

## دینامیک مسیرهای توفان در زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸ از دیدگاه انرژی

فرناز حسین پور<sup>۱\*</sup>، علیرضا محب‌الحجه<sup>۲</sup> و فرهنگ احمدی گیوی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته هوشناسی، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۸۹/۴/۲۶، پذیرش نهایی: ۹۱/۴/۱۳)

### چکیده

برای بررسی اقلیم‌شناختی مسیرهای توفان در زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸، علاوه بر داده‌های جهانی GFS از داده‌های جهانی بازتحلیل NCEP-NCAR از سال ۱۹۴۸ تا ۲۰۰۵ برای میانگین‌های اقلیم‌شناختی استفاده شده است. در زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸ به همراه کاهش انرژی جنبشی پیچکی در پادجریان‌سوی مسیر توفان اطلس، انرژی پتانسیل در دسترس پیچکی نیز در این مناطق به علت کاهش تولید کُفشاری نسبت به میانگین اقلیم‌شناختی آن کاهش یافته است. علاوه بر جمله تبدیل کُفشاری که به‌منزله عامل کُفشار، مهم‌ترین نقش را در تقویت و کشیده شدن جت در پادجریان‌سوی مسیر توفان اطلس در زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸ داشته، افزایش مقادیر مثبت تبدیل فشارورودی نیز در حکم عامل فشارورودی نقش موثری در این خصوص داشته است.

در بررسی نقش جملات انرژی در خاورمیانه به‌ویژه در ژانویه ۲۰۰۸، تولید کُفشاری مهم‌ترین جمله در تغذیه انرژی از جریان‌سوی مدیترانه بوده و تکوین جریان‌سوی قوی با واگرایی شدید شار آزمین‌گرد را به همراه داشته است. در این ماه، استقرار هسته جت جنوب‌غرب آسیا در مناطق شمال عربستان تا جنوب‌غرب ایران عامل افزایش انرژی جنبشی شارش میانگین در این مناطق است. تبدیل کُفشاری، تولید کُفشاری و واگرایی شار آزمین‌گرد در مناطق شمال عربستان و غرب ایران به بیشینه مقدار خود در زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸ رسیده و سبب تقویت انرژی پیچکی و تابش قوی به نواحی مرکزی ایران شده است. بیشینه همگرایی قوی شار آزمین‌گرد روی ایران نشان می‌دهد که به‌طور میانگین منطقه ایران در این ماه گیرنده انرژی بوده و عمیق شدن ناوه دمایی و سرمای بی‌سابقه در دهه‌های اخیر را روی ایران به دنبال داشته است. در فوریه ۲۰۰۸، بیشینه بی‌هنجاری مثبت تبدیل فشارورودی در نیمکره شمالی روی ایران بوده و جابه‌جایی جریان‌سوی جت جنوب‌غرب آسیا سبب افزایش انرژی جنبشی میانگین در این مناطق شده است. در این ماه، افزایش شدید تبدیل فشارورودی در مناطق شمالی و جنوبی ایران و بیشینه محلی تولید کُفشاری در مناطق مرکزی ایران به‌ترتیب با افزایش انرژی جنبشی پیچکی و انرژی پتانسیل در دسترس پیچکی همراه بوده و به‌طور میانگین منطقه ایران در این ماه فرستنده انرژی به مناطق هم‌جوار شرقی بوده است.

واژه‌های کلیدی: انرژی جنبشی پیچکی، انرژی پتانسیل در دسترس پیچکی، تبدیل کُفشاری، تولید کُفشاری، تبدیل فشارورودی،

شار آزمین‌گرد

### Storm track dynamics in anomalous winter 2007-2008 from energetic perspective

Hosseinpour, F.<sup>1</sup>, Mohebalhojeh, A. R.<sup>2</sup> and Ahmadi-Givi, F.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>M.Sc. in Meteorology Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 17 Jul 2010, Accepted: 03 Jul 2012)

### Abstract

Climatological study of the mid-latitude storm tracks was investigated using the daily Global Forecast System (GFS) and the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Reanalysis data sets from 1948 to 2008 winter seasons. In anomalous winter

2007-2008, decreasing of eddy kinetic energy along with the reduction of eddy available potential energy upstream of Atlantic storm track are related to weakening of the baroclinic generation with respect to the long-term means. In addition to the baroclinic conversion, the most important term in strengthening and stretching of the jet-stream upstream of Atlantic storm track, the increase of the positive values of barotropic conversion plays a controlling role.

Study of the energetics over the Middle East shows that in January 2008, the domination of the subtropical jet stream core over the south-western Iran was responsible for the increase of the mean kinetic energy. Baroclinic generation had a remarkable role in energy feeding from downstream of Mediterranean, which produced strong convergence of ageostrophic flux due to the downstream development over the Mediterranean storm track. Significant increase of baroclinic conversion, baroclinic generation, and divergence of ageostrophic flux have their maximum values over the north of Arabian Peninsula causing intense eastward radiation of eddy energy toward the central part of Iran. In this month, the maximum convergence of ageostrophic flux shows that on average, Iran was a strong sink of energy associated with deepening of thermal trough and dominance of unprecedented cold anomalies over the northern Iran in the recent decades.

In February 2008, in addition to the increase of the mean kinetic energy due to the downstream displacement of subtropical jet-stream over south-western Iran, the maximum of positive barotropic conversion anomaly in Northern Hemisphere was located over this region. Local core of baroclinic generation over the central part of Iran elongated between the significant positive bands of barotropic conversion was accompanied by the increase of the eddy kinetic energy and eddy available potential energy, respectively. This indicates that Iran, on average, was a transmitter of energy toward the adjacent eastern regions during this month.

**Key words:** Eddy kinetic energy, Eddy available potential energy, Baroclinic conversion, Barotropic conversion, Barotropic generation, Ageostrophic flux

## ۱ مقدمه

روی رشد پادجریان سوی امواج کژفشاری روشن ساختند که در اواسط زمستان و در سالهایی که جت آرام قوی تر است، مسیر توفان آرام با پهنای کمتر و ضعیف تر همراه است. همچنین زمانی که جت منطقه اقیانوسی آرام قوی تر است، به علت عبور سریع پریشیدگی ها، فعالیت پیچکی (eddy activity) ضعیف تر است. به بیان دیگر، امواج کژفشاری در منطقه ورودی مسیر توفان رشد می کنند و در بخش جریان سو با افزایش انرژی جنبشی پیچکی کاهش می یابند. میانگین جریان مداری وقتی از لحاظ دینامیکی دارای ناپایداری کژفشاری است که آشفتگی ایجاد شده انرژی لازم برای رشد خود را از انرژی پتانسیل در دسترس

انرژی جو از طریق بسته های موج در مسیرهای توفان به جریان سو منتقل می شود (ارلانسکی و گراس، ۲۰۰۰). از آنجا که مسیرهای توفان بخش مهمی از گرما و تکانه را منتقل می سازند، در حکم واداشت در جریان های بزرگ مقیاس عمل می کنند و در دینامیک آب و هوای عرض های میانی نقش بسیار غالبی دارند (دانلسون و همکاران، ۲۰۰۵). هسته مسیر توفان در جریان سوی هسته جریان جتی، در نزدیکی خروجی جت و در شاخه شمالی آن قرار دارد؛ به طوری که می توان گفت بیشینه یکی روی کمینه دیگری است (هاسکینز و پیرس، ۱۹۸۸). هارنیک و چنگ (۲۰۰۴) با بررسی تاثیر پهنای جریان جتی آرام

$$\frac{\partial K}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{v}K + \mathbf{v}_a \phi') - \omega' \alpha' - \mathbf{v}' \cdot (\mathbf{v}'_3 \cdot \nabla_3) \bar{\mathbf{v}} + \mathbf{v}' \cdot (\mathbf{v}'_3 \cdot \nabla_3) \bar{\mathbf{v}} - \frac{\partial}{\partial p} \omega K - \frac{\partial}{\partial p} \omega' \phi' + \text{Res.} \quad (1)$$

