌توان گفت مدل وُرف از توانایی نسبتاً خوبی برای نمایش و شبیه‌سازی توفان‌های تندری برخوردار می‌باشد و خروجی‌های مدل قابل اعتماد هستند. البته هر چه پارامترهایی مانند قدرت تفکیک انتخاب شده مقدار بیشتر و بهتری داشته باشد، ارزش و دقت خروجی‌های مدل نیز قابل ملاحظه‌تر خواهد بود. همچنین نتایج به دست آمده به عواملی مانند وسعت منطقه تحت پوشش پدیده و نیز دقت داده‌های ورودی به مدل بستگی خواهند داشت.

یکی از راهکارهای عملی و علمی بهمنظور آمادگی برای روبرو شدن با این نوع توفان‌ها، استفاده از مدل‌های اقلیمی با قابلیت پیش‌بینی پدیده‌های جوی می‌باشد. از آن جا که در کلان‌شهر مشهد تنها یک ایستگاه هواشناسی اصلی (فروندگاه) موجود است و با توجه به این که پدیده‌ای مثل توفان تندری ممکن است در مقیاس کوچکی اتفاق بیفتد (به عنوان مثال در منطقه شمال غرب شهر رخداد توفان حادث شود و در منطقه جنوب شرق شهر، اوضاع جوی کاملاً پایدار باشد)، بنابراین استفاده از مدل‌ها و شبیه‌سازی‌ها به دلیل قابلیت تعیین نتایج، گزینه مناسبی به نظر می‌رسد. با توجه به نتیجه قابل قبولی که در شبیه‌سازی یک مورد توفان تندری توسط مدل وُرف به دست آمد پیشنهاد می‌گردد که از این مدل با قدرت تفکیک بالا استفاده شود تا بتوان توفان‌های تندری شهر مشهد و پیرامون آن را پیش‌بینی نمود.

## تقدیر و تشکر

از سازمان هواشناسی و مسئول محترم وقت بخش خدمات ماشینی، جناب آقای میررضایی به دلیل ارسال داده‌های هواشناسی موردنیاز برای انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌گردد. همچنین از دانشجوی فرهیخته و ارجمند، سرکار خانم نرگس صالح‌آبادی نیز به خاطر کمک و نقش بسیار ارزنده در انجام این تحقیق، به خصوص در بخش اجرای مدل سپاسگزاری می‌شود.

## منابع و مأخذ

- ثابی نژاد، سید حسین، صالحی، حسن، بابائیان، ایمان (۱۳۸۹)، تحلیل سینوپتیکی و دینامیکی پدیده‌های همرفتی محلی بهمنظور بهبود پیش‌بینی آن‌ها (مطالعه موردي توفان و تگرگ مورخه ۶ مرداد ۱۳۸۸ در مشهد)، چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران، مؤسسه ژئوفیزیک.
- جعفرپور، ابراهیم (۱۳۸۶)، مبانی اقلیم‌شناسی، تهران، انتشارات دانشگاه پیام نور، چاپ هشتم.



