

بررسی شدت، مدت و نوع توفان‌های تندری سیلاب‌ساز در آذربایجان شرقی با استفاده از تصاویر رادار تبریز

فروزان ارکیان، مهناز کریم‌خانی* و پری‌سیما کتیرائی بروجردی
گروه هواشناسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۵/۱۶

۱۳۹۲/۰۴/۱۴

تاریخ دریافت:

چکیده

توفان‌های تندری سیلاب‌ساز در نواحی شمال غربی ایران خصوصاً استان آذربایجان شرقی در سال‌های اخیر سبب جاری شدن سیل در این مناطق شده و خسارت شدیدی از نظر جانی و مالی در این منطقه ایجاد کرده است. در این پژوهش سعی بر آن شده که روش‌های نوین و دقیق تری جهت آگاهی از نوع این توفان‌ها بدست آید. با توجه به گزارش‌های هواشناسی، پنج مورد بارش سیل آسا که مجموعاً شامل بیست سلول بارشی در مناطق تحت پوشش رادار تبریز بودند، استخراج گردید. برای تشخیص نوع، مدت و شدت توفان تندری از تصاویر بیشینه بازتاب راداری و سطح مقطع قائم آن استفاده شد. علاوه بر آن، با استفاده از داده‌های بدست آمده جو بالا از گمانه‌زنی‌ها و داده‌های GFS با قدرت تفکیک پذیری نیم درجه، شاخص‌های ناپایداری مناسب برای تشخیص توفان‌های تندری از قبیل، شاخص K، شاخص شوالتر، شاخص مجموع مجموعه‌ها، انرژی پتانسیلی در دسترس همرفتی، آب بارش شو، عدد ریچاردسون توده‌ای، شاخص هلیسیتی، شاخص انرژی-هلیسیتی و چینش قائم باد نیز مورد ارزیابی قرار گرفتند. بررسی‌ها نشان داد که اکثر توفان‌های تندری سیلاب‌ساز در منطقه تحت پوشش رادار تبریز در آذربایجان شرقی از نوع تک سلولی و چند سلولی می‌باشند که پس از حرکت و ادغام با یک دیگر تشکیل سلول‌های پیچیده را می‌دهند.

واژگان کلیدی

سیل، توفان تندری، رادار هواشناسی، شاخص‌های ناپایداری، آذربایجان شرقی

مقدمه

از جنبه های مجهول و مبهم این تحقیق، نامشخص بودن نوع دقیق این پدیده در منطقه می باشد. تعیین نوع توفان های تندرین دشار بوده ولی از آنجا که در سال های اخیر، شبکه راداری کشور راه اندازی و شروع به کار کرده است، می توان با بهره جویی از تصاویر این سامانه، نوع توفان را تعیین کرد. با استفاده از میزان بازتاب پرتو رادار (تصاویر بازتاب)، شدت و مدت بارش ابر توفان را قابل تشخیص است. همچنین جهت تعیین نوع توفان های تندرین از برش عمودی (Vertical cut) تصاویر بازتاب نیز استفاده شده است. این نوع نمایش، جزئیات ساختار قائم را نشان می دهد و برای تشخیص توفانهای شدید، تگرگ و باند درخشان مورد استفاده قرار می گیرد. تحقیق حاضر با هدف بررسی شدت، مدت و نوع توفان های تندرین سیلاب ساز در استان آذربایجان شرقی با استفاده از برخی از شاخص ها و تصاویر راداری در مناطق تحت پوشش رادار تبریز انجام گرفته است. شناخت سازوکار تشکیل و توسعه این توفان ها می تواند کمک فراوانی در جهت کاهش خسارات و افزایش سطح بهره وری محصولات کشاورزی و ... را در استان فراهم کند.

مواد و روش ها

۱) داده ها

در گام نخست این پژوهش، روزهایی را که توفان تندرین سیل آسا در ایستگاه های همدیدی تحت پوشش رادار تبریز گزارش شده شناسایی شدند. در مجموع، پنج مورد توفان تندرین همراه با سیل در سال های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ در منطقه رخ داده بود که مجموعاً شامل بیست سلول بارشی بودند. تصاویر راداری برای این روزها با فواصل زمانی ۱۵ دقیقه از بایگانی سازمان هواشناسی استخراج شد، آن ها شامل بیشینه بازتاب راداری و سطح مقطع قائم آن می باشد. با استفاده از این داده ها می توان رشد قائم و تعداد سلول های بارشی را در توفان تندرین بدست آورد. سپس با استفاده از نمودارهای ترمودینامیکی و داده های (General Forecast System) GFS با قدرت تفکیک پذیری نیم درجه، شاخص های K، شوالتر (SI)، مجموع مجموعه ها (TT)، انرژی پتانسیلی در دسترس همرفتی (CAPE)، عدد ریچاردسون توده ای (BRN)، هلیسیتی (SRH)، انرژی- هلیسیتی (EHI)، چپش قائم باد (Vertical Wind Shear) و آب بارش شو (PW) نیز بدست می آید. در تحقیق حاضر، معیار تشخیص نوع توفان تندرین با شاخص ها، بر اساس نتایج پژوهش Rasmussen & Blanchard (1998) انجام شده است.

۲) شاخص های ناپایداری

● شاخص k (k index): با استفاده از آن می توان پتانسیل توفان تندرین را براساس وضعیت قائم دما و میزان وسعت قائم رطوبت در سطوح پایین جو سنجید. معرف احتمال وقوع توفان تندرین به صورت تابعی از آهنگ کاهش قائم دما بین ترازهای ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتو پاسکال، محتوای بخار آب در تراز ۸۵۰ هکتو پاسکال (برحسب دمای نقطه شبنم) و عمق لایه رطوبت در تراز ۷۰۰ میلی باری می باشد و طبق رابطه زیر بدست می آید:

$$KI = (T_{850hPa} - T_{500hPa}) + T_{d(850hPa)} - (T_{700hPa} - T_{d(700hPa)}) \quad (1)$$

درصد) و برای $k > 40$ بیانگر امکان وقوع توفان های تندرین همراه با باران خیلی سنگین (با احتمال تا ۹۰ درصد به بالا) می باشد.

