

ارزیابی اثر بسته‌موج‌های کژفشار اقیانوس اطلس شمالی بر مسیر توفان دریای مدیترانه در زمستان ۲۰۱۱-۲۰۱۲

سامان مرتضی‌پور^۱، فرهنگ احمدی‌گیوی^۲، علیرضا محب‌الحجه^{۳*} و محمدعلی نصراصفهانی^۳

^۱دانش‌آموخته کارشناسی ارشد هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲دانشیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۳/۱۲/۱۳، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۹/۰۸)

چکیده

وضعیت جوی منطقه مدیترانه و ارتباط آن با نواحی مجاور از این نظر که مدیترانه در زمستان نیمکره شمالی دارای فعالیت جوی زیاد است، مورد پژوهش گسترده قرار داشته و به‌ویژه بر روی تأثیرپذیری این منطقه از مسیر توفان اطلس شمالی و برهمکنش بین این دو مسیر توفان تأکید شده است. در این پژوهش با توجه به دو الگوی معرفی شده در کار احمدی و همکاران در سال ۲۰۱۴ به شناسایی و درک بهتر سازوکار برهمکنش بسته‌موج‌ها در انتقال از اطلس شمالی به دریای مدیترانه در زمستان گسترده ۲۰۱۱-۲۰۱۲ با استفاده از روش‌های نمودار هافمولر، تعیین پوش‌موج، فعالیت موج و دیدگاه انرژی پرداخته شده است.

در این دوره، پنج بسته‌موج از طریق نمودارهای هافمولر شناسایی و با مطالعه به روش‌های فوق نتیجه گرفته شد که از پنج مورد، در دو مورد نمودارهای پوش‌موج و فعالیت موج حاکی از آن است که بسته‌موج هنگام رسیدن به اروپا در پادجریان‌سوی مسیر توفان مدیترانه به عرض‌های پایین‌تر و به سمت شاخه جنوبی اشاره شده در کار لی در سال ۲۰۰۰ و مسیر اول کار هاسکینز و هاجز در سال ۲۰۰۲، نفوذ کرده که منطبق با الگوی معرفی شده اول است. در دو مورد دیگر، بسته‌موج از قسمت شمالی اروپا عبور کرده و در امتداد مسیر دوم کار هاسکینز و هاجز در سال ۲۰۰۲، جریان‌سوتر از دو مورد قبل به سمت شاخه جنوبی و مسیر اول منتشر می‌شود که منطبق با الگوی دوم معرفی شده است. در یک مورد دیگر، عملکرد بسته‌موج حالتی مخلوط از دو الگوی فوق دارد. به‌عبارتی، برای ۵ موردی که در زمستان گسترده ۲۰۱۱-۲۰۱۲ تعیین شده است، نتایج نشان می‌دهد که سازوکار ۴ مورد مطابق دسته‌بندی معرفی شده است و می‌تواند از نظر آماری در تبیین این الگوهای رفتاری نتیجه قابل توجهی باشد.

واژه‌های کلیدی: فعالیت موج، مسیر توفان، بسته‌موج، کژفشار، فشارورد، پوش موج

۱ مقدمه

منطقه مدیترانه در زمستان نیمکره شمالی از نظر تحولات جوی فعالیت زیادی داشته و چرخندهای زیادی در آن شکل می‌گیرد. از این نظر این منطقه و ارتباط آن با ناحیه‌های مجاور مورد توجه و بررسی‌های متعددی قرار داشته است. از آنجا که وضعیت اقلیمی کشور ما، به‌ویژه در پاییز و زمستان، بسیار متأثر از سامانه‌های ایجاد شده و عبوری در حوزه دریای مدیترانه و هم‌چنین نحوه فعالیت آنها است، نتایج این نوع بررسی‌ها می‌تواند برای مراکز علمی و اجرایی مانند سازمان هواشناسی کشور مفید باشد. طبق پژوهش‌های انجام شده، منطقه مدیترانه بسیار تحت تأثیر مسیر توفان اطلس شمالی است و به این دلیل مطالعه برهمکنش بین آنها و شناسایی سازوکارهای درگیر در برهمکنش اهمیت زیادی دارد. در این زمینه می‌توان از دیدگاه‌های متفاوت از جمله سازوکار آشفستگی‌ها و بسته‌موج‌ها و تحول و انتشار آنها، دیدگاه انرژی، فعالیت موج، فرایند تکوین جریان‌سو، مسیرهای توفان و به‌ویژه تحول بسته‌موج‌های کژفشار برای مطالعه استفاده کرد که نتایج نظری ارائه شده مربوط به آنها دستخوش تحول گسترده‌ای بوده است.

مطالعه تکوین بسته‌موج‌های کژفشار معمولاً به صورت تکوین مد بهنجار این بسته‌موج‌ها بررسی می‌شود. چارنی (۱۹۴۷) و ایدی (۱۹۴۹) برای تفسیر رشد آشفستگی‌ها نظریه ناپایداری کژفشار را به صورت رشد خطی مد بهنجار امواج کژفشار و کسب انرژی از جریان میانگین ارائه کردند. در نظریه رشد خطی مد بهنجار، انتشار بسته‌موج‌ها هم به جریان‌سو و هم به پادجریان‌سو صورت می‌پذیرد. در ادامه، مشاهدات مورد مطالعه و به‌کارگیری مدل‌های مختلف در تحول بسته‌موج‌ها و هم‌چنین چالش‌های ریاضی فراوان از جمله بررسی رشد غیرخطی مد بهنجار امواج کژفشار (سیمونز و هاسکینز، ۱۹۷۹؛ اورلانسکی و چنگ، ۱۹۹۳؛ چنگ، ۱۹۹۳؛ لی و هلد،

۱۹۹۳؛ سوآنسون و پیرهامبرت، ۱۹۹۴؛ چنگ و یو، ۱۹۹۹؛ چنگ، ۲۰۰۰؛ حکیم، ۲۰۰۳) انحرافات واضحی را نسبت به نظریه خطی نشان دادند. سیمونز و هاسکینز (۱۹۷۹) برخلاف نظریه قدیمی خطی، مبنی بر اینکه چرخندها از یک ناپایداری کوچک شروع شده و در اثر ناپایداری کژفشار رشد می‌کنند، رشد غیرخطی مد بهنجار امواج کژفشار را مطالعه نموده و نشان دادند که انتشار جریان‌سو آشفستگی‌ها سریع‌تر از سرعت میانگین جریان است و هم‌چنین رشد جریان‌سو به‌وضوح قابل مشاهده است، در حالی که رشد پادجریان‌سو به‌ندرت دیده می‌شود.

به طور کلی این بررسی‌ها که شامل انحرافات اساسی از نظریه خطی می‌باشند، نشان دادند که برخلاف نظریه خطی مبنی بر رشد کژفشار و کسب انرژی از جریان میانگین به‌عنوان سازوکار اساسی تکوین بسته‌موج‌های کژفشار، منبع اصلی انرژی برای تکوین بسته‌موج‌ها و تحول چرخندها، انتشار جریان‌سو مربوط به آشفستگی‌های واقع در پادجریان‌سو است و شواهد بسیار اندکی از تکوین پادجریان‌سو وجود دارد. البته باید توجه داشت که اگرچه رشد اولیه عمدتاً با فرایند تکوین جریان‌سو انجام می‌شود، اما منبع انرژی برای رشد موج‌ها هم‌چنان ناشی از تبدیل کژفشار انرژی پتانسیل حالت پایه است که در موج بالغ پادجریان‌سو رخ می‌دهد. از این طریق، موج پادجریان‌سو موج جدید در جریان‌سو را با شار انرژی تغذیه می‌کند و خودش تضعیف می‌شود.

از موارد دیگری که در این زمینه مورد توجه بوده است، شناسایی و تخمین مسیرهای جهانی دارای فراوانی فعالیت سامانه‌های جوی و به عبارتی مسیرهای فعالیت امواج و مسیرهای توفان می‌باشد. با استفاده از شاخص همدوسی موج، برآورد مسیر بیشینه همدوسی که در سازوکار تکوین جریان‌سو مشارکت دارد، به‌عنوان موجبر امکان‌پذیر است.

