

بررسی اثرات نوسان شبه‌دوسالانه (QBO) بر وردسپهر برون‌حاره‌ای در اوایل زمستان از دیدگاه انرژی

قربان اسبقی*^۱، محمدجغتایی^۲، علیرضا محب‌الحجه^۳

۱. کارشناس ارشد هواشناسی، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

۲. استادیار دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد

۳. دانشیار گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

چکیده

نوسان شبه‌دوسالانه (QBO) به‌عنوان نوسان غالب در پوشش‌سپهر حاره‌ای اثرات مهمی در منطقه برون‌حاره دارد. این اثرات همچنین در وردسپهر زیرین نیز مشاهده شده است. برای این منظور در این پژوهش اثرات نوسان QBO بر وردسپهر برون‌حاره‌ای از دیدگاه انرژی بررسی می‌شود. تغییر انرژی جنبشی پیچکی با زمان متأثر از چندین عامل واداشت نظیر همگرایی شار کل، همگرایی شار آزمین‌گرد انرژی، تبدیل کژفشار و تبدیل فشارورد است. در پژوهش حاضر از داده‌های روزانه NCEP/NCAR از سال ۱۹۵۳ تا ۲۰۱۱ میلادی برای محاسبه انرژی جنبشی و همگرایی شار کل در فازهای مختلف QBO استفاده می‌شود. نتایج حاکی از آن است که بیشینه انرژی جنبشی پیچکی بر روی مسیرهای توفان که دارای بیشینه فعالیت پیچکی هستند، قرار دارد. شدت و محل این بیشینه مقادیر در فازهای مختلف QBO متفاوت است، به‌طوری‌که این مقادیر بیشینه در همه ماه‌ها در فاز غربی قوی‌تر و گسترده‌تر از فاز شرقی است و در ماه دسامبر بیشترین مقدار خود را در مسیر توفان اطلس در ناحیه گسترده‌ای از شرق تا غرب اطلس دارد. همچنین شار کل نیز در ماه دسامبر شدت و گستره بیشتری نسبت به دیگر ماه‌ها دارد.

واژگان کلیدی: نوسان شبه‌دوسالانه، فاز غربی، فاز شرقی، انرژی جنبشی پیچکی، شار انرژی کل.

¹ gh.asbaghi@ut.ac.ir

مقدمه

(۱۰۰hPa) با دوره تناوب میانگین حدود ۲۸ ماه است. این نوسان اثراتی را در منطقه برون‌حاره‌ای و ردسپهر زبرین برجا می‌گذارد. برای همین منظور در این مقاله از دیدگاه انرژی این اثرات بررسی می‌شود. چنگ (Chang, 2001) با استفاده از معادله تکانه افقی، معادله گرایش انرژی جنبشی پیچکی را برای واحد جرم $K = \frac{1}{2} \mathbf{V}' \cdot \mathbf{V}'$ ، به صورت زیر بیان کرد:

$$\frac{\partial}{\partial t} k = -\nabla \cdot (\mathbf{V}k + \nabla \cdot \mathbf{V}_a' \phi') - \omega' \alpha' - \mathbf{V}' \cdot (\mathbf{V}_3' \cdot \nabla_3) \bar{\mathbf{V}} + \mathbf{V}' \cdot \overline{(\mathbf{V}_3' \cdot \nabla_3) \mathbf{V}'} - \frac{\partial}{\partial p} \omega k - \frac{\partial}{\partial p} \omega' \phi' + \text{Res}$$

(James, 1995)، دارای چند مرحله است. در تشابه با چرخه لورنتس، در غرب اقیانوس‌های آرام و اطلس که ناپایداری کژفشار قوی است، امواج به‌طور کلی به‌دلیل تبدیل کژفشار رشد و بعد از رسیدن به حد بحرانی، از طریق شار ژئوپتانسیل آزمینگرد شروع به تابش انرژی به جریان‌سو می‌کنند. از سوی دیگر، در شرق اقیانوس‌ها که ناپایداری کژفشار ضعیف است امواج به‌طور معمول به دلیل همگرایی شارهای انرژی در ناحیه جریان‌سوی امواج موجود رشد می‌کنند (Chang, 1993).

