

ماه‌های تابستانی و گرم سال است که در زاگرس تعداد ماه‌ها با میزان عمق برف صفر بیشتر است.

جدول ۱. مشخصه‌های آماری میزان عمق برف در دو منطقه البرز و زاگرس در بازه سال‌های ۱۹۸۱-۲۰۲۰.

ناحیه	نام حوزه	بیشینه	کمینه	انحراف معیار	میانگین	ماه‌هایی با بیشترین عمق برف	سال‌هایی با بیشترین عمق برف
البرز	دماوند	۳۷/۹۹۴۸	0	۷/۸۴۶۷	۶/۸۶۸۰	فوریه	۲۰۱۲
زاگرس	دنا و زردکوه	۱۵/۰۱۰۴	0	۴/۰۹۲۹	۲/۷۵۱۳	ژانویه	۲۰۰۸

۳ نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به بررسی توزیع زمانی میزان عمق برف در منطقه کوهستانی البرز و زاگرس در بازه زمانی سال‌های ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۱ با استفاده از داده‌های بازتحلیل MERRA-2 می‌پردازد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که میزان عمق برف در مقیاس سالانه و متوسط ماهانه در منطقه البرز بیشتر از زاگرس است و تغییرات در مقادیر میانگین سبب افزایش انحراف معیار عمق برف در رشته کوه البرز شده است. به طور کلی میانگین عمق برف و ماندگاری برف در رشته کوه البرز از زاگرس بیشتر است. در این دوره ۴۰ ساله، در رشته کوه البرز ۱۸ سال و در زاگرس ۲۵ سال، ژانویه ماهی با بیشترین عمق برف بوده است. در رشته کوه زاگرس نسبت به البرز تعداد ماه‌های که عمق برف نزدیک صفر یا صفر بوده، بیشتر است، به عنوان مثال میانگین ۴۰ ساله عمق برف در ماه اکتبر در رشته کوه البرز ۲/۶۹۸ سانتیمتر و در رشته کوه زاگرس ۰/۰۲ سانتیمتر است.

منابع

- منتظری، م، فنایی، ر، ۱۳۹۷، شناسایی قلمروهای برفی ایران به روش تحلیل خوشه‌ای: مجله مخاطرات محیط طبیعی، ۷، (۱۶)، ۲۵۸-۲۴۱.
- Barnett, T. P., Adam, J. C., & Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066), 303-309.
- Brown, R. D., & Robinson, D. A. (2011). Northern Hemisphere spring snow cover variability and change over 1922–2010 including an assessment of uncertainty. *The Cryosphere*, 5(1), 219-229.
- Dozier, J., Bair, E. H., & Davis, R. E. (2016). Estimating the spatial distribution of snow water equivalent in the world's mountains. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(3), 461-474.
- Liston, G. E., & Hiemstra, C. A. (2011). The changing cryosphere: Pan-Arctic snow trends (1979–2009). *Journal of Climate*, 24(21), 5691-5712.
- Liu, Y., Fang, Y., & Margulis, S. A. (2021). Spatiotemporal distribution of seasonal snow water equivalent in High Mountain Asia from an 18-year Landsat–MODIS era snow reanalysis dataset. *The Cryosphere*, 15(11), 5261-5280.
- Parker, W. S. (2016). Reanalyses and observations: What's the difference?. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(9), 1565-1572.
- Xiao, L., Che, T., & Dai, L. (2020). Evaluation of Remote Sensing and Reanalysis Snow Depth Datasets over the Northern Hemisphere during 1980–2016. *Remote Sensing*, 12(19), 3253.

مطالعه انرژی سه توفند قوی رخ داده در اقیانوس اطلس طی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹

فرونش حداد^۱، فرهنگ احمدی گیوی^۲، علیرضا محب‌الحجه^۳ و محمد میرزائی^۴

^۱دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران، farnoosh.haddad@ut.ac.ir

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

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

^۴استادیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران، mirzaeim@ut.ac.ir

چکیده

هدف از این پژوهش مطالعه رابطه سه توفند قوی رخ داده در سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۱۹ و مسیر توفان اطلس است. بدین منظور، با استفاده از داده‌های بازتحلیل JRA-55 و رهیافت انرژی، مقادیر روزانه انرژی جنبشی پیچکی (EKE) و جملات مهم آن برای گذار برون‌حاره‌ای سه توفند مورد مطالعه که موقعیت جغرافیایی متفاوتی داشته‌اند، در سپتامبر سال‌های فوق محاسبه شدند. نتایج نشان می‌دهد که توفند دورین بیشترین میزان تأثیر بر مسیر توفان اطلس را در دریای لابرادور به دلیل همرفت عمیق نسبت به توفند ماریا داشته و موجب تقویت شدید آن شده است. به علاوه، جملات تبدیل کُرفشار و واگرایی شار آزمینگرد ژئوپتانسیل مهم‌ترین جملات EKE در تقویت مسیر توفان اطلس در مرحله گذار برون‌حاره‌ای توفندها هستند. همچنین موقعیت جغرافیایی توفندهای در حال گذار در غرب اطلس بر تغییرات جملات EKE، به ویژه دو جمله فوق، تأثیر بسزایی دارد.