فشارورده دارد. در دوره بلوغ و میرایی ناو‌های شکل‌گرفته از تکوین جریان‌سو، تبدیل کژفشار هم‌چنان عامل اصلی تغییر انرژی است. یآوری (۱۳۸۳) به بررسی دینامیکی بسته‌موج‌های کژفشار در فوریه ۲۰۰۳ در حوزه اطلس و مدیترانه پرداخته و اهمیت نقش فرایند تکوین جریان‌سو را در رشد آشفستگی‌ها نتیجه گرفته است. مبانی نظری مربوط به بسته‌موج و ناپایداری کژفشار در تحقیق او آورده شده است.

نصراصفهانی و همکاران (۱۳۸۸) ارتباط بین نوسان اطلس شمالی (North Atlantic Oscillation) NAO؛ و تحولات انرژی و عوامل واداشتی آن در نواحی مدیترانه و خاورمیانه را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که انرژی از اطلس و اروپا به مدیترانه منتقل می‌شود و مقدار آن در فاز مثبت NAO کمتر است. مرکز مدیترانه دارای واگرایی انرژی است که در فاز مثبت NAO بزرگ‌تر بوده و به صورت منبعی قوی، انرژی را به سمت جنوب‌شرق با همگرایی شار آزمینگرد منتقل می‌کند.

احمدی گیوی و همکاران (۲۰۱۴) برهمکنش بین اطلس شمالی و مدیترانه را در زمستان ۲۰۰۴-۲۰۰۵ با استفاده از روش‌های پوش موج، تحلیل انرژی و فعالیت موج و با توجه به سازوکار تکوین جریان‌سو بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که وقتی بسته‌موج‌های پادجریان‌سو در اطلس شمالی به اندازه کافی قوی باشند، بسته‌موج‌های روی مدیترانه با فرایند تکوین جریان‌سو به رشد ادامه می‌دهند. هم‌چنین ضمن معرفی دو مورد برهمکنش بین مسیرهای توفان اطلس شمالی و مدیترانه به برآورد خصوصیات رفتاری این دو مورد و ارائه الگوی رفتاری در این دو نوع برهمکنش پرداختند. مطالعه دوره‌های زمانی متفاوت در این موضوع و تحلیل و مقایسه نتایج به‌دست آمده می‌تواند در تبیین این الگوهای رفتاری مؤثر باشد و با بررسی موردهای مختلف در تطبیق با این الگوها، از نظر آماری درستی این نظریه را ارزیابی کرد.

لی (۲۰۰۰) اثر دینامیک فشارورده را روی مسیرهای توفان عرض‌های میانی برای فصل زمستان نیمکره شمالی مورد مطالعه قرار داده و مدل فشارورده را برای تعیین ساختار کلی مسیرهای توفان به کار برد. او هم‌چنین در بخش جریان‌سوی مسیر توفان اطلس شمالی دو شاخه مسیر توفان در نظر گرفت که شاخه شمالی در حدود عرض ۶۰ درجه شمالی و شاخه جنوبی در حدود ۳۰ درجه شمالی قرار داشته و تا پادجریان‌سوی مسیر توفان آرام شمالی امتداد دارند. در مطالعه حاضر با شاخه شمالی و شاخه جنوبی از کار فوق یاد می‌شود.

هاسکینز و هاجز (۲۰۰۲) مسیرهای توفان در زمستان نیمکره شمالی را مورد مطالعه قرار دادند. مسیرهای توفان اقیانوس آرام و اقیانوس اطلس تقریباً در تمام نمونه‌های بررسی شده آنها وجود داشته است. هم‌چنین آنها برای اقیانوس اطلس شمالی دو مسیر اصلی فعالیت توفان معرفی کردند که مسیر اول فعالیت توفان در نواحی جنب‌حاره‌ای اطلس شمالی شکل گرفته و با گسترش شرق‌سو از مدیترانه و خاورمیانه عبور می‌کند. منشأ مسیر دوم، نواحی مرکزی و شمال اطلس شمالی است که به سمت جنوب‌شرق امتداد یافته و در قسمت‌های مرکزی و شرقی مدیترانه با مسیر اول ادغام می‌شود. در این پژوهش از نام‌های مسیر اول فعالیت توفان (مسیر اول) و مسیر دوم فعالیت توفان (مسیر دوم) برای آنها استفاده می‌شود.

احمدی گیوی و همکاران (۱۳۸۴) و محب‌الحجه و همکاران (۱۳۸۴) بسته‌موج‌های کژفشار مربوط به نیمکره شمالی در فوریه ۲۰۰۳ را بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که تبدیل کژفشار عامل رشد آشفستگی‌های اولیه است و سپس این پریشیدگی فرایند تکوین جریان‌سو را شروع کرده و انرژی را به جریان‌سو منتشر می‌کند. سهم عمده در تکوین جریان‌سو با همگرایی شار ژئوپتانسیلی آزمینگرد است و همگرایی انرژی در زمان رشد اولیه ناو‌ها در بسته‌موج، نقش مهمی در مقایسه با تبدیل‌های کژفشار و

برای مطالعه رفتار بسته‌موج‌ها و برهمکنش آنها، ابتدا باید بسته‌موج‌ها در دوره زمانی اشاره شده شناسایی شوند. برای شناسایی و تعیین بسته‌موج‌ها از نمودارهای زمانی هافمولر و برای تعقیب زمانی آنها از نمودارهای پوش‌موج استفاده شده است. در نمودارهای هافمولر، کمیت‌های پریشیدگی مؤلفه نصف‌النهاری سرعت v' و پریشیدگی ارتفاع ژئوپتانسیلی Z' و هم‌چنین مربع مقادیرشان در ترازهای ۳۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال به کار رفته است. مقادیر و کمیت‌ها در نمودارهای هافمولر به صورت میانگین بین ۳۰ تا ۶۰ درجه شمالی تعیین شده‌اند.

برای نمودارهای پوش‌موج از روشی بر مبنای تبدیل هیلبرت برای بهبود شیوه‌ای که زمین و همکاران (۲۰۰۳) ارائه داده‌اند، استفاده شده است. به روش زمین و همکاران (۲۰۰۳)، پالایه‌ای در راستای نصف‌النهاری افزوده شده که تمام طول موج‌های بزرگ‌تر از طول موج مربوط به عدم‌موج قطع (cut-off) را که در اینجا ۱۲ است، حذف می‌کند. کمیت‌های مورد استفاده عبارتند از ارتفاع ژئوپتانسیلی Z در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و مؤلفه نصف‌النهاری سرعت v در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال. در ادامه، برای شناسایی و تعیین بسته‌موج‌ها نتایج به دست آمده از نمودارهای هافمولر و پوش‌موج با هم مقایسه و مورد‌های زمانی مناسب برای مطالعه برهمکنش‌ها و الگوهای رفتاری بسته‌موج‌ها در این دوره‌های زمانی مشخص شده‌اند.

به کارگیری معادله انرژی همراه با اشکالاتی است که در دقت نتایج به دست آمده تأثیر می‌گذارد؛ برای نمونه جملات شار و تبدیل در معادله انرژی یکتا نیستند (پلام، ۱۹۸۳). برای دست‌یابی به نتایج دقیق‌تر مربوط به سازوکار انرژی و انتشار امواج راسبی می‌توان از کمیت فعالیت موج و شار آن استفاده کرد. رابطه فعالیت موج به صورت زیر است:

هم‌چنین با داشتن موارد مطالعاتی بیشتر می‌توان شاخص‌های مناسبی برای کمیت‌های مختلف از جمله پوش‌موج، انرژی، فعالیت موج و ترکیبی از آنها به دست آورد تا از طریق آنها برای دوره‌های بلندمدت، رفتار آماری بسته‌موج‌ها تعیین شود. در این تحقیق، با توجه به مطلب فوق و با در نظر گرفتن خصوصیات دو مورد ذکر شده در کار احمدی گیوی و همکاران (۲۰۱۴)، به بررسی برهمکنش بین بسته‌موج‌های اطلس شمالی و دریای مدیترانه و انتشار آنها به سمت شمال آفریقا و جنوب شرق آسیا در زمستان ۲۰۱۲-۲۰۱۱ پرداخته می‌شود. در این دوره، پنج مورد بسته‌موج با بررسی نمودارهای هافمولر شناسایی شد. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که از پنج مورد، دو مورد در دسته اول یعنی منطبق با مورد اول الگوی معرفی شده، دو مورد در دسته دوم و منطبق با مورد دوم الگوی معرفی شده و یک مورد حالتی مخلوط از دو مورد الگو قرار دارند. در این دو مطالعه، به‌طور میانگین برای هر ماه یک مورد از انتشار شناسایی شده است که می‌تواند نتیجه مهمی در ادامه این دو مطالعه بوده و بیانگر اطلاع اقلیمی ارزشمندی باشد.

