

مطالعه اثر نوسان اطلس شمالی بر رابطه بین مسیرهای توفان اطلس شمالی و مدیترانه با استفاده از داده‌های بازتحلیل NCEP/NCAR و JRA-55

آمنه ملاشریفی^۱، علیرضا محب‌الحجه^{۲*} و فرهنگ احمدی گیوی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. استاد، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. دانشیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۹۷/۷/۲۵، پذیرش نهایی: ۹۸/۲/۲۴)

چکیده

نوسان اطلس شمالی (NAO) به‌عنوان مهم‌ترین عامل اثرگذار بر وضع هوای اروپا و مدیترانه و همچنین موقعیت مکانی و جهت مسیر توفان مطرح است، به‌طوری‌که مسیرهای توفان تحت‌تأثیر این پدیده دورپیوند هستند. هدف این پژوهش، نگاهی نو به اثر NAO بر مسیرهای توفان اطلس و مدیترانه از دیدگاه انرژی با استفاده از مجموعه داده‌های بازتحلیل JRA-55 و مقایسه نتایج آنها با داده‌های بازتحلیل NCEP/NCAR است. بدین منظور، نقشه ترکیبی جمله‌های مهم معادله گرایش زمانی انرژی جنبشی پیچکی (EKE) و تولید کُرفشار برای ماه‌های بحرانی مثبت و منفی NAO، در فصل زمستان برای بازه زمانی ۱۹۵۹ تا ۲۰۱۷ محاسبه شد.

نتایج هر دو مجموعه داده نشان می‌دهند عمدتاً همگرایی شار انرژی کل نسبت به عوامل دیگر نقش مهم‌تری در تقویت EKE دارد و نقش شار آزمینگرد در تقویت مسیر توفان مدیترانه بیش از مسیر توفان اطلس است. با وجود سازگاری نسبی نتایج و الگوهای به‌دست آمده از دو مجموعه داده، نتایج JRA-55 حاکی از قوی‌تر بودن تمام جمله‌های انرژی، در هر دو فاز به‌ویژه در فاز منفی، هستند. از طرفی، مراکز واگرایی و همگرایی شار انرژی در مسیر توفان مدیترانه حاصل از NCEP/NCAR حساسیت کمتری به تغییر فاز NAO نشان می‌دهند. برخلاف مطالعات پیشین که بیانگر قوی‌تر بودن هسته مسیر توفان اطلس در فاز مثبت NAO هستند، نتایج JRA-55 اختلافی بین فازهای مثبت و منفی نشان نمی‌دهند. به علاوه، با وجود آن‌که نتایج JRA-55 نیز نحوه ارتباط دو مسیر توفان در دو فاز را تأیید می‌کنند، ولی در فاز منفی ارتباط کمتری بین مسیرهای توفان، نسبت به نتایج NCEP/NCAR، مشاهده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: نوسان اطلس شمالی، مسیر توفان، انرژی جنبشی پیچکی، تولید کُرفشار، NCEP/NCAR، JRA-55

۱. مقدمه

رشد می‌کند که تولید انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر پیچکی و تبدیل آن به انرژی جنبشی پیچکی، پاشش انرژی به جریان سو توسط مؤلفه آزمینگرد باد را جبران کند. انرژی‌ای که با واگرایی خارج می‌شود، باعث توسعه ثانویه در جریان سو می‌شود. این نتایج با یافته‌های مربوط به چرخه زندگی مُد بهنجار، که بیانگر اتلاف انرژی جنبشی پیچکی در اثر تبدیل به انرژی جنبشی جریان میانگین است، در تضاد است. لی (۲۰۰۰) اثرات مدوله‌سازی موج در تقسیم بسته‌های موج راسبی بالابسامد به دو شاخه در شرق اطلس را بررسی کرده و نشان داد که فعالیت پیچکی

علاوه بر اثر مسیر توفان بر الگوهای بارشی که آن را به موضوع مهمی در دینامیک اقلیم تبدیل کرده است، به نظر می‌رسد که مسیرهای توفان با هم ارتباط دارند و از طریق این ارتباط هم بر جریان‌های بزرگ‌مقیاس اثر می‌گذارند (کای و مک، ۱۹۹۰؛ برنستیتز، ۱۹۹۵). ارلانسکی و کاتزفی (۱۹۹۱) چرخندهای نیمکره جنوبی را با استفاده از داده‌های ECMWF از دیدگاه انرژی تحلیل کردند. آنها نشان دادند که فرارفت ارتفاع ژئوپتانسیلی توسط مولفه آزمینگرد باد، هم چشمه اصلی انرژی جنبشی پیچکی و هم چاه آن است. بر اساس نتایج آنها، سامانه تا زمانی

در انتهای جریان سوی مسیر توفان اطلس به دو شاخه، یک شاخه شمالی در امتداد ۶۰ درجه شمالی و یک شاخه جنوبی در امتداد ۳۰ درجه شمالی تقسیم می‌شود. هاسکینز و هاجز (۲۰۰۲) نیز دو مسیر اصلی برای فعالیت مسیر توفان در نیمکره شمالی بیان داشته‌اند که یکی از آنها از مناطق جنب‌حاره‌ای اقیانوس اطلس شمالی آغاز و به سمت شرق کشیده می‌شود و سپس از دریای مدیترانه و منطقه خاورمیانه می‌گذرد؛ مسیر توفان دیگر از مرکز و شمال اطلس شروع می‌شود، به سمت جنوب شرق ادامه می‌یابد و در مرکز و شرق منطقه مدیترانه با مسیر توفان اول ادغام می‌شود. چنگ و همکاران (۲۰۰۲) فرآیندهای کژفشار، ناپایداری خطی، تکوین جریان سو، اثرات فشارورود و گرمایش بادرو را به‌عنوان فرآیندهای فیزیکی مهم و اثرگذار در دینامیک مسیر توفان بیان کرده‌اند. هاسکینز و هاجز (۲۰۰۲) با استفاده از تاوایی پتانسیلی، مسیرهای توفان در نیمکره شمالی را برای وردسپهر زیرین و زیرین مورد مطالعه قرار داده و ضمن ارائه طرحی از مسیرهای توفان و برهم‌کنش آنها، مناطق دیگری با فعالیت همدیدی قوی شامل مسیرهای توفان مدیترانه و سبیری را شناسایی کردند. در این تحقیق، به‌طور مستقیم به ارتباط مسیرهای توفان اطلس و مدیترانه اشاره‌ای نشده، اما آنها نشان دادند که بسته‌موج‌های اطلس شمالی در جهت جنوب به سمت شمال آفریقا و جنوب آسیا (جایی که مسیر توفان مدیترانه فعال است) منحرف می‌شوند.

نتایج مطالعات زیادی حاکی از آن است که الگوهای دورپیوندی مانند نوسان اطلس شمالی، می‌تواند تغییراتی در مسیرهای توفان ایجاد کنند. دورپیوند کم‌بسامد NAO یکی از مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر وضع هوای اروپا و مناطق جریان سو محسوب شده و بر موقعیت مکانی و جهت مسیر توفان و جریان جتی اثر می‌گذارد (پینتو و همکاران، ۲۰۱۱). این الگو با تغییرپذیری بادهای غربی در شرق اطلس شمالی و غرب اروپا همبستگی دارد و با تغییر در شدت و بسامد توفان‌ها بر روی اقیانوس اطلس، می‌تواند در اقلیم مناطق جریان سوی مسیر توفان اطلس نیز

اثر بگذارد. ولیس و گربر (۲۰۰۸) دینامیک پدیده NAO را بررسی کرده و اظهار داشتند که NAO نتیجه تغییرات مسیر توفان اطلس است. در فاز مثبت NAO توزیع شار تکانه پیچکی به‌گونه‌ای است که باعث می‌شود جت به سمت قطب انتقال یافته و از جت جنب‌حاره‌ای جدا شود. در فاز منفی NAO انتقال استواسو صورت گرفته و شار پیچکی تکانه تضعیف می‌شود. در این حالت، پیچک‌هایی که عامل ایجاد جت هستند، از جت جنب‌حاره‌ای جدا ناپذیرند.

پینتو و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از داده‌های بازتحلیل NCEP در بازه زمانی ۱۹۹۸-۱۹۵۸، به بررسی رخداد چرخندهای شدید و غیرشدید پرداخته و ارتباط آنها با فازهای NAO و متغیرهای محیطی مهم کنترل‌کننده رشد چرخندها را مورد بحث قرار دادند. نتایج نشان داد که رشد چرخندها به مقادیر بزرگ متغیرهای محیطی مانند جریان جتی و کژفشاری وابسته است. سپس پینتو و همکاران (۲۰۱۱) از بررسی اثر NAO بر مسیر توفان اطلس، به این نتیجه رسیدند که NAO در شرق اطلس شمالی بیشترین تأثیر را دارد و در این منطقه، بیشترین فعالیت در فاز مثبت NAO بین گرینلند و شمال اروپا دیده می‌شود. نصراصفهان‌ی و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از داده‌های NCEP/NCAR برای دوره ۲۰۰۵-۱۹۵۰، تأثیر نوسان اطلس شمالی بر مسیر توفان مدیترانه و اقلیم جنوب‌غرب آسیا را از دیدگاه انرژی مورد مطالعه قرار دادند. آنها نحوه اثرگذاری فازهای مثبت و منفی NAO در برهم‌کنش بین اقیانوس اطلس شمالی و دریای مدیترانه را بررسی کرده و از مقایسه مؤلفه‌های انرژی در ماه‌های بحرانی مثبت و منفی NAO، به این نتیجه رسیدند که در فاز مثبت NAO، در منطقه خاورمیانه، همه مقادیر محاسبه شده بزرگ‌تر هستند. به‌علاوه، آنها نشان دادند که ارتباط بین مسیرهای توفان اطلس و مدیترانه در فاز مثبت بسیار ضعیف‌تر از فاز منفی است. احمدی گیوی و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از داده‌های GFS برای فصل زمستان ۲۰۰۵-۲۰۰۴، برهم‌کنش بین مسیرهای توفان اطلس و

JRA-55 نه تنها دارای تفکیک بالاتری نسبت به داده‌های NCEP/NCAR هستند، بلکه در انجام بازتحلیل این داده‌ها از طرحواره‌های داده‌گواری پیشرفته‌تر (4D-Var) به همراه روش جدیدی در تصحیح بردشی آریبی برای داده‌های ماهواره استفاده شده است. بر این مبنای مقایسه نتایج دیدگاه انرژی در برآورد اثر NAO بر نحوه ارتباط مسیرهای توفان اطلس و مدیترانه حاصل از مجموعه داده JRA-55 و مقایسه آن با نتایج قبلی حاصل از داده‌های NCEP/NCAR هدف اصلی پژوهش حاضر است. از آنجا که تأثیر NAO بر روی مسیر توفان مدیترانه تاکنون کمتر مورد بررسی قرار گرفته و پژوهش‌های انجام شده در این خصوص با داده‌های NCEP/NCAR صورت گرفته‌اند (نصراصفهانی و همکاران، ۲۰۱۱؛ رضاییان و همکاران، ۲۰۱۶)، در نتیجه با این مقایسه به نوعی اعتبار نتایج قبلی به دست آمده، سنجیده و سازگاری نتایج حاصل از دو مجموعه داده نیز بررسی می‌شود. برای درک درست نتایج ارائه شده، لازم است تأکید شود که هدف به هیچ وجه مقایسه دو مجموعه داده و کیفیت آنها نیست، امری که از حوزه پژوهش فعلی خارج است.

