

تحلیل دینامیکی-آماری اثر متقابل نوسان اطلس شمالی (NAO) و نوسان مدن-جولیان (MJO)

شاهین عالمزاده^۱، فرهنگ احمدی گیوی^{۱*}، علیرضا محب‌الحجه^۱ و محمدعلی نصر‌اصفهان‌ی^۲

^۱ مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران
^۲ دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۴/۲۹)

چکیده

نوسان اطلس شمالی (NAO) و نوسان مدن-جولیان (MJO)، بخش‌های وسیعی از نیمکره شمالی زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهند. با بررسی برهم‌کنش متقابل آنها و با داشتن اطلاعات کافی از هر یک، می‌توان فاز و شدت دیگری را پیش‌بینی کرد. بررسی آماری و دینامیکی رخداد‌های NAO و MJO بحرانی زمستان نیمکره شمالی در دوره ۳۷ ساله (۱۹۷۴-۲۰۱۱)، رابطه قابل توجهی بین این دو پدیده را نشان می‌دهد. در روش آماری، محاسبه شاخص میانگین NAO به تفکیک فازهای MJO و با تأخیرهای ۵ تا ۲۵ روزه، حاکی از رابطه علت و معلولی بین این دو پدیده است. برای بررسی دینامیکی اثر NAO بر MJO، نقشه‌های ترکیبی تأخیری بی‌هنجاری باد مداری تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال و بی‌هنجاری تابش موج بلند خروجی (OLR) به تفکیک فازهای فرین NAO و برای تحلیل اثر MJO بر NAO، بی‌هنجاری تأخیری ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به تفکیک فازهای MJO به دست آمده است. ۲۰ تا ۲۵ روز پس از فاز مثبت (منفی) بحرانی NAO، فاز ۷ (۳) MJO دیده می‌شود. این اثر NAO بر MJO با ایجاد تغییر در بی‌هنجاری باد مداری تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال و نیز بی‌هنجاری OLR در عرض‌های حاره‌ای از اقیانوس اطلس تا اقیانوس هند به تفکیک فازهای بحرانی NAO همراه است. تحول زمانی الگوی بی‌هنجاری باد مداری تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال و جهت انتشار این بی‌هنجاری‌ها در روزهای پس از فاز مثبت (منفی) NAO با تحول زمانی و جهت انتشار بی‌هنجاری OLR همخوانی بسیار دارد. بنابراین به نظر می‌رسد که اثر NAO بر همرفت MJO از راه القای تغییرات باد مداری تراز بالای جو تا اقیانوس هند منتقل می‌شود. از سوی دیگر، ۵ تا ۱۵ روز پس از فاز ۳ (۷) بحرانی MJO، NAO به فاز مثبت (منفی) می‌رود. این اثر MJO بر NAO، با جهت‌گیری‌های متفاوت قطار امواج راسبی و در نتیجه شکست موج متفاوت در امریکای شمالی و اطلس شمالی به تفکیک فازهای ۳ و ۷ از MJO بحرانی قابل مشاهده است.

واژه‌های کلیدی: برهم‌کنش NAO و MJO، فاز بحرانی، تحلیل آماری، نقشه ترکیبی تأخیری، بی‌هنجاری باد مداری، بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی

Statistical-dynamical analysis of the mutual effects of NAO and MJO

Shahin Alemzadeh¹, Farhang Ahmadi-Givi^{1*}, Alireza Mohebalhojeh¹ and Mohammad Ali Nasr-Esfahani²

¹Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran
²University of Shahrekord, Iran

(Received: 25 January 2012, accepted: 20 July 2013)

*Corresponding author:

ahmadig@ut.ac.ir

*نگارنده رابط:

Summary

Vast areas of the Northern Hemisphere are influenced by the North Atlantic Oscillation (NAO) and the Madden-Julian Oscillation (MJO). Revealing the interaction between them can help us predict the phase and amplitude of each one based on the conditions of the other. Statistical-dynamical study on critical events of MJO and NAO during the Northern Hemisphere winter in a 37-year period (1974-2011), reveals a considerable connection between NAO and MJO. In a statistical method, the computed mean value of NAO index for different phases of MJO associated with 5 to 25-day lags, showed a causal relation between the two phenomena. Phase 7 (3) of MJO was observed 20 to 25 days after the positive (negative) phase of NAO. On the other hand, 5 to 15 days after phase 3 (7) of MJO, positive (negative) phase of NAO occurred.

Lagged composite maps of 200-hPa zonal wind anomaly and the outgoing long-wave radiation (OLR) anomaly were computed for different phases of critical NAO in order to analyze the dynamical impact of NAO on MJO. Within 5 to 25 days after the positive NAO, maximum 250-hPa westerly anomalies in the Africa-Asia jet region propagate eastward from Africa to central Indian Ocean. On the other hand, OLR anomaly patterns propagate eastward in the same period and same region after the positive NAO that might be induced by the propagation features of 250-hPa zonal wind anomalies. On the 25-day lag relative to the critical positive NAO, both 250-hPa westerly anomalies over the central and eastern Indian Ocean and the development of positive OLR anomalies in the same region were consistent with the conditions of phase 7 of MJO. However, on the 5 to 25-day lags relative to the critical negative NAO, 250-hPa zonal wind anomalies showed the attenuation of the westerly Africa-Asia jet leading to the favorable conditions for evolution of the easterly anomalies over the Indian Ocean. On the other hand, the OLR anomaly patterns displayed either little or no westward propagation. On the 25-day lag relative to the critical negative NAO, the development of both 250-hPa easterly anomalies and negative OLR anomalies over the central Indian Ocean corresponded to the conditions of phase 3 of MJO.

Lagged composites of 500-hPa geopotential height anomaly for different phases of MJO were also computed in order to analyze the dynamical impact of MJO on NAO. On the 5 to 15-day lags relative to phase 3 of MJO, a Rossby wave train was observed over the Pacific Ocean extending to the North America and Atlantic region. The waves were oriented in the South West – North East direction. On the 10-day and 15-day lags, the waves started to gradually break anticyclonically over the North America and North Atlantic regions. On the 15-day lag, a dipolar pattern formed in the Atlantic region associated with a negative anomaly center of 500-hPa geopotential height in the northern part of the North Atlantic and a positive anomaly center in the central part of the North Atlantic, leading to the formation of the positive NAO phase. On lag days after phase 7 of critical MJO, a similar wave train was also extended from the Pacific and North America to the Atlantic region; however, the orientation of the waves was South East-North to West at this time. On the 5 and 10-day lags, a cyclonic wave breaking was observed over the North America and North Atlantic regions. Ultimately, on the 10-day lag a dipole structure similar to the negative NAO phase was formed over the North Atlantic region.

Keywords: Interaction between MJO and NAO, critical phase, statistical analysis, lagged composite map, zonal wind anomaly, geopotential height anomaly

۱ مقدمه

تحقیقاتی که تا کنون در مورد نوسان‌های MJO و NAO صورت گرفته است، عمدتاً هریک از این پدیده‌ها را مستقل و جدا از هم بررسی کرده‌اند. برای مثال، ماتیوس و کیلادیس (۱۹۹۹) نشان داده‌اند که بین MJO و پیچک‌های گذرای بسامد زیاد در مناطق جنب‌حاره برهم‌کنش وجود دارد. در مقاله‌ای دیگر از ماتیوس و کیلادیس (۲۰۰۰) نتیجه شده است که امواج راسبی با بسامد زیاد با جهت انتشار استواسو، از راه ایجاد همرفت عمیق در شرق بخش حاره‌ای اقیانوس آرام بر MJO اثر می‌گذارند. ماتیوس (۲۰۰۸) در مقاله‌ای با دسته‌بندی انواع MJO، سعی در شناخت دقیق‌تر عوامل ایجادکننده آن همچون بی‌هنجاری‌های همرفت و دمای وردسپهر میانی برای MJOهای منفرد و همگرایی لایه مرزی، رطوبت و واداشت دمای سطحی آب برای MJOهای پی‌درپی کرده است.

در ارتباط با NAO پژوهش‌های بسیاری صورت گرفته است که در اینجا به ذکر دو مورد آن اکتفا می‌شود. نخست مقاله اخیر وکیس و گریب (۲۰۰۸) که براساس نتایج آن، NAO و ردایی شار پیچکی تکانه مسیر توفان اطلس است و الگویی دوقطبی از وردایی میدان‌های باد و فشار در سطح زمین ایجاد می‌کند. بندیکت و همکاران (۲۰۰۴) روشن ساختند که هر دو فاز NAO از امواج مقیاس همدیدی ناشی می‌شوند که پس از تبدیل به امواج کم بسامد در اثر شکست و اچرخندی، فاز مثبت و در اثر شکست چرخندی، فاز منفی NAO به وجود می‌آید.

در مورد رابطه یا برهم‌کنش MJO و NAO پژوهش‌های اندکی صورت گرفته است. برای مثال، لین و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که بی‌هنجاری همرفت مربوط به MJO در اقیانوس آرام از راه قطار موج راسبی بر NAO اثر می‌گذارد و از سوی دیگر، NAO نیز از راه

شار تکانه و القای تغییرات قابل توجه در شدت باد مداری مناطق حاره‌ای اطلس، MJO را تحت تاثیر قرار می‌دهد. هدف از این پژوهش، بررسی ارتباط و برهم‌کنش NAO و MJO از دو دیدگاه آماری و دینامیکی است. ابتدا از دیدگاه آماری توزیع فازهای مثبت و منفی NAO به تفکیک فازهای هشت‌گانه MJO بررسی می‌شود تا دریافت بعد یا قبل از هریک از فازهای NAO چه فازهایی از MJO و با چه مدت تأخیر، احتمال وقوع بیشتری دارد. همچنین، بعد یا قبل از هریک از فازهای فرین MJO کدام فاز NAO و با چه مدت تأخیر، بیشتر رخ می‌دهد. سپس از دیدگاه دینامیکی و به کمک نقشه‌های ترکیبی، به تحلیل سازوکار اثر متقابل NAO و MJO می‌پردازیم.

