

بررسی تغییرات اقلیمی مسیرهای توفان زمستان در اطلس، مدیترانه و جنوب غرب آسیا با مدل MPI-ESM-LR تحت سناریوی RCP8.5 در پروژه CMIP5

شاهین عالمزاده^۱، فرهنگ احمدی گیوی^{۲*}، علیرضا محب‌الحجه^۳ و محمدعلی نصرافهانی^۴

^۱ دانشجوی دکتری هواشناسی، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ استاد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۴ استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۲۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۲۴)

چکیده

در این پژوهش، اثر گرمایش زمین بر مسیرهای توفان اطلس و مدیترانه در فصل زمستان براساس داده‌های خروجی مدل ماکس پلانک در شبیه‌سازی‌های مرحله پنجم از "پروژه مقایسه متقابل مدل جفت‌شده" موسوم به CMIP5 بررسی می‌شود. سناریوی تاریخی (historical) برای دوره گذشته و سناریوی RCP8.5 برای دوره آینده به کار رفته است. برای تحلیل مسیر توفان یا فعالیت پیچکی، از پایستاری فعالیت موج استفاده شده است.

بررسی دینامیکی نتایج نشان می‌دهد که در ترازهای بالای و ردسپهر، نحوه تغییرات شدت فعالیت موج و الگوی انتشار و شکست موج در شاخه‌های شمالی و جنوبی مسیر توفان اطلس، تعیین‌کننده چگونگی تغییرات فعالیت موج به ترتیب در عرض‌های شمالی و جنوبی قطاع‌های جریان‌سوی خود از اروپا تا سیبری و آسیای میانه و از مدیترانه تا جنوب غرب آسیا است. در فصل زمستان، از غرب اطلس تا آسیای میانه، نواحی بیشینه زوج‌های واگرایی-همگرایی شار فعالیت موج یا بسته‌موج‌ها در عرض‌های شمالی از شاخه شمالی مسیر توفان اطلس تا اسکانندیناوی و سیبری و در عرض‌های جنوبی از شاخه جنوبی مسیر توفان اطلس تا مسیر توفان مدیترانه و شمال آفریقا تضعیف و در شاخه مرکزی در مرکز اروپا - دریای سیاه - دریای خزر متمرکز می‌شوند. سازگار با این موضوع، شار شرق‌سوی فعالیت موج نیز در عرض‌های شمالی و جنوبی تضعیف و در عرض‌های میانی تقویت می‌شود. این نتایج به معنای تبدیل ساختار دوشاخه مسیر توفان به ساختار تک‌شاخه مرکزی است. به علاوه، بیشینه شکست و اچ‌رخندی موج و بسته‌موج‌های مربوط به هر دو مسیر توفان اطلس و مدیترانه و همچنین بسته‌موج شاخه مرکزی اروپا - دریای سیاه به سمت شرق جابه‌جا می‌شوند. این امر سبب افزایش نفوذ بسته‌موج هر دو شاخه مدیترانه و دریای سیاه به ایران شده است که نتیجه‌ای امیدوارکننده از نظر اثر بر انتقال فعالیت سامانه‌های همدیدی به ایران تلقی می‌شود.

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

۱ مقدمه

به علاوه، آنها با مقایسه نتایج دوازده مدل CMIP5 و نتایج مربوط به داده‌های بازتحلیل نشان دادند که سه مدل، از جمله مدل MPI_ESM_LR که در پژوهش حاضر استفاده شده است، نسبت به سایر مدل‌ها توانایی بهتری در شبیه‌سازی وردایی چندسالانه شاخص‌های کمی مسیر توفان اطلس شمالی (شاخص‌های شدت، عرض و طول جغرافیایی) دارند.