● شاخص شوالتر (Showalter index): بر رابطه بین دمای خشک و دمای نقطه شبنم تراز ۸۵۰ هکتو پاسکالی و دمای خشک تراز ۵۰۰ هکتو پاسکالی گذارده شده است و از تفاوت دمای محیط در تراز ۵۰۰ هکتو پاسکالی با دمای بسته

یکی از پدیده های مؤثر در تولید رواناب و سیلاب در بیشتر عرض های جغرافیایی رخداد توفان های تندرین در مقیاس محلی تا منطقه ای (میان مقیاس) است. توفان های تندرین اغلب از نظر زمانی و مکانی دارای ابعاد میان مقیاس می باشند بنابراین با توجه به قدرت تفکیک داده های هواشناسی، تشخیص این پدیده ها به راحتی امکان پذیر نیست. رادارهای هواشناسی به دلیل پوشش نسبتاً وسیع مکانی و دیدبانی، بهترین ابزار برای تشخیص توفان تندرین می باشند. توفان تندرین پدیده ای است که به دلیل نرخ بارش بالا ممکن است سبب ایجاد سیل شود. این توفان ها شامل انواع مختلفی از قبیل تک سلولی (Single cell)، چند سلولی (Multi cell)، ابرسلولی (Super cell) و خط تندوزه (Squall line) می باشند که هر کدام از آن ها، شدت، مدت و همچنین دیگر ویژگی های خاص خود را به همراه دارند که با استفاده از شاخص های ناپایداری نظیر انرژی پتانسیلی در دسترس همرفتی، عدد ریچاردسون توده ای، شاخص هلیسیتی، شاخص انرژی- هلیسیتی، چپش قائم باد و همچنین تصاویر راداری قابل تفکیک می باشند. رشد قائم زیاد در ابر سلول ها سبب رشد بیشتر قطرک های ابر و در نتیجه ایجاد بارش های رگباری سنگین و در برخی موارد تشکیل تگرگ های درشت می گردد (Doswell et al., 1996).

Doswell & Johns (1992) به بررسی توفان های تندرین با استفاده از داده های هواشناسی از ایستگاه های همدیدی، ماهواره و رادار پرداخته اند. Rasmussen & Blanchard (1998) به بررسی نوع توفان های تندرین با استفاده از برخی شاخص ها از قبیل چپش قائم باد، انرژی پتانسیلی در دسترس همرفتی، هلیسیتی، انرژی- هلیسیتی، شاخص تلاوی (Vorticity Index)، سرعت باد و عدد ریچاردسون توده ای پرداختند و توانستند توفان های ابر سلولی را از بقیه توفان ها تشخیص دهند. Knupp & Stalker (2002) به بررسی توفان تندرین چند سلولی با استفاده از داده های رادار داپلری و شاخص های انرژی پتانسیلی در دسترس همرفتی، جریان هوای بالارونده آستانه ای، عمق ابر لایه ای آستانه ای، منطقه جریان هوای بالارونده آستانه ای و منشأ سلولی پرداختند. Byko و همکاران (2009) به بررسی یک توفان تندرین ابر سلولی با استفاده از رادارهای سیار و شبیه سازی عددی با تفکیک بالا پرداختند. هسته های بازتابی نزولی (Descending Reflectivity Cores) در این توفان قبل از رشد کامل آن، سبب گردش در سطح پائین شده است که این شرایط سبب تشکیل پژواک های چنگکی (Hook echo) می شود که شاید شناخته شده ترین مشخصه ابرسلولها توسط رادار باشند. Donaldson (1981) به اندازه گیری نیم رخ های بازتاب راداری در توفان های تندرین پرداخته است. تفاوت های بازتاب راداری میان رگبار تگرگ و باران در ارتفاعات پائین، اندک است ولی در بخش های میانی و بالایی قابل توجه می باشد. توفان های تندرین تولید کننده پیچند، بی هنجاری های قابل توجهی را در بازتاب در ارتفاعات بالا آشکار می کنند. افزایش بازتاب در نیم رخ، متناسب با افزایش شدت توفان تندرین است.

این شاخص برای $k < 30$ بیانگر امکان وقوع توفان تندرین همراه با باران (با احتمال تا ۴۰ درصد)، $k > 30$ بیانگر امکان وقوع توفان تندرین خیلی زیاد و بهترین پتانسیل لازم برای وقوع توفان های تندرین همراه با باران سنگین و هوای بد (با احتمال تا ۸۰

● شاخص مجموع مجموعه ها (Total total index)

(index): از دو جزء مجموع قائم و مجموع افقی تشکیل شده است. مجموع قائم نشان‌دهنده پایداری ایستایی (Static Stability) بین تراز ۸۵۰ هکتو پاسکال و ۵۰۰ هکتو پاسکال است و مجموع افقی شامل تشکیل نقطه شبنم در تراز ۸۵۰ هکتو پاسکال می‌باشد و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$TT = T_{850hPa} + T_{d(850hPa)} - 2(T_{500hPa})$$

جهت قائم و یا میزان کاری که یک بسته روی محیط انجام می‌دهد را نشان می‌دهد. سطح مثبت در نمودارهای ترمودینامیکی می‌باشد که محدوده بین منحنی صعود بسته هوا (که به صورت بی درروی مرطوب از تراز همرفتی آزاد (LFC) تا تراز تعادل (EL) حرکت کرده)، و منحنی دمای محیط را نشان می‌دهد (Moncrieff & Green, 1972) و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

(۴)

$$CAPE = \int_{LNB}^{LFC} R_d(T_{vp} - T_v) dl np - \int_{LFC}^{LCL} R_d(T_v - T_{vp}) dl np$$

برای توفان‌های تندری چند سلولی بین ۱۵-۵ متر بر ثانیه و برای توفان‌های تندری ابرسلولی در محدوده ۲۱-۱۱ متر بر ثانیه می‌باشد.

● عدد ریچاردسون توده ای (Bulk Richardson number)

(number): برای تعیین نوع توفان‌های تندری مطلوب می‌باشد و در آن از دو عامل مهم در تعیین، توسعه و تکامل توفانها یعنی انرژی پتانسیلی در دسترس همرفتی و چینش قائم باد به صورت یک شاخص استفاده شده است که به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$BRN = \frac{CAPE}{(0.5 \times (u_{6km} - u_{500m})^2)}$$

● شاخص هلیسیتی (Helicity): بعنوان یک شاخص برای تعیین نوع توفان‌های تندری مورد استفاده قرار می‌گیرد. Davies (1984) رابطه زیر را برای محاسبه هلیسیتی بیان کردند:

$$SRH = - \int_0^h k \cdot (V - C) \times \frac{\partial V}{\partial z} dz$$

۲۰۸ < SRH < ۶۴ دارند و اغلب ابرسلول‌ها با نشانه‌های پیچند، هلیسیتی بیشتر از ۲۰۰ متر مربع بر مجذور ثانیه دارند.