در بخش ۲ از مقاله حاضر، داده‌ها و روش تحقیق و در بخش ۳، بررسی آماری که شامل تعیین شاخص میانگین و تأخیری NAO به تفکیک فازهای MJO است، شرح داده می‌شود. بخش ۴ به بررسی اثر NAO بر MJO با توضیح تحول زمانی بی‌هنجاری‌های باد مداری تراز بالا و تابش موج بلند خروجی به تفکیک فازهای NAO، اختصاص دارد. در بخش ۵، اثر MJO بر NAO با تحول زمانی بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی به تفکیک فازهای MJO، بررسی می‌شود. در بخش ۶ نتیجه‌گیری آورده شده است.

۲ داده‌ها و روش تحقیق

در این تحقیق از داده‌های روزانه بازتحلیل جهانی مربوط به مراکز ملی پیش‌بینی محیطی - مرکز ملی پژوهش جوئی (NCEP/NCAR) (کالنی و همکاران، ۱۹۹۶) از سال ۱۹۷۴ تا ۲۰۱۱ استفاده شده است. تفکیک افقی داده‌ها $2/5^{\circ} \times 2/5^{\circ}$ در راستاهای طول و عرض جغرافیایی است. داده‌های مورد استفاده شامل باد مداری تراز ۲۰۰ hPa، ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ hPa و تابش موج بلند خروجی (OLR) است.

۵ تا ۲۵ روز بعد و قبل از هر یک از فازهای MJO، شاخص میانگین رخدادهای NAO از نظر مقدار و علامت (مثبت و منفی) چگونه است. در این راستا، ابتدا رخدادهای بحرانی MJO با شدت بزرگتر از میانگین شدت همه رخدادهای MJO تعیین و به تفکیک فازهای ۱ تا ۸ آن، میانگین شاخص رخدادهای NAO که همزمان و با تأخیرهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ روزه نسبت به رخدادهای بحرانی MJO به وقوع پیوسته‌اند، محاسبه شده است. این قسمت از محاسبات، برای تحلیل اثر رخدادهای MJO بحرانی کاربرد دارد. در مرحله بعد، براساس تعریف متداول برای رخدادهای بحرانی NAO، رخدادهایی در نظر گرفته می‌شود که شاخص آن حداقل یک انحراف معیار بزرگتر (فاز مثبت) یا کوچکتر (فاز منفی) از میانگین شاخص NAO است. سپس میانگین شاخص NAO به تفکیک فاز رخدادهای MJO که همزمان و با تأخیرهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ روزه نسبت به رخدادهای بحرانی NAO اتفاق افتاده‌اند، به دست آمده است. این قسمت از محاسبات، مربوط به تحلیل اثر رخدادهای NAO بحرانی بر فازهای MJO است. نتایج حاصل از محاسبات این دو مرحله در جدول ۱ آمده است.

در جدول ۱، اعداد نیمه بالایی (مربوط به تأخیر زمانی ۵- تا ۲۵- روز)، شاخص میانگین رخدادهای بحرانی NAO است که قبل از فازهای ۱ تا ۸ از MJO رخ داده‌اند و بررسی آنها نشانگر اثر NAO بر MJO است. با مقایسه فازهای ۲ و ۳ با فازهای ۶ و ۷ از MJO مشاهده می‌شود که ۱۰ تا ۲۵ روز پیش از فازهای ۲ و ۳ از MJO، شاخص میانگین NAO منفی بوده، در حالی که ۱۰ تا ۲۵ روز پیش از فازهای ۶ و ۷ از MJO، شاخص میانگین NAO مثبت است. از این نتایج می‌توان انتظار داشت که رخدادهای NAO بحرانی مثبت ۱۰ تا ۲۵ روز بعد منجر به تقویت یا ایجاد فاز ۶ و ۷ از MJO شده، حال آنکه رخدادهای NAO

از آنجا که هدف اصلی این پژوهش بررسی رابطه رخدادهای NAO و MJO در فصل زمستان در دوره ۱۹۷۴-۲۰۱۱ است، برای تشخیص رخدادهای MJO، فاز و شدت آن به صورت روزانه از وبگاه مرکز پژوهش هوا و اقلیم استرالیا (<http://cawcr.gov.au>) برای ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه در دوره پیش گفته استخراج شده است. فاز و شدت MJO، با توجه به شاخص‌های RMM1 و RMM2 تعیین می‌شود. این شاخص‌ها را ویلر و هندون (۲۰۰۴) برای دیده‌بانی و تشخیص موقعیت MJO هم از جهت شدت و هم از جهت فاز آن، عرضه کرده‌اند که براساس یک جفت تابع متعامد تجربی (EOF) از ترکیب میدان‌های باد مداری تراز ۸۵۰ hPa و باد مداری تراز hPa ۲۰۰ میانگین‌گیری شده در نزدیک استوا و داده ماهواره‌ای مشاهده شده OLR است. برای تشخیص رخدادهای NAO نیز شاخص‌های روزانه آن که از روش هارل به دست می‌آید، از وبگاه (<http://www.cgd.ucar>) در دوره پیش گفته تهیه شده است.

در بخش بررسی آماری، ابتدا رخدادهای NAO و MJO به ترتیب زمان مرتب شده و سپس محاسبات آماری همچون تعیین رخدادهای بحرانی NAO و MJO (در قسمت ۳ تعریف رخدادهای بحرانی شرح داده خواهد شد) و همچنین به دست آوردن شاخص میانگین رخدادهای NAO به تفکیک فازهای MJO و با تأخیرهای متفاوت صورت گرفته است. در بخش بررسی دینامیکی، بی‌هنجاری کمیت‌های هواشناختی در روزهای موردنظر، نسبت به میانگین بلندمدت زمستانی دوره ۳۷ ساله محاسبه و نقشه‌های ترکیبی مربوط رسم شده است.

۳ نتایج بررسی آماری

در این بخش، شاخص میانگین تأخیری و تقدیمی NAO به تفکیک فازهای MJO محاسبه و بررسی می‌شود. در واقع به این سؤال پاسخ داده خواهد شد که به لحاظ آماری برای

جدول ۱. شاخص میانگین NAO با تأخیر نسبت به فازهای MJO. در اولین ستون سمت چپ عدد n- بیانگر وقوع NAO به مدت n روز قبل از فاز خاصی از MJO و عدد n بیانگر وقوع NAO به مدت n روز پس از فاز خاصی از MJO است.

فاز MJO / تأخیر	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
-۲۵	۰/۲۰۱	-۰/۲۶۹	-۰/۳۴۱	-۰/۲۹۸	۰/۲۱۹	۰/۱۴۳	۰/۰۹۸	۰/۴۷۷
-۲۰	-۰/۳۴۵	-۰/۱۶۰	-۰/۲۷۸	۰/۱۰۰	۰/۲۳۵	۰/۱۶۵	۰/۱۰۱	۰/۳۶۵
-۱۵	-۰/۴۴۶	-۰/۲۶۴	-۰/۰۱۳	۰/۲۳۴	۰/۲۸۱	۰/۳۶۲	۰/۰۱۶	-۰/۱۴۵
-۱۰	-۰/۳۹۱	-۰/۲۳۶	۰/۲۶۱	۰/۳۴۰	۰/۳۷۵	۰/۲۰۷	۰/۱۶۱	-۰/۶۲۰
-۵	-۰/۲۵۶	۰/۰۰۴	۰/۴۴۲	۰/۲۱۲	۰/۵۵۰	۰/۱۸۴	-۰/۲۲۵	-۰/۴۹۶
۰	۰/۰۶۳	۰/۱۷۶	۰/۰۴۵	۰/۴۹۵	۰/۴۰۷	۰/۲۹۱	۰/۱۰۰	-۰/۲۰۳
۵	۰/۱۴۳	۰/۱۱۱	۰/۱۶۰	۰/۶۰۵	۰/۳۹۱	۰/۲۳۶	۰/۰۲۲	-۰/۰۸۲
۱۰	۰/۰۴۰	۰/۱۵۱	۰/۴۳۲	۰/۶۴۴	۰/۳۹۴	-۰/۰۱۰	-۰/۰۵۸	-۰/۰۰۱
۱۵	۰/۱۲۵	۰/۲۹۳	۰/۵۱۷	۰/۶۴۴	۰/۱۳۵	-۰/۱۵۰	-۰/۰۸۸	-۰/۰۴۰
۲۰	۰/۱۹۴	۰/۴۵۴	۰/۴۹۵	۰/۳۶۰	۰/۰۰۰	-۰/۰۱۳	-۰/۰۶۶	۰/۰۴۶
۲۵	۰/۳۸۹	۰/۴۳۹	۰/۳۸۲	۰/۲۷۱	۰/۱۵۶	۰/۰۱۶	۰/۰۰۳	۰/۱۵۶