در بخش ۲ این مقاله مبانی نظری مسئله ارائه می‌شود. در بخش ۳، علاوه بر معرفی داده‌ها و روش کار، به نحوه طبقه‌بندی فازهای NAO پرداخته می‌شود. بخش ۴ به بحث و مقایسه نتایج حاصل از تأثیر NAO بر مسیرهای توفان با استفاده از دو مجموعه داده و نقش مؤثر هر یک از جملات انرژی در مناطق مختلف اختصاص دارد. در بخش ۵ نیز خلاصه نتیجه‌گیری مقاله حاضر آورده می‌شود.

۲. مبانی نظری

معادله گرایش زمانی بودجه انرژی جنبشی پیچکی، EKE (Eddy Kinetic Energy)، که با استفاده از معادله تکانه افقی به دست می‌آید، بدین صورت است (ارلانسکی و کاتزفی، ۱۹۹۱؛ چنگک، ۲۰۰۱):

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

مدیترانه را از دیدگاه انرژی تفکیک بررسی کردند و نشان دادند تا وقتی که بسته موج پادجریان سو در شمال اطلس به اندازه کافی قوی باشد، بسته موج در دریای مدیترانه رشد خواهد کرد. آنها همچنین نشان دادند که مسیر توفان مدیترانه تحت تأثیر NAO قرار می‌گیرد. بنابراین نتایج مطالعات انجام شده نشان‌دهنده آن است که الگوی دورپیوندی NAO، می‌تواند تغییراتی در مسیرهای توفان اطلس و مدیترانه ایجاد کند. همچنین در زمینه نقش افت و خیزهای نوسان اطلس شمالی بر مناطقی نظیر اروپا، اقیانوس اطلس و مدیترانه پژوهش‌های فراوانی صورت گرفته است که برای نمونه می‌توان به هارل (۱۹۹۶)، شبارو و همکاران (۱۹۹۷) و تامسون و والاس (۱۹۹۸) اشاره کرد. همچنین شواهد زیادی نشان می‌دهند مسیر توفان اطلس شمالی روی منطقه مدیترانه اثرگذار است (هارل، ۱۹۹۵؛ هارل و ونلون، ۱۹۹۷؛ رادول و همکاران، ۱۹۹۹؛ اشل و فارل، ۲۰۰۰؛ اشل و همکاران، ۲۰۰۰) و این مسیر توفان می‌تواند روی مناطق واقع در جریان سو مثل غرب آسیا نیز مؤثر باشد (واتاناب، ۲۰۰۴). بنابراین انتظار می‌رود که مسیرهای توفان اطلس و مدیترانه تحت تأثیر NAO باشند (مارتیوس و همکاران، ۲۰۰۷؛ نصراصفهانی و همکاران، ۱۳۸۷؛ نصراصفهانی و همکاران، ۱۳۸۹؛ رضاییان و همکاران، ۱۳۹۳).

با توجه به آن که هنگام تغییر فاز NAO، میانگین سرعت و جهت باد، انتقال رطوبت و گرما، شدت و فراوانی چرخندها، مسیر چرخندها و ویژگی آنها بر روی اطلس و نواحی همجوار آن تغییر می‌کند و وضع هوای خاورمیانه و ایران را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد، مطالعه تغییرات ایجاد شده در ساختار مسیرهای توفان به هنگام تغییر فاز این الگو، اهمیت فراوان دارد. در پژوهش حاضر، از دو مجموعه داده بازتحلیل NCEP/NCAR و JRA-55 در بازه زمانی ۱۹۵۹ تا ۲۰۱۷ استفاده شده است. از آنجا که اساس کار پژوهش‌های اقلیمی، تحلیل‌های دینامیکی، همدیدی و محاسبات آماری می‌باشد، لذا استفاده از داده‌های باکیفیت حائز اهمیت فراوان است. داده‌های

از انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر میانگین که آن را تولید کژفشار می‌نامند، می‌تواند اطلاعات سودمندی در مورد چرخه انرژی به ما بدهد. چنگ و همکاران (۲۰۰۲)، معادله بودجه انرژی پیچکی کل را به صورت زیر بیان نمودند:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{v}E + v_a \phi') + \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\theta}} \frac{v' \theta'}{\left(\frac{d\bar{\theta}}{dp}\right)} \cdot \nabla \bar{\theta} - \mathbf{v}' \cdot (\mathbf{v}' \cdot \nabla) \bar{v} - \text{diss} + \text{diab}, \quad (2)$$

به طوری که

$$E = \left(-\frac{\bar{\alpha}}{2\bar{\theta}} \theta'^2 / \left(\frac{d\bar{\theta}}{dp} \right) \right) + K. \quad (3)$$

E انرژی پیچکی کل را نشان می‌دهد که از مجموع انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر پیچکی و انرژی جنبشی پیچکی به دست می‌آید. در رابطه (۲) خط تیره بالای کمیت‌ها نشانگر میانگین زمانی (فصلی) و $\bar{\theta}$ معرف میانگین $\bar{\theta}$ روی سطح افقی است. نام‌گذاری بقیه متغیرها مشابه رابطه (۱) است. جمله اول در سمت راست معادله (۲)، همگرایی شار انرژی کل است که از ترکیب دو جمله شار آزمینگرد ژئوپتانسیل و شار فرارفتی به دست آمده و تکوین جریان‌سو را نشان می‌دهد. جمله دوم، تولید کژفشار، BCG (BaroClinic Generation) نامیده می‌شود که بیانگر میزان تبدیل انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر میانگین به انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر پیچکی می‌باشد. جمله سوم تبدیل فشارورد، جمله چهارم اتلاف مکانیکی و جمله پنجم تولید بادررو است.

۳. داده‌ها و روش کار

در این پژوهش برای بررسی اثر NAO بر مسیرهای توفان، از دو مجموعه داده بازتحلیل: (۱) NCEP/NCAR دارای تفکیک افقی ۲/۵ درجه در راستاهای طول و عرض جغرافیایی و شامل ۱۷ تراز در راستای قائم از ۱۰ hPa - ۱۰۰۰ و (۲) JRA-55 دارای تفکیک افقی ۱/۲۵ درجه در راستاهای طول و عرض جغرافیایی و شامل ۳۷ تراز در راستای قائم از ۱ hPa - ۱۰۰۰، در بازه زمانی ۱۹۵۹ تا ۲۰۱۷ و در فصل زمستان استفاده شده است. داده‌های

در این رابطه، خط تیره بالای کمیت‌ها نشانگر میانگین زمانی (فصلی)، کمیت‌های پریم‌دار بیانگر انحراف از میانگین زمانی، زیرنویس a نشان‌دهنده باد آزمینگرد و زیرنویس ۳ بیانگر بردارها و عملگرهای سه‌بعدی هستند. بردارهایی که زیرنویس ندارند، بردارهای افقی هستند. K انرژی جنبشی پیچکی بر واحد جرم، t زمان، \mathbf{v} سرعت افقی، ω سرعت قائم فشاری، ϕ ژئوپتانسیل، p فشار و α حجم ویژه است. جمله اول در سمت راست رابطه بالا، معرف همگرایی افقی شار انرژی کل، CTF (Convergence of Total Flux)، است که از مجموع شارهای فرارفتی و آزمینگرد انرژی به دست می‌آید. نحوه انتقال انرژی را از نظر جهت و بزرگی نشان می‌دهد. جمله دوم، تبدیل کژفشار، BCC (BaroClinic Conversion)، نام دارد که نشان‌دهنده تبدیل انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر پیچکی به انرژی جنبشی پیچکی می‌باشد. جمله‌های سوم و چهارم، تنش رینولدز هستند و با چینش افقی باد مشخص می‌شوند که تبدیل فشارورد، BTC (BaroTropic Conversion)، نامیده می‌شوند. BTC، نشان‌دهنده تبدیل انرژی جنبشی پیچکی به انرژی جنبشی میانگین شاره و به عکس است. میانگین زمانی جمله سوم، BTC1، را می‌توان به عنوان تبدیل انرژی جنبشی میانگین و EKE به یکدیگر تفسیر کرد. میانگین جمله چهارم، BTC2، نیز بیانگر تبدیل EKE به انرژی جنبشی گذراها است. جمله پنجم، همگرایی شار فرارفتی در راستای قائم و جمله ششم، همگرایی شار آزمینگرد در راستای قائم را نشان می‌دهند. از آنجا که جمله‌های چهارم، پنجم و ششم مقادیر قابل ملاحظه‌ای ندارند (نصراصفهانی و همکاران، ۲۰۱۱)، در نتایج آورده نمی‌شوند. جمله آخر، باقیمانده بودجه انرژی شامل اثرات اصطکاک و خطای ناشی از درونیایی را نشان می‌دهد.

بر اساس چرخه انرژی لورنتس، انرژی جنبشی مداری از تبدیل EKE به دست می‌آید (هولتن، ۲۰۰۴) و EKE نیز از تبدیل انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر پیچکی حاصل می‌شود. بنابراین، بررسی تولید انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر پیچکی

بحرانی منفی و خنثی، از شاخص ماهانه NAO برگرفته از مرکز NOAA (<http://www.cpc.noaa.gov/>)، استفاده شده است. برای تهیه سه مجموعه فوق، ابتدا میانگین و انحراف معیار شاخص‌های ماهانه تمام ماه‌های مورد بررسی در دوره ۲۰۱۷-۱۹۵۹ (۱۷۷ ماه)، محاسبه شد. سپس، ماه‌هایی که شاخص آنها از میانگین به علاوه (منهای) یک انحراف معیار بزرگ‌تر (کوچک‌تر) بودند، در مجموعه ماه‌های بحرانی مثبت (منفی) قرار گرفته و بقیه ماه‌ها، در مجموعه ماه‌های خنثی دسته‌بندی شدند. با این روش، در بازه مورد مطالعه، ۲۸ ماه بحرانی مثبت (NAO+)، ۳۶ ماه بحرانی منفی (NAO-) و ۱۱۳ ماه خنثی شناسایی شد.

پس از طبقه‌بندی فازهای NAO، برای بررسی نوسان اطلس شمالی و درک بهتر نحوه اثرگذاری آن بر مسیرهای توفان، نقشه‌های ترکیبی میدان‌های انرژی، به‌طور جداگانه برای هر یک از سه مجموعه NAO+، NAO- و فاز خنثی رسم شد. به‌علاوه، برای مقایسه بهتر مسیرهای توفان در فازهای مثبت و منفی NAO، تفاضل فاز مثبت از منفی نیز برای EKE رسم شد. با فرض اینکه مجموعه خنثی، میانگین درستی از مجموعه NAO به‌دست می‌دهد، به‌منظور تعیین معناداری آماری نتایج حاصل برای مجموعه‌های بحرانی مثبت و منفی، از مجموعه خنثی استفاده شده است. در محاسبه معناداری آماری هر مجموعه همادی، آزمون t دوطرفه به‌کار رفته است. نتایج معناداری آماری فقط برای اختلاف فازهای مثبت و منفی بحرانی آورده شده است.