۲ داده‌ها و روش کار

در این پژوهش از داده‌های سامانه پیش‌بینی جهانی GFS (Global Forecast System) برای زمستان گسترده ۲۰۱۲-۲۰۱۱ (اکتبر، نوامبر و دسامبر ۲۰۱۱ و ژانویه و فوریه ۲۰۱۲) استفاده شده است. شبکه داده‌ها دارای تفکیک افقی ۱ درجه در هر دو راستای طول و عرض جغرافیایی و ۱۷ تراز فشاری در راستای قائم است که در بازه‌های زمانی ۶ ساعته در دسترس هستند. در محاسبه مقادیر میانگین و پریشیدگی کمیت‌ها، مقدار میانگین به‌طور جداگانه برای دو ماه اکتبر و نوامبر ۲۰۱۱ و سه ماه دسامبر ۲۰۱۱ و ژانویه و فوریه ۲۰۱۲ تعیین و در ادامه استفاده شده است.

زمین، f پارامتر کوریولیس، λ طول جغرافیایی، φ عرض جغرافیایی، u مؤلفه مداری سرعت، v مؤلفه نصف‌النهاری سرعت، θ دمای پتانسیلی، q تاوایی پتانسیلی شبه‌زمینگرد، ψ تابع جریان، U^0 مؤلفه مداری سرعت حالت پایه، Θ^0 دمای پتانسیلی حالت پایه و Q^0 تاوایی پتانسیلی شبه‌زمینگرد حالت پایه هستند.

فعالیت موج و مؤلفه‌های شار و نیز واگرایی شار افقی آن $(\nabla \cdot \mathbf{F}_h)$ محاسبه و برای نمودارهای مربوطه، میانگین قائم‌کمیتهای فعالیت موج و واگرایی شار افقی آن بین ترازهای ۱۰۰ و ۱۰۰۰ هکتوپاسکال محاسبه شده‌اند. برای مقایسه بهتر مورد‌های بررسی شده و نحوه عملکرد فعالیت موج می‌توان برای ناحیه مورد نظر، شار افقی فعالیت موج محاسبه شده را با رابطه زیر به‌دست آورد:

$$F_{\text{tot}} = \int_{\partial\Omega} \mathbf{F}_h \cdot \mathbf{n} \, dl, \quad (7)$$

که \mathbf{n} بردار یکانی نرمال برون‌سو، $\partial\Omega$ مرز ناحیه افقی Ω و F_{tot} معرف شار کل افقی خروجی از ناحیه Ω است. برای محاسبه شار افقی فعالیت موج خروجی در ناحیه مدیترانه، ناحیه Ω را با مرزهای ۳۰ تا ۵۰ درجه شمالی و ۱۵ درجه غربی تا ۴۵ درجه شرقی تعیین کرده و به‌منظور برآورد دقیق‌تر، این ناحیه بزرگ به سه زیرناحیه مساوی به نام‌های زیرناحیه غربی، زیرناحیه مرکزی و زیرناحیه شرقی در امتداد طول جغرافیایی تقسیم می‌شود. شار خروجی به صورت میانگین بین ترازهای ۲۰۰ و ۶۰۰ هکتوپاسکال محاسبه شده و مقدار آن برای دوره زمانی هر مورد، ماه‌های مورد مطالعه و هم‌چنین دو ماه اکتبر و نوامبر ۲۰۱۱ و سه ماه دسامبر ۲۰۱۱ و ژانویه و فوریه ۲۰۱۲ برآورد شده است. مقدار مثبت نشان‌دهنده گسیل شار و مقدار منفی نشان‌دهنده دریافت شار توسط ناحیه است.

در این تحقیق برای بررسی برهمکنش بین بسته-موج‌های اطلس شمالی و دریای مدیترانه و نحوه انتشار

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

که A فعالیت موج، \mathbf{F} شار آن و S اثرات ناپایستار مربوط به تبدیلات انرژی، اصطکاک و فرایندهای بادررو است. می‌توان شار \mathbf{F} را به‌صورتی به‌کار برد که دارای خاصیت سرعت گروه به شکل زیر باشد:

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

که \mathbf{c}_g بردار سرعت گروه است. در ادامه، جهت اختصار برای فعالیت موج یا فعالیت پیچکی از EA و برای مؤلفه افقی شار فعالیت موج از \mathbf{F}_h استفاده می‌شود. بررسی فعالیت موج در این تحقیق با مدل شبه‌زمینگرد بر مبنای فرمول‌بندی اسلر و هینز (۱۹۹۹) به‌صورت زیر انجام می‌گیرد:

$$A = a \frac{\cos \varphi \left((q^\circ)^2 - \xi^\circ q_\lambda^\circ \right)}{4Q_\varphi^0}, \quad (3)$$

$$\mathbf{F} = \frac{\cos \varphi}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} (\psi^\circ q^\circ - v^\circ \xi^\circ) + (v^\circ)^2 - \frac{\psi^\circ v_\lambda^\circ}{a \cos \varphi} \\ -u^\circ v^\circ + \frac{\psi^\circ u_\lambda^\circ}{a \cos \varphi} \\ \frac{f}{\Theta_p^\circ} \left(v^\circ \theta^\circ - \frac{\psi^\circ \theta_\lambda^\circ}{a \cos \varphi} \right) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U^p A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$q^\circ = \frac{1}{a^2 \cos^2 \varphi} \frac{\partial^2 \psi^\circ}{\partial \lambda^2} + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\cos \varphi \frac{\partial \psi^\circ}{\partial \varphi} \right) + f \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{\theta^\circ}{\Theta_p^\circ} \right), \quad (5)$$

$$\xi_\lambda^\circ = a \cos \varphi \left(q^\circ - [q^\circ] \right), \quad (6)$$

در معادلات (۳) تا (۶) بالانویس‌های \mathbf{e} و 0 به‌ترتیب معرف پریشیدگی و حالت پایه و پایین‌نویس‌های λ φ به‌ترتیب بیانگر مشتقات مداری و نصف‌النهاری‌اند. از $[]$ برای نمایش میانگین مداری استفاده شده است. a شعاع

همگرایی و واگرایی شار فعالیت موج به غرب مدیترانه و عرض‌های پایین‌تر نفوذ نکرده و این مراکز در مسیر اول توفان مشاهده نمی‌شوند.

شار افقی فعالیت موج خروجی از ناحیه مدیترانه و زیرناحیه‌های آن نشان می‌دهد که در هر دو الگو، مقادیر شار انحراف واضحی از شارهای میانگین ماه مربوط به خود دارند. به علاوه، نحوه عملکرد ناحیه مرکزی دارای اهمیت ویژه است و به نظر می‌رسد ناحیه مرکزی نقش غالب در تفاوت نحوه عملکرد دو الگو دارد.

با توجه به مطالب اشاره شده، در این تحقیق دسته اول (دوم) شامل مواردی است که مطابق الگوی اول (دوم) هستند و دسته سوم شامل مواردی است که مطابق دو الگو نیستند.

۳ بحث

در بررسی زمستان گسترده ۲۰۱۲-۲۰۱۱، یعنی سه ماه اکتبر، نوامبر و دسامبر ۲۰۱۱ و دو ماه ژانویه و فوریه ۲۰۱۲، پنج مورد انتشار بسته‌موج که برای بررسی برهمکنش بین مسیرهای توفان اطلس شمالی و مدیترانه و فرایند تکوین جریان سو مناسب بود، انتخاب و مطابق مطالب اشاره شده دسته‌بندی گردید. حاصل این بررسی در جدول ۱ آمده است. در اینجا به ارائه نتایج برای یک مورد از الگوی اول (از ۱ تا ۱۶ اکتبر ۲۰۱۱، مورد اول) و یک مورد از الگوی دوم (از ۱ تا ۱۰ ژانویه ۲۰۱۲، مورد دوم) می‌پردازیم.