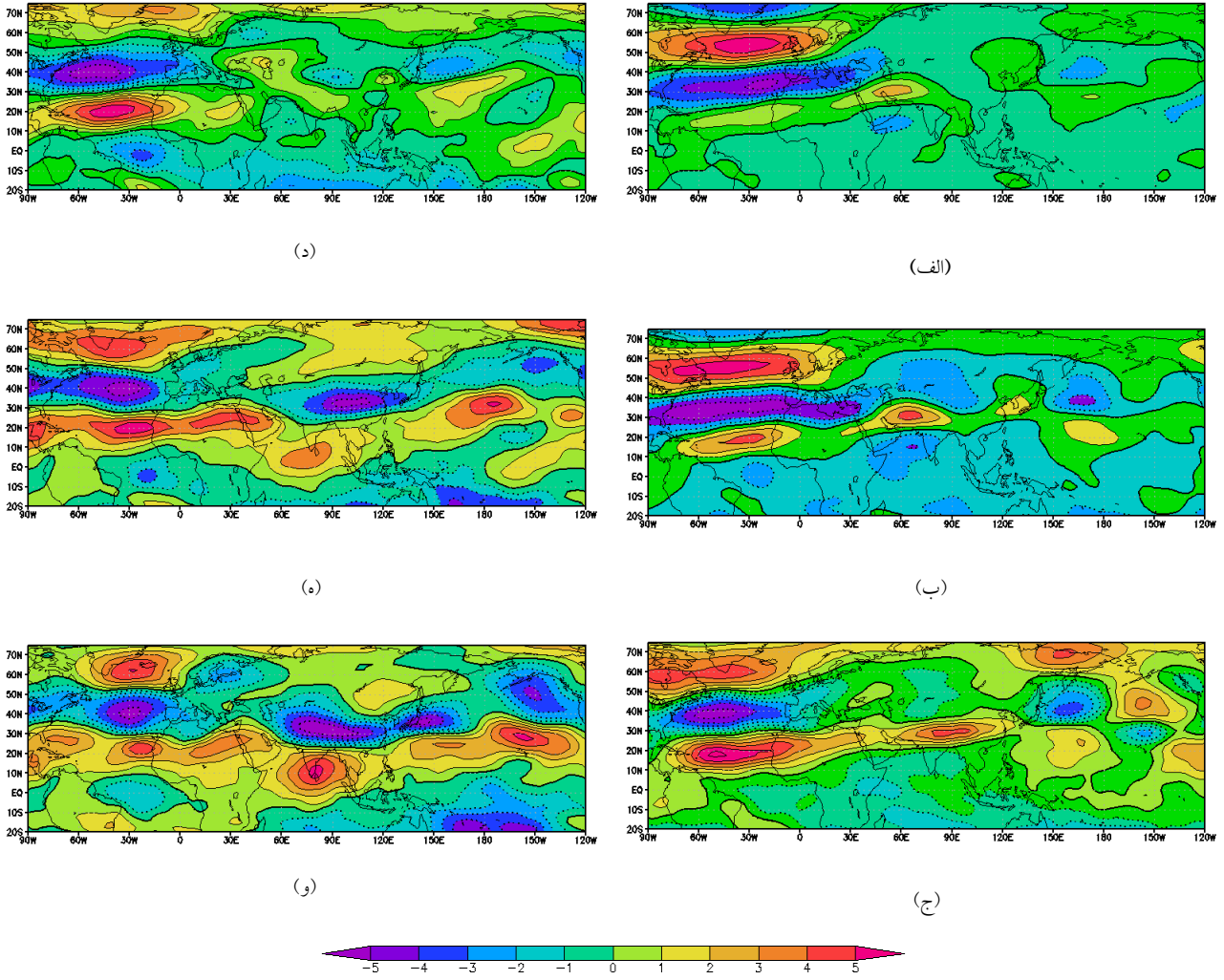
شمالی را توجیه کند. از سوی دیگر، مجموعه‌ای از آزمایش‌های خطی حاکی از آن است که پاسخ جو مناطق حاره‌ای به واداشت برون‌حاره‌ای در اطلس شمالی منجر به موج کلونین واداشتی با انتشار شرقی در جریان میانگین شرقی مناطق حاره‌ای نیمکره شرقی می‌شود (لین و همکاران، ۲۰۰۷a). در این بخش، احتمال اثر NAO بر مناطق حاره‌ای با دیدگاهی متفاوت بررسی می‌شود بدین صورت که به تحلیل اثر NAO بر باد مداری تراز بالای جو در مناطق حاره‌ای اطلس شمالی، انتشار این بی‌هنجاری‌ها در عرض‌های حاره‌ای نیمکره شرقی تا اقیانوس هند و اقیانوس آرام و همچنین احتمال اثر آن بر همرفت MJO می‌پردازیم.

در بخش ۴-۱، با استفاده از نقشه‌های ترکیبی تأخیری بی‌هنجاری باد مداری تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال به تفکیک فازهای بحرانی NAO، تحول زمانی بی‌هنجاری باد در این تراز برای صفر، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ روز پس از رخدادهای NAO بحرانی مثبت و NAO بحرانی منفی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین صورت، اثر رخدادهای

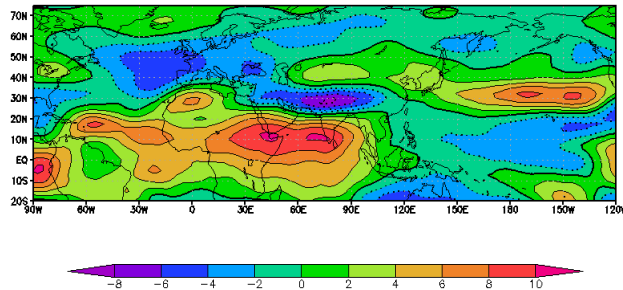
بحرانی منفی با گذشت ۱۰ تا ۲۵ روز منجر به تقویت یا ایجاد فاز ۲ و ۳ از MJO می‌شوند. اعداد نیمه پایینی جدول (مربوط به تأخیر زمانی ۵ تا ۲۵ روز)، شاخص میانگین رخدادهای NAO است که پس از فازهای ۱ تا ۸ از رخدادهای MJO بحرانی به وقوع پیوسته‌اند و بررسی آنها نشانگر اثر MJO بر NAO است. با مقایسه فازهای ۲ و ۳ با فازهای ۶ و ۷ از MJO دیده می‌شود که ۱۰ تا ۲۰ روز پس از فازهای ۲ و ۳ از MJO بحرانی، شاخص میانگین NAO مثبت، اما پس از فازهای ۶ و ۷ از MJO بحرانی، این شاخص منفی است.

۴ بررسی دینامیکی اثر NAO بر MJO

با توجه به نتایج بخش قبل و جدول ۱، انتظار می‌رود که فازهای مثبت و منفی NAO بر فازهای MJO اثرگذار باشد. لین و همکاران (۲۰۰۹) روشن ساختند که فاز مثبت NAO سبب تقویت شار فعالیت موج جنوب‌سو در ناحیه اطلس شمالی شده است که این امر می‌تواند تأثیر عرض‌های برون‌حاره‌ای بر مناطق حاره‌ای در اطلس



شکل ۱. میانگین بی‌هنجاری باد مداری در تراز ۲۰۰ hPa برای روزهای ۰ (الف)، ۵ (ب)، ۱۰ (ج)، ۱۵ (د)، ۲۰ (و) و ۲۵ (ه) پس از رخدادهای بحرانی NAO مثبت. پرندهای نقطه‌چین و خط پُر به ترتیب معرف مقادیر منفی و مثبت و خط صفر ضخیم شده است. محدوده جغرافیایی در این شکل از ۲۰ درجه جنوبی تا ۷۵ درجه شمالی و از ۹۰ درجه غربی تا ۱۲۰ درجه غربی است.



شکل ۲. میانگین بی‌هنجاری باد مداری در تراز ۲۰۰ hPa برای فاز ۷ از رخدادها بحرانی MJO. پرندهای نقطه‌چین و خط پُر به ترتیب معرف مقادیر منفی و مثبت و خط صفر ضخیم شده است. محدوده جغرافیایی مانند شکل ۱ است.

رخداد NAO بحرانی مثبت، به تدریج بی‌هنجاری جت شمالی تضعیف و به عکس جت جنوبی روی اطلس شمالی تقویت می‌شود. لین و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که علت این پدیده، شار تکانه پیچکی استواسو در ناحیه اطلس هنگام فاز مثبت NAO است. در روزهای ۲۰ (شکل ۱-ه) و ۲۵ (شکل ۱-و) پس از رخداد NAO بحرانی مثبت، بی‌هنجاری جت جنوبی دارای انتشار شرق‌سوی قابل توجهی است و به عرض‌های پایین‌تر گسترش می‌یابد. مرکز بیشینه بی‌هنجاری بادهای غربی که در روز ۱۵ در غرب آفریقا بود، در روز ۲۰ به نوار شمالی آفریقا و در روز ۲۵ به منتهی‌الیه جنوب آسیا و اقیانوس هند می‌رسد. در روزهای ۲۰ و ۲۵، علاوه بر انتشار شرق‌سوی این بی‌هنجاری مثبت باد مداری، گسترش و نفوذ آن به عرض‌های جنوبی‌تر و حتی پایین‌تر از خط استوا مشاهده می‌شود. انتشار شرق‌سوی این بی‌هنجاری‌ها مشابه انتشار شرق‌سوی موج کلونین است. در مقاله لین و همکاران (۲۰۰۷a) که با استفاده از یک مدل معادله بسط‌هوا خشک، همرفت MJO شبیه‌سازی شده است، نتایج حاکی از آن است که واداشت بی‌هنجاری تاوایی ناشی از NAO در ناحیه اطلس، منجر به ایجاد موج کلونین در مناطق حاره‌ای نیمکره شرقی می‌شود و به سمت شرق انتشار می‌یابد.

