

بررسی دینامیک مسیر توفان مدیترانه از دیدگاه شار فعالیت موج راسبی

علی اسعدی^۱، فرهنگ احمدی گیوی^{۲*}، سرمد قادر^۳ و علیرضا محب‌الحجه^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۲ استادیار، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۳ دانشیار، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۹/۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۷/۶، دسترسی برخط: ۱۳۹۰/۱۲/۲۵)

چکیده

هدف اصلی این تحقیق بررسی دینامیک مسیر توفان مدیترانه براساس کمیت دینامیکی فعالیت موج راسبی و شار آن است. با توجه به تأثیرپذیری مسیر توفان مدیترانه از مسیر توفان اقیانوس اطلس شمالی، یکی از مسائل مهم مطرح چگونگی تابش موج راسبی از مسیر توفان اقیانوس اطلس شمالی به مسیر توفان مدیترانه است. داده‌های به‌کاررفته در این بررسی مربوط به بازه زمانی دسامبر تا فوریه سال‌های ۲۰۰۴-۲۰۰۵ است. به‌منظور بررسی شار فعالیت موجی خروجی و ورودی به منطقه مدیترانه، یک حوزه دُو بُعدی مستطیل‌شکل روی تراز ۳۰۰ hPa و یک حوزه مکعب مستطیل شکل از تراز ۲۰۰ hPa تا ۶۰۰ hPa انتخاب و مقادیر انتگرالی شار روی مرزهای دو حوزه محاسبه شده است. با توجه به اهمیت شار فعالیت موجی ورودی در مرز شمالی منطقه مدیترانه، وضعیت شار در این مرز با جزئیات بیشتر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که در ماه دسامبر، منطقه غرب مدیترانه تقریباً مستقل از مسیر توفان اطلس بوده و عمده شار ورودی از مرز شمالی منطقه مدیترانه مربوط به قسمت شرقی آن است. درحالی‌که در ماه فوریه و به‌ویژه ژانویه، منطقه غرب مدیترانه تحت تأثیر مسیر توفان اطلس بوده و عمده شار ورودی از مرز شمالی منطقه مدیترانه مربوط به قسمت غربی آن است.

واژه‌های کلیدی: شار فعالیت موجی، مسیر توفان اطلس شمالی، مسیر توفان مدیترانه، تابش انرژی

Dynamic analysis of the Mediterranean storm track using Rossby wave activity and fluxes

Ali Asadi¹, Farhang Ahmadi-Givi^{1*}, Sarmad Ghader¹ and Alireza Mohebalhojeh¹

¹Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 23 November 2010, accepted: 28 September 2011, available online: 15 March 2012)

Summary

This paper studies the dynamics of the Mediterranean storm track from the view point of Rossby wave activity and its flux. The evolution of wave activity is related to wave transience and nonconservative effects. In this study, the formulation introduced by Esler and Haynes (1999) has been applied to compute wave activity. The data used for this study are from December 2004 through February 2005. In order to investigate the flux of the wave activity into and out of the Mediterranean region, first the wave activity and its flux were calculated for each grid point of a grid covering the middle latitudes of the North Atlantic Ocean and the Mediterranean Sea. Next, a two-dimensional rectangular

*Corresponding author:

ahmadig@ut.ac.ir

*نگارنده رابط:

domain at 300 hPa surface as well as a three-dimensional rectangular cubic domain extending from 600 to 200 hPa surfaces was selected on the Mediterranean region, and wave activity and its flux were calculated for their different boundaries. These computations were done at 6-hr intervals for each month (December, January and February) of the winter as well as the periods of the two case studies: case 1 (23/12/2004-01/01/2005) with clear propagation of the wave packets to the western Mediterranean from the North Atlantic storm track, and case 2 (07/01/2005-13/01/2005) with zonal propagation of the wave packets along the central latitude of the North Atlantic storm track.. In addition, to investigate more accurately contributions of the different parts of the domains to wave activity, each of the domains was divided into three smaller subdomains located on the western, central and eastern Mediterranean. Given the importance of the northern boundary in the wave activity flux into the Mediterranean region, the flux of this boundary was studied in more detail. The results indicate that

1. Entrance of the wave activity was observed in the western and northern boundaries of the two- and three-dimensional domains at all the time scales (monthly, seasonally and during the periods of the case studies), while the eastern and southern boundaries showed the exit of wave activity from the Mediterranean region.

2. In all of the cases, except Case Study 1, due to the dominance of the total output flux, the Mediterranean region acted as a source of wave activity. This result might be regarded, at least partly, as the reason for the existence of various cyclogenesis centers in the Mediterranean region.

3. In Case Study region.

4. The wave activity fluxes associated with the subdomains over the western, central and eastern Mediterranean show that the input flux from the eastern boundary of the subdomains west of the Mediterranean was greater than those from the eastern boundaries of the other subdomains. This finding might be one of the possible reasons for the existence of the main cyclogenesis centers in the western part of the Mediterranean. In this case, the western subdomain acted as a source of the wave activity, whereas the central and eastern subdomains played the opposite role.

5. In December 2004, it seemed the wave activity flux in the western Mediterranean was almost independent of the Atlantic storm track, and most of the influx came from the eastern part of the Mediterranean northern boundary. In January 2005, and to a lesser extent in February, the western Mediterranean was affected by the Atlantic storm track and the major influx belonged to the western part of the Mediterranean region.

Key words: Wave activity flux, North Atlantic Storm track, Mediterranean storm track, Energy transfer

۱ مقدمه

دسته‌بندی آنها را از نظر جغرافیایی، ساختار و تغییرات، مسیر حرکت و بسامد نسبی رخداد روشن می‌کند. شواهد بسیاری وجود دارد که توسعه چرخندها و واچرخندهای عرض‌های میانی را می‌توان تا حدودی به انتشار بسته‌های موج نسبت داد (مانند اورلانسی و شلدون، ۱۹۹۳؛ چنگ، ۲۰۰۰). اورلانسی و کترفی (۱۹۹۱) و پس از آن چنگ (۲۰۰۰) روشن ساختند که برای بررسی و ردیابی

نتایج مشاهدات و پژوهش‌های بسیار حاکی از آن است که بسیاری از تغییرات روزانه‌ی هوا در عرض‌های میانی مربوط به سامانه‌های گذرای کم‌فشار و پرفشار با مقیاس چندین هزار کیلومتر است. در نظر گرفتن این موضوع در کنار نقش اساسی این سامانه‌ها در گردش کلی جو از راه انتقال گرما، تکانه و رطوبت، ضرورت بررسی جامع‌تر و

که ذر آن، S ، واداشت‌های پیچکی ناپایستار موج، تبدیل‌های گوناگون انرژی و اثرات اصطکاک و فرایندهای دررو را نشان می‌دهد. F شار فعالیت موجی و A چگالی فعالیت موجی است که مشتق زمانی آن اثرات گذرای موج را نشان می‌دهد و برای امواج ایستا صفر است. این رابطه به وضوح بیانگر وابستگی واگرایی شار فعالیت موجی به خصوصیات فیزیکی گذرای موج و اثرات ناپایستاری موج است و از جنبه ساختاری، ساده‌تر از معادله انرژی موج است و دارای مزیت‌های روشنی مانند فرایابی انتشار موج در شارش پیچیده میانگین است و در نتیجه کاربرد بیشتری دارد. شار الیاسن-پالم (ادمون و همکاران، ۱۹۸۰) یک مثال از F است که انتشار اغتشاش‌ها روی یک شارش میانگین مداری را نشان می‌دهد. مانند شار انرژی پیچکی، شار F شکل‌های گوناگونی دارد که همه آنها دارای خاصیت سرعت گروه نیستند. ولی برخلاف انرژی پیچکی، اگر F دارای خاصیت سرعت گروه برطبق رابطه

$$\mathbf{F} = \mathbf{c}_g A \quad (2)$$

باشد که در آن، \mathbf{c}_g سرعت گروه است، بقیه جمله‌های بودجه فعالیت موجی توصیف فیزیکی نسبتاً مشخصی خواهند داشت (دنیلسون و همکاران، ۲۰۰۶).