واژه‌های کلیدی: چرخندهای برون‌حاره‌ای، مسیر توفان اطلس، انرژی جنبشی پیچکی، تبدیل کُرفشار، شار آزمینگرد ژئوپتانسیل

An energetic study of three major hurricanes in 2017–2019

Haddad, F.¹, Ahmadi-Givi, F.², Mohebalhojeh, A. R.³ and Mirzaei, M.⁴

M.Sc. Graduate of Meteorology, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

Associate Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

Assistant Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

Abstract

The objective of this research is to investigate the relationship between the three major hurricanes and the North Atlantic storm track that occurred in 2017–2019. To this end, using the JRA-55 data and from the energy point of view, the daily values of “eddy kinetic energy” (EKE) and the main terms involved in its dynamical evolution are computed for extratropical transition of the three hurricanes in September, which had different geographical locations. Results show that, compared to hurricane Maria, hurricane Dorian had the greatest impact on the North Atlantic storm track in the Labrador Sea due to deep convection which led to significant strengthening of the storm track. The baroclinic conversion and divergence of ageostrophic geopotential flux are the most important terms determining EKE evolution. Further, geographical location of the hurricanes during their extratropical transition has a significant effect on the changes of EKE.

Keywords: hurricanes, extratropical cyclones, North Atlantic storm track, baroclinic conversion, ageostrophic geopotential flux

۱ مقدمه

چرخندهای حاره‌ای از مؤلفه‌های ضروری در گردش کلی جو هستند (چنگ و همکاران، ۲۰۰۲) که گرما و رطوبت را طی گذار برون‌حاره‌ای خود به سمت قطب انتقال داده و موجب تغییر در وضع هوای عرض‌های میانی مانند وزش بادهای شدید و بارش می‌شوند (دونات و همکاران، ۲۰۱۰). کلر و همکاران (۲۰۱۴) در مطالعه گذار برون‌حاره‌ای توفند هانا واقع در ۹ سپتامبر سال ۲۰۰۸ در غرب اقیانوس اطلس و ارتباط آن با دینامیک مسیر توفان اطلس با

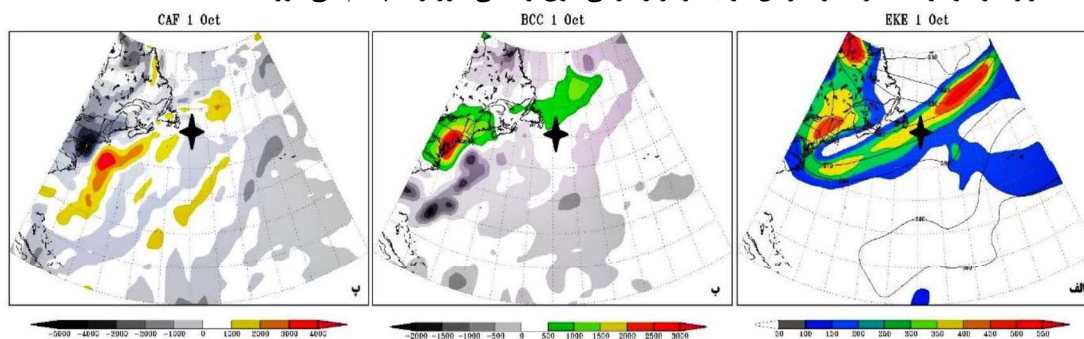
استفاده از انرژی جنبشی پیچکی و جملات مؤثر در آن نشان دادند که جمله تبدیل کژ فشار (BCC) در تقویت الگوی موج جریان سو نقش مهمی دارد. به علاوه، تبدیل کژ فشار در 60° - 35° درجه شمالی و 70° درجه غربی در شرق توفند رخ می‌دهد که با یک هسته گرم و صعود هوای گرم در شرق منطقه کژ فشاری همراه است. همچنین واگرایی (همگرایی) شار انرژی جنبشی پیچکی و شار آزمینگرد ژئوپتانسیل در محدوده 50° درجه غربی (40° درجه غربی) دیده می‌شود و بیشینه انرژی جنبشی پیچکی به وجود واگرایی در شمال چرخند حساس است.

