

اثر گرمایش زمین بر مسیر توفان مدیترانه در فصل زمستان

شاهین عالمزاده^۱، فرهنگ احمدی گیوی^۲، علیرضا محبالحجه^۳

^۱دانشجوی دکتری هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، sh.alemzadeh@ut.ac.ir

^۲دانشیار گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ahmadig@ut.ac.ir

^۳دانشیار گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، amoheb@ut.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، اثر گرمایش زمین بر مسیر توفان اطلس و مدیترانه براساس داده‌های خروجی مدل ماکس پلانک در شبیه‌سازی‌های مرحله پنجم از «پروژه مقایسه متقابل مدل جفت‌شده» موسوم به CMIP5 مورد بررسی قرار می‌گیرد. سناریوی تاریخی (historical) برای دوره گذشته و سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره آینده به کار رفته است. برای تحلیل مسیر توفان یا فعالیت پیچکی از پایستاری فعالیت موج استفاده شده است. از مهم‌ترین نتایج مربوط به ترازهای بالای وردسپهر و فصل زمستان می‌توان به تبدیل ساختار دو شاخه شمالی-جنوبی مسیر توفان به ساختار تک‌شاخه مرکزی در اطلس و جریان‌سوی آن تا اروپا و غرب آسیا بر اثر گرمایش زمین اشاره کرد. همچنین مسیر توفان در اطلس، مدیترانه و دریای سیاه دچار جابه‌جایی شرق‌سو خواهد شد. این امر نتیجه‌ای امیدوارکننده از نظر افزایش نفوذ و انتقال فعالیت سامانه‌های همدیدی مدیترانه و دریای سیاه به ایران در اواخر قرن بیست‌ویکم می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مسیر توفان، فعالیت موج، گرمایش زمین، پروژه CMIP5، سناریوی Historical، سناریوی RCP8.5

Changes of winter-time Mediterranean storm track under global warming

Shahin Alemzadeh¹, Farhang Ahmadi-Givi², Alireza Mohebalhojeh²

¹PhD Student in Meteorology, Institute of Geophysics, University of Tehran

²Associate Professor of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran

Abstract

In this study, "MPI-ESM-LR" model output from phase 5 of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) is analyzed to assess the response of the North Atlantic and Mediterranean storm tracks to climate change. Historical scenario is used for the past and RCP8.5 scenario is used as the projection for the future period. The conservation of wave activity is applied as a diagnostic tool to investigate the eddy activity dynamics. In winter, the double-branch structure of storm track in the Atlantic and its downstream region in Europe and west Asia will turn into a single-branch pattern at the end of 21st century. Moreover, the wave breaking and wave packets maxima associated with both the North Atlantic and Mediterranean storm tracks and the central branch of wave activity in the Europe-Black Sea will undergo an eastward shift. This leads to a considerable increase in the impact of both the Mediterranean and Black Sea storm activities on Iran in a warming climate.

Keywords: storm track, wave activity, global warming, CMIP5, historical scenario, RCP8.5 scenario

۱ مقدمه

پژوهشگران بسیاری، فعالیت پیچکی و انتشار امواج راسبی را با روش‌های اویلری و لاگرانژی مورد مطالعه قرار داده‌اند. برای نمونه، در مطالعات مبتنی بر روش‌های اویلری، با ابزارهای فرایابی انرژی (نصراصفهانی و همکاران، ۲۰۱۱) و پایستاری فعالیت موج (احمدی گیوی و همکاران، ۲۰۱۴؛ رضاییان و همکاران، ۲۰۱۶) مسیر توفان مدیترانه و ارتباط آن با مسیر توفان اطلس و همچنین اثر آن بر جنوب غرب آسیا بررسی شده است. از سوی دیگر، در روش‌های لاگرانژی، هاسکینز و هاجز (۲۰۰۲) و ۲۰۰۵) با ابزار میدان تاوایی ترازهای پایین وردسپهر، مسیر توفان را بررسی کرده و مسیر توفان مدیترانه را نشان داده‌اند. در رابطه با تغییرات مسیر توفان بر اثر گرمایش زمین با استفاده از مشاهدات، مدل‌سازی و نیز داده‌های CMIP، پژوهش‌های مختلفی انجام شده که وجه اشتراک نتایج آنها جابه‌جایی قطب‌سوی مسیر توفان در پاسخ به واداشت‌های فعالیت بشری است (تامپسون و همکاران، ۲۰۰۰؛ آربلستر و مییل، ۲۰۰۶؛ میلر و همکاران، ۲۰۰۶؛ لو و همکاران، ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸). بیشتر این