در بخش ۴ به‌منظور بررسی مسیرهای توفان و ارتباط آنها با فازهای NAO، نتایج محاسبات انرژی‌تیک حاصل از دو مجموعه داده NCEP/NCAR و JRA-55 در فازهای مثبت و منفی، تحلیل و مقایسه شده و نقش مؤثر عوامل تقویت و تضعیف انرژی جنبشی پیچکی در مناطق مختلف بررسی می‌شود. برای رعایت اختصار از ذکر نتایج جمله تبدیل فشارورد که به‌دلیل ساختار بزرگ‌مقیاس‌تر آن نسبت به تبدیل کثرفشار عدم قطعیت کمتری در مورد نتایج

بازتحلیل ژاپنی JRA-55، علاوه بر تفکیک فضایی بالاتر، دارای مزیت‌های دیگری نسبت به داده‌های بازتحلیل NCEP/NCAR می‌باشند که شامل: (۱) اجرای طرحواره جدید برای تابش، (۲) داده‌گذاری چهاربعدی (4D-Var)، به همراه تصحیح ورودی اُریبی (Variational Bias Correction) برای به‌دست آوردن تابندگی ماهواره و (۳) وارد کردن گازهای گلخانه‌ای، به‌گونه‌ای که غلظت آنها با زمان تغییر می‌کند، هستند. علاوه بر اینها، در بازتحلیل JRA-55، از منابع گوناگونی برای داده‌های مشاهداتی استفاده شده است. در واقع، JRA-55 نه تنها اولین مجموعه بازتحلیلی است که تحلیل ورودی چهاربعدی (4-dimensional variational analysis) را به کار گرفته است، بلکه مشکلات موجود در داده‌های بازتحلیل قبلی را یافته و یک مجموعه داده جامع که برای مطالعه تغییرپذیری چنددهه‌ای و تغییر اقلیم مناسب باشد، ارائه کرده است (کوبایاشی و همکاران، ۲۰۱۵). از طرفی، چون در پژوهش‌های فراوانی از داده‌های بازتحلیل NCEP/NCAR استفاده شده است، بنابراین می‌توان این داده‌ها را به‌عنوان مبنای محاسبات دیگر استفاده کرد. با توجه به اینکه یکی از مزایای داده‌های بازتحلیل JRA-55 تفکیک بالاتر آن است، داده‌های JRA-55 به تفکیک پایین‌تر داده‌های NCEP/NCAR شبکه‌بندی نشده و با همان تفکیک افقی ۱/۲۵ درجه خود مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در این پژوهش از مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد، ارتفاع ژئوپتانسیلی، دما و سرعت قائم فشاری در فصل زمستان (دسامبر، ژانویه و فوریه) و در ساعت 00 استفاده شده است. با به‌کار بردن این کمیت‌ها، میانگین قائم (از ۱۰۰۰ تا ۱۰۰ hPa) میدان‌های EKE و جملات مهم رابطه (۱) و تولید کثرفشار (جمله دوم رابطه ۲) برای هر ماه محاسبه شد. با توجه به اینکه ۵۹ سال و برای هر سال سه ماه زمستان مورد مطالعه قرار گرفتند، ۱۷۷ خروجی برای هر میدان به‌دست آمد.

برای طبقه‌بندی فازهای NAO به سه دسته بحرانی مثبت،

آن وجود دارد، در بخش ۴ صرف نظر شده است.

۴. میانگین انرژی جنبشی پیچکی و جملات مؤثر در گرایش زمانی آن

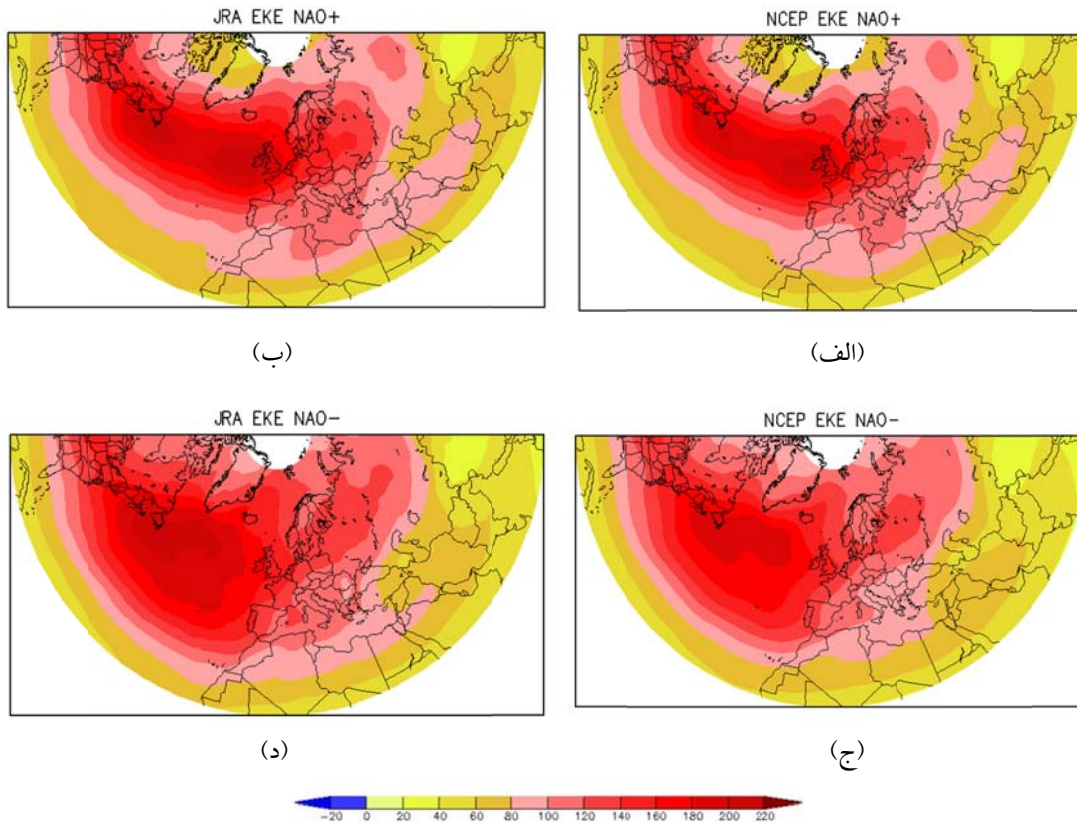
توزیع مقادیر میانگین EKE با استفاده از داده‌های بازتحلیل NCEP/NCAR و JRA-55، برای فازهای بحرانی مثبت و منفی NAO در شکل ۱ دیده می‌شود. بیشینه‌های انرژی جنبشی پیچکی منطبق با مسیرهای توفان هستند. به طور کلی مسیر توفان اطلس در زمستان نیمکره شمالی، اغلب در عرض‌های میانی بیشینه است و به صورت مداری از غرب اطلس شمالی به طرف اروپا گسترش می‌یابد. توزیع EKE در تمام فازها، دو مسیر اصلی بیشینه فعالیت پیچکی در نیمکره شمالی را که با نتایج لی (۲۰۰۰) همخوانی دارد به وضوح نشان می‌دهد. در نتایج JRA-55، مسیر توفان اطلس در فاز خنثی ۱۰ درصد قوی‌تر است (شکل آورده نشده است). همچنین این داده‌ها، EKE در منطقه مدیترانه و بخش‌هایی از منطقه خاورمیانه شامل ایران و دریای سرخ را بزرگ‌تر نشان می‌دهند که بیانگر قوی‌تر بودن مسیر توفان مدیترانه به دست آمده از داده‌های JRA-55 است.

در فاز مثبت NAO، انرژی جنبشی پیچکی دارای دو هسته بیشینه با مقادیر حدود $220 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ، یکی در شرق و دیگری در غرب اقیانوس اطلس است. هر دو بیشینه به یک اندازه قوی هستند، ولی بیشینه واقع در نواحی شرقی اقیانوس اطلس و غرب اروپا گسترده‌تر است؛ ضمناً هر دو بیشینه واقع بر روی اقیانوس اطلس، در نتایج JRA-55 گسترده‌گی بیشتری دارند که حاکی از قوی‌تر بودن مسیر توفان اطلس حاصل از داده‌های JRA-55 است. همچنین هر دو مجموعه داده در فاز مثبت، یک کشیدگی در راستای شمال شرق، در بیشینه EKE به سمت شمال غرب اروپا در اقیانوس اطلس را نشان می‌دهند که بیانگر انحراف شمال‌سوی مسیر توفان اطلس در فاز مثبت است.

به بیان دیگر، در فاز مثبت توفان‌های (پیچک‌های) اقیانوس اطلس به سمت شمال اروپا حرکت می‌کنند، در حالی که در فاز منفی این طور نیست.

در فاز منفی NAO، بیشینه EKE در مرکز و غرب اقیانوس اطلس واقع شده و دارای کشیدگی مداری است. در این فاز، نتایج NCEP/NCAR بیشینه انرژی جنبشی پیچکی را حدود $200 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ (کمتر از فاز مثبت) نشان می‌دهد، ولی در نتایج JRA-55 بزرگی بیشینه EKE همانند فاز مثبت، حدود $220 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ مشاهده می‌شود. بنابراین با توجه به نتایج NCEP/NCAR، در فاز مثبت NAO، بیشینه EKE در ناحیه مسیر توفان اطلس بیشتر از فاز منفی است؛ حال آن‌که، شدت هسته مسیر توفان اطلس که از داده‌های JRA-55 به دست آمده است، در دو فاز NAO تفاوت چندانی ندارد. نه تنها نتایج JRA-55 هسته مسیر توفان اطلس در فاز منفی را قوی‌تر از NCEP/NCAR نشان می‌دهد، بلکه هر دو شاخه شمالی و جنوبی مسیر توفان اطلس حاصل از JRA-55 در فاز منفی قوی‌تر و گسترده‌تر از مشابه آن در NCEP/NCAR است، همچنین در فاز منفی، نتایج JRA-55 مسیر توفان مدیترانه را نیز قوی‌تر نشان می‌دهد.

هر دو مجموعه داده در فاز منفی، شاخه‌ای از EKE که از اقیانوس اطلس به طرف عرض‌های پایین‌تر کشیده شده و به سمت دریای مدیترانه و قاره آفریقا گسترش دارد را نشان می‌دهند. در واقع، منطقه مدیترانه در فاز منفی تحت تأثیر چرخندهای شکل گرفته در غرب اقیانوس اطلس است، ولی در فاز مثبت، متأثر از چرخندهای تقویت شده در شمال شرق اقیانوس اطلس می‌باشد. بنابراین با توجه به مطالب فوق، می‌توان این طور نتیجه‌گیری کرد که سازگار با نتایج نصرافهانی و همکاران (۲۰۱۱)، ارتباط مسیرهای توفان اطلس و مدیترانه در فاز مثبت NAO ضعیف‌تر از فاز منفی بوده و مسیر توفان مدیترانه در فاز مثبت عملکرد مستقلی از خود نشان می‌دهد.