داده‌ها و روش کار

در این مقاله از داده‌های بازتحلیل NCEP/NCAR از سال ۱۹۵۳ تا ۲۰۱۱ با تفکیک افقی ۲٫۵×۲٫۵ درجه و تفکیک زمانی روزانه استفاده شده است. در مقاله حاضر ماه‌های نوامبر و دسامبر به‌عنوان اوایل زمستان در نظر گرفته شده است. داده‌های مورد استفاده شامل میدان‌های سرعت افقی، سرعت قائم فشاری، ارتفاع ژئوپتانسیلی و دما در منطقه‌ای از ۲۰ تا ۹۰ درجه شمالی و از ۹۰ درجه غربی تا ۹۰ درجه شرقی در ۱۲ تراز فشاری (از ۱۰۰۰ تا ۱۰۰ هکتوپاسکال) است. از این داده‌ها برای محاسبه متوسط قائم انرژی جنبشی پیچکی و همگرایی شار کل که یکی از جملات مؤثر در گرایش انرژی جنبشی است، روی ردسپهر در بازه فشاری ۱۰۰۰ تا ۱۰۰ هکتوپاسکال و نیز برای به‌دست آوردن الگوهای میانگین اقلیمی یا بلندمدت زمستان برای فازهای

گردش‌ها و نوسان‌های پوشش‌سپهری اثرات مهمی بر گردش‌های وردسپهری دارد. برای مثال نوسان اطلس شمالی (NAO) بر انرژی عرض‌های میانی تاثیر به‌سزایی دارد (نصرافهانی، ۱۳۸۸). نوسان شبه‌دوسالانه نیز یکی دیگر از این نوسان‌های مهم است. این نوسان، موسوم به QBO، در منطقه حاره پوشش‌سپهر میانی تا زیرین (بین ۱۰ hPa تا

که در آن علامت "−" میانگین زمانی، علامت پریم معرف انحراف از میانگین زمانی (مؤلفه پیچکی)، \mathbf{V} سرعت افقی، ω سرعت قائم، p فشار، ϕ ژئوپتانسیل و α حجم ویژه است. در این رابطه بردارها و عملگرها در سه بعد با اندیس ۳ و در دو بعد افقی بدون اندیس نشان داده شده‌اند. اندیس a نشان‌دهنده مؤلفه آزمینگردباد است که از تفاضل باد زمینگرد از باد واقعی حاصل می‌شود. عبارت Res نیز به‌منزله باقی مانده، شامل اثراتی از قبیل اصطکاک و خطای ناشی از درونیایی است (Nasre-Esfahani et al, 2011). در معادله گرایش انرژی جنبشی پیچکی، جمله اول سمت راست، همگرایی شار فرارفتی انرژی و شار آزمینگرد ژئوپتانسیل را نشان می‌دهد که مجموع آنها شار انرژی کل نامیده می‌شود. در مناطقی که هر یک از این دو دارای مقادیر مثبت (منفی) باشند، همگرایی (واگرایی) انرژی رخ می‌دهد و اثر مثبت (منفی) بر مقدار انرژی جنبشی پیچکی دارند. جمله دوم مربوط به تبدیل کژفشار است که بیانگر تبدیل انرژی پتانسیلی در دسترس پیچکی به انرژی جنبشی پیچکی است. جمله‌های سوم و چهارم تبدیل فشارورود هستند که معرف تبادل انرژی جنبشی میان پیچک و حالت میانگین شاره می‌باشد. جمله پنجم نشان‌دهنده همگرایی قائم فرارفت قائم انرژی جنبشی پیچکی و جمله ششم معرف شار قائم انرژی است.

چرخه انرژی لورنتس که فرآیندهای تولید و نابودی انرژی جنبشی پیچکی را در هر نیمکره بیان می‌کند

شرقی و غربی QBO و همچنین تفاضل فاز شرقی از غربی، در بازه زمانی مورد مطالعه استفاده شده است. در این پژوهش همه محاسبات از لحاظ سطح اطمینان آماری نیز بررسی شده است.