در رابطه فوق، خط تیره بالای کمیت‌ها نشانگر میانگین زمانی، علامت پریم نشان‌دهنده پربیشیدگی‌ها یا مولفه‌های پیچکی، پایین‌نویس  $a$  نشانگر باد آزمین‌گرد و پایین‌نویس ۳ بیان‌گر بردارها و گرادیان‌های سه‌بعدی است.  $K$  انرژی جنبشی پیچکی بر واحد جرم،  $t$  زمان،  $\mathbf{v}$  سرعت افقی،  $\omega$  سرعت قائم فشاری،  $\phi$  ارتفاع ژئوپتانسیلی،  $p$  شار و  $\alpha$  حجم ویژه است. جمله اول سمت راست رابطه، شار کل برابر با مجموع دو جمله شار فرارفتی و پاشنده است. جمله دوم، تبدیل کثرفشاری نام دارد که برای صعود هوای گرم و نزول هوای سرد مثبت است؛ یعنی زمانی که  $\omega' \alpha'$  منفی است، تبدیل کثرفشاری مثبت است و در این حالت بر اساس چرخه لورنتس انرژی پتانسیل در دسترس پیچکی به انرژی جنبشی پیچکی تبدیل می‌شود. جملات سوم و چهارم ناشی از تنش رینولدز هستند و توسط چینش افقی مشخص می‌شوند و بدین دلیل تبدیل فشاروردی نامیده می‌شوند. طبق چرخه لورنتس، این جملات بازگشت انرژی جنبشی پیچکی به انرژی جنبشی میانگین را نشان می‌دهند. جمله پنجم شار فرارفتی در راستای قائم، جمله ششم شار پاشنده در راستای قائم و جمله آخر باقی‌مانده بودجه انرژی جنبشی پیچکی است. با ترکیب جملات شار پاشنده، تبدیل کثرفشاری و شار پاشنده در راستای قائم، جمله  $\mathbf{v} \cdot \nabla \phi$  حاصل می‌شود که طبق تحقیقات ارلانسکی و کاتزفی (۱۹۹۱) نشان‌دهنده تکوین جریان‌سواست. چنگ و همکاران (۲۰۰۲) از دیدگاهی دیگر معادله بودجه انرژی کل را به صورت زیر بیان کردند:

میانگین به دست آورده باشد (محب‌الحجه و همکاران، ۱۳۸۴؛ نصر اصفهانی و همکاران، ۱۳۸۸). با توجه به مطالب فوق، بررسی‌های پُرانرژی (انرژی‌تیک) و بررسی بی‌هنجاری‌های جهانی این کمیت‌ها در دوره زمانی موردنظر هدف این پژوهش قرار گرفته است.

برای انجام این بررسی، داده‌های تحلیل شده مدل جهانی GFS با تفکیک فضایی ۱ درجه در راستاهای مداری و نصف‌النهاری و تفکیک زمانی ۶ ساعته در بازه زمانی دسامبر ۲۰۰۷ تا فوریه ۲۰۰۸ مورد استفاده قرار گرفته و متوسط‌گیری قائم جملات انرژی روی وردسپهر در بازه فشاری ۱۰۰۰ تا ۱۰۰ هکتوپاسکال صورت گرفته است. از داده‌های بازتحلیل NCEP/NCAR از سال ۱۹۴۸ تا ۲۰۰۵ با تفکیک افقی ۲/۵ درجه برای به‌دست آوردن الگوهای میانگین اقلیمی و بی‌هنجاری‌های زمستان مورد بررسی، بهره گرفته شده است.

در این پژوهش، ابتدا نقش جملات موثر در تقویت و تضعیف انرژی پیچکی روی مسیرهای توفان آرام، اطلس و مدیترانه نسبت به میانگین‌های اقلیم‌شناختی تعیین و ارتباط مسیرهای توفان با یکدیگر و جریان جتی بر مبنای مقایسه هریک از جملات انرژی در میانگین‌های اقلیمی و فصلی معین شده است. در ادامه، با تمرکز بررسی روی منطقه خاورمیانه و به‌خصوص ایران، علل بی‌هنجاری‌های سرد زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸ که از موارد کم‌سابقه در این منطقه در دهه‌های اخیر بوده است، از دیدگاه انرژی تحلیل شده است.

## ۲ مبانی نظری

چنگ (۲۰۰۰) براساس تحقیقات ارلانسکی و کاتزفی (۱۹۹۱)، رابطه بودجه انرژی جنبشی پیچکی را به صورت زیر بیان کرد:

آنها قرار دارد (شکل ۱-الف). در مقایسه اقلیمی مسیرهای توفان آرام و اطلس با یکدیگر، این طور به نظر می‌رسد که قوی‌تر بودن جت آرام نسبت به جت اطلس در پادجریان سو با عبور سریع‌تر پیچک‌ها و ضعیف‌تر بودن EKE در جریان سوی آرام نسبت به اطلس در ارتباط باشد. از سوی دیگر، مقایسه الگوهای فصل خاص و اقلیم‌شناختی EKE روی آرام و اطلس، کاهش EKE را در جریان سوی مسیرهای توفان در زمستان ۲۰۰۸-۲۰۰۷ (شکل ۱-ب) نشان می‌دهد که در این مقایسه نیز کاهش EKE با تقویت جت در مناطق پیش‌گفته همراه بوده است. این مطلب در بررسی الگوهای میانگین ماهانه به‌خصوص در ماه ژانویه به‌منزله ماه بحرانی نیز مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که کمینه مقادیر میانگین اقلیم‌شناختی EKE به‌خصوص روی آرام و مدیترانه در ماه ژانویه بوده است و این در حالی است که در ماه ژانویه روی نواحی شرقی اطلس بیشینه محلی EKE وجود دارد (شکل‌های ۲-الف و ۳-الف). از سوی دیگر بررسی الگوهای ماه به ماه اقلیم‌شناختی جت‌ها نشان می‌دهد که بیشینه مقادیر جت‌ها نیز غالباً در ماه ژانویه شکل می‌گیرد.