با توجه به تعریف S در رابطه (۱)، تبدیل‌های انرژی در عرض‌های میانی در مرحله نخست بدین دلیل رخ می‌دهند که حالت پایه در راستای مداری و قائم متغیر است. چنگ و اورلانسکی (۱۹۹۴) با محاسبه شار و سرعت گروه برای مدل‌های دارای حالت پایه متغیر در راستای قائم، روشن ساختند که شار ژئوپتانسیلی آزمون‌گرد در شارش‌های دارای چینش خطی ایدنال، با سرعت گروه در ارتباط است. آنها اظهار کردند که شار ژئوپتانسیلی با تحلیل‌های مشاهداتی چنگ (۱۹۹۳) مطابقت دارد و می‌توان این شار را برای نمایش انتشار

انتشار یک بسته موج می‌توان از شار ژئوپتانسیلی آزمون‌گرد که بخش مهمی از انتشار انرژی پیچکی را به خود اختصاص می‌دهد، استفاده کرد. اگرچه توصیف فیزیکی دیگر جمله‌های انرژی به‌خوبی امکان‌پذیر است، ولی جمله‌های شار انرژی و جمله‌های تبدیل را نمی‌توان از نظر کمی به‌دقت و به‌صورت یکتا مشخص کرد (پلام، ۱۹۸۳). این موضوع مسائلی را که با استفاده از بودجه انرژی پیچکی قابل حل هستند و همچنین برآورد اهمیت نسبی انتشار بسته‌های موج را پیچیده می‌کند.

چنگ و اورلانسکی (۱۹۹۴) شکل شبه‌زمین‌گرد شار ژئوپتانسیل پیچکی آزمون‌گرد را معرفی کردند و نشان دادند که این شار نسبت به شارش مداری یکنواخت، موازی با سرعت گروه است. بدین ترتیب شار انرژی پیچکی به‌صورت یکتا مشخص شد و توصیف فیزیکی آن هم واضح و بدون ابهام است. البته برای فرایابی رخدادهای مشاهداتی می‌باید اهمیت توسعه پایین‌دست را هم در نظر گرفت. عموماً چنین اندازه‌گیری با مقایسه جمله واگرایی شار با دیگر جملات بودجه انرژی صورت می‌پذیرد. براساس نتیجه پلام (۱۹۸۳)، هیچ‌کدام از تبدیل‌ها و شارهای بودجه انرژی الزاماً یکتا نیستند.

بدون توجه فیزیکی سایر جمله‌های بودجه انرژی، به‌سختی می‌توان ادعا کرد که جمله واگرایی شار مهم‌ترین جمله است. این موضوع یک چالش در فرایابی است که می‌توان آن را با به‌کارگیری یک کمیت که در غیاب واداشت‌های دررو و اصطکاک، کاملاً پایستار است، حل کرد. این کمیت در واقع همان «فعالیت موجی» است. وقتی چنین کمیتی از شارش مشخص شود (ادمون و همکاران، ۱۹۸۰؛ پلام، ۱۹۸۶؛ اسلر و هینز، ۱۹۹۹؛ تاکایا و ناکامورا، ۲۰۰۱؛ وولینگ و همکاران، ۲۰۰۸)، رابطه بودجه آن به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F} = S \quad (1)$$

که ذر آن، فعالیت موجی به صورت زیر است:

$$A = a \frac{\cos \phi \left(q^{e2} - \frac{\xi^e q_\lambda^e}{a \cos \phi} \right)}{4Q_\phi^0} \quad (۴)$$

که ذر آن، بالانویس e در بالای کمیت‌ها نشان‌دهنده پریشیدگی از حالت پایه ثابت است که سرعت مداری U^0 ، دمای پتانسیلی Θ^0 و تاوایی پتانسیلی شبه‌زمین گرد Q^0 را دارد. این کمیت‌ها معمولاً مقادیر میانگین زمانی در نظر گرفته می‌شوند. کمیت ψ^e پریشیدگی تابع جریان ($\psi = \Phi / 2\Omega \sin \phi$) بوده و پریشیدگی تاوایی پتانسیلی شبه‌زمین گرد نیز به صورت زیر است:

$$q^e = \frac{1}{a^2 \cos^2 \phi} \frac{\partial^2 \psi^e}{\partial \lambda^2} + \frac{1}{a^2 \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\cos \phi \frac{\partial \psi^e}{\partial \phi} \right) + f \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\theta^e}{\Theta_p^0} \right) \quad (۵)$$

که ذر آن، کمیت ξ^e هم با انتگرال‌گیری از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\xi_\lambda^e = a \cos \phi (q^e - \bar{q}^e) \quad (۶)$$

که در آن، خط افقی در بالای کمیت، نشانگر میانگین مداری است.

برای به دست آوردن فعالیت موجی که تاکایا و ناکامورا (۲۰۰۱) معرفی کردند (رابطه ۳۷ از مقاله آنها)، لازم است مقدار C_p تخمین زده شود که هرچه این تخمین بهتر باشد، دقت محاسبات بیشتر خواهد بود. ولی در فرمول‌بندی اسلر و هینز (۱۹۹۹) چنین مشکلی وجود ندارد و از این جهت نسبت به فرمول‌بندی تاکایا و ناکامورا دارای برتری است.

انرژی پیچکی در جریان‌های غیرخطی متغیر در راستای قائم و مداری به کار برد. تاکایا و ناکامورا (۲۰۰۱) رابطه‌ای را مربوط به شار ژئوپتانسیلی آزمون گرد برای پیچک‌های شبه‌زمین گرد با دامنه کوچک به دست آوردند. آنها روشن ساختند که با ترکیب انرژی پیچکی و آنستروفی پیچکی بهنجار شده، برای تعیین بودجه فعالیت موجی مانند رابطه (۱)، دیگر نیازی به میانگین‌گیری مکانی (ادمون و همکاران، ۱۹۸۰) و یا میانگین‌گیری زمانی (پلام، ۱۹۸۶) نیست. در نتیجه فعالیت موجی و شار آن (و همچنین سرعت گروه) را می‌توان هم در مکان و هم در زمان، به صورت منطقه‌ای مشخص کرد و به منزله یک مکمل ایدئال برای فرایابی انرژی پیچکی به کار برد. اسلر و هینز (۱۹۹۹) نیز روش مشابهی را برای یک مدل دو لایه‌ای به کار بردند. آنها رابطه پلام (۱۹۸۶) را تصحیح کردند و نتایج او را به امواج ناپایستار تعمیم دادند. ونسته و شفر (۱۹۹۸) روشن ساختند که اگر ضرایب معادلات خطی شده در فضا و زمان به آهستگی تغییر کنند، یعنی همان شرایطی که با تقریب WKB (Wentzel-Kramers-) Brillouin فراهم می‌شود، آن‌گاه این روابط برای فعالیت موجی همواره خاصیت سرعت گروه به شکل رابطه (۲) را بر آورده می‌کنند. اسلر و هینز (۱۹۹۹) شار فعالیت موجی خود را که تعمیم شار پلام (۱۹۸۶) بود، به صورت زیر معرفی کردند:

$$\mathbf{F} = \frac{\cos \phi}{2} \begin{bmatrix} \frac{2U^0 A}{\cos \phi} + \frac{1}{2} (\psi^e q^e - v^e \xi^e) \\ + v^{e2} - \frac{\psi^e v_\lambda^e}{a \cos \phi} \\ - u^e v^e + \frac{\psi^e u_\lambda^e}{a \cos \phi} \\ \frac{f}{\Theta_p^0} \left(v^e \theta^e - \frac{\psi^e \theta_\lambda^e}{a \cos \phi} \right) \end{bmatrix} \quad (۳)$$

بررسی فصلی و ماهانه ارتباط مسیر توفان مدیترانه با مسیر توفان اطلس با رهیافت فعالیت موجی و شار آن، این بررسی برای دو بازه زمانی فوق نیز صورت پذیرفته است.