بیشتر مطالعاتی که درباره اثر گرمایش زمین بر مسیرهای توفان در مدل‌های CMIP5 انجام شده است، در مقیاس بزرگ و نیمکره‌ای و با تمرکز بر مسیرهای توفان اطلس و آرام بوده است؛ از جمله می‌توان به پژوهش چندمدلی لی و همکاران (۲۰۱۴) بر مبنای روش لاگراژی مسیریابی توفان اشاره کرد که هاسکینز و هاجز (۲۰۰۴) و (۲۰۰۵) معرفی کردند. در بین پژوهش‌های مرتبط با موضوع تغییرات اقلیمی گردش‌های جوی با مدل‌های CMIP5، مطالعات کمی به مسیر توفان مدیترانه پرداخته‌اند. به‌طور مثال، زاپا و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهش چندمدلی با مدل‌های CMIP5، با استفاده از الگوریتم لاگراژی مسیریابی چرخندها (هاجز، ۱۹۹۵) نشان دادند در فصل زمستان تعداد چرخندهای مدیترانه‌ای بر اثر گرمایش زمین کاهش می‌یابد. در مطالعات عمده مربوط به مدل‌های CMIP5 نیز که تاکنون در زمینه پاسخ مسیر توفان به تغییر اقلیم انجام شده است، پژوهش‌های کم و محدودی می‌توان یافت که به تحلیل سازوکارها و فرایندهای دینامیکی تغییرات مسیر توفان در اثر گرمایش زمین پرداخته باشند. به‌طور مثال، تامارین و کاسپی (۲۰۱۷)، با مطالعه مجموعه‌ای از مدل‌های CMIP5، دیدگاه جدیدی برای توضیح سازوکارهای دینامیکی جابه‌جایی قطب‌سوی مسیر توفان در پاسخ به گرمایش زمین ارائه کردند. آنها نشان دادند که در اثر گرمایش زمین، علاوه بر جابه‌جایی قطب‌سوی عرض جغرافیایی تولید توفان‌ها که از جابه‌جایی عرض جغرافیایی کژفشاری

پژوهشگران بسیاری فعالیت پیچکی و انتشار امواج راسبی را با روش‌های اوپلری و لاگراژی مطالعه کرده‌اند. برای نمونه، در مطالعات مبتنی بر روش‌های اوپلری، با ابزارهای فرایابی انرژتیک (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 جنوب‌غرب آسیا بررسی شده است. از سوی دیگر، در روش‌های لاگراژی، هاسکینز و هاجز (۲۰۰۲ و ۲۰۰۵) با ابزار میدان تاوایی ترازهای زیرین وردسپهر، مسیر توفان را مطالعه و فعالیت مسیر توفان مدیترانه را نشان دادند. درباره تغییرات مسیر توفان بر اثر گرمایش زمین با استفاده از مشاهدات و مدل‌سازی، پژوهش‌های مختلفی انجام شده است که وجه اشتراک نتایج آنها، جابه‌جایی قطب‌سوی مسیر توفان در پاسخ به واداشت‌های انسان‌زاد است (تامپسون و همکاران، ۲۰۰۰؛ آربلستر و میبل، ۲۰۰۶؛ میلر و همکاران، ۲۰۰۶؛ لو و همکاران، ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸).

در شبیه‌سازی مسیرهای توفان با مدل‌های اقلیمی شرکت‌کننده در فاز پنجم از "پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده" موسوم به CMIP5، خطاهایی در مقایسه با نمایش مسیرهای توفان در داده‌های بازتحلیل مشاهده و بررسی شده است. بوت و همکاران (۲۰۱۷) با مقایسه نتایج چندمدلی CMIP5 و نتایج داده‌های بازتحلیل نشان دادند که خطاها در شبیه‌سازی مسیر توفان در اطلس شمالی در نواحی شمالی جریان گلف‌استریم با خطای مدل‌ها در دمای سطحی اقیانوس (SST) مرتبط است. همچنین ینگ و همکاران (۲۰۱۸) با مقایسه نتایج مدل‌ها و نتایج حاصل از داده‌های بازتحلیل به این نتیجه رسیدند که توزیع فضایی "وردایی چندسالانه مسیر توفان زمستانه اطلس شمالی" در میانگین همادی نتایج چندمدلی CMIP5، بهتر از هر نتیجه تک‌مدلی نمایان می‌شود.

اطلس، مدیترانه و جنوب غرب آسیا براساس سناریوی بدینانه CMIP5 تحلیل خواهد شد و در نهایت، بخش ۵ به ارائه جمع بندی و نتیجه گیری اختصاص دارد.

