نگاشت و تحلیل همگرایی جریان رطوبت جو طی بارش فوق سنگین ناشی از توفان حاره‌ای فت در سواحل چابهار

یوسف قویدل رحیمی*

استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

دریافت: ۸۹/۹/۱ پذیرش: ۱۱/ ۹۰/۳

چکیده

توفان حاره‌ای نوظهور فت یکی از نشانه های تغییر اقلیم در محدوده اقیانوس هند و دریای عرب است. شدت توفان مذکور که برای اولین بار روز ۱ ژوئن ۲۰۱۰ در محدوده بین اقیانوس هند و دریای عرب زایش یافت، در روز ۳ ژوئن ۲۰۱۰ به درجه ۴ که در حد ابر چرخند (سوپر سیکلون) است، رسید. توفان مذکور در طی روند غیرقابل پیش‌بینی خود در روز ۴ ژوئن ۲۰۱۰ برابر با ۱۴ خرداد ۱۳۸۹ به سواحل ایران در چابهار نزدیک شد و قسمت نیم دایره خطرناک آن روی سواحل چابهار قرار گرفت، سپس با تجمیع رطوبت دریاهای عمان و دریای عرب و هم‌چنین رطوبت منطقه همگرایی دریای سرخ و خلیج عدن (در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال ساعت ۹/۳۰ روز ۱۴ خرداد) به شکل توفانی رعد و برقی همراه با بارش همرفتی شدید رگباری و سنگین به سواحل چابهار یورش برد و با ایجاد امواج بلند سهمیگن دریایی و بارش سنگین ۱۰۹/۵ میلی‌متری خسارت‌های سنگینی به وجود آورد.

جریان همگرای رطوبت یکی از مهم‌ترین ملزومات وقوع بارش از توفان‌های حاره‌ای‌است که بارش سنگین حاصل از توفان حاره‌ای فت در سواحل چابهار نیز از این قاعده مستثنا نبوده و بارش سنگین یاد شده به علت وزش رطوبت و همگرایی جریان رطوبت ترازهای مختلف جوی در ساعت‌های مختلف روز ۱۴ خرداد ۱۳۸۹ به وقوع پیوسته است.

با استفاده از معادلات ترمودینامیک مخصوص به همگرایی جریان رطوبت جو، نقشه‌های مربوطه به همراه مسیر وزش رطوبت جو بر اثر جریان بادهای غربی ترسیم و مورد تجزیه و تحلیل قرار داده شد. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل نقشه‌های ترسیمی نشان داد که منبع تأمین و تزریق رطوبت به چرخند حاره‌ای که حرکت آن به سمت سواحل چابهار موجب ریزش بارش سنگین در روز ۱۴ خرداد ۱۳۸۹ شده است(به استثنای وزش و جریان همگرایی رطوبت تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در ساعت ۹/۳۰ که تزریق رطوبت از سمت خلیج عدن و جنوب غرب منطقه

---

* نویسنده مسؤول مقاله: E-mail: ghavidel@modares.ac.ir

همگرایی دریای سرخ انجام گرفته است) در سایر ترازهای جوی و ساعت‌های روز ۱۴ خرداد ۱۳۸۹ منبع تزریق و تغذیه رطوبت بارش سنگین سواحل چابهار دریای عرب و خلیج عمان بوده‌اند. هم‌چنین نقشه‌های ترسیمی محل و موقعیت هسته‌های همگرای رطوبتی در جریان فعالیت توفان فت در روز ۱۴ خرداد ۱۳۸۹ نشان داد که در بیش‌تر اوقات بر روی سواحل چابهار یا نزدیکی آن مستقر بوده‌اند و به عنوان هسته‌های انبارش و تجمیع رطوبت با تزریق رطوبت به داخل چرخند حاره‌ای بارش سنگین ۱۰۹/۵ میلی‌متری روز ۱۴ خرداد را تقویت کرده‌اند.

واژه‌های کلیدی: همگرایی جریان رطوبت، توفان فت، وزش رطوبتی، بارش ابر سنگین، چابهار.

۱- مقدمه

بارش‌های سنگین و سیل‌آسا یکی از مهم‌ترین و خسارت بارترین آثار توفان‌های حاره‌ای محسوب می‌شوند که این بارش‌ها محصول وجود هسته‌های تراکمی رطوبت در جو هستند. برای تشکیل هسته‌های تراکم بارش وجود جریان‌های بادی و رطوبت که طی فرایندهای خاص دینامیک و سینماتیک منجر به وقوع همگرایی جریان رطوبت جو در مناطق خاصی شده است و رطوبت بارش‌های سنگین را تأمین می‌کنند، ضروری است.

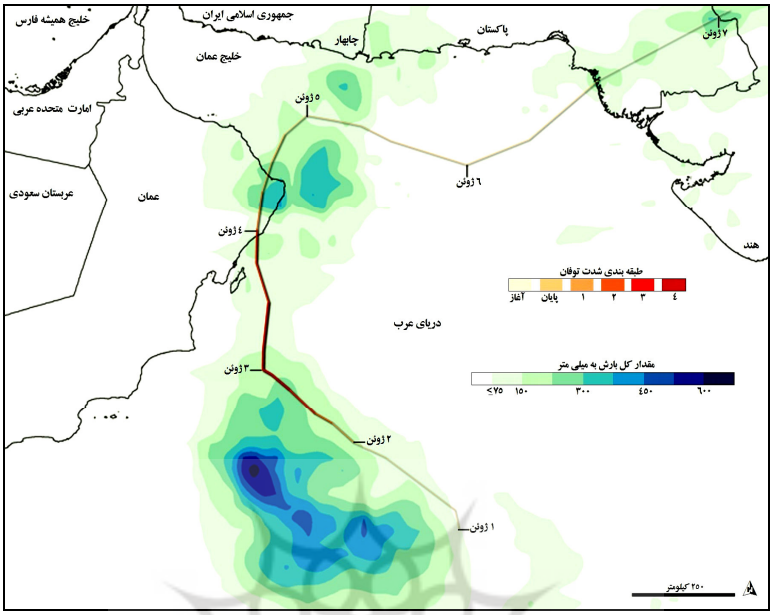
علت ایجاد بارش‌های سنگین از توفان‌های حاره‌ای وجود سازوکارهای دینامیک و سینماتیک تسهیل‌کننده و مولد همگرایی جریان رطوبت جوی بوده و به همین خاطر اغلب توفان‌های حاره‌ای بارش سنگین و سیل‌آسا تولید می‌کنند. از عمده مراکز ایجاد توفان‌های حاره‌ای، اقیانوس هند و دریای عرب هستند که توفان‌های مذکور در بازه‌های فصلی خاصی که به مونسون یا موسمی‌ها معروف شده‌اند، ایجاد بارش‌های سنگین و در اغلب موارد فوق سنگین کرده و سیلاب‌های شدیدی به راه می‌اندازند که سیلاب خانمان‌سوز اخیر پاکستان از این نوع بوده است.