۲ داده‌ها و روش کار

در این تحقیق، برای محاسبه فعالیت موجی و شار آن از داده‌های تحلیل GFS (Global Forecast System) مرکز NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) مربوط به زمستان ۲۰۰۴-۲۰۰۵ (ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه) استفاده شده است. این داده‌ها شامل مولفه‌های افقی سرعت و مولفه قائم آن در مختصات فشاری، دما و ارتفاع ژئوپتانسیلی با بازه زمانی ۶ ساعته هستند که روی شبکه‌ای با تفکیک ۱ درجه عرض جغرافیایی در ۱ درجه طول جغرافیایی در ۲۱ تراز فشاری درون‌یابی شده‌اند. به علاوه، داده‌های مربوط به بازه‌های زمانی دربرگیرنده دو بررسی موردی ۱ (۲۳ دسامبر ۲۰۰۴ تا ۱ ژانویه ۲۰۰۵) و ۲ (۷ ژانویه ۲۰۰۵ تا ۱۳ ژانویه ۲۰۰۵) نیز به کار رفته است.

در پژوهش حاضر از فرمول‌بندی اسلر و هینز (۱۹۹۹)، یعنی روابط (۳) تا (۶)، برای بررسی ارتباط میان مسیرهای توفان مدیترانه و اطلس شمالی و انرژی‌ای که از مسیر توفان اطلس به مسیر توفان مدیترانه تابش می‌شود، استفاده شده است. بدین‌منظور، ابتدا محاسبه فعالیت موجی و شارهای آن در سه جهت اصلی برای بخش عمده نیم کره شمالی شامل محدوده ۰ تا ۳۶۰ درجه طول جغرافیایی و ۱۰ تا ۸۰ درجه عرض جغرافیایی برای ۱۰ تراز فشاری از ۱۰۰۰ تا ۱۰۰ هکتوپاسکال صورت گرفت. مشتق‌های فضایی موجود در روابط شار، فعالیت موجی و تاوایی پتانسیلی پریشیدگی با تفاضل‌های متناهی مرتبه دوم تقریب زده می‌شوند. تنها مورد استفاده از تقریب تفاضل متناهی مرتبه اول، برآورد جمله آخر سمت راست رابطه (۵) در پایین‌ترین و بالاترین تراز محاسباتی است. پس از آن

در طی دو دهه اخیر تحقیقات بسیاری درباره مسیر توفان‌های آرام و اطلس از دیدگاه‌های متفاوت صورت گرفته است (سوانسون، ۲۰۰۶؛ بنگتسون و همکاران، ۲۰۰۶؛ ریویور و اورلانسی، ۲۰۰۷)، ولی پژوهش‌های مرتبط با مسیر توفان مدیترانه بسیار کم و محدود به چندسال اخیر است (هاسکینز و هاجز، ۲۰۰۲). لذا همچنان سؤال‌های فراوان در مورد دینامیک و فیزیک این مسیر توفان و ارتباط آن با دو مسیر توفان دیگر وجود دارد. هدف از پژوهش حاضر بررسی مسیر توفان مدیترانه و ارتباط آن با مسیر توفان اطلس در فصل زمستان ۲۰۰۵-۲۰۰۴ و به تفکیک در هریک از ماه‌های این فصل با استفاده از کمیت فعالیت موجی و شار آن است. یکی از دلایل مهم انتخاب این موضوع، علاوه بر عملی ساختن یک کار پژوهشی درباره مسیرهای توفان که نقش مهمی در اقلیم عرض‌های میانی و گردش کلی جو دارد، آن است که بیشتر سامانه‌های جوئی و چرخندهایی که کشور ایران را تحت تاثیر قرار می‌دهند، در دریای مدیترانه شکل می‌گیرند. در نتیجه هرگونه پژوهش در این راستا و نتایج آن می‌تواند از جنبه نظری و کاربردی برای مراکز علمی و سازمان هواشناسی کشور مفید باشد. این تحقیق بر یک بررسی اولیه زمستان ۲۰۰۴-۲۰۰۵ بر مبنای کاربردی روش‌های گوناگون تعیین پوش بسته موج‌های راسبی شامل وامدوله‌سازی مختلط (محب‌الحجه و همکاران، ۱۳۸۴) و تبدیل هیلبرت (زیمین و همکاران، ۲۰۰۳) و محاسبات انرژی‌تیک (احمدی‌گیوی و همکاران، ۱۳۸۴) استوار است. در این بررسی اولیه دو بازه زمانی در ماه‌های دسامبر و ژانویه به‌منزله نمونه به‌دست آمد که در بازه اول، انتقال انرژی از اطلس به مدیترانه به‌خوبی صورت گرفته است ولی در بازه دوم، ارتباط بارزی میان دو مسیر توفان مشاهده نمی‌شود. پس از این در بخش‌های متفاوت این مقاله دو مورد یادشده به‌ترتیب با نام‌های بررسی موردی ۱ و بررسی موردی ۲ به کار خواهند رفت. لذا علاوه بر

گوناگون چرخندزای مدیترانه و پی بردن به منبع انرژی آنها است. در انتها با توجه به اهمیت شار فعالیت موجی ورودی در مرز شمالی مستطیل مدیترانه، این قسمت مورد بررسی جزئی تر قرار می گیرد.

۱-۳ فعالیت موجی و شار آن در مستطیل و مکعب مستطیل مدیترانه

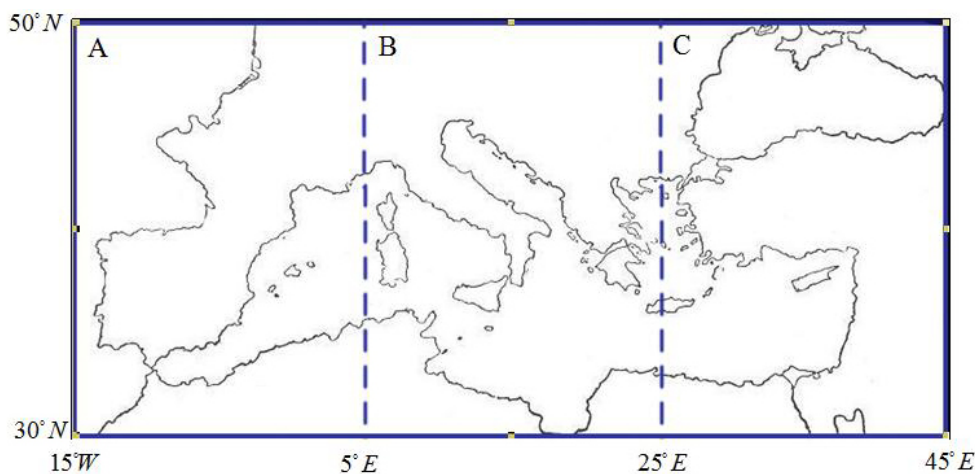
جدول های ۱ و ۲ نتایج محاسبه شار فعالیت موجی به ترتیب روی مرزهای مستطیل و مکعب مستطیل مدیترانه در فصل زمستان ۲۰۰۴-۲۰۰۵ و به تفکیک برای هریک از ماه های دسامبر، ژانویه و فوریه و همچنین بازه های زمانی بررسی های موردی ۱ و ۲ را نشان می دهد. از آنجا که جهت بردار یکه عمود بر مرزها به سمت بیرون در نظر گرفته شده است، علامت مثبت (منفی) مقادیر شار فعالیت موجی بیانگر خروج (ورود) شار از آن مرز است. با توجه به دو جدول، مشاهده می شود که علامت شار فعالیت موجی در مرز غربی هر دو شبکه منفی است؛ که این به معنای ورود شار از مرز غربی مستطیل و مکعب مستطیل مدیترانه است. از سوی دیگر، در مرز شرقی هر دو شبکه، علامت مثبت است؛ که این نشانگر خروج شار از این مرز است. در مرزهای شمالی و جنوبی، به ترتیب ورود و خروج شار دیده می شود.