نتایج حاصل از بررسی ارتباط پدیده‌های کم‌بسامد با انرژی پیچکی روی مسیرهای توفان آرام و اطلس در زمستان ۲۰۰۸-۲۰۰۷ حاکی از آن است که مقادیر EKE روی آرام نسبت به عرض‌های جغرافیایی دارای پهنای بیشتری بوده است. همچنین افزایش EKE در شمال شرق آرام و کاهش آن در شرق آرام نسبت به میانگین‌های اقلیمی نشانگر جابه‌جایی مسیر توفان آرام در فاز سرد ENSO در این دوره بوده است و با جابه‌جایی‌پذیری نصف‌النهاری هسته جت آرام که نشانه‌ای از حاکمیت لائینا در این دوره است، هماهنگی دارد. از سوی دیگر، روی مسیر توفان اطلس در الگوهای هر سه ماه زمستان ۲۰۰۸-۲۰۰۷، افزایش EKE در شمال اروپا و کاهش

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{v}E + \mathbf{v}'_a \phi') + \frac{\alpha_m}{\Theta_m} \frac{\overline{\mathbf{v}' \theta'}}{(\frac{\partial \Theta}{\partial p})} \cdot \nabla \Theta - \mathbf{v}' \cdot (\mathbf{V}'_3 \cdot \nabla_3) \mathbf{v}'_m - \text{diss} + \text{diab}_s \quad (2)$$

که در آن، پایین‌نویس  $m$  کمیت‌های میانگین را نشان می‌دهد و نام‌گذاری متغیرها مشابه رابطه (۱) است. علاوه بر آن،  $\theta'$  پرتاب‌دهی دمای پتانسیلی پیچکی و  $\Theta$  میانگین افقی و زمانی دمای پتانسیلی پیچکی است. جمله اول سمت راست معادله، شار انرژی کل است که ترکیب دو جمله شار ژئوپتانسیلی آزمون‌گرد و شار پاشنده است. بر پایه نتایج چنگ و ارلانسکی (۱۹۹۴) این جمله نشان‌دهنده انتشار پیچکی یا تکوین جریان سو است. جمله دوم تولید کژفشاری، جمله سوم تبدیل فشارورودی، جمله چهارم اتلاف مکانیکی انرژی و جمله پنجم تولید انرژی در اثر فرایندهای دررو است.

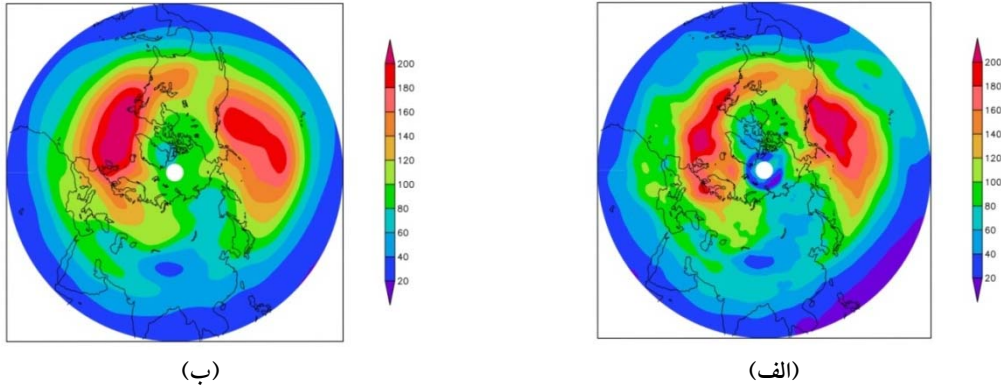
۳ مقایسه میانگین جملات انرژی در زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸ با میانگین متناظر برای دوره ۱۹۴۸ تا ۲۰۰۵ در این بخش با بررسی هریک از جملات انرژی به‌صورت میانگین‌های فصلی (زمستان ۲۰۰۸-۲۰۰۷) و میانگین‌های ماه به ماه آن و همچنین مقایسه آنها با الگوهای اقلیم‌شناختی متناظر (دوره ۱۹۴۸ تا ۲۰۰۵) به‌ترتیب روی مسیرهای توفان آرام، اطلس و مدیترانه، نقش این جملات و ارتباط آنها با یکدیگر در بی‌هنجاری‌های منطقه‌ای مشخص می‌شود.

### ۱-۳ انرژی جنبشی پیچکی

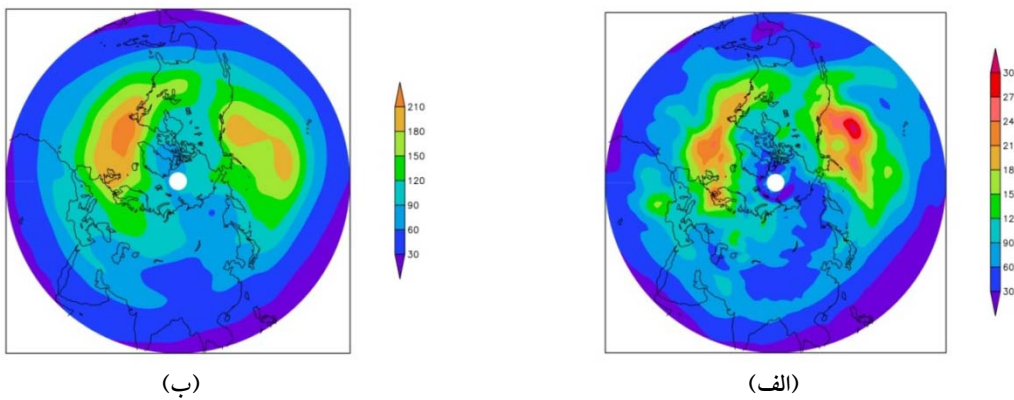
بخش پادجریان سوی مسیرهای توفان اطلس و آرام مکان دو مرکز عمده کژفشاری در نیمکره شمالی است و در الگوهای میانگین اقلیم‌شناختی مشاهده می‌شود که بیشینه مقادیر (Eddy Kinetic Energy) EKE در جریان سوی

دوره علاوه بر جابه‌جایی قطب‌سوی جت اطلس که نشانه حاکمیت فاز مثبت NAO است، جابه‌جایی قطب‌سوی EKE نیز روی مسیر توفان اطلس مشاهده می‌شود.

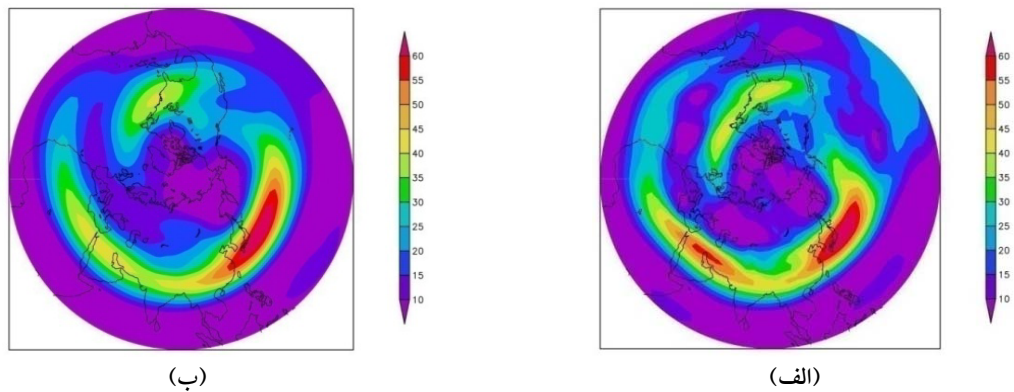
آن در جنوب اروپا و شمال‌غرب اطلس نسبت به میانگین‌های اقلیمی، جابه‌جایی قطب‌سوی EKE را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت که در این



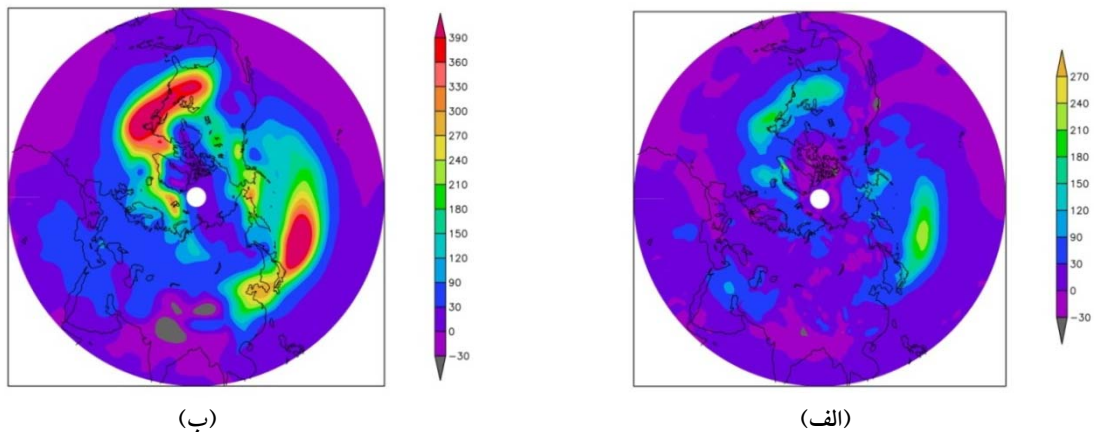
شکل ۱. میانگین زمانی متوسط قائم انرژی جنبشی پیچکی در نیمکره شمالی برای: (الف) زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸ و (ب) زمستان‌های ۱۹۴۸ تا ۲۰۰۵. فاصله پربندی برابر با  $20 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  است.