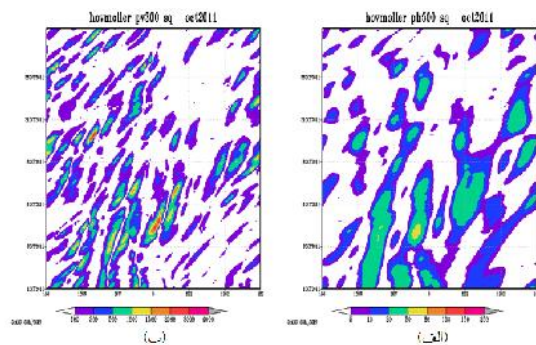
۳-۱ نمودارهای هافمولر

نمودارهای هافمولر برای کمیت‌های پریشیدگی سرعت نصف‌النهاری 17° و پریشیدگی ارتفاع ژئوپتانسیلی Z' در ترازهای ۳۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال تهیه شده است. کمیت مورد نظر و مربع مقادیر آن، به صورت میانگین بین عرض‌های ۳۰ تا ۶۰ درجه شمالی محاسبه شده است. در

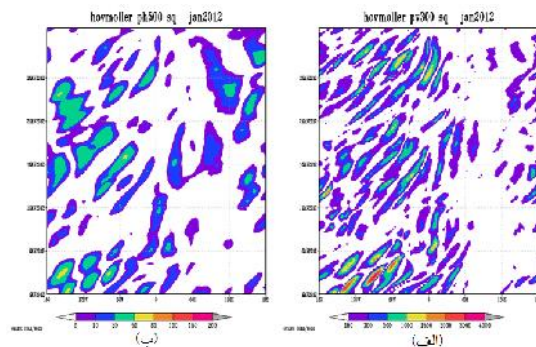
امواج از اطلس شمالی به مدیترانه در زمستان ۲۰۱۲-۲۰۱۱، موردهایی را که در این دوره زمانی تعیین شده، مطابق دو الگوی معرفی شده توسط احمدی گیوی و همکاران (۲۰۱۴) دسته‌بندی می‌کنیم. در مورد اول، بسته-موج از اطلس شمالی با حرکت به جنوب شرق به مدیترانه انتشار می‌یابد که در پژوهش حاضر آن را الگوی اول می‌نامیم. در مورد دوم، بسته‌موج از عرض‌های میانی مسیر توفان اطلس شمالی با حرکت به شرق انتشار مداری دارد که آن را الگوی دوم می‌نامیم.

در نمودارهای هافمولر، بسته‌موج‌های متوالی برای الگوی اول در گذر از اطلس شمالی به سمت ناحیه اروپا و مدیترانه قابل ردیابی است؛ ولی در الگوی دوم، بسته-موج‌ها در ناحیه اروپا مشاهده نمی‌شوند. در نمودارهای پوش‌موج، برای الگوی اول، بسته‌موج هنگام رسیدن به اروپا به سمت جنوب شرق و ناحیه مدیترانه منتشر شده و در پادجریان سوی مسیر توفان مدیترانه قرار می‌گیرد و با عبور از مدیترانه، قبل از میرایی به ناحیه خاورمیانه می‌رسد. در الگوی دوم، بسته‌موج از قسمت شمالی اروپا عبور کرده و جریان سوتر از الگوی اول، به جنوب منتشر شده و به قسمت‌های شرقی مدیترانه می‌رسد و بدون استقرار از مدیترانه عبور می‌کند. در واقع، مستقرشدن در مدیترانه و عبور از آن، به ترتیب خصوصیات الگوی اول و الگوی دوم است. برای فعالیت موج در الگوی اول، بین مسیرهای اول و دوم توفان (هاسکینز و هاجز، ۲۰۰۲) برهمکنش مثبت وجود دارد. فعالیت موج در ناحیه غرب مدیترانه از مسیر دوم به عرض‌های پایین‌تر و به سمت مسیر اول نفوذ کرده و مراکز واگرایی و همگرایی نسبی کوچک شار فعالیت موج را در مسیر اول و در ناحیه غرب مدیترانه و شمال غرب آفریقا به وجود می‌آورد. در الگوی دوم، فعالیت موج در شمال اروپا و در مسیر دوم توفان حرکت شرق سو داشته و در جریان سوتر از الگوی اول به سمت شرق مدیترانه و خاورمیانه نفوذ می‌کند. در واقع، مراکز

پوش حاصل از ادغام در حدود ۳۰ درجه غربی قرار می‌گیرد و در روز نهم به حرکت شرق‌سوی خود ادامه می‌دهد. در روز بعد پوش موج مقداری تضعیف شده و در غرب مدیترانه قرار دارد. در روز یازدهم اکتبر، پوش ضعیف و گونه‌ای از دونیم‌شده آن مشاهده می‌شود؛ قسمتی که روی غرب اروپا واقع است، روند تضعیف شدیدی داشته و قسمتی که در غرب اطلس در حدود ۶۰ درجه غربی به چشم می‌خورد، نسبت به قبل تقویت شده است. در این وضعیت، متأثر از وجود پوش جدید در پادجریان‌سو روی اقیانوس آرام، مکان پیشینه پوش از غرب مدیترانه به ۶۰ درجه غربی منتقل شده است. تأثیر پوش موج در پادجریان‌سو در روز دوازدهم اکتبر ادامه داشته و پوش اولیه ضمن تقویت و حرکت شرق‌سو به



شکل ۱. نمودارهای هافمولر برای ماه اکتبر ۲۰۱۱ (مورد اول) با میانگین‌گیری بین عرض‌های ۳۰ تا ۶۰ درجه شمالی؛ (الف) مربع مقدار پریشیدگی ارتفاع ژئوپتانسیلی Z' در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (بر حسب 10^3 gpm^2) و (ب) مربع مقدار پریشیدگی سرعت نصف‌النهاری v' در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال (بر حسب m^2s^{-2}).



شکل ۲. مانند شکل ۱ ولی برای ماه ژانویه ۲۰۱۲ (مورد دوم).

شکل‌های ۱ و ۲، مربع مقدار پریشیدگی سرعت نصف‌النهاری v' در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال و مربع مقدار پریشیدگی ارتفاع ژئوپتانسیلی Z' در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال آمده است.

در نمودار هافمولر مربوط به مورد اول (شکل ۱)، بسته‌موج‌های متوالی از حدود ۹۰ درجه غربی در روز ششم اکتبر تا حدود ۹۰ درجه شرقی در روز شانزدهم اکتبر دیده می‌شوند. این بسته‌موج‌ها در گذر از اطلس شمالی به سمت ناحیه اروپا و مدیترانه قابل ردیابی بوده و امتداد آنها در طول‌های جغرافیایی را می‌توان مشاهده کرد. در نمودار هافمولر مربوط به مورد دوم (شکل ۲)، بسته‌موج‌های متوالی از حدود ۱۶۰ درجه غربی در روز یکم ژانویه تا حدود ۶۰ درجه شرقی در روز دهم ژانویه مشاهده می‌شوند. در مورد دوم، بسته‌موج‌ها در گذر از اطلس شمالی به سمت ناحیه اروپا و مدیترانه قابل ردیابی نبوده و در ناحیه اروپا ناپدید می‌شوند.

جدول ۱. دسته‌بندی رویدادهای انتشار بسته‌موج و گستره زمانی آنها.

مورد ۱، ششم تا شانزدهم اکتبر ۲۰۱۱	دسته اول
مورد ۵، هفتم تا هفدهم فوریه ۲۰۱۲	
مورد ۲، یکم تا دهم ژانویه ۲۰۱۲	دسته دوم
مورد ۳، نوزدهم تا بیست‌وهفتم ژانویه ۲۰۱۲	
مورد ۴، یکم تا نهم فوریه ۲۰۱۲	دسته سوم