نکته قابل توجه در ستون مجموع از جدول ۱، که نشان دهنده مجموع مقادیر شار روی همه مرزهای مستطیل مدیترانه است، آن است که مجموع شار صفر نیست و در همه موارد، به جز بررسی موردی ۱، علامت ها مثبت است. این موضوع را می توان چنین تعبیر کرد که در همه موارد، مستطیل مدیترانه در حکم یک چشمه فعالیت موجی ظاهر می شود و دلیل احتمالی آن وجود مناطق متفاوت چرخندزا در مدیترانه است (تریگو و همکاران، ۱۹۹۹؛ ماهراس و همکاران، ۲۰۰۱؛ گوجارو و همکاران، ۲۰۰۶).

حوزه مستطیل شکلی در سطح ۳۰۰ هکتوپاسکال بین طول های جغرافیایی ۱۵ درجه غربی تا ۴۵ درجه شرقی و عرض های جغرافیایی ۳۰ تا ۵۰ درجه شمالی در نظر گرفته (شکل ۱)، که از این پس "مستطیل مدیترانه" نامیده خواهد شد) و شار فعالیت موجی ورودی و خروجی از مرزهای مستطیل محاسبه شد و نمودارهای مربوط بر حسب زمان (۳۶۰ زمان با فاصله ۶ ساعته) و برای هر مرز (شمالی، جنوبی، شرقی و غربی) به دست آمد. هدف از این کار بررسی شار فعالیت موجی خروجی و ورودی به منطقه مدیترانه بود. در مرحله بعد، برای مشاهده و مقایسه شار فعالیت موجی در ماه های گوناگون، این محاسبات برای هر ماه (دسامبر، ژانویه و فوریه) به صورت جداگانه و همچنین برای بررسی های موردی ۱ و ۲ نیز صورت گرفت. به علاوه، نمودارهای شار فعالیت موجی برای مرز شمالی مستطیل مورد نظر بر حسب طول جغرافیایی و برای همه زمان ها رسم شد. سپس با تقسیم مستطیل یاد شده به سه زیرحوزه مستطیل شکل کوچک تر شرقی، مرکزی و غربی (شکل ۱)، مراحل فوق برای هریک از این زیرحوزه ها تکرار شد. در ادامه، حوزه سه بُعدی مکعب مستطیل شکل با همین ابعاد افقی، از نظر طول و عرض جغرافیایی، از تراز ۶۰۰ تا ۲۰۰ هکتوپاسکال در نظر گرفته شد (که از این پس "مکعب مستطیل مدیترانه" نامیده خواهد شد) و مجدداً محاسبات فوق روی مرزهای جانبی آن صورت پذیرفت.

۳ بحث

در این بخش، ابتدا نتایج محاسبه فعالیت موجی و شار آن برای مستطیل و مکعب مستطیل مدیترانه در فصل زمستان و هریک از سه ماه آن عرضه و تحلیل می شود. در ادامه، مشابه این بررسی برای سه مستطیل کوچک تر واقع بر غرب، مرکز و شرق مدیترانه صورت می گیرد. هدف از این کار، بررسی فعالیت موجی و شار آن در مراکز



شکل ۱. حوزه مستطیل شکل انتخابی روی منطقه مدیترانه در سطح ۳۰۰ هکتوپاسکال برای محاسبه فعالیت موجی و شار آن که در متن به نام مستطیل مدیترانه به کار رفته است. در بررسی جزئی تر، مستطیل مدیترانه به زیرحوزه‌های مستطیل شکل کوچک تر غربی، مرکزی و شرقی تقسیم شده که در شکل به ترتیب با حروف A, B, C نشان داده شده است.

جدول ۱. مقادیر شار افقی فعالیت موجی (برحسب m^2s^{-2}) برای فصل زمستان ۲۰۰۴-۲۰۰۵ در مرزهای مستطیل مدیترانه. همچنین، مقادیر شار برای هریک از ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه آن سال و بازه‌های زمانی مربوط به بررسی‌های موردی ۱ و ۲ نشان داده شده است. برای مفهوم بررسی موردی ۱ و ۲ به ترتیب به متن مراجعه شود.

	مرز غربی	مرز شرقی	مرز جنوبی	مرز شمالی	مجموع
DJF	-4.39E+18	6.46E+18	2.06E+17	-2.64E+17	2.02E+18
D	-1.72E+18	2.22E+18	5.03E+16	-7.92E+16	4.72E+17
J	-9.78E+17	1.97E+18	1.33E+17	-1.32E+17	9.97E+17
F	-1.69E+18	2.27E+18	2.35E+16	-5.28E+16	5.51E+17
مورد ۱	-3.79E+17	3.83E+17	3.91E+16	-7.01E+16	-2.70E+16
مورد ۲	-2.19E+17	8.84E+17	2.82E+16	-5.38E+16	6.40E+17