شکل ۲. مانند شکل ۱ ولی برای: (الف) ژانویه ۲۰۰۸ و (ب) ژانویه‌های ۱۹۴۸ تا ۲۰۰۵.



شکل ۳. میانگین تندی باد در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال در نیمکره شمالی برای: (الف) ژانویه ۲۰۰۸ و (ب) ژانویه‌های ۱۹۴۸ تا ۲۰۰۵. فاصله پربندی برابر با ۵ متر بر ثانیه است.

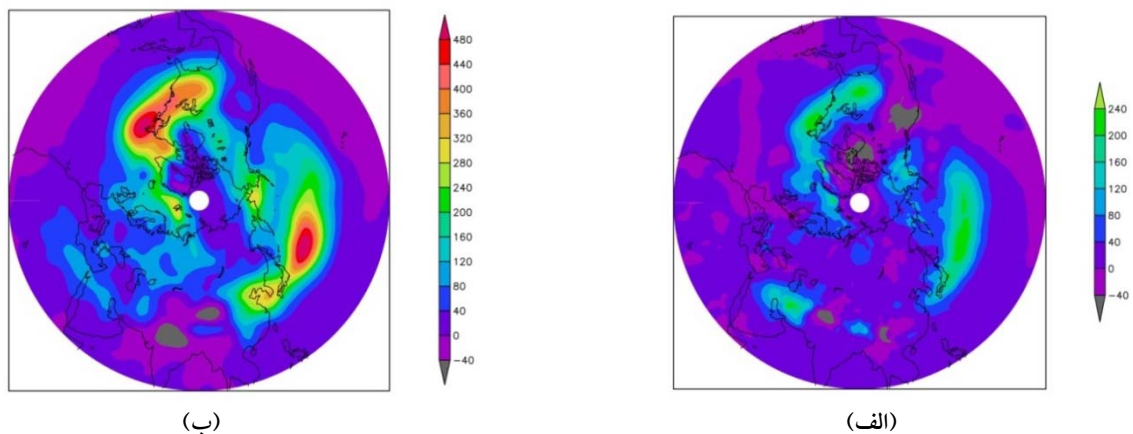


شکل ۴. میانگین زمانی متوسط قائم تولید کژفشاری در نیمکره شمالی برای: (الف) زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸ و (ب) زمستان‌های ۱۹۴۸ تا ۲۰۰۵. فاصله پربندی برابر با  $30 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  است.

مثبت EKE با افزایش BCG و در نتیجه افزایش انرژی پتانسیل در دسترس پیچگی همراه بوده است. روی مسیر توفان آرام نیز مشاهده می‌شود که در مناطق دارای بی‌هنجاری منفی EKE، کاهش BCG وجود دارد. بنابراین با توجه به آنکه انرژی پیچگی برابر با مجموع انرژی جنبشی پیچگی و انرژی پتانسیل در دسترس پیچگی است، می‌توان گفت که رشد کژفشاری در پادجریان سوی مسیرهای توفان اطلس و آرام در زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸ نسبت به میانگین اقلیم‌شناختی، با عبور سریع گذراها و کاهش انرژی پیچگی همراه بوده است.

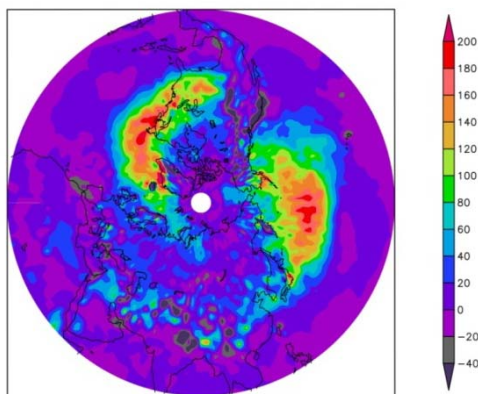
### ۲-۳ تولید کژفشاری

بررسی الگوهای میانگین ماه به ماه (شکل‌های ۴ و ۵) نشان می‌دهد که در پادجریان سوی مسیر توفان اطلس به همراه کاهش EKE، از مقدار میانگین تولید کژفشاری (BCG, Baroclinic Generation) نیز نسبت به میانگین اقلیم‌شناختی آن کاسته شده است. از آنجا که انرژی پتانسیل در دسترس میانگین با BCG به انرژی پتانسیل در دسترس پیچگی تبدیل می‌شود، کاهش انرژی پتانسیل در دسترس پیچگی در پادجریان سو را نیز می‌توان انتظار داشت. در نواحی شرقی اطلس، بیشینه محلی بی‌هنجاری

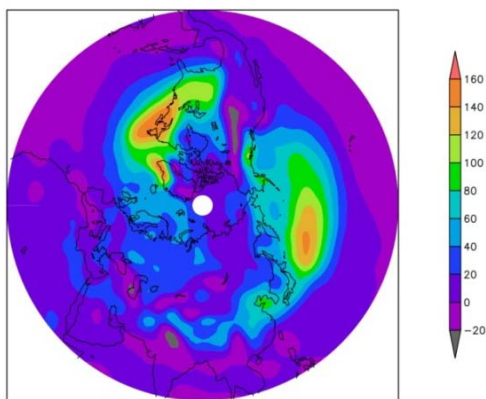


شکل ۵. میانگین زمانی متوسط قائم تولید کژفشاری در نیمکره شمالی برای: (الف) فوریه ۲۰۰۸ و (ب) فوریه‌های ۱۹۴۸ تا ۲۰۰۵.

مثبت NAO در این دوره مرتبط است (شکل‌های ۶-الف و ۶-ب). این جابه‌جایی و افزایش گستره و قدرت BCC در هر سه ماه زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸، مشهود است و نشان می‌دهد که حاکمیت فاز مثبت NAO در هر سه ماه با رشد کژفشاری در پادجریان‌سوی اطلس که عمده‌ترین مرکز کژفشاری نیمکره شمالی است، ارتباط تنگاتنگ دارد. بررسی مقدار عددی جملات انرژی در هر سه ماه زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸ حاکی از آن است که در پادجریان‌سوی مسیرهای توفان اطلس و آرام، نقش BCC در تقویت انرژی بیشتر از سایر جملات بوده است.



(الف)



(ب)

شکل ۶. میانگین زمانی متوسط قائم تبدیل کژفشاری در نیمکره شمالی برای: (الف) زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸ و (ب) زمستان‌های ۱۹۴۸ تا ۲۰۰۵. فاصله پربندی برابر با  $20 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  است.