مطالعات در مقیاس بزرگ و نیمکره‌ای و با تمرکز بر مسیرهای توفان اطلس و آرام بوده است. از جمله می‌توان به بررسی لاگراژی لی و همکاران (۲۰۱۴) بر مبنای روش هاسکینز و هاجز (۲۰۰۲ و ۲۰۰۵) و با استفاده از داده‌های CMIP5 اشاره کرد که ضمن بررسی کل کره زمین اشاراتی هم به منطقه مدیترانه کرده‌اند. ولی تا جایی که ما اطلاع داریم، تاکنون تغییرات مسیر توفان ناشی از گرمایش زمین به‌طور خاص در منطقه مدیترانه و ارتباط آن با تغییرات فعالیت موج در جنوب غرب آسیا و اطلس شمالی، به‌ویژه بر مبنای داده‌های CMIP5 و با رهیافت پایستاری فعالیت موج انجام نشده است. لذا در این پژوهش، این موضوع برای فصل زمستان و با ابزار فرایابی اویلری پایستاری فعالیت موج که اسلر و هینز (۱۹۹۹) ارائه کردند، بررسی شده است. هدف اصلی مطالعه حاضر، پاسخ به این سؤال است که فعالیت پیچکی و مسیر توفان در پاسخ به گرمایش زمین در منطقه اطلس و مدیترانه تا جنوب غرب آسیا چه تغییری خواهد کرد و سازوکارهای دینامیکی این تغییرات چگونه است.

۲ داده‌ها و روش پژوهش

در این پژوهش، داده‌های خروجی شبیه‌سازی‌های مدل MPI-ESM-LR در فاز پنجم از "پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده" موسوم به CMIP5 (تیلور و همکاران، ۲۰۱۲) استفاده شده است. این داده‌ها شامل میانگین روزانه ارتفاع ژئوپتانسیلی در چندین تراز فشاری است و دو سناریوی تاریخی (دوره ۲۶ ساله ۲۰۰۵-۱۹۸۰) و RCP8.5 (دوره ۲۴ ساله ۲۰۹۹-۲۰۷۶) را دربرمی‌گیرد. در سناریوی تاریخی، واداشت گازهای گلخانه‌ای براساس مشاهدات گذشته در قرن ۲۰ام است و سناریوی RCP8.5 متناظر با آینده‌ای است که میانگین جهانی واداشت تابشی کل ناشی از گسیل انسانی گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۱۰۰ (پایان قرن ۲۱م) به 8.5 W/m^2 خواهد رسید.

در پژوهش حاضر برای بررسی فعالیت موج و انتشار آن، از رابطه اسلر و هینز (۱۹۹۹) استفاده شده است. احمدی گیوی و همکاران (۲۰۱۴) و رضاییان و همکاران (۲۰۱۶)، این رابطه و نتایج حاصل از آن را در فرایابی و تحلیل انتشار بسته‌موج‌های راسبی در ناحیه اطلس شمالی و مدیترانه و برای فازهای فرین نوسان اطلس شمال (NAO) بررسی کرده‌اند. رابطه پایستاری فعالیت موج براساس اسلر و هینز (۱۹۹۹) به‌صورت زیر است:

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

که شار فعالیت موج به‌صورت بردار سه‌بعدی \mathbf{F} با مرتبه $O(a^2)$ ، در تقریب شبه‌زمینگرد و در دستگاه مختصات کروی و فشاری به‌صورت زیر تعریف می‌شود (اسلر و هینز، ۱۹۹۹):