فعالیت بی‌سابقه و زودهنگام سامانه موسمی در اقیانوس هند، دریای عمان و بویژه دریای عرب (که امسال با تشکیل توفان باندو در ماه می تحرک جدی خود را آغاز کرد) از روز ۱ ژوئن ۲۰۱۰ با تشکیل دومین توفان حاره ای تحت عنوان فت (Phet)، عمان و مناطق مجاور دریای عمان بویژه نواحی جنوب شرقی و جنوبی ایران و هم‌چنین کشورهای پاکستان و هند را مورد تهدید قرار داد. اثر توفان فت بر ایران در روز ۵ ژوئن (١٤ خرداد ۱۳۸۹) در قالب وزش

باد شدید و موج ناشی از طوفان و بارش سنگین رگبار رعد و برقی ۱۰۹/۵ میلی‌متری در بندر چابهار پدیدار شد. توفان فت که بر اثر سامانه کم‌فشار حاره‌ای همراه با رعد و برق، رگبار، باد شدید و مواج شدن دریای عمان به‌وجود آمده بود، در طول روزهای ۱۳ تا ۱۵ خرداد ماه ۱۳۸۹ خسارت‌های سنگینی به بخش‌های مختلف از جمله صید و صیادی و راه در شهرستان چابهار وارد کرد. هم‌چنین توفان فت ۱۵ میلیارد ریال به موج شکن در حال ساخت اسکله شهید بهشتی چابهار و حدود دو میلیارد ریال نیز به مناطق مسکونی اداره کل بنادر ودریانوردی سیستان و بلوچستان، خطوط برق‌رسانی، انبارها و کانکس‌ها خسارت وارد کرده است (www.onvannews.com). همان گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود توفان فت در روز ۱ ژوئن ۲۰۱۰ از محدوده واقع بین اقیانوس هند و دریای عرب زایش یافته و در روز ۵ ژوئن به سمت دریا و خلیج عمان کشیده شده است.

توفان حاره‌ای فت با ورود به دریای عمان و کسب رطوبت کافی دوباره تقویت شده و به سوی جنوب پاکستان حرکت کرده است. حاشیه شمالی آن بر جنوب استان سیستان و بلوچستان و شرق هرمزگان با بارش‌های شدید رگباری همراه با رعد وبرق و وزش باد تأثیر گذاشته؛ به طوری که در اواخر روز ۱۳ خرداد (٤ ژوئن) و اوایل بامداد روز ١٤ خرداد (٥ ژوئن ۲۰۱۰) که اوج فعالیت چرخند مذکور بر روی دریای عمان بوده است، آثار آن به مرزهای ایران رسیده و بارش سنگین رعد و برقی ۱۰۹/۵ میلی‌متری روز ١٤ خرداد ۱۳۸۹ چابهار را موجب شده است. پس از ایجاد ناپایداری در سواحل ایران، در ساعت‌ها و روزهای بعدی مسیر توفان مذکور به سمت شبه قاره هند بویژه پاکستان تغییر پیدا کرده و بارش‌های سنگین و مخربی را در مسیر خود فرو ریخته است.

شدت توفان فت در روز ۳ تا ٤ ژوئن به حداکثر ممکن رسیده و در روز ۷ ژوئن با کاهش شدید شدت فعالیت، ناپدید و از بین رفته است. در روز ۵ ژوئن ۲۰۱۰ که توفان فت به نزدیک سواحل ایران رسید، از شدت آن کاسته به درجه ۲ تقلیل پیدا کرد، اما این موضوع سبب کاهش قدرت بارش‌زایی توفان نشده و تزریق رطوبت دریای عمان به داخل چرخند باعث تقویت بارش‌زایی سامانه مذکور شده است.



شکل ۱ مسیر آغاز حرکت و پایان توفات فت و شدت توفان در مسیر حرکت[1]

به نظر می‌رسد که ظهور توفان‌های حاره‌ای نوظهور (مثل توفان‌های فت یا و گونو) بی‌ارتباط با گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی نیستند (هندرسون سلرز، ۱۹۹۸) و به خاطر آثار شدید اقلیمی و اقتصادی- اجتماعی که دارند باید از دیدگاه‌های مختلف تحت بررسی قرار داده شوند. از جمله مطالعاتی که به‌طور صرف بعد اقلیمی توفان‌های حاره‌ای را برجسته ساخته‌اند، می‌توان به کار کالاگان (۲۰۰۳) درخصوص خطر و خسارت‌های توفان‌های حاره‌ای در کارینز استرالیا، مطالعه چن و همکاران (۲۰۱۰) درخصوص پیش‌بینی بارش‌های سنگین ناشی از طوفان‌های حاره‌ای در جنوب شرقی آسیا، پیش‌بینی فصلی فراوانی زایش توفان‌های حاره‌ای شمال‌غربی اقیانوس آرام با استفاده از الگوهای پیوند از دور که به‌وسیله چوی و همکاران (۲۰۱۰) انجام گرفت و تحقیق زانگ و همکاران (۲۰۱۱) درباره مخاطرات اقلیمی سیلاب، خشک‌سالی و توفان تایفون در استان گواندوگ چین اشاره کرد.