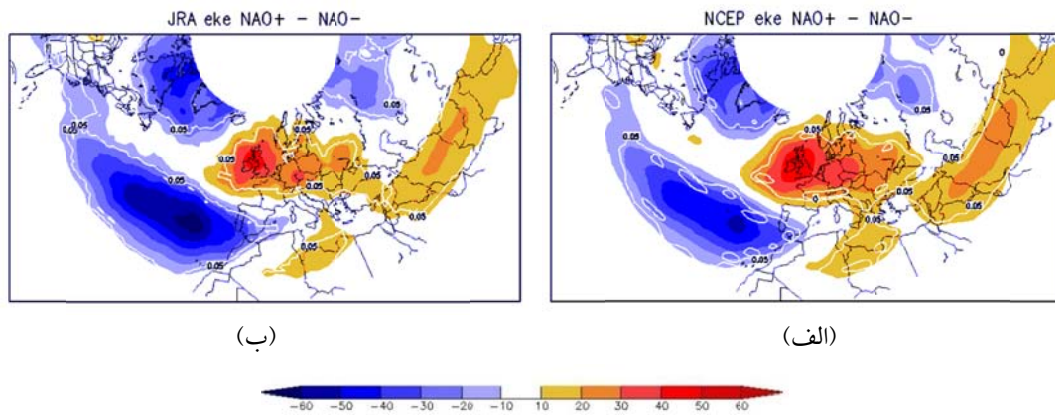


شکل ۱. توزیع میانگین انرژی جنبشی پیچکی (برحسب m^2s^{-2}) در دوره ۲۰۱۷-۱۹۵۹ برای ماه‌های بحرانی مثبت (الف و ب) و منفی (ج و د) با استفاده از داده‌های NCEP/NCAR (الف و ج) و ERA-55 (ب و د).

که بیانگر انحراف شمال‌سوی مسیر توفان اطلس در فاز مثبت است. در نتایج NCEP/NCAR (شکل ۲الف) اختلاف بیشتری بین دو فاز در شمال اروپا وجود دارد که از ضعیف‌تر بودن مسیر توفان اطلس نتایج این مجموعه داده در فاز منفی نسبت به مشابه آن حاصل از نتایج JRA-55 نشأت می‌گیرد. همچنین، در طول نواری که به‌طور مداری بر روی خاورمیانه و ایران کشیده شده است، EKE در فاز مثبت حدود $30 m^2s^{-2}$ بیشتر از فاز منفی است؛ این موضوع می‌تواند به دلیل قوی‌تر بودن جت جنب‌حاره در فاز مثبت NAO باشد. EKE در مرکز مدیترانه و شمال آفریقا نیز در فاز مثبت حدود $20 m^2s^{-2}$ قوی‌تر از فاز منفی است.

با توجه بیشتر به منطقه مدیترانه در نتایج هر دو مجموعه داده، مشاهده می‌شود که میانگین EKE در این ناحیه در دو فاز NAO تفاوت چندانی ندارد ولی با حرکت به سمت شرق، مقدار آن در فاز مثبت زیادتر می‌شود و می‌توان گفت که مسیر توفان مدیترانه در فاز مثبت قوی‌تر است. منطقه ایران نیز در این فاز بیشتر تحت تأثیر چرخندها قرار می‌گیرد و در آن EKE تا حدود $100 m^2s^{-2}$ می‌رسد.

در شکل ۲ نتایج دو مجموعه داده برای اختلاف EKE در فازهای مثبت و منفی دیده می‌شود. به‌طور کلی، در شمال شرق اقیانوس اطلس و اروپا، به‌ویژه در نزدیکی جزایر بریتانیا، اختلاف انرژی جنبشی پیچکی بین دو فاز، مقادیر بزرگ مثبتی در حدود $50 m^2s^{-2}$ نشان می‌دهد



شکل ۲. توزیع میانگین انرژی جنبشی پیچکی (برحسب m^2s^{-2}) در دوره ۱۹۵۹-۲۰۱۷ برای اختلاف فازهای بحرانی (مثبت منهای منفی) با استفاده از داده‌های (الف) NCEP/NCAR و (ب) JRA-55. معناداری آماری برای سطح ۰/۰۵ با خطوط سفید مشخص شده است.

نتایج هر دو مجموعه داده، بیشترین تبدیل کثرفشار در غرب اقیانوس اطلس وجود دارد؛ به طوری که در فاز مثبت (شکل‌های ۳الف و ۳ب) مقادیر بیشینه بزرگ‌تری نسبت به فاز منفی (شکل‌های ۳ج و ۳د) مشاهده می‌شود. به طور کلی، بیشینه انرژی جنبشی پیچکی (شکل ۱)، در جریان‌سوی بیشینه تبدیل کثرفشار (شکل ۳) قرار دارد. در واقع، تبدیل کثرفشار در مناطق با کثرفشاری شدید، یعنی غرب اقیانوس اطلس یا به عبارتی پادجریان‌سوی مسیر توفان، قوی می‌باشد. در هر دو فاز، به‌ویژه در فاز منفی، نتایج داده‌های JRA-55 مقادیر بزرگ‌تری از بیشینه تبدیل کثرفشار در غرب اقیانوس اطلس نشان می‌دهند (شکل ۳د). به بیانی داده‌های JRA-55 نشان‌دهنده اختلاف ۲۰ درصدی مقدار BCC در ورودی مسیر توفان اطلس نسبت به داده‌های NCEP/NCAR (شکل ۳ج) در فاز منفی هستند. بنابراین این تغییر قابل توجه BCC در نتایج JRA-55، تأثیر محسوسی در قوی‌تر نشان دادن هسته مسیر توفان اطلس حاصل از این داده‌ها، به‌ویژه در فاز منفی، دارد. در قاره اروپا، در فاز مثبت، بیشینه تبدیل کثرفشار در شمال و شمال‌غرب آن رخ می‌دهد (شکل‌های ۳الف و ۳ب)؛ در حالی که در فاز منفی (شکل‌های ۳ج و ۳د)، تبدیل کثرفشار در غرب و جنوب این قاره مقادیر بزرگی دارد. این اختلاف واضح در توزیع BCC، با این یافته که مسیر

با توجه به شکل ۲، در مناطق جنب‌حاره‌ای اقیانوس اطلس و در نزدیکی جنوب‌غرب مدیترانه و غرب آفریقا، در نتایج هر دو مجموعه داده، مقادیر بزرگ منفی دیده می‌شود. در واقع در فاز منفی NAO، پیچک‌هایی با انرژی جنبشی بیشتر از این منطقه عبور می‌کنند که انحراف جنوب‌سوی مسیر توفان اطلس در فاز منفی و تأثیر بیشتر آن در غرب منطقه مدیترانه و آفریقا را نشان می‌دهد. نتایج JRA-55 دارای اختلاف بیشتری بین فازهای مثبت و منفی در نواحی جنب‌حاره‌ای اطلس است (شکل ۲ب). این اختلاف بزرگ بین دو فاز، از بزرگ‌تر بودن EKE این داده‌ها در فاز منفی، نسبت به مشابه آن حاصل از داده‌های NCEP/NCAR ناشی می‌شود.

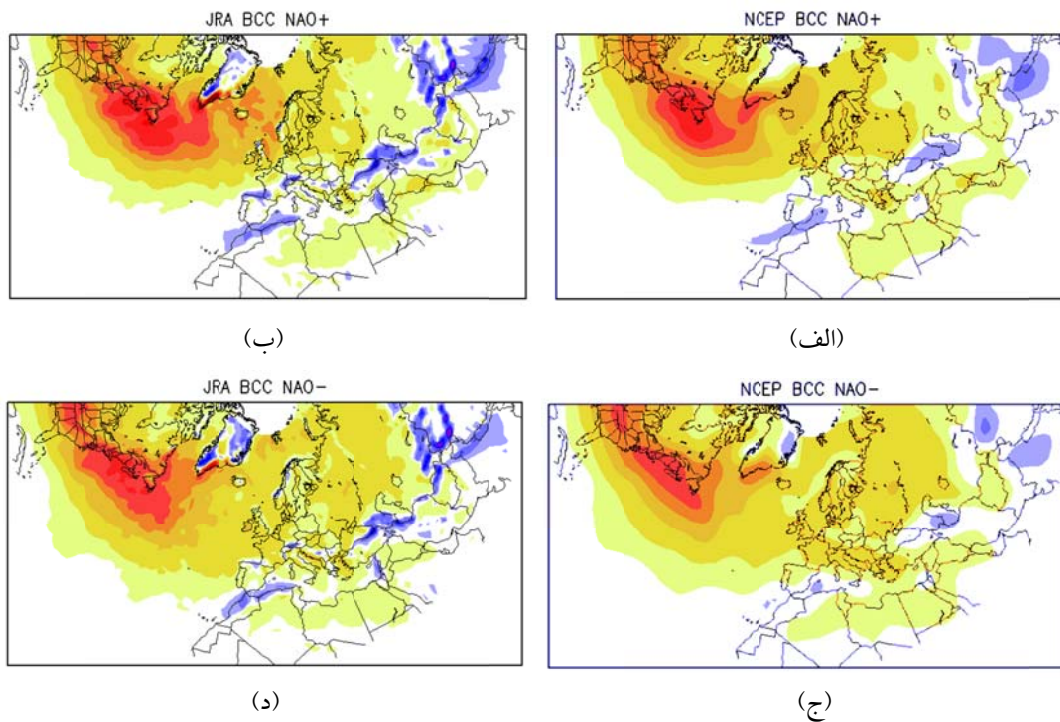
توزیع مقادیر میانگین جمله تبدیل کثرفشار برای فازهای بحرانی مثبت و منفی NAO با استفاده از داده‌های بازتحلیل NCEP/NCAR و JRA-55 در شکل ۳ ارائه شده است. در فازهای بحرانی NAO، جمله تبدیل کثرفشار در عرض‌های میانی بیشینه بوده و در نواحی جنب‌حاره‌ای به دلیل کثرفشاری ضعیف‌تر دارای مقادیر کمتری است. به‌علاوه در اکثر مناطق، تبدیل کثرفشار مقدار مثبت دارد که نشان‌دهنده غالب بودن تبدیل انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر پیچکی به انرژی جنبشی پیچکی است، حال آن‌که خلاف آن کمتر رخ می‌دهد. در هر دو فاز و در

است. بنابراین با توجه به مطالب فوق که با نتایج نصراصفهان‌ی و همکاران (۲۰۱۱) همخوانی دارد، در فاز منفی NAO مسیر توفان مدیترانه به انتهای جریان‌سوی مسیر توفان اطلس متصل است؛ داده‌های NCEP/NCAR ارتباط دو مسیر توفان در فاز منفی را از لحاظ توزیع BCC بهتر نشان می‌دهند. در فاز مثبت NAO، این منطقه کُرفشاری از مسیر توفان اطلس جدا شده و در اثر آن، دو مسیر توفان به طور مستقل عمل کرده و با یکدیگر برهم‌کنش کمتری دارند.