در روز ۲۵ پس از رخداد NAO مثبت (شکل ۱-و)، بی‌هنجاری بادهای غربی روی اقیانوس هند مشاهده می‌شود. مشابه همین الگو در فاز ۷ از MJO وجود دارد (شکل ۲). طبق تعریف، دینامیک و ساختار تراز بالای MJO بدین گونه است که در مناطقی که بادهای غربی در سطوح فوقانی وجود دارد، همراه با همگرایی در بالا و واگرایی در سطوح پایین و در نتیجه حرکات نزولی و هوای خشک است (غضنفری لاکه، ۱۳۸۸). از آنجا که براساس ویژگی فازهای MJO، فازهای ۶ و ۷ از MJO با حرکات نزولی و هوای صاف و خشک در مرکز اقیانوس

NAO مثبت و منفی بر باد تراز بالای جو مناطق حاره‌ای از اقیانوس اطلس تا اقیانوس‌های هند و آرام مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش ۴-۲ نیز با استفاده از نقشه‌های ترکیبی تأخیری بی‌هنجاری تابش موج بلند خروجی (OLR) به تفکیک فازهای بحرانی NAO، تحول زمانی بی‌هنجاری OLR که شاخص مناسبی برای نقاط بیشینه و کمینه همرفت و بارش است، برای ۵ تا ۲۵ روز پس از رخدادهای NAO بحرانی مثبت و منفی بررسی می‌شود و اثر احتمالی رخدادهای NAO مثبت و منفی بر همرفت مناطق حاره‌ای مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۱ بی‌هنجاری باد مداری تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال

الف) رخدادهای NAO بحرانی مثبت

در شکل ۱، تحول زمانی میانگین بی‌هنجاری باد مداری تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال مربوط به دوره رخداد NAO بحرانی مثبت و همچنین برای ۵ تا ۲۵ روز پس از آن آمده است. در روز صفر پس از رخداد NAO بحرانی مثبت (شکل ۱-الف) در ناحیه اطلس شمالی، مجزا شدن دو جت جنب‌قطبی و جنب‌حاره کاملاً مشخص است؛ بدین‌صورت که دو ناحیه بیشینه بی‌هنجاری مثبت باد مداری (بی‌هنجاری بادهای غربی)، یکی در عرض‌های بین ۵۰ تا ۶۰ درجه شمالی و دیگری در عرض‌های بین ۱۰ تا ۲۰ درجه شمالی روی اطلس شمالی مشاهده می‌شود. بنا بر تعریف نوسان اطلس شمالی (NAO)، در فاز مثبت NAO، کم‌فشار جنب‌قطبی گرینلند در شمال اطلس و پُرفشار جنب‌حاره‌ای در جنوب اطلس شمالی تقویت می‌شود و در نتیجه گرادیان فشار بین این دو سامانه افزایش می‌یابد که براساس رابطه بین باد و گرادیان فشار، جت جنب‌قطبی ضمن تقویت به سمت قطب جابه‌جا و از جت جنب‌حاره جدا می‌شود (نصر اصفهانی، ۱۳۸۸).

با توجه به شکل‌های ۱-ب تا ۱-د مشاهده می‌شود که با گذشت زمان و در روزهای پنجم تا پانزدهم پس از

ج). همچنین در ناحیه اطلس جنوبی تا افریقا و غرب و مرکز اقیانوس هند تا روز دهم پس از فاز منفی NAO، عمدتاً بی‌هنجاری‌ها صفر یا مثبت هستند. به تدریج در روزهای ۱۵ و ۲۰، در افریقا و غرب اقیانوس هند شاهد تضعیف بی‌هنجاری‌های مثبت باد مداری و ظهور و گسترش تدریجی بی‌هنجاری بادهای شرقی تا غرب اقیانوس هند و تا عرض حدود ۱۰ درجه شمالی هستیم (شکل‌های ۳-د و ۳-ه). در روز ۲۵م، بی‌هنجاری‌های شرقی واقع روی مرکز اقیانوس هند تقویت می‌شوند و گسترش بیشتری تا عرض‌های بالاتر و تا حدود عرض ۲۰ تا ۲۵ درجه شمالی می‌یابند (شکل ۳-و). در واقع، در مقایسه با روزهای پس از فاز مثبت NAO که تقویت جت افریقا-آسیا وجود دارد و در نهایت پس از ۲۵ روز سبب گسترش و انتشار بی‌هنجاری بادهای غربی تا مرکز اقیانوس هند می‌شود، در روزهای پس از فاز منفی NAO، تضعیف جت افریقا-آسیا دیده می‌شود که پس از ۲۵ روز، شرایط برای گسترش بی‌هنجاری‌های شرقی روی اقیانوس هند را مساعد می‌کند.

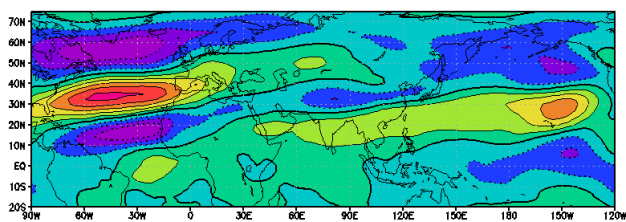
با مقایسه روز ۲۵ پس از NAO منفی (شکل ۳-و) با روز ۲۵ پس از NAO مثبت (شکل ۳-ا) به وضوح مشخص است که الگوی بی‌هنجاری ناحیه افریقا تا مرکز اقیانوس هند در این دو فاز برعکس است. در روز ۲۵ پس از NAO مثبت، در ناحیه افریقا از خط استوا تا عرض ۳۰ درجه شمالی و در اقیانوس هند تا عرض ۲۰ درجه شمالی، بی‌هنجاری بادهای غربی مشاهده می‌شود؛ در حالی که در همین نواحی در روز ۲۵ پس از NAO منفی، بی‌هنجاری بادهای شرقی وجود دارد. بنابراین برخلاف روز ۲۵ پس از فاز مثبت NAO (شکل ۳-ا) و که الگوی بی‌هنجاری باد مداری ۲۰۰ hPa به‌ویژه در ناحیه افریقا تا مرکز اقیانوس هند مشابه فاز ۷ از MJO بحرانی است (شکل ۲)، در روز ۲۵ پس از فاز منفی NAO (شکل ۳-و)، الگو مشابه فاز ۳ از MJO بحرانی (شکل ۴) است. در فاز ۳ از MJO بحرانی

هند همراه است، با توجه به شکل ۲ در فاز ۷ از MJO شاهد بادهای غربی و همگرایی در تراز بالا در این نواحی هستیم. بنابراین ۲۵ روز پس از رخداد NAO مثبت، الگوی باد تراز بالای جو در منطقه اقیانوس هند مشابه الگوی فاز ۷ می‌شود و می‌توان انتظار داشت که در این شرایط فاز ۷ از MJO در اقیانوس هند شکل گیرد.

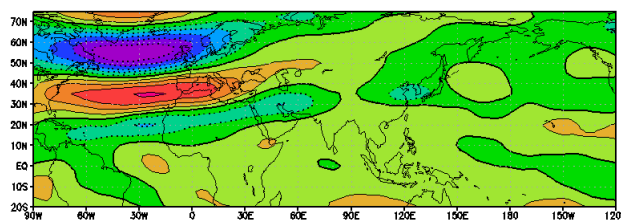
ب) رخداد های NAO بحرانی منفی

شکل ۳ تحول زمانی میانگین بی‌هنجاری باد مداری تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال مربوط به رخداد NAO بحرانی منفی و همچنین برای ۵ تا ۲۵ روز پس از آن را نشان می‌دهد. در روز صفر پس از رخداد NAO منفی در ناحیه اطلس شمالی، به هم پیوستن دو جت جنب قطبی و جنب‌حاره مشاهده می‌شود؛ بدین صورت که یک ناحیه بیشینه بی‌هنجاری مثبت باد مداری در عرض‌های بین ۳۰ تا ۴۰ درجه شمالی و دو ناحیه بیشینه بی‌هنجاری منفی باد مداری (بی‌هنجاری بادهای شرقی) یکی در عرض‌های بین ۵۰ تا ۶۰ درجه شمالی و دیگری در عرض‌های بین ۱۰ تا ۲۰ درجه شمالی روی اطلس شمالی وجود دارد (شکل ۳-الف). بنابر تعریف نوسان اطلس شمالی (NAO)، در فاز منفی NAO، کم‌فشار جنب قطبی گرینلند در شمال اطلس و پرفشار جنب‌حاره‌ای در جنوب اطلس شمالی تضعیف می‌شود و در نتیجه گرادیان فشار بین این دو سامانه کاهش می‌یابد که طبق رابطه بین باد و گرادیان فشار، جت جنب قطبی ضمن تضعیف به سمت عرض‌های پایین‌تر جابه‌جا و به جت جنب‌حاره می‌پیوندد (نصر اصفهانی، ۱۳۸۸).