1. www.pakmet.com.pk

به طور کلی مطالعات انجام شده درخصوص توفان‌های حاره‌ای و ویژگی‌های آن‌ها در ایران اندک بوده و معمولاً به بعد اقلیمی توفان‌ها بهای چندانی داده نشده است؛ به‌طور مثال دیباج‌نیا و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیق خود بیش‌تر به امواج ناشی از توفان گونو در سواحل ایران پرداخته و معتقدند که از نظر شدت، توفان گونوی سال ۲۰۰۷ شدیدترین توفان حاره‌ای است که در دریای عرب روی داده است. در این ارتباط شاید بتوان گفت که تحقیق خسروی و پودینه (۱۳۸۹) درخصوص توفان حاره‌ای گونو از کارهای جدید و اقلیم‌شناسی محور است که در آن با روشی ساده با استفاده از تصاویر آنالوگ ماهواره‌ای و نقشه‌های سطوح فوقانی جو آثاراقلیمی سیکلون حاره‌ای گونو اتفاق افتاده در خرداد ماه سال ۱۳۸٦ مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج حاصل از نقشه‌های ترکیبی در مطالعه یاد شده نشان می‌دهد که با افزایش قدرت گونو، محور مراکز پرفشار جنب حاره‌ای در سطوح پایینی جو به سمت شرق و در سطوح میانی به سمت شمال جابه‌جا شده است. این جابه‌جایی شرایط را برای همرفت شدید و بارش سنگین مهیا ساخته است. حداکثر بارش در نیک‌شهر ۱٤٤ میلی‌متر گزارش شده است. نقشه‌های اُمگا وجود حرکات صعودی شدیدی بر فراز جو منطقه طی روزهای ۱٤ تا ۱۷ خرداد ۱۳۸٦ را تأیید کرده‌اند. درخصوص اثر همگرایی رطوبت بر وقوع بارش‌های سنگین کارهای متعددی انجام شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به تحقیق مفیدی (۱۳۸۳) درخصوص نقش منطقه هم‌گرایی دریای سرخ در وقوع بارش‌های سیل‌آسا در خاورمیانه اشاره کرد. محمدی (۱۳۸۸) نیز در رساله خود یکی از عمده دلایل وقوع بارش‌های سنگین را همگرایی رطوبت جو و فراوانی وقوع بیش‌تر آن در مناطق شمال و جنوب غرب ایران می‌داند.

با توجه به کمبود مطالعات تحقیقی اقلیم‌شناختی درخصوص توفان‌های حاره‌ای که بیش‌تر ناشی از فراوانی وقوع کم پدیده مذکور در ایران در سال‌های گذشته است، پرواضح است که همگرایی جریان رطوبت در طی توفان‌های حاره‌ای نیز بدون پیشینه تحقیق خواهد بود.

پژوهش حاضر با هدف نگاشت و تحلیل همگرایی جریان رطوبت سطوح جوی ۱۰۰۰، ۹۲۵، ۸۵۰، ۷۰۰، ٦۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال در زمان جریان توفان فت روی ایران و اثر آن بر وقوع بارش سنگین چابهار که هیچ گونه سابقه و پیشینه تحقیقاتی ندارد و به روش محیطی به گردشی انجام گرفته است.

۲- داده‌ها و روش‌شناسی

۲-۱- داده‌ها

تنها داده ایستگاه‌های زمینی استفاده شده در این پژوهش مربوط به داده‌های روزانه بارش روزانه ایستگاه‌های ساحلی واقع در جنوب شرق و جنوب ایران است که در روزهای وقوع توفان فت تنها بارش قابل توجه مربوط به ایستگاه چابهار بوده و تمام کارهای انجام گرفته در این تحقیق براساس بارش ۱۰۹/۵ میلی‌متری بارش چابهار در روز ١٤ خرداد ۱۳۸۹ برابر با ۵ ژوئن ۲۰۱۰ میلادی انجام شده است. ایستگاه چابهار به‌عنوان ایستگاهی ساحلی در حد انتهایی استان گرمسیری سیستان و بلوچستان در موقع جغرافیایی ۲۵ درجه و ۱۷ دقیقه عرض جغرافیایی شمالی و طول جغرافیایی ٦۰ درجه و ۳۷ دقیقه شرقی واقع شده و ارتفاع آن از سطح دریا تنها ۸ متر است.

داده‌های بالای جو که در این مطالعه برای نگاشت و تحلیل شار همگرایی رطوبت جو مورد استفاده قرار داده شده است، عبارت از داده‌های بازکاوی شدهٔ مربوط به مؤلفه‌های باد مداری، باد نصف‌النهاری و رطوبت ویژه جو هستند که از وب سایت (www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis) که متعلق به مرکز ملی پیش‌بینی‌های محیطی (NCEP) می باشد، اخذ شده است.

۲-۲- روش‌شناسی

روش استفاده شده برای نگاشت و تحلیل همگرایی جریان رطوبت جو جزئی از کار با ارزش باناکوس و شولتز (۲۰۰۵، ۳۵۲) است که در این مطالعه براساس معادلات به کار گرفته شده در تحقیق مذکور نقشه‌های همگرایی جریان رطوبت جو ترسیم و مورد تحلیل قرار گرفته است. نقشه‌های همگرایی و واگرایی جریان رطوبتی جو نیز در تحلیل‌های دینامیک و سینوپتیک بویژه در مطالعات هیدروکلیماتولوژی بارش‌های سنگین و فوق سنگین اهمیت زیادی دارد و با استفاده از داده‌های جوی و ترسیم و تحلیل نقشه‌های همگرایی و واگرایی جریان رطوبتی جو می‌توان منبع رطوبت بارش‌های سنگین را شناسایی و مورد ارزیابی قرار داد.

۲-۲-۱- بیان فیزیکی

از نظر دینامیک دو نوع جریان رطوبتی قائم و افقی در جو وجود دارد که اغلب این دو جریان توأم با یکدیگر هستندو فقط در شرایطی خاص ممکن است میزان یکی از آن‌ها از دیگری بیش‌تر شود. جریان افقی به وسیله صعود توده (بسته) هوا صورت می‌گیرد، اما جریان عمودی به وسیله صعود هوا در جهت قائم انجام‌پذیر می‌باشد. وسیله صعود هوا در جهت قائم بیش‌تر برای انتقال رطوبت از سطوح تبخیر شونده به داخل جو و جریان افقی برای انتقال رطوبت از محل تبخیر به سایر مناطق انجام می‌گیرد که حتی مناطق خشک و فاقد منابع آبی نیز از انتقال مذکور بی‌بهره نیستند. انتقال بخار آب در جو به صورت موازی هم در جهت افقی وهم در جهت قائم انجام می‌گیرد. در این صورت می‌توان میزان این انتقال را به صورت جداگانه نیز محاسبه کرد. در انتقال افقی جابه‌جایی بخار آب از یک منطقه به منطقه دیگر در هر یک از سطوح جو مد نظر است (کریمی احمدآباد، ۱۳۸٦: ۱۷). می‌توان گفت که همگرا شدن جریان رطوبتی سطوح مختلف جو در واقع بررسی میزان انباشت بخار آب از طریق وزش، افقی به ترازهای مختلف سطح زمین تا سطوح فوقانی جو است.

