

دو بررسی موردی برای تحقیق گسترش جریان‌سوی ثانویه در تقویت چرخندهای غرب ایران از دیدگاه انرژی

مجید آزادی^{۱*} و محمدمهدی خدادادی^۲

^۱دانشیار، پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران
^۲کارشناس مرکز پیش‌بینی سازمان هواشناسی کشور، تهران، ایران

(دریافت: ۹۱/۱۱/۳۰، پذیرش نهایی: ۹۲/۷/۱۶)

چکیده

در این تحقیق رشد و گسترش فشارورودی و کژفشاری دو موج سیاره‌ای در ناحیه شرق دریای مدیترانه، سوریه و غرب ایران و اندرکنش آنها با چرخندهای سطح زمین از دیدگاه انرژی بررسی شده است. با استفاده از داده‌های CFSR با تفکیک افقی ۵/ درجه مقدار انرژی و مولفه‌های گوناگون گرایش انرژی برای این چرخندها محاسبه شده است. چرخند اول مربوط به ژانویه ۲۰۰۴ روی غرب مدیترانه شکل می‌گیرد و روی شرق مدیترانه تضعیف اما در طی مسیر خود تا نواحی غرب ایران در دو ناحیه دیگر تقویت می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که مهم‌ترین عامل رشد ثانویه مرکز انرژی در جریان‌سوی ناوه روی شمال عربستان و شرق مدیترانه و سپس غرب ایران تبدیل کژفشاری انرژی و همگرایی شار آزمین‌گرد انرژی است.

برای چرخند دوم مربوط به ژانویه سال ۲۰۰۰، مشابه مورد اول ابتدا یک مرکز انرژی قوی روی دریای مدیترانه در پادجریان‌سوی ناوه وجود دارد. در این مورد حضور جت جنب‌حاره موجب شار آزمین‌گرد قوی انرژی از این مرکز به جریان‌سوی ناوه و در نتیجه موجب گسترش جریان‌سوی مرکز انرژی روی شمال عربستان و غرب ایران می‌شود. همچنین نقش فرارفت هوای گرم در شمال عربستان و شرق مدیترانه و سپس صعود اجباری هوا در غرب ایران در تقویت عامل کژفشاری و گسترش جریان‌سوی انرژی برای این مورد، مشابه مورد پیشین است. اما در این مورد نقش عامل فشارورودی (تنش‌های رینولدز) نیز در تقویت این مرکز انرژی قابل توجه است. به بیان دیگر تاثیر جت جنب‌حاره‌ای در تقویت چرخند در جنوب غرب ایران دیده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: گسترش جریان‌سو، انرژی جنبشی پیچکی، تبدیل فشارورودی، تبدیل کژفشاری

Examining the energetics of secondary downstream development for two cyclone cases over western Iran

Azadi, M.^{1*} and Khodadi, M. M.²

¹Associate Professor, Atmospheric Science and Meteorological Research Center, Tehran, Iran

²Senior Forecaster, Forecasting Center, I. R. Iran Meteorological Organization, Tehran, Iran

(Received: 18 Feb 2013, Accepted: 08 Oct 2013)

Summary

In this research energetics of the barotropic and baroclinic development for two planetary waves over eastern Mediterranean, Syria and west of Iran and their interaction with surface cyclones were investigated.

Ahmadi-Givi et al. (1384) calculated and examined several selected important terms in the eddy kinetic energy (EKE) tendency equation during life cycle of six troughs that were developed with downstream development over Europe. They showed that almost for all cases the ageostrophic flux convergence (AFC) was the main factor in development of the systems. AFC causes radiative energy transport from upstream of the wave to the

E-mail: azadi68@hotmail.com

*نگارنده رابط: تلفن: ۰۹۱۲۷۰۵۴۷۶۵ دورنگار: ۰۲۱-۴۴۵۸۰۶۷۰

downstream of the trough. For mature baroclinic waves, this radiative energy transport causes dispersion of the upstream wave and forming a new wave downstream. Orlanski and Gross (1993) simulated the effect of topography on cyclone development over the Mediterranean using primitive equations. They showed that when mature troughs cross east-west Mountains, strong cyclones form over the south of the mountain and if the isotherms are also oriented in the east-west direction, baroclinic development is intensified. Northward advection of warm and moist air to higher latitudes accounts for baroclinic development and secondary development. In some cases baroclinic energy conversion between separated cyclones is responsible for the cyclone development (Chang, 2000). Decker and Martin (2005) examined the life cycle of two cyclones that had similar track over North America. They showed that the first cyclone intensified and damped much faster than the second cyclone. The reason for this is that the development and damping of the first and second cyclones occurred upstream and downstream of the trough respectively. Nasre-Esfahani et al. (1389) examined the effects of several important forcing terms in the EKE tendency equation for critical positive months (CPM) and critical negative months (CNM) of the North Atlantic Oscillation (NAO) over the Mediterranean and Middle East. Their results indicated that there is no considerable difference in the amount of EKE between CPM and CNM in the Mediterranean region. However, moving eastward, the values of EKE become greater in the CPM than in the CNM in such a way that the difference between the two reaches its maximum over the south west of Iran. Also, in the CPM, all of the computed forcing terms are larger than in the CNM.

In this research, National Center for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecast System Reanalysis (CFRSR, Saha et al., 2010) data with 0.5 degree horizontal resolution, described by Saha et al., 2010 are used to extract several fields including geopotential height, horizontal wind vector, relative vorticity and temperature at several vertical levels. Thickness fields and several important EKE tendency forcing terms for 00, 06, 12 and 18 UTC for two case studies, that cover the period 14-18 January 2004 and 27-29 January 2000 are then calculated. Following Orlanski and Katzfy (1991), different forcing terms in the EKE tendency equation including baroclinic and barotropic conversions, zonal and eddy advections and AFC are derived. Time mean stress term is also calculated according to Decker and Martin (2005).

Results showed that the first cyclone on January 2004 was formed over western Mediterranean. It was then weakened over the eastern Mediterranean and subsequently intensified in two other regions as it moved to the west of Iran. At the beginning, there was a strong energy center over Mediterranean associated with the polar jet at the upstream of the trough. Ageostrophic energy flux from this center to the downstream of the trough causes downstream intensification of the energy center east of the Mediterranean and west of Iran. It is shown that baroclinic energy conversion and ageostrophic flux convergence are the most important factors in the secondary development of the energy center over north of Saudi Arabia and east of the Mediterranean and subsequently over west of Iran. Increase of the energy tendency terms over eastern Mediterranean and Syria is due to the warm and moist air advection over the Red Sea and combination of the thermal Sudanic low and the low pressure situated at higher latitudes. Forced vertical motion over the mountain ranges located west of Iran accounts for the increase of the energy tendency terms.

For the second cyclone on January 2000, similar to the first case, there is a strong energy center over the Mediterranean at the upstream of the associated trough. The subtropical jet causes a strong ageostrophic energy flux from the upstream energy center to the downstream of the trough and developing a downstream energy center over

northern Saudi Arabia and west of Iran. Moreover, similar to the first case, warm and moist air advection over northern Saudi Arabia and eastern Mediterranean and subsequently forced vertical motion over the west of Iran are responsible for intensification of the baroclinic factor and downstream development of the energy center. But for this case, barotropic factor (such as Reynolds stress) is important for the intensification of the energy center. Stated differently, the role of the subtropical jet in intensification of the cyclone over south of Iran is clearly seen.

Keywords: Downstream development, Eddy kinetic energy, Barotropic conversion, Baroclinic conversion

۱ مقدمه

آن است که مراحل رشد و میرایی چرخند اول و دوم به ترتیب در پادجریان‌سو و جریان‌سوی ناوه رخ می‌دهد. احمدی گیوی و همکاران (۱۳۸۴) برای شش ناوه از بسته موج‌هایی که دارای تکوین جریان‌سو بوده‌اند، مقدار انرژی جنبشی پیچکی (EKE: Eddy Kinetic Energy) همراه با مقادیر دیگر جملات مهم موجود در رابطه بودجه انرژی را در طول چرخه عمر هر یک از ناوه‌ها محاسبه کردند. نتایج آنها روشن ساخت که تقریباً در همه مواردی که علت گسترش موج، پاشندگی جریان‌سو بوده و تبدیل کژفشاری یک منبع عمده انرژی به هنگام بلوغ و میرایی ناوه بوده است. عامل اصلی در تکوین جریان‌سو، همگرایی شار آزمین‌گرد (AFC: Ageostrophic Flux Convergence) است که باعث تابش انرژی از پادجریان‌سوی پریشیدگی موجود به جریان‌سوی آن می‌شود. زمانی که امواج کژفشار بالغ می‌شوند، این موضوع سبب تضعیف موج و رشد یک موج جدید در جریان‌سو می‌شود. نصر اصفهانی و همکاران در ۱۳۸۹ تغییر انرژی پیچکی با زمان متأثر از چند عامل واداشت نظیر همگرایی شار آزمین‌گرد، همگرایی شار کل انرژی، تبدیل کژفشاری و تبدیل فشارورودی انرژی را در ماه‌های بحرانی مثبت و منفی نوسان اطلس شمالی (NAO: North Atlantic Oscillation) در ناحیه مدیترانه و خاورمیانه بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که میانگین انرژی جنبشی پیچکی در ناحیه مدیترانه در