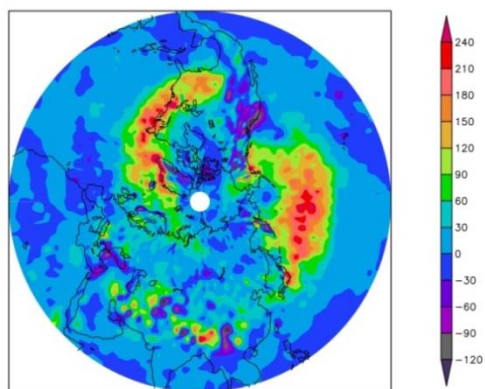
بررسی BCG روی مسیر توفان مدیترانه حاکی از آن است که بیشینه محلی این جمله در شمال عربستان در دسامبر ۲۰۰۷ تشکیل و در ژانویه ۲۰۰۸ (شکل ۵-الف) بر شدت آن افزوده شده است. این بیشینه محلی در فوریه ۲۰۰۸ (شکل ۵-ب) روی ایران بوده و به بیشترین مقدار خود نسبت به ماه‌های دیگر زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸ رسیده است؛ به طوری که بیشینه بی‌هنجاری BCG و بنابراین بیشینه انرژی پتانسیل در دسترس پیچکی در نیمکره شمالی در این منطقه استقرار داشته است. مقایسه مقدار عددی میانگین جملات انرژی روی خاورمیانه نشان می‌دهد که BCG بر واحد حجم با مقدار  $160 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  در ژانویه ۲۰۰۸ روی شمال عربستان و در فوریه ۲۰۰۸ روی ایران، مهم‌ترین جمله معادله انرژی در تغذیه این مناطق از مسیر توفان مدیترانه در هریک از دو ماه فوق بوده است. در ادامه خواهیم دید که این جمله تکوین جریان‌سوی قوی ناشی از واگرایی شدید شار آ زمین‌گرد به مقدار  $250 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  از شمال عربستان در ژانویه ۲۰۰۸ و تابش قوی به شرق سو در فوریه ۲۰۰۸ به مقدار  $200 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  از ایران را به همراه داشته است.

### ۳-۳ تبدیل کژفشاری

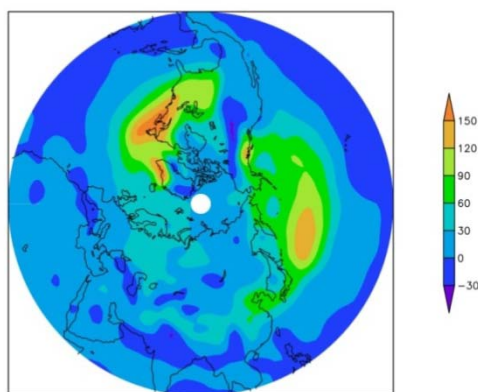
با مقایسه الگوهای میانگین EKE جریان و تبدیل کژفشاری (Baroclinic Conversion) (BCC) آن می‌توان گفت که معمولاً در پادجریان‌سوی هسته EKE که فعالیت پیچکی بالا است، هسته BCC قوی و متمرکز است و با رشد کژفشاری تناسب دارد (شکل‌های ۱-الف و ۶-الف). در الگوهای میانگین زمستان مورد بررسی، نسبت به میانگین اقلیم‌شناختی، هسته BCC وسیع‌تر و کشیده‌تر شده و الگوی جابه‌جایی به سمت قطب BCC نیز با جابه‌جایی به سمت قطب جت متاثر از فاز

و آرام مشاهده می‌شود که به همراه قوی‌تر بودن EKE، بیشینه هسته منفی BTC نیز در خروجی اطلس قوی‌تر از آرام است.

در زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸ و در جریان سوی مسیره‌های توفان اطلس و آرام، مقادیر منفی BTC قوی‌تر از میانگین‌های اقلیم‌شناختی و دارای محدوده بزرگ‌تری است که سبب افزایش انرژی جنبشی میانگین در جریان سو شده است (شکل ۸-ب). بنابراین به نظر می‌رسد که مقادیر منفی BTC از جمله عواملی است که موجب تضعیف EKE در مناطق وسیعی از جریان سوی آرام و اطلس نسبت به میانگین اقلیم‌شناختی شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۷. میانگین زمانی متوسط قائم تبدیل کژفشاری در نیمکره شمالی برای: (الف) ژانویه ۲۰۰۸ و (ب) ژانویه‌های ۱۹۴۸ تا ۲۰۰۵.

با آنکه در میانگین‌های اقلیم‌شناختی فصلی و ماهانه به خصوص ماه دسامبر، به علت کژفشاری ضعیف در اروپا و منطقه مدیترانه تا آسیای میانه و مناطق جنب حاره‌ای BCC ضعیف است، ولی در ژانویه ۲۰۰۸ بیشینه محلی BCC روی شمال عربستان مشاهده می‌شود. از آنجا که مطابق چرخه لورنتس جمله BCC نشانگر تبدیل انرژی پتانسیل در دسترس پیچکی به EKE است، افزایش انرژی پتانسیل در دسترس پیچکی در این منطقه به علت حضور بیشینه محلی BCG سبب افزایش BCC شده است (شکل ۷-ب). به این ترتیب در ژانویه ۲۰۰۸ انتشار شدید انرژی به سمت جریان سو با عمیق شدن شدید ناوه دمایی (شکل آورده نشده) و قرار گرفتن هسته قوی جت جنوب غرب آسیا روی نیمه جنوبی ایران همراه بوده و سرمای بی‌سابقه ایران را به دنبال داشته است.

### ۳-۴ تبدیل فشارورودی

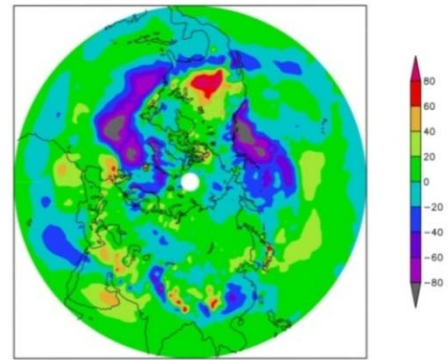
از آنجا که مقادیر مثبت تبدیل فشارورودی (Barotropic Conversion) (BTC) در ورودی مسیره‌های توفان و مقادیر منفی آن (-BTC) در جریان سوی مسیره‌های توفان قرار دارد، لذا به نظر می‌رسد که الگوی این جمله می‌تواند نمای نسبتاً خوبی از موقعیت مکانی مسیره‌های توفان در عرض‌های میانی نیمکره شمالی را نشان دهد.

با توجه به بخش جریان سوی مسیره‌های توفان اطلس و آرام الگوهای میانگین اقلیم‌شناختی (شکل ۸-الف)، دیده می‌شود که مقادیر منفی تبدیل فشارورودی با کاهش EKE همراه است و چون مطابق چرخه لورنتس EKE توسط (-BTC) به انرژی جنبشی میانگین تبدیل می‌شود، افزایش انرژی جنبشی میانگین در جریان سو را می‌توان انتظار داشت. از سوی دیگر با مقایسه الگوهای اقلیم‌شناختی و فصلی اطلس

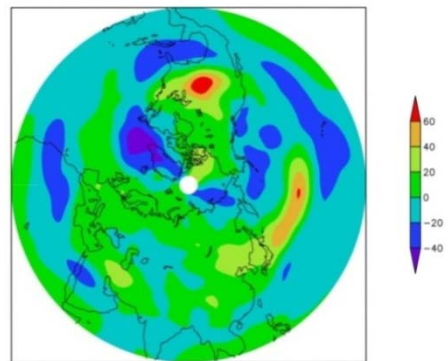


فشارورودی می تواند نقش موثری در این خصوص داشته باشد.