۲-۲-۲- معادلات ساختاری و بیان ریاضی همگرایی جریان رطوبت جو

براساس کار و دستورالعمل عالی باناکوس و شولتز (۲۰۰۵: ۳۵۲) بهتر است معادله مربوط به تابع همگرایی جریان رطوبت براساس اصل تداوم بخار آب در سیستم مختصات فشار به صورت زیر نوشته شود:

$$S = dq / dt \qquad (۲)$$

که در این جا:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u\frac{\partial}{\partial x} + v\frac{\partial}{\partial y} + \omega\frac{\partial}{\partial p}, \qquad (۳)$$

u، v و ω معرف مؤلفه‌های سه بعدی استاندارد باد برداری در سیستم مختصات فشار، q رطوبت (نم) ویژه، S ذخیره بخار آب (که از تفاوت بین منابع وجودی و نبود بخار بسته

هوای در حال سیلان محاسبه می‌شود). در این‌جا S به‌طور ویژه از $E-C$ مورد محاسبه قرار می‌گیرد که در آن E را نسبت تبخیر درون بسته هوا و C را نسبت چگالیدگی (تراکم) بسته هوا می‌توان فرض کرد. در مطالعاتی از که معادله فوق استفاده شده، فرض بر این بوده که آب حاصل از چگالش در همان لحظه به صورت بارش فرو خواهد ریخت. به این ترتیب براساس معادله ارائه شده به‌وسیله محققان اقلیم‌شناسی خواهیم داشت:

$$S = E - P \qquad (٤)$$

افزون بر این استفاده از معادله پیوستگی جرم به ما اجازه می‌دهد که معادله

$$\partial u / \partial x + \partial v / \partial y + \partial \omega / \partial p = 0 \qquad (٥)$$

را تحت عنوان معادله جریانی که پیوستگی کل رطوبت جرم جو را با تأثیر اضافه کردن صفر به دو طرف معادله تضمین می‌کند، بسط داده و بازنویسی کنیم.

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u\frac{\partial q}{\partial x} + v\frac{\partial q}{\partial y} + \omega\frac{\partial q}{\partial p} + q\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial p}\right) = E - P \qquad (٦)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(qu) + \frac{\partial}{\partial y}(qv) + \frac{\partial}{\partial p}(q\omega) = E - P \qquad (٧)$$

$$\partial q / \partial t + \nabla.(qV_h) + \partial / \partial p(q\omega) = E - P \qquad (٨)$$

در این‌جا $\partial q / \partial t$ عبارت از مقدار محلی تغییر q، $\nabla.(qV_h)$ همگرایی افقی جریان رطوبت جو، $\partial / \partial p(q\omega)$ همگرایی عمودی جریان رطوبت جو و $E-P$ ذخیره بخار آب است. همان طور که پیش از این نیز توضیح داده شد، از تفاوت بین منابع وجودی و نبود بخار بسته هوای در حال سیلان محاسبه می‌شود. در معادله اخیر $\nabla = \hat{i}(\partial / \partial x) + \hat{j}(\partial / \partial y)$ و $V_h = (u,v)$ هستند و بیلان رطوبتی بسته هوا که مشتمل بر مقدار محلی تغییر q، واگرایی افقی جریان رطوبت جو، واگرایی عمودی جریان رطوبت جو و تغییرات ذخیره بخار آب می‌شود، به روشنی نشان می‌دهند، می‌توان معادله مذکور را به عنوان معادله برداری و تحت

عنوان همگرایی افقی جریان رطوبتی جو (که اغلب در واحدهای پیش‌بینی از آن تحت عنوان ساده شده همگرایی رطوبت جو یاد می‌شود) به صورت معادله زیر تبدیل کرد:

$$MFC = -\nabla.(qV_h) = -V_h.\nabla q - q\nabla.V_h, \qquad (۹)$$

به عبارت دیگر در این‌جا می توان نوشت:

$$MFC = -u\frac{\partial q}{\partial x} - V\frac{\partial q}{\partial y} - q(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}) \qquad (۱۰)$$

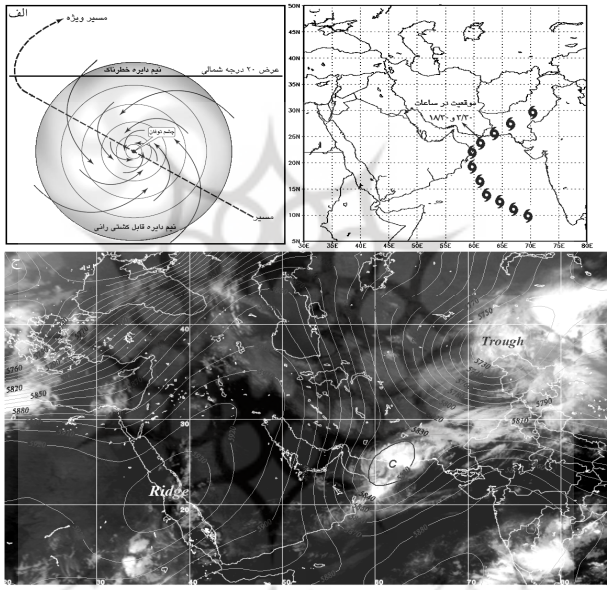
که در معادله فوق، جمله $-u\frac{\partial q}{\partial x} - V\frac{\partial q}{\partial y}$ معرف جمله وزش یا انتقال افقی رطوبت ویژه جو و جمله $q(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y})$ نشانگر همگرایی رطوبت ویژه جو بوده و حاصل‌ضرب رطوبت ویژه در همگرایی حجم جرم را بیان می‌کند (قویدل رحیمی، ۱۳۸۹: ۱۷۹).

۳- نگاشت و تفسیر نقشه‌های همگرایی رطوبت جو

با توجه به این‌که نزدیک‌ترین موقعیت مکانی و زمانی توفان فت به سواحل ایران در چابهار در روز ۵ ژوئن ۲۰۱۰ برابر با ١٤ خرداد ۱۳۸۹ بوده و در آن روز ایستگاه ساحلی چابهار شاهد بارش فوق سنگین ۱۰۹/۵ میلی‌متری بوده است، در این صورت نقشه‌های سطوح جوی ۱۰۰۰، ۹۲۵، ۸۵۰، ۷۰۰، ٦۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال مربوط به روز ١٤ خرداد ۱۳۸۹ به عنوان اساس کار نگاشت نقشه‌ها و تفاسیر مورد استفاده قرار گرفته است.