- جلالی، اورج، رسولی، علی اکبر، ساری صراف، بهروز (۱۳۸۵)، توفان‌های تندری و بارش‌های ناشی از آن در محدوده شهر اهر، نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی، شماره ۲۴، صص ۳۳-۱۸.
- جلالی، اورج، جهانی، مقصود (۱۳۸۷)، بررسی پراکنش مکانی بارش‌های تندری شمال غرب ایران، مجله فضای جغرافیایی، سال هشتم، شماره ۲۳، صص ۵۸-۳۵.
- خالصی، فریده (۱۳۹۳)، واکاوی زمانی توفان‌های تندری در ایران، دو فصلنامه آب و هواشناسی کاربردی، سال ۱، شماره ۱، پاییز و زمستان ۱۳۹۳، شماره پیاپی ۱، صص ۶۰-۴۷.
- خزایی، مهدی، مدیری، احسان، مدیری، مهدی (۱۳۹۳)، تحلیل همدیدی توفان‌های تندری مخاطره‌آمیز اصفهان، نشریه دانش مخاطرات، دوره ۱، شماره ۲، صص ۲۱۵-۲۰۳.
- خوشحال دستجردی، جواد، قویدل رحیمی، یوسف (۱۳۸۶)، شناسایی ویژگی‌های سوانح محیطی منطقه شمال غرب ایران (مطالعه موردی: خطر توفان‌های تندری تبریز)، مجله مدرس علوم انسانی، شماره ۵۳، صص ۱۱۶-۱۰۱.
- سایت خبرگزاری تابناک، [Homepage: tabnakrazavi.ir]، عنوان خبر: «اطلاعیه هواشناسی اخطار بود نه هشدار! آخرین آمارها از آب‌گرفتگی و سیل شدید مشهد»، تاریخ انتشار: ۱۹ اردیبهشت ۱۳۹۴ ساعت ۰۸:۰۴، [...] [http://tabnakrazavi.ir/fa/news/32637].
- تاریخ مشاهده: پنجشنبه ۲۲ بهمن ۱۳۹۴.
- شمسی پور، علی اکبر (۱۳۹۳)، مدل‌سازی آب و هوایی - نظریه و روش، تهران، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ دوم.
- صادقی، سلیمان، مفیدی، عباس، جهانشیری، مهین، دوستان، رضا (۱۳۹۳)، نقش الگوهای گردش مقیاس منطقه‌ای جو بر وقوع روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد، مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۱۰، صص ۳۵-۱.
- علی‌اکبری بیدختی، عباسعلی، بیوک، ندا، تقی، محمد (۱۳۸۳)، بررسی ساختار چند جریان جستاک توفان‌های همرفتی تهران با استفاده از داده‌های سودار، نشریه فیزیک زمین و فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، جلد ۳۰، شماره ۲، صص ۱۱۳-۹۳.
- علیجانی، بهلول (۱۳۷۴)، آب‌وهوای ایران، تهران، انتشارات دانشگاه پیام نور، چاپ اول.
- علیزاده، امین، کمالی، غلامعلی، موسوی، فرهاد، موسوی بایگی، محمد (۱۳۹۱)، هوا و اقلیم‌شناسی، مشهد، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، چاپ پانزدهم.
- قویدل رحیمی، یوسف، باغبانان، پرستو، فرج زاده اصل، منوچهر (۱۳۹۴)، روند تغییرات زمانی مخاطره توفان‌های تندری در ایران، مجله برنامه‌ریزی و آمایش فضا، دوره نوزدهم، شماره ۲، صص ۲۰۲-۱۸۵.
- فرجی، عبدالله، دوستکامیان، مهدی، صفری، زهرا (۱۳۹۴)، واکاوی همدیدی الگوهای زمانی و مکانی بارش‌های تندری (مطالعه موردی: استان زنجان)، فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی، سال چهارم، شماره ۱۴، صص ۶۶-۴۱.
- لشکری، حسن، حجتی، زهرا (۱۳۹۱)، تحلیل سینوپتیکی - دینامیکی توفان‌های تندری در جنوب غرب کشور، فصلنامه اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، دوره پیست و یکم، شماره ۸۲، صص ۲۱-۱۴.
- هاشمی دوین، مهری، الهی گل، مهدی (۱۳۹۱)، تحلیل چند توفان تندری بجنورد با استفاده از داده‌های سودار، چهاردهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، دانشگاه بیرجند.

- Biltoft, C. A. (1974), Thunderstorm Potential of Cold Air Cumulonimbi, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 13, pp. 22-26.
- Bluestein, H. B., Parks, C. R. (1983), A Synoptic and Photographic Climatology of Low-Precipitation Severe Thunderstorm in the Southern Plains, *Monthly Weather Review*, Vol. 111, pp. 2034-2046.
- Dou, J., Wang, Y., Bornstein, R., Miao, S. (2015), Observed Spatial Characteristics of Beijing Urban Climate Impacts on Summer Thunderstorms, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 54, pp. 94-105, DOI: 10.1175/JAMC-D-13-0355.1.

- Perler, D., Marchand, O. (2009), A Study in Weather Model Output Post processing Using the Boosting Method for Thunderstorm Detection, *Weather and Forecasting*, Vol. 24, pp. 211-222, DOI: 10.1175/2008WAF2007047.1.
- Singh, J., Gairola, A., Dos, S. (2015), Numerical Simulation of a Severe Thunderstorm over Delhi Using WRF Model, *International Journal of Scientific and Research Publications*, Vol. 5, pp. 1-6.
- Tajbakhsh, S., Gafarian, P., Sahraian, F. (2012), Instability Indices and Forecasting Thunderstorms: the Case of 30 April 2009, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 12, pp. 403-413. DOI: 10.5194/nhess-12-403-2012.