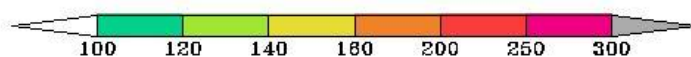
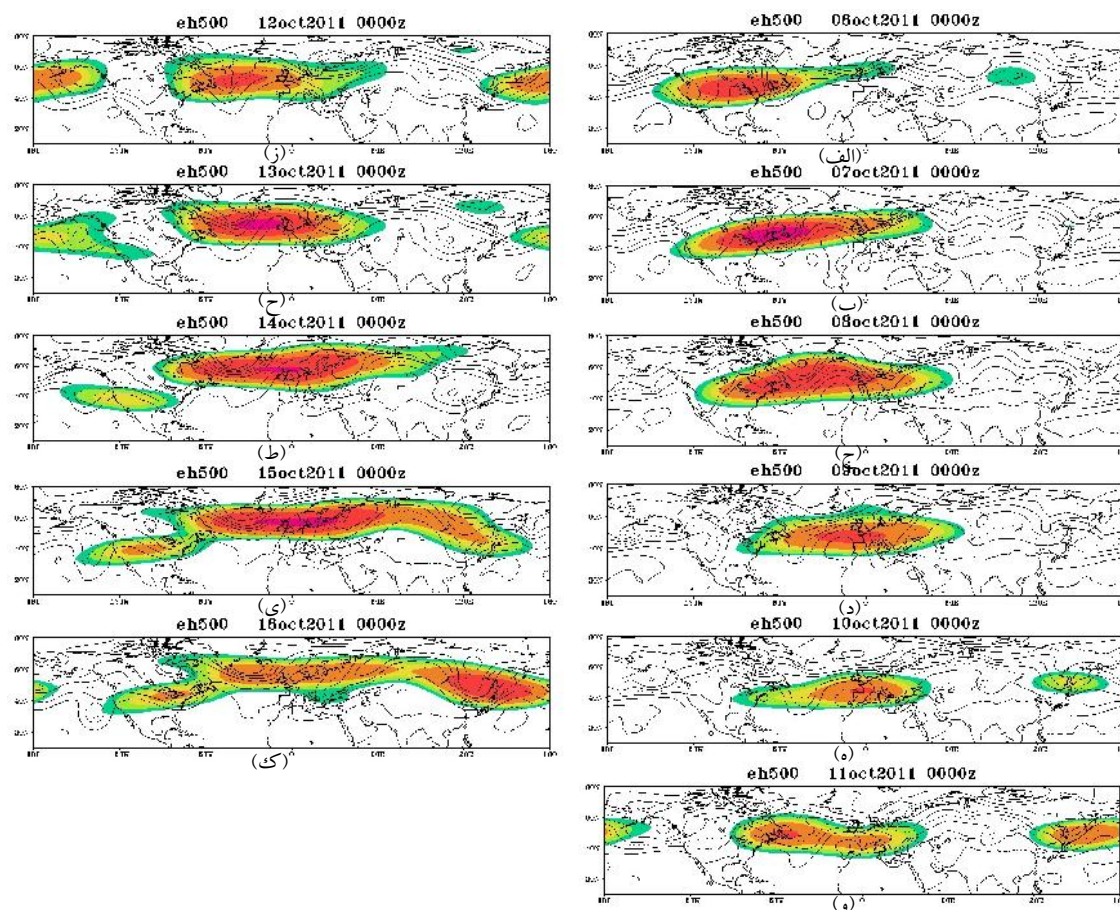
۲-۳ پوش موج - روش تبدیل هیلبرت

شکل‌های ۳ و ۴ پوش موج ارتفاع ژئوپتانسیلی Z در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال را به ترتیب برای موردهای اول و دوم نشان می‌دهند. برای مورد اول (شکل ۳)، در روز ششم اکتبر یک پوش موج روی آمریکای شمالی و غرب اطلس شمالی حدود ۹۰ درجه غربی و پوش ضعیفی نیز در غرب اروپا حدود ۱۰ درجه غربی دیده می‌شود. در روز هفتم اکتبر، هر دو پوش موج به سمت شرق حرکت داشته و حالتی از ادغام بین آنها وجود دارد. در روز هشتم اکتبر،

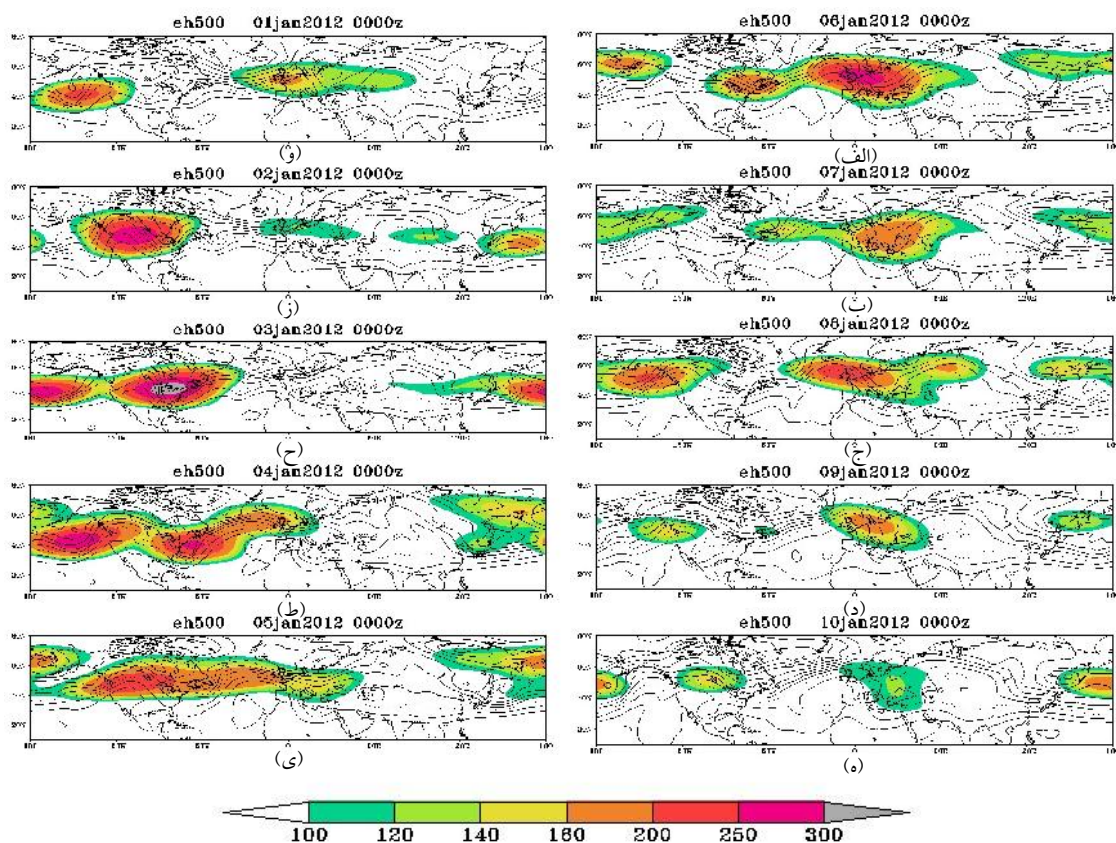
غرب اروپا ضعیف شده و از بین می‌رود؛ در حالی که پوشش واقع در غرب آمریکا تقویت یافته و روی آمریکای شمالی قرار دارد. در روز سوم ژانویه، دو پوشش در غرب و شرق آمریکا مشاهده می‌شود که در روز بعد، ضمن حرکت این دو بسته‌موج به شرق، پوشش دیگری روی اطلس شمالی حدود ۲۰ درجه غربی شکل گرفته است. در روز پنجم ژانویه تنها یک پوشش روی آمریکای شمالی باقی می‌ماند و پوشش واقع بر اطلس شمالی با حرکت به سمت شرق روی غرب مدیترانه به چشم می‌خورد. در روز

حدود ۵۰ درجه غربی می‌رسد. در روزهای سیزدهم تا پانزدهم اکتبر، با کاهش حضور پوشش پادجریان‌سو و از بین رفتن آن، پوشش اولیه تقریباً با فعالیت یکنواخت به آرامی به شرق و مرکز اروپا منتقل می‌شود. از روز شانزدهم اکتبر فعالیت موج کاهش یافته و به تدریج از بین می‌رود.

برای مورد دوم (شکل ۴)، در روز یکم ژانویه دو مکان پوشش، یکی در غرب آمریکا و دیگری در غرب اروپا دیده می‌شود. در روز دوم ژانویه، پوشش موج واقع در



شکل ۳. نمودارهای پوشش موج پریشیدگی ارتفاع ژئوتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (مناطق رنگی بر حسب m) برای مورد اول در بازه زمانی ششم تا شانزدهم اکتبر ۲۰۱۱. پرندها معرف ارتفاع ژئوتانسیلی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال (با فاصله پرندهی 100 gpm) و خط چین پرنده 5600 gpm را نشان می‌دهد.