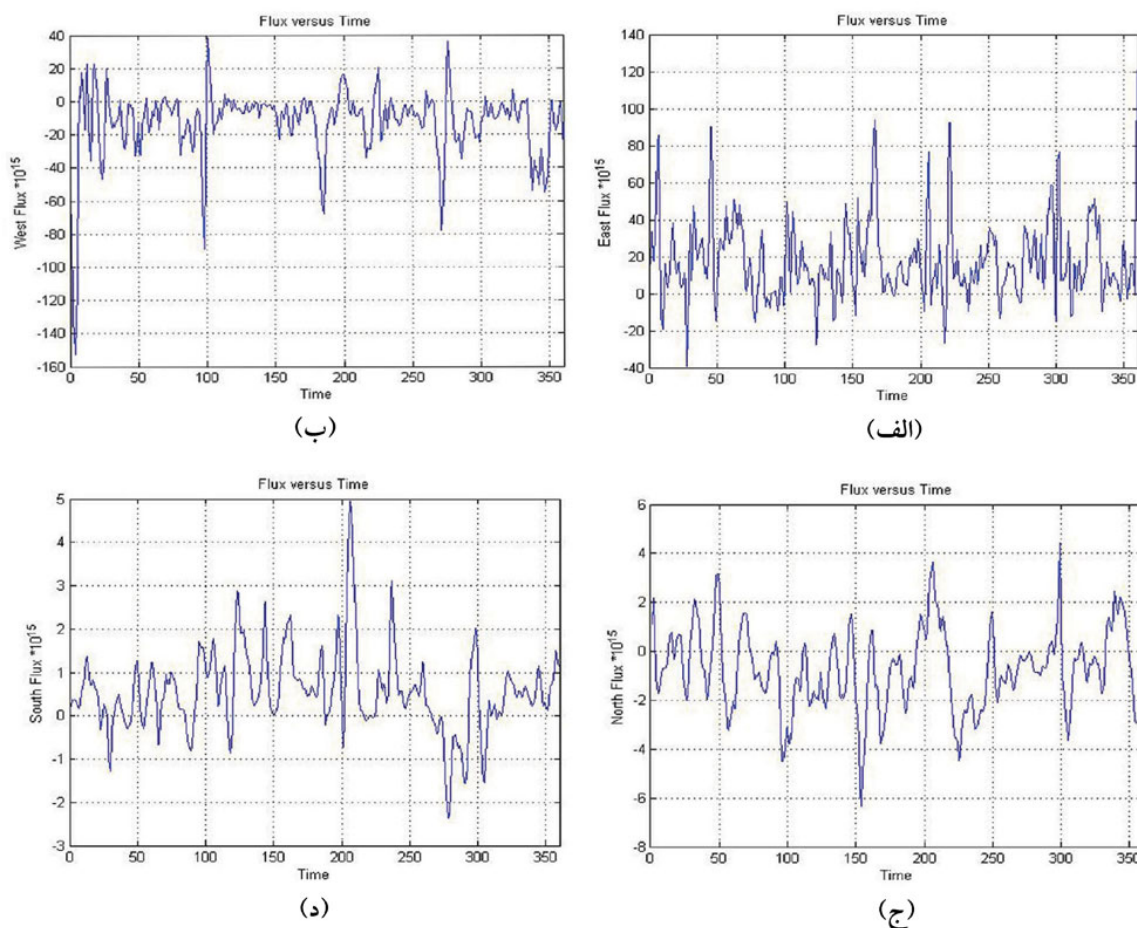
مقادیر شار خروجی است. این موضوع را می توان به انتقال مقادیر بسیار انرژی از اطلس به مدیترانه نسبت داد که با نتایج ردیابی پوش بسته موج‌های راسبی و محاسبات انرژی‌تیک صورت گرفته در بررسی اولیه زمستان ۲۰۰۴

در بررسی موردی ۱ نیز که مجموع مقادیر شار با یک مرتبه بزرگی کمتر و با علامت منفی دیده می‌شود، مدیترانه همانند یک چاه فعالیت موجی عمل می‌کند؛ که این نشان‌دهنده غلبه مقادیر شار فعالیت موجی ورودی بر

مقادیر شار در سراسر بازه سه ماهه زمستان همواره در بالای خط صفر بوده و دارای مقادیر مثبت است؛ که این به معنای خروج پیوسته شار از این مرز است (شکل ۲-الف). از سوی دیگر، در مرز غربی بیشتر مقادیر منفی است؛ که این بیانگر ورود شار فعالیت موجی به این مرز است (شکل ۲-ب). در مرزهای شمالی و جنوبی (شکل های ۲-ج و ۲-د)، به ترتیب و عمدتاً مقادیر منفی و مثبت شار دیده می شود؛ که این نشانگر آن است که شار فعالیت موجی از مرز شمالی وارد و از مرز جنوبی خارج می شود.

۲۰۰۵ که در انتهای مقدمه بدان اشاره شد، همخوانی دارد. به علاوه، بررسی ارتباط بین دو مسیر توفان اطلس و مدیترانه در فازهای گوناگون نوسان اطلس شمالی (نصر اصفهانی و همکاران، ۲۰۱۱) این نتیجه گیری را تایید می کند.

لازم به ذکر است که شکل های مربوط به همه موارد جدول های ۱ و ۲ تهیه شده است، ولی در اینجا برای رعایت اختصار، تنها شکل کلی مربوط به چهار مرز مستطیل مدیترانه عرضه می شود (شکل ۲). در مرز شرقی،



شکل ۲. تغییرات شار افقی فعالیت موجی برحسب زمان (۳۶۰ گام زمانی به فاصله ۶ ساعت) در سه ماهه زمستان ۲۰۰۴-۲۰۰۵ برای مرزهای مستطیل مدیترانه؛ (الف) شرقی، (ب) غربی، (ج) شمالی و (د) جنوبی. از آنجاکه هر روز دارای ۴ گام زمانی ۶ ساعته است، بازه های زمانی صفر تا ۱۲۰ مربوط به ماه دسامبر، ۱۲۱ تا ۲۴۰ مربوط به ماه ژانویه و ۲۴۱ تا ۳۶۰ مربوط به ماه فوریه است.

جدول ۲. مشابه جدول ۱ ولی برای مکعب مستطیل مدیترانه.

	مرز غربی	مرز شرقی	مرز جنوبی	مرز شمالی	مجموع
DJF	-2.24E+23	3.16E+23	1.34E+17	-1.48E+22	7.66E+22
D	-9.31E+22	1.07E+23	3.79E+16	-4.15E+21	1.03E+22
J	-5.19E+22	9.81E+22	7.83E+16	-7.55E+21	3.86E+22
F	-7.93E+22	1.10E+23	1.77E+16	-3.11E+21	2.77E+22
مورد ۱	-2.57E+22	2.02E+22	2.64E+16	-3.95E+21	-9.39E+21
مورد ۲	-1.22E+22	4.40E+22	1.65E+16	-3.16E+21	2.86E+22

می‌شود (شکل ۳-ج). در مرز جنوبی (شکل ۳-د) نیز عمدتاً مقادیر مثبت و در نتیجه خروج شار وجود دارد. مقادیر شار فعالیت موجی برای مرزهای سه مستطیل کوچک‌تر غربی، مرکزی و شرقی در سه ماهه زمستان در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به جدول، مقادیر شار در مرز شرقی مربوط به مستطیل غربی از بقیه مرزها بیشتر است که دلیل احتمالی آن می‌تواند مربوط به وجود مراکز چرخندزا در ناحیه غرب مدیترانه باشد که در بالادست این مرز قرار دارند. نکته قابل توجه دیگر در جدول ۳ مربوط به مقادیر واقع در ستون مجموع شارها است که نشان می‌دهد که به‌طور کلی مستطیل غربی به دلیل وجود مقادیر مثبت، همانند یک چشمه فعالیت موجی و مستطیل‌های مرکزی و شرقی همانند چاه‌های فعالیت موجی عمل می‌کنند.

۳-۳ شار فعالیت موجی در مرز شمالی مکعب مستطیل مدیترانه و مکعب مستطیل‌های کوچک‌تر به علت اهمیت ویژه شار فعالیت موجی در مرز شمالی منطقه مدیترانه برای بررسی ارتباط دو مسیر توفان اطلس و

۲-۳ فعالیت موجی و شار آن در مستطیل‌ها و مکعب مستطیل‌های کوچک‌تر واقع بر غرب، مرکز و شرق مدیترانه در این مرحله حوزه‌های مستطیل‌شکل و مکعب مستطیل‌شکل مدیترانه به سه زیرحوزه کوچک‌تر واقع بر غرب، مرکز و شرق مدیترانه تقسیم شده و محاسبات پیشین برای هر یک از آنها صورت گرفته است. نمودارهای تغییرات شار فعالیت موجی برحسب زمان برای همه مرزهای مستطیل‌ها و مکعب مستطیل‌های کوچک‌تر تهیه شده، ولی در اینجا برای نمونه فقط نمودارهای یک مکعب مستطیل آورده می‌شود. شکل ۳ تغییرات شار فعالیت موجی برحسب زمان در مرزهای مکعب مستطیل شرق مدیترانه را نشان می‌دهد. به دلیل وجود مقادیر مثبت و منفی در مرزهای شرقی و غربی در سراسر بازه سه ماهه زمستان (شکل‌های ۳-الف و ۳-ب)، به ترتیب خروج و ورود شار وجود دارد. در ماه دسامبر (بازه زمانی ۱ تا ۱۲۰)، در مرز شمالی مکعب مستطیل شرقی، مقادیر بزرگ‌تر شار فعالیت موجی نسبت به دیگر ماه‌ها دیده