در بیشتر موارد امواج کوتاه یک ناحیه دارای ویژگی‌های توسعه‌ای مختص همان ناحیه هستند. گاهی اوقات امواج کوتاه به هزینه سامانه در پادجریان‌سو رشد می‌کنند (اورلانسکی و کاتزفی، ۱۹۹۱؛ شلدن، ۱۹۹۳). این نوع رشد کژفشاری در جریان‌سوی امواج به صورت مرکزهای انرژی وابسته به زمان (هاسکینز، ۱۹۷۹؛ اورلانسکی، ۱۹۹۳) در شرق مدیترانه و دریای سرخ کمتر بررسی شده است. اورلانسکی و گراس (۱۹۹۳) تاثیر ناهمواری‌ها را در گسترش چرخندها روی ناحیه مدیترانه با استفاده از معادلات بسط شبیه‌سازی کردند. آنها نشان دادند که وقتی امواج کژفشاری بالغ به صورت متقاطع به کوه‌های شرقی-غربی نزدیک می‌شوند، چرخندهای قوی در جنوب کوهستان شکل می‌گیرند و در مواردی که هم‌دماها هم شرقی-غربی هستند، رشد کژفشاری موج افزایش می‌یابد و فرارفت شمال‌سوی هوای گرم و مرطوب جنب‌حاره‌ای به عرض‌های بالاتر، دلیل وجود عامل کژفشاری و رشد ثانویه امواج است. در برخی موارد عوامل کژفشاری مسئول رشد چرخندها به علت تبادل انرژی بین چرخندهای مجزا هستند (چانگ، ۱۹۹۳). وقتی تبادل انرژی بین چرخندها رخ می‌دهد که امواج هم‌فاز باشند (چنگ، ۲۰۰۰). دکر و مارتین در سال ۲۰۰۴ دو چرخند با مسیر حرکت یکسان را در امریکای شمالی بررسی کردند. نتایج نشان داد که چرخند اول بسیار سریع‌تر از چرخند دوم رشد کرد و میرا شد. علت این امر

۲ داده‌ها و روش کار

با استفاده از داده های CFSR (Climate Forecast System Reanalysis، ساها و همکاران، ۲۰۱۰) با تفکیک افقی ۵/۰ درجه میدان‌های ارتفاع ژئوپتانسیل، دما، بردار افقی باد و تاوایی استخراج و کمیت‌های ضخامت و مولفه‌های گوناگون گرایش انرژی در ساعت‌های ۰۰:۰۶:۱۲ و ۱۸UTC برای دو بررسی موردی مربوط به ژانویه ۲۰۰۴ (از ۲۰۰۴۰۱۱۱۱۸ تا ۲۰۰۴۰۱۱۴۰۰) و ژانویه ۲۰۰۰ (از ۲۰۰۰۰۱۲۷۰۰ تا ۲۰۰۰۰۱۲۹۰۶) محاسبه شده است. روابط مورد استفاده برای محاسبه تبدیل کژفشاری و فشارورودی انرژی و فرارفت انرژی در پیوست عرضه شده است. تنش میانگین زمانی بر اساس کار دکر و مارتین (۲۰۰۵) محاسبه شده است. رابطه تقویت توفان با شارش سیاره‌ای با استفاده از انحراف از میانگین ماهانه بررسی شده است.

۳ بررسی همدیدی و تحلیل انرژی برای سامانه اول

۳-۱ بررسی همدیدی سامانه اول مربوط به ژانویه

۲۰۰۴ (از ۲۰۰۴۰۱۱۱۱۸ تا ۲۰۰۴۰۱۱۴۰۰)

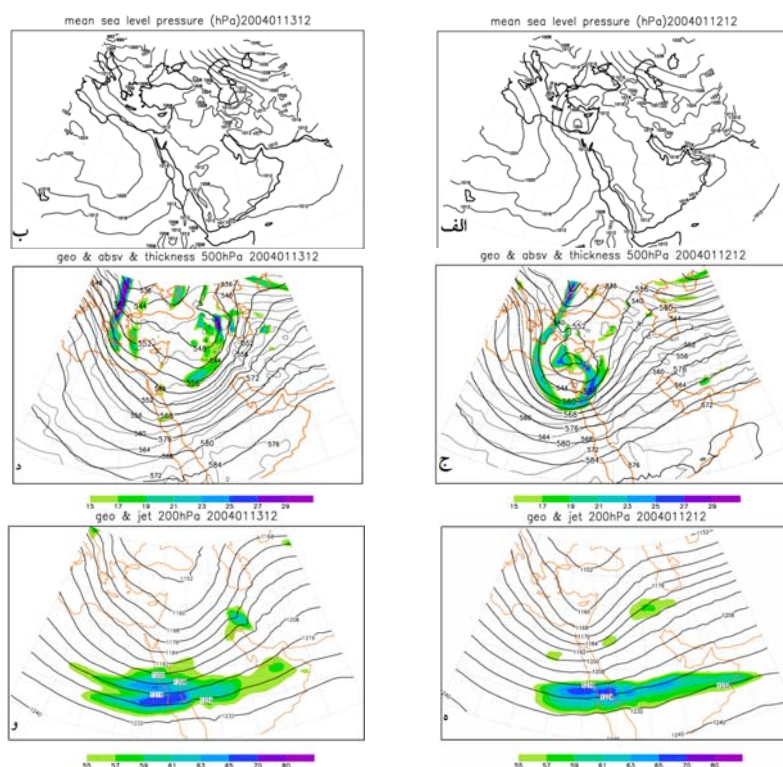
در ساعت ۱۲UTC روز یازدهم ژانویه ۲۰۰۴ یک کم‌فشار با خط هم‌فشار بسته ۱۰۰۰hPa روی ناحیه مرکزی دریای مدیترانه دیده می‌شود. در تراز میانی (۵۰۰hPa) سلول کم‌ارتفاع با پربند ۵۴۴dm روی مرکز دریای مدیترانه است و در تراز ۳۰۰hPa یک کم‌ارتفاع با پربند ۸۸۸dm روی دریای سیاه و ناوه آن به همراه جت قطبی در پاد جریان‌سوی ناوه روی مرکز دریای مدیترانه دیده می‌شود (شکل داده نشده). بنا به شکل ۱-الف برای روز دوازدهم ژانویه، کم‌فشار با خط هم‌فشار بسته ۱۰۰۴hPa روی شرق دریای مدیترانه جابه‌جا شده است و مرکز کم‌فشار با خط هم‌فشار ۱۰۰۸hPa روی جنوب دریای سرخ در سمت راست محور ناوه تراز میانی و بالایی مشاهده می‌شود. ناحیه بین شرق دریای مدیترانه تا جنوب دریای سرخ، بین

دو فاز، تفاوت چندانی ندارد، ولی با حرکت NAO به سمت شرق، مقدار آن در فاز مثبت زیادتر می‌شود. همچنین بزرگی همه جملات محاسبه شده در فاز مثبت در این ناحیه، بیشتر از فاز منفی است.

به سبب اهمیت درک ساختار انرژی در سامانه‌های جوئی، تحقیقات مربوط به تعیین مراحل تقویت و تضعیف چرخندها از دیدگاه انرژی در بیشتر نقاط جهان صورت گرفته است. اما تحقیقاتی از این دست روی ایران معدود است (احمدی گیوی و همکاران، ۱۳۸۴)، به گونه‌ای که در مورد نحوه تغییرات انرژی و عوامل تاثیرگذار در جملات گرایش انرژی روی امواج غرب ایران، شناخت کافی وجود ندارد. در این پژوهش دو موج بالغ روی مدیترانه که دارای ساختار کژفشاری‌اند و گسترش جریان‌سوی انرژی دارند در نظر گرفته شده است و نحوه تراپرد انرژی از پادجریان‌سوی پریشیدگی موجود به جریان‌سوی آن در غرب ایران بررسی می‌شود. علت انتخاب دو چرخند یاد شده آن است که هرچند هر دو مورد با ناوه تراز میانی و جت در تراز بالا همراه بوده‌اند ولی مسیر حرکت و ساختار کژفشاری آنها با هم متفاوت بوده است (سیمونز و هاسکینز، ۱۹۷۸)؛ به گونه‌ای که حوزه فعالیت و مسیر حرکت موج اول از غرب و شمال غرب کشور و همراه با جت قطبی و موج دوم از نیمه جنوبی کشور عبور کرده و همراه جت جنب‌حاره نیز بوده است. در نتیجه تاثیر دریا‌های سرخ و مدیترانه و ناهمواری‌های غرب ایران در تقویت جریان‌سوی موج و همچنین تاثیر جت جنب‌حاره‌ای و جت قطبی در رشد این مرکز انرژی برای دو مورد، بررسی شده و داده‌ها و روش کار در بخش دوم آمده است. تحلیل همدیدی، بحث جنبه‌های انرژی برای هر بررسی موردی به صورت جداگانه در بخش‌های سوم تا چهارم آمده است. بخش پنجم مقاله نیز به نتیجه‌گیری کلی اختصاص دارد.