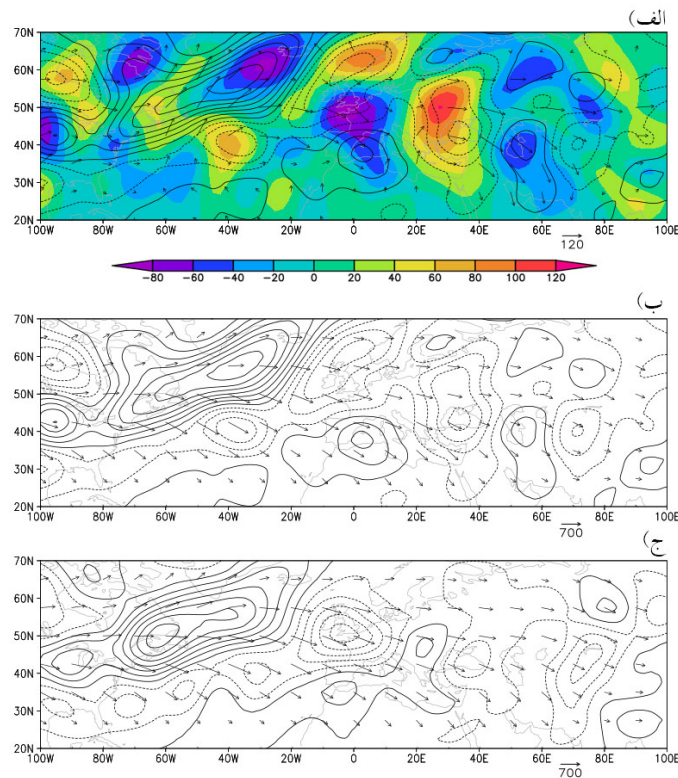
$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F^{(\lambda)} \\ F^{(\phi)} \\ F^{(p)} \end{bmatrix} = \frac{\cos \phi}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(\psi^e q^e - v^e \xi^e) + v^{e2} - \frac{\psi^e v_\lambda^e}{a \cos \phi} \\ -u^e v^e + \frac{\psi^e u_\lambda^e}{a \cos \phi} \\ \frac{f}{\Theta_p^0} \left(v^e \theta^e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

که در آن $F^{(\lambda)}$ ، $F^{(\phi)}$ و $F^{(p)}$ به ترتیب مؤلفه‌های مداری، نصف‌النه‌ای و قائم شار فعالیت موج هستند. a شعاع زمین، λ طول جغرافیایی، ϕ عرض جغرافیایی، $f = 2\Omega \sin \phi$ پارامتر کوریولیس و p فشار است. u و v به ترتیب مؤلفه‌های مداری و نصف‌النه‌ای باد، θ دمای پتانسیلی و Θ دمای پتانسیلی مرجع است. $\psi = \Phi / 2\Omega \sin \phi$ تابع جریان بوده که در آن $\Phi = gz$ ژئوپتانسیل است و z و g نیز به ترتیب ارتفاع ژئوپتانسیلی و شتاب گرانی می‌باشند. پایین‌نویس‌های λ ، ϕ و p به ترتیب مشتقات جزئی نسبت به طول، عرض و فشار هستند. همچنین، بالانویس‌های e ، به معنای «پیش‌شدگی» (انحراف از حالت پایه) و بالانویس 0 ، نشان‌دهنده «حالت پایه» است. بنابراین، U^0 ، Θ^0 و Q^0 به ترتیب باد مداری، دمای پتانسیلی مرجع و تاوایی پتانسیلی شبه‌زمینگرد «حالت پایه» هستند.

۳ تحلیل نتایج

در شکل ۱-الف، تغییرات شار افقی فعالیت موج و تغییرات میدان واگرایی آن از دوره تاریخی به آینده (RCP8.5-historical) و همچنین برای مقایسه و تحلیل بهتر، میدان واگرایی در دوره تاریخی نشان داده شده است. به‌علاوه، توزیع این میدان‌ها برای هر یک از دوره‌های تاریخی و آینده به ترتیب در شکل‌های ۱-ب و ۱-ج آمده است. تغییرات شامل سه جنبه مهم: (۱) تغییرات

شدت مسیرهای توفان، ۲) جابه‌جایی مداری در الگوی بسته‌موج‌ها و ۳) جابه‌جایی نصف‌النهاری در الگوها است که در ادامه به شرح آنها می‌پردازیم.



شکل ۱. نتایج مربوط به فصل زمستان در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال: (الف) تغییرات شار افقی فعالیت موج (بردارها) و تغییرات میدان واگرایی آن (سایه رنگی) از دوره تاریخی به دوره آینده براساس سناریوی RCP8.5 (RCP8.5-historical)، به همراه میدان واگرایی آن در دوره گذشته (پریندها)؛ (ب) و (ج) شار افقی فعالیت موج (بردارها) و میدان واگرایی آن (پریندها) به ترتیب برای دوره‌های تاریخی (historical) و آینده (RCP8.5). بازه پربندها $m s^{-1}$ است. مقیاس بردارها در پایین و سمت راست شکل‌ها نمایش داده شده و مؤلفه نصف‌النهاری آن برای نمایش بهتر در 10^{-02} ضرب شده است.

