

بررسی عددی توفان‌های تندری توسط مدل WRF-ARW در تهران (۱۰ مطالعه‌ی موردی)

غلامرضا دنیا دوست*^۱، فروزان ارکیان^۲، عباس رنجبر^۳، ابراهیم میرزایی^۴

۱. کارشناس ارشد هواشناسی، سازمان هواشناسی

۲. دکترای هواشناسی، استادیار، دانشکده علوم و فنون دریایی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

۳. دکترای هواشناسی، استادیار، پژوهشکده هواشناسی

۴. دانشجوی هواشناسی - مقطع دکترا، مربی، سازمان هواشناسی

چکیده

پیش‌بینی پدیده‌های مخرب از مهم‌ترین وظایف مراکز پیش‌بینی وضع هوا می‌باشد که می‌توان بر اساس آن امنیت پرواز را تامین نمود. در این پژوهش، جهت پیش‌آگاهی از توفان‌های تندری مخاطره‌آمیز، ده مورد توفان رخ داده در تهران طی سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۰۶ با استفاده از مدل WRF-ARW بررسی شدند. جهت تعیین میزان ناپایداری در محیط شاخص‌هایی از قبیل مجموع مجموعه‌ها (TT)، شاخص (KI)، شاخص شوالتر (SI)، شاخص (SWEAT)، شاخص (LI) و انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی (CAPE+) توسط برون‌داد مدل محاسبه شده و توسط نمودارهای ترمودینامیکی گمانه‌زنی در ساعت‌های UTC ۰۰ و UTC ۱۲ مورد ارزیابی قرار گرفتند. چهار مورد پیکربندی از طرحواره‌های فیزیکی مورد استفاده قرار گرفت که با توجه به نتایج، پیکربندی شامل خرد فیزیک: Thompson, کومولوس (همرفت): Grell-Devenyi، لایه مرزی: Mellor-Yamada-Janjic، تابش جوی بلند: RRTM و کوتاه: Dudhia، زمین سطح: Noah lsm و لایه سطحی: Janjic در شبیه‌سازی و پیش‌بینی توفان‌های تندری در ایستگاه تهران مهرآباد، مقادیر دقیق تری را برای شاخص‌های مذکور ارائه داد. شاخص‌های پایداری TT, K, LI و CAPE+ دارای کمترین مقدار خطا بوده و عملکرد مناسبی نسبت به شاخص‌های دیگر داشته‌اند، به طوری‌که میانگین مطلق خطا برای این شاخص‌ها به ترتیب ۳/۳۳، ۴/۳۷، ۲/۵۵ و ۳۲/۱ و همچنین میانگین انحراف خطا به ترتیب ۰/۸۷، -۱/۰۳، ۰/۹۹ و ۳۶/۱- برآورد شده است. از شاخص‌های مذکور می‌توان جهت پیش‌آگاهی توفان تندری در مراکز پیش‌بینی سازمان هواشناسی استفاده کرد. دو شاخص دیگر SI و SWEAT به ترتیب دارای میانگین مطلق خطای ۲/۲ و ۱۵/۹۸ و میانگین انحراف خطا ۰/۹۹ و ۴۲/۵۴ می‌باشند.

واژگان کلیدی: تهران، توفان تندری، مدل عددی میان مقیاس WRF-ARW، طرحواره‌های فیزیکی، شاخص‌های ناپایداری

مقدمه

توفان تندری از معدود پدیده هایی است که کارایی و سلامت پرواز را در بالاترین درجه به خطر می اندازد، به بیان دیگر توفان تندری مخربترین پدیده جوی و یک تهدید جدی در هوانوردی می باشد، بنابراین پیش بینی به موقع آن می تواند خسارت های ناشی از این پدیده را کاهش دهد. این پدیده، میان مقیاس و در برخی موارد خرد مقیاس بوده و اغلب مدل های عددی پیش بینی وضع هوا در پیش بینی آنها دچار مشکل می شوند. از سوی دیگر مقیاس زمانی و مکانی این پدیده پیش بینی آن را مشکل تر نموده است (Sanchez, 2009). عدم امکان دسترسی به داده های جو بالا در بسیاری از نقاط کره زمین موجب شده مدل های پیش بینی عددی از مهمترین ابزار های تعیین این گونه شاخص ها باشند (Lopez et al, 2009). در مطالعه ای آستانه شاخص های ناپایداری برای پیش بینی تگرگ تعیین شدند (Sioutas et al, 2003) و در مطالعه ای دیگر نیز با شبیه سازی بر روی دو توفان شدید به وسیله طرحواره های پارامتر سازی های همرفتی مدل WRF-NMM² نشان داده شد که طرحواره کومولوس گزل³ در محاسبه شاخص های ناپایداری CAPE، KI، LI و TTI نسبت به دیگر طرحواره ها عملکرد بهتری دارد و درالگوهای زمانی و مکانی بارش ها نیز با مشاهدات همخوانی مناسبی دارد (Prosenjit et al, 2008). اگر چه خطا در تمام طرحواره های خرد فیزیکی مورد آزمایش وجود دارد ولی باید به این نکته اشاره کرد که برخی از خطا ها ممکن است بیشتر به دلیل خطاهای دیگر مدل، مانند انتخاب دینامیک نادرست، تاثیرات لایه مرزی و خطا در ترسیم حرکات عمودی باشد (Gallus et al, 2010). همچنین در مطالعه ای دیگر، طرحواره تامسون⁴ در محاسبه شاخص های ناپایداری CAPE، LI و TTI عملکرد بهتری نسبت به دیگر طرحواره های خرد فیزیک مدل WRF داشته