به‌طور هم‌زمان فرارفت هوای سرد بر روی شرق افریقا در مجاورت محور ناوه مشاهده می‌شود. در شکل ۱-ا مربوط به تراز ۲۰۰hPa برای روز دوازدهم، ناوه روی شرق دریای مدیترانه جابه‌جا و تا دریای سرخ کشیده شده است. جلوی محور ناوه روی دریای سرخ و مرکز عربستان یک جت جنب‌حاره با بیشینه سرعت 7.0 ms^{-1} وجود دارد. در تراز ۳۰۰hPa روی شمال عربستان و غرب ایران جت قطبی با بیشینه سرعت 6.0 ms^{-1} مشاهده می‌شود (شکل داده نشده). در روز سیزدهم این سامانه به شمال عراق و نوار غربی ایران جابه‌جا شده است (شکل ۱-ب، ۱-د، ۱-و). در روز چهاردهم این سامانه تضعیف و روی نوار مرکزی ایران جابه‌جا شده است (شکل داده نشده).

دو زبانه پُرفشار سیبری روی عراق و پُرفشار مستقر روی شرق اروپا و شمال شرق افریقا هر دو با خط هم‌فشار ۱۰۱۲، یک ناحیه کم‌فشار است. بنا به شکل ۱-ج مربوط به تراز میانی، در این روز کم‌ارتفاع با پربند 540 dm روی شرق دریای مدیترانه جابه‌جا و تقویت شده است. همچنین ناوه وابسته به این کم‌ارتفاع، روی شمال دریای سرخ عمیق شده است و بیشینه فرارفت تاوایی تا حدود 25×10^{-5} در این ناحیه مشاهده می‌شود که ضخامت در جریان‌سوی ناوه روی غرب عربستان تا 80 dm نسبت به روز قبل کاهش یافته است. این امر به همراه فرارفت هوای گرم در جلوی محور ناوه از روی دریای سرخ به غرب عربستان به معنی وجود حرکت صعودی قوی در این ناحیه است.



شکل ۱. فشار سطح دریا برحسب hPa با فاصله پربندی ۴ hPa برای ۱۲ UTC روزهای (الف) دوازدهم، (ب) سیزدهم ژانویه ۲۰۰۴. ارتفاع ژئوپتانسیل برحسب (dm) و تاوایی مطلق برحسب 10^{-5} s^{-2} در تراز ۵۰۰ hPa و ضخامت لایه ۵۰۰-۱۰۰۰ hPa برای ۱۲ UTC، روزهای (ج) دوازدهم، (د) سیزدهم ژانویه ۲۰۰۴. ارتفاع ژئوپتانسیل و جت در تراز ۲۰۰ hPa برای ۱۲ UTC، روزهای (ه) دوازدهم و (و) سیزدهم ژانویه سال ۲۰۰۴.

۲-۳ تحلیل جنبه‌های انرژی برای سامانه اول

در روز یازدهم یک مرکز انرژی با مقدار $300 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ در پادجریان سوی ناوه روی غرب دریای مدیترانه در محل محور جت قطبی شکل گرفته است (معادله پ-۱). وجود جت قطبی با پیشینه سرعت 70 ms^{-1} همراه با فرافت شدید هوای سرد موجب شکل‌گیری مرکز انرژی قوی در بالادست ناوه روی غرب دریای مدیترانه شده است (شکل داده نشده). و ترابرد آزمونگرد انرژی از این مرکز به مرکز کوچک انرژی روی مرکز و شرق دریای مدیترانه دیده می‌شود (شکل داده نشده). در ساعت ۱۲UTC روز دوازدهم مرکز انرژی با مقدار $200 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ در جریان سوی ناوه روی شمال عربستان گسترش یافته است. ترابرد آزمونگرد انرژی از مرکز انرژی در پادجریان سوی ناوه روی شرق دریای مدیترانه به مرکز انرژی روی شمال عربستان مشاهده می‌شود (شکل ۲-الف). در این روز مرکز گسترده گرایش انرژی (EKE-Tendency)، افزایش انرژی با مقدار $5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ را روی غرب ایران نشان می‌دهد (شکل ۲-ج). واداشت‌های تبدیل کژفشاری (شکل ۳-ز) و همگرایی شار آزمونگرد (شکل ۳-ه)، محاسبه شده با استفاده از معادله پ-۵، و فرافت انرژی جنبشی با شارش میانگین (KMA: EKE mean advection) (شکل ۳-الف) و پیچک‌ها (KEA: EKE eddy advection) (شکل ۳-ج) با مقادیر مثبت حدود $3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ روی شمال عربستان در افزایش انرژی این مرکز موثر هستند (معادله پ-۳). به نظر می‌رسد حرکت صعودی مناسب هوای گرم و مرطوب روی شمال دریای سرخ و شرق مدیترانه در این ناحیه موجب افزایش جمله کژفشاری شده است (شکل ۱-ه) ولی مولفه تنش رینولدز تبدیل فشاروردی (brt: barotropic conversion) انرژی روی غرب ایران و مولفه تنش میانگین زمانی (tms: time mean stress) تبدیل فشاروردی موج به ترتیب با مقادیر ۴- و $1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ در تضعیف مرکز انرژی روی شمال

عربستان اثر دارد (شکل‌های ۳-ط و ۳-ک). مقادیر منفی نشان‌دهنده انتقال انرژی از موج به شارش میانگین و بیانگر تقویت جت جنب‌حاره روی عربستان و جنوب غرب ایران است (شکل‌های ۱-الف، ۱-ج و ۱-ه).

در ساعت ۱۲UTC روز سیزدهم مرکز انرژی با مقدار $200 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ در جریان سوی ناوه، روی نوار غربی ایران وجود دارد. از طرفی باد آزمونگرد و شارش انرژی از پادجریان سوی ناوه به مرکز انرژی روی شمال غرب ایران دیده می‌شود (شکل ۲-ب). گرایش زمانی مرکز انرژی روی غرب و مرکز ایران در حدود $5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ است (شکل ۲-د). سهم جمله‌های تبدیل کژفشاری (شکل ۳-ح)، همگرایی شار آزمونگرد انرژی (شکل ۳-و) و فرافت میانگین مداری (شکل ۳-ب) و پیچکی انرژی (شکل ۳-د) در گرایش یاد شده حدود $\text{m}^2 \text{ s}^{-3}$ است. به بیان دیگر، در روز سیزدهم سامانه کم‌فشار از ناحیه شرق دریای مدیترانه و دریای سرخ به غرب و شمال غرب ایران رسیده و فرافت هوای گرم و مرطوب جنوبی و حرکت صعودی قوی در ترازهای میانی جو و حضور جت قطبی موجب تقویت جمله کژفشاری سبب همگرایی شار آزمونگرد انرژی در این نواحی شده است (شکل‌های ۱-الف، ۱-ج، ۳-ه و ۳-و). همچنین در این روز فرافت پیچکی انرژی از روی شرق دریای مدیترانه روی شمال غرب و غرب ایران عامل تقویت‌کننده دیگری برای موج به شمار می‌رود (شکل ۳-د) و به نظر می‌رسد که موج‌های کوتاه در سمت راست محور ناوه توسط موج بلند روی غرب و شمال غرب ایران تقویت می‌شوند. اما جملات تنش رینولدز و تنش میانگین زمانی به ترتیب با مقادیر حدود $1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ و $1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ عامل‌های کاهنده و افزایش‌دهنده انرژی روی غرب ایران هستند (شکل‌های ۳-ی و ۳-ل).

مراکز انرژی مورد بررسی در تحقیق اورلانسکی و کاتزفی (۱۹۹۱) و نیز پیوا و همکاران (۲۰۰۹) روی امریکای جنوبی در مقایسه با تحقیق حاضر گسترده‌تر و

تراز بالا و فرارفت تاوایی و هوای گرم تراز میانی در جریان‌سوی ناوه روی دریای سرخ قرار گرفته است (شکل‌های ۱-ج و ۱-د). همین امر باعث تقویت همگرایی شار آزمین‌گرد و جمله کژفشاری می‌شود. با تقویت جت جنب‌حاره عامل فشارورودی تنش رینولدز و فرارفت مداری انرژی روی سوریه و عراق ضعیف و حتی منفی (شکل‌های ۴-الف و ۴-ب) می‌شود. بین ساعت‌های ۲۴ و ۳۰ (از ۱۲۱۲ تا ۱۳۰۰) فرارفت پیچکی انرژی در جلوی ناوه تقویت می‌شود و با تلفیق دو کم‌فشار دریای مدیترانه و دریای سرخ و فرارفت هوای گرم و مرطوب روی شمال عربستان (شکل ۱-الف)، جمله‌های تبدیل کژفشاری و همگرایی شار آزمین‌گرد مثبت و موجب تقویت مرکز انرژی شده است (شکل ۴-ب). بین ساعت‌های ۳۰ و ۴۲ (از ۱۳۰۰ تا ۱۳۱۲) مرکز انرژی با عبور از روی شمال عربستان و عراق به غرب ایران می‌رسد (شکل ۴-ب) و گرایش انرژی منفی و مرکز انرژی ضعیف می‌شود (شکل ۴-الف). با اینکه در این بازه زمانی جمله‌های مربوط به تبدیل کژفشاری، همگرایی آزمین‌گرد شار انرژی و فرارفت پیچکی انرژی در این ناحیه دیده می‌شود ولی مقدار آنها ضعیف است و دو عامل فشارورودی تنش رینولد و فرارفت مداری انرژی، باعث کاهش انرژی و چیره هستند (شکل ۴-الف و ۴-ب). علت این است که جت قطبی و جت جنب‌حاره همگرا می‌شوند و جت مداری قوی روی دریای سرخ دیده می‌شود و در تراز میانی فرارفت تاوایی و هوای گرم در جریان‌سوی ناوه ضعیف شده است (شکل‌های ۱-ب، ۱-د و ۱-و). تقریباً از ساعت ۴۲ تا ۴۸ (از ۱۳۱۲ تا ۱۳۱۸) مرکز انرژی روی نوار غربی ایران قرار گرفته (شکل‌های ۴-د و ۴-الف) و به همراه ناوه خود از روی رشته‌کوه زاگرس عبور می‌کند (شکل ۱-د). همان‌گونه که در شکل ۴-الف می‌توان دید در این ساعت‌ها گرایش انرژی مثبت است. علت اصلی توسعه مرکز انرژی، تبدیل کژفشاری و همگرایی

دارای انرژی بیشتری در جریان‌سوی ناوه تا حدود $m^2 s^{-2}$ بوده‌اند. وجود اقیانوس آرام و رطوبت زیاد سبب آزادسازی مقادیر چشمگیر گرمای نهان و در نتیجه حرکت‌های صعودی بسیار قوی و تقویت جملات کژفشاری در این ناحیه شده است. مقدار جمله کژفشاری محاسبه شده با استفاده از معادله پ-۵ در پژوهش‌های یاد شده حدود دو برابر مقدار آن در تحقیق حاضر در غرب ایران است.