مدیترانه، در این بخش از پژوهش شار فعالیت موجی در مرزهای شمالی مکعب مستطیل مدیترانه و مستطیل‌های کوچک‌تر بررسی دقیق می‌شود. بدین منظور، محاسبات پیشین برای مرزهای شمالی فوق در فصل زمستان، هریک از سه ماه زمستان و برای دو بازه زمانی مربوط به بررسی‌های موردی ۱ و ۲ عملی و نتایج شار فعالیت موجی تحلیل می‌شود. در جدول ۴ شار افقی فعالیت موجی در مرز شمالی مکعب مستطیل مدیترانه و مکعب مستطیل‌های کوچک‌تر برای هریک از سه ماه زمستان برحسب درصد از شار سه‌ماهه زمستان آورده شده است. با توجه به جدول، مشاهده می‌شود که در مکعب مستطیل مدیترانه،

عمده شار ورودی از مرز شمالی در ماه ژانویه رخ می‌دهد، در حالی که در مکعب مستطیل غربی، بیشتر شار ورودی در ماه ژانویه و پس از آن در فوریه است. در مکعب مستطیل مرکزی، شار فعالیت موجی در هر سه ماه زمستان وجود دارد، با این تفاوت که در ماه ژانویه بیشتر است. در مکعب مستطیل شرقی نیز عمده شار ورودی در ماه دسامبر به چشم می‌خورد.

مقادیر شار فعالیت موجی عبوری از مرز شمالی مکعب مستطیل مدیترانه و مکعب مستطیل‌های کوچک‌تر در فصل زمستان و هریک از ماه‌های آن و همچنین بازه زمانی دو بررسی موردی ۱ و ۲ در جدول ۵ آمده است.

جدول ۳. مقادیر شار افقی فعالیت موجی (برحسب m^2s^{-2}) برای فصل زمستان در مرزهای سه مستطیل کوچک‌تر واقع بر غرب، مرکز و شرق مدیترانه.

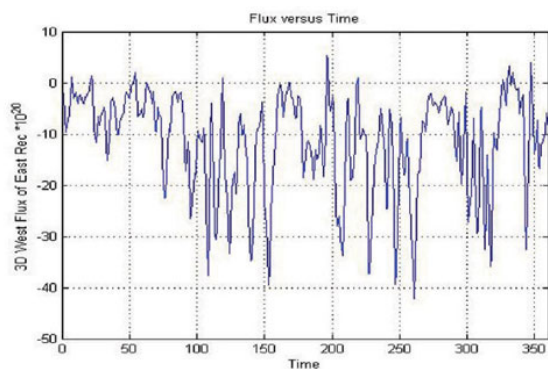
DJF	مرز غربی	مرز شرقی	مرز جنوبی	مرز شمالی	مجموع
مستطیل غربی	-4.39E+18	8.87E+18	1.55E+16	-1.19E+17	4.38E+18
مستطیل مرکزی	-8.87E+18	8.23E+18	1.08E+17	-6.24E+16	-5.97E+17
مستطیل شرقی	-8.23E+18	6.46E+18	8.33E+16	-8.24E+16	-1.76E+18

جدول ۴. شار افقی فعالیت موجی ماهانه در مرز شمالی مکعب مستطیل مدیترانه و مکعب مستطیل‌های کوچک‌تر واقع بر غرب، مرکز و شرق مدیترانه برحسب درصد از شار سه‌ماهه زمستان.

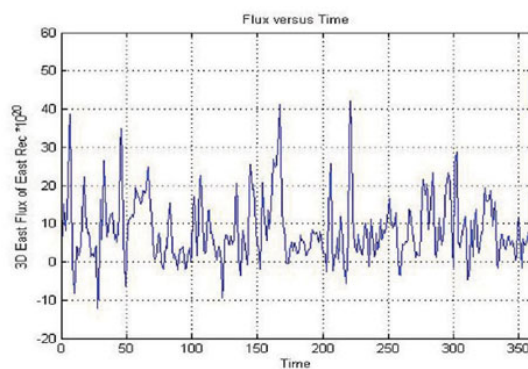
	دسامبر (%)	ژانویه (%)	فوریه (%)
مرز شمالی مکعب مستطیل بزرگ	28	51	21
مرز شمالی مکعب مستطیل غربی	2	77	21
مرز شمالی مکعب مستطیل مرکزی	39	45	16
مرز شمالی مکعب مستطیل شرقی	68	9	23

جدول ۵. شار افقی فعالیت موجی عبوری (برحسب m^2s^{-2}) از مرز شمالی مکعب مستطیل بزرگ و مکعب مستطیل های کوچکتر واقع بر مدیترانه برای بازه زمانی فصلی، ماهانه و بررسی های موردی ۱ و ۲.

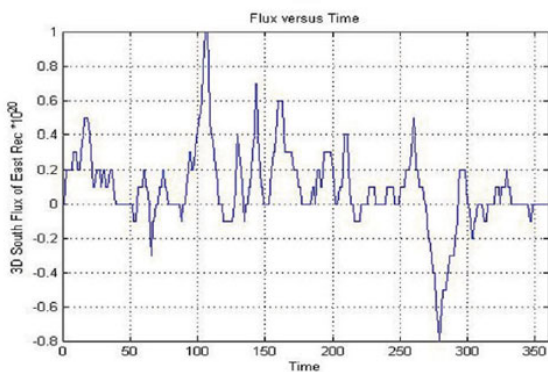
	DJF	دسامبر	ژانویه	فوریه	مورد ۱	مورد ۲
مرز شمالی مکعب مستطیل بزرگ	-1.48E+22	-4.15E+21	-7.55E+21	-3.11E+21	-3.95E+21	-4.16E+21
مرز شمالی مکعب مستطیل غربی	-7.09E+21	-0.36E+20	-5.64E+21	-1.59E+21	-2.02E+21	-3.08E+21
مرز شمالی مکعب مستطیل مرکزی	-3.33E+21	-1.29E+21	-1.50E+21	-5.41E+20	-1.44E+21	-5.79E+20
مرز شمالی مکعب مستطیل شرقی	-4.38E+21	-2.99E+21	-4.13E+20	-9.77E+20	-4.91E+20	5.06E+20



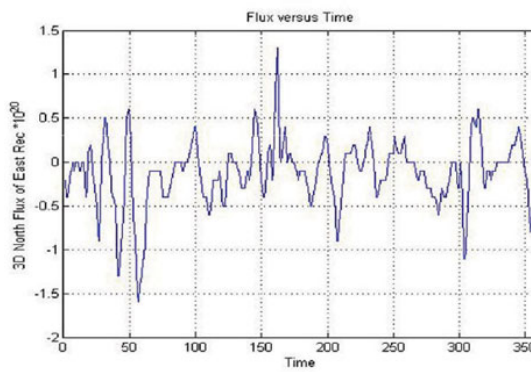
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