است (Litta et al. 2012). در ایران نیز مطالعاتی در خصوص پیش بینی توفان تندری توسط مدل MM5 صورت گرفته است (تاج بخش و همکاران، ۱۳۸۷) و یا به عنوان نمونه بر اساس تحقیقات انجام شده، در شبیه سازی بارش های رگباری جنوب و جنوب غرب کشور مناسبترین طرحواره گزل و طرحواره لایه مرزی بلک آدر شناخته شدند (قندهاری و همکاران، ۱۳۸۵). اما در خصوص مدل WRF و شاخص های ناپایداری حاصل از برون داد مدل مطالعات کمتری صورت گرفته است. از این رو در این تحقیق ده مورد رخداد توفان تندری در تهران با استفاده از مدل پیشرفته عددی پیش بینی و پژوهش وضع هوا^۵ WRF-ARW بررسی می شوند. از آن جائیکه هدف در این پژوهش، ارزیابی عملکرد مدل در پیش بینی شرایط ناپایدار در جو می باشد برخی از شاخص های ناپایداری از قبیل KI، LI، شاخص شوالتر (SI)، شاخص مجموع مجموعه ها (TT)، شاخص SWEAT و انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی (CAPE+) انتخاب و توسط برون داد مدل محاسبه می شوند. جهت صحت سنجی مدل در تخمین مقادیر شاخص ها، از داده های رادیوگمانه نیز استفاده می شود.

مواد و روش ها

داده های مورد استفاده

- داده های مشاهداتی ایستگاه مهرآباد که در این تحقیق به کار رفته مربوط می شود به ده مورد توفان تندری که توسط دیدبانی تشخیص، و با کد های ۹۵، ۹۶ و ۹۷ ثبت شده اند.
- داده های جو بالای ایستگاه مهرآباد برای ده مورد توفان تندری استخراج شد و با توجه به جدول ۱ این داده ها شامل شاخص های ناپایداری حاصل از نمودارهای ترمودینامیکی در ساعت های UTC ۰۰ و UTC ۱۲ می باشند. شاخص های ناپایداری توسط برون داد مدل نیز محاسبه شده و از طریق این داده ها صحت سنجی می شوند.

- داده های جهانی FNL که دارای قدرت تفکیک یک درجه در راستای طول و عرض جغرافیایی است به عنوان ورودی مدل WRF-ARW بکار می روند.

جدول ۱. شاخص های ناپایداری مربوط به ده مورد مطالعاتی

CAPE	SWEAT	SI	TT	K	LI	شاخص ناپایداری	
						تاریخ	
۴۷/۱۷	۱۵۵/۹	۰/۳۶	۴۹/۴	۳۱/۷	-۰/۱۴	۰۰ UTC	۲۰۰۶-۴-۲۶
۴۶۲/۲۴	۲۲۱/۳۶	-۱/۵۲	۵۴/۲	۳۳/۴	-۲/۵۶	۱۲ UTC	
۰	۱۴۹/۱۹	۱/۸۸	۴۶/۵	۳۳	۲/۱۵	۰۰ UTC	۲۰۰۷-۴-۲۸
۷۹۱/۵۸	۲۸۴/۹۱	-۳/۲۹	۵۵/۲	۳۵/۳	-۳/۳۹	۱۲ UTC	
۰	۱۰۶/۸۵	۲/۰۱	۴۶/۴	۲۷/۱	۱/۳۲	۰۰ UTC	۲۰۰۷-۵-۱۳
۱۶۴/۲۱	۱۶۷/۸۸	-۱/۱۵	۵۲/۴	۲۸/۳	-۱/۸۴	۱۲ UTC	
۱۳۵	۱۷۶/۳	-۰/۹۲	۵۱/۶	۳۰/۱	-۱/۴۴	۰۰ UTC	۲۰۰۷-۶-۵
۶۷۴/۵	۲۳۲/۷	-۲/۶۲	۵۵	۳۵/۵	-۳/۵۹	۱۲ UTC	
۰	۱۴۲/۳	۳/۲۲	۴۵/۸	۲۵/۱	۲/۹۱	۰۰ UTC	۲۰۰۹-۴-۳۰
۵۱۳/۶	۲۵۶/۱	-۲/۹۵	۵۴/۶	۳۶/۸	-۲/۹۵	۱۲ UTC	
۱۰۶/۵	۲۰۵/۶	-۱/۳۷	۵۳/۲۷	۳۳/۹۴	-۱/۳۷	۰۰ UTC	۲۰۱۰-۴-۹
۱۰۳/۴	۱۷۷/۸	-۰/۲۹	۵۱	۳۴/۲	-۰/۷۵	۱۲ UTC	
۸۳/۳۲	۱۶۷/۴	۰/۵۸	۴۸/۴	۳۴/۵	۰/۳۲	۰۰ UTC	۲۰۱۰-۴-۱۸
۴۰۶/۲	۲۰۹/۲	-۲/۰۱	۵۴/۶	۳۶	-۲/۰۴	۱۲ UTC	
۱۰/۰۸	۱۵۲	-۰/۷۱	۵۱/۴	۲۹/۷	-۰/۳۹	۰۰ UTC	۲۰۱۲-۶-۳۰
۱۲۱۱	۵۷۵/۶	-۷/۸۷	۶۳/۴	۴۱/۳	-۵/۶۱	۱۲ UTC	
۳۱/۳۱	۱۸۷/۶	-۱/۲۲	۵۱/۲	۳۳/۹	-۱/۳۱	۰۰ UTC	۲۰۱۲-۷-۱۵
۴۸۵/۰۸	۳۰۱/۸۳	-۳/۸۸	۵۶/۹۶	۴۰/۴۶	-۳/۸۴	۱۲ UTC	
۱۹/۷۲	۱۰۷/۵۸	۰/۱۵	۵۱	۳۰/۳	-۰/۳۶	۰۰ UTC	۲۰۱۳-۵-۱۳
۰	۳۸	۲/۹۴	۴۵/۲	۲۱/۵	۳/۰۲	۱۲ UTC	

مدل WRF-ARW :