در نتیجه می‌توان گفت در فاز مثبت NAO، با وجود اینکه انرژی جنبشی پیچکی در منطقه مدیترانه قوی‌تر است، این منطقه از سامانه‌هایی که از سمت غرب اقیانوس اطلس به طرف شرق حرکت می‌کنند، کمتر متأثر می‌شود. در ضمن در هر دو فاز، تبدیل کُرفشار در غرب مدیترانه مقادیر بزرگی ندارد؛ یعنی انرژی در این منطقه باید از طریق دیگری تأمین شود که در توضیح شکل ۵ به این موضوع پرداخته خواهد شد.

توفان اطلس در فاز مثبت (منفی) به عرض‌های بالاتر (پایین‌تر) کشیده شده و شمال اروپا (منطقه مدیترانه و جنوب‌اروپا) را تحت تأثیر قرار می‌دهد، در توافق است. نتایج داده‌های JRA-55 در فاز مثبت NAO (شکل ۳ب)، در بخش‌هایی از شمال‌شرق اقیانوس اطلس و مرزهای غربی اروپا، دارای اختلاف ۳۰ درصدی BCC نسبت به نتایج داده‌های NCEP/NCAR (شکل ۳الف) است که می‌تواند در قوی‌تر نشان دادن شاخه شمالی مسیر توفان اطلس حاصل از JRA-55، نقش به‌سزایی داشته باشد. در واقع، در این منطقه اختلاف کُرفشاری بین دو فاز، در نتایج JRA-55 قابل توجه است.

مطابق شکل ۳، در هر دو فاز NAO، در مناطق جنب‌حاره از شمال آفریقا تا جنوب‌غرب آسیا و ایران، یک ناحیه بیشینه BCC با مقدار حدود $30 \text{ m}^2\text{s}^{-2}\text{day}^{-1}$ در راستای مداری قرار گرفته است. این نوار بیشینه نسبی منطبق بر مسیر توفان مدیترانه می‌باشد. می‌توان گفت توزیع BCC بر نحوه ارتباط مسیرهای توفان اطلس و مدیترانه اثرگذار



شکل ۳. مانند شکل اولی برای جمله تبدیل کُرفشار (برحسب $\text{m}^2\text{s}^{-2}\text{day}^{-1}$).

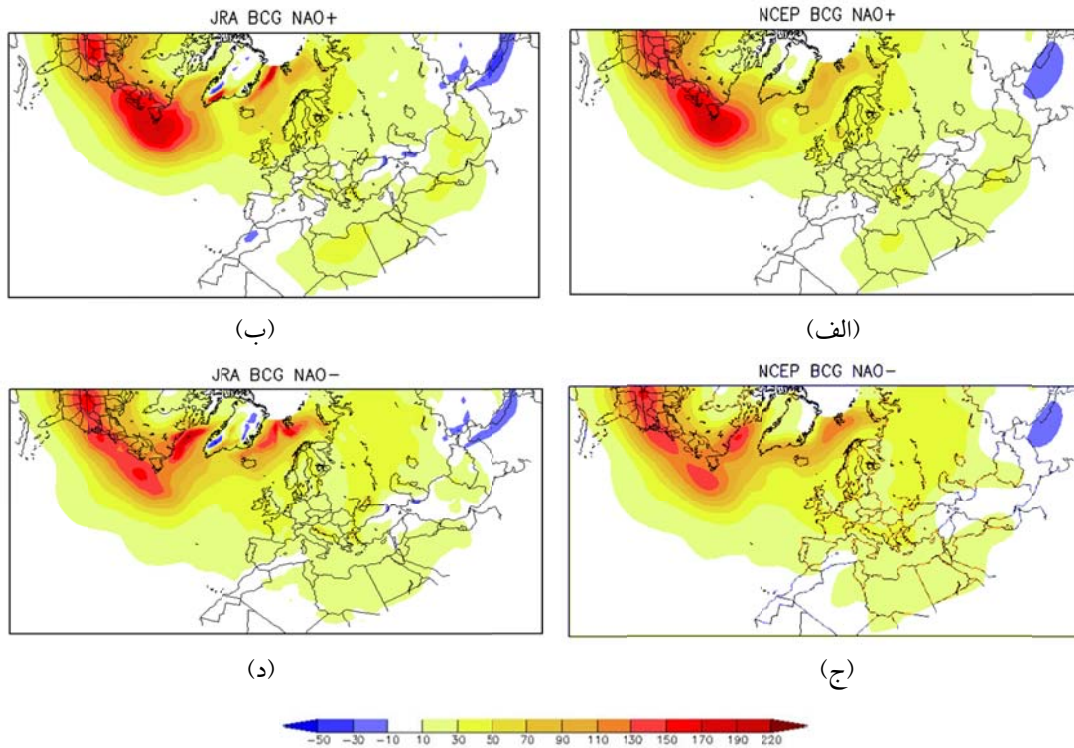
بزرگ‌تری است و اختلاف ۱۵ درصدی مقدار BCG در ورودی مسیر توفان اطلس، نسبت به نتایج داده‌های NCEP/NCAR دیده می‌شود. قوی‌تر بودن کژفشاری در نتایج JRA-55 می‌تواند به علت بزرگ‌تر بودن مقادیر سرعت قائم حاصل از این داده‌ها باشد. از آنجا که کژفشاری عامل اصلی در تقویت مسیر توفان اطلس است، بنابراین، این تغییر قابل توجه BCG در غرب اقیانوس اطلس در نتایج JRA-55، سبب می‌شود که این داده‌ها مسیر توفان اطلس را در این منطقه، به‌ویژه در فاز منفی، قوی‌تر نشان دهند.

با توجه به شکل ۴، در هر دو فاز، نتایج داده‌های JRA-55 در شمال اقیانوس اطلس دارای مقادیر بزرگ‌تری از BCG (مشابه BCC) نسبت به نتایج داده‌های NCEP/NCAR است، به‌طوری‌که اختلاف در نتایج دو مجموعه داده حداقل ۳۰ درصد است. بنابراین بدیهی است که نتایج JRA-55 تقویت بیشتر انرژی جنبشی پیچکی در این مناطق را نشان دهد.

به‌طور کلی در همه فازها، BCG در مناطق مدیترانه و خاورمیانه دارای مقادیر کوچکی در حدود $30 \text{ m}^2\text{s}^{-2}\text{day}^{-1}$ است (شکل ۴)؛ یعنی تولید کژفشار عامل اصلی در تقویت چرخندهای مدیترانه نمی‌باشد. نحوه جهت‌گیری (انحراف) مسیر توفان اطلس و ارتباط آن با مسیر توفان مدیترانه در فازهای مختلف NAO، در توزیع BCG نیز آشکار بوده (هر دو مجموعه داده) و این امر بیانگر نقش غالب کژفشاری در تعیین ساختار مسیر توفان است. در نتیجه، بر مبنای BCG هم می‌توان استنباط کرد که ارتباط مسیر توفان مدیترانه و مسیر توفان اطلس در فاز مثبت NAO ضعیف‌تر از فاز منفی است. همان‌طور که پیش‌تر در مورد BCC بیان شد، داده‌های NCEP/NCAR انحراف جنوب‌سوی مسیر توفان اطلس به سمت جنوب اروپا و ارتباط دو مسیر توفان در فاز منفی را در توزیع BCG بهتر از داده‌های JRA-55 نمایش می‌دهند.

در شکل ۴ توزیع مقادیر میانگین جمله تولید کژفشار برای فازهای بحرانی مثبت و منفی NAO با استفاده از دو مجموعه داده ارائه شده است. همانند شکل ۳، در اکثر مناطق، BCG مقدار مثبت دارد که نشان‌دهنده چیرگی تبدیل انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر میانگین به پیچکی در عرض‌های میانی است. از مقایسه شکل‌های ۳ و ۴ می‌توان گفت، مناطقی که BCG مثبت در آنها اتفاق می‌افتد، منطبق با مناطقی است که تبدیل انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر پیچکی به انرژی جنبشی پیچکی در آنها رخ می‌دهد. به بیان دیگر، BCG چشمه انرژی پتانسیل پیچکی و BCC چاه انرژی پتانسیل پیچکی و چشمه انرژی جنبشی پیچکی می‌باشد. معمولاً مصرف انرژی پتانسیل پیچکی توسط BCC کمتر از تولید انرژی پتانسیل پیچکی توسط BCG بوده و مجموع آنها صفر نیست.

همان‌طور که در نتایج هر دو مجموعه داده آشکار است (شکل ۴)، بیشینه BCG همانند بیشینه BCC در عرض‌های میانی که کژفشاری شدید است، قرار دارد. از طرفی، چون در حاشیه غربی اقیانوس‌ها شیو دمایی بزرگی بین خشکی و دریا وجود دارد، بیشینه BCC و BCG نیز در غرب اقیانوس‌ها و در عرض‌های میانی اتفاق می‌افتد. با وجود آن‌که کژفشاری در غرب اقیانوس اطلس بیشینه است، ولی بیشینه انرژی پیچک‌ها در جریان‌سوی آن و در شرق اقیانوس قرار دارد که این موضوع به‌وضوح انتشار انرژی به جریان‌سو را نشان می‌دهد. بنابراین، BCG در ورودی مسیر توفان حائز اهمیت است و مقدار زیادی از انرژی حاصل پس از تبدیل به EKE، از طریق تکوین جریان‌سو به پایین دست انتقال می‌یابد. در نتایج هر دو مجموعه داده، بیشینه BCG در شرق آمریکای شمالی واقع در پادجریان‌سوی مسیر توفان اطلس در فاز مثبت (شکل‌های ۴الف و ۴ب) مقادیر بزرگ‌تری نسبت به فاز منفی (شکل‌های ۴ج و ۴د) دارد؛ اما در هر دو فاز و به‌ویژه فاز منفی، این بیشینه در نتایج داده‌های JRA-55 دارای مقادیر



شکل ۴. مانند شکل ۱ ولی برای جمله تولید کژفشار (برحسب $m^2s^{-2}day^{-1}$).

توفان و نیز ارتباط مسیرهای توفان مدیترانه و اطلس در فاز منفی سازگار است.