همان‌طور که در شکل ۱-الف مشاهده می‌شود، در مناطقی که میدان واگرایی شار فعالیت موج در دوره تاریخی مثبت (منفی) بود، تغییرات آن در آینده به صورت منفی (مثبت) است. این نتیجه به معنای کاهش دامنه نوسانات در میدان واگرایی و به عبارتی تضعیف زوج‌های واگرایی-همگرایی شار فعالیت موج و بنابراین کاهش شدت مسیر توفان در اکثر مناطق است. در اطلس شمالی، برخلاف گذشته (شکل ۱-ب) که یک زوج واگرایی-همگرایی در عرض ۶۰ درجه شمالی و یک زوج دیگر در عرض ۴۰ درجه وجود داشت که به ترتیب مشخصه‌های دو شاخه شمالی و جنوبی مسیر توفان اطلس بودند، در آینده (شکل ۱-ج) هر دو شاخه تضعیف و تقریباً از بین رفته و به جای آن یک زوج واگرایی-همگرایی در عرض ۵۰ درجه شکل می‌گیرد. به بیانی، دو شاخه شمالی و جنوبی با یکدیگر ادغام شده و ساختار دوشاخه شمالی-جنوبی مسیر توفان اطلس در گذشته (شکل ۱-ب) به یک ساختار تک‌شاخه مرکزی در آینده (شکل ۱-ج) تبدیل می‌شود. به دنبال تبدیل ساختار دوشاخه شمالی-جنوبی مسیر توفان اطلس به یک ساختار تک‌شاخه مرکزی در آینده، در قطاع اروپا-آسیا از غرب اروپا تا شرق دریای خزر نیز مشابه همین اتفاق رخ می‌دهد. با مقایسه شکل‌های ۱-ب و ۱-ج می‌توان دریافت که بسته‌موج‌های دو شاخه جنوبی (مدیترانه) و شمالی (اسکاندیناوی) فعالیت توفان‌ها به ترتیب واقع در عرض‌های جنوب‌حاره و جنوب‌قطبی تضعیف شده و به جای آن، مشخصه‌های مسیر توفان در یک شاخه مرکزی واقع در عرض‌های میانی (۴۰ تا ۵۵ درجه شمالی) متمرکز می‌شوند.

علاوه بر جابه‌جایی نصف‌النهاری در الگوی مسیرهای توفان، جابه‌جایی مداری نیز رخ می‌دهد. در ساختار آینده مسیر توفان اطلس (شکل ۱-ج)، مرکز همگرایی آن در شرق اطلس علاوه بر جابه‌جایی استواسو نسبت به دوره تاریخی (شکل ۱-ب) و قرار گرفتن در جنوب انگلستان، به سمت شرق هم گسترش یافته و تا نواحی جنوب‌غربی، جنوبی و مرکزی اروپا را دربر خواهد گرفت. به دنبال آن، زوج واگرایی-همگرایی مرکز اروپا-دریای سیاه نیز به سمت شرق جابه‌جا شده و دامنه نفوذ آن به داخل

مرزهای ایران و نیمه غربی و شمال غربی ایران گسترش می‌یابد. همچنین با مقایسه شکل‌های ۱-ب و ۱-ج می‌توان دریافت که با دو نیم‌شدن واگرایی مدیترانه و جابه‌جایی شرق سوی هسته شرقی آن به جنوب شرق مدیترانه، ناحیه همگرایی جفت‌شده با آن که در گذشته در نیمه شرقی مدیترانه، شمال شرق آفریقا و دریای سرخ مستقر بود و دامنه نفوذ آن در خاورمیانه حداکثر تا مرزهای جنوب غربی و غربی ایران گسترش داشت، در آینده با جابه‌جایی شمال شرق سوی قابل توجه، روی نیمه غربی ایران و شمال خلیج فارس قرار خواهد گرفت. نفوذ بیشتر ناحیه همگرایی مربوط به مسیر توفان مدیترانه و نیز شاخه مرکزی اروپا-دریای سیاه به ایران نتایج مطلوب و امیدوارکننده‌ای از نظر افزایش فعالیت‌های در مقیاس همدیدی برای فصل زمستان ایران می‌باشد. نتایج مربوط به میدان‌های فعالیت موج و شار نصف‌النهار فعالیت موج (در اینجا نشان داده نشده) نیز مؤید جابه‌جایی شرق سوی ناوه بیشینه فعالیت موج و شکست و اچرخندی موج در هر دو مسیر توفان اطلس و مدیترانه در آینده است. همچنین، نتایج مربوط به شار مداری فعالیت موج (در اینجا نشان داده نشده) نشان‌دهنده تضعیف انتشار شرق سوی فعالیت موج در دو شاخه شمالی و جنوبی مسیر توفان و به‌عکس تقویت آن در عرض‌های میانی می‌باشد.