محدوده کاربرد آن بسیار وسیع است و گستره بین چندین متر تا هزاران کیلومتر را تحت پوشش قرار می دهد و با استفاده از تغییر حالت های متفاوت پارامتر سازی های فیزیکی موجود در مدل می توان گستره وسیعی از اجراها را به انجام رساند (پژوهشکده هواشناسی، ۱۳۸۸). در این تحقیق با تغییر بعضی از پارامترهای فیزیکی سعی به رسیدن به یک طرحواره مناسب جهت شبیه سازی و پیش بینی

سامانه مدل سازی پیشرفته WRF-ARW یک مدل میان مقیاس و سامانه ای انعطاف پذیر با قابلیت های فراوان است که می توان وضعیت های مختلف جو را با استفاده از آن شبیه سازی نمود. این مدل در طی چند سال گذشته در حال توسعه بوده است، مدل مذکور قابل نصب بر روی سامانه های مختلف و رایانه ای شامل خوشه رایانه می باشد،

هکتوپاسکال ($T_{500} - T_{850}$)، محتوای رطوبت بر حسب دمای نقطه شبنم در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (T_{850}) و عمق لایه مرطوب در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال ($T_{700} - T_{4700}$) می باشد. شاخص مجموع مجموعه ها^۱ (TT I)، شاخصی است که از دیگر شاخص ها به علت ترکیب دو شاخص مجموع دیگر، قابل اعتماد تر می باشد. این شاخص به رطوبت تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال بسیار وابسته است. چنانچه ناپایداری در اثر هوای سرد سطوح بالایی جو باشد و در سطوح زیرین جو رطوبت کافی موجود باشد، شاخص مجموع مجموعه ها بیش از دیگر شاخصها قابل اعتماد می باشد. شاخص تهدیدکننده هوای بد^۱ (SWEAT I)، شاخص تجربی دیگری می باشد که برای تعیین احتمال وقوع توفان شدید یا دیو بادها بکار می رود. این شاخص برای شناسایی و تشخیص دوره های تندری و غیر تندری توفان استفاده می شود. شاخص SWEAT ترکیبی از عوامل توسعه و تقویت توفان نظیر رطوبت و ناپایداری می باشد. مزیت این پارامتر استفاده از پارامتر سرعت باد در سطوح زیرین جو است؛ زیرا تنها عامل تعیین کننده دوام پایداری توفان تندری باد می باشد. انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی مثبت^۲ ($CAPE+$)، معرف شناوری قائم مثبت بسته هوایی است که بطور بی دررو در حال صعود می باشد. این پارامتر معرف بیشینه انرژی در دسترس برای صعود بسته هوا و رطوبت می باشد. این پارامتر به انرژی شناوری نیز معروف است و روی نمودارهای ترمودینامیکی معرف محدوده ای است بین نمایه قائم دمای محیط و رطوبت بی دررو که تراز همرفت آزاد را به تراز هم ارز مرتبط می سازد. در این تحقیق، شش شاخص ناپایداری که از بررسی و پرونداد مدل حاصل خواهند شد و مورد استفاده قرار خواهند گرفت در جدول ۲ آورده شده است.

توفان تندری شده است. انواع پارامترسازی های فیزیکی مدل به چند دسته تقسیم می شوند که هر کدام از آنها دارای چند حالت متفاوت است. دسته های مذکور شامل پارامترسازی های فیزیکی مربوط به خرد فیزیک^۱، کومولوس^۲، لایه سطحی^۳، زمین-سطح^۴، لایه مرزی سیاره ای^۵ و تابش جوی^۶ هستند.

شاخص های ناپایداری

شاخصهای ارزیابی پایداری که به شاخصهای ناپایداری معروف می باشند، روابط تجربی می باشند که به کمک آنها می توان مناطق ناپایدار جو را تعیین نمود. استفاده از شاخصهای ناپایداری جهت پیش بینی توفان های تندری توده هوا می باشند که امروزه در جهان مورد توجه بسیاری از هواشناسان قرار گرفته اند. شاخص بالابری^۷ (LI)، یکی از مهمترین شاخص های شناسایی توفان تندری است که برای ارزیابی ناپایداری بسته هوا در سطوح زیرین ورد سپهر (نزدیک سطح زمین) مورد استفاده قرار می گیرد. مقادیر منفی LI نشان از لایه مرزی ناپایدار می باشد و افزایش آن موجب افزایش شناوری منفی شده و به این ترتیب بسته هوا از لایه مرزی صعود می کند. شاخص شوالتز^۸ (SI)، بر اساس ارزیابی شرایط پایداری یا ناپایداری بسته هوا در تراز ۸۵۰ میلی باری تعریف می شود. مقادیر منفی این شاخص نشان می دهد که بخشهای بالایی لایه مرزی تا ورد سپهر میانی ناپایدار است. در چنین شرایطی همرفت رخ می دهد. شاخص K^9 (KI)، از این شاخص برای شناسایی و پیش بینی توفانهایی استفاده می شود که منشأ وقوع آنها توده هوا می باشد. همچنین می توان از آن برای توفانهایی که سازو کارهای دینامیکی ندارند نیز استفاده نمود. معرف احتمال وقوع توفان به صورت تابعی بر حسب آهنگ کاهش قائم دما بین تراز های ۸۵۰ و ۵۰۰

1. Microphysics
3. Surface layer
5. Boundry layer
7. Lifted Index
9. K Index
11. Severe Weather Threat

2. Cumulus
4. Land-surface
6. Radiation
8. Showalter Index
10. Total Totals
12. Convective Available Potential Energy

جدول ۲. شاخص‌های ناپایداری مورد استفاده

شاخص پایداری	آستانه ناپایداری
TT	>۴۴
K Index (KI)	>۳۳
Showalter Index (SI)	>۰
Severe Weather Threat (SWEAT)	>۳۰۰
Lifted Index (LI)	<-۳
CAPE	>۱۰۰۰