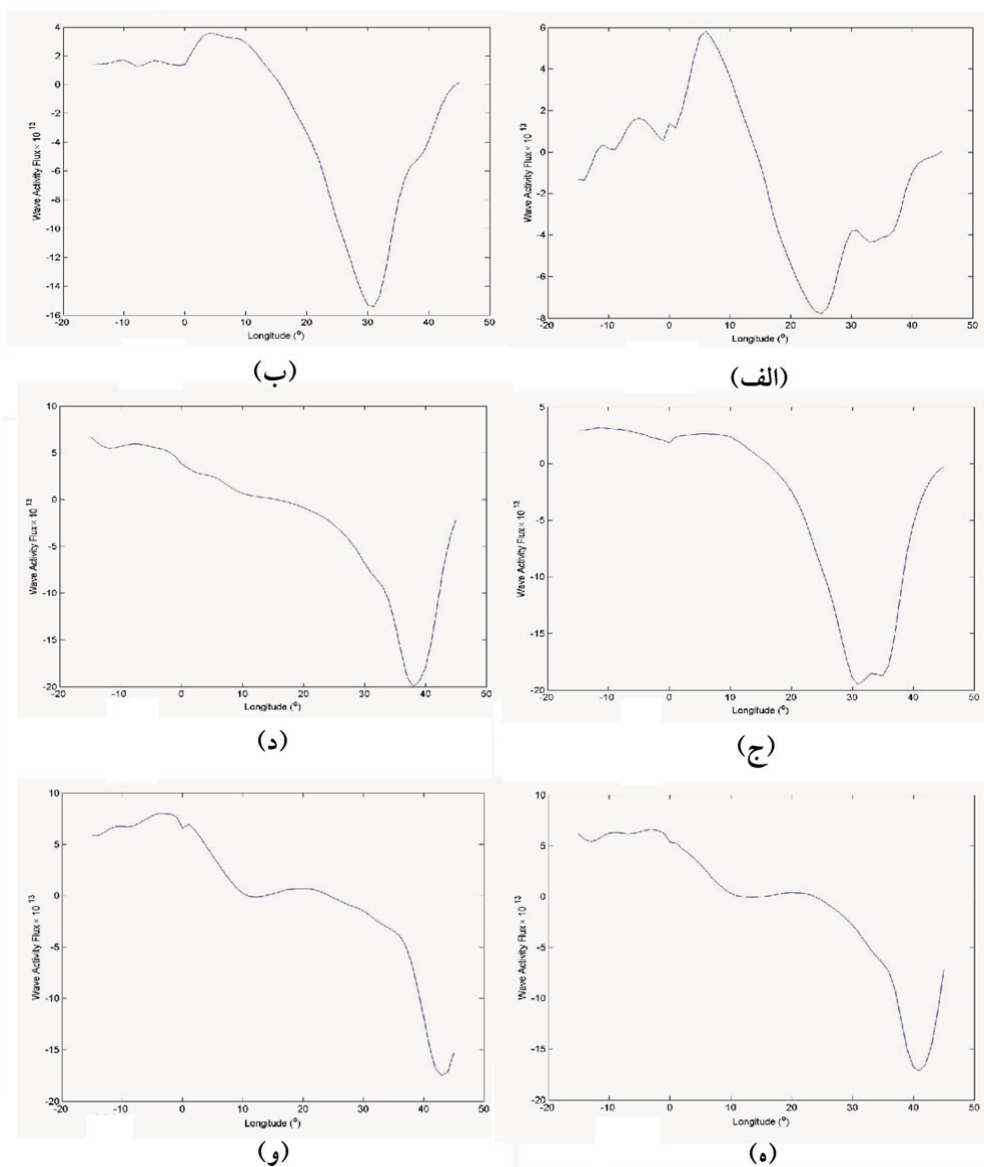
شکل ۳. تغییرات شار افقی فعالیت موجی برحسب زمان (۳۶۰ گام زمانی به فاصله ۶ ساعت) در فصل زمستان ۲۰۰۴-۲۰۰۵ برای مرزهای مکعب مستطیل کوچکتر واقع بر شرق مدیترانه؛ (الف) شرقی، (ب) غربی، (ج) شمالی و (د) جنوبی.

در ادامه کار در این مرحله، نمودار تغییرات شار فعالیت موجی عبوری از مرز شمالی مستطیل مدیترانه برحسب طول جغرافیایی برای ۳۶۰ گام زمانی (به فاصله ۶ ساعت) مربوط به بازه سه ماهه تهیه شد. برای نمونه، شکل ۴ تغییرات شار افقی فعالیت موجی در مرز شمالی مستطیل مدیترانه برای روزهای ۱۰-۱۲ ماه دسامبر را نشان می‌دهد. ناوه‌ها در این شکل، نشان‌دهنده مقادیر منفی شار فعالیت موجی و در نتیجه ورود شار از مرز شمالی هستند. با تمرکز روی ناوه‌ها و پیگیری همه شکل‌ها، مشاهده می‌شود شاری از طول جغرافیایی حدود ۲۵ درجه شرقی که ابتدای مستطیل کوچک‌تر شرقی است (شکل ۱)، به مرز شمالی وارد شده است و در زمان‌های بعد، ضمن افزایش به دیگر طول‌های جغرافیایی نیز منتقل می‌شود. شکل ۴ تنها بخشی از بازه زمانی ماه دسامبر است که با بررسی شکل دیگر زمان‌های ماه دسامبر، نتیجه عرضه شده در بالا تایید می‌شود و حاکی از آن است که در ماه دسامبر، عمده شار ورودی به منطقه مدیترانه از قسمت شرقی مرز شمالی و در ماه‌های ژانویه و فوریه (شکل‌ها نشان داده نشده است)، بخش اصلی شار ورودی از بخش غربی مرز شمالی است.

جدول ۶ نیز شار فعالیت موجی در مرز شمالی هریک از مکعب‌مستطیل‌های کوچک‌تر برحسب در صد نسبت به مجموع شار سه مرز شمالی (یا مرز شمالی مکعب‌مستطیل مدیترانه) برای هریک از بازه‌های زمانی فوق را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۶، در دوره سه‌ماهه و بازه زمانی بررسی‌های موردی ۱ و ۲، بخش عمده شار از مرز شمالی مکعب‌مستطیل غربی وارد شده است. در ماه دسامبر، بیشترین شار فعالیت موجی ورودی از مرز شمالی مکعب‌مستطیل شرقی و پس از آن مکعب‌مستطیل مرکزی بوده است و تنها بخش بسیار کوچکی از شار از مرز شمالی مکعب‌مستطیل غربی به منطقه مدیترانه وارد می‌شود. در ماه‌های ژانویه و فوریه، بخش اصلی شار ورودی از مرز شمالی مکعب‌مستطیل غربی است و این موضوع در ماه ژانویه مشخص‌تر است. به‌طور کلی از این جدول می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که در ماه دسامبر، بخش عمده شار فعالیت موجی ورودی از مرز شمالی به منطقه مدیترانه، مربوط به قسمت شرقی این مرز است، ولی در ژانویه و فوریه، بخش اصلی شار ورودی به منطقه مدیترانه مربوط به ناحیه غربی مرز شمالی است.

جدول ۶. شار افقی فعالیت موجی عبوری از مرز شمالی هریک از مکعب‌مستطیل‌های کوچک‌تر واقع بر مدیترانه برحسب درصد نسبت به مجموع شار سه مرز شمالی برای بازه زمانی فصلی، ماهانه و بررسی‌های موردی ۱ و ۲.

	DJF (%)	دسامبر (%)	ژانویه (%)	فوریه (%)	مورد ۱ (%)	مورد ۲ (%)
مرز شمالی مکعب‌مستطیل غربی	48	1	75	51	51	74
مرز شمالی مکعب‌مستطیل مرکزی	22	28	20	18	36	14
مرز شمالی مکعب‌مستطیل شرقی	30	71	5	31	13	12



شکل ۴. تغییرات شار افقی فعالیت موجی برحسب طول جغرافیایی در مرز شمالی مستطیل مدیترانه برای زمان‌های: (الف) ۳۸، (ب) ۴۰، (ج) ۴۱، (د) ۴۳، (ه) ۴۴، (و) ۴۵ که مربوط به روزهای ۱۲-۱۰ ماه دسامبر هستند.