بحث و نتیجه

در این بخش به ارائه و بررسی توزیع انرژی جنبشی پیچکی و همگرایی شار کل که یکی از جملات مؤثر در گرایش انرژی جنبشی می‌باشد، در اوایل و اواخر زمستان برای فازهای شرقی و غربی QBO و همچنین تفاضل فاز شرقی از غربی پرداخته می‌شود. دلیل استفاده از محاسبه و نمایش شکل‌های تفاضل فاز شرقی از غربی QBO، نشان دادن قوی یا ضعیف بودن فاز غربی نسبت به فاز شرقی با جزئیات بیشتر در منطقه مورد مطالعه است. بدین ترتیب مقادیر مثبت (منفی) تفاضل فاز شرقی از غربی بیانگر قوی (ضعیف) بودن فاز غربی نسبت به فاز شرقی است.

انرژی جنبشی پیچکی

شکل ۱ توزیع انرژی جنبشی پیچکی را برای اوایل زمستان (نوامبر و دسامبر) در فازهای QBO و تفاضل آنها نشان می‌دهد. در این شکل و همچنین شکل بعدی که در این بخش ارائه می‌شود، ردیف اول مربوط به فاز غربی، ردیف دوم مربوط به فاز شرقی و ردیف سوم مربوط به تفاضل فاز شرقی از فاز غربی است. در ردیف سوم تمامی شکل‌ها، خط سفید ۰/۰۵ نشان دهنده سطح اطمینان آماری ۹۵ درصد است. به‌طور کلی، بیشینه انرژی جنبشی پیچکی بر روی مسیرهای توفان که دارای بیشینه فعالیت پیچکی هستند، قرار دارد (Chang et al, 2001). شدت و محل این بیشینه مقادیر در فازهای مختلف QBO متفاوت است.

برای ماه نوامبر (شکل ۱-الف) مقدار انرژی جنبشی پیچکی در فاز غربی در ناحیه مسیر توفان اطلس بیشتر از فاز شرقی است. در حالی که در فاز غربی بیشینه انرژی در یک ناحیه گسترده واقع در مسیر توفان از غرب تا شرق اقیانوس اطلس قرار دارد، در فاز شرقی این بیشینه از غرب تا مرکز اقیانوس اطلس محدود شده است. باتوجه به شکل تفاضل دو فاز در ردیف سوم، اختلاف قابل توجهی

در انرژی جنبشی پیچکی با مقادیر مثبت در دریای خزر و شمال آن و عرض‌های میانه و پایین اقیانوس اطلس و یک مرکز منفی قوی روی شمال ترکیه و دریای سیاه وجود دارد. در ماه دسامبر (شکل ۱-ب) نیز مانند نوامبر بیشینه مقدار انرژی جنبشی پیچکی در ناحیه مسیر توفان اطلس قرار دارد و در فاز غربی کمی بیشتر از فاز شرقی است. این بیشینه انرژی در هر دو فاز نسبت به ماه نوامبر قوی‌تر شده است. در ردیف تفاضل فاز شرقی از غربی QBO، اختلاف قابل توجهی در انرژی جنبشی پیچکی با سطح اطمینان آماری بالا وجود دارد که بسیار قوی‌تر از مقدار متناظر در ماه نوامبر است. یک ناحیه مثبت قوی از جنوب غرب اروپا شروع شده و تا ایران و حتی افغانستان گسترش یافته است. در این قسمت، بیشینه اختلاف در شمال مدیترانه و جنوب غرب ایران مشاهده می‌شود که می‌توان آن را به قوی‌تر بودن جت جنب‌حاره‌ای در فاز غربی QBO ارتباط داد. به‌علاوه این اختلاف انرژی جنبشی پیچکی در دسامبر نسبت به نوامبر در میانه اقیانوس اطلس از لحاظ اطمینان آماری منطقه بیشتری را شامل می‌شود. یک مرکز منفی نیز در شمال غرب اروپا وجود دارد.