با توجه به این که حرکت و قدرت بارش‌زایی توفان حاره‌ای (فت) در ساعات ۳/۳۰ (۰۰ زولو) و ۱۵/۳۰ (۱۲ زولو) بیش‌تر بوده و موجب ریزش بارش فوق سنگین در روز ۵ ژوئن شده و ساعت‌های مذکور به طور علمی ساعت‌های اوج فعالیت توفان‌ها بوده و معمولاً توفان‌ها در ساعت‌های مذکور آشکارسازی و ردیابی می‌شوند؛ در این صورت ساعت‌های یاد شده به عنوان مبدأ زمانی نگاشت نقشه‌ها و تفسیرها انتخاب شده‌اند. بررسی موقعیت توفان حاره‌ای فت نشان داده که از ساعت‌های ۳/۳۰ (۰۰ زولو) تا ۲۱/۳۰ (۱۸ زولو) قسمت نیم

دایره خطرناک توفان که ویژگی اصلی آن مخرب بودن و بارش‌های همرفتی شدید و غیرقابل کشتیرانی بودن است (شکل ۲ الف)، بر روی سواحل جنوب شرق ایران که به طور دقیق با داشتن موقع عرض جغرافیایی بالای ۲۰ درجه شمالی منطبق بر ساحل چابهار می‌شود (شکل ۲ ب)، قرار گرفته است. در شکل ۲ ج موقعیت توفان فت بر روی چابهار در ساعت ۱۵/۳۰ روز ۵ ژوئن ۲۰۱۰ در ترکیبی از تصویر مادون قرمز ماهواره متوسط ۹ و الگوی جریانی ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نشان داده شده است.

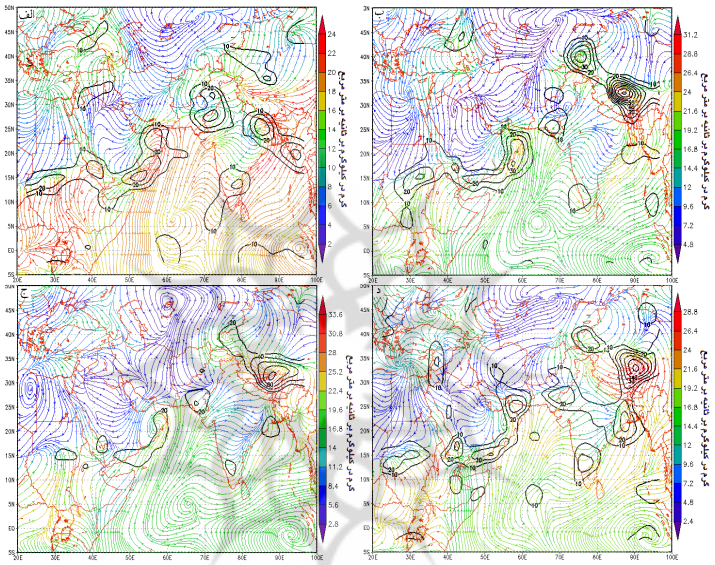


شکل ۲ الف: ساختار و شمای کلی یک توفان حاره ای نمونه از دیدگاه مخاطرات جوی از آلابی، ۲۰۰۷: ۴۹۲؛ ب: مسیر واقعی توفان فت از بدو تشکیل تا روز انهدام و موقعیت آن بر روی چابهار از روز۱ تا ۷ ژوئن ۲۰۱۰؛ ج: تصویر ترکیبی مادون قرمز ماهواره متوست ۹ و آرایش توپوگرافی ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در ساعت ۱۵/۳۰ روز ۵ ژوئن ۲۰۱۰

ترسیم نقشه‌های مربوط به همگرایی جریان رطوبت جو برای ساعت‌های مختلف روز ۵ ژوئن ۲۰۱۰ میلادی برابر با روز ١٤ خرداد ۱۳۸۹ شمسی نشان داد که همگرایی رطوبت جو بر اثر جریان باد در سه زمان و در سه تراز جوی روی چابهار انجام شده و به عنوان منبع اصلی بارش سنگین ۱۰۹/۵ میلی متری عمل کرده است که به‌ترتیب اهمیت عبارتند از:

۳-۱- همگرایی جریان رطوبت جو در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال

ترسیم نقشه‌های همگرایی جریان رطوبت جو در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال که در روز ١٤ خرداد ۱۳۸۹ اتفاق افتاد، نشان داد که در محدوده زمانی استقرار توفان فت بر روی ایران، شدیدترین همگرایی رطوبت جوی بر روی چابهار در تراز مذکور و در هر ٤ مشاهده نگاشته شده از ساعت ۳/۳۰ تا ۲۱/۳۰ به وقوع پیوسته است (شکل ۳).



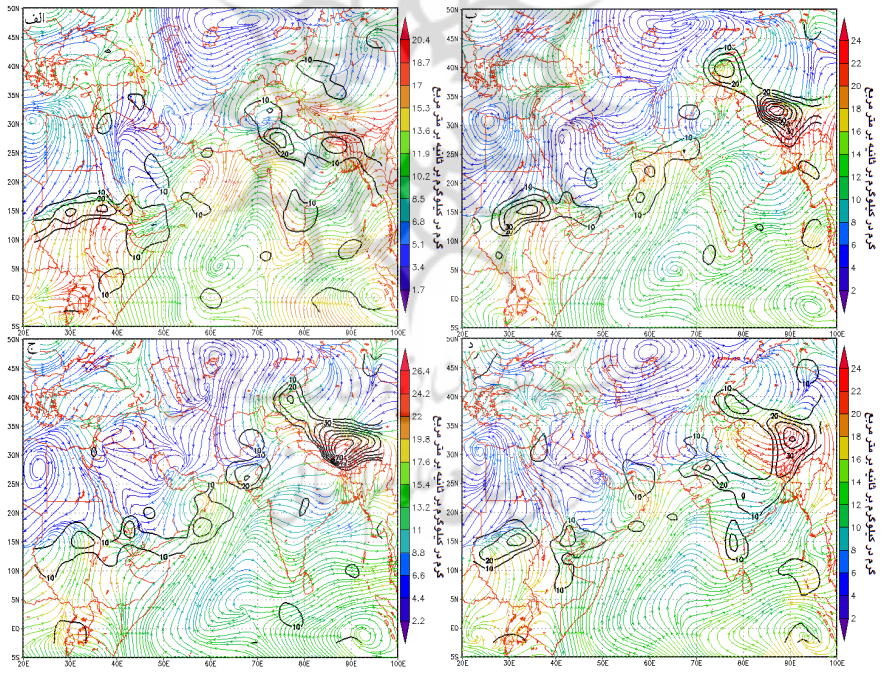
شکل ۳ همگرایی جریان رطوبت جو در طی توفان فت بر روی چابهار در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال برای ساعت‌های الف: ۳/۳۰، ب: ۹/۳۰، ج: ۱۵/۳۰و د: ۲۱/۳۰ روز ۱۴ خرداد ۱۳۸۹ (منحنی میزان همگرایی رطوبت را براساس گرم بر کیلوگرم بر متر مربع در ثانیه نشان می‌دهد.)