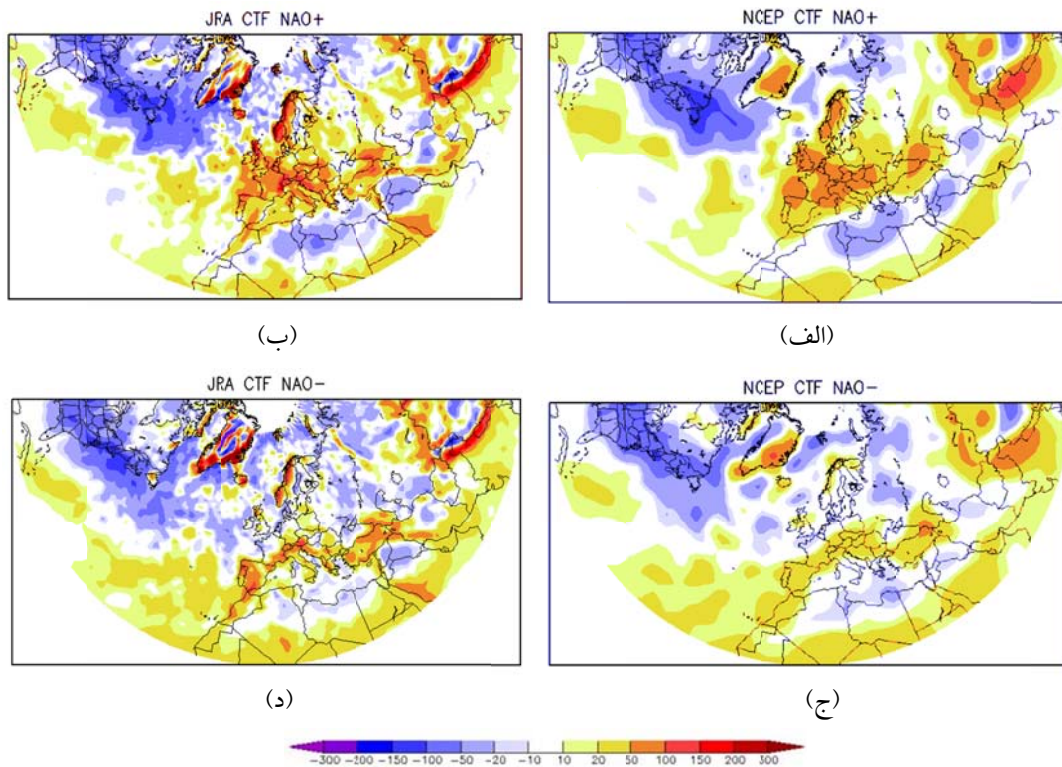
علاوه بر غرب و شرق اقیانوس‌ها که عواملی همچون تبدیل‌های کژفشار و فشارورد سهم عمده‌ای در تقویت و تضعیف پیچک‌ها دارند، در مناطق دیگر، همگرایی و واگرایی شار نقش مهمی در انتقال انرژی و تولید و تضعیف سامانه‌ها دارد که این موضوع اهمیت تکوین جریان‌سو را نشان می‌دهد. توزیع مقادیر میانگین همگرایی شار کل (مجموع فرارفتی و آزمینگرد) و همگرایی شار آزمینگرد برای فازهای بحرانی مثبت و منفی NAO با استفاده از دو مجموعه داده به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ دیده می‌شود. با توجه به شکل ۵، در غرب اقیانوس اطلس، واگرایی شار کل و در شرق اقیانوس اطلس و اروپا، همگرایی شار کل دیده می‌شود که مسیر توفان اطلس را مشخص می‌کند. بنابراین غرب اطلس، منطقه گسیل انرژی و شرق آن، منطقه دریافت انرژی است. به‌علاوه، واگرایی شار کل در مرکز و شرق دریای

براساس شکل ۴، اختلاف واضحی (حدود $m^2s^{-2}day^{-1}$ ۳۰) بین فازهای مثبت و منفی NAO حاصل از هر دو مجموعه داده، در ناحیه تولید کژفشار که از شمال آفریقا به جنوب غرب آسیا و ایران کشیده شده است، مشاهده می‌شود. تولید کژفشار حاصل از هر دو دسته داده در فاز مثبت NAO، در شرق و جنوب غرب ایران و همچنین شمال آفریقا، بزرگ‌تر از فاز منفی است. همچنین در فاز مثبت، نتایج JRA-55 در مناطق فوق دارای گستردگی بیشتر و مقادیری بزرگ‌تر از نتایج NCEP/NCAR در این فاز هستند. بنابراین BCG می‌تواند به‌عنوان عامل تقویت فعالیت همدیدی در این مناطق در فاز مثبت، به‌ویژه در نتایج JRA-55 معرفی شود. از سوی دیگر، در نواحی جنب‌حاره‌ای شرق اقیانوس اطلس، جنوب و غرب اروپا (به‌ویژه بر روی فرانسه) و سواحل شمالی دریای مدیترانه، تولید کژفشار در فاز منفی حدود $m^2s^{-2}day^{-1}$ ۲۰ از فاز مثبت بزرگ‌تر است (شکل ۴). این وضعیت با افزایش انرژی پیچکی در این منطقه، انحراف جنوب‌سوی مسیر

مسیر توفان اطلس، در فاز مثبت در منطقه وسیعی و در عرض‌های بالاتر (به‌ویژه مرکز، غرب و شمال اروپا) و در فاز منفی، در عرض‌های پایین‌تر (شمال و غرب دریای مدیترانه و نواحی جنب‌حاره‌ای اقیانوس اطلس) قرار می‌گیرد و مقدار آن در فاز مثبت بیشتر از فاز منفی است. از طرفی، در بخش‌هایی از مرکز و شمال اروپا، مراکز واگرایی در فاز منفی وجود دارند که سبب تضعیف انرژی پیچک‌های گذرا در این فاز می‌شوند؛ در حالی که در فاز مثبت این منطقه واگرایی وجود نداشته و همگرایی شار انرژی کل در این منطقه، افزایش EKE را به همراه دارد. در نتیجه همگرایی شار یکی از عوامل تأثیرگذار است که سبب می‌شود EKE در فاز مثبت در مرکز و شمال اروپا مقادیر بزرگ‌تری نسبت به فاز منفی داشته باشد. بنابراین توزیع همگرایی شار با شدت و نحوه انحراف مسیر توفان اطلس در فازهای مختلف NAO و نوع ارتباط دو مسیر توفان، در توافق است.

مدیترانه و همگرایی آن در جنوب‌غرب آسیا، به‌ویژه در نزدیکی دریای سرخ، مسیر توفان مدیترانه را نشان می‌دهند. از آنجا که توزیع همگرایی شار آزمینگرد بسیار مشابه شار کل است، می‌توان سهم غالب همگرایی شار آزمینگرد در ایجاد همگرایی شار کل را نتیجه گرفت. به‌طور کلی، مراکز واگرایی و همگرایی در فاز مثبت (شکل‌های ۵الف و ۵ب) نسبت به فاز منفی (شکل‌های ۵ج و ۵د) قوی‌تر هستند که بیانگر قوی‌تر بودن مسیرهای توفان در این فاز است. همچنین در فاز مثبت، مراکز واگرایی و همگرایی (هم شار کل و هم شار آزمینگرد) تقریباً در راستای مداری به‌دنبال هم قرار گرفته‌اند؛ ولی در فاز منفی، مراکز همگرایی و واگرایی پشت سرهم، به‌سمت جنوب متمایل شده‌اند. بنابراین تفاوت در نحوه انتقال انرژی، در جهت‌گیری مسیرهای توفان در دو فاز NAO اثر می‌گذارد.

براساس شکل ۵، نتایج هر دو مجموعه داده حاکی از آن است که مرکز همگرایی واقع در جریان‌سوی



شکل ۵. مانند شکل ۱ ولی برای میانگین همگرایی شار کل انرژی (برحسب $\text{m}^2\text{s}^{-2}\text{day}^{-1}$).

انرژی، می‌توان چنین نتیجه گرفت که انرژی در غرب مدیترانه از گسیل انرژی مسیر توفان اطلس به جریان سو حاصل می‌شود و مستقل از کژفشاری است. مطابق شکل ۵، انرژی از ناحیه واگرایی شار در مرکز مدیترانه، به سمت جنوب شرق منتقل شده و موجب افزایش EKE در جنوب غرب آسیا می‌شود. از سوی دیگر، در فاز مثبت در حوالی دریای سرخ، تبدیل فشارورد منفی است (شکل آورده نشده است) که نشان‌دهنده تبدیل انرژی جنبشی پیچکی به انرژی جنبشی میانگین است. لذا می‌توان گفت که در فاز مثبت NAO، بیشتر انرژی جنبشی پیچکی که از مرکز دریای مدیترانه به سمت جنوب شرق انتقال یافته، در آنجا به انرژی جنبشی جریان میانگین تبدیل می‌شود و این تبدیل انرژی می‌تواند علت تشدید جت جنب‌حاره در فاز مثبت NAO باشد. این نتیجه، نتایج مطالعه نصرافهانی و همکاران (۲۰۱۱) را که با استفاده از داده‌های روزانه NCEP/NCAR در دوره ۲۰۰۵-۱۹۵۰ حاصل شده است، تأیید می‌کند.

نتایج هر دو مجموعه داده، مراکز همگرایی و واگرایی شار (کل و آزمینگرد) در ورودی و خروجی مسیر توفان مدیترانه را، در فاز مثبت NAO وسیع تر و شدیدتر از فاز منفی نشان می‌دهند (شکل‌های ۵ و ۶)؛ در نتیجه همگرایی شار، عامل مهمی در گستردگی و شدت بیشتر مسیر توفان مدیترانه در فاز مثبت NAO است. از طرفی در هر دو فاز، مراکز همگرایی شار (کل و آزمینگرد) حاصل از JRA-55 در جنوب غرب آسیا حوالی دریای سرخ، دارای مقادیر بزرگ‌تری هستند، به طوری که بر روی دریای سرخ نتایج JRA-55 نسبت به NCEP/NCAR تقریباً دو برابر است. از سوی دیگر، داده‌های JRA-55 در فاز مثبت (شکل‌های ۵ب و ۶ب)، مرکز واگرایی شار (کل و آزمینگرد) واقع در مرکز مدیترانه را قوی‌تر و گسترده‌تر از مشابه آن در NCEP/NCAR (شکل‌های ۵الف و ۶الف) نشان می‌دهند که به‌عنوان یک منبع قوی‌تر EKE می‌تواند منجر به گسیل بیشتر انرژی از این منطقه به جریان سو شود. بنابراین قوی‌تر بودن مراکز واگرایی و همگرایی در

در هر دو فاز، به‌ویژه در فاز منفی، مراکز واگرایی و همگرایی شار کل در ورودی و خروجی (به‌ویژه در شمال اروپا بر روی جزایر اسکاندیناوی) مسیر توفان اطلس، در نتایج داده‌های JRA-55 گسترده‌تر و شدیدتر هستند (شکل ۵ د)؛ این در حالی است که نتایج داده‌های NCEP/NCAR در فاز منفی (شکل ۵ج)، نشان‌دهنده همگرایی شار کل در شمال غرب اروپا بر روی جزایر اسکاندیناوی نمی‌باشد. بنابراین یکی از دلایل مهم قوی‌تر بودن شاخه شمالی مسیر توفان اطلس در نتایج داده‌های JRA-55، به‌ویژه در فاز منفی، قوی‌تر بودن مراکز واگرایی و همگرایی شار کل در ورودی و خروجی مسیر توفان اطلس حاصل از این داده‌ها است. شایان ذکر است که شار فرارفتی در ایجاد همگرایی در جریان سوی مسیر توفان اطلس اهمیت بیشتری نسبت به شار آزمینگرد دارد.