روش تحقیق

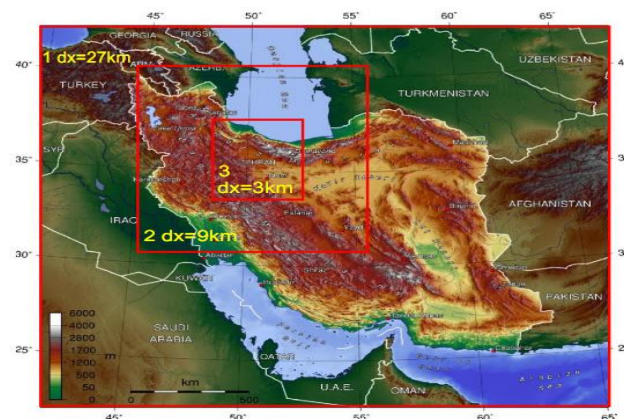
در این تحقیق مدل با چهار پیکربندی مختلف و به صورت پیش‌بینی‌های ۴۸ ساعته اجرا شده است و گام زمانی بین برونداد‌های مدل یک ساعت می‌باشد. از برخی فراسنج‌های بدست آمده از برونداد مدل از قبیل دما، نقطه شبنم و رطوبت نسبی جهت تخمین شاخص‌های ناپایداری جو از قبیل شاخص KI، شاخص LI، شاخص شوالتر (SI)، شاخص مجموع مجموعه‌ها (TT)، شاخص SWEAT و انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی (CAPE) استفاده می‌شود. بدین ترتیب از طریق این شاخص‌ها، پیش‌آگاهی از شرایط ناپایداری در زمان وقوع توفان صورت می‌پذیرد. جهت صحت‌سنجی نتایج مدل، از مقادیر شاخص‌های مذکور که حاصل از مشاهدات در ایستگاه مهرآباد می‌باشند (جدول ۲-۱) در ساعت UTC ۱۲ استفاده می‌شود. در شکل ۲-۱، دامنه‌های انتخابی و در جدول ۲-۳، چهار پیکربندی انتخابی برای اجرای مدل آورده شده است.

میانگین خطای مطلق و میانگین انحراف خطا

در این تحقیق به منظور تعیین صحت مدل، با توجه به مقادیر حاصل از ۴ پیکربندی ذکر شده و رادیوگمانه، دقت هر پیکربندی از طرحواره‌ها با توجه به معیارهای آماری میانگین خطای مطلق (MAE) و میانگین انحراف خطا (MBE) محاسبه شده‌اند. در تعیین صحت مدل با MAE مقدار صفر آن نشان‌دهنده صحت ۱۰ درصد است و هر قدر مقدار آن از صفر فاصله داشته باشد حاکی از کم شدن صحت مدل است. معیار ارزیابی MBE بیانگر میانگین انحراف است. این معیار علاوه بر دارا بودن علامت مثبت (بیش برآوردی مدل) و یا منفی (کم برآوردی مدل) مقدار انحراف از مقادیر رادیوگمانه را نیز نشان می‌دهد.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Z^*(X) - Z(X)|}{n} \quad (1)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Z^*(X) - Z(X))}{n} \quad (2)$$



شکل ۱. دامنه انتخابی برای هر منطقه

جدول ۳. چهار پیکربندی انتخابی و به کار رفته در مدل

طرحواره لایه مرزی سیاره ای	طرحواره زمین - سطح و لایه سطحی	طرحواره تابش جوی بلند و کوتاه	طرحواره کومولوس	طرحواره خرد فیزیک	طرحواره پیکربندی
Mellor- Yamada- Janjic	Noah lsm و Janjic	RRTM و Dudhia	Grell- Devenyi	WSM6	پیکربندی اول
YSU	Noah lsm و MM5 Monin-Obukhov	RRTM و Dudhia	Kain-Fritsch (new Eta)	WSM3	پیکربندی دوم
Mellor- Yamada- Janjic	Noah lsm و Janjic	RRTM و Dudhia	Grell- Devenyi	Thompson	پیکربندی سوم
YSU	Noah lsm و MM5 Monin-Obukhov	RRTM و Dudhia	Betts-Miller- Janjic	Ferrier (new Eta)	پیکربندی چهارم

کومولوس (همرفت) Grell-Devenyi، لایه مرزی Mellor-Yamada-Janjic، تابش جوی بلند RRTM و کوتاه Dudhia، زمین سطح Noah lsm و لایه سطحی Janjic در بررسی و پیش بینی توفان های تندری در ایستگاه تهران- مهرآباد، مقادیر دقیق تری را برای شاخص های مذکور ارائه کرده است. بنابراین در ادامه جهت ارزیابی توانایی مدل در شناسایی شرایط ناپایدار در محیط از برون داد حاصل از این طرحواره استفاده می شود.

بحث و نتایج

در این پژوهش ده مورد توفان تندری توسط مدل-WRF ARW با چهار پیکربندی از طرحواره های فیزیکی بررسی شدند و مقادیر شاخص های LI، SI، KI، TT، SWEAT، CAPE و توسط مدل برای هر یک از پیکربندی ها محاسبه گردید. میانگین خطای مطلق و میانگین انحراف خطای هر یک از شاخص ها محاسبه شده است (جدول ۳-۱). با توجه به نتایج، پیکربندی سوم با پارامترسازی های فیزیکی شامل خرد فیزیک Thompson،

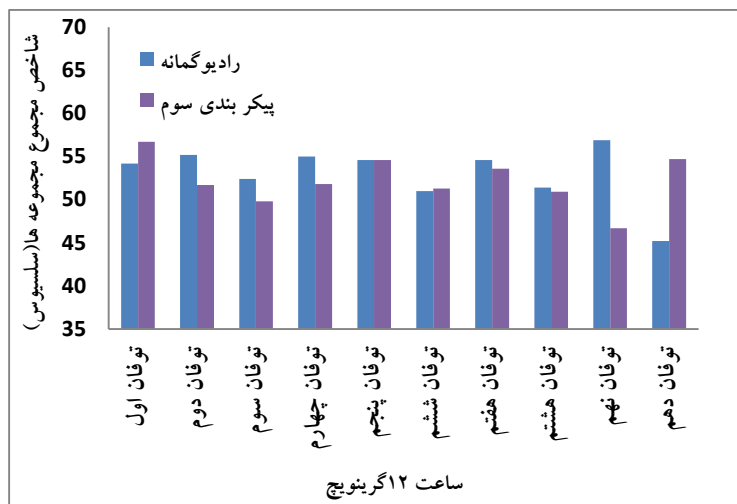
جدول ۴. میانگین خطای مطلق و میانگین انحراف خطای شاخص‌های
SI, LI, SWEAT و CAPE حاصل از برون‌داد مدل با ۴ پیکربندی