با توجه به شکل ۳ همگرایی شدید رطوبت جوی در جریان بارش سنگین در ساعت ۳/۳۰ (شکل ۲ الف) روز ١٤ خرداد ۱۳۸۹ در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال به وقوع پیوسته است. در ساعت مذکور همگرایی رطوبت از شمال آفریقا تا منطقه همگرایی دریای سرخ تا خلیج فارس قابل مشاهده بوده شدت همگرایی رطوبت بر روی خلیج عدن شدیدتر از سایر نواحی است؛ اما شدیدترین همگرایی رطوبت جوی در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال روز ١٤ خرداد ۱۳۸۹ در ساعت۲۱/۳۰ مشاهده می‌شود (شکل ۳ ب). در ساعت مذکور سه هسته اصلی همگرایی

رطوبت ۳۰ گرم بر کیلوگرم بر روی دریای سرخ، خلیج عدن و خلیج فارس متمرکز شده و انبارشی از وزش شدید رطوبت دریای عرب در مناطق یاد شده که درنهایت منجر به بارش‌های سنگینی منطقه خلیج فارس در ساعت ۲۱/۳۰ شده، قابل مشاهده است.

۳-۲- همگرایی جریان رطوبت جو در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال

با وجود وزش رطوبتی مناسب و قوی از دریای عرب به سمت سواحل ایران در چابهار در کلیه مشاهدات روز مذکور از ساعت ۳/۳۰ تا ۲۱/۳۰، تنها در ساعت ۹/۳۰ (شکل ٤ ب) منحنی میزان ۱۰ گرم بر کیلوگرم از روی چابهار عبور کرده است. با این وجود هسته‌های همگرای رطوبت جو تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال در سایر ساعت در نزدیکی سواحل چابهار مستقر بوده و باعث شارش رطوبت به سمت چابهار شده‌اند (شکل ٤).

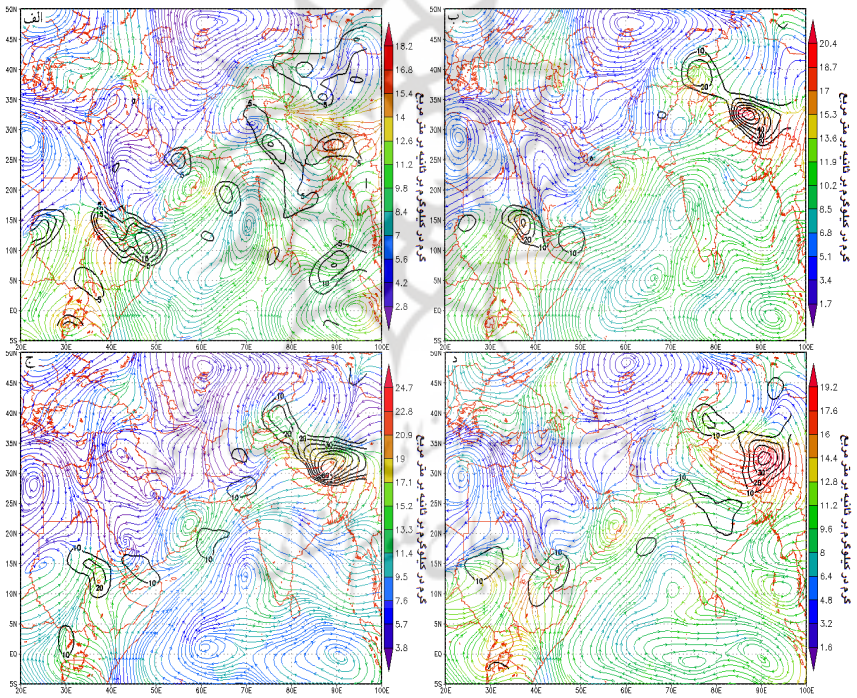


شکل ۴ همگرایی جریان رطوبت جو در طی توفان فت بر روی چابهار در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال برای ساعت‌های الف: ۳/۳۰؛ ب: ۹/۳۰؛ ج: ۱۵/۳۰و د: ۲۱/۳۰ روز ۱۴ خرداد ۱۳۸۹ (منحنی میزان همگرایی رطوبت را براساس گرم بر کیلوگرم بر متر مربع در ثانیه نشان می‌دهد.)

همان‌گونه که از نقشه ٤ مشاهده می‌شود، در هر ٤ مشاهده تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال در روز ١٤ خرداد ١٣٨٩، شارش رطوبت از دریای عمان به سمت سواحل ایران در چابهار با شدت و ضعف زمانی تداوم یافته است.

۳-۳- همگرایی جریان رطوبت جو در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال

وزش رطوبتی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال موجب ایجاد هسته‌های همگرای رطوبت در ساعت ۳/۳۰ بر روی خلیج فارس، شمال دریای عرب و غرب دریای عرب بر روی خلیج عدن و جنوب دریای سرخ شده که هسته‌های همگرایی رطوبت یاد شده بر بارش چابهار تأثیرگذار نبوده‌اند (شکل ۵ الف).

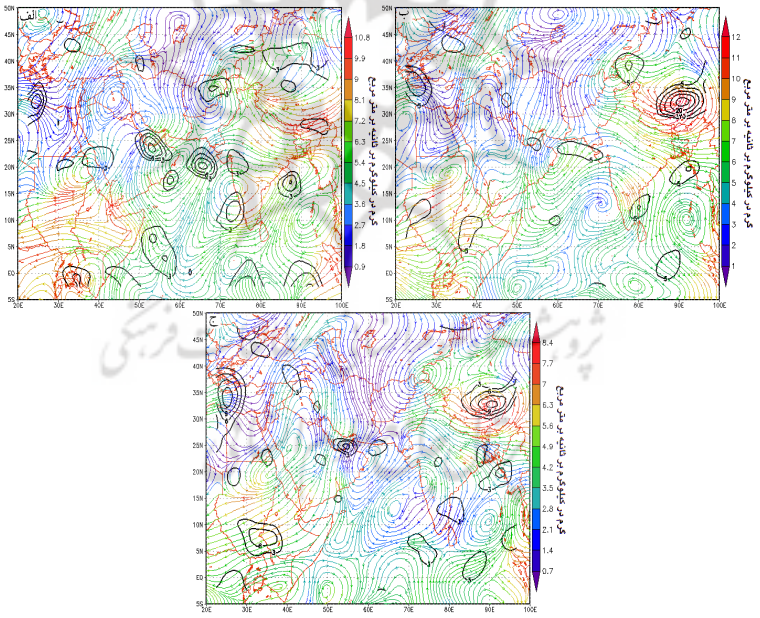


شکل ۵ همگرایی جریان رطوبت جو در طی توفان فت بر روی چابهار در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال برای ساعات‌های الف: ۳/۳۰، ب: ۹/۳۰، ج: ۱۵/۳۰و د: ۲۱/۳۰ روز ۱۴ خرداد ۱۳۸۹ (منحنی میزان همگرایی رطوبت را براساس گرم بر کیلوگرم بر متر مربع در ثانیه نشان می‌دهد.)