۴ نتیجه‌گیری و بحث

در این پژوهش، تغییرات مسیر توفان مدیترانه در فصل زمستان بر اثر گرمایش زمین و براساس داده‌های خروجی مدل MPI-ESM-LR در فاز پنجم از پروژه CMIP موسوم به CMIP5 مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است. به‌طور کلی چگونگی تغییرات شدت و الگوی انتشار و شکست امواج در شاخه‌های شمالی و جنوبی مسیر توفان اطلس به ترتیب تعیین‌کننده نحوه تغییرات انتشار امواج در عرض‌های شمالی و جنوبی قطعات‌های جریان سوی خود از اروپا و مدیترانه تا سبیری و جنوب غرب آسیا می‌باشد. در قطاع اطلس، تضعیف فعالیت در دو شاخه شمالی و جنوبی مسیر توفان و تقویت و تمرکز آن در شاخه مرکزی و هم‌زمان جابه‌جایی آن به سمت شرق رخ می‌دهد. به دنبال آن در جریان سوی شاخه شمالی این مسیر توفان، از شمال اروپا و اسکاندیناوی تا سبیری و همچنین در جریان سوی شاخه جنوبی آن، در مدیترانه و شمال آفریقا، قطار موج و مسیر توفان تضعیف شده و در مقابل، فعالیت در قطار موج شاخه مرکزی بین دو شاخه مدیترانه و اسکاندیناوی از مرکز اروپا تا دریا‌های سیاه و خزر متمرکز می‌گردد. هم‌زمان، بسته‌موج این شاخه روی دریای سیاه و نیز بخش جداشده‌ای از مسیر توفان مدیترانه به سمت شرق جابه‌جا شده و بدین ترتیب نفوذ هر دو شاخه به ایران افزایش می‌یابد که نتیجه‌ای مطلوب از نظر اثر بر افزایش انتقال فعالیت سامانه‌های همدیدی به ایران تلقی می‌شود.

منابع

- Ahmadi-Givi, F., M. A. Nasr-Esfahany, and A. R. Mohebalhojeh, 2014: Interaction of North Atlantic baroclinic wave packets and the Mediterranean storm track. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **140**: 754–765.
- Arblaster, J., and G. Meehl, 2006: Contributions of external forcings to southern annular mode trends. *J. Climate*, **19**, 2896–2905.
- Esler, J. G., and P. H. Haynes, 1999: Baroclinic wave breaking and the internal variability of the tropospheric circulation. *J. Atmos. Sci.* **56**: 4014–4031.
- Hoskins, B. J., and K. I. Hodges, 2002: New Perspectives on the Northern Hemisphere Winter Storm Tracks. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **59**, 1041–1061.
- Hoskins, B. J., and K. I. Hodges, 2005: A New Perspective on Southern Hemisphere Storm Tracks. *Journal of Climate*, **18**, 4108–4129.
- Lee, R. W., K. I. Hodges, and T. Woollings, 2014: Storm track biases and changes in a warming climate from an extratropical cyclone perspective using CMIP5. Ph.D. thesis, University of Reading, 411 pp.
- Lu, J., G. Chen, and D. M. W. Frierson, 2008: Response of the zonal mean atmospheric circulation to El Niño versus global warming. *J. Clim.*, **21**, 5942–5959.
- Lu, J., G. A. Vecchi, and T. Reichler, 2007: Expansion of the Hadley cell under global warming. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L06805, doi:10.1029/2006GL028443.
- Miller, R. L., G. A. Schmidt, and D. T. Shindell, 2006: Forced annular variations in the 20th century Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report models. *J. Geophys. Res.*, **111**, D18101, doi:10.1029/2005JD006323.
- Nasr-Esfahany M. A., F. Ahmadi-Givi, and A. R. Mohebalhojeh, 2011: An energetic view of the relation between the Mediterranean storm track and the North Atlantic Oscillation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **137**, 749–756.
- Rezaeian, M., A. R. Mohebalhojeh, F. Ahmadi-Givi, and M. A. Nasr-Esfahany, 2016: A wave-activity view of the relation between the Mediterranean storm track and the North Atlantic Oscillation in winter. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **142**: 1662–1671.
- Taylor, K. E., R. J. Stouffer, and G. A. Meehl, 2012: An overview of CMIP5 and the experiment design: *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 485–498.
- Thompson, D. W. J., J. Wallace, and G. Hegerl, 2000: Annular modes in the extratropical circulation. Part II: Trends. *J. Climate*, **13**, 1018–1036.