● شاخص انرژی - هلیسیتی (Energy - Helicity index)

(Helicity index): برای پیش بینی نوع توفان‌های تندری استفاده می‌گردد. Hart & Kortky (1991) شاخص انرژی-هلیسیتی را به صورت رابطه زیر تعریف کردند:

$$EHI = \frac{(CAPE)(SRH)}{1.6 \times 10^5}$$

آب بارش شو (Precipitable water): مقدار آب چگالیده شده موجود در یک ستون هوای نمناک می‌باشد که برحسب سانتی متر یا میلی متر بیان می‌شود. آب بارش شو به صورت جرم بخار آب موجود در ستونی از هوا به سطح مقطع S از سطح زمین

صعود کننده در تراز ۵۰۰ هکتو پاسکالی از رابطه زیر بدست می‌آید.

(۲)

$$SI = T_{500} - T_{500}^*$$

هرقدر این شاخص مثبت تر باشد، پایداری جو بیشتر بوده و هرقدر منفی تر باشد شدت ناپایداری جو بیشتر خواهد بود.

(۳)

هرقدر مقدار این شاخص از مقدار ۴۵ بزرگتر باشد امکان بروز توفان تندری بیشتر خواهد بود.

● انرژی پتانسیلی در دسترس

همرفتی (Convective available potential energy)

(energy): یکی از بهترین شاخص‌ها برای نشان دادن ناپایداری جو و بهترین ابزار برای پیش بینی توفان ابرسلولی می‌باشد (Moncrieff & Miller, 1976). میزان انرژی شنواری قابل دسترسی برای شتاب دادن به بسته هوا در

p فشار، T_v دمای مجازی، T_{vp} دمای مجازی بی دررو، R_d ثابت گازها برای هوای خشک می‌باشد. این شاخص برای مقادیر کوچکتر از صفر، پایداری جو را نشان داده و هر چه مقدار آن از صفر بزرگتر شود، ناپایداری در منطقه شدیدتر می‌شود. رشد قائم سلول نشان‌دهنده وجود شرایط عمیق در داخل ابر می‌باشد که توسط شاخص انرژی پتانسیلی در دسترس همرفتی سنجیده می‌شود.

● چینش قائم باد تا ۶ کیلومتری (Vertical wind shear)

(shear): مقدار چینش، میان باد میانگین ۵۰۰-۰ متری بالای سطح زمین و باد ۶ کیلومتری از سطح زمین را بیان می‌کند و

(۵) طبق پژوهش‌های Weisman & Klemp (1982) سلولهای با $BRN < 50$ ابرسلولی و با $BRN > 50$ چندسلولی می‌باشند.

(۶)

که در آن V سرعت افقی بر حسب متر بر ثانیه، C بردار حرکت توفان متر بر ثانیه و h ارتفاع مورد نظر برحسب متر می‌باشد. هلیسیتی پارامتر قابل توجهی برای تشخیص چینش قائم باد تا ارتفاع ۶ کیلومتری می‌باشد. نیمی از توفان‌های تندری غیر ابرسلولی، هلیسیتی کوچکتر از ۱۰۰ متر مربع بر مجذور ثانیه دارند و نیمی از ابرسلول‌های بدون نشانه پیچند نیز

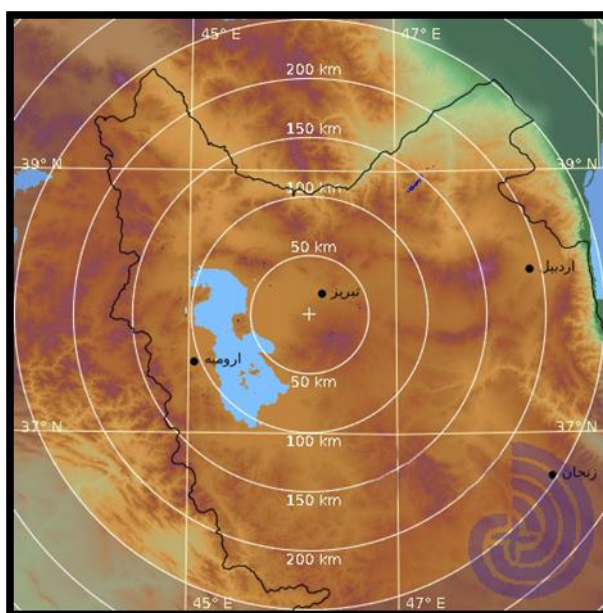
(۷)

مقادیر بزرگتر از یک بیانگر پتانسیل کافی برای تشکیل نوع ابرسلولی و مقادیر بزرگتر از ۲ بیشترین احتمال را برای تشکیل نوع ابرسلولی خواهند داشت.

خشک با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد است. سرمای زمستانی، از ارتفاع بالا و عارضه نگاری کوهستانی منطقه تأثیر می‌پذیرد. رادار هواشناسی تبریز در شهرک سهند اسکو نصب و راه اندازی شده که در نوار بسامد رادارهای داپلری نوع C کار می‌کند و برای پیش بینی های کوتاه مدت، بارندگی و سیل و پیش بینی هوانوردی و جاده ای قابل استفاده است. مناطق تحت پوشش رادار تبریز در عرض جغرافیایی ۳۵ تا ۴۰ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۳ تا ۴۹ درجه شرقی می‌باشد (شکل ۱). مشخصات رادار تبریز در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات رادار هواشناسی تبریز

مدل رادار	Metero 1500C	برد آنتن	به شعاع ۲۰۰-۲۵۰ کیلومتر
دوقطبی		قطر آنتن	۸ متر
زاویه چرخش افقی	۰ تا ۳۶۰ درجه	ارتفاع دکل رادار	۱۸ متر
ارتفاع از سطح زمین	۱۶۴۰ متر	فرکانس عملیاتی	۵/۶۲ گیگاهرتز بر ثانیه
زاویه چرخش عمودی	۲- تا ۱۸۲ درجه	سرعت چرخش افقی / قائم	قابل تنظیم تا ۶ درجه بر ثانیه
توان ارسالی	۲۵۰ کیلووات		