با تغییرات جزئی جهت وزش باد در ساعت‌های ۹/۳۰ و ۱۵/۳۰ وزش رطوبت از روی هسته‌های همگرایی جنوب شرقی دریای سرخ و خلیج عدن (شکل ۵ ب) و هسته همگرایی شمال دریای عرب (شکل ۵ ج) به علت نزدیکی به سطوح میانی جو موجب ایجاد ابر و تقویت رطوبتی بارش سنگین روز ١٤ خرداد ١٣٨٩ در چابهار شده است.

۳-۴- همگرایی جریان رطوبت جو در تراز ۷۰۰ و ۶۰۰ هکتوپاسکال

ترسیم نقشه‌های وزش و همگرایی جریان رطوبت تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال ساعت‌های مختلف روز ١٤ خرداد ١٣٨٩ نشان می‌دهد که علی‌رغم وزش رطوبتی و تداوم شدت و ضعف آن در هر مشاهده، همگرایی جریان رطوبتی مؤثر بر بارش سنگین سواحل چابهار فقط در ساعت ۳/۳۰ (شکل ٦ الف) و ۲۱/۳۰ (شکل ٦ ب) قابل مشاهده بوده و همگرایی جریان رطوبت در ساعت ۳/۳۰ با سه هسته همگرایی رطوبتی در نزدیکی منطقه از شدت بیش‌تری برخوردار است.

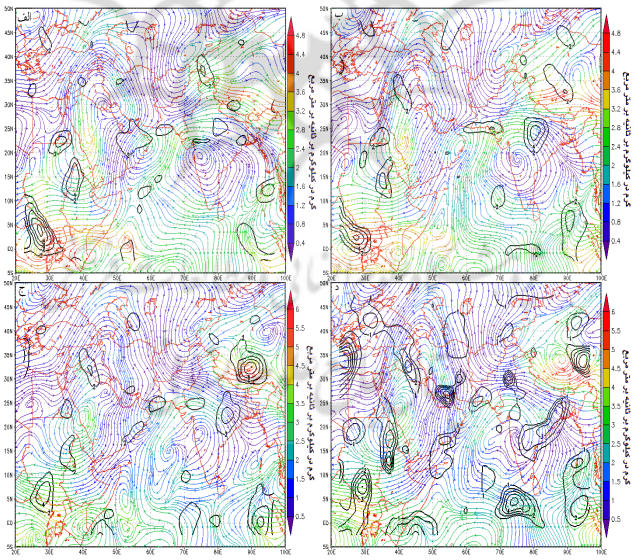


شکل ۶ همگرایی جریان رطوبت جو در طی توفان فت بر روی چابهار در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال برای ساعت‌های الف: ۳/۳۰، ب: ۲۱/۳۰ و ج: تراز ۶۰۰ هکتوپاسکال در ساعت ۲۱/۳۰ روز ۱۴ خرداد ۱۳۸۹ (منحنی میزان همگرایی رطوبت را براساس گرم بر کیلوگرم بر متر مربع در ثانیه نشان می‌دهد.)

جریان باد و به تبع از آن مسیر وزش رطوبت در تراز ٦٠٠ هکتوپاسکال در روز ١٤ خرداد ١٣٨٩ به نحوی بوده است که هسته‌های همگرایی جریان رطوبت جوی مؤثر بر بارش سنگین چابهار فقط در ساعت ٢١/٣٠ و بر روی خلیج عمان و خلیج فارس قابل مشاهده‌اند (شکل ٦ ج).

۳-۵- همگرایی جریان رطوبت جو در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

با این که میزان وزش رطوبتی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به نسبت سایر ترازهای جوی سهم کمی را از رطوبت بارش سنگین چابهار در روز ١٤ خرداد ١٣٨٩ تأمین کرده است، اما از نظر استقرار هسته‌های مربوط به جریان رطوبتی جو در تمام مشاهدات زمانی به عمل آمده وزش رطوبتی جو در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال موجب ایجاد شار همگرایی رطوبت بر روی سواحل ایران در چابهار شده است که این امر برای ساعت‌های مختلف روز ١٤ خرداد ١٣٨٩ در شکل ۷ به وضوح قابل مشاهده بوده و همان طور که ملاحظه می‌شود، شدت شارش همگرایی رطوبت در ساعت ٢١/٣٠ (شکل ۷ د) به‌خصوص در محدوده خلیج فارس از شدت بیش‌تری برخوردار است.



شکل ۷ همگرایی جریان رطوبت جو در طی توفان فت بر روی چابهار در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای ساعت‌های الف: ۳/۳۰، ب: ۹/۳۰، ج: ۱۵/۳۰ و د: ۲۱/۳۰ روز ۱۴ خرداد ۱۳۸۹ (منحنی میزان همگرایی رطوبت را براساس گرم بر کیلوگرم بر متر مربع در ثانیه نشان می‌دهد.)

۴- نتیجه‌گیری

یکی از ملزومات اصلی وقوع بارش‌های سنگین و سیل‌آسا وجود هسته‌های رطوبتی روی منطقه وقوع بارش سنگین یا نزدیکی است. هسته‌های همگرای رطوبت بر اثر وزش شدید رطوبت بویژه از روی سطوح آبی مستقر در عرض‌های پایین یا حاره به سمت خشکی‌های عرض‌های میانی جغرافیایی، به وجود می‌آیند. همگرایی جریان رطوبت نقش بسیار مهمی در انبارش و تزریق رطوبت به درون چرخند (توفان)های حاره‌ای مانند فت دارند و همان گونه که در منابع مختلف پیشینه تحقیق ذکر شد، بارش‌های سنگین بدون دخالت و وجود همگرایی جریان رطوبت غیر قابل وقوع هستند.