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. دلیل تمرکز بر یک مدل در پژوهش حاضر، ارائه تحلیل سازوکارهای دینامیکی مسیر توفان و فرایندهای مؤثر بر آن است که در پژوهش‌های پیشین به علت بررسی‌های چندمدلی کمتر به این مسئله پرداخته شده است. از دیگر دلایل انتخاب مدل ماکس پلانک در بین بیش از سی مدل اقلیمی در پروژه CMIP5، داده‌های کامل‌تر، به‌ویژه تفکیک قائم بالاتر داده‌های این مدل در مقایسه با سایر مدل‌ها است که این نکته در دقت محاسباتی بسیار مهم است. این داده‌ها شامل میانگین روزانه ارتفاع ژئوپتانسیلی در چندین تراز فشاری است و دو سناریوی تاریخی (دوره ۲۶ ساله از سال ۱۹۸۰ تا سال ۲۰۰۵) و RCP8.5 (دوره ۲۴ ساله از سال ۲۰۷۶ تا سال ۲۰۹۹) را دربرمی‌گیرد. در سناریوی تاریخی، واداشت گازهای گلخانه‌ای براساس مشاهدات گذشته در قرن بیستم 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 بیست و یکم) به $8/5 \text{ W/m}^2$ خواهد رسید. علت تعیین دوره‌های زمانی یادشده در این پژوهش آن است که وضع اقلیم ربع قرن آخر قرن بیستم با وضع اقلیم ربع قرن آخر قرن بیست و یکم مقایسه شود؛ زیرا در این حالت، فاصله زمانی حدود یک قرن بین دو دوره وجود دارد و تغییرات اقلیمی بهتر نمایان می‌شود.

ناشی می‌شود، بازه عرضی انتشار نصف‌النهار توفان‌های چرخندی نیز افزایش می‌یابد. از دیگر نتایج پژوهش یادشده این است که فرایند دینامیکی این افزایش بازه عرضی انتشار توفان‌ها، به افزایش حرکت قطب‌سوی چرخندها مربوط می‌شود که ناشی از افزایش شدت بادهای ترازهای فوقانی جو و افزایش بخار آب در اقلیم گرم‌تر است.

براساس مطالب فوق، می‌توان گفت به دو مسئله مهم در بررسی‌های تغییرات اقلیمی گردش‌های جوی بر مبنای مدل‌های اقلیمی CMIP5 کمتر توجه شده است: الف) تغییرات مسیر توفان در منطقه مدیترانه بر اثر گرمایش زمین و ب) سازوکارهای دینامیکی مسیرهای توفان و فرایندهای مؤثر در آنها. لذا، دو ویژگی پژوهش حاضر این است که بر منطقه مدیترانه و جنوب غرب آسیا متمرکز شده است و همچنین برخلاف بیشتر مطالعات قبلی که چندمدلی بودند، با استفاده از تنها یک مدل اقلیمی، به تحلیل سازوکارهای دینامیکی مسیر توفان زمستانه و تغییرات آن بر اثر گرمایش زمین می‌پردازد. برای این منظور، از ابزار فرایابی اولری پایستاری فعالیت موج اسلر و هینز (۱۹۹۹) استفاده شده است که دیدگاهی جدید در بین مطالعاتی است که تاکنون بر مبنای مدل‌های CMIP5 روی مسیرهای توفان و پاسخ آن به گرمایش زمین انجام 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.

در این مقاله، داده‌ها و روش تحقیق، در بخش ۲ شرح داده می‌شود. اقلیم‌شناختی مسیرهای توفان در منطقه مورد نظر برای دوره گذشته مدل و همراه با مفاهیم دینامیکی در بخش ۳ بررسی می‌شود. در بخش ۴، چگونگی پاسخ مسیرهای توفان به گرمایش زمین در قطاع‌های

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 نصف‌النهاری باد، θ دمای پتانسیلی و Θ دمای پتانسیلی مرجع است. $\psi = \Phi / 2\Omega \sin \phi$ تابع جریان است که در آن $\Phi = gz$ ژئوپتانسیل است و z و g به ترتیب ارتفاع ژئوپتانسیلی و شتاب گرانی هستند. پایین‌نویس‌های λ ، ϕ و p به ترتیب مشتقات جزئی نسبت به طول، عرض و فشار هستند. بالانویس e ، به معنای «پرشیدگی» (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 اقلیم‌شناختی مسیره‌های توفان در دوره تاریخی مدل و مفاهیم دینامیکی