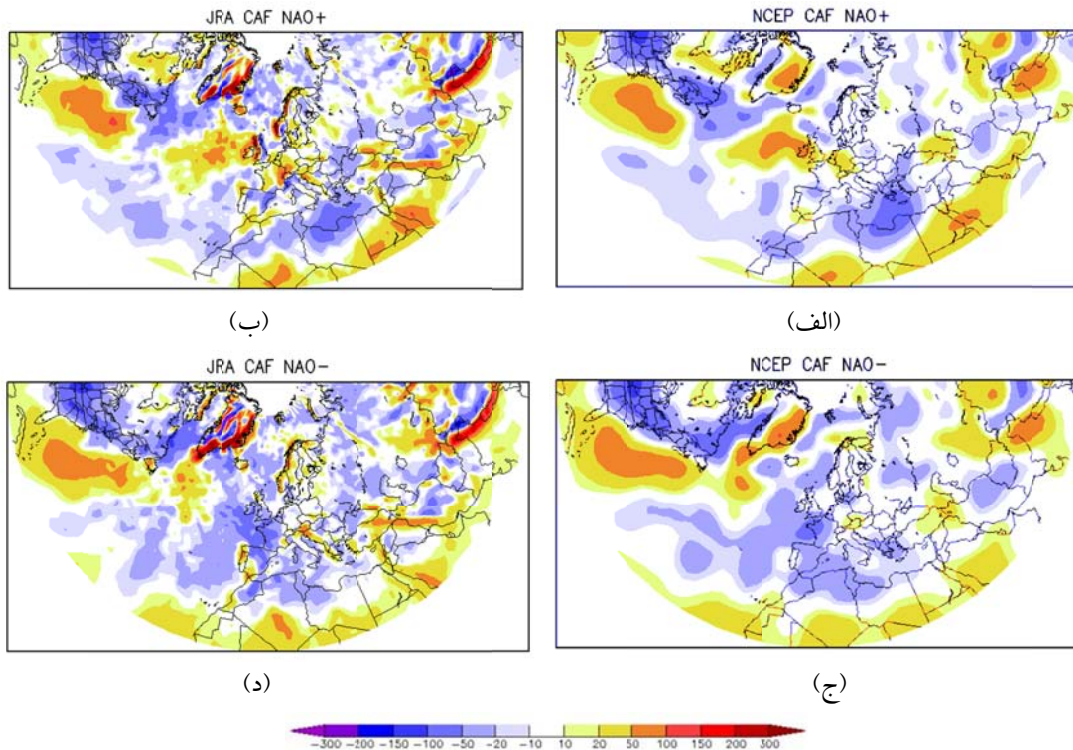
با توجه به شکل ۵، در هر دو فاز دیده می‌شود که یک ناحیه همگرایی انرژی از نواحی جنب‌حاره‌ای شرق اقیانوس اطلس به سمت آفریقا تا جنوب غرب آسیا با دو مرکز پیشینه، یکی بر روی دریای سرخ و دیگری در شمال آفریقا، در راستای مداری کشیده شده است. از آنجا که این منطقه همگرایی در نواحی جنب‌حاره‌ای شرق اقیانوس اطلس، در فاز منفی گسترده‌تر از فاز مثبت است، انتشار جنوب سوی پیچک‌ها و دریافت بیشتر انرژی در این مناطق، در فاز منفی NAO را نشان می‌دهد. همگرایی ذکر شده در نواحی جنب‌حاره‌ای اقیانوس اطلس و غرب مدیترانه، در نتایج JRA-55 (شکل ۵د) شدیدتر و گسترده‌تر از نتایج NCEP/NCAR (شکل ۵ج) است. بنابراین، نتایج داده‌های JRA-55 حاکی از آن است که در فاز منفی، انرژی بیشتری از مسیر توفان اطلس به این مناطق منتقل شده و EKE نسبت به مشابه آن در NCEP/NCAR بیشتر افزایش می‌یابد که سبب تقویت شاخه جنوبی مسیر توفان اطلس، به‌ویژه در فاز منفی می‌شود.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، در هر دو فاز NAO، تولید و تبدیل کژفشار در غرب مدیترانه مقادیر بزرگی ندارند. با توجه به موقعیت مراکز واگرایی و همگرایی

مقدار شار کل در فاز خنثی تقسیم شد. اختلاف نسبی واگرایی شار در مسیر توفان مدیترانه بین دو فاز در نتایج داده‌های JRA-55، $1/6$ و در نتایج داده‌های NCEP/NCAR، $0/8$ به دست آمد. در واقع، داده‌های JRA-55 مرکز واگرایی شار بر روی مدیترانه را در فاز مثبت قوی‌تر و در فاز منفی ضعیف‌تر از داده‌های NCEP/NCAR نشان می‌دهند. همچنین اختلاف نسبی همگرایی شار دریای سرخ بین دو فاز در نتایج داده‌های JRA-55 حدود $0/4$ است، در حالی که در نتایج داده‌های NCEP/NCAR اختلافی بین دو فاز دیده نمی‌شود. بنابراین نتایج JRA-55 اختلاف بیشتری بین دو فاز بر روی مدیترانه و دریای سرخ نشان می‌دهد. به بیانی، نسبت به مطالعات پیشین با داده‌های NCEP/NCAR، نتایج داده‌های JRA-55 حاکی از آن است که تغییر فاز NAO تأثیر بیشتری در تغییر شدت مراکز واگرایی شار انرژی بر روی دریای مدیترانه و همگرایی شار انرژی بر روی دریای سرخ دارد.

ورودی و خروجی مسیر توفان مدیترانه یکی از علل بسیار مهم در گستردگی و شدت بیشتر مسیر توفان مدیترانه حاصل از نتایج JRA-55 نسبت به NCEP/NCAR، به‌خصوص در فاز مثبت است. شایان ذکر است که در هر دو مجموعه داده، مراکز واگرایی و همگرایی شار آزمینگرد بر روی مدیترانه و دریای سرخ (شکل ۶) قوی‌تر از واگرایی و همگرایی شار کل (شکل ۵) هستند که بیانگر نقش مهم و سهم غالب شار آزمینگرد در انتقال انرژی از مدیترانه به جریان سو می‌باشد. در نتیجه، شار آزمینگرد در تقویت مسیر توفان مدیترانه و افزایش EKE در جنوب غرب آسیا نقش مهم‌تری نسبت به شار فرارفتی دارد. قابل توجه آن که نقش شار آزمینگرد در انتقال پیچک‌های مدیترانه بیش از نقش آن در انتقال پیچک‌های اطلس است.

برای مقایسه اختلاف بین دو فاز NAO، تغییر نسبی شدت مراکز بین دو فاز محاسبه شد. برای این کار، مقدار شار کل به دست آمده از تفاضل فاز مثبت از فاز منفی، بر



شکل ۶. مانند شکل ۱ ولی برای میانگین همگرایی شار آزمینگرد انرژی (بر حسب $\text{m}^2\text{s}^{-2}\text{day}^{-1}$).

مجموعه داده، بلکه مقایسه مسیرهای توفان و نحوه ارتباط آنها در دو فاز NAO بر مبنای نتایج حاصل از دو مجموعه داده بوده است.

نتایج هر دو مجموعه داده نشان می‌دهند که در غرب اطلس، کژفشاری عامل اصلی افزایش EKE است، در حالی که در مناطق جریان سوی آن مثل غرب اروپا و منطقه مدیترانه، همگرایی شار عامل اصلی تقویت مسیر توفان است. از این رو، در اکثر مناطق، همگرایی شار کل در تقویت انرژی جنبشی پیچکی دارای سهم بیشتری نسبت به جمله‌های دیگر انرژی است. عامل اصلی ایجاد واگرایی و همگرایی شار انرژی کل در اکثر مناطق، همگرایی شار آزمینگرد است. به عبارت دیگر، همگرایی شار آزمینگرد نقش اصلی در انتقال انرژی از ورودی به خروجی مسیرهای توفان، به خصوص مسیر توفان مدیترانه، دارد. شایان ذکر است که در هر دو فاز، سهم همگرایی شار آزمینگرد در ایجاد همگرایی شار کل در جریان سوی مسیر توفان اطلس، ضعیف بوده و این همگرایی شار فرارفتی است که در ایجاد همگرایی شار کل در این مناطق مؤثر است.

از بررسی انرژی‌تیک NAO در حوزه فعالیت مسیر توفان مدیترانه با استفاده از هر دو مجموعه داده، می‌توان چنین نتیجه گرفت که در فاز مثبت NAO، مقادیر بزرگ BCG و BCC در منطقه مدیترانه به‌طور مداری قرار گرفته‌اند و از مقادیر بزرگ این کمیت‌ها در شمال اروپا، واقع در جریان سوی مسیر توفان اطلس، جدا هستند. یعنی در فاز مثبت، مسیرهای توفان اطلس و مدیترانه به‌طور مستقل عمل می‌کنند و با یکدیگر برهم‌کنش کمتری دارند؛ در حالی که در فاز منفی NAO، مسیر توفان مدیترانه به انتهای جریان سوی مسیر توفان اطلس متصل است. هر یک از جملات انرژی، نحوه انحراف مسیرهای توفان در دو فاز NAO را نشان می‌دهند. بنابراین، نتیجه بررسی انرژی‌تیک اثر NAO بر مسیرهای توفان، حاکی از آن است که خروجی مسیر توفان اطلس به‌شدت با NAO جفت شده است که با نتایج نصرافهانی و همکاران (۲۰۱۱)

به‌منظور مقایسه تفاضل شدت مراکز واگرایی و همگرایی شار کل، واقع در ورودی و خروجی مسیر توفان مدیترانه، قدرمطلق تفاضل بیشینه اندازه واگرایی از بیشینه اندازه همگرایی در هر فاز محاسبه شد. نتایج حاکی از آن است که در فاز مثبت، هر دو مجموعه داده تفاضل شدت این مراکز را صفر نشان می‌دهند. در واقع، با وجود این که JRA-55 دارای مقادیر بزرگ‌تری برای هر دو مرکز است، ولی در هر دو مجموعه داده، اندازه اختلاف آنها در فاز مثبت صفر است. یعنی در فاز مثبت همان مقدار انرژی که از مدیترانه گسیل می‌شود، در دریای سرخ دریافت می‌شود. در فاز منفی، نتایج NCEP/NCAR اختلاف مراکز واگرایی و همگرایی را همانند فاز مثبت صفر نشان می‌دهد، ولی نتایج JRA-55 دارای اختلافی بزرگ‌تر (حدود $5.0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ day}^{-1}$) است. در واقع، از آنجا که در نتایج این داده‌ها مرکز همگرایی شار انرژی بر روی دریای سرخ در فاز منفی قوی‌تر است، اختلاف شدت مراکز واگرایی و همگرایی شار انرژی نیز بزرگ‌تر است. نتایج تفاضل شدت مراکز واگرایی و همگرایی شار آزمینگرد نیز مشابه شار کل است.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به مطالعه اثر نوسان اطلس شمالی بر مسیرهای توفان اطلس و مدیترانه و همچنین فعالیت‌های پیچکی در جنوب غرب آسیا از دیدگاه انرژی‌تیک پرداخته شد. بدین منظور، مؤلفه‌های اصلی واداشت انرژی جنبشی پیچکی، برای ماه‌های بحرانی مثبت و منفی NAO، با استفاده از داده‌های بازتحلیل JRA-55 با تفکیک افقی $1/25$ و NCEP/NCAR با تفکیک افقی $2/5$ درجه در بازه زمانی ۱۹۵۹ تا ۲۰۱۷، تحلیل و مقایسه شدند. این که چه تغییری در میانگین جمله‌های انرژی حاصل از دو مجموعه داده در فازهای بحرانی مثبت و منفی رخ داده و تأثیر جملات انرژی در نحوه رفتار مسیرهای توفان اطلس و مدیترانه، به‌عنوان اهداف اصلی پژوهش حاضر مورد مطالعه قرار گرفت. هدف این مطالعه نه مقایسه خود دو

همخوانی دارد.