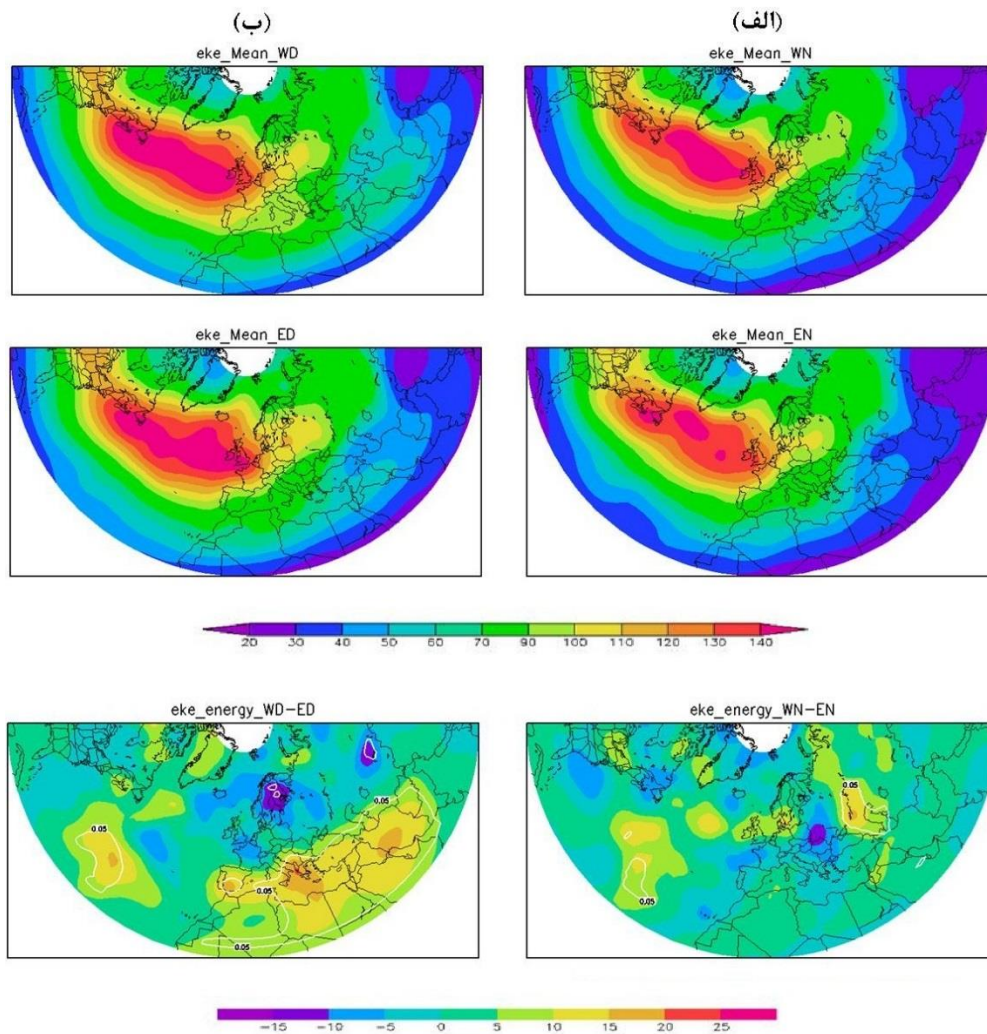
همگرایی شار کل

در شکل ۲ میانگین همگرایی شار کل، شامل شار فرارفتی و شار آزمینگرد، برای اوایل زمستان در فازهای غربی، شرقی و تفاضل فاز شرقی از غربی QBO همراه با سطح معنی‌داری آماری ارائه شده است. در شکل‌ها وجود مناطقی با مقادیر مثبت بیشینه و مقادیر منفی کمینه همگرایی شار کل، بارز است. مقادیر مثبت بیانگر همگرایی شار کل یا دریافت انرژی است که سبب تقویت انرژی جنبشی پیچکی است. اما مقادیر منفی نشان‌دهنده واگرایی شار کل یا گسیل انرژی است که موجب تضعیف انرژی جنبشی پیچکی می‌شود. ورودی مسیر توفان اطلس در شمال شرق آمریکای شمالی منطقه گسیل انرژی و شرق اطلس به‌عنوان خروجی مسیر توفان، منطقه دریافت انرژی است.