۲ داده‌ها و روش تحقیق

در این پژوهش از داده‌های بازتحلیل JRA-55 در ساعت UTC ۰۰ با تفکیک افقی $1/25^{\circ}$ درجه در راستاهای طول و عرض جغرافیایی که شامل 37° تراز در راستای قائم از 1 هکتوپاسکال تا 1000 هکتوپاسکال هستند، استفاده شده است. برای بررسی مقادیر روزانه EKE مربوط به سه توفند قوی منتخب در سال‌های $2019-2017$ از معادله گرایش زمانی بودجه انرژی جنبشی پیچکی حاصل از معادله تکانه افقی (ارلانسکی و کاتزفی، 1991 ؛ چنگ، 2000) استفاده شده است.

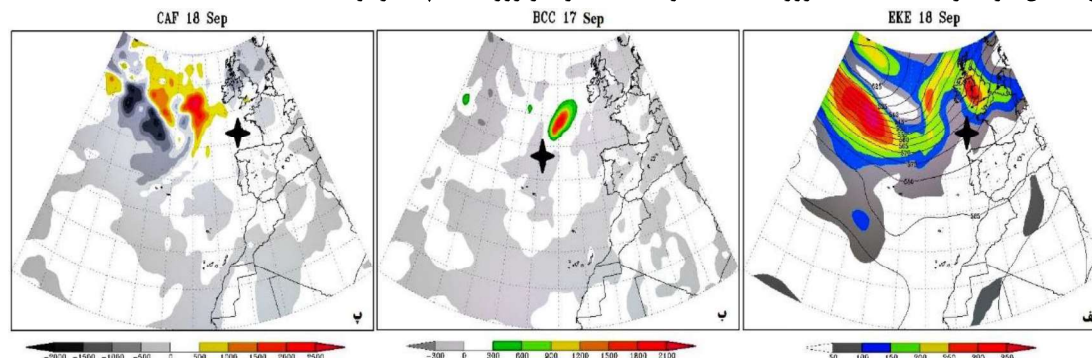
۳ تحلیل نتایج

در شکل ۱ مربوط به گذار برون‌حاره‌ای توفند منتخب اول (توفند ماریا) رخ داده در سپتامبر 2017 ، انرژی جنبشی پیچکی (EKE) و جملات تبدیل کژ فشار (BCC) و شار آزمینگرد ژئوپتانسیل (CAF) در روزی که بیشترین مقادیر را طی مرحله گذار داشته‌اند، نشان داده شده است. توفند ماریا در ساعت UTC ۰۰ روز 29 سپتامبر به عرض جغرافیایی $36/9^{\circ}$ N رسیده و سپس در ساعت UTC 18 روز 2 اکتبر در $47/5^{\circ}$ N میرا شده است. در شکل ۱-الف، به‌طور کلی مناطق بیشینه EKE نشان‌دهنده مسیر توفان اطلس است که با پیشروی سامانه به سمت عرض‌های بالاتر، EKE نیز با مقدار $550 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ تقویت یافته است؛ زیرا هم سامانه به منطقه همرفت عمیق در دریای لابرادور نزدیک شده و هم در این ناحیه شیو دمایی بزرگی میان خشکی و دریا وجود دارد. دریای لابرادور، ناحیه اصلی همرفت عمیق تا عمق 1000 متر است (مارشال و اسکات، 1999). همچنین توزیع ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز 500 هکتوپاسکال در شکل ۱-الف حاکی از آن است که هم ناوه عرض‌های میانی و هم مسیر توفان اطلس تقویت یافته‌اند. منبع اصلی تأمین انرژی مسیر توفان و تقویت آن، جمله تبدیل کژ فشار بوده که بیانگر تبدیل انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر پیچکی به انرژی جنبشی پیچکی است. عاملی که در تضعیف سامانه‌های چرخندی نقش مهمی دارد، جمله واگرایی شار آزمینگرد ژئوپتانسیل است. در شکل ۱-ب که بیشترین میزان BCC در سواحل شرقی آمریکای شمالی واقع است، ضمن آنکه همگرایی قوی دیده می‌شود، واگرایی شار آزمینگرد ژئوپتانسیل (شکل ۱-پ) بسیار قوی نیز در این ناحیه قرار دارد و توفند ماریا در جریان‌سوی مرکز واگرایی فوق و کمی دورتر به چشم می‌خورد.