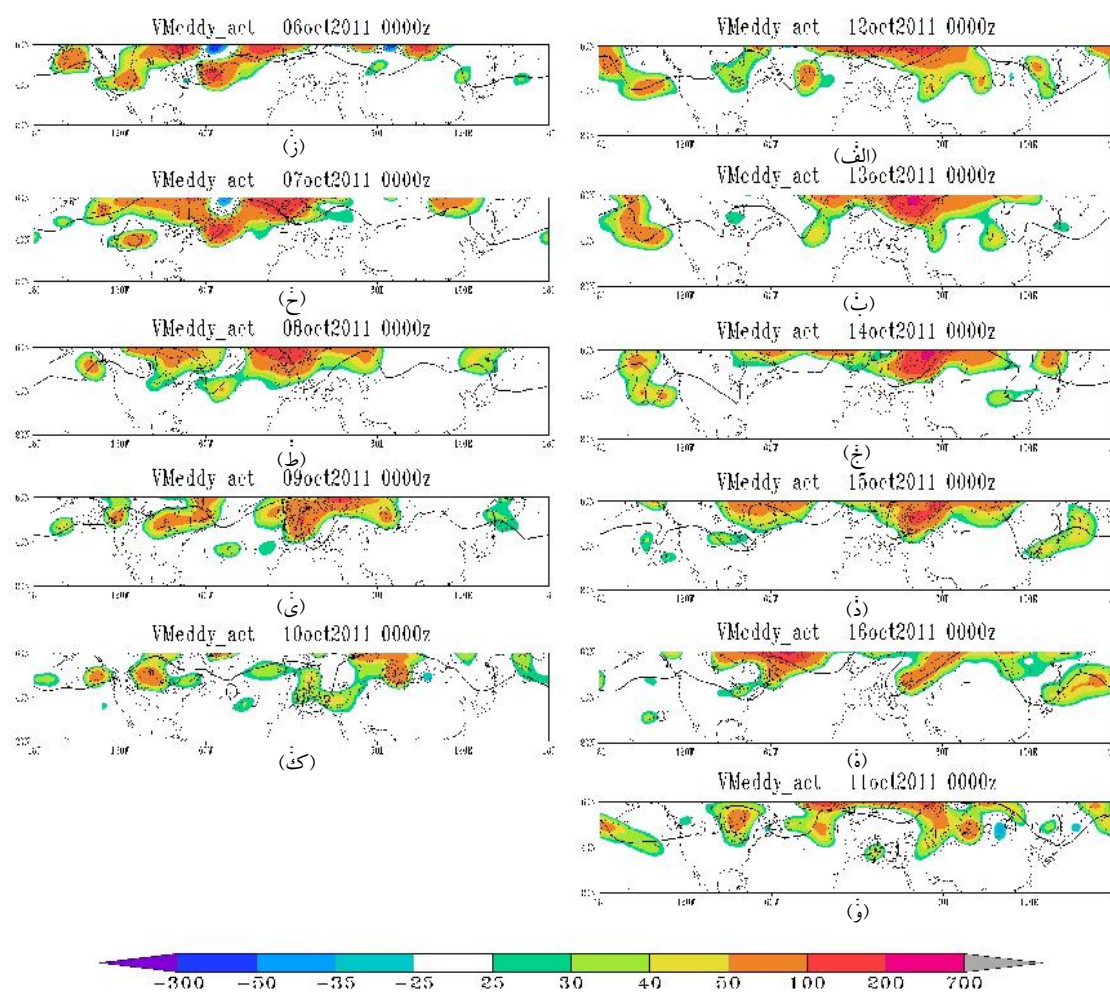


شکل ۴. مانند شکل ۳ ولی برای مورد دوم در بازه زمانی یکم تا دهم ژانویه ۲۰۱۲.

۳-۳ فعالیت موج

با بررسی فعالیت موج برای موردهای انتخاب شده، می‌توان نتیجه‌های کلی در مورد رفتار و ساختار آنها به دست آورد. با توجه به شکل‌های مربوط به EA و واگرایی شار افقی آن $(\nabla \cdot \mathbf{F}_H)$ ، مشاهده می‌شود که بیشینه این دو کمیت در عرض‌های بالاتر از ۴۰ درجه شمالی واقع است. مقایسه این شکل‌ها با شکل‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد که بیشینه‌های فوق در شمال نواحی بیشینه گرادیان ارتفاع ژئوپتانسیلی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال قرار داشته و به طور کلی با حرکت به شرق تقویت می‌شوند. از بررسی این شکل‌ها نتیجه گرفته می‌شود که واگرایی و همگرایی شار افقی فعالیت موج به ترتیب در پادجریان سو و جریان سوی مراکز EA قرار دارند. فعالیت موج در وردسپهر زیرین در یکی از دو نوع رفتار خود با انتقال از عرض‌های بالا به سمت نواحی

ششم ژانویه، پوش روی مدیترانه تقویت و پوش روی آمریکا ضمن کشیده شدن به شرق آمریکا، تضعیف شده است. در روز بعد پوش واقع بر مدیترانه ضعیف‌تر شده و پوش روی شرق آمریکا تقریباً از بین رفته است. در روز هشتم ژانویه، همراه با قرار گرفتن پوش جدیدی بر روی غرب آمریکا، پوش مدیترانه دوباره مقداری تقویت شده و فعالیت آن به سمت غرب کشیده می‌شود. در روزهای بعد این پوش دستخوش تضعیف می‌شود. با توجه به شکل‌های ۳ و ۴، می‌توان گفت در مورد اول، بسته‌موج هنگام رسیدن به اروپا به سمت جنوب شرق و ناحیه مدیترانه و شاخه جنوبی (لی، ۲۰۰۰) منتشر شده و در پادجریان سوی مسیر توفان مدیترانه قرار می‌گیرد. در مورد دوم، پوش موج از قسمت شمالی اروپا عبور کرده و جریان سوتر از مورد اول، به جنوب انتشار یافته و به قسمت‌های شرقی مدیترانه می‌رسد و بدون استقرار از مدیترانه عبور می‌کند.



شکل ۵. میانگین قائم فعالیت موج (مناطق رنگی بر حسب ms^{-1}) و واگرایی شار افقی آن (با فاصله پربندی $3000 \text{m}^2 \text{s}^{-2}$ در لایه $[100$ و $1000]$ هکتوپاسکال برای مورد اول در بازه زمانی ششم تا شانزدهم اکتبر ۲۰۱۱. مقادیر منفی به صورت خط چین بوده و پربند صفر حذف شده است. خط پربند ارتفاع ژئوپتانسیلی 5600gpm را نشان می دهد.

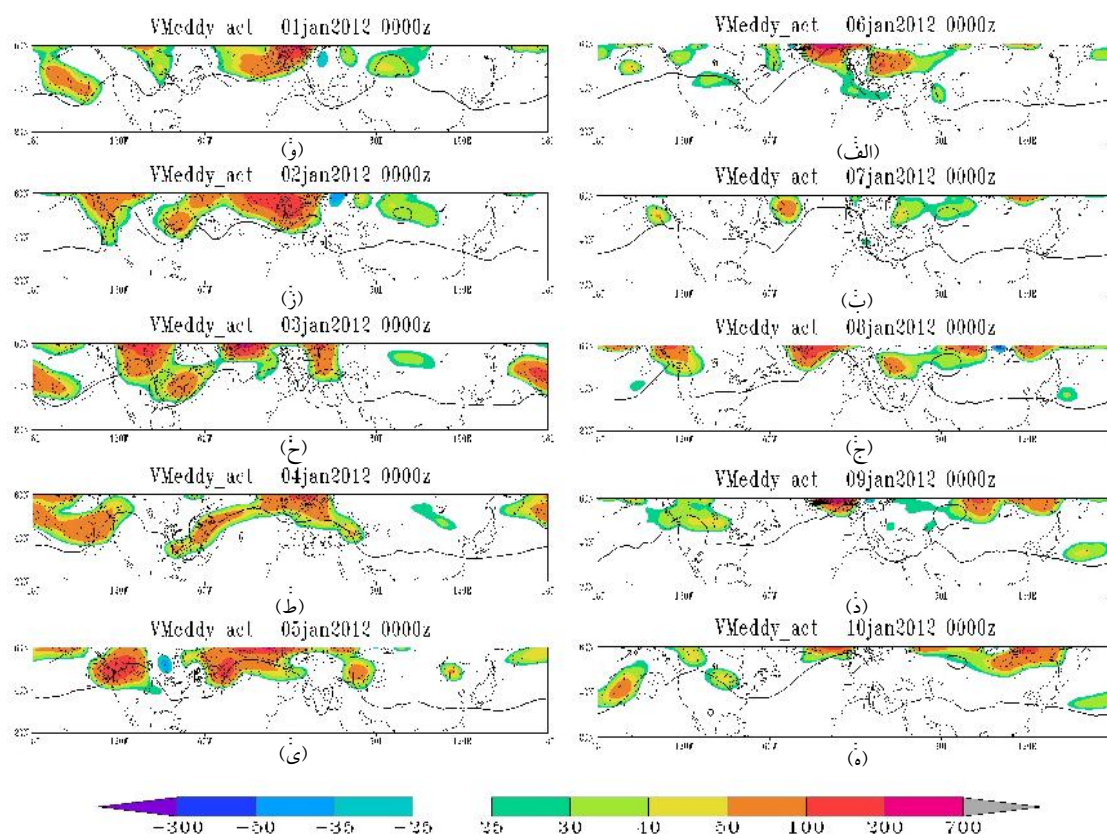
بالای 40° درجه شمالی و بین 120° درجه غربی تا 10° درجه شرقی متمرکز بوده و منطبق بر مسیر دوم توفان هستند (هاسکینز و هاجز، ۲۰۰۲). طی روزهای ششم تا هشتم اکتبر، این مراکز حرکت به سمت شرق داشته و به نسبت قوی می باشند. در روزهای هشتم و نهم اکتبر، مراکز فوق روی اروپای مرکزی و مدیترانه مستقر شده و پس از آن، ضمن نفوذ به عرض های پایین به تدریج ضعیف می شوند. در روزهای هشتم تا یازدهم اکتبر، مراکز واگرایی و همگرایی ضعیفی در نواحی جنب حاره ای دیده می شوند که منطبق بر مسیر اول توفان هستند (هاسکینز و هاجز، ۲۰۰۲). در روزهای سیزدهم و چهاردهم اکتبر نیز تقویت