در شکل ۱، وضعیت اقلیم‌شناختی زمستانی مسیر توفان در وردسپهر زبرین در منطقه مورد نظر از نیمکره شمالی، برای دوره تاریخی (۲۰۰۵-۱۹۸۰) در مدل ماکس پلانک نشان داده شده است. شکل ۱-الف، میدان شار افقی فعالیت موج (\mathbf{F}_H) و واگرایی آن ($\nabla \cdot \mathbf{F}_H$)؛ شکل ۱-ب، میدان فعالیت موج A ؛ شکل ۱-ج، میدان شار مداری فعالیت موج ($F^{(\lambda)}$) و شکل ۱-د، میدان شار نصف‌النهاری فعالیت موج ($F^{(\phi)}$) را نشان می‌دهد. هر زوج واگرایی-همگرایی شار افقی فعالیت موج یا هر جفت از مراکز مثبت-منفی $\nabla \cdot \mathbf{F}_H$ (شکل ۱-الف) به معنای زوجی از نواحی گسیل-دریافت موج یا همان بسته‌موج بوده و مشخص‌کننده مسیر توفان است. به عبارتی، در هر زوج واگرایی-همگرایی، مرکز واگرایی نشان‌دهنده ناحیه گسیل و رشد موج است و لبه عقبی مسیر توفان را مشخص می‌کند و مرکز همگرایی، معرف ناحیه دریافت

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 آن را در فرایابی و تحلیل انتشار بسته‌موج‌های راسبی در ناحیه اطلس شمالی و مدیترانه و برای فازهای فرین نوسان اطلس شمالی (NAO) بررسی کردند. رابطه پایستاری فعالیت موج براساس اسلر و هینز (۱۹۹۹) به صورت زیر است:

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

که A فعالیت موج است. بردار سه‌بعدی \mathbf{F} از مرتبه (α^2) O ، شار فعالیت موج است که در تقریب شبه‌زمینگرد و در دستگاه مختصات کروی و فشاری به صورت زیر تعریف می‌شود (اسلر و هینز، ۱۹۹۹):

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

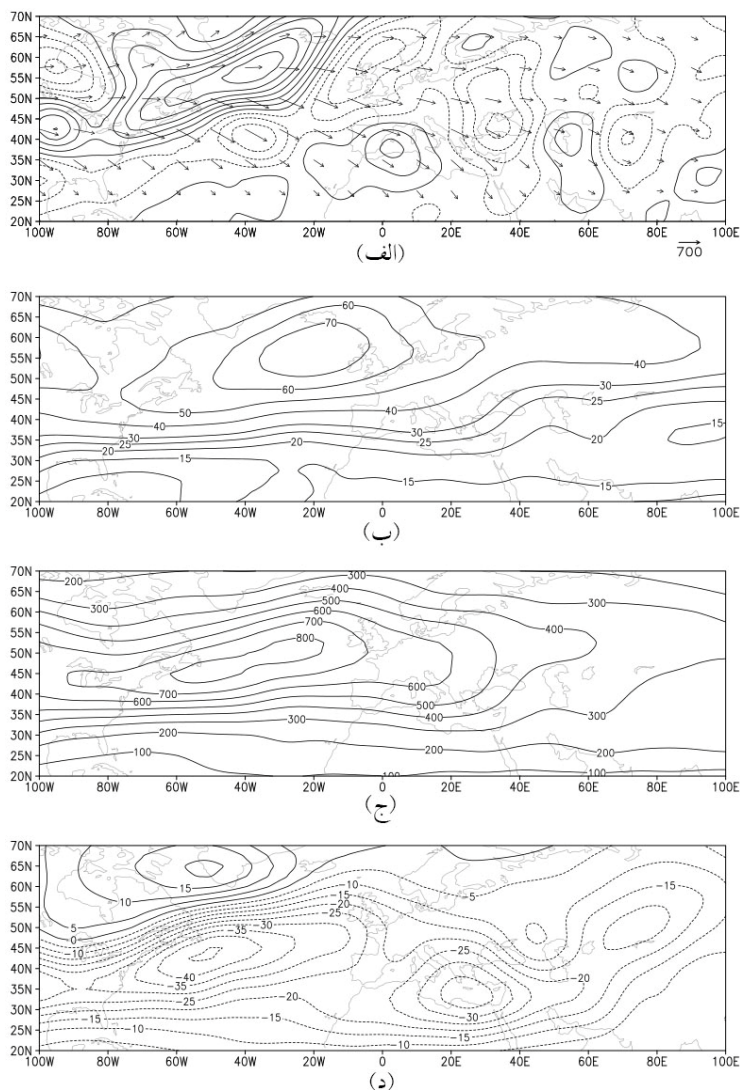
فعالیت موج، A ، با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$A = a \frac{\cos \phi \left(q^e e 2 - \frac{\xi^e q_{\lambda}^e}{a \cos \phi} \right)}{4Q_{\phi}^0}, \quad (3)$$