شکل ۱- نقشه مناطق تحت پوشش رادار تبریز (مأخذ <http://radar.irimo.ir>)

منطقه شدند، در نهایت کلیه ابرهای همرفتی در یک امتداد قرار گرفته و تشکیل یک خط همرفتی در ساعت ۱۳:۰۰ UTC دادند. تشخیص هر یک از توفان های تندری (سلول های بارشی) براساس میزان بازتاب راداری آن ها با آستانه ۴۰ dBZ در نظر گرفته شد که با حروف A-Q نام گذاری شدند. در این تحقیق جهت اختصار، شدت بازتاب رادار، شدت بیان می‌شود. با بررسی سطح مقطع قائم بازتابش راداری، کلیه توفان های تندری به غیر از دو سلول A و J در زمان تشکیل از نوع تک سلولی می‌باشند. شدت سلول های بارشی A و J در حدود ۷۰ dBZ است که این مقدار بیانگر پتانسیل بارش تگرگ در منطقه توسط این دو توفان تندری می‌باشد. اغلب سلول های شکل گرفته، پس از رشد، با یک دیگر ترکیب شده و تشکیل سلول های پیچیده

تا انتهای وردسپهر یا بین هر دو تراز فشاری دلخواه در نظر گرفته می‌شود. آستانه کمیت آب بارش شو برای اینکه ابر پتانسیل بارش داشته باشد مقدار ۸ کیلو گرم بر متر مربع می‌باشد (صادقی حسینی، ۱۳۸۵).

۳) موقعیت نسبی و مشخصات اقلیمی مناطق

تحت پوشش رادار تبریز

تبریز در غرب استان آذربایجان شرقی و در منتهی‌الیه مشرق و جنوب شرق جلگه تبریز قرار گرفته است. آب و هوای تبریز استپی

نتایج

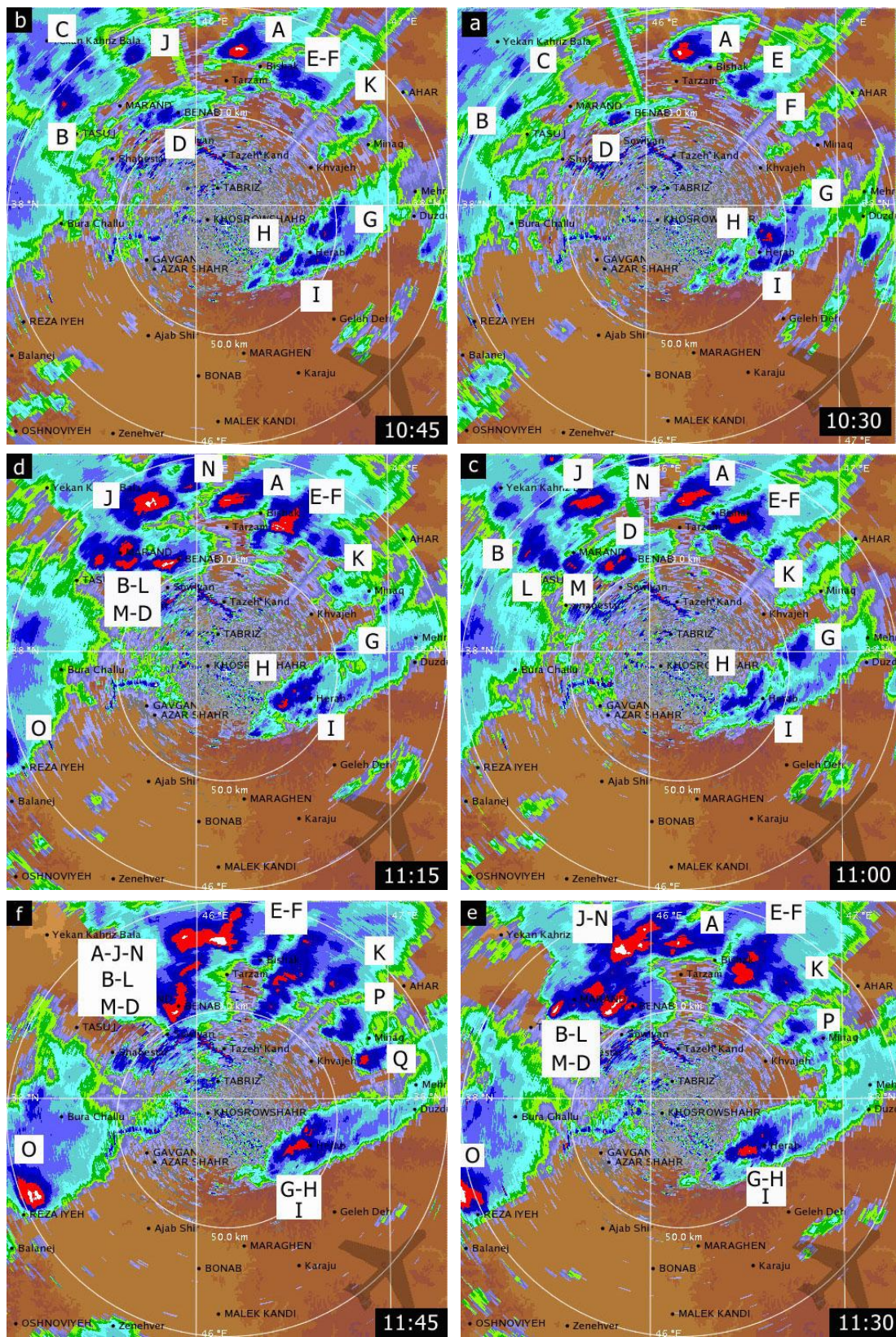
بارش شدید باران در ۱۰ سپتامبر ۲۰۱۲ به مقدار بیشینه ۳۵/۸ میلی متر به مدت سه ساعت در سه روستای شهرستان ورزقان از استان آذربایجان شرقی منجر به سیل گردید. ورزقان از شرق به شهرستان اهر، از غرب به شهرستان های مرند و شیبستر، از شمال به شهرستانهای کلیبر و جلفا و از جنوب به شهرستان تبریز محدود شده است، بدلیل کوهستانی بودن، مستعد سیل می‌باشد. شکل ۲a-d بازتاب راداری هر یک از توفان های تندری منجر به سیل را در منطقه مورد مطالعه از ساعت ۱۰:۳۰ تا ۱۱:۱۵ UTC نشان می‌دهد. نواحی تشکیل ابر در این منطقه به صورت یکپارچه نبوده بلکه به صورت سلول هایی در تصاویر راداری مشاهده شد که هر کدام پس از گذشت زمان و ترکیب با یکدیگر سبب بارش شدید در این

باشند، در این مدت زمان، سلول **A** به سمت چپ و **J** به سمت راست حرکت کرده است. مقدار چینش قائم باد در مورد سلول های **A** و **J** به ترتیب ۱۱ و ۸ متر بر ثانیه بدست آمد.