بررسی روی مسیر توفان مدیترانه نشان می دهد با آنکه BTC در الگوهای اقلیمی فصلی ضعیف است، ولی در الگوهای اقلیمی ماهانه دارای بیشینه محلی مثبت در نیمه شرقی مدیترانه اند و این نشانگر وردایی ماهانه BTC در میانگین های اقلیم شناختی است (شکل های ۹-الف و ۱۰-الف). در زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸ و در جریان سوی مسیر توفان مدیترانه، افزایش شدت بیشینه های مثبت محلی BTC در شمال اروپا، شمال آفریقا، شمال عربستان تا ترکیه، شمال غرب ایران و عرض های جنب حاره ای در جنوب خلیج فارس و دریای عمان با تقویت و کشیده شدن جت جنوب غرب آسیا به شرق همراه بوده است.

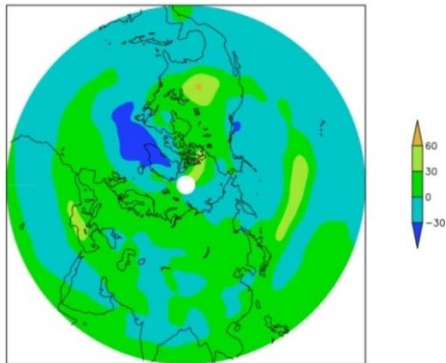


(الف)

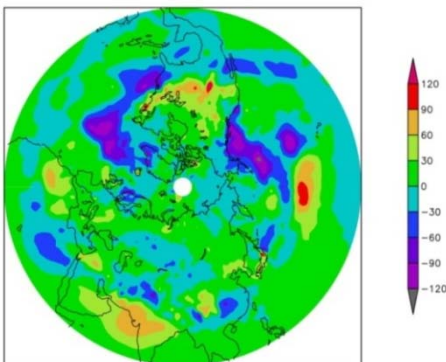


(ب)

شکل ۸ میانگین زمانی متوسط قائم جمله اول تبدیل فشارورودی در نیمکره شمالی برای، (الف) زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸ و (ب) زمستان های ۱۹۴۸ تا ۲۰۰۵. فاصله پربندی برابر با  $20\text{m}^2\text{s}^{-2}$  است.



(الف)



(ب)

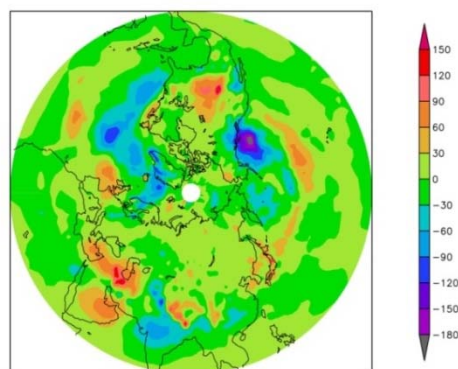
شکل ۹. میانگین زمانی متوسط قائم جمله اول تبدیل فشارورودی در نیمکره شمالی برای: (الف) ژانویه ۲۰۰۸ و (ب) ژانویه های ۱۹۴۸ تا ۲۰۰۵.

مقادیر قابل توجه BTC در ژانویه ۲۰۰۸ روی مسیرهای توفان آرام و اطلس، به بیشینه مقدار خود در زمستان مورد بررسی رسیده است (شکل ۹-ب)؛ به طوری که در جریان سوی اطلس دو هسته ای شدن BTC با دو هسته ای شدن جت اطلس در ژانویه ۲۰۰۸ همراه بوده است. به طور کلی با مقایسه الگوهای اقلیم شناختی جریان جتی و BTC، به نظر می رسد که مقادیر مثبت BTC با استقرار جت ها در پادجریان سوی مسیرهای توفان اطلس و آرام همراه است. به این ترتیب، علاوه بر جمله BCC که به منزله عامل کزفشار در تقویت و کشیده شدن جت در پادجریان سوی مسیر توفان اطلس در زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸ موثر بوده است، افزایش BTC نیز در حکم عامل

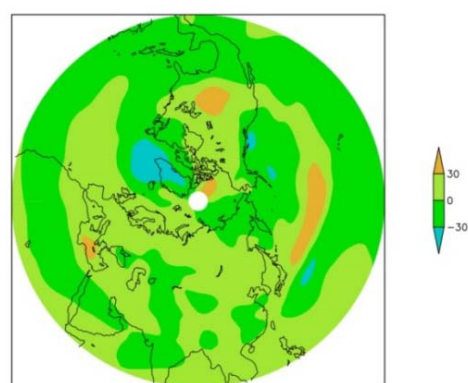
اقلیم‌شناختی، نشان‌دهنده قوی‌تر بودن چشمه و چاهه انرژی در این مناطق است (شکل ۱۱). بردارهای شار از منطقه واگرایی به منطقه همگرایی در الگوهای ماه به ماه، قوی‌تر از میانگین اقلیم‌شناختی آن است که به‌خصوص در مسیرهای توفان اطلس و آرام نشانه رشد موج جدید در جریان سو است. این عامل به وضوح نشان می‌دهد که نقش جملات شار در تکوین جریان سو روی این مناطق در زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸، بیشتر از میانگین اقلیم‌شناختی بوده است.

وجود واگرایی شار در الگوهای میانگین اقلیم‌شناختی در نیمه شرقی مدیترانه، شمال افریقا، شمال عربستان و مناطق مرکزی ایران نشانگر تابش انرژی شرق سو است که در زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸، قوی‌تر شده است. همچنین الگوی موجی شکل زوج هسته‌های مثبت و منفی از مراکز واگرایی به همگرایی نیز تابش قوی و توزیع بیشتر انرژی به نواحی جریان سو که دارای کثافت‌سازی ضعیف‌تر است را نشان می‌دهد.

بر اساس بررسی میانگین‌های ماهانه، نقش غالب جمله شار آزمین‌گرد که از جملات مهم در پخش پیچکی است، نسبت به شار کل در تکوین جریان سو بارز است و به‌خصوص در ژانویه ۲۰۰۸ (شکل ۱۲)، مراکز همگرایی و واگرایی آن از نظر تعداد و شدت بسیار چشم‌گیر است. در این ماه، بیشینه محلی منفی قوی شار به‌ویژه شار آزمین‌گرد، در شمال عربستان و غرب ایران ایجاد و در فوریه ۲۰۰۸ (شکل ۱۳) به مناطق شمالی ایران کشیده شده است و از اهمیت این جمله در بی‌هنجاری‌ها روی ایران حکایت دارد. همچنین از مقایسه الگوهای اقلیم‌شناختی EKE، چنین بر می‌آید که جملات شار نقش موثری در حضور هسته EKE در جریان‌سوی مسیرهای توفان دارد.