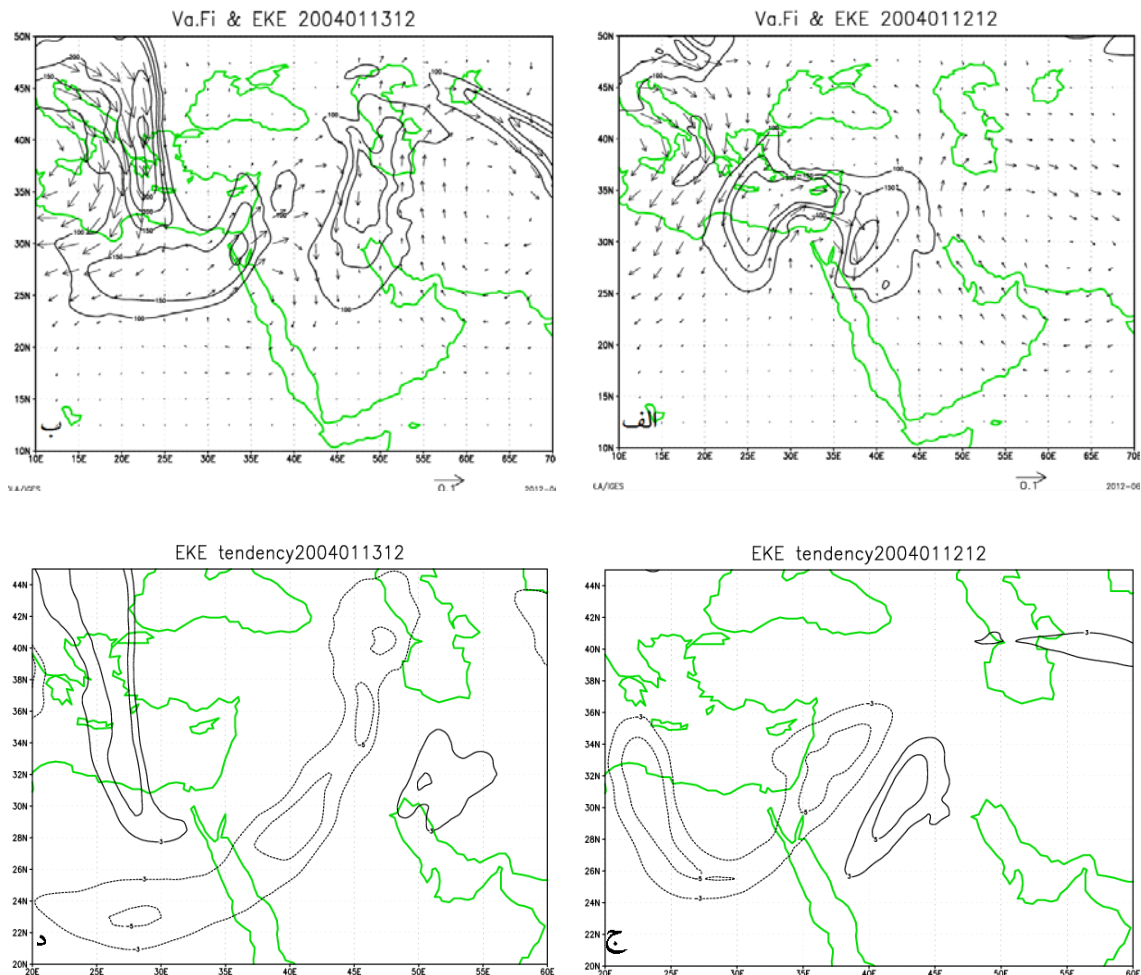
۳-۳ بررسی حجمی مرکز انرژی و نحوه تغییرات آن برای سامانه اول

از ساعت ۱۸ روز یازدهم تا ساعت شش روز دوازدهم، مرکز انرژی در جریان‌سوی ناوه روی شرق دریای مدیترانه شکل گرفته است (شکل داده نشده). در شکل‌های ۴-الف و ۴-ب مقدار تجمعی مولفه‌های گرایش انرژی (EKE-Tendency) برای ۵۴ ساعت در دوره زندگی این مرکز (از ۲۰۰۴۰۱۱۱۱۸ تا ۲۰۰۴۰۱۱۴۰۰) نشان داده شده است. مطابق شکل ۴-الف در ۱۲ ساعت اول (از ۱۱۱۸ تا ۱۲۰۶) گرایش انرژی مثبت است و مرکز انرژی در جریان‌سوی ناوه روی شرق دریای مدیترانه توسعه یافته است (شکل داده نشده). عوامل موثر در توسعه این مرکز انرژی، تبدیل فشارورودی ناشی از تنش رینولدز و فرارفت میانگین مداری انرژی به علت وجود جت جنب‌حاره است (شکل ۴-الف). در این ساعت‌ها، جابه‌جایی جت قطبی از پادجریان‌سوی ناوه به جریان‌سو روی داده (شکل داده نشده) و عوامل کژفشاری و همگرایی شار آزمین‌گرد ناچیز بوده است (شکل ۴-ب). از ساعت ۱۲ تا ۲۴ (از ۱۲۰۶ تا ۱۲۱۸) مرکز انرژی روی سوریه و غرب عراق قرار دارد (شکل ۲-الف) و گرایش انرژی دارای کاهش است (شکل ۴-الف). در این بازه زمانی کم‌فشار به سواحل شرقی دریای مدیترانه روی سوریه و غرب عراق جابه‌جا و تضعیف شده (شکل ۱-الف) ولی جت قطبی

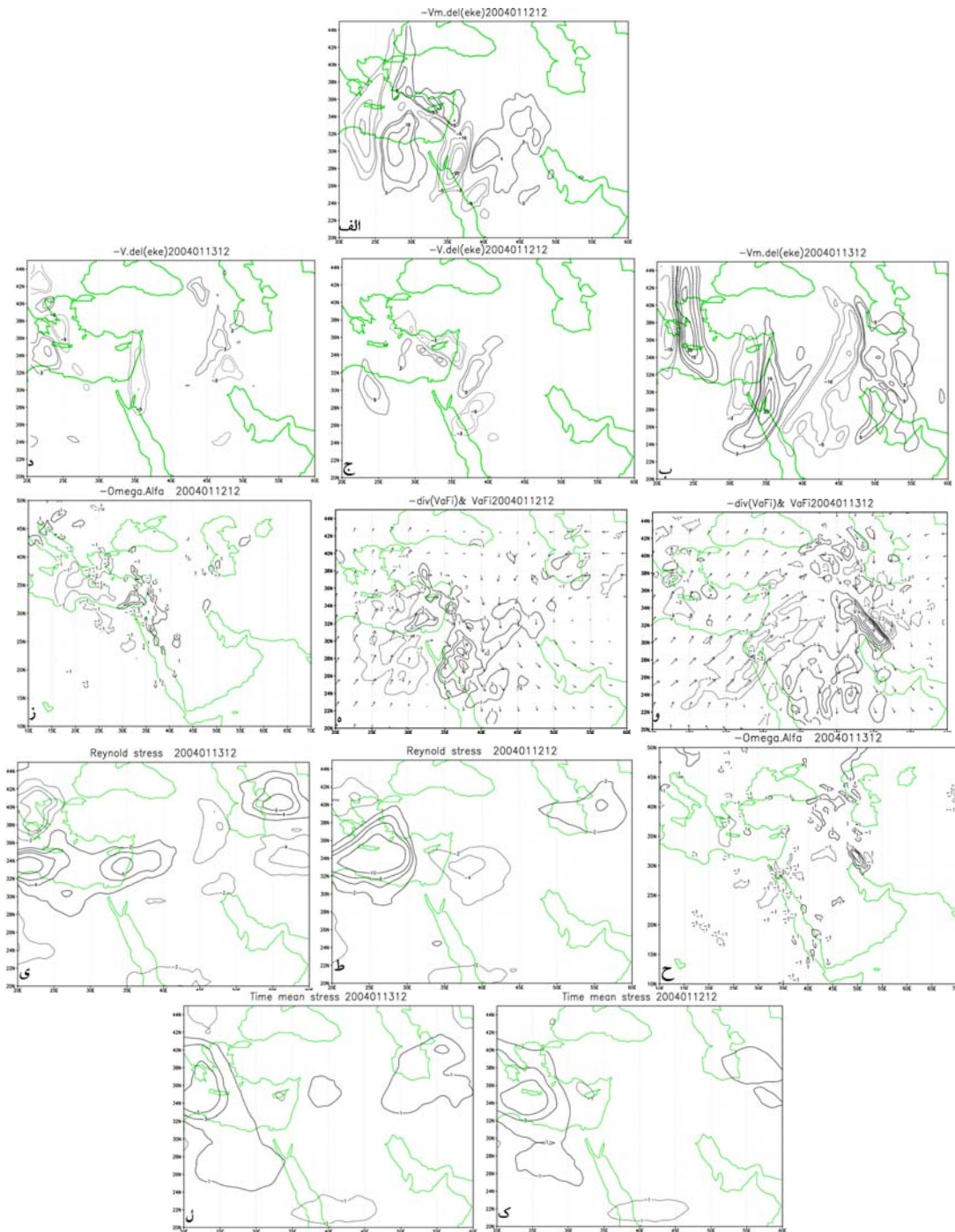
شارآزمین گرد انرژی است (شکل ۴-ب) زیرا با رسیدن کم فشار به دامنه‌های غربی زاگرس و سپس ارتفاعات جنوبی البرز، صعود اجباری هوای گرم و مرطوب به همراه فرارفت تاوایی و ضخامت، موجب تقویت سامانه شده است (شکل‌های ۱-ب و ۱-د). در این بازه زمانی به علت همگرایی جت قطبی و جت جنب‌حاره روی جنوب و مرکز ایران (شکل ۱-و) عامل فشارورودی تنش رینولد مثبت است (شکل ۴-ب). همچنین جمله مربوط به فرارفت مداری انرژی از فرارفت پیچکی بزرگ‌تر است