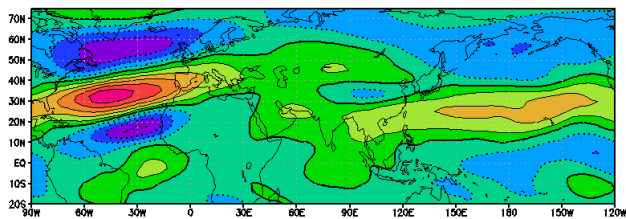
همانند فاز مثبت NAO که ۵ تا ۱۵ روز پس از آن جت شمالی تضعیف و جت جنوبی تقویت می‌شود، در فاز منفی NAO نیز در روزهای ۵ تا ۱۰ پس از آن، ناحیه بی‌هنجاری منفی بیشینه شمالی تضعیف و ناحیه بی‌هنجاری منفی بیشینه جنوبی تقویت می‌شود (شکل‌های ۳-ب و ۳-ب).



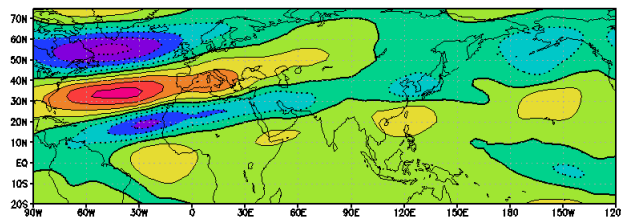
(د)



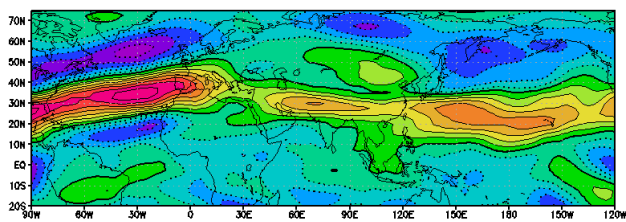
(الف)



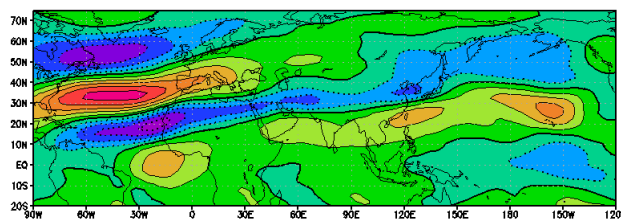
(ه)



(ب)



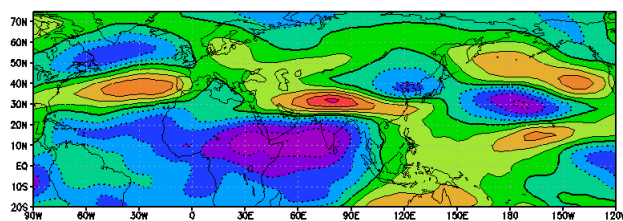
(و)



(ج)



شکل ۳. مشابه شکل ۱، ولی برای رخدادهای NAO منفی بحرانی منفی.



شکل ۴. مشابه شکل ۲، ولی برای فاز ۳ از رخدادهای بحرانی MJO.

بالا و همرفت و پوشش ابر یا بارش است (غضنفری لاکه، ۱۳۸۸). در نتیجه در روز ۲۵ پس از فاز منفی NAO که

(شکل ۴)، بی‌هنجاری بادهای شرقی روی مرکز اقیانوس هند در سطوح فوقانی وجود دارد که همراه با واگرایی در

همچنین، در روز ۵ یک ناحیه بیشینه بی‌هنجاری مثبت در افریقا شکل می‌گیرد که تا روز ۲۵ به سمت شرق منتقل می‌شود. این ناحیه در روز ۱۰ تا غرب اقیانوس هند و در روز ۱۵ تا مرکز اقیانوس هند می‌رسد و در روزهای ۲۰ و ۲۵ در مرکز و شرق اقیانوس هند تا قاره دریایی قرار می‌گیرد. به نظر می‌رسد که این انتشار غرب به شرق ناحیه بی‌هنجاری مثبت OLR، ناشی از همان انتشار غرب به شرق بی‌هنجاری بیشینه بادهای غربی تراز ۲۰۰ hPa باشد که در بخش ۴-۱ شرح داده شد.

با توجه به شکل ۵-۵ و مربوط به بی‌هنجاری OLR در روز ۲۵ پس از فاز مثبت NAO، در مرکز و شرق اقیانوس هند تا قاره دریایی بی‌هنجاری مثبت OLR دیده می‌شود که به معنای کاهش یا نبود ابر و بارش است. این مشاهدات با ویژگی‌های MJO که در فاز ۷ آن در نواحی مرکزی و شرق اقیانوس هند بی‌هنجاری مثبت OLR وجود دارد، سازگار است (شکل ۶). به عبارت دیگر، در این فاز MJO ناحیه همرفت و بارش به اقیانوس آرام منتقل می‌شود و به عکس در اقیانوس هند هوای بدون ابر و بارش حاکم شده است. با مقایسه دو شکل ۵-۵ و ۶ مشاهده می‌شود که در روز ۲۵ پس از فاز مثبت NAO و در فاز ۷ از MJO در اقیانوس هند بی‌هنجاری مثبت OLR و به عکس در اقیانوس آرام، به ویژه در محدوده طول جغرافیایی بین ۱۵۰ درجه شرقی تا ۱۵۰ درجه غربی، بی‌هنجاری منفی OLR وجود دارد. بنابراین الگوی بی‌هنجاری OLR در روز ۲۵ پس از NAO مثبت بحرانی مشابه فاز ۷ از MJO است.

نکته قابل توجه آنکه در روز ۲۵ پس از NAO مثبت بحرانی، بین نقشه بی‌هنجاری OLR (شکل ۵-۵) و باد مداری تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۱-۵) و همچنین الگوی فاز ۷ از MJO سازگاری وجود دارد. درست در همان مناطق مرکزی اقیانوس هند که همراه با بی‌هنجاری بیشینه بادهای غربی در تراز ۲۰۰ hPa است (شکل ۱-۵)،

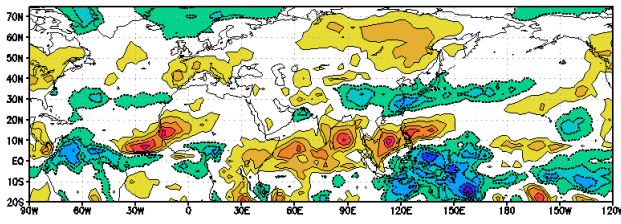
بی‌هنجاری بادهای شرقی در مرکز اقیانوس هند وجود دارد، انتظار می‌رود که سبب همرفت و بارش در این نواحی بشود و شرایط برای ایجاد فاز ۳ از MJO فراهم شود.

۴-۲ بی‌هنجاری تابش موج بلند خروجی

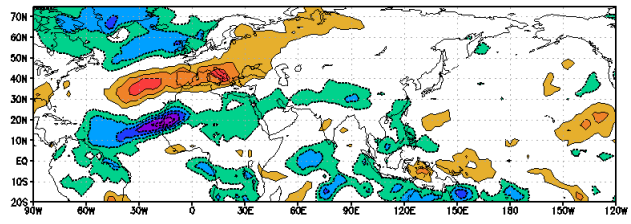
الف) رخدادهای NAO بحرانی مثبت

تحول زمانی میانگین بی‌هنجاری تابش موج بلند خروجی برای دوره رخداد NAO بحرانی مثبت و همچنین برای ۵ تا ۲۵ روز پس از آن در شکل ۵ آورده شده است. نقشه‌های بی‌هنجاری تابش موج بلند خروجی، معیار مناسبی برای مشخص شدن مناطق همرفت، پوشش ابر یا بارش (بی‌هنجاری منفی) و مناطق حرکات نزولی، هوای بدون ابر یا خشک (بی‌هنجاری مثبت) است. مطابق شکل ۵-الف، در روز صفر پس از رخداد NAO بحرانی مثبت در ناحیه اطلس شمالی، دو ناحیه بارش و همرفت به صورت دو ناحیه کمینه بی‌هنجاری تابش موج بلند خروجی، یکی در عرض‌های بین ۵۰ تا ۶۰ درجه شمالی و دیگری در عرض‌های بین ۱۰ تا ۲۰ درجه شمالی روی اطلس شمالی مشاهده می‌شود. این دو ناحیه دقیقاً منطبق بر دو ناحیه جت جنب‌قطبی و جنب‌حاره‌ای در شکل ۱-الف است. طبق مبانی دینامیک جو، جت تراز بالا شاخصی از مسیر توفان یعنی محل عبور چرخندها و بارش و در نتیجه بی‌هنجاری منفی OLR است.

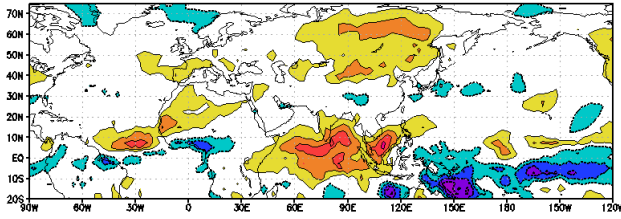
در روزهای ۵ تا ۲۵ پس از NAO مثبت بحرانی (شکل‌های ۵-ب تا ۵-و)، ناحیه کمینه بی‌هنجاری OLR که در روز اول در غرب اقیانوس هند قرار داشت، به سمت شرق انتشار می‌یابد. این ناحیه بی‌هنجاری در روز ۵ به مرکز اقیانوس هند (شکل ۵-ب)، در روز ۱۰ به شرق اقیانوس هند (شکل ۵-ج)، در روز ۱۵ به قاره دریایی (شکل ۵-د) و در روزهای ۲۰ و ۲۵ به غرب و مرکز اقیانوس آرام جابه‌جا می‌شود (شکل‌های ۵-ه و ۵-و).