(الف)



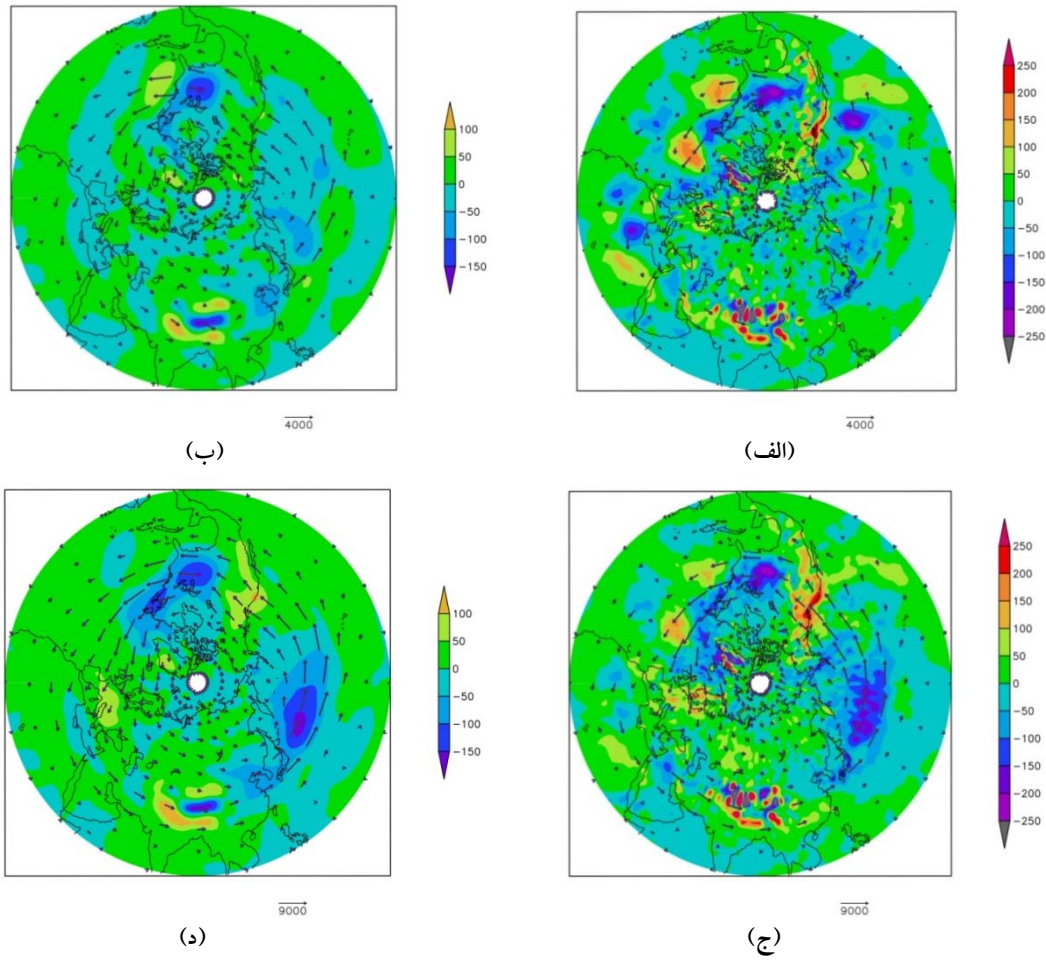
(ب)

شکل ۱۰. میانگین زمانی متوسط قائم جمله اول تبدیل فشارورودی در نیمکره شمالی برای، (الف) فوریه ۲۰۰۸ و (ب) فوریه‌های ۱۹۴۸ تا ۲۰۰۵.

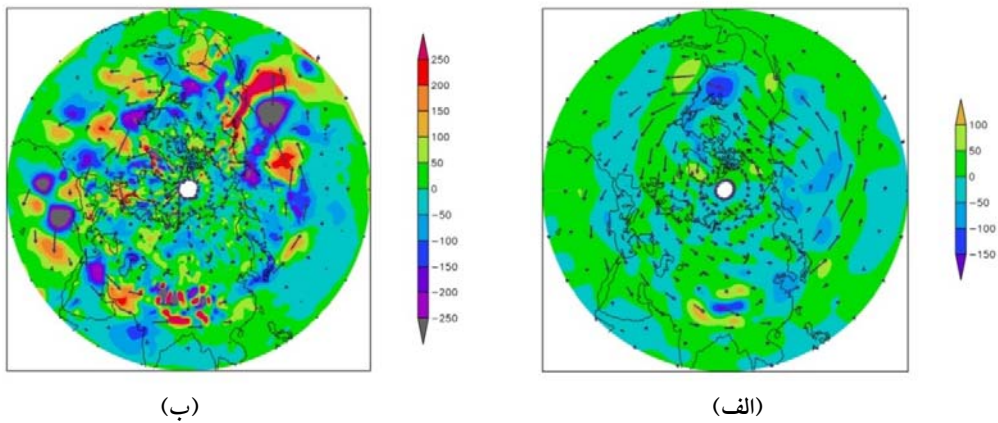
در فوریه ۲۰۰۸، بیشینه‌های محلی در الگوی میانگین BTC (شکل ۱۰-ب) که به شکل نواری در شمال و جنوب جت جنوب غرب آسیا دیده می‌شود، نسبت به ماه‌های دیگر زمستان مورد بررسی بسیار چشم‌گیر است و در این ماه بیشینه مثبت BTC در نیمکره شمالی روی مناطق شمالی ایران شکل گرفته است.

### ۳-۵ شار کل و شار آزمین‌گرد

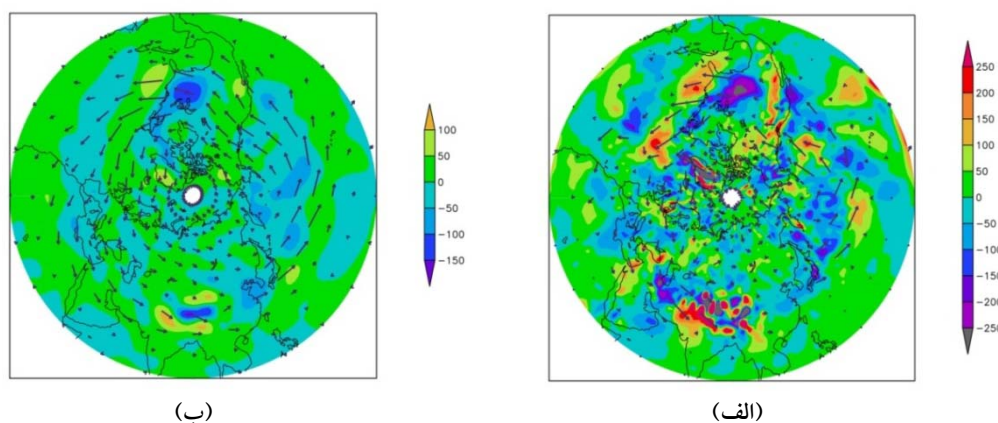
در ورودی و خروجی مسیرهای توفان آرام و اطلس در زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸، به ترتیب واگرایی و همگرایی قوی‌تر شار آزمین‌گرد و شار کل نسبت به میانگین‌های



شکل ۱۱. میانگین زمانی متوسط قائم همگرایی شار آزمین‌گرد (مناطق سایه‌دار) و میدان برداری میانگین زمانی متوسط قائم شار آزمین‌گرد در نیمکره شمالی برای: (الف) زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸ و (ب) زمستان‌های ۱۹۴۸ تا ۲۰۰۵. میانگین زمانی متوسط قائم همگرایی شار کل (مناطق سایه دار) و میدان برداری میانگین زمانی متوسط قائم شار کل در نیمکره شمالی برای (ج) زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸ و (د) زمستان‌های ۱۹۴۸ تا ۲۰۰۵. فاصله پربندی برابر با  $50 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  است.



شکل ۱۲. میانگین زمانی متوسط قائم همگرایی شار آزمین‌گرد (مناطق سایه‌دار) و میدان برداری میانگین زمانی متوسط قائم شار آزمین‌گرد در نیمکره شمالی برای: (الف) ژانویه ۲۰۰۸ و (ب) ژانویه‌های ۱۹۴۸ تا ۲۰۰۵. فاصله پربندی برابر با  $50 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  است.