که $F^{(\lambda)}$ ، $F^{(\phi)}$ و $F^{(p)}$ به ترتیب مؤلفه‌های مداری، نصف‌النهاری و قائم شار فعالیت موج هستند. a شعاع

واگرایی آن ابزارهای مناسبی برای بررسی ویژگی‌های انتشار افقی موج هستند. در حوزه مورد بررسی این تحقیق، سه زوج واگرایی-همگرایی عمده وجود دارد که مسیرهای طوفان اطلس، مدیترانه و سبیری را مشخص می‌کنند. در اقیانوس اطلس، زوج گسترده و قوی واگرایی-

موج است و لبه جلویی مسیر طوفان را نشان می‌دهد. در شکل ۱-الف، می‌توان مسیرهای طوفان را به صورت قطارهایی از جفت‌های واگرایی-همگرایی یا بسته‌موج‌ها مشاهده و تحلیل کرد. همچنین، میدان برداری شار افقی فعالیت موج F_H نیز جهت و شدت انتشار افقی فعالیت موج را نشان می‌دهد. میدان‌های شار افقی فعالیت موج و



شکل ۱. میانگین زمستانی دوره تاریخی (۲۰۰۵-۱۹۸۰) در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال برای میدان‌های: (الف) شار افقی فعالیت موج (بردارها) و واگرایی آن (پریندها)، (ب) فعالیت موج، (ج) شار مداری فعالیت موج و (د) شار نصف‌النهاری فعالیت موج. مقادیر مثبت و صفر با خط پر و مقادیر منفی با نقطه‌چین نشان داده شده است. بازه پریندها در (الف) $3 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2$ ؛ در (ب) 5 m/s و 10 m/s به ترتیب برای مقادیر کمتر و بیشتر از 30 ؛ در (ج) $100 \text{ m}^2/\text{s}^2$ و در (د) $10 \text{ m}^2/\text{s}^2$ است. مقیاس بردارها در پایین و سمت راست شکل (الف) نشان داده شده و مؤلفه نصف‌النهاری آن برای نمایش بهتر در 10° ضرب شده است.

و بخش‌هایی از خاورمیانه از شمال شرق آفریقا تا مرزهای جنوب غربی و غربی ایران را دربر گرفته است، ناحیه دریافت موج مسیر توفان مدیترانه محسوب می‌شود. مناطق جنوب غربی و غربی ایران در ناحیه همگرایی شرق مدیترانه است و دریافت کننده امواج این مسیر توفان است. با در نظر گرفتن جهت انتشار امواج که از شمال غرب به جنوب شرق است، نمی‌توان نوار شمالی کشور را بر اساس نتایج این مدل، در امتداد قطار امواج مسیر توفان مدیترانه دانست. بین قطار موج امتداد یافته از شاخه شمالی مسیر توفان اطلس که با انتشار اغلب مداری، تا اسکاندیناوی و روسیه کشیده شده است و قطار موج انتشار یافته از شاخه جنوبی مسیر توفان اطلس تا شرق مدیترانه، قطار موج دیگری وجود دارد که در امتداد انشعابی از شاخه شمالی مسیر توفان اطلس از شمال غرب اروپا و مرکز اروپا تا دریای سیاه را دربر گرفته است و انتشار استواسوتری نسبت به قطار موج شاخه شمالی دارد. همان‌طور که در شکل ۱-الف مشخص است، نوار شمالی ایران، هم‌عرض با این قطار موج و تحت تأثیر امواج منتشرشونده از آن است. نواحی شمال غربی تا غربی کشور در حوزه ناحیه همگرایی دریای سیاه قرار گرفته‌اند و دریافت کننده امواج هستند.