جنب حاره ای جذب و تضعیف می شود (تورنکرافت و همکاران، ۱۹۹۳؛ اسلر و هینز، ۱۹۹۹). این یافته با نتایج بررسی موردهای مطالعه شده که حاکی از آن است مراکز واگرایی و همگرایی شار افقی فعالیت موج معمولاً در عرض های بالاتر از 40° درجه شمالی قرار داشته و با نفوذ به عرض های پایین تر تا حد زیادی تضعیف می شوند، مطابقت دارد.

فعالیت موج و واگرایی و همگرایی شار افقی آن برای موردهای اول و دوم به ترتیب در شکل های ۵ و ۶ نشان داده شده است. برای مورد اول (شکل ۵)، مشاهده می شود که در روز ششم اکتبر، مراکز EA و $\nabla \cdot F_h$ در عرض های

به‌طور کلی شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهند که برای مورد اول، فعالیت موج در ناحیه غرب مدیترانه از مسیر دوم توفان به عرض‌های پایین‌تر و به سمت مسیر اول نفوذ کرده و مراکز واگرایی و همگرایی نسبی کوچک شار فعالیت موج را در مسیر اول و در ناحیه غرب مدیترانه و شمال‌غرب آفریقا به‌وجود می‌آورد که نشان‌دهنده برهمکنش مثبت بین مسیرهای اول و دوم توفان است. برای مورد دوم، فعالیت موج در شمال اروپا و در مسیر دوم توفان حرکت شرق‌سو داشته و در جریان‌سوتر از مورد اول به سمت شرق مدیترانه و خاورمیانه نفوذ می‌کند. در واقع، مراکز همگرایی و واگرایی شار فعالیت موج به غرب مدیترانه و عرض‌های پایین‌تر نفوذ نکرده و این مراکز در مسیر اول مشاهده نمی‌شوند.

مراکز $\nabla \cdot \mathbf{F}_h$ و EA روی اروپا و در عرض‌های بالای ۴۰ درجه شمالی وجود دارد که از روز شانزدهم اکتبر شروع به ضعیف شدن می‌کند. برای مورد دوم (شکل ۶)، در روزهای یکم تا چهارم ژانویه بیشتر فرین‌های EA و $\nabla \cdot \mathbf{F}_h$ در عرض‌های بالای ۴۰ درجه شمالی و در حدود صفر تا ۳۰ درجه غربی، یعنی منطبق بر مسیر دوم توفان قرار دارند. در روز پنجم ژانویه، این فرین‌ها در دو ناحیه، یکی بین طول‌های جغرافیایی حدود ۱۰ درجه شرقی تا ۶۰ درجه غربی و دیگری حول طول جغرافیایی ۱۲۰ درجه غربی، دیده می‌شوند. در روز ششم ژانویه، فرین‌های EA و $\nabla \cdot \mathbf{F}_h$ روی اروپا و شمال‌غرب آن منطبق بر مسیر دوم توفان تمرکز می‌یابند و در روزهای بعد با قدری نوسان در شدت به تدریج ضعیف می‌شوند.



شکل ۶. مانند شکل ۵ ولی برای مورد دوم در بازه زمانی یکم تا دهم ژانویه ۲۰۱۲

۳-۴ شار خروجی افقی

همان‌طور که پیش‌تر بدان اشاره شد، شار افقی فعالیت موج خروجی در ناحیه بزرگ مدیترانه و زیرناحیه‌های غربی، مرکزی و شرقی به‌صورت میانگین بین ترازهای ۲۰۰ و ۶۰۰ هکتوپاسکال محاسبه شده است. مقدار مثبت نشان‌دهنده گسیل شار و مقدار منفی نشان دهنده دریافت شار توسط ناحیه است. باید توجه داشت که در این محاسبات از پالایه استفاده نشده و اثرات فرآیندهای کم-بسامد هم در آن وجود دارد. زیرناحیه مرکزی منطبق با ناحیه چرخندزایی مدیترانه است و مقادیر به‌دست آمده شار افقی خروجی آن برای نشان دادن رفتار موردهای در دست مطالعه، دارای اهمیت ویژه‌ای است. جدول ۲ نشان می‌دهد برای مورد اول که جزء اولین دسته قرار دارد، مقدار شار افقی فعالیت موج در زیرناحیه مرکزی منفی بوده و نسبت به میانگین ماه خود نیز مقدار منفی دارد و این نتیجه حاکی از آن است که این دسته از موردها نسبت به زمینه میانگین ماه مربوط، دریافت‌کننده شار هستند. با توجه به جدول ۲، مقدار شار افقی فعالیت موج مربوط به مورد دوم از دومین دسته در زیرناحیه مرکزی مثبت است که نسبت به میانگین ماه خود (ژانویه) نیز مقدار مثبت دارد. این نتایج بیانگر گسیلنده بودن زیرناحیه مرکزی در هر دو مورد نسبت به زمینه میانگین ماه خود است.

آمد. در این راستا، مقادیر شار افقی فعالیت موج خروجی از ناحیه مدیترانه و سه زیرناحیه غربی، مرکزی و شرقی آن محاسبه شد. در مطالعه احمدی گیوی و همکاران (۲۰۱۴) برای سه ماه زمستان ۲۰۰۵-۲۰۰۴ سه مورد از انتشار بسته-موج‌ها و در این پژوهش برای پنج ماه اکتبر، نوامبر و دسامبر ۲۰۱۱ و ژانویه و فوریه ۲۰۱۲ پنج مورد از انتشار بسته‌موج‌ها استخراج شد. بدین ترتیب، در این دو مطالعه به‌طور میانگین برای هر ماه یک مورد از انتشار بسته‌موج شناسایی شده است که خود می‌تواند نتیجه‌ای مهم تلقی شود و در واقع بیانگر اطلاع اقلیمی ارزشمندی است. در اینجا به ارائه نتایج برای یک مورد از الگوی اول (از ۱ تا ۱۶ اکتبر ۲۰۱۱، مورد اول) و یک مورد از الگوی دوم (از ۱ تا ۱۰ ژانویه ۲۰۱۲، مورد دوم) پرداخته شده است.

جدول ۲. میانگین زمانی شار افقی فعالیت موج خالص خروجی از ناحیه مدیترانه و زیرناحیه‌های غربی، مرکزی و شرقی آن. مقادیر مثبت بیانگر شار خالص خروجی و مقادیر منفی بیانگر شار خالص ورودی بوده و مقدار واحد $1 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$ است.