۴ نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- در هر دو حوزه دو بُعدی و سه بُعدی (مستطیل و مکعب مستطیل مدیترانه) و همچنین بازه‌های زمانی فصل زمستان، ماهانه و مربوط به بررسی‌های موردی ۱ و ۲، در مرزهای غربی و شمالی منطقه مدیترانه، ورود شار فعالیت

موجی و در مرزهای شرقی و جنوبی، خروج شار فعالیت موجی مشاهده می‌شود.

۲- در همه موارد، به جز بررسی موردی ۱، به دلیل غلبه شار خروجی کل بر شار ورودی کل، منطقه مدیترانه همانند یک چشمه فعالیت موجی عمل می‌کند که این نتیجه را می‌توان به وجود مراکز متعدد چرخندزا در منطقه مدیترانه ارتباط داد.

- II: بررسی دینامیک بسته موج‌ها از دیدگاه انرژی،
مجله فیزیک زمین و فضا، (۲) ۳۱، ۴۵-۵۸.
- محب‌الحجه، ع.، احمدی گیوی، ف.، و یآوری، م.،
۱۳۸۴، مطالعه بسته موج‌های کژفشار در فوریه ۲۰۰۳.
- I: شناسایی بسته‌های موج به روش‌های مختلف و
بررسی ویژگی‌های آنها، مجله فیزیک زمین و فضا،
(۲) ۳۱، ۵۹-۷۸.
- Bengtsson, L., Hodges, K. I., and Roeckner, E.,
2006, Storm tracks and climate change: *J. Climate*, **19**, 3518-3543.
- Chang, E. K. M., 1993, Downstream development
of baroclinic waves as inferred from
regression analysis: *J. Atmos. Sci.*, **50**, 2038-
2053.
- 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.
- 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.
- Danielson, R. E., Gyakum, J. R., and Straub, D.
N., 2006, 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.
- Edmon, H. J., Hoskins, B. J., and McIntyre, M.
E., 1980, Eliassen-Palm sections for the
troposphere: *J. Atmos. Sci.*, **37**, 2600-2616.
- Esler, J. G., and Haynes, P. H., 1999, Baroclinic
wave breaking and the internal variability of
the tropospheric circulation: *J. Atmos. Sci.*,
56, 4014-4031.
- Guijarro, J. A., Jansa, A., and Campins, J., 2006,
Time variability of cyclonic geostrophic
circulation in the Mediterranean: *Advances in
Geosciences*, **7**, 45-49.
- Hoskins, B. J., and Hodges, K. I., 2002, New
perspectives on the Northern Hemisphere
winter storm tracks: *J. Atmos. Sci.*, **59**, 1041-
1061.
- Maheras, P., Flocas, H. A., Patrikas, I., and
Anagnostopoulou, C., 2001, A 40 year
objective climatology of surface cyclones in
the Mediterranean region: spatial and temporal
distribution: *Int. J. Climate*, **21**, 109-130.

۳- در بررسی موردی ۱، به دلیل غلبه شار ورودی کل
بر شار خروجی کل، منطقه مدیترانه همانند یک چاهه
فعالیت موجی یا گیرنده انرژی عمل می‌کند که این
وضعیت را می‌توان با انتقال انرژی از اطلس به مدیترانه در
این بازه زمانی ارتباط داد (نصر اصفهانی و همکاران،
۲۰۱۱).

۴- محاسبه شار فعالیت موجی برای مستطیل‌های
کوچک‌تر واقع در غرب، مرکز و شرق مدیترانه نشان
می‌دهد که مقدار شار ورودی از مرز شرقی مستطیل غربی
نسبت به مرزهای شرقی دو مستطیل دیگر بیشتر است. این
یافته می‌تواند بیانگر و دلیل احتمالی وجود مراکز اصلی
چرخندزا در بخش غربی مدیترانه باشد. در این مورد نیز
مستطیل غربی همانند یک چشمه فعالیت موجی و
مستطیل‌های مرکزی و شرقی همانند چاهه‌های فعالیت
موجی هستند.

۵- با تمرکز روی شار فعالیت موجی در مرز شمالی
منطقه مدیترانه در سه ماه زمستان، مشاهده می‌شود که
عمده شار ورودی از مرز شمالی در ماه دسامبر، از قسمت
شرقی آن رخ می‌دهد، درحالی‌که در ماه فوریه و به‌ویژه
ژانویه، عمده شار ورودی از مرز شمالی مربوط به قسمت
غربی آن است.

در اینجا می‌باید به این نکته اشاره کرد که نتایج فوق
تنها با استفاده از داده‌های زمستان سال‌های ۲۰۰۴-۲۰۰۵
به دست آمده است و برای کسب اطمینان بیشتر از درستی
نتایج و تعمیم آن به دیگر زمستان‌ها، باید از داده‌هایی با
بازه زمانی وسیع‌تر استفاده کرد؛ ضمن آنکه کاربست
روش‌های دیگر، غیر از شار فعالیت موجی، نیز می‌تواند
مفید باشد.

منابع

- احمدی گیوی، ف.، محب‌الحجه، ع.، و یآوری، م.،
۱۳۸۴، مطالعه بسته موج‌های کژفشار در فوریه ۲۰۰۳.

- Swanson, K., 2006, Storm Track Dynamics. In the global circulation of the atmosphere: T. Schneider and A. S. Sobel, Eds., Princeton University Press, Princeton, NJ, 78-103.
- Takaya, K., H. Nakamura, 2001, A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow: *J. Atmos. Sci.*, **58**, 608-627.
- Trigo, I. F., Davis, T. D., and Bigg, G. R., 1999, Objective climatology of cyclones in the Mediterranean region: *J Climate*, **12**, 1685-1696.
- Vanneste, J., and Shepherd, T. G., 1998, On the group velocity property for conservation laws: *J. Atmos. Sci.*, **55**, 1063-1068.
- Woollong, T., Hoskins, B. J., Blackburn, M., and Berrisford, P., 2008, A new Rossby wave-breaking interperation of the North Atlantic Oscillation: *J. Atmos. Sci.*, **65**, 609-626.
- Zimin, A. V., Szunyogh, I., Patil, D. J., Hunt, B. R., and Ott, E., 2003: Extracting envelope of Rossby wave packets: *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1011-1017.
- Nasr-Esfahani, M. Ahmadi-Givi, F. and Mohebalhojeh, A. R., 2011, An energetic view of the relation between the Mediterranean storm track and the North Atlantic Oscillation: *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **137**, 749-756.
- Orlanski, I., and Katzfey, J. J., 1991, The life cycle of a cyclone wave in the southern hemisphere: *J. Atmos. Sci.*, **48**, 1972-1998.
- Orlanski, I., and Sheldon, J. P., 1993, A case of downstream baroclinic development over western North America: *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2929-2950.
- Plumb, R. A., 1983, A new look at the energy cycle: *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1669-1688.
- Plumb, R. A., 1986, Three-dimensional propagation of transient quasi-geostrophic eddies and its relationship with the eddy forcing of the time-mean flow: *J. Atmos. Sci.*, **43**, 1657-1678.
- Riviere, G., and Orlanski, I, 2007, Characteristics of the Atlantic storm-track eddy activity and its relation with the North Atlantic Oscillation: *J. Atmos. Sci.*, **64**, 241-266.