پارامتر سازی های فیزیکی		پیکربندی ۱	پیکربندی ۲	پیکربندی ۳	پیکربندی ۴
میانگین خطای مطلق (MAE)	TT	۳/۶۸	۴/۰۵	۳/۳۳	۳/۵۶
	K	۵	۵/۳۶	۴/۳۷	۴/۰۹
	SI	۲/۵۳	۲/۶۳	۲/۲	۲/۱
	LI	۲/۸۵	۲/۷۵	۲/۵۵	۲/۵۹
	SWEAT	۸۶/۲۲	۸۸/۸۱	۸۵/۹۸	۸۰/۴۸
	CAPE	۲۹۵/۳	۳۰۹/۷	۳۲۱/۱	۲۶۰
پارامتر سازی های فیزیکی		پیکربندی ۱	پیکربندی ۲	پیکربندی ۳	پیکربندی ۴
میانگین انحراف خطا (MBE)	TT	-۰/۹۲	-۱/۷۷	-۰/۸۷	-۱/۷۲
	K	-۲/۱۶	-۱/۷۲	-۱/۰۳	-۱/۷۷
	SI	۰/۸۸	۱/۳۱	۰/۹۹	۱/۴
	LI	۱/۰۹	۱/۴۹	۰/۹۹	۱/۹۹
	SWEAT	۴۷/۶۸	۴۶/۸۹	۴۲/۵۴	۲۶/۷۴
	CAPE	-۸۷/۵	-۱۷۱/۳	-۳۶/۱	-۱۷۸

شاخص TT :

با توجه به شکل (۳-۱)، تخمین مقدار شاخص TT در ساعت ۱۲ UTC توسط مدل، برای پنج مورد توفان به صورت پائین برآورد صورت گرفته است که به طور کلی دارای میانگین انحراف خطا ۰/۸۷- می باشد. بر طبق آستانه های تعریف شده در دو مورد احتمال رخداد ضعیف توفان، در هفت مورد احتمال رخداد متوسط و در یک مورد نیز احتمال شدید توفان را پیش بینی می کند. در این ساعت شاخص TT با میانگین خطای مطلق ۳/۳۳ در پنج توفان با

بیش برآوردی مدل همراه است و رادیوگمانه نیز در شش مورد احتمال رخداد متوسط توفان را بیان می کند. در این ساعت در دو مورد مدل با رادیوگمانه در شبیه سازی و پیش بینی توفان اختلاف قابل توجهی داشته است. در توفان نهم، رادیو گمانه با مقدار ۵۶/۹ نسبت به مدل با مقدار ۴۶/۶ در وضعیت خوبی است ولی در توفان دهم، شاخص TT حاصل از رادیوگمانه با مقدار ۴۵/۲ نسبت به مقدار ۵۱/۷ حاصل از برون‌داد مدل، عملکرد خوبی نداشته است.

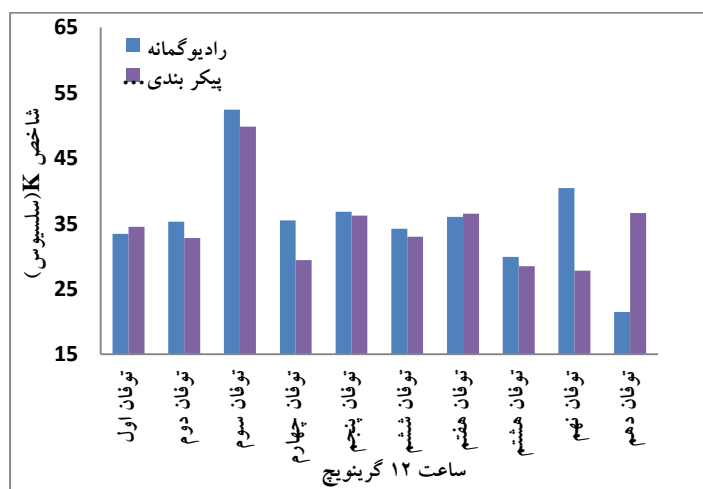


شکل ۲. شاخص مجموع مجموعه‌ها حاصل از برون‌داد مدل و رادیوگمانه مربوط به ده توفان تندری در ساعت ۱۲ گری‌نویچ.

دو توفان با احتمال رخداد ۱۰۰٪، در سه مورد با احتمال رخداد ۸۰ تا ۹۰٪، در سه توفان با احتمال رخداد ۶۰ تا ۸۰٪ و در سه مورد نیز احتمال رخداد ۴۰ تا ۶۰٪ توفان را بیان می‌کند. در این ساعت در دو مورد مدل با رادیوگمانه در شبیه‌سازی و پیش‌بینی توفان اختلاف قابل توجهی داشته است. در توفان نهم، رادیوگمانه با مقدار ۴۰/۴ نسبت به مدل با مقدار ۲۷/۸ در وضعیت خوبی است ولی در توفان دهم، شاخص K حاصل از رادیوگمانه با مقدار ۲۱/۵ نسبت به مقدار ۳۶/۶ حاصل از برون‌داد مدل، عملکرد خوبی نداشته است.