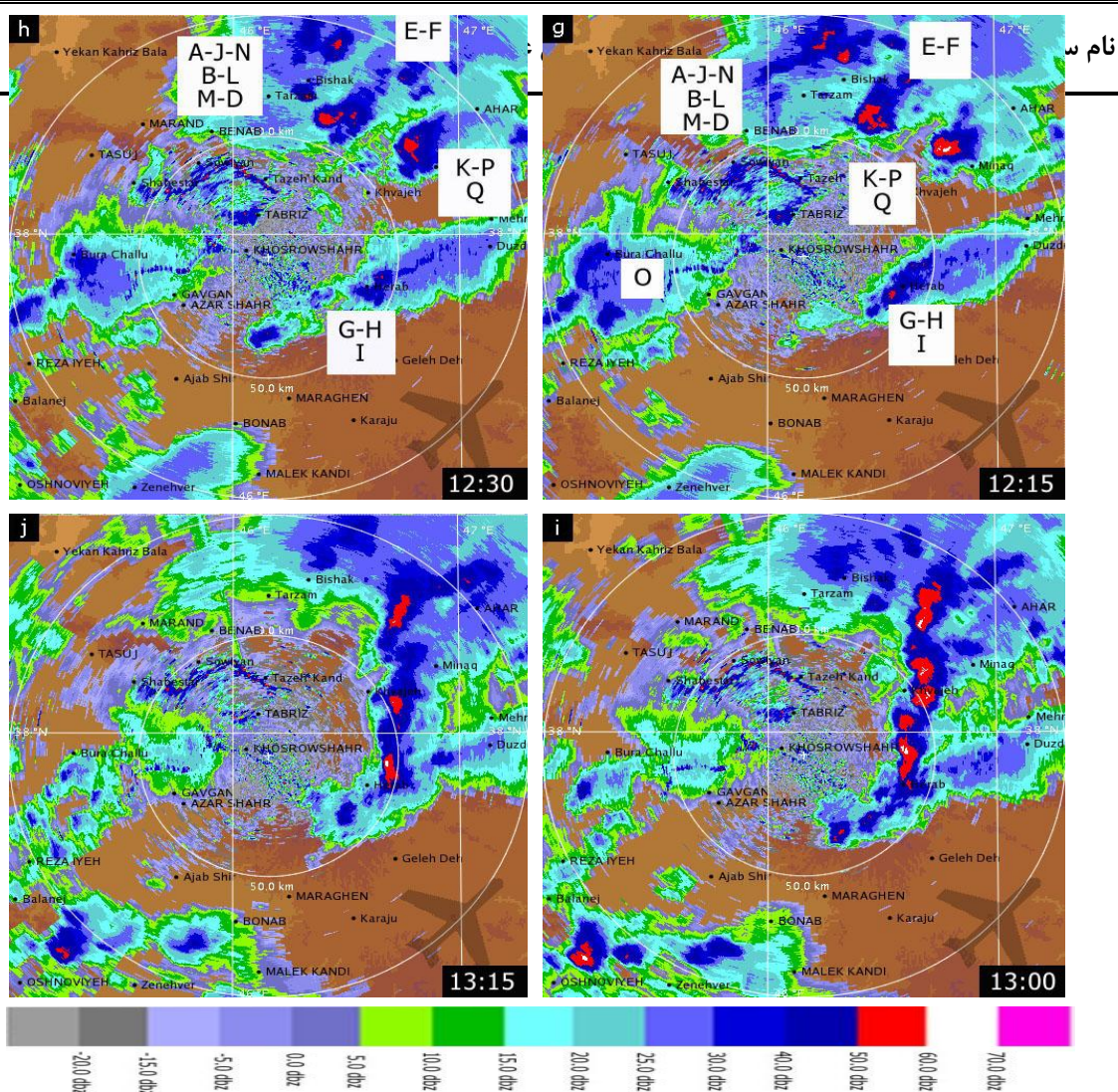
علاوه بر شاخص های ذکر شده شاخص هایی از قبیل هلیسیتی، انرژی - هلیسیتی و عدد ریچاردسون توده ای نیز برای تمامی سلول های بارشی محاسبه شدند که مقادیر آن ها برای این دو سلول در جدول (۳) آورده شده است. سلول **A** در محدوده ابر سلولی بدون نشانه پیچند (پژواک چنگکی در تصاویر راداری مشاهده نگردید) و سلول **J** از نوع چند سلولی شناسایی شده است. همان طور که در تصاویر راداری روز ۱۰ سپتامبر ۲۰۱۲ مشاهده شد تشکیل توفان های تندری از ساعت ۱۰:۳۰ شروع شده و موجب بارش شدید باران و بارش تگرگ در منطقه گشته و در طی سه ساعت از بین رفته است. جدول (۲) شدت، مدت و نوع سلول های بارشی را در توفان تندری شکل گرفته نشان می دهد.

با توجه به جدول (۴) مقادیر شاخص های **K**، شوالتر (**SI**) و مجموع مجموعه ها (**TT**)، ناپایداری شدید در منطقه وجود دارد و احتمال توفان تندری از ۶۰ درصد تا ۸۰ درصد بیان شده است.