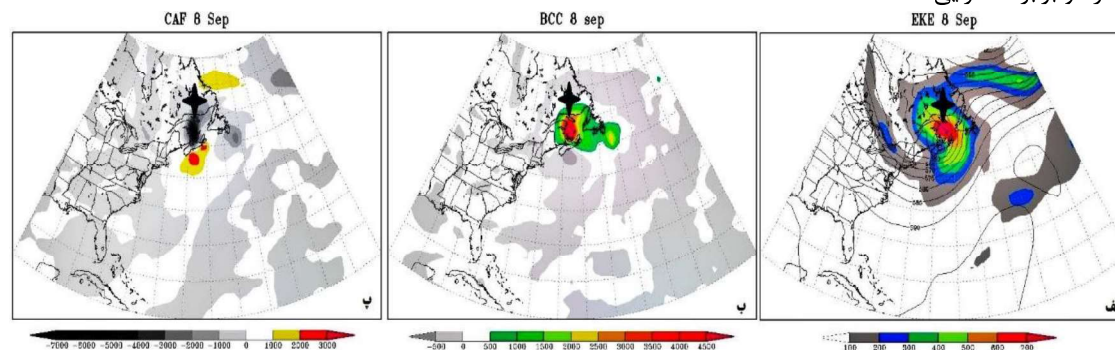
شکل ۱. (الف) مقادیر روزانه میانگین قائم انرژی جنبشی پیچکی (برحسب $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$)، (ب) تبدیل کژ فشار (BCC) و (پ) شار آزمینگرد ژئوپتانسیل (CAF) (برحسب $\text{m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ day}^{-1}$) در گذار برون‌حاره‌ای توفند ماریا رخ داده در سپتامبر سال 2017 . در شکل الف، پربندهای خاکستری ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز 500 hPa (مابین 600 - 500 gpdm به فاصله 10 gpdm) را نشان می‌دهند. ستاره سیاه رنگ معرف موقعیت تقریبی توفند بوده و محدوده جغرافیایی شکل‌ها 20° - 60° N و 80° - 20° W است. همچنین فواصل بین نصف‌النهارها و مدارها 5° درجه است و طول غربی‌ترین نصف‌النهار 80° W و عرض پایین‌ترین مدار 20° N می‌باشد.

توفند منتخب دوم، توفند هلن است که در سپتامبر سال ۲۰۱۸ در شرق اطلس رخ داده است. این توفند در ساعت ۰۰ UTC روز ۱۵ سپتامبر به عرض $35/2^{\circ}N$ رسیده و در ساعت ۰۰ UTC روز ۱۸ سپتامبر در حوالی عرض $50^{\circ}N$ میرا شده است. مطابق شکل ۲-الف، بیشترین مقدار انرژی جنبشی پیچکی حدود $350 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ است، در حالی که مقدار متناظر برای توفند ماریا اندکی کمتر از دو برابر انرژی جنبشی توفند هلن است. از آنجا که توفند هلن در شرق اطلس رخ داده است، انتظار می‌رود که این سامانه در تقویت مسیر توفان اطلس نقشی نداشته باشد. در این ارتباط، جملات تبدیل کُزفشار و شار آزمینگرد ژئوپتانسیل (شکل‌های ۲-ب و ۲-پ) حاکی از آن هستند که توفند هلن نقشی در تقویت مسیر توفان اطلس نداشته و موجب تضعیف آن نیز نشده است. براساس شکل ۲-ب، بیشترین میزان تبدیل کُزفشار با اختلاف یک روز نسبت به دو جمله دیگر، در روز ۱۷ سپتامبر بوده است.



شکل ۲. همانند شکل ۱ ولی برای توفند هلن رخ داده در سپتامبر سال ۲۰۱۸. در شکل الف، پربندهای خاکستری نشان‌دهنده ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ hPa (مابین ۶۰۰-۵۲۰ gpdm به فاصله ۵ gpdm) هستند و محدوده جغرافیایی شکل‌ها $20^{\circ}-60^{\circ}N$ و $10^{\circ}-E$ است. طول غربی‌ترین نصف‌النهار $50^{\circ}W$ و عرض پایین‌ترین مدار $20^{\circ}N$ می‌باشد.