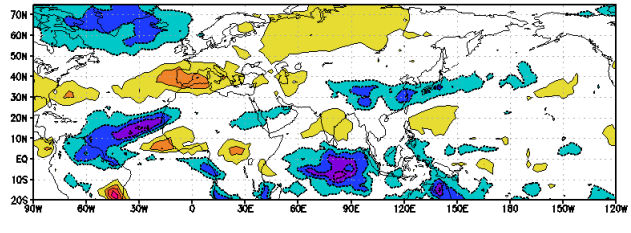
(د)



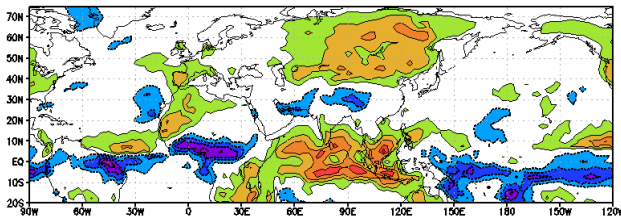
(الف)



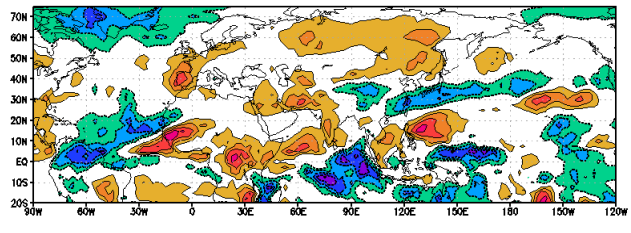
(ه)



(ب)



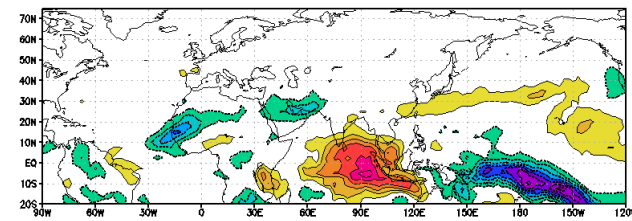
(و)



(ج)



شکل ۵. میانگین بی‌هنجاری OLR برای روزهای ۰ (الف)، ۵ (ب)، ۱۰ (ج)، ۱۵ (د)، ۲۰ (و) و ۲۵ (ه) پس از رخداد های بحرانی مثبت NAO. محدوده جغرافیایی مانند شکل ۱ است. خط صفر حذف شده. رنگ سرخ و پربندهای خط پُر با مقادیر مثبت نشانگر هوای صاف و رنگ آبی و پربندهای نقطه‌چین با مقادیر منفی نشانگر ابرناکی و بارش است.



شکل ۶. میانگین بی‌هنجاری OLR برای فاز ۷ از رخداد های بحرانی MJO. محدوده جغرافیایی مشابه شکل ۵ است.

پس از NAO مثبت همین جهت انتشار بی‌هنجاری‌ها است. همان‌طور که در شکل‌های ۵- الف تا ۵- و مشاهده می‌شود، پس از رخداد NAO مثبت، انتشار شرق‌سوی بی‌هنجاری‌ها از آفریقا تا اقیانوس هند و آرام وجود دارد. به نظر می‌رسد که تفاوت در جهت انتشار بی‌هنجاری‌های OLR، از تفاوت در بی‌هنجاری باد مداری تراز ۲۰۰ hPa در رخدادهای NAO مثبت و منفی ناشی می‌شود.

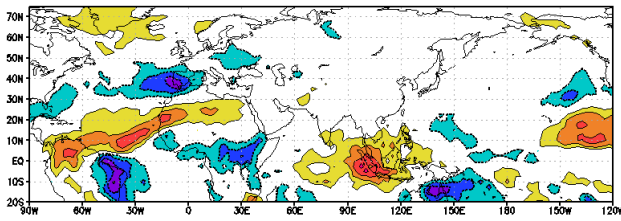
در شکل ۷- و که مربوط به بی‌هنجاری OLR در روز ۲۵ پس از فاز منفی NAO است، در اقیانوس هند بی‌هنجاری منفی OLR دیده می‌شود که به معنای افزایش ابر و بارش است. این مشاهدات با ویژگی‌های فاز ۳ از MJO که در نواحی مرکزی و شرق اقیانوس هند بی‌هنجاری منفی OLR وجود دارد، سازگار است (شکل ۸). با مقایسه دو شکل ۷- و ۸ مشاهده می‌شود که در روز ۲۵ پس از فاز منفی NAO و در فاز ۳ از MJO، در اقیانوس هند بی‌هنجاری منفی OLR و به‌عکس در اقیانوس آرام، به‌ویژه در محدوده طول جغرافیایی بین ۱۲۰ تا ۱۵۰ درجه شرقی، بی‌هنجاری مثبت OLR وجود دارد. بنابراین الگوی بی‌هنجاری OLR در روز ۲۵ پس از NAO منفی بحرانی مشابه فاز ۳ از MJO است. همچنین در روز ۲۵ پس از NAO منفی بحرانی، بین نقشه بی‌هنجاری OLR و باد مداری تراز ۲۰۰ hPa و الگوی فاز ۳ از MJO همخوانی وجود دارد. در همان مناطق مرکزی اقیانوس هند که در شکل ۳- و بی‌هنجاری بیشینه بادهای شرقی در تراز ۲۰۰ hPa دیده می‌شود، در شکل ۷- و نیز بی‌هنجاری منفی بیشینه OLR وجود دارد. به‌عکس در قاره دریایی و در محدوده بین طول‌های ۱۱۰ تا ۱۳۰ درجه شرقی و عرض‌های بین ۰ تا ۲۰ درجه شمالی که همراه با بی‌هنجاری بادهای غربی است، بی‌هنجاری مثبت OLR مشاهده می‌شود.

در شکل ۵- و نیز بی‌هنجاری مثبت بیشینه OLR مشاهده می‌شود. به‌عکس، در اقیانوس آرام و در محدوده بین طول‌های ۱۴۰ درجه شرقی تا ۱۲۰ درجه غربی و عرض‌های بین ۲۰ درجه جنوبی تا ۱۰ درجه شمالی که بی‌هنجاری بیشینه بادهای شرقی وجود دارد، بی‌هنجاری منفی و کمینه OLR به چشم می‌خورد.

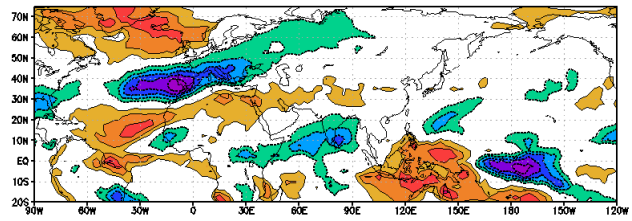
ب) رخدادهای NAO بحرانی منفی

در شکل ۷، تحول زمانی میانگین بی‌هنجاری OLR برای رخداد NAO بحرانی منفی و همچنین برای ۵ تا ۲۵ روز پس از آن مشاهده می‌شود. در روز صفر پس از رخداد NAO بحرانی منفی در ناحیه اطلس شمالی، یک ناحیه بیشینه بارش و همرفت (بی‌هنجاری کمینه OLR) در بین عرض‌های ۳۰ تا ۴۰ درجه شمالی کاملاً مشخص است (شکل ۷- الف). این ناحیه دقیقاً منطبق بر بی‌هنجاری مثبت بیشینه باد مداری (بیشینه بی‌هنجاری بادهای غربی) تراز ۲۰۰ hPa (شکل ۳- الف) و همان ناحیه به‌هم پیوستن جت قطبی و جنب‌حاره هنگام رخداد NAO منفی است که در بخش ۴-۱ شرح داده شد. به‌عکس، دو ناحیه بیشینه بی‌هنجاری OLR، یکی در عرض‌های بین ۵۰ تا ۷۰ درجه شمالی و دیگری در عرض‌های بین ۱۰ تا ۲۰ درجه شمالی روی اطلس شمالی وجود دارد که این دو ناحیه دقیقاً بر بی‌هنجاری منفی بیشینه باد مداری تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۳- الف) منطبق‌اند.

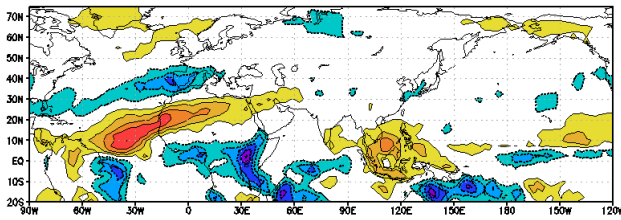
در ۵، ۱۰ و ۱۵ روز پس از رخداد NAO منفی، از غرب اقیانوس آرام تا اقیانوس هند و آفریقا شاهد انتشار غرب‌سوی الگوی بی‌هنجاری OLR هستیم (شکل‌های ۷- الف تا ۷- د). در ادامه، در روز ۲۰ یک ناحیه بی‌هنجاری منفی OLR در غرب و مرکز اقیانوس هند وجود دارد که در روز ۲۵ با شدت بیشتر تا شرق اقیانوس هند گسترش می‌یابد (شکل‌های ۷- ه و ۷- و). در واقع تفاوت عمده این الگو با تحول زمانی الگوی بی‌هنجاری OLR در روزهای



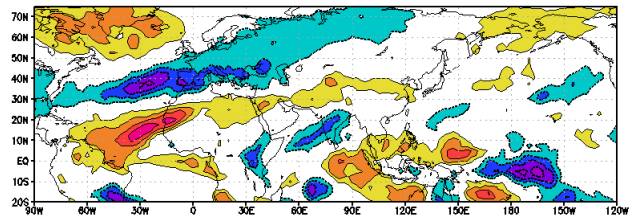
(د)