شاخص K:

همانطور که در شکل (۲-۳) مشاهده می‌شود، مقدار شاخص K در این ساعت توسط مدل، برای هفت مورد توفان به صورت پائین برآورد صورت گرفته است که به طور کلی دارای میانگین انحراف خطا ۱/۰۳- می‌باشد و این شاخص در یک مورد با احتمال رخداد ۱۰۰٪ توفان، در سه مورد با احتمال رخداد ۸۰ تا ۹۰٪، در سه توفان با احتمال رخداد ۶۰ تا ۸۰٪ و در سه مورد نیز با احتمال رخداد ۴۰ تا ۶۰٪ توفان را پیش‌بینی می‌کند. در این ساعت شاخص K با میانگین خطای مطلق ۴/۳۷ در سه توفان با بیش برآوردی مدل همراه است و رادیوگمانه نیز در

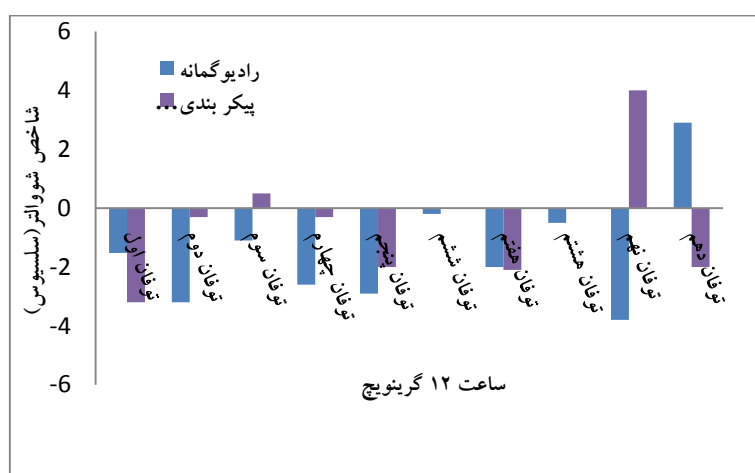


شکل ۳. شاخص K حاصل از برون‌داد مدل و رادیوگمانه مربوط به ده توفان تندری در ساعت ۱۲ گری‌نویچ.

شاخص SI :

احتمال رخداد ضعیف یا متوسط توفان را بیان می‌کند و در یک مورد نیز احتمال رخداد جوی پایدار را پیش بینی می‌کند. در این ساعت در دو مورد مدل با رادیوگمانه در شبیه سازی و پیش بینی توفان اختلاف قابل توجهی داشته است. در توفان نهم، رادیو گمانه با مقدار $3/8^{\circ}C$ - نسبت به مدل با مقدار $4^{\circ}C$ در وضعیت خوبی است ولی در توفان دهم، شاخص SI حاصل از رادیوگمانه با مقدار $2/9^{\circ}C$ نسبت به مقدار $2^{\circ}C$ - حاصل از برون داد مدل، عملکرد خوبی نداشته است.

در شکل (۳-۳) برآورد شاخص SI در ساعت ۱۲ UTC توسط مدل، برای هفت مورد توفان به صورت پائین برآورد صورت گرفته است که به طور کلی دارای میانگین انحراف خطا $0/99$ می باشد. براین اساس در هشت مورد احتمال رخداد ضعیف یا متوسط توفان و در دو مورد نیز احتمال رخداد جوی پایدار را پیش بینی می‌کند. در این ساعت شاخص SI با میانگین خطای مطلق $2/2$ در سه توفان با بیش برآوردی مدل همراه است و رادیوگمانه نیز در نه مورد

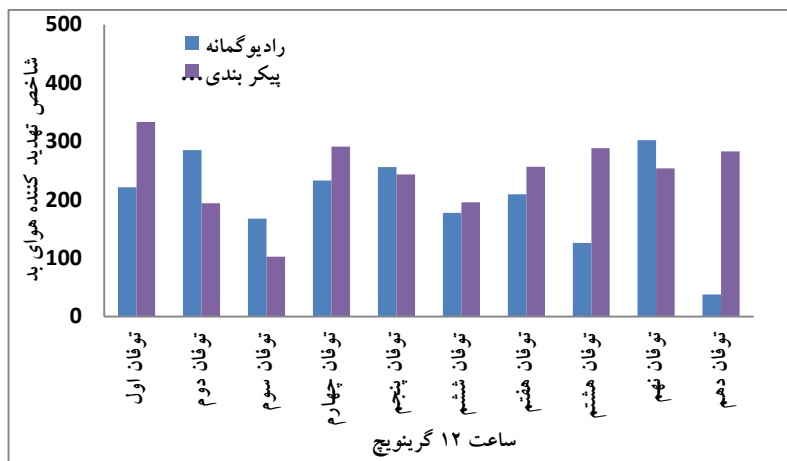


شکل ۴. شاخص شوالتر حاصل از برون داد مدل و رادیوگمانه مربوط به ده توفان تندی در ساعت ۱۲ گریجویچ.

مورد احتمال رخداد متوسط توفان، در هفت مورد نیز احتمال رخداد ضعیف و در دو مورد هم جوی پایدار را پیش بینی می‌کند. در این ساعت در دو مورد مدل با رادیوگمانه در شبیه سازی و پیش بینی توفان اختلاف قابل توجهی داشته است. در توفان هشتم، رادیو گمانه با مقدار 126 نسبت به مدل با مقدار $288/4$ و در توفان دهم نیز شاخص SWEAT حاصل از رادیوگمانه با مقدار 38 نسبت به مقدار $282/6$ حاصل از برون داد مدل، وضعیت خوبی نداشته است و مدل در شبیه سازی و پیش بینی توفان عملکرد بهتری داشته است.