(شکل ۴-الف).

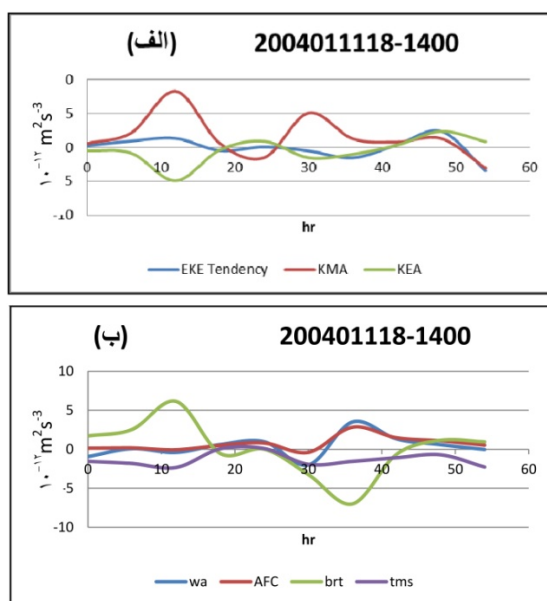
در شش ساعت آخر (از ۱۳۱۸ تا ۱۴۰۰) با عبور ناوه از ارتفاعات زاگرس، گرایش انرژی منفی (شکل ۴-الف) و مرکز انرژی ضعیف شده است (شکل آورده نشده). به علت عبور شمال سوی ناوه، فرارفت پیچکی از فرارفت مداری انرژی بیشتر است (شکل ۴-الف). عامل اصلی در تضعیف مرکز انرژی، تنش میانگین زمانی است که با تضعیف جمله‌های کثرفشاری و همگرایی انرژی موجب کاهش انرژی می‌شود (شکل‌های ۴-الف و ۴-ب).



شکل ۲. میانگین قائم انرژی جنبشی ($m^2 s^{-2}$) و شار آزمین گرد انرژی ($m^3 s^{-3}$) بین ترازهای ۱۰۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال برای روزهای (الف) دوازدهم، (ب) سیزدهم، میانگین قائم گرایش انرژی جنبشی ($m^3 s^{-3}$) بین ترازهای ۱۰۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال برای روزهای (ج) دوازدهم و (د) سیزدهم ژانویه ۲۰۰۴. خط پُر مقادیر مثبت و نقطه‌چین مقادیر منفی را نشان می‌دهد.



شکل ۳. میانگین قائم فرارفت مداری انرژی جنبشی ($m^2 s^{-3}$) بین ترازهای ۱۰۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال برای روزهای (الف) دوازدهم، (ب) سیزدهم، میانگین قائم فرارفت پیچکی انرژی جنبشی ($m^2 s^{-3}$) بین ترازهای ۱۰۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال برای روزهای (ج) دوازدهم و (د) سیزدهم، میانگین قائم بردار شار زمین گرد انرژی ($m^3 s^{-3}$) و همگرایی آن ($m^2 s^{-3}$) بین ترازهای ۱۰۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال برای روزهای (ه) دوازدهم و (و) سیزدهم، میانگین قائم تبدیل انرژی کفشاری ($m^2 s^{-3}$) بین ترازهای ۱۰۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال برای روزهای (ز) دوازدهم، (ح) سیزدهم، میانگین قائم تبدیل انرژی فشاروردی (تنش رینولدز $m^2 s^{-3}$) بین ترازهای ۱۰۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال برای روزهای (ط) دوازدهم، (ی) سیزدهم، میانگین قائم تبدیل فشاروردی انرژی (تنش میانگین زمانی $m^2 s^{-3}$) بین ترازهای ۱۰۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال برای روزهای (ک) دوازدهم و (ل) سیزدهم ژانویه سال ۲۰۰۴. خط پُر مقادیر مثبت و نقطه چین مقادیر منفی را نشان می‌دهد.



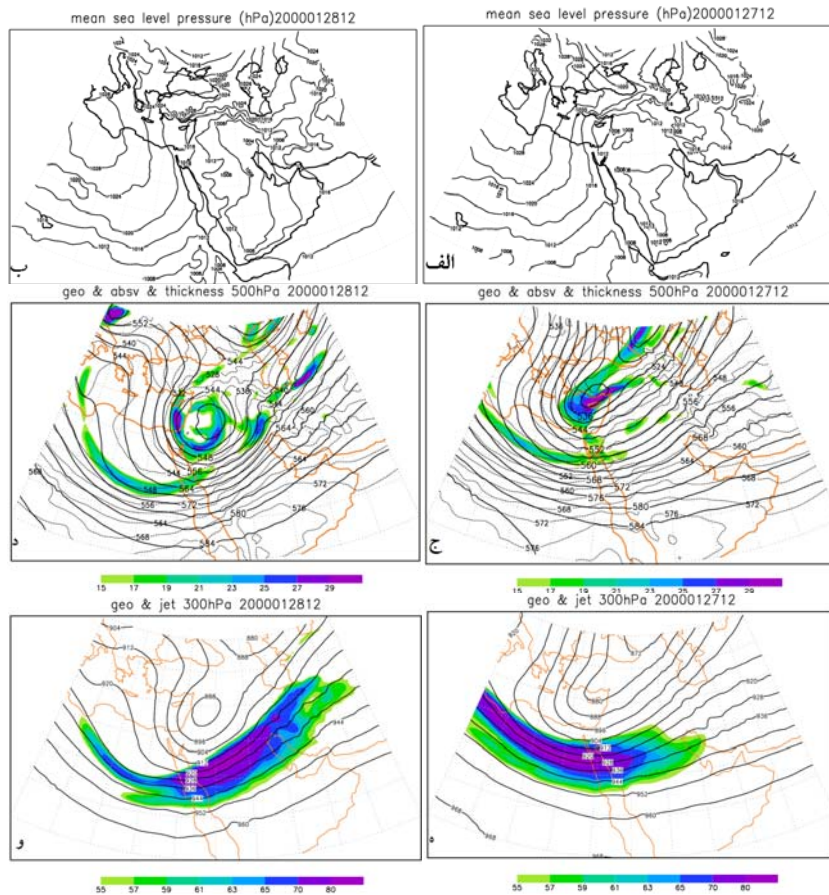
شکل ۴. (الف) انتگرال حجمی گرایش انرژی و فرارفت انرژی بر اثر شارش میانگین (KMA) و پیچگی (KEA) بین ترازهای ۱۰۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال که با پربند $100 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ محدود شده است، (ب) مانند (الف) ولی برای تبدیل کثافتشاری انرژی (-wa)، همگرایی آزمون گرد شار انرژی (AFC)، تبدیل فشارورودی انرژی بر اثر تنش رینولدز (brt) و تبدیل بر اثر تنش میانگین زمانی (tms) برحسب $\text{m}^2 \text{ s}^{-3}$.

همراه جت جنب‌حاره با بیشینه سرعت 80 ms^{-1} دیده می‌شود (شکل ۵-ه). در روز بیست و هشتم در سطح زمین دو کم‌فشار عربستان و مدیترانه روی غرب ایران با هم ترکیب و تقویت شده‌اند، به گونه‌ای که مرکز کم‌فشار با خط کم‌فشار 1004 hPa روی غرب ایران دیده می‌شود (شکل ۵-ب). در تراز میانی، ارتفاع ژئوپتانسیلی روی عراق بین ۴۰ تا 60 dm کاهش و بیشینه فرارفت تاوایی 10^{-5} s^{-1} افزایش یافته است. همچنین، فرارفت هوای گرم در جریان‌سوی ناوه روی غرب عربستان و جنوب غرب ایران جابه‌جا شده است (شکل ۵-د). در تراز 300 hPa مرکز کم‌ارتفاع با پربند 88 gpm روی سوریه و غرب عراق شکل گرفته و ناوه آن به همراه جت جنب‌حاره با بیشینه سرعت 80 ms^{-1} جلوی محور ناوه روی عربستان و جنوب غرب ایران کشیده شده است، به گونه‌ای که شاخه فرازشی سلول گرمایی غیر مستقیم در خروجی جت روی غرب ایران قرار گرفته است (شکل ۵-و).