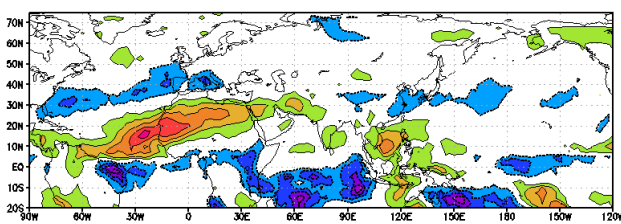
(الف)



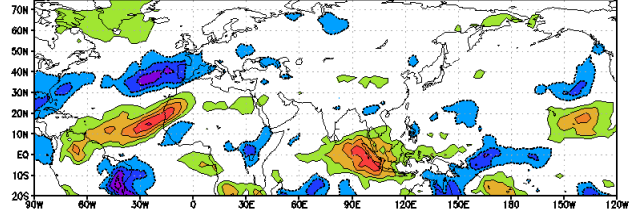
(ه)



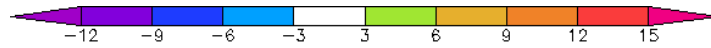
(ب)



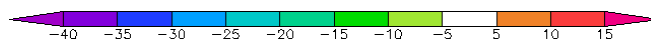
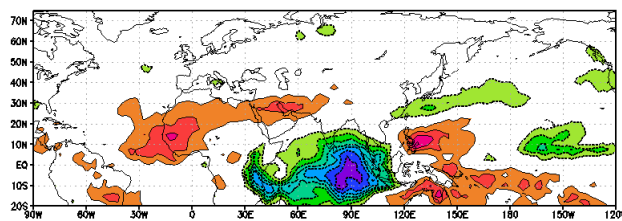
(و)



(ج)



شکل ۷. مشابه شکل ۵ ولی برای رخدادهای NAO بحرانی منفی.



شکل ۸. مشابه شکل ۶ ولی برای فاز ۳ از رخداد های بحرانی MJO

۵ اثر MJO بر NAO

با توجه به نتایج بخش ۴ و جدول ۱، انتظار می‌رود که فازهای ۲ و ۳ و همچنین فازهای ۶ و ۷ از MJO بحرانی دارای بیشترین تأثیر بر NAO با تأخیر ۵ تا ۱۵ روز باشند. بنابراین در این بخش، اثر دو فاز ۳ و ۷ از MJO بحرانی بر NAO مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این راستا، با تهیه نقشه‌های ترکیبی تأخیری بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی hPa ۵۰۰ به تفکیک فازهای ۳ و ۷ از MJO، تحول زمانی الگوی بی‌هنجاری گردش جوئی مناطق برون‌حاره‌ای در ناحیه امریکای شمالی، اطلس شمالی و در نتیجه تغییرات NAO، برای ۵ تا ۱۵ روز پس از فاز ۳ و ۵ تا ۱۰ روز پس از فاز ۷ از MJO بحرانی تحلیل می‌شود.

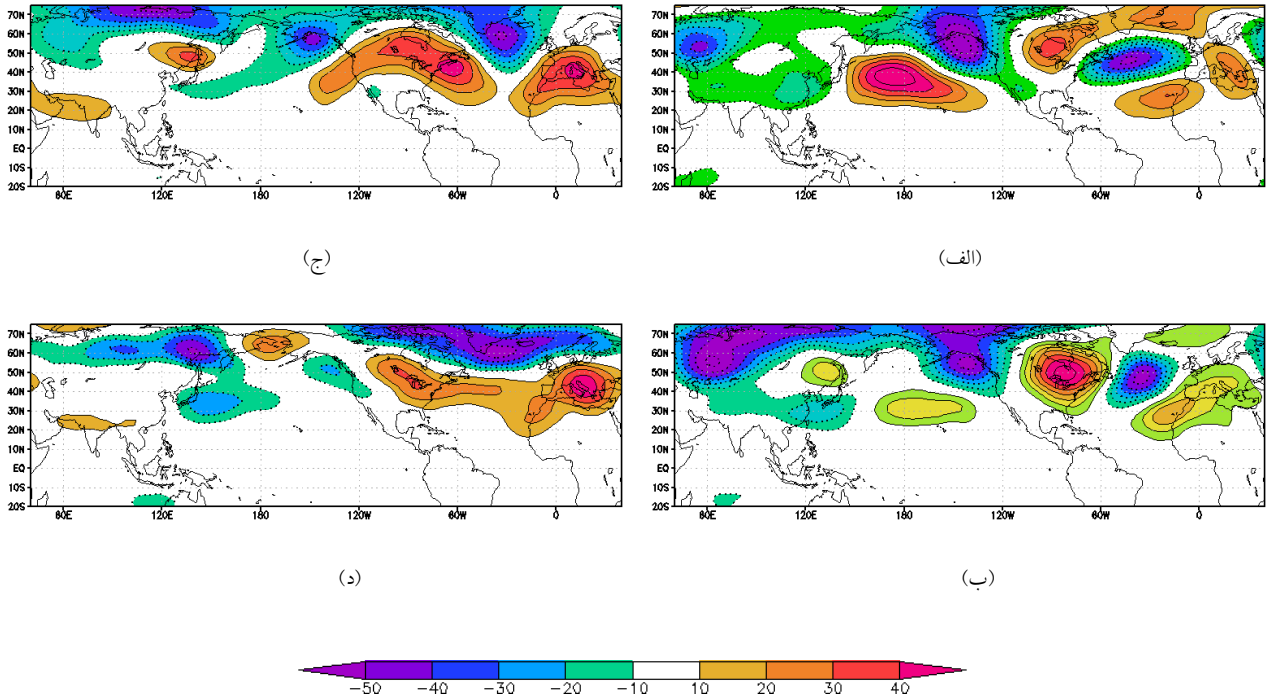
شمالی واقع بود، در روز ۱۰ (شکل ۹-ج) با جابه‌جایی به سمت قطب در عرض ۶۰ درجه شمالی قرار گرفته است. در روز ۱۵ (شکل ۹-د)، یک الگوی دوقطبی به صورت بی‌هنجاری منفی در شمال اطلس و بی‌هنجاری مثبت در مرکز اطلس شکل گرفته است که همان‌طور که پیش‌تر هم ذکر شد، این همان الگوی فاز مثبت NAO است. در شکل ۱۰، نقشه میانگین بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای رخداد NAO مثبت بحرانی آورده شده است. با مقایسه این شکل با شکل ۹-د به وضوح می‌توان شباهت الگوی بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی در ۱۵ روز پس از فاز ۳ MJO بحرانی را با روز صفر پس از رخداد NAO مثبت بحرانی روی اطلس شمالی مشاهده کرد.

ب) فاز ۷ از MJO بحرانی

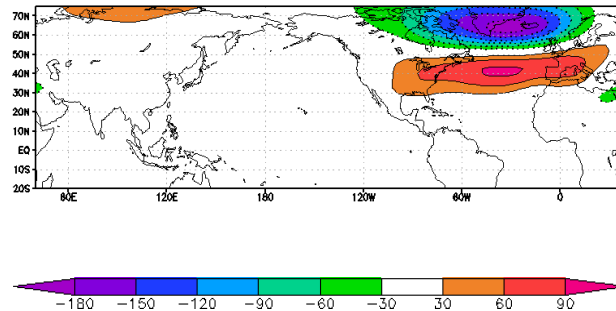
در شکل ۱۱، تحول زمانی میانگین بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ hPa در روزهای صفر، ۵ و ۱۰ پس از فاز ۷ MJO بحرانی آورده شده است. با توجه به شکل ۱۱-الف، در روز صفر پس از فاز ۷ MJO بحرانی، بی‌هنجاری مثبت ارتفاع ژئوپتانسیلی روی قاره آسیا و بی‌هنجاری منفی روی اقیانوس آرام وجود دارد که کاملاً برعکس الگوی فاز ۳ (شکل ۹-الف) است. با توجه به کوچک بودن نیروی کوریولیس در عرض‌های حاره‌ای، بی‌هنجاری قابل‌ملاحظه‌ای از ارتفاع ژئوپتانسیلی در عرض‌های حاره‌ای بین ۱۰ درجه جنوبی و ۲۰ درجه شمالی دیده نمی‌شود. همچنین، از اقیانوس آرام تا امریکای شمالی و اقیانوس اطلس شمالی، قطاری از امواج به چشم می‌خورد که در ناحیه بین امریکای شمالی تا اطلس دارای جهت‌گیری جنوب‌شرقی-شمال‌غربی است. در روزهای ۵ و ۱۰ (شکل‌های ۱۱-ب و ۱۱-ج)، به تدریج یک الگوی دوقطبی به صورت بی‌هنجاری مثبت در شمال اطلس و بی‌هنجاری منفی در مرکز اطلس شکل می‌گیرد که این همان الگوی فاز منفی NAO است. در