شکل ۱۳. میانگین زمانی متوسط قائم همگرایی شار آزمین گرد (مناطق سایه دار) و میدان برداری میانگین زمانی متوسط قائم شار آزمین گرد در نیمکره شمالی برای: (الف) فوریه ۲۰۰۸ و (ب) فوریه های ۱۹۴۸ تا ۲۰۰۵. فاصله پرنندی برابر با  $50 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  است.

## ۶ نتیجه گیری

شدن جت جنوب غرب آسیا به سوی شرق است. در جریان سوی مدیترانه، بیشینه محلی BCG واقع در شمال عربستان در دسامبر ۲۰۰۷ تشکیل و در ژانویه ۲۰۰۸ بر شدت آن افزوده شده است؛ به طوری که در این دوره، مهم ترین جمله معادله انرژی در تغذیه این مناطق از مسیر توفان مدیترانه بوده و تکوین جریان سوی قوی بر اثر واگرایی شدید شار آزمین گرد را به همراه داشته است. در میانگین های اقلیم شناختی، نیمه غربی مدیترانه چاه انرژی و نیمه شرقی آن چشمه انرژی است که در زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸، بر شدت آن در این مناطق افزوده شده است.

در مورد منطقه خاورمیانه و به ویژه ایران، می توان به نکات مهم زیر اشاره کرد:

در ژانویه ۲۰۰۸، با استقرار هسته جت جنب حاره ای در منطقه شمال عربستان، انرژی شارش میانگین این مناطق افزایش یافته و به دنبال آن جملات BCG و BCC به بیشینه مقدار خود در زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸ رسیده است که به ترتیب با افزایش شدید انرژی پتانسیل در دسترس پیچکی و انرژی جنبشی پیچکی و در نتیجه افزایش انرژی گذرا در این منطقه همراه بوده است. به طور میانگین در این ماه، وجود واگرایی شدید شار آزمین گرد روی ایران نشان می دهد که ایران گیرنده انرژی بوده که پیامد آن

روی مسیر توفان آرام، پهن شدگی EKE نسبت به عرض های جغرافیایی در هر سه ماه مورد بررسی با جابه جایی پذیری نصف النهاری هسته جت آرام در فاز سرد ENSO هماهنگ است؛ به طوری که در فوریه ۲۰۰۸، قوی تر بودن بیشینه EKE در جریان سوی هسته جت آرام نسبت به ماه های دسامبر و ژانویه با بیشینه شاخص لائینا در این ماه در تطابق است.

جابه جایی قطب سوی EKE جریان همراه با باریک شدن آن در جریان سوی اطلس، مویند جابه جایی مسیر توفان اطلس به سمت شمال در فاز مثبت NAO است و تداوم آن در میانگین های هر سه ماه زمستان، با وردایی کم شاخص NAO در این دوره هماهنگ است. لازم به ذکر است که جابه جایی قطب سو به طور هماهنگ در دیگر جملات انرژی، به ویژه BCC، نیز دیده می شود.

انتشار جریان سوی قوی انرژی از مسیر توفان اطلس، منجر به تشکیل بیشینه های مثبت محلی نسبتا قوی BTC در شمال اروپا، شمال آفریقا، شمال عربستان تا ترکیه و شمال غرب ایران و همچنین در عرض های جنب حاره ای در جنوب خلیج فارس شده است؛ این موضوع نشانگر نقش موثر BTC در تقویت جریان جتی در این مناطق و کشیده

۱۳۸۴، مطالعه بسته‌های موج‌های کُزفشار در فوریه ۲۰۰۳، آ: شناسایی بسته‌های موج به روش‌های مختلف و بررسی ویژگی‌های آنها، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۱، ۴۵-۵۸.

نصراصفهانی، م. ع.، احمدی گیوی، ف. و محب‌الحجه، ع. ر.، ۱۳۸۸، بررسی پُرانرژی (انرژی‌تیک) اثر نوسان اطلس شمالی (NAO) بر اقلیم جنوب غرب آسیا، مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۶، ۱۳۱-۱۴۹.

Chang, E. K. M., 2000, Wave packets and life cycles of troughs in the upper troposphere: examples from the Southern Hemisphere summer season of 1984/85, *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 25-50.

Chang, E. K. M., Lee, S. and Swanson, K. L., 2002, Storm track dynamics, *J. Climate.*, **15**, 2163-2183.

Chang, E. K. M., and Orlanski, I., 1994, On energy flux and group velocity of waves in baroclinic flows, *J. Atmos. Sci.*, **51**, 3823-3828.

Danielson, R. E., Gyakum, J. R. and Straub, D. N., 2005, A case study of downstream baroclinic development over the North Pacific Ocean. Part II: diagnoses of eddy energy and wave activity, *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1549-1567.

Harnik, N. and Chang, E. K. M., 2004, The effects of variations in jet width on the growth of baroclinic waves: Implications for midwinter Pacific storm track variability, *J. Atmos. Sci.*, **61**, 23-40.

Hoskins, B. J. and Pearce, R., 1988, Large-scale dynamical processes in the atmosphere, Academic Press, 397 pp.

Orlanski, I. and Gross, B., 2000, The life cycle of baroclinic eddies in a stormtrack environment, *J. Atmos. Sci.*, **57**, 3498-3513.

Orlanski, I. and Katzfey, J., 1991, The life cycle of a cyclone wave in the Southern Hemisphere. Part I: eddy energy budget, *J. Atmos. Sci.*, **48**, 972-1998.

عمیق شدن شدید ناوه دمایی و قرار گرفتن هسته جت جنوب غرب آسیا روی ایران را در این ماه بوده است. در فوریه ۲۰۰۸، وجود واگرایی قوی شار آزمین‌گرد در ایران نشانگر آن است که به‌طور میانگین در این ماه ایران چشمه انرژی بوده و بیشترین مقدار انتشار انرژی به سوی شرق در نیمکره شمالی از مناطق مرکزی ایران صورت گرفته است. جابه‌جایی جریان‌سوی جت جنوب غرب آسیا سبب افزایش انرژی میانگین در این مناطق شده، به‌طوری که بیشترین مقدار جمله BTC در نیمکره شمالی روی مناطق شمالی و جنوبی ایران بوده و در افزایش EKE این مناطق نقش مهمی داشته است. جمله BCG که برای آن بیشینه بی‌هنجاری مثبت در نیمکره شمالی روی مناطق مرکزی ایران روی می‌دهد، در افزایش انرژی پتانسیل در دسترس پیچکی این مناطق نقش عمده‌ای ایفا کرده است. افزایش انرژی پیچکی روی ایران در این ماه، ناشی از جملات BCG و BTC به بیشینه مقدار خود در دوره مورد بررسی رسیده است.

چاهه و چشمه انرژی بودن ایران به ترتیب در ژانویه و فوریه ۲۰۰۸، بیانگر وردایی ماهانه الگوی شار انرژی در این منطقه است. از آنجا که وردایی مسیر توفان و به تبع آن جریان جتی با بی‌هنجاری شارها همراه است، می‌توان علل وردایی ماهانه شارها و بی‌هنجاری آنها در مقیاس سیاره‌ای را با عوامل موثر بر وردایی ماهانه جت جنوب غرب آسیا در ماه‌های زمستان ۲۰۰۷-۲۰۰۸ و وردایی پدیده‌های با بسامد کم، مرتبط دانست.

#### منابع

محب‌الحجه، ع. ر.، احمدی گیوی، ف. و یاوری، م.،