در تقریب WKB (ونتزل، کرامرس، بریلونن)، که در آن مقیاس دامنه موج نسبت به شارش میانگین کوچک است، شار فعالیت موج خاصیت سرعت گروه را دارد و رابطه $\mathbf{F} = \mathbf{c}_g A$ برقرار است (اندروز و همکاران، ۱۹۸۷؛ رضاییان و همکاران، ۲۰۱۶). بنابراین "همگرایی (منفی) واگرایی) شار افقی فعالیت موج" $(-\nabla \cdot \mathbf{F}_H)$ ، معادل "فرافت فعالیت موج با سرعت گروه \mathbf{c}_g " $(-\mathbf{c}_g \cdot \nabla A)$ است. از طرفی، بنابر رابطه پایستاری فعالیت موج که با این خاصیت یک رابطه فرارفتی است، هرگاه یک ناحیه اغتشاشی از بیشینه فعالیت موج (A) با سرعت گروه \mathbf{c}_g در حرکت باشد، در جریان سو و پادجریان سوی آن که بزرگی شیو A بیشینه است، به ترتیب نواحی بیشینه مثبت و

همگرایی، مسیر توفان اطلس را نشان می‌دهد (شکل ۱-الف)؛ به این ترتیب که یک ناحیه وسیع از گسیل موج (واگرایی) از شرق آمریکای شمالی و غرب اقیانوس اطلس شمالی تا شمال این اقیانوس و گرینلند، با کج‌شدگی شمال شرقی-جنوب غربی کشیده شده است. در جریان سوی آن، ناحیه‌ای از دریافت موج (همگرایی) و با کج‌شدگی مشابه، نواحی مرکزی اطلس تا منتهی‌الیه شرق و شمال شرق این اقیانوس، انگلیس، دریای نروژ و غرب اسکاندیناوی را دربر گرفته است. این مسیر توفان شامل دو شاخه شمالی و جنوبی است؛ زیرا هر یک از نواحی واگرایی و همگرایی مربوط به آن، خود به دو هسته شمالی و جنوبی تقسیم شده‌اند. البته، گسستگی این دو شاخه در ناحیه همگرایی آشکارتر است، ولی در ناحیه واگرایی، این دو شاخه به نسبت پیوسته هستند.

در جریان سوی شاخه جنوبی مسیر توفان اطلس (شکل ۱-الف)، یک زوج گسترده و به نسبت قوی واگرایی-همگرایی از غرب دریای مدیترانه و شمال غرب آفریقا تا شرق مدیترانه، شمال شرق آفریقا و خاورمیانه دیده می‌شود که مشخصه مسیر توفان مدیترانه است. احمدی گیوی و همکاران (۲۰۱۴) و رضاییان و همکاران (۲۰۱۶) نیز زوج واگرایی-همگرایی مربوط به مسیر توفان مدیترانه را با داده‌های بازتحلیل نشان داده‌اند. مطابق شکل، یک ناحیه از واگرایی در نیمه غربی مدیترانه در بازه عرضی ۳۰ تا ۴۵ درجه شمالی قرار گرفته است که تقریباً هم‌عرض و کمی استواسوتر از مرکز همگرایی شاخه جنوبی مسیر توفان اطلس است. این ناحیه واگرایی از ۲۰ درجه غربی تا حدود ۲۰ درجه شرقی را پوشش می‌دهد که شامل نیمه غربی مدیترانه، شمال غرب آفریقا و جنوب غرب اروپا از اسپانیا تا غرب ایتالیا می‌شود. با توجه به جهت انتشار امواج که مؤلفه استواسو دارد، زبانه مقدار زیاد همگرایی که در جریان سوی واگرایی غرب مدیترانه و کمی استواسوتر از آن قرار دارد و نیمه شرقی دریای مدیترانه تا دریای سرخ