۴ بررسی همدیدی و تحلیل انرژی برای سامانه دوم

۴-۱ توصیف همدیدی سامانه دوم مربوط به ژانویه ۲۰۰۰ (از 2000012700 تا 2000012906)

در ساعت 12 UTC روز بیست و هفتم ژانویه سال ۲۰۰۰ در سطح زمین، دو مرکز کم‌فشار نزدیک هم با خط هم‌فشار بسته 1008 hPa روی غرب عراق و سوریه و شمال عربستان دیده می‌شود (شکل ۵-الف). در تراز میانی یک کم‌ارتفاع با پربند بسته 534 gpm روی شرق دریای مدیترانه وجود دارد که ناوه آن روی شمال عربستان و دریای سرخ کشیده شده است. بیشینه فرارفت تاوایی تا مقدار 10^{-5} s^{-1} و ضخامت تا 40 dm نسبت به روز قبل در نزدیک محور ناوه کاهش یافته است. همچنین فرارفت ضعیف هوای گرم در جریان‌سوی ناوه روی غرب عربستان و غرب عراق نیز دیده می‌شود (شکل ۵-ج). در تراز 300 hPa ناوه عمیقی با محور شمال شرقی- جنوب غربی روی شرق دریای مدیترانه و شمال دریای سرخ به



شکل ۵. مانند شکل ۱ ولی برای روزهای بیست‌وهفتم و بیست‌وهشتم ژانویه سال ۲۰۰۰.

شرق دریای مدیترانه موجب تقویت مرکز انرژی می‌شود (شکل ۷-ج). در شکل‌های ۷-ز و ۷-ه مراکز مثبت تبدیل کژفشاری و همگرایی شار آزمین‌گرد انرژی روی مراکز جنوب غرب ایران و شرق مدیترانه با مقدار حدود $5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ دیده می‌شود. به نظر می‌رسد قرار گرفتن جت جنب‌حاره (شکل ۵-ه) روی شرق دریای مدیترانه و شمال دریای سرخ به همراه واگرایی قوی در ترازهای بالا و وجود رطوبت مناسب در چرخند سطح زمین روی این ناحیه (شکل ۵-الف) موجب تقویت جمله کژفشاری و همگرایی شار آزمین‌گرد انرژی شده است.

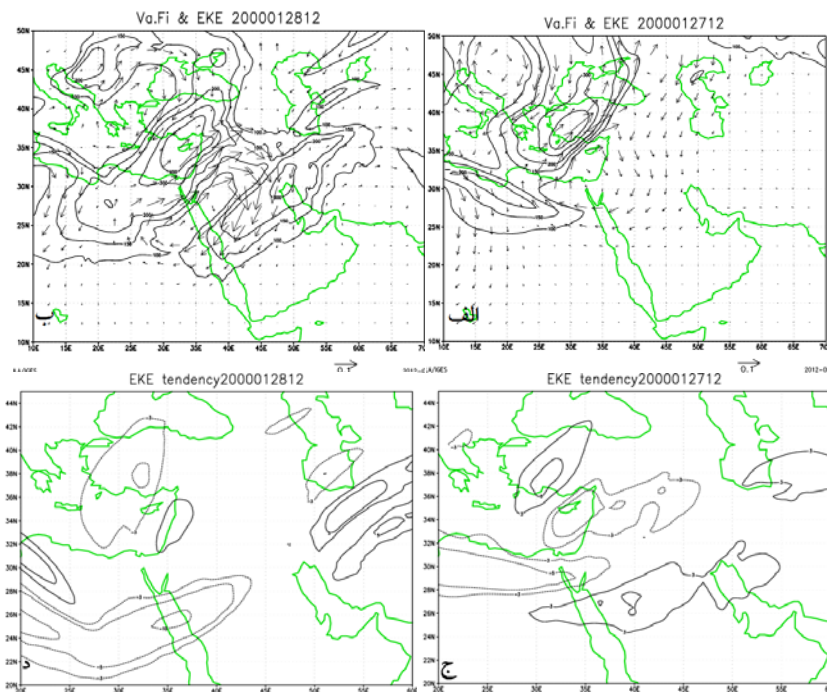
نصر اصفهانی و همکاران (۱۳۸۹) با بررسی جملات گرایش انرژی در فازهای مثبت و منفی NAO نتیجه گرفتند که در حضور جت جنب‌حاره، همگرایی شار

۲-۴ تحلیل جنبه‌های انرژی برای سامانه دوم

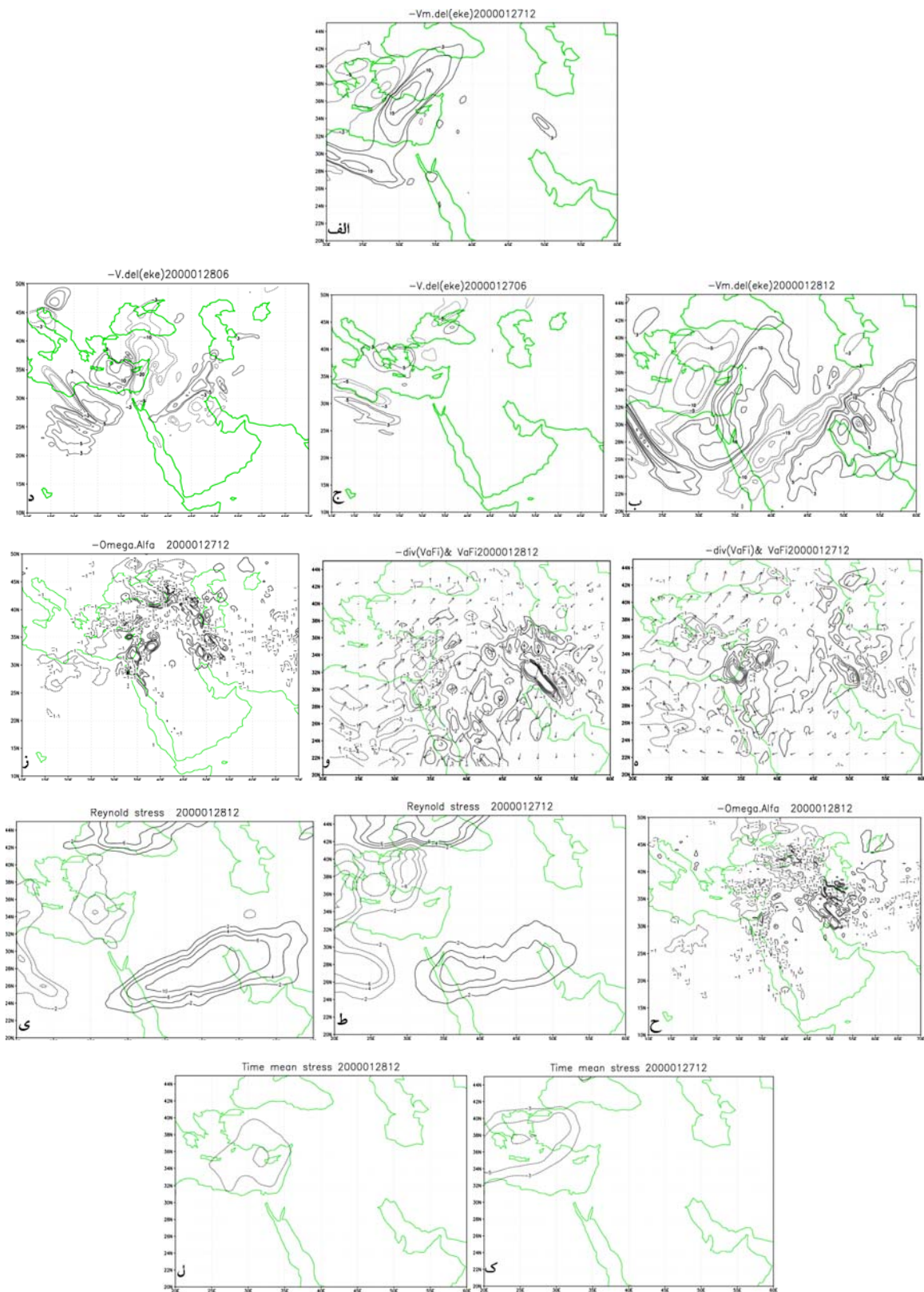
در روز بیست و هفتم ژانویه ۲۰۰۰ مرکز انرژی با مقدار $400 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ در پادجریان‌سوی ناوه روی شرق دریای مدیترانه و شارش آزمین‌گرد انرژی از این مرکز به جریان‌سوی ناوه روی شمال عربستان و جنوب غرب ایران دیده می‌شود (شکل ۶-الف). در همین روز وجود دو سلول گرایش مثبت انرژی روی جنوب غرب ایران و روی شرق مدیترانه با مقدار بیش از $5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ بیانگر توسعه جریان‌سوی مرکز انرژی روی جنوب غرب ایران و شرق دریای مدیترانه است (شکل ۶-ج). فرارفت مداری انرژی نیز در هردو ناحیه دیده می‌شود و روی شرق مدیترانه مقدار آن قابل توجه و حدود $15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ است (شکل ۷-الف). فرارفت پیچکی با مقدار حدود $5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ فقط روی