نگاشت نقشه‌های مربوط به وزش رطوبت و همگرایی جریان رطوبت جوی در ترازهای سطح زمین تا تراز میانی جو در روز ١٤ خرداد که نزدیک‌ترین موقع زمانی و مکانی اثر توفان بر سواحل ایران در چابهار است، نشان‌دهنده نقش بسیار بارز و مهم همگرایی جریان رطوبت جو در وقوع بارش سنگین ۱۰۹/۵ میلی‌متری چابهار است که توفان مذکور با ایجاد بارش‌های همرفتی شدید توأم با رعد و برق و با ایجاد امواج بلند دریایی در دریا و سیلاب در نوار ساحلی چابهار خسارت‌های سنگینی به سواحل ایران در چابهار وارد کرده است.

مرور نقشه‌های ترسیمی از فرایند همگرایی جریان رطوبتی جو در جریان توفان فت نشان داد که وقوع فرایند مذکور در سطوح مختلف جو بویژه تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال (که به سبب نزدیکی به سطح زمین، پهنه‌های آبی و سطوح تبخیر و وقوع آشفتگی و تلاطم بیش‌تر دارای رطوبت بیش‌تری نسبت به ترازهای فوقانی بوده و اهمیت آن نسبت به دیگر سطوح جوی بیش‌تر است) مهم‌ترین و تأثیرگذارترین عامل وقوع بارش‌های همرفتی منجر به سیلاب و توفان بویژه در ساعت‌های آغازین (۳/۳۰) و انتهایی (۲۱/۳۰) روز ١٤ خرداد ۱۳۸۹ است. نقش زیاد ترازهای ۱۰۰۰ و ۹۲۵ هکتوپاسکال نشان‌دهنده تأثیرپذیری بارش سنگین از چرخند حاره‌ای فت است؛ در حالی که در سطوح بالاتر که به سطوح میانی نزدیک‌ترند، نقش دینامیک جو یا همان وزش رطوبتی ناشی از بادهای غربی اهمیت بیش‌تری دارد.

با توجه به مسیر وزش و همگرایی جریان رطوبت در طی توفان فت معلوم می‌شود که منبع تأمین و تزریق رطوبت به چرخند حاره‌ای که حرکت آن به سمت سواحل چابهار موجب

ریزش بارش سنگین در روز ١٤ خرداد ١٣٨٩ شده، به استثنای وزش و همگرایی جریان رطوبت تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در ساعت ۹/۳۰ که تزریق رطوبت از سمت خلیج عدن و جنوب غرب منطقه همگرایی دریای سرخ انجام گرفته در سایر ترازهای جوی و ساعت‌های روز ١٤ خرداد ١٣٨٩ منبع تزریق و تغذیه رطوبت بارش سنگین سواحل چابهار دریای عرب و خلیج عمان بوده‌اند.

نقشه‌های ترسیمی و استفاده شده در این پژوهش ابزار جدیدی برای مطالعات اقلیمی توفان‌های حاره‌ای و بارش‌های سنگین در اختیار محققان قرار می‌دهد که با استفاده از آن‌ها می‌توان در تحلیل‌های هیدرواقلیمی، موقعیت هسته‌های رطوبتی، همگرایی جریان رطوبت ناشی از وزش رطوبت در مناطق مختلف و موقعیت آن نسبت به منطقه بارش و وزش رطوبت از ترازهای مختلف را که منبع تأمین رطوبت بارش‌ها هستند، تشخیص داد و با دقت بسیار بیش‌تر و سهولت اقدام به تجزیه و تحلیل بارش‌ها و بویژه توفان‌های حاره ای به عنوان یکی از پدیده‌های نوظهور ناشی از تغییر اقلیم در ایران کرد.

۵- منابع

- خسروی م.، پودینه م. ر.ضا؛ تحلیلی بر تأثیرات اقلیمی سیکلون حاره‌ای گونو (خرداد ١٣٨٦) بر جنوب شرق ایران، *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، شماره ۷۲ ،۱۳۸۹: ۵۳-۷۲ .
- قویدل رحیمی؛ نگاشت و تفسیر سینوپتیک اقلیم با استفاده از نرم‌افزار Grads؛ چاپ اول تهران: انتشارات سها دانش، ۱۳۸۹.
- کریمی احمدآباد م.؛ تحلیل منابع رطوبت بارش‌های ایران؛ رساله دکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی, دانشگاه تربیت مدرس تهران، ١٣٨٦.
- مفیدی ع.؛ اقلیم‌شناسی سینوپتیکی بارش‌های سیل‌زا با منشأ منطقه دریای سرخ در خاورمیانه؛ *تحقیقات جغرافیایی*، شماره پیاپی ۷۵، ۳۸۳ :۷۱-۹۳ .
- محمدی ب.؛ تحلیل همدید بارش‌های ابر سنگین ایران، رساله دکتری اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه اصفهان، ۱۳۸۸.
- Allaby M.; Encyclopedia of weather and climate; Facts On File, Inc, 2007.

- Banacos P. C., D. M. Schultz; The use of moisture flux convergence in forecasting convective initiation: Historical and operational perspectives; Weather Forecasting, 20, 2005: 351-366.
- Dibajnia M., M. Soltanpour, R. Nairn, M. R. Allahyar, Cyclone Gonu: The most intense tropical cyclone on record in the Arabian Sea; in Y. Charabi (ed.), Indian Ocean Tropical Cyclones and Climate Change, Springer, 2010.
- Callaghan J.; The tropical cyclone risk in Cairns; Natural Hazards 30, 2003: 129–153.
- Chen L., L. Ying, C. Zhengquan; An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones; *Advances in Atmospheric Sciences*, 27(5), 2010: 967–976.
- choi K. S., J. A. Moon, D. W. Kim; Seasonal prediction of tropical cyclone genesis frequency over the western north pacific using teleconnection patterns; Theor Appl Climatol, 100 , 2010:191–206.
- Henderson-Sellers A.; Tropical cyclones and global climate change: A post-IPCC assessment; Bull Am Meteorol Soc, 79, 1998:19–38.
- http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.
- http://www.onvannews.com.
- http://www.pakmet.com.pk.
- Zhang Q, W. Zhang, Y. D., Chen, T. Jiang; Flood, drought and typhoon disasters during the last half-century in the Guangdong province ; China, Natural Hazards, in Press, DOI 10.1007/s11069-010-9611-9, 2011.