شاخص SWEAT :

همانطور که در شکل (۳-۴) مشاهده می‌شود، تخمین مقدار شاخص SWEAT در ساعت ۱۲ UTC توسط مدل، برای چهار مورد توفان به صورت پائین برآورد صورت گرفته است که به طور کلی دارای میانگین انحراف خطا $42/54$ می باشد و در یک مورد احتمال رخداد متوسط توفان، در هشت مورد احتمال رخداد ضعیف و در یک مورد هم جوی پایدار را پیش بینی می‌کند. در این ساعت شاخص SWEAT با میانگین خطای مطلق $85/98$ در شش توفان با بیش برآوردی مدل همراه است و رادیوگمانه نیز در یک

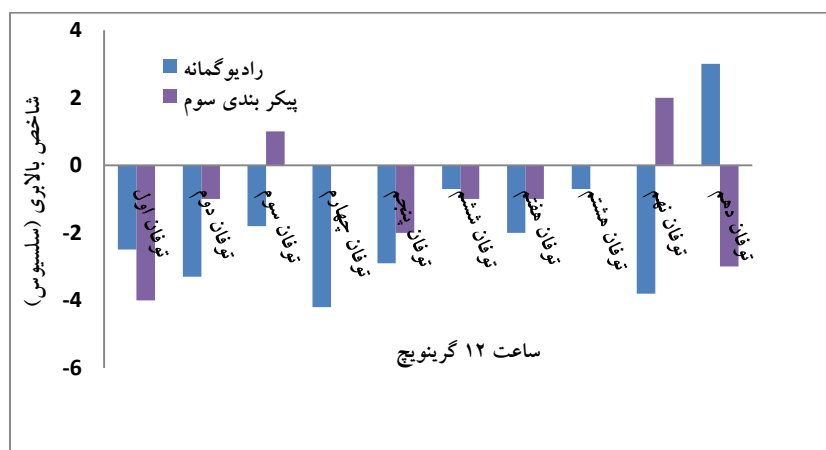


شکل ۵. شاخص تهدید کننده هوای بد حاصل از برون داد مدل و رادیوگمانه مربوط به ده توفان تندری در ساعت ۱۲ گرینویچ.

شاخص LI :

رخداد ضعیف یا متوسط، در شش مورد احتمال رخداد رگبار باران و در یک مورد نیز احتمال رخداد جوی پایدار را پیش بینی می کند. در این ساعت در دو مورد مدل با رادیوگمانه در شبیه سازی و پیش بینی توفان اختلاف قابل توجهی داشته است. در توفان نهم، رادیو گمانه با مقدار $2^{\circ}C$ $3/8-$ نسبت به مدل با مقدار $2^{\circ}C$ در وضعیت خوبی است ولی در توفان دهم، شاخص LI حاصل از رادیوگمانه با مقدار $3^{\circ}C$ نسبت به مقدار $3^{\circ}C-$ حاصل از برون داد مدل، عملکرد خوبی نداشته است.

در شکل (۳-۵) در ساعت ۱۲ UTC شاخص LI با میانگین خطای مطلق $2/55$ در هفت توفان با بیش برآوردی مدل همراه است و برای مقدار شاخص LI در همین ساعت توسط مدل، برای سه مورد توفان به صورت پائین برآورد صورت گرفته است که به طور کلی دارای میانگین انحراف خطا $0/99$ می باشد. براین اساس در دو مورد احتمال رخداد ضعیف یا متوسط توفان، در شش مورد احتمال رخداد رگبار و در دو مورد نیز احتمال رخداد جوی پایدار را پیش بینی می کند. و رادیوگمانه نیز در سه توفان احتمال



شکل ۶. شاخص بالابری حاصل از برون داد مدل و رادیوگمانه مربوط به ده توفان تندری در ساعت ۱۲ گرینویچ.

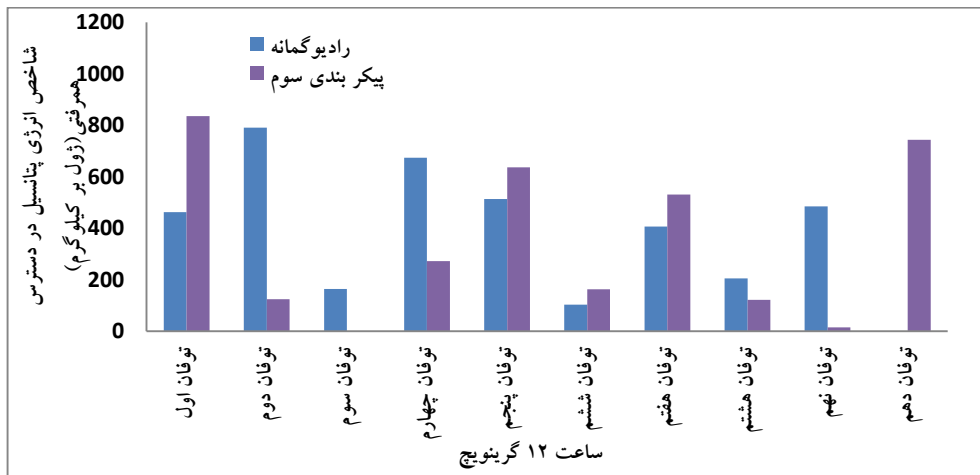
شاخص CAPE+ :

برای پنج مورد توفان به صورت پائین برآورد صورت گرفته است که به طور کلی دارای میانگین انحراف خطا $36/1-$ می باشد. براین اساس در چهار مورد احتمال رخداد ضعیف

همانطور که در شکل (۳-۶) مشاهده می شود تخمین مقدار شاخص CAPE+ در ساعت ۱۲ UTC توسط مدل،

با رادیوگمانه در شبیه‌سازی و پیش‌بینی توفان اختلاف قابل توجهی داشته است. در توفان نهم، رادیوگمانه با مقدار 485 j/kg نسبت به مدل با مقدار 15 j/kg در وضعیت خوبی است ولی در توفان دهم، شاخص $\text{CAPE}+$ حاصل از رادیوگمانه با مقدار 0 j/kg نسبت به مقدار 744 j/kg حاصل از برون‌داد مدل، عملکرد خوبی نداشته است.