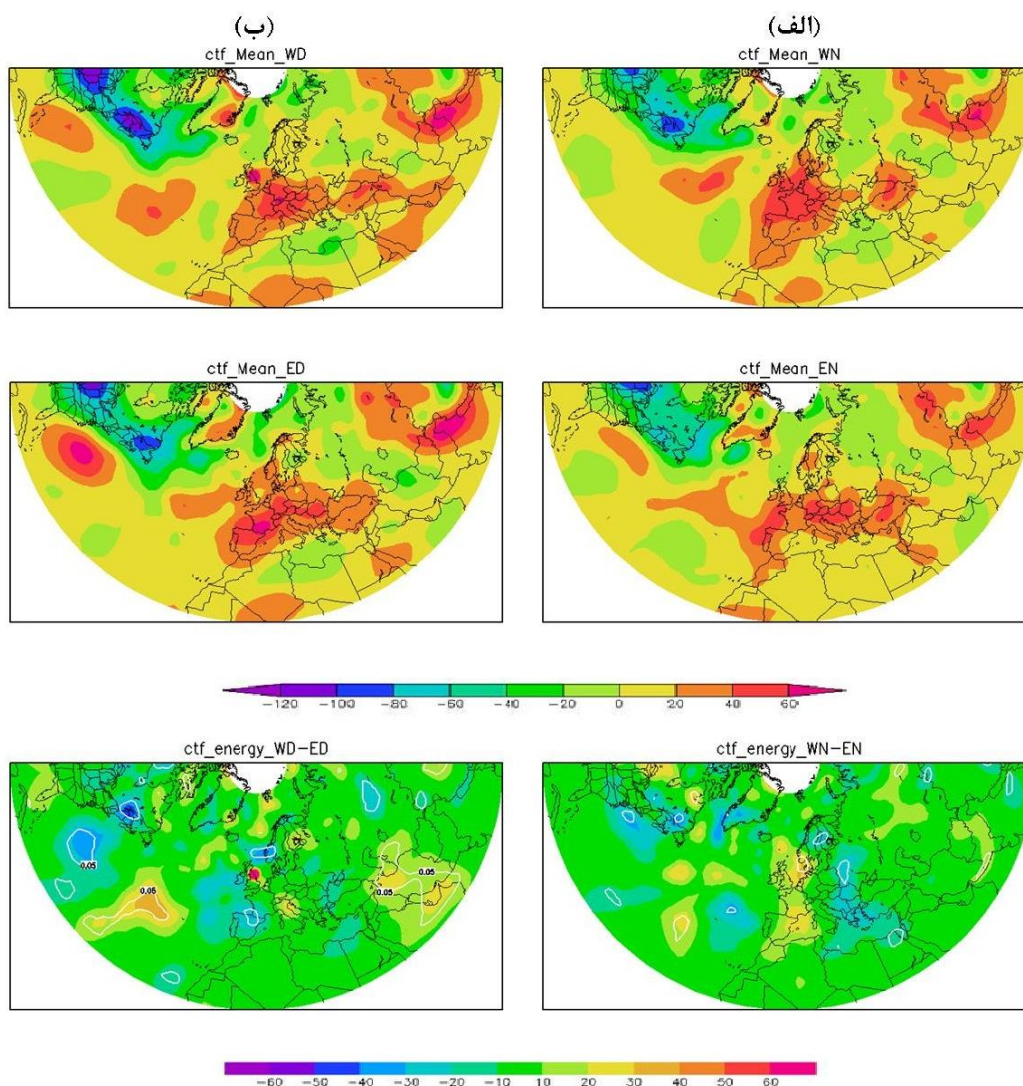
در ماه نوامبر در فاز غربی منطقه بیشینه واگرایی یا گسیل انرژی در شمال شرق آمریکای شمالی قرار دارد و نسبت به فاز شرقی منفی‌تر بوده و لذا انرژی بیشتری را

در فاز غربی به‌ویژه در ماه دسامبر شدت و گستره بیشتری دارد. این مراکز به‌دلیل رابطه مستقیم با سامانه‌های کم‌فشار سودانی، که در زمستان تاثیر بسزایی روی وضع هوای ایران دارند، اهمیت دارند. با توجه به شکل ۲، روی شمال‌شرق ایران یک منطقه واگرایی شار کل وجود دارد که در فاز شرقی ماه دسامبر بیشینه واگرایی را دارد. از روی شکل‌های ارائه شده برای تفاضل فاز شرقی از غربی، در ماه نوامبر دو ناحیه مثبت و منفی کنار هم روی اروپا قرار دارد که کاملاً در راستای نصف‌النهاری کشیده شده است. در ماه دسامبر روی ایران یک ناحیه مثبت با سطح اطمینان آماری بالا وجود دارد که بیانگر قوی‌تر بودن فاز غربی است (شکل-های ۲-الف و ۲-ب).