مورد ۲ (ژانویه ۲۰۱۲)	مورد ۱ (اکتبر ۲۰۱۱)	ژانویه ۲۰۱۲	اکتبر ۲۰۱۱	
۱۱/۵۸	۱۷/۲۶	۸/۴۱	۰/۵۸	ناحیه مدیترانه
۹/۶۵	۴۸/۱۵	۹/۱۴	۶/۷۷	زیرناحیه غربی
۲/۸۵	-۰/۹۰	-۱/۶۰	۲/۳۵	زیرناحیه مرکزی
-۰/۷۵	-۳۰/۱۵	۰/۷۳	-۸/۶۲	زیرناحیه شرقی

۴ نتیجه‌گیری

در این پژوهش، سازوکار و الگوی رفتاری بسته‌موج‌ها در برهمکنش مسیر توفان اطلس شمالی و مسیر توفان مدیترانه در زمستان گسترده ۲۰۱۱-۲۰۱۲ با استفاده از روش‌های نمودار هافمولر، تعیین پوش موج و فعالیت موج، با توجه به دو الگوی معرفی شده در کار احمدی گیوی و همکاران (۲۰۱۴) مورد مطالعه قرار گرفت. در دوره فوق، پنج مورد بسته‌موج به‌وسیله نمودارهای هافمولر شناسایی و پس از آن نمایه‌های پوش موج و فعالیت موج برای آنها به‌دست

برای مورد اول، در نمودارهای هافمولر، بسته‌موج‌های متوالی در گذر از اطلس شمالی به سمت ناحیه اروپا و مدیترانه، قابل ردیابی بوده و امتداد انتشار آنها را می‌توان به‌وضوح دید. در نمودارهای پوش موج، بسته‌موج هنگام رسیدن به اروپا به سمت جنوب شرق و ناحیه مدیترانه و شاخه جنوبی (لی، ۲۰۰۰) منتشر شده و در پادجریان سوی مسیر توفان مدیترانه قرار می‌گیرد. نمودارهای فعالیت موج این بسته‌موج‌ها نشان می‌دهند که فعالیت موج در ناحیه غرب مدیترانه از مسیر دوم توفان (هاسکینز و هاجز،

بنابراین این یافته می‌تواند از نظر آماری در تبیین این الگوهای رفتاری نتیجه قابل توجهی باشد. با مطالعه دوره‌های زمانی متفاوت در این زمینه و تحلیل و مقایسه نتایج به دست آمده، می‌توان شاخص‌های مناسبی برای کمیت‌های مختلف از جمله پوش موج، انرژی، فعالیت موج و ترکیبی از آنها به دست آورد تا با استفاده از آنها، برای دوره‌های بلندمدت رفتار آماری بسته‌موج‌ها تعیین شود.

منابع

احمدی گیوی، ف.، محب‌الحجه، ع. ر. و یآوری. م.، ۱۳۸۴، مطالعه بسته‌موج‌های کژفشار در فوریه ۲۰۰۳، ا: بررسی دینامیکی بسته‌موج‌ها از دیدگاه انرژی: مجله فیزیک زمین و فضا، (۲) ۳۱، ۵۹-۷۸.

محب‌الحجه، ع. ر.، احمدی گیوی، ف. و یآوری. م.، ۱۳۸۴، مطالعه بسته‌موج‌های کژفشار در فوریه ۲۰۰۳، ا: شناسایی بسته‌های موج به روش‌های مختلف و بررسی ویژگی‌های آنها: مجله فیزیک زمین و فضا، (۲) ۳۱، ۴۵-۵۸.

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

یآوری، م.، ۱۳۸۳، مطالعه بسته‌موج‌های کژفشار در فوریه ۲۰۰۳: پایان‌نامه کارشناسی ارشد هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

۲۰۰۲) به عرض‌های پایین‌تر و به سمت مسیر اول توفان نفوذ کرده و مراکز واگرایی و همگرایی نسبی کوچک شار فعالیت موج را در مسیر اول و در ناحیه غرب مدیترانه و شمال غرب آفریقا به وجود می‌آورد که نشان‌دهنده برهمکنش مثبت بین مسیرهای اول و دوم توفان است. شار افقی فعالیت موج خروجی برای مورد اول در زیرناحیه مرکزی مدیترانه منفی بوده و نسبت به میانگین ماه خود نیز مقدار منفی دارد که بیانگر آن است این موردها نسبت به زمینه میانگین ماه مربوط، دریافت کننده شار هستند.

نمودارهای هافمولر برای مورد دوم نشان می‌دهد که بسته‌موج‌ها در گذر از اطلس شمالی به سمت ناحیه اروپا و مدیترانه قابل ردیابی نبوده و در ناحیه اروپا ناپدید می‌شوند. بسته‌موج‌ها با دامنه‌ای کوچک در ناحیه اروپا وجود داشته، ولی امتداد آنها در ناحیه اروپا قابل مشاهده نیست. در نمودارهای پوش موج نیز دیده می‌شود که بسته-موج از قسمت شمالی اروپا عبور کرده و جریان‌سوتر از مورد اول به جنوب منتشر شده و به قسمت‌های شرقی مدیترانه می‌رسد و بدون استقرار از مدیترانه عبور می‌کند. با توجه به نمودارهای فعالیت موج مورد دوم مشاهده می‌شود که فعالیت موج در شمال اروپا و در مسیر دوم توفان حرکت شرق‌سو داشته و در جریان‌سوتر از مورد اول به سمت شرق مدیترانه و خاورمیانه نفوذ می‌کند. در واقع، مراکز همگرایی و واگرایی شار فعالیت موج به غرب مدیترانه و عرض‌های پایین‌تر نفوذ نکرده و این مراکز در مسیر اول مشاهده نمی‌شوند. شار افقی فعالیت موج خروجی مربوط به مورد دوم در زیرناحیه مرکزی مدیترانه مثبت است و نسبت به میانگین ماه خود نیز مقدار مثبت دارد. این نتایج بیانگر گسیلنده بودن هر دو مورد نسبت به زمینه میانگین ماه خود است.

به طور کلی، از پنج مورد شناسایی شده در زمستان گسترده ۲۰۱۲-۲۰۱۱، نتایج نشان می‌دهد که سازوکار ۴ مورد مطابق دسته‌بندی احمدی گیوی و همکاران (۲۰۱۴) است؛

Ahmadi-Givi, F., Nasr-Esfahany, M. and Mohebalhojeh, A. R., 2014, Interaction of the North Atlantic baroclinic wave packets and the Mediterranean storm track: Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 140.

Chang, E. K. M., 1993, Downstream development of baroclinic waves as inferred from

- Orlanski, I., and Chang, E. K. M., 1993, Ageostrophic geopotential fluxes in downstream and upstream development of baroclinic waves: *J. Atmos. Sci.*, **50**, 212–225.
- Plumb, R. A., 1983, A new look at the energy cycle: *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1669–1688.
- Simmons, A. J., and Hoskins, B. J., 1979, The downstream and upstream development of unstable baroclinic waves: *J. Atmos. Sci.*, **37**, 1239–1254.
- Swanson, K. L., and Pierrehumbert, R. T., 1994, Nonlinear wave packet evolution on a baroclinically unstable jet: *J. Atmos. Sci.*, **51**, 384–394.
- Thorncroft, C. D., Hoskins, B. J., and McIntyre, M. E., 1993, Two paradigms of baroclinic wave life-cycle behavior: *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **119**, 17–55.
- 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.
- Swanson, K. L., and Pierrehumbert, R. T., 1994, Nonlinear wave packet evolution on a baroclinically unstable jet: *J. Atmos. Sci.*, **51**, 384–394.
- Thorncroft, C. D., Hoskins, B. J., and McIntyre, M. E., 1993, Two paradigms of baroclinic wave life-cycle behavior: *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **119**, 17–55.
- 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.
- regression analysis: *J. Atmos. Sci.*, **50**, 2038–2053.
- Chang, E. K. M., 2000, Wave packets and life cycles of troughs in the upper troposphere: Examples from the Southern Hemisphere summer season of 1984/1985: *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 25–50.
- Chang, E. K. M., and Yu, D. B., 1999, Characteristics of wave packets in the upper troposphere. Part I: Northern Hemisphere winter: *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1708–1728.
- Charney, J. G., 1947, The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current: *J. Meteor.*, **4**, 135–162.
- Eady, E. T., 1949, Long waves and cyclone waves: *Tellus*, **1**, 33–52.
- 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.
- Hakim, G. J., 2003, Developing wave packets in the North Pacific storm track: *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 2824–2837.
- Hoskins, B. J., and Hodges, K. I., 2002, New perspectives on the Northern Hemisphere winter storm tracks: *J. Atmos. Sci.*, **59**, 1041–1061.
- Lee, S., 2000, Barotropic effects on atmospheric storm tracks: *J. Atmos. Sci.*, **57**, 1420–1435.
- Lee, S., and Held, M., 1993, Baroclinic wave packets in models and observations: *J. Atmos. Sci.*, **50**, 1413–1428.