تفاوت رخداد توفند منتخب دورین در سال ۲۰۱۹ با توفند ماریا آن است که این توفند در خط ساحل شرقی ایالات متحده آمریکا و کانادا فعالیت بسیار زیادی داشته، ولی توفند ماریا در نزدیکی سواحل فعال بوده است. توفند دورین در ساعت ۰۰ UTC روز ۶ سپتامبر در موقعیت $33/4^{\circ}N$ و $77/9^{\circ}W$ واقع بوده و در ساعت ۰۶ UTC روز ۹ سپتامبر در ناحیه $51/6^{\circ}N$ و $54/8^{\circ}W$ میرا شده است. در شکل ۳-الف، بیشینه EKE در شرق کانادا با مقدار $700 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ متمرکز بوده که بیشترین میزان انرژی جنبشی پیچکی واقع در مسیر توفان اطلس طی رخداد توفند دورین و حتی دو توفند دیگر است. بیشینه بسیار قوی BCC (شکل ۳-ب) نیز با مقدار $4500 \text{ m}^2\text{s}^{-2}\text{day}^{-1}$ در سواحل شرقی کانادا دیده می‌شود که همراه با هسته هوای گرم و صعود شدید هوا است و در همین منطقه بیشینه واگرایی شار آزمینگرد (شکل ۳-پ) نیز به چشم می‌خورد. در واقع، در این روز توازن همگرایی و واگرایی شار به هم خورده و میزان واگرایی بیش از دو برابر همگرایی است.



شکل ۳. همانند شکل ۱ ولی برای توفند دورین رخ داده در سپتامبر سال ۲۰۱۹. در شکل الف، پربندهای خاکستری نشان‌دهنده ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ hPa (مابین ۶۰۰-۵۲۵ gpdm به فاصله ۵ gpdm) هستند و محدوده جغرافیایی شکل‌ها $20^{\circ}-90^{\circ}N$ و $35^{\circ}-W$ است. طول غربی‌ترین نصف‌النهار $90^{\circ}W$ و عرض پایین‌ترین مدار $20^{\circ}N$ می‌باشد.

۴ نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مطالعه انرژی‌تیک سه توفند قوی رخ داده در اقیانوس اطلس طی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ با استفاده از داده‌های بازتحلیل JRA-55 مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد با توجه به موقعیت جغرافیایی توفندهای در حال گذار، دو توفند ماریا و دورین موجب تقویت مسیر توفان اطلس شده‌اند که تأثیر توفند دورین در جریان‌سوی مسیر توفان اطلس در دریای لابرادور برجسته‌تر بوده و رخداد توفند ماریا با شدت اندکی موجب تقویت مسیر توفان اطلس شده است. توفند هلن تأثیر کمتری بر فعالیت پیچکی مسیر توفان اطلس داشته است. آنچه که موجب افزایش انرژی جنبشی پیچکی با رخداد توفندها شده است، جملات تبدیل کژ فشار و واگرایی شار آزمینگرد ژئوپتانسیل هستند و تأثیر جملات دیگر انرژی کمتر بوده است. این چرخندهای برون‌حاره‌ای، در شرایطی تشدید می‌شوند که متأثر از کژ فشاری قوی در غرب اطلس بوده و آزاد شدن گرمای نهان موجب تقویت پشته‌های جریان‌سو و به دنبال آن ناوه توفند و در نتیجه جریان‌های صعودی همراه آن می‌شود. در مقایسه، آن دسته از چرخندهای برون‌حاره‌ای که در شرق اطلس و با شدت کمتری رخ می‌دهند، شرایط مساعدی برای تقویت مسیر توفان اطلس فراهم نمی‌کنند.

منابع

- Chang, E. K., 2000, Wave packets and life cycles of troughs in the upper troposphere: Examples from the Southern Hemisphere summer season of 1984/85. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 25–50.
- Chang, E. K., Lee, S., and Swanson, K. L., 2002, Storm track dynamics. *J. Clim.*, **15**, 2163–2183.
- Donat, M. G., Leckebusch, G. C., Pinto, J. G., and Ulbrich, U., 2010, Examination of wind storms over Central Europe with respect to circulation weather types and NAO phases. *Int. J. Climatol.*, **30**, 1289–1300.
- Keller, J. H., Jones, S. C., and Harr, P. A., 2014, An eddy kinetic energy view of physical and dynamical processes in distinct forecast scenarios for the extratropical transition of two tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 2751–2771.
- Orlanski, I., and Katzfey, J., 1991, The life cycle of a cyclone wave in the Southern Hemisphere. Part I: Eddy energy budget. *J. Atmos. Sci.*, **48**, 1972–1998.
- Marshall, J., and R. Schott, 1999: Open ocean deep convection: Observations, theory, and models. *Rev. Geophys.*, **37**, 1–64.