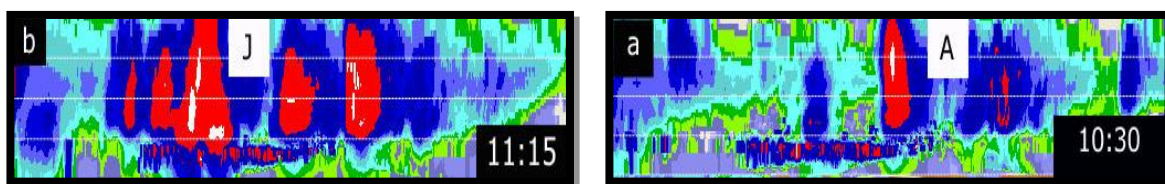
(Complex cell) را دادند، به جز تک سلول **C** که با شدت 50 dBZ در طی یک ساعت به صورت منفرد رشد کرده و سپس میرا گشته است. تصاویر (**۲a-f** و **۳g**) به وضوح ادغام شدن سلول ها با یک دیگر و در نهایت تشکیل چهار سلول پیچیده را (شکل **۳h**) نشان می دهند. در این شکل توفان **ANJBLMD** شامل یک ابرسلولی، یک چندسلولی و چند سلول پیچیده است. سه توفان دیگر از نوع پیچیده می باشند. چهار سلول پیچیده دارای شدت 70 dBZ بوده که این مقدار نشاندهنده پتانسیل بارش تگرگ در منطقه مورد نظر است. کلیه سلول های همرفتی تشکیل شده از ساعت ۱۰:۳۰ بعد از ادغام شدن حرکت کرده و نهایتاً در ساعت $13:00 \text{ UTC}$ در امتداد یک خط (شکل **۳i**) قرار گرفتند و در ساعت $13:15 \text{ UTC}$ شروع به از بین رفتن می کنند (شکل **۳j**). سلول های **A** و **J** با توجه به شکل (**۴a, b**) در زمان بیشینه رشد خود، دارای رشد قائم بیش از ۱۵ کیلومتر بودند و مقدار **CAPE** برای این دو سلول از ۵۰۰ ژول بر کیلوگرم بیش تر می باشد. این دو سلول با توجه به شکل **۲a-e**، دارای حرکت نیز می



شکل ۲- تصاویر بازتاب رادار تبریز در ساعت های (a) ۱۰:۳۰، (b) ۱۰:۴۵، (c) ۱۱:۰۰، (d) ۱۱:۱۵، (e) ۱۱:۳۰، (f) ۱۱:۴۵
 UTC برای ۱۰ سپتامبر ۲۰۱۲ (مأخذ [ftp://radar.irimo.ir](http://radar.irimo.ir))



شکل ۳- تصاویر بازتاب رادار تبریز در ساعت (g) ۱۲:۱۵، (h) ۱۲:۳۰، (i) ۱۳:۰۰، (j) ۱۳:۱۵ UTC برای ۱۰ سپتامبر ۲۰۱۲ (مأخذ [ftp://radar.irimo.ir](http://radar.irimo.ir))



شکل ۴- تصاویر رشد قائم رادار تبریز (a) سلول بارشی A در ساعت ۱۰:۳۰ UTC، (b) سلول بارشی J در ساعت ۱۱:۱۵ UTC برای ۱۰ سپتامبر ۲۰۱۲ (مأخذ [ftp://radar.irimo.ir](http://radar.irimo.ir))

A	۱۰:۳۰	۱۳:۳۰	۳ ساعت	۷۰	ابرسلولی
B	۱۰:۳۰	۱۳:۳۰	۳ ساعت	۵۰	تک سلولی
C	۱۰:۳۰	۱۱:۰۰	۳۰ دقیقه	۴۰	تک سلولی
D	۱۰:۳۰	۱۳:۳۰	۳ ساعت	۵۰	تک سلولی
E	۱۰:۳۰	۱۳:۳۰	۳ ساعت	۴۰	تک سلولی
F	۱۰:۳۰	۱۳:۳۰	۳ ساعت	۴۰	تک سلولی
G	۱۰:۳۰	۱۳:۳۰	۳ ساعت	۵۰	تک سلولی
H	۱۰:۳۰	۱۳:۳۰	۳ ساعت	۵۰	تک سلولی
I	۱۰:۳۰	۱۳:۳۰	۳ ساعت	۴۰	تک سلولی
J	۱۰:۴۵	۱۳:۳۰	۳ ساعت	۷۰	چند سلولی
K	۱۰:۳۰	۱۳:۳۰	۳ ساعت	۵۰	تک سلولی
L	۱۰:۳۰	۱۳:۳۰	۳ ساعت	۵۰	تک سلولی
M	۱۰:۳۰	۱۳:۳۰	۳ ساعت	۵۰	تک سلولی
N	۱۰:۳۰	۱۳:۳۰	۳ ساعت	۵۰	تک سلولی
P	۱۱:۳۰	۱۳:۳۰	۳ ساعت	۴۰	تک سلولی
Q	۱۱:۴۵	۱۳:۳۰	۳ ساعت	۴۰	تک سلولی
EF	۱۰:۴۵	۱۳:۳۰	۲:۴۵	۴۰	سلول پیچیده
BLMD	۱۱:۱۵	۱۳:۳۰	۲ ساعت	۷۰	سلول پیچیده
JN	۱۱:۳۰	۱۳:۳۰	۳ ساعت	۷۰	چند سلولی - پیچیده
GHI	۱۱:۳۰	۱۳:۳۰	۳ ساعت	۷۰	سلول پیچیده
AJNBLMD	۱۱:۴۵	۱۳:۳۰	۱:۴۵	۷۰	چندسلولی - ابرسلولی - پیچیده
KP	۱۲	۱۳:۳۰	۱:۳۰	۷۰	سلول پیچیده
KPQ	۱۲:۱۵	۱۳:۳۰	۱:۱۵	۷۰	سلول پیچیده

جدول ۲- مدت، شدت و نوع سلول های بارشی طوفان تندری ایستگاه تبریز در تاریخ ۱۰ سپتامبر ۲۰۱۲

حرکت نمی باشد. دلیل آن می تواند ناچیز بودن مقدار چینه قائم باد در حدود 1-msec باشد و رشد قائمی در حدود ۱۰ کیلومتر داشته و این مقدار رشد متناسب با مقدار انرژی پتانسیلی در دسترس همرفتی آن، ۴۰۰ ژول بر کیلوگرم می باشد.