گسیل می‌کند. این مقادیر بیشینه واگرایی در ماه دسامبر در هر دو فاز شرقی و غربی QBO نسبت به ماه نوامبر تقویت شده‌اند. در هر دو فاز QBO مقادیر بیشینه همگرایی شار کل، در ناحیه‌ای که از شرق اطلس تا دریای سیاه کشیده شده است، وجود دارد. در فاز شرقی گستره مداری مراکز مثبت شار کل بیشتر شده است. همچنین یک مرکز واگرایی روی مدیترانه واقع شده است. این مراکز مثبت و منفی شار کل در ماه دسامبر تقویت می‌شوند. یک مرکز همگرایی روی شمال آفریقا، عربستان و شرق دریای سرخ در ماه نوامبر دیده می‌شود که در ماه دسامبر به‌شدت تقویت شده، به‌طوری‌که جنوب و جنوب‌غرب ایران را نیز شامل می‌شود. در کل مراکز مثبت همگرایی روی شمال آفریقا و عربستان



شکل ۱ توزیع میانگین انرژی جنبشی پیچکی با واحد m^2s^{-2} در فاز غربی QBO (ردیف اول)، فاز شرقی QBO (ردیف دوم) و تفاضل فاز شرقی از فاز غربی QBO (ردیف سوم)، برای اوایل زمستان: الف) ماه نوامبر، ب) ماه دسامبر.



شکل ۲ مانند شکل ۱ ولی برای جمله همگرایی شار کل با واحد $\text{m}^2\text{s}^{-2}\text{day}^{-1}$.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از انجام فرایفت‌های انرژی نشان داد، انرژی جنبشی پیچکی در همه ماه‌ها در فاز غربی بیشتر و گسترده‌تر از فاز شرقی است و در ماه دسامبر دارای بیشینه مقادیر می‌باشد. این بیشینه مقادیر در ماه دسامبر بیشتر منطقه ایران را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد به طوری که در شمال مدیترانه و جنوب غرب ایران دارای سطح اطمینان آماری بالا است. همچنین مراکز مثبت همگرایی شار کل روی شمال

آفریقا و عربستان در فاز غربی به ویژه در ماه دسامبر شدت و گستره بیشتری دارد به طوری که جنوب و جنوب غرب ایران را نیز شامل می‌شود.

منابع

1. Anstey, J. A., Shepherd, T., 2014: High-latitude influence of the quasi-biennial oscillation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 140, 1-21. DOI: 10.1002/qj.2132.

2. Baldwin, M. P., Gray, L. J., Dunkerton, T. J., Hamilton, K., Haynes, P. H., Randel, W. J., Holton, J. R., Alexander, M. J., Hirota, I., Horinouch, T., Jones, D. B. A., Kinnersley, J. S., Marquardt, C., Sato, K., and M. Takahashi, 2001: The quasi-biennial oscillation. *Rev. Geophys.* 39, 179–229.
3. Chang, E. K. M., 1993: Downstream development of baroclinic waves as inferred from regression analysis. *J. Atmos. Sci.*, 50, 2038–2053.
4. Chang, E. K. M., 2001: The structure of baroclinic wave packets. *J. Atmos. Sci.*, 58, 1694–1713.
5. Chang, E. K. M., Lee, S. and Swanson, K. L., 2002: Storm track dynamics. *J. climate*, 15, 2163–2183.
6. Holton, J. R., Tan, H. C., 1980: The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 mb. *J. Atmos. Sci.*, 37, 2200–2208.
7. James, I. N., 1994: *Introduction to Circulating Atmospheres*. Cambridge University Press, New York. 422 pp.
8. Nasre-Esfahani, M. A., 2008: The impacts of NAO and MJO on the climate of Southwest Asia. Ph.D thesis, Institute of Geophysics, University of Tehran.
9. Nasr-Esfahany, M. A., Ahmadi-Givi, F., Mohebalhojeh, A. R., 2011: An energetic view of the relation between the Mediterranean storm track and the North Atlantic Oscillation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, DOI:10.1002/qj.794.