الف) فاز ۳ از MJO بحرانی

شکل ۹، تحول زمانی میانگین بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال مربوط به فاز ۳ از MJO بحرانی برای صفر تا ۱۵ روز پس از آن را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۹-الف، در روز صفر پس از MJO بحرانی، بی‌هنجاری منفی ارتفاع ژئوپتانسیلی روی قاره آسیا و بی‌هنجاری مثبت روی اقیانوس آرام وجود دارد. با توجه به کوچک بودن نیروی کوریولیس در عرض‌های حاره‌ای، بی‌هنجاری قابل‌توجهی از ارتفاع ژئوپتانسیلی در عرض‌های بین ۱۰ درجه جنوبی تا ۲۰ درجه شمالی دیده نمی‌شود و بی‌هنجاری‌ها عمدتاً در بالاتر از عرض ۲۰ درجه شمالی است. به علاوه، از اقیانوس آرام تا امریکای شمالی و اقیانوس اطلس شمالی، قطاری از امواج راسبی وجود دارد که در ناحیه بین امریکای شمالی تا اطلس جهت‌گیری این امواج دارای شیب بسیار ملایم جنوب‌غربی-شمال‌شرقی است، اما در روزهای ۵ و ۱۰ این جهت‌گیری شیب تندتری می‌یابد (شکل ۹-ب و ۹-ج). مرکز بی‌هنجاری کم‌ارتفاعی که در روز صفر (شکل ۹-الف) روی اطلس شمالی در عرض پایین‌تر از ۵۰ درجه



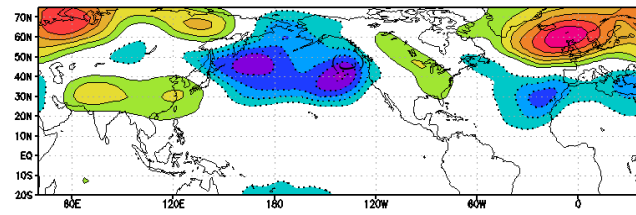
شکل ۹. میانگین بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی در تراز ۵۰۰ hPa برای روزهای ۰ (الف)، ۵ (ب)، ۱۰ (ج) و ۱۵ (د) پس از فاز ۳ از MJO بحرانی. پرندهای نقطه‌چین و خط پُر به ترتیب معرف مقادیر منفی و مثبت هستند. محدوده جغرافیایی در این شکل از ۲۰ درجه جنوبی تا ۷۵ درجه شمالی است و یک مدار کامل را در بر می‌گیرد.



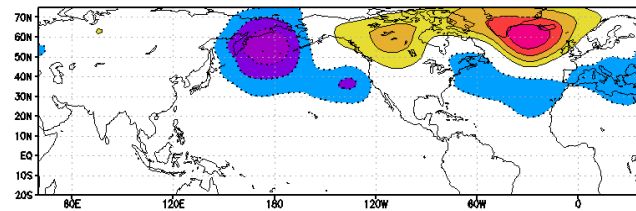
شکل ۱۰. میانگین بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی در تراز ۵۰۰ hPa برای NAO بحرانی مثبت. پرندهای نقطه‌چین و خط پُر به ترتیب معرف مقادیر منفی و مثبت و محدوده جغرافیایی مانند شکل ۹ است.

می‌توان به شباهت الگوی بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی در ۱۵ روز پس از فاز ۷ MJO بحرانی با روز صفر پس از رخداد NAO منفی بحرانی روی اطلس شمالی پی برد.

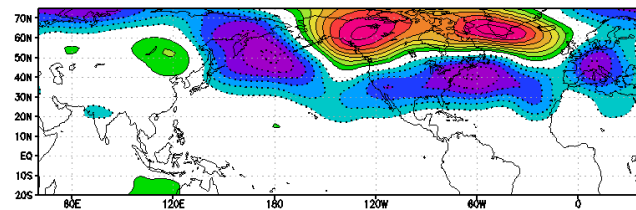
شکل ۱۲، نقشه میانگین بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ hPa برای رخداد NAO منفی بحرانی دیده می‌شود. با مقایسه این شکل با شکل ۱۱- ج به راحتی



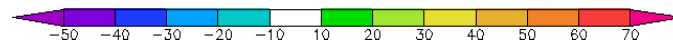
(الف)



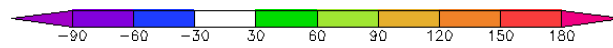
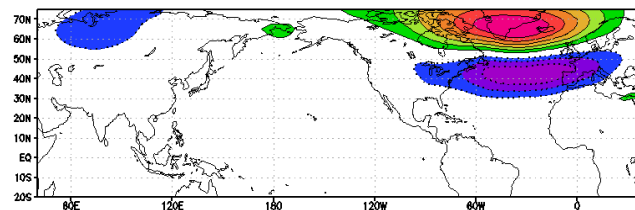
(ب)



(ج)



شکل ۱۱. میانگین بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی در تراز ۵۰۰ hPa برای روزهای ۰ (الف)، ۵ (ب) و ۱۰ (ج) پس از فاز ۷ از MJO بحرانی. محدوده جغرافیایی مانند شکل ۹ است.



شکل ۱۲. مانند شکل ۱۰، ولی برای NAO بحرانی منفی.

۶ نتیجه گیری

قابل توجهی بین این دو پدیده مشاهده می‌شود. مطابق نتایج بررسی آماری اثر NAO بر MJO بدین صورت است که ۲۰ تا ۲۵ روز پیش از فازهای ۲ و ۳ (۶ و ۷) از MJO، منفی (مثبت) NAO تقویت شده است. بررسی دینامیکی

در این پژوهش، رابطه متقابل NAO و MJO مورد بررسی قرار گرفته است. براساس داده‌های زمستان نیمکره شمالی در دوره ۳۷ ساله (۱۹۷۴-۲۰۱۱)، رابطه آماری و دینامیکی

منابع

نصر اصفهانی، م. ع.، ۱۳۸۸، بررسی اثر NAO و MJO بر اقلیم جنوب غرب آسیا: رساله دکتری هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

غضنفری لاکه، ا.، ۱۳۸۸، مطالعه موردی توزیع رطوبت و بارش بر روی کشور در زمستان ۱۳۸۶ و ارتباط احتمالی آن با همرفت MJO: پایان‌نامه کارشناسی ارشد هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

Benedict, J. J., and Lee, S., 2004, Synoptic view of the North Atlantic Oscillation: *J. Atmos. Sci.*, **91**, 121-144.

Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., and Joseph, D., 1996, The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project": *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-471.

Lin, H., Brunet, G., and Derome, J., 2007a, Intraseasonal variability in a dry atmospheric model: *J. Atmos. Sci.*, **64**, 2422-2441.

Lin, H., Brunet, G., and Derome, J., 2009, An observed connection between the North Atlantic Oscillation and the Madden-Julian Oscillation: *J. Climate.*, **22**, 364-380.

Matthews, A. J., and Kiladis, G. N., 1999, The Tropical-Extratropical interaction Between high-frequency transients and the Madden-Julian Oscillation: *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 661-667.

Matthews, A. J., and Kiladis, G. N., 2000, A model of Rossby waves linked to submonthly convection over the eastern tropical Pacific: *J. Atmos. Sci.*, **57**, 3785-3798.

Matthews, A. J., 2008, Primary and successive events in the Madden-Julian Oscillation: *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **134**, 349-453.

Wheeler, M. C., and Hendon, H. H., 2004, An all-season Real-Time Multivariate MJO index: Development of an index for Monitoring and Prediction, *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1917-1932.

نیز به نتیجه‌ای مشابه می‌انجامد و حاکی از آن است که ۲۰ تا ۲۵ روز پس از فاز مثبت بحرانی NAO، بی‌هنجاری باد مداری تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال در مرکز اقیانوس هند الگوی مشابه فاز ۷ MJO را می‌یابد، درحالی‌که ۲۰ تا ۲۵ روز پس از فاز منفی بحرانی NAO، بی‌هنجاری باد مداری این تراز در همین منطقه دارای الگوی مشابه فاز ۳ MJO است. از سوی دیگر، بی‌هنجاری OLR که نشان‌دهنده بی‌هنجاری همرفت و بارش است، ۲۰ تا ۲۵ روز پس از فاز مثبت (منفی) بحرانی NAO مشابه فاز ۷ (۳) از MJO می‌شود. همچنین تحول زمانی بی‌هنجاری OLR در روزهای پس از NAO مثبت و منفی متفاوت است و با تحول زمانی بی‌هنجاری باد مداری تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال همخوانی دارد. بنابراین به نظر می‌رسد که اثر NAO بر همرفت و بارش MJO از راه القای تغییر در باد تراز بالای جو منتقل می‌شود.

به‌طور متقابل، مطابق نتایج روش آماری، اثر MJO بر NAO بدین صورت است که ۱۰ تا ۱۵ روز پس از فازهای ۲ و ۳ (۶ و ۷) از MJO بحرانی، فاز مثبت (منفی) NAO تشدید می‌شود. بررسی دینامیکی نیز نشان می‌دهد که پس از فاز ۳ (۷) از MJO بحرانی، بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ hPa در اقیانوس اطلس شمالی مشابه فاز مثبت (منفی) NAO است. جهت‌گیری قطار امواج راسبی واقع در امریکای شمالی و اقیانوس اطلس در فاز ۳ (۷) از MJO بحرانی به صورت جنوب‌غربی - شمال‌شرقی (جنوب‌شرقی - شمال‌غربی) و تحول زمانی این امواج در روزهای پس از فاز ۳ MJO با فاز ۷ MJO متفاوت است. به علاوه، تحول زمانی بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در روزهای پس از فاز ۳ (۷) از MJO در عرض‌های برون‌حاره‌ای از امریکای شمالی تا اقیانوس اطلس به گونه‌ای است که منجر به شکست و اچرخندی (چرخندی) موج در اطلس شمالی می‌شود که با مثبت (منفی) شدن فاز NAO همراه است.