به‌طور کلی در هر دو فاز NAO، الگوی کلی مسیرهای توفان و جملات انرژی به‌دست آمده از دو مجموعه داده تقریباً مشابه هستند، ولی اختلاف‌هایی از لحاظ مقدار و گسترش مراکز، بین نتایج آنها وجود دارد؛ به‌طوری‌که نتایج JRA-55 تقریباً در تمام میدان‌ها مقادیر بزرگ‌تری را نشان می‌دهند. JRA-55 در فاز منفی، هر دو مسیر توفان را قوی‌تر از NCEP/NCAR نشان داده و همچنین نسبت به نتایج NCEP/NCAR ارتباط کمتری بین مسیرهای توفان در این فاز دیده می‌شود. این دو موضوع، بارزترین اختلاف بین نتایج حاصل از JRA-55 با نتایج کارهای قبلی به‌دست آمده از NCEP/NCAR (مانند نصرافهانی و همکاران، ۲۰۱۱) است.

نتایج داده‌های NCEP/NCAR اختلاف بیشتری بین فازهای مثبت و منفی NAO در مورد پیشینه انرژی جنبشی پیچکی در ناحیه مسیر توفان اطلس نشان می‌دهد، به‌طوری‌که مرکز مسیر توفان اطلس در فاز مثبت ۱۰ درصد قوی‌تر از فاز منفی است؛ اما این اختلاف در نتایج JRA-55 مشاهده نمی‌شود. در واقع، شدت هسته مسیر توفان اطلس که از داده‌های JRA-55 به‌دست آمده است، در دو فاز NAO تفاوت قابل ملاحظه‌ای ندارد. از طرفی، واگرایی و همگرایی شار انرژی کل در ورودی و خروجی مسیر توفان مدیترانه در نتایج داده‌های JRA-55 دارای اختلاف بیشتری بین فازهای مثبت و منفی NAO است. به بیانی، نتایج داده‌های JRA-55 حاکی از آن است که تغییر فاز NAO تأثیر زیادی در تغییر شدت مراکز واگرایی شار انرژی در مدیترانه و همگرایی شار انرژی در دریای سرخ دارد، در حالی‌که مراکز واگرایی و همگرایی حاصل از نتایج NCEP/NCAR، حساسیت کمتری به تغییر فاز NAO نشان می‌دهند.

به‌طور کلی، نتایج داده‌های JRA-55 در هر دو فاز NAO، مسیرهای توفان اطلس و مدیترانه را قوی‌تر و گسترده‌تر نشان می‌دهند و اختلاف مسیرهای توفان بین دو مجموعه داده در فاز منفی مشخص‌تر است (هر یک از جملات

انرژی، بیانگر این اختلاف هستند). در واقع، در فاز منفی، هسته مسیر توفان اطلس حاصل از داده‌های JRA-55، ۱۰ درصد قوی‌تر از متناظر آن حاصل از داده‌های NCEP/NCAR است. افزایش حدود ۲۰ درصدی BCC و BCG در ورودی مسیر توفان اطلس در نتایج داده‌های JRA-55 نسبت به NCEP/NCAR نقش مهمی در ایجاد این اختلاف در فاز منفی دارد. اختلاف مشاهده شده بین دو مجموعه داده در کژفشاری، می‌تواند به علت بزرگ‌تر بودن مقادیر سرعت قائم حاصل از JRA-55 باشد. همچنین واگرایی قوی‌تر شار در پادجریان‌سوی مسیر توفان در فاز منفی این داده‌ها، از عوامل مهم این اختلاف قابل ملاحظه در شدت مسیر توفان اطلس، بین دو مجموعه داده است. علاوه بر این، اختلاف دو مجموعه داده در نمایش همگرایی شار (کل و آزمینگرد) در شمال اروپا بر روی جزایر اسکاندیناوی و نیز در جنوب اروپا و سواحل شمالی مدیترانه، در هر دو فاز، به‌ویژه فاز منفی، چشم‌گیر است. بنابراین، مسیر توفان اطلس حاصل از JRA-55 در جریان‌سوی خود، تمام بخش‌های اروپا از شمال تا جنوب را بیشتر از مشابه آن در NCEP/NCAR تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نتیجه، علاوه بر هسته مسیر توفان اطلس، هر دو شاخه شمالی و جنوبی آن نیز در نتایج JRA-55 گستردگی و شدت بیشتری، به‌ویژه در فاز منفی دارد. همچنین در فاز منفی، اختلاف پیشینه شدت مراکز واگرایی مدیترانه و همگرایی دریای سرخ در نتایج JRA-55 بزرگ‌تر از مشابه آن در نتایج NCEP/NCAR است. به بیان دیگر، تقویت منطقه همگرایی دریای سرخ در نتایج JRA-55، در گسترش و شدت بیشتر مسیر توفان مدیترانه حاصل از JRA-55 در فاز منفی، به‌ویژه در جنوب مدیترانه و مناطق جریان‌سو مثل خاورمیانه، نقش اساسی دارد.

مراجع

رضاییان، م.، محب‌الحجه، ع. ر.، احمدی گیوی، ف. و نصرافهانی، م. ع.، ۱۳۹۳، تحلیل آماری-دینامیکی

- ایران، تهران.
- نصرافهانی، م.ع.، احمدی گیوی، ف. و محب‌الحجه، ع. ر.، ۱۳۸۹، بررسی انرژی‌تیک ارتباط نوسان اطلس شمالی (NAO) و گردش بزرگ‌مقیاس وردسپهر در جنوب غرب آسیا. مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۶(۳)، ۱۳۱-۱۴۹.
- Ahmadi-Givi, F., Nasr-Esfahany, M. and Mohebalhojeh, A. R., 2014, Interaction of North Atlantic baroclinic wave packets and the Mediterranean storm track. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140(680), 754-765.
- Branstator, G., 1995, Organization of storm track anomalies by recurring low-frequency circulation anomalies. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 52(2), 207-226.
- Cai, M. and Mak, M., 1990, Symbiotic relation between planetary and synoptic-scale waves. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 47(24), 2953-2968.
- Chang, E. K., 2001, The structure of baroclinic wave packets. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 58(13), 1694-1713.
- Chang, E. K., Lee, S. and Swanson, K. L., 2002, Storm track dynamics. *Journal of Climate*, 15(16), 2163-2183.
- Eshel, G., Cane, M. A. and Farrell, B. F., 2000, Forecasting eastern Mediterranean droughts. *Monthly Weather Review*, 128(10), 3618-3630.
- Eshel, G. and Farrell, B. F., 2000, Mechanisms of eastern Mediterranean rainfall variability. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 57(19), 3219-3232.
- Holton, J. R., 2004, *An Introduction to Dynamic Meteorology*, 4th Edn. Elsevier Academic Press, 144pp.
- Hoskins, B. J. and Hodges, K. I., 2002, New perspectives on the Northern Hemisphere winter storm tracks. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59(6), 1041-1061.
- Hurrell, J. W., 1995, Transient eddy forcing of the rotational flow during northern winter. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 52(12), 2286-2301.
- Hurrell, J. W., 1996, Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. *Oceanographic Literature Review*, 2(43), 116-120.
- Hurrell, J. W. and Van Loon, H., 1997, Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation. In *Climatic change at high elevation sites* (pp. 69-94), Springer Netherlands.
- رابطه بین مسیر توفان مدیترانه و نوسان اطلس شمالی بر مبنای فرایافت فعالیت موج. مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۰(۲)، ۱۳۹-۱۵۲.
- نصرافهانی، م.ع.، احمدی گیوی، ف. و محب‌الحجه، ع. ر.، ۱۳۸۷، بررسی ارتباط نوسان اطلس شمالی با اقلیم جنوب غرب آسیا. سیزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک
- Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebata, A., Moriya, M., Onoda, H., Onogi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., Endo, H., Miyaoka, K. and Takahashi, K., 2015, The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 93(1), 5-48.
- Lee, S., 2000, Barotropic effects on atmospheric storm tracks. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 57(9), 1420-1435.
- Martius, O., Schwierz, C. and Davies, H. C., 2007, Breaking waves at the tropopause in the wintertime Northern Hemisphere: Climatological analyses of the orientation and the theoretical LC1/2 classification. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 64(7), 2576-2592.
- Nasr-Esfahany, M. A., Ahmadi-Givi, F. and Mohebalhojeh, A. R., 2011, An energetic view of the relation between the Mediterranean storm track and the North Atlantic Oscillation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 749-756.
- Orlanski, I. and Katzfey, J., 1991, The life cycle of a cyclone wave in the Southern Hemisphere. Part I: Eddy energy budget. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 48(17), 1972-1998.
- Pinto, J. G., Zacharias, S., Fink, A. H., Leckebusch, G. C. and Ulbrich, U., 2009, Factors contributing to the development of extreme North Atlantic cyclones and their relationship with the NAO. *Climate Dynamics*, 32(5), 711-737.
- Pinto, J. G., Reyers, M. and Ulbrich, U., 2011, The variable link between PNA and NAO in observations and in multi-century CGCM simulations. *Climate Dynamics*, 36(1-2), 337-354.
- Rezaeian, M., Mohebalhojeh, A. R., Ahmadi-Givi, F. and Nasr-Esfahany, M., 2016, A wave-activity view of the relation between the Mediterranean storm track and the North Atlantic Oscillation in winter. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(697), 1662-1671.
- Rodwell, M. J., Rowell, D. P. and Folland, C. K., 1999, Oceanic forcing of the wintertime North Atlantic Oscillation and European climate.

- Nature, 398(6725), 320–323.
- Shabbar, A., Higuchi, K., Skinner, W. and Knox, J. L., 1997, The association between the BWA index and winter surface temperature variability over eastern Canada and west Greenland. *International Journal of Climatology*, 17(11), 1195–1210.
- Thompson, D. W. and Wallace, J. M., 1998, The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical Research Letters*, 25(9), 1297–1300.
- Vallis, G. K. and Gerber, E. P., 2008, Local and hemispheric dynamics of the North Atlantic Oscillation, annular patterns and the zonal index. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 44(3), 184–212.
- Watanabe, M., 2004, Asian jet waveguide and a downstream extension of the North Atlantic Oscillation. *Journal of Climate*, 17(24), 4674–4691.