تبدیل کثافتی و همگرایی شار آزمین گرد انرژي حدود $5\text{m}^2\text{s}^{-3}$ و مقدار مثبت فشاروردي (تنش رینولدز) تا حدود $10\text{m}^2\text{s}^{-3}$ روی جنوب غرب ایران دیده می‌شود. در این روز ناحیه خروجی جت روی جنوب غرب ایران قرار دارد که موجب تقویت حرکت صعودی واداشته هوای مرطوب روی دامنه‌های غربی رشته‌کوه‌های زاگرس در ترازهای پایینی و در نتیجه جمله‌های کثافتی و همگرایی شار آزمین گرد تقویت می‌شوند (شکل ۵-ب). مطابق نتیجه‌گیری نصراصفهانی و همکاران (۱۳۸۹) هرچه به عرض‌های پایین‌تر برویم مقدار جملات فشاروردي بزرگ‌تر و جملات کثافتی ضعیف می‌شوند. هرچند این قاعده به‌طور کلی درست است، ولی نتایج به‌دست آمده در اینجا، نشان می‌دهد که در برخی مناطق ممکن است با کاهش عرض جغرافیایی، افزایش مقدار جمله کثافتی نیز مشاهده شود. در این بررسی موردی شاهد افزایش جملات کثافتی روی شمال دریای سرخ و دامنه‌های غربی زاگرس هستیم.

آزمین گرد انرژي روی جنوب شرق وجود دارد. این نتیجه با نتایج به‌دست آمده در این پژوهش هم‌خوانی دارد با این تفاوت که در دو بررسی موردی این پژوهش، شار انرژي روی جنوب غرب ایران نیز قابل توجه است. همچنین به علت استقرار محور جت روی شمال عربستان و جنوب غرب ایران، مرکز مثبت تبدیل فشاروردي (تنش‌های رینولدز و میانگین زمانی) تا حدود $10\text{m}^2\text{s}^{-3}$ روی این مناطق دیده می‌شود (شکل‌های ۷-ط و ۷-ک). در روز بیست و هشتم، مرکز انرژي روی جنوب غرب ایران تا m^2s^{-2} تقویت شده و شارش انرژي از مرکز شرق دریای مدیترانه به این مرکز افزایش یافته است (شکل ۶-ب). وجود مرکزهای مثبت گرایش انرژي روی جنوب غرب ایران و روی سوریه، بیانگر رشد مراکز انرژي در این نواحی است (شکل ۶-د). علت این تقویت انرژي وجود فرارفت مداری انرژي تا حدود $10\text{m}^2\text{s}^{-3}$ (شکل ۷-ب) و فرارفت موجی تا مقدار $5\text{m}^2\text{s}^{-3}$ است (شکل ۷-د). همچنین مطابق شکل‌های ۷-ح، ۷-ل و ۷-ی مقادیر مثبت



شکل ۶. مانند شکل ۲ ولی برای روزهای بیست‌وهفتم و بیست‌وهشتم ژانویه سال ۲۰۰۰.

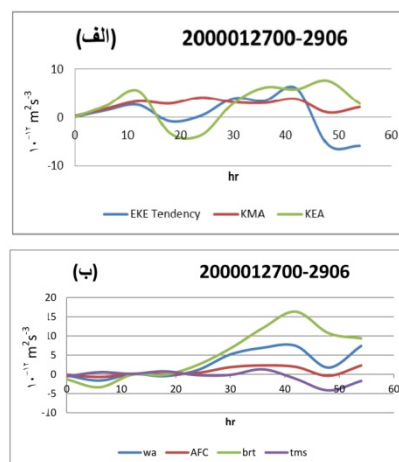


شکل ۷. مانند شکل ۳ ولی برای روزهای بیست و هفتم و بیست و هشتم ژانویه سال ۲۰۰۰.

۳-۴ بررسی حجمی بسته انرژی ونحوه تغییرات آن برای سامانه دوم

در روز ۲۷ ژانویه مرکز انرژی در جریان سوی ناوه روی شمال عربستان در حال شکل گیری است (شکل ۶-الف). در شکل های ۸-الف و ۸-ب مقدار تجمعی مولفه های گرایش انرژی برای ۵۴ ساعت در دوره زندگی این مرکز انرژی (از ۲۰۰۰۱۲۷۰۰ تا ۲۰۰۰۱۲۹۰۶) داده شده است. در ۱۲ ساعت اول (از ۲۷۰۰ تا ۲۷۱۲) گرایش مثبت انرژی این مرکز در جریان سو به علت مقادیر مثبت فرارفت مداری و پیچکی انرژی در شکل ۸-الف دیده می شود. مقادیر منفی تبدیل کژفشاری و همگرایی آزمون گرد انرژی و تبدیل فشاروردی (تنش رینولدز) روی این مرکز کوچک است (شکل ۸-ب). در این ساعت ها کم فشار ضعیفی روی سوریه شکل می گیرد (شکل ۵-الف). بین ساعت های ۱۲ تا ۲۴ (از ۲۷۱۲ تا ۲۸۰۰) گرایش انرژی منفی (شکل ۸-الف) و بیشینه فرارفت تاوایی و ضخامت از مجاورت محور ناوه به جریان سوی ناوه جابه جا شده است (شکل ۵-ج) و با تقویت کم فشارها روی عربستان و سوریه جملات کژفشاری ضعیفی دیده می شود (شکل های ۵-الف و ۸-ب). از ساعت ۲۴ تا ۳۶ (از ۲۸۰۰ تا ۲۸۱۲) مرکز انرژی

تقویت می شود (شکل ۸-الف). با جابه جایی ناحیه خروجی جت به جریان سوی ناوه در تراز بالا وجود فرارفت هوای گرم و تاوایی در جریان سوی ناوه تراز میانی، کم فشار در سطح زمین روی غرب ایران تقویت شده است (شکل های ۵-ب، ۵-د و ۵-و) و در نتیجه عوامل فشاروردی و کژفشاری و همگرایی شار آزمون گرد انرژی و فرارفت مداری موجب تقویت مرکز انرژی در غرب ایران می شوند (شکل های ۸-الف و ۸-ب). در بین ساعت های ۳۶ تا ۴۲ (از ۲۸۱۲ تا ۲۸۱۸) با عبور این موج از ارتفاعات زاگرس (شکل ۵-ب) تقویت دوباره در عامل تبدیل کژفشاری انرژی و همگرایی شار آزمون گرد انرژی رخ می دهد (شکل ۸-الف). در این ساعت ها با عمیق شدن ناوه (شکل ۵-د) مقدار مثبت فرارفت پیچکی انرژی (شکل ۸-الف) و تاثیر جت جنب حاره ای روی موج به صورت تبدیل فشاروردی مثبت دیده می شود (شکل ۸-ب). در ۱۲ ساعت آخر (از ۲۸۱۸ تا ۲۹۰۶) با عبور موج از ارتفاعات زاگرس، در مرکز و جنوب ایران مرکز انرژی تضعیف می شود (شکل ۸-الف). مهم ترین عامل کاهش انرژی در آن کوچک شدن جمله تبدیل کژفشاری و همگرایی شار آزمون گرد انرژی است (شکل ۸-ب).



شکل ۸. مانند شکل ۴ ولی برای بیست و هفتم تا بیست و نهم ژانویه ۲۰۰۰.

۵ نتیجه‌گیری

در این تحقیق توسعه جریان‌سوی مرکز انرژی مربوط به دو چرخند بالغ روی دریای مدیترانه در ماه ژانویه سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۰ که از نوار غربی ایران عبور کرده‌اند بررسی شده است. به‌طور خلاصه می‌توان مراحل زندگی این چرخندها به همراه رشد جریان‌سوی ثانویه مرکز انرژی را به‌صورت زیر بیان کرد.

در مورد چرخند اول مربوط به ژانویه سال ۲۰۰۴ وجود جملات مثبت کژفشاری و فرارفت آزمین‌گرد ارتفاع ژئوپتانسیل روی دریای مدیترانه در روز یازدهم، و روی سوریه و عراق در روز دوازدهم و سپس روی غرب ایران در روز سیزدهم نشان می‌دهد که این چرخند روی غرب مدیترانه شکل گرفته و در دو ناحیه دیگر نیز تقویت شده است. ابتدا روی مدیترانه یک مرکز انرژی قوی به علت حضور جت قطبی در پادجریان‌سوی ناوه وجود دارد. سپس هم‌زمان با جابه‌جایی جت قطبی به جریان‌سوی ناوه شار آزمین‌گرد قوی انرژی از این مرکز به مرکز انرژی در جریان‌سوی ناوه موجب گسترش جریان‌سوی مرکز انرژی در شرق مدیترانه و غرب ایران می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که افزایش مقدار تبدیل کژفشاری انرژی و همگرایی شار آزمین‌گرد انرژی در دو ناحیه شرق مدیترانه، شمال عربستان و سپس غرب ایران عامل تقویت جریان‌سوی انرژی است. افزایش انرژی کژفشاری روی شرق مدیترانه و سوریه به علت فرارفت هوای گرم و مرطوب دریای سرخ و روی غرب ایران به علت صعود واداشته هوا روی ارتفاعات غربی ایران است.