در جدول (۳)، مقادیر شاخص ها برای پنج طوفان های منجر به سیل در استان آذربایجان شرقی که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته اند آورده شده است. طوفان تندری در تاریخ ۲۱ ژوئیه ۲۰۱۲، یک مورد چند سلولی است که در تصاویر راداری دارای

همرفتی تفکیک نوع ابرسلولی و غیر ابرسلولی برای سلول های بارشی انجام شد و مواردی که چند سلولی یا پیچیده بودند با بررسی شاخص ها فقط غیر ابر سلولی بودن بدست آمد ولی با بررسی تصاویر راداری به وضوح ترکیب سلول ها با هم مشاهده و نوع دقیق سلول ها تشخیص داده شد.

بسته به میزان بازتاب رادار برای کلیه سلول های بارشی، مقدار شدت برای سلول نشان دهنده بارش باران شدید، ۵۰dBZ و برای سلول نشان دهنده تگرگ، ۷۰dBZ می باشد.

در جدول (۴) مقدار شاخص k ، مجموع مجموعه ها و شوالتر آورده شده است که شاخص مجموع مجموعه ها و شاخص k میزان ناپایداری زیاد و احتمال بالایی را برای وقوع توفان تندری برای تمامی توفان های تندری بررسی شده، نشان داده اند ولی شاخص شوالتر برای دو سلول بارشی (۱۲ فوریه ۲۰۱۳ و ۲۱ دسامبر ۲۰۱۲) برای بیان ناپایداری در منطقه جواب دقیقی نداد.

با بررسی توفان تندری شکل گرفته در تاریخ ۱۲ اکتبر ۲۰۱۲، بر روی تصاویر رادار تشکیل دو خط تندوزه به فاصله ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلومتری در جلوی جبهه سرد قابل مشاهده است بنابراین نوع این توفان تندری، خط تندوزه ای می باشد.

چینش قائم باد محاسبه شده برای تک سلولی، $1^{-1} msec^{-1}$ ، ۷، برای ابرسلولی $1^{-1} msec^{-1}$ ۱۱ و برای سلول های پیچیده بین $1^{-1} msec^{-1}$ ۶ تا ۲۶ متغیر بودند. آب بارش شو نیز برای کلیه سلول های بارشی با استفاده از داده های GFS با قدرت تفکیک پذیری نیم درجه محاسبه گردید که در کلیه موارد مورد مطالعه، مقدار آب بارش شو، بیشتر از ۸ کیلو گرم بر متر مربع بدست آمده است. مقادیر عدد ریچاردسون توده ای محاسبه شده برای چند سلولی ها دارای مقادیر بالای ۵۰، برای ابر سلولی، مقدار ۲۰ می باشد. مقدار عدد ریچاردسون توده ای، هلیسیتی، انرژی - هلیسیتی نیز برای تک تک سلول ها محاسبه گردید. با استفاده از این شاخص ها به انضمام مقدار چینش قائم باد و انرژی پتانسیلی در دسترس

جدول ۳- بررسی راداری و شاخص ها برای ۵ رخداد سیل مورد مطالعه در ناحیه تحت پوشش رادار تبریز

تاریخ	نام سلول	رشد قائم (km)	BRN	CAP E ($\frac{J}{kg}$)	چینش قائم باد ($msec^{-1}$)	SRH ($\frac{m^2}{s^2}$)	EHI	نوع سلول	شدت سلول (dBZ)	آب بارش ($\frac{kg}{m^2}$) شو
	A	۱۶	۲۰	۱۰۰۰	۱۱	۱۱۰	۰/۷	ابرسلولی	۷۰	۱۲/۵
	J	۱۵	۵۰	۶۰۰	۸	۴۰	۰/۱۵	چندسلولی	۷۰	۱۹
	ANJB LMD	۱۵	۱۰	۱۰۰۰	۱۴	۱۱۰	۰/۷	ابرسلولی- پیچیده	۷۰	۲۰
	EF	۱۴	۱۴	۶۰۰	۹	۹۰	۰/۳۳	پیچیده	۷۰	۱۸
	KQP	۱۰	۱۸	۵۰۰	۷	۷۰	۰/۲	پیچیده	۷۰	۱۴
۲۱ ژوئیه ۲۰۱۲		۱۰	۱۰۰	۴۰۰	۲	۱۷۰	۰/۴۲۵	چندسلولی	۵۰	۲۱
۱۲ فوریه ۲۰۱۳		۶	۱	۶۰	۹	۵۰	۰/۰۱۸	چندسلولی	۷۰	۱۰
۱۲ اکتبر ۲۰۱۲		۸	۲/۵	۲۰۰	۱۱	۹۰	۰/۱۱۲	خط تندوزه ای	۵۰	۱۳
۲۱ دسامبر ۲۰۱۲		۳	۰/۰۴	۵۰	۲۶	۱۸۰	۰/۰۱۶	پیچیده	۵۰	۱۲/۵

۱۰ سپتامبر ۲۰۱۲

جدول ۴- مقادیر محاسبه شده شاخص های ناپایداری برای ۵ رخداد سیل مورد مطالعه در ناحیه تحت پوشش رادار تبریز

تاریخ	نام سلول	TT	KI	SI
۲۱ ژوئیه ۲۰۱۲	A	۴۹	۳۳/۴	-۰/۲۲
۱۲ فوریه ۲۰۱۳	J	۴۹	۳۳/۴	-۰/۲۲

-۰/۲۲	۳۳/۴	۴۹	ANJBLMD	
-۰/۲۲	۳۳/۴	۴۹	EF	
-۰/۲۲	۳۳/۴	۴۹	KQP	
-۱/۰۵	۳۱/۵	۴۸/۶		۲۱ ژوئیه ۲۰۱۲
۳/۲۶	۱۹/۶	۵۰/۳		۱۲ فوریه ۲۰۱۳
-۱/۸۴	۳۱/۵	۵۴/۴		۱۲ اکتبر ۲۰۱۲
۲/۹	۲۵/۳	۵۱/۸		۲۱ دسامبر ۲۰۱۲

پژوهش خود برای تعیین نوع توفان تندری از مجموع شاخص‌ها استفاده کرده‌اند.