توفان، در شش مورد نیز احتمال رخداد جوی پایدار را پیش‌بینی می‌کند. در این ساعت شاخص $\text{CAPE}+$ با میانگین خطای مطلق $321/1$ در پنج توفان با بیش برآوردی مدل همراه است و رادیوگمانه نیز در شش مورد احتمال رخداد ضعیف توفان و در چهار مورد نیز احتمال رخداد جوی پایدار را پیش‌بینی می‌کند. در این ساعت در دو مورد مدل



شکل ۷. شاخص انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی حاصل از برون‌داد مدل و رادیوگمانه مربوط به ده توفان تندی در ساعت ۱۲ گرینویچ.

رخداد توفان شدید، 60% توفان متوسط و در 10% نیز رخداد توفان ضعیف را پیش‌بینی نموده است. در همین ساعت شاخص K از ده مورد توفان، یک مورد را با 100% احتمال رخداد، سه مورد را با 80% احتمال رخداد، سه مورد را با 75% احتمال و در سه مورد دیگر را نیز با 55% احتمال رخداد توفان پیش‌بینی کرده است. شاخص SI نیز در 30% موارد احتمال رخداد ناپایداری متوسط، در 40% احتمال ناپایداری ضعیف و در 20% موارد نیز احتمال رخداد جوی پایدار را در ساعت 12 UTC پیش‌بینی می‌کند. شاخص LI حاصل از برون‌داد مدل در ساعت 12 UTC نیز در 20% موارد احتمال رخداد متوسط توفان، در 60% احتمال ضعیف رگبار باران و در 20% نیز احتمال جوی پایدار و در همین ساعت شاخص $\text{CAPE}+$ در 40% موارد احتمال ضعیف توفان و در 60% نیز احتمال رخداد جوی پایدار را پیش‌بینی کرده است. در مورد شاخص SWEAT با توجه به نتایج به نظر می‌رسد از این شاخص برای

نتیجه‌گیری

بررسی و پیش‌بینی توفان تندی همواره از موضوعات مورد توجه پیش‌بین‌ها در مرکز پیش‌بینی سازمان هواشناسی می‌باشد، بنابراین پیش‌بینی به موقع آن می‌تواند خسارت‌های ناشی از این پدیده را کاهش دهد. از این رو در این مقاله به بررسی و مطالعه ده مورد توفان تندی به کمک برخی شاخص‌های ناپایداری حاصل از برون‌داد مدل پرداخته شد. با توجه به نتایج، پیکربندی از طرحواره‌های فیزیکی شامل خرد فیزیک: Thompson، کومولوس (همرفت): Grell-Devenyi، لایه مرزی: Mellor-Yamada-Janjic، تابش جوی بلند: RRTM و کوتاه: Dudhia، زمین سطح: Noah lsm و لایه سطحی: Janjic در بررسی و پیش‌بینی توفان‌های تندی در ایستگاه مهرآباد، مقادیر دقیق‌تری را برای شاخص‌های ناپایداری ارائه کرده است، به طوریکه شاخص TT حاصل از برون‌داد مدل در ساعت 12 UTC در 30% موارد احتمال

THE SIMULATION OF HEAVY RAINFALL EVENT AT BHUR IN BHUTAN-A CASE STUDY, SAARC Meteorological Research Center (SMRC).

8. Prosenjit Chatterjee, D and Pradhan, De. U.K., 2008, Simulation of local severe storm mesoscale model MM5. Indian Journal of Radio & Space Physics, Vol. 37, PP. 419-433.
9. Sánchez, J.L., Marcos, J.L., Dessens, J., López, L., Bustos, C., García-Ortega, E, 2009, Assessing sounding-derived parameters as storm predictors in different latitudes. Atmos. Res. 93, 446-456.
10. Tajbakhsh, Sahar; Ghafarian, Parvin and Mirzaee, Ebrahim, 1387, a method for predicting thunderstorms event with two case studies, Space Physics Journal, Volume 35, Number 4, 1388, page 147-166.
11. Yusuke Yamane, Taiichi Hayashi and Ashraf Mahmood Dewan, Fatima Akter, 2010, Severe local convective storms in Bangladesh: Part II, Environmental conditions, Atmospheric Research, NO. 95, PP. 407-418.
12. Zepka, G.S., Pinto, Jr and Saraiva, A.C.V., 2012, INFLUENCE OF INITIAL CONDITIONS ON LIGHTNING FORECASTING USING THE WRF MODEL. 22nd International Lightning Detection Conference, 4th International Lightning Meteorology Conference.
13. Zepka, G and Pinto Jr, O.S., 2010, A METHOD TO IDENTIFY THE BETTER WRF PARAMETERIZATIONS SET TO DESCRIBE LIGHTNING OCCURRENCE. 21st International Lightning Detection Conference. 3rd International Lightning Meteorology Conference.

بررسی توفان‌های بسیار شدید استفاده می‌شود که البته نیاز به مطالعه بیشتری در این خصوص دارد.

منابع

1. Gallus, W.A and Pfeifer, M., 2008, Intercomparison of simulations using 5 WRF microphysic Schemes with dual-Polarization data for a German squall line. Advances in Geosciences, NO.16, PP. 109-116.
2. Institute of Meteorology, 1388, final report project acts material forecast model WRF, pages 4 and 73.
3. Qandahari, SH; Meshkvaty, and Mazrae Farahani, M., 1385, to evaluate the performance of a scale model MM5 to simulate rainfall showers, conference numerical weather prediction, 1385.
4. LITTA, A., Mohanty, J, Sumam Mary, U and Idicula, C, 2012, The diagnosis of severe thunderstorms with high-resolution WRF model. J. Earth Syst. Sci. 121, NO. 2, 2012, PP. 297-316, Indian Academy of Sciences.
5. Litta, A.J and Mohanty, U.C, 2011, A Comparative Study of Convective Parameterization Scheme in WRF-NMM Model. International journal of Computer Application (0975-8887), Volume 33-NO.6.
6. López, L., Sánchez, J.L., 2009, Discriminant methods for radar detection of hail. Atmos. Res. 93, 358-368
7. Majajul Alam Sarker, Md and Debsarma, Sujit, K, 2011, WRF MODEL PERFORMANCE FOR