برای چرخند دوم مربوط به ژانویه سال ۲۰۰۰، مشابه مورد اول ابتدا یک مرکز انرژی قوی روی دریای مدیترانه در پادجریان‌سوی ناوه وجود دارد. اما در این مورد حضور جت جنب‌حاره به همراه جت قطبی، موجب شار آزمین‌گرد قوی انرژی از این مرکز به مرکز انرژی در جریان‌سوی ناوه و در نتیجه موجب گسترش جریان‌سوی

مرکز انرژی روی شمال عربستان و غرب ایران می‌شود. همچنین نقش فرارفت هوای گرم در شمال عربستان و شرق مدیترانه و سپس صعود اجباری هوا در غرب ایران در تقویت عامل کژفشاری و گسترش جریان‌سوی انرژی برای این مورد مشابه مورد پیشین است. می‌توان گفت که دریای سرخ و رشته‌کوه‌های زاگرس که دارای کشیدگی نصف‌النهاری هستند، با قرار گرفتن در مسیر چرخندهای عبوری به‌صورت دو ناحیه ویژه در تقویت چرخندها اثرگذار هستند و پس از عبور از دامنه‌های زاگرس انرژی چرخندها به تدریج ضعیف می‌شود.

مقدار انرژی در جریان‌سوی سامانه اول تا $200 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ ولی در سامانه دوم تا $300 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ رشد داشته است و هردوی آنها روی دامنه‌های غربی زاگرس بیشینه شده‌اند. در این ناحیه هرچند مقدار جملات کژفشاری و همگرایی شار آزمین‌گرد انرژی در هردو مورد هم‌مرتب بوده است ولی در سامانه جنوبی نواحی دارای کژفشاری و همگرایی شار آزمین‌گرد گسترده‌تر است. از طرفی مرکز انرژی در پادجریان‌سوی سامانه دوم $100 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ بیشتر از مقدار آن در سامانه اول و تا حدود $400 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ بوده است. در نتیجه مقدار همگرایی شار آزمین‌گرد انرژی از پادجریان‌سو به جریان‌سوی ناوه در سامانه دوم بیشتر بوده است. همچنین برخلاف سامانه اول در سامانه دوم نقش عامل فشاروردی (تنش‌های رینولدز و میانگین زمانی) در تقویت این مرکز انرژی قابل توجه است. به نظر می‌رسد وجود یک جت جنب‌حاره قوی در شرایط مناسب روی دامنه‌های غربی زاگرس حرکت صعودی را در این سامانه تشدید کرده است و موجب تقویت مرکز انرژی در جریان‌سوی ناوه شده است.

پیوست

به‌منظور ارزیابی زمانی هزینه انرژی جنبشی سامانه برای واحد جرم (k)، معادله شامل انرژی شار میانگین (k_m)،

چهارم اتلاف انرژی جنبشی پیچکی بر اثر نیروی اصطکاک و جمله آخر اثر واداشت پایای شارش میانگین روی پیچکها است. مقدار این دو جمله ناچیز است (اورلانسکی و کاتزفی، ۱۹۹۱).

شار پیچکی ارتفاع ژئوپتانسیل آزمینگرد را می توان به صورت زیر تعریف کرد

$$v_a \phi = \left(v - \frac{k}{f_0} \times \nabla \phi \right) \phi \quad (\text{پ-۴})$$

که در آن، سرعت آزمین گرد نسبت به شارش زمین گرد در یک عرض جغرافیایی مرجع و پارامتر کوریولیس f_0 است. توجه شود که واگرایی بردار سمت چپ معادله بالا معادل واگرایی شار کل است. زیرا جمله دوم داخل پرانتز نشان دهنده شار با شارش زمین گرد و ناواگرا است. مینگین قائم $v \cdot \nabla \phi$ - به صورت زیر نوشته می شود:

$$-v \cdot \nabla \phi = -(\nabla \cdot (v \phi)) - \omega \alpha - \frac{\omega \phi |p_s - p_t|}{(p_s - p_t)} \quad (\text{پ-۵})$$

برای امواج با دامنه کوچک $v \phi$ نشان دهنده شار انرژی است که از آن به مثابه شار انرژی تابشی یاد می شود تا از بخش فرارفتی متمایز باشد. جمله $\omega \alpha$ بیانگر تبدیل از انرژی پتانسیل پیچکی به انرژی جنبشی پیچکی است. جمله آخر در سمت راست معادله بالا قابل چشم پوشی است زیرا مقدار سرعت قائم در مرزها کوچک و مقدار ارتفاع ژئوپتانسیلی در سطح زمین صفر است.

مراجع

نصراصفهانی، م. ع.، احمدی گیوی، ف. و محب الحجه، ع. ر.، ۱۳۸۹، بررسی انرژی تیک ارتباط نوسان اطلس شمالی NAO و گردش بزرگ مقیاس و ردسپهر در جنوب غرب آسیا، م. فیزیک زمین و فضا، ۳۶(۳)، ۱۳۱-۱۴۹.

احمدی گیوی، ف.، محب الحجه، ع. ر. و یآوری، م.، ۱۳۸۴، مطالعه بسته موج های کرفشار در فوریه ۲۰۰۳،

مرتب اول نوسان زمانی انرژی جنبشی (k_1) و انرژی جنبشی پیچکی (k_e) استفاده می شود.

$$k = \frac{1}{2} V_m \cdot V_m + V_m \cdot v + \frac{1}{2} v \cdot v = k_m + k_1 + k_e \quad (\text{پ-۱})$$

$$V = V_m + v \quad (\text{پ-۲})$$

که در آن، (V) سرعت افقی باد، (V_m) میانگین ماهانه و (v) انحراف از میانگین ماهانه است. البته در میانگین زمانی جمله مربوط به نوسان زمانی حذف می شود و (k_1) فقط در مقیاس زمانی کوتاه در هزینه انرژی قابل ملاحظه است و وقتی متوسط گیری در مدت حدود یک ماه صورت گیرد، حالت پایا رابه دست نمی دهد.

با استفاده از معادله پایستاری تکانه و میانگین آن می توان معادله گرایش انرژی موج را به شکل زیر به دست آورد.

$$\frac{\partial k_e}{\partial t} + V_m \cdot \nabla k_e + v \cdot \nabla_3 k_e = - (v \cdot \nabla \phi) - (v \cdot (v \cdot \nabla_3 V_m)) + (v \cdot (\nabla_3 v)) - v \cdot F_r + v \cdot F_0 \quad (\text{پ-۳})$$

که در آن، V_m میانگین ماهانه سرعت افقی ϕ و v به ترتیب انحراف از میانگین ماهانه برای ارتفاع ژئوپتانسیلی و سرعت افقی هستند. F_0 میانگین زمانی گرایش محلی تکانه و F_r اختلاف نیروی وشکسانی کلی و میانگین زمانی آن است (برای مثال اورلانسکی و کاتزفی، ۱۹۹۱ و پیوا و همکاران، ۲۰۰۹). جمله های سمت چپ به ترتیب گرایش محلی انرژی جنبشی پیچکی و فرارفت آن با شارش میانگین (KMA) و پیچکها (KEA) است. جمله اول سمت چپ کار فشار وابسته به پیچکها است. جمله دوم تبدیل انرژی توسط تنش رینولدز است که اگر به طور مناسب در مکان یا زمان میانگین گیری شود می توان آنرا به مثابه انتقال انرژی جنبشی بین شارش میانگین و پیچکی تعبیر کرد (BRT). جمله سوم نشان دهنده تبدیل خالص از انرژی جنبشی پیچکی (K_e) به همبستگی مرتبه اول ($K_1 = V_m \cdot v$) یا تنش میانگین زمانی (TMS) است. جمله

- Orlanski, I. and Katzfey, J., 1991, The life cycle wave in the southern hemisphere Part I: Eddy energy budget, *J. Atmos. Sci.*, **48**, 1972-1997.
- Orlanski, I. and Gross, B. D., 1993, Orographic modification of cyclone development, *J. Atmos. Sci.*, **51**, 589-611.
- Piva, D. E., Gan, M. A. and Rao, V. B., 2009, Energetics of winter troughs entering South America, *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1084-1103.
- Sheldon, J. P., 1993, A case of downstream baroclinic development over western North America, *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2929-2950.
- Simmons, A. J. and Hoskins, B. J., 1978, The life cycles of some nonlinear baroclinic waves, *J. Atmos. Sci.*, **35**, 414-432.
- Saha, S. and Coauthors, 2010, The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 1015-1057.
- II: بررسی دینامیکی بسته موج‌ها از دیدگاه انرژی، م. فیزیک زمین و فضا، **۳۱**(۲)، ۷۸-۵۹.
- Chang, E. K. M., 1993: Downstream development of baroclinic waves as inferred from regression analysis. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 2038 – 2053.
- Decker, S. G. and J. E. Martin, 2005, A local energetics analysis of the life cycle differences between consecutive, explosively deepening, continental cyclones, *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 295–316.
- Hoskins, B. J., 1979, The downstream and upstream development of unstable baroclinic waves, *J. Atmos. Sci.*, **36**, 1239-1254.
- Orlanski, I., 1993, On the dynamics of a storm track, *J. Atmos. Sci.*, **50**, 999-1015.