۶. همانطور که در جدول (۳) گفته شده یک مورد از توفان‌های تندری مورد بررسی دارای دو خط تندوزه می‌باشد که در تصاویر رادار با قرار گرفتن کلیه سلول‌های بارشی در یک خط قابل مشاهده است بنابراین رادار بهترین ابزار برای پیش‌بینی توفان خط تندوزه ای بوده در حالیکه شاخص‌های ناپایداری توانایی پیش‌بینی آن را ندارند که این نتیجه با پژوهش Karan و همکاران (۲۰۱۰) که رادار را مناسب‌ترین وسیله برای مشاهده خط تندوزه معرفی کردند، کاملاً سازگار است.

منابع

صادقی حسینی، ع. و رضائیان، م. ۱۳۸۵. بررسی تعدادی از شاخص‌های ناپایداری و پتانسیل بارورسازی ابرهای همرفتی منطقه اصفهان. مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۲: ۹۸-۸۳.

Byko, Z., Markowski, P. & Richardson, Y. 2009. Descending reflectivity cores in super cell thunderstorms observed by mobile radars and in a high-resolution numerical simulation. *Weather and forecasting*, 24: 155-186.

Cohen, A., Coniglio, M., Corfidi, S. & Corfidi, S. 2007. Discrimination of mesoscale convective system environments using sounding observations. *Weather and forecasting*, 22: 1045-1062.

Davies, J. 1984. Stream wise vorticity: The origin of updraft rotation in super cell storms. *Atmospheric sciences*, 41: 2991-3006.

Donaldson, R. 1981. Radar reflectivity profiles in thunderstorm. *Journal of meteorology*, 18: 292-305.

Doswell, C. & Johns, R. 1992. Severe local storms forecasting. *Weather and forecasting*, 7: 588-612.

بحث و نتیجه گیری

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته بر روی توفان‌های تندری سیل آسا در مناطق تحت پوشش رادار تبریز نتایج زیر حاصل گردید:

۱. با بررسی پنج مورد توفان تندری سیل آسا (که شامل ۲۰ سلول بارشی بودند) از طریق تحلیل تصاویر بازتاب راداری، ۱ سلول از نوع ابرسلولی (ابرسلولی بدون نشانه پیچند)، ۱ توفان تندری از نوع خط تندوزه ای (۲ خط تندوزه تشکیل شده است)، ۱ سلول از نوع تک سلولی، ۳ سلول از نوع چند سلولی، ۴ مجموعه سلول پیچیده (شامل ۱۳ تک سلولی) و ۱ سلول از نوع ابرسلولی-چندسلولی- پیچیده می‌باشند. بررسی‌ها نشان داد که بخش عمده توفان‌های تندری سیلاب ساز در منطقه تحت پوشش رادار تبریز در آذربایجان شرقی از نوع تک سلولی و چند سلولی می‌باشند که پس از حرکت و ادغام با یکدیگر تشکیل سلول‌های پیچیده را می‌دهند.

۲. با توجه به جدول (۳)، افزایش رشد قائم سلول بارشی در تصاویر رادار منجر به افزایش انرژی پتانسیلی در دسترس همرفتی گردید بنابراین با گفته Markowski & Richardson (2007) که افزایش بالاروی سلول بارشی منجر به افزایش مقدار انرژی پتانسیلی در دسترس همرفتی (CAPE) می‌شود، همخوانی دارد. همچنین مشاهده گردید که اگر رشد قائم سلول در تصاویر رادار بیشتر از ۱۵ کیلومتر باشد سلول می‌تواند از نوع ابرسلولی تعیین شود.

۳. با استفاده از تصویر بیشینه بازتاب رادار (Max dBZ) می‌توان شدت و مدت توفان تندری را بدست آورد (Twomey, 1953). کمترین مدت توفان تندری شکل گرفته ۱۵۰ دقیقه و بیشترین مدت آن ۳۳۰ دقیقه بوده است و همچنین با توجه به جدول (۳)، کمترین شدت توفان تندری شکل گرفته ۴۰ dBZ و بیشترین شدت آن ۷۰ dBZ بود.

۴. طبق جدول شماره (۳) سلول‌های بارشی که در تصاویر رادار دارای حرکت بودند، چپش قائم باد قابل ملاحظه ای از $msec^{-1}$ ۶ تا ۲۶ داشتند و با نتایج Cohen و همکاران (۲۰۰۷) که حرکت توفان با پارامتر بردار چپش قائم باد در ارتباط است، مطابقت دارد.

۵. مقادیر عدد ریچاردسون توده ای، انرژی پتانسیلی در دسترس همرفتی، چپش قائم باد، هلیسیتی و شاخص انرژی-هلیسیتی مجموعاً به خوبی بیانگر نوع توفان می‌باشند ولی به کارگیری هر یک از آن‌ها به تنهایی تعیین کننده نوع توفان نبوده و در صورتی می‌توان با استفاده از شاخص‌ها نوع یک توفان تندری را ابرسلولی اعلام کرد که کل شاخص‌ها در محدوده ابرسلولی باشند که Blanchard & Rasmussen (1998) نیز در

- Doswell, C., Brooks, H. & Maddox, R. 1996. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. *Weather and forecasting*, 11: 560-581.
- Hart, J. & Kortky, W. 1991. The sharp workstation v1.50 users guide. National weather service, NOAA.
- Karan, H., Fitzpatrick, P., Hill, C & Li, Y . 2010. The formation of multiple squall Lines and the impacts of WSR-88D radial winds in a WRF simulation. *Weather and forecasting*, 25: 242-262.
- Markowski, P. & Richardson, R. 2007. Observations of vertical wind shear heterogeneity in convective boundary layers. *Monthly weather review*, 135: 843-861.
- Moncrieff, M. & Green, J. 1972. The propagation of steady convective overturning in shear. *Q. J. Meteorological society*, 98: 336-352.
- Moncrieff, M. & Miller, M. 1976. The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. *Meteorological society*, 102: 373-394.
- Rasmussen, E. & Blanchard, D. 1998. A baseline climatology of sounding – derived super cells and tornado forecast parameters. *Weather and forecasting*, 13: 1148-1164.
- Stalker, J. & Knupp, K. 2002. A method to identify convective cells within multi cell thunderstorms from multiple Doppler radar data. *Monthly weather review*, 130: 188-195.
- Twomey, S. 1953. On the measurement of precipitation intensity by radar. *Journal of meteorology*, 15: 66-67.
- Weisman, M. & Klemp, J. 1982. The dependence of numerically simulated convective storms on wind shear and buoyancy. *Monthly weather review*, 110: 504-520.