در شکل ۱-ج، شار مداری فعالیت موج ارائه شده است. توزیع فضایی این کمیت، با توجه به جمله $U^0 A$ در رابطه (۲)، به توزیع فضایی میدان‌های باد مداری حالت پایه و فعالیت موج بستگی دارد. بنابراین سازگاری درخور توجهی بین مکان و دامنه نوسانات یا زبانه‌های مقدار زیاد و مقدار کم شار مداری فعالیت موج (شکل ۱-ج) با مکان و دامنه نوسانات میدان فعالیت موج (شکل ۱-ب) وجود دارد. همان‌طور که در شکل ۱-ج مشخص است، متناظر با مسیر توفان اطلس، مرکز بسته بیشینه‌ای از شار مداری فعالیت موج در اطلس شمالی دیده می‌شود. یک زبانه منشعب از این مرکز در حدود ۲۰ درجه غربی و در بازه عرضی ۵۰ تا ۷۰ درجه شمالی کشیده شده است که دقیقاً منطبق بر محور زبانه مقدار زیاد فعالیت موج مربوط به شاخه شمالی مسیر توفان اطلس (شکل ۱-ب) است. همچنین، زبانه‌ای از این مرکز بیشینه، از نواحی مرکزی تا غرب اطلس گسترش داشته که بر زبانه مقدار زیاد فعالیت موج مربوط به شاخه جنوبی مسیر توفان اطلس منطبق است. به‌علاوه، زبانه مقدار زیادی از شار مداری فعالیت موج در مرکز مدیترانه تا شمال شرق آفریقا و غرب دریای سرخ وجود دارد که مربوط به مسیر توفان مدیترانه بوده و منطبق بر زبانه مقدار زیاد فعالیت موج در این ناحیه است.

رهیافت دیگر بررسی مسیر توفان و نوع و شدت شکست امواج راسی، بررسی شار نصف‌النهاری فعالیت موج ($F^{(\phi)}$) است که در شکل ۱-د ارائه شده است. مقادیر منفی، نشان‌دهنده "شار استواسو" و مقادیر مثبت، نشان‌دهنده "شار قطب‌سوی" فعالیت موج هستند. مناطقی که شار نصف‌النهاری فعالیت موج، قطب‌سو (استواسو) بوده و راستای کج‌شدگی بسته موج‌ها شمال‌غربی- جنوب شرقی (شمال شرقی- جنوب غربی) است، بیانگر نواحی شکست چرخندی (واچرخندی) موج هستند. نواحی بیشینه مقادیر "منفی" $F^{(\phi)}$ یا نواحی بیشینه "شار

منفی" فرارفت فعالیت موج" شکل می‌گیرد. در نتیجه، با توجه به معادل بودن "فرارفت فعالیت موج" با "منفی واگرایی شار فعالیت موج"، نواحی بیشینه منفی و مثبت $\nabla \cdot \mathbf{F}_H$ به ترتیب در جریان سو و پادجریان سوی بیشینه میدان A ایجاد می‌شوند. براساس این استدلال، انتظار می‌رود که متناظر با هر زوج از واگرایی-همگرایی شار افقی فعالیت موج در شکل ۱-الف، یک ناحیه بیشینه از میدان فعالیت موج A در شکل ۱-ب وجود داشته باشد به گونه‌ای که مراکز واگرایی و همگرایی به ترتیب در پادجریان سو و جریان سوی آن قرار گیرند. به عبارت دیگر، محور هر مرکز بیشینه یا زبانه مقدار زیاد A منطبق بر محور تقارن زوج واگرایی-همگرایی متناظر خود باشد که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

متناظر با زوج واگرایی-همگرایی مسیر توفان اطلس که در شکل ۱-الف وجود دارد، یک مرکز گسترده بیشینه فعالیت موج در اقیانوس اطلس شمالی در شکل ۱-ب دیده می‌شود. با توجه به این شکل، محور یک زبانه منشعب از این مرکز در نوار شمالی اقیانوس اطلس، در عرض ۵۰ تا ۷۰ درجه شمالی و در ۲۰ درجه غربی، دقیقاً بر ناحیه بین دو مرکز واگرایی و همگرایی شاخه شمالی مسیر توفان اطلس منطبق است. همچنین، زبانه منشعب دیگری از این مرکز با کج‌شدگی شمال شرقی- جنوب غربی از بخش مرکزی تا نوار غربی اطلس کشیده شده است که بین نواحی واگرایی و همگرایی شاخه جنوبی مسیر توفان اطلس قرار دارد. در جریان سوی شاخه جنوبی مسیر توفان اطلس، محور یک زبانه مقدار زیاد فعالیت موج در مرکز مدیترانه از ایتالیا تا شمال و شمال شرق آفریقا و غرب دریای سرخ گسترش دارد که مشخص‌کننده مسیر توفان مدیترانه است و بر ناحیه بین مراکز واگرایی (غرب مدیترانه) و همگرایی (شرق مدیترانه) این مسیر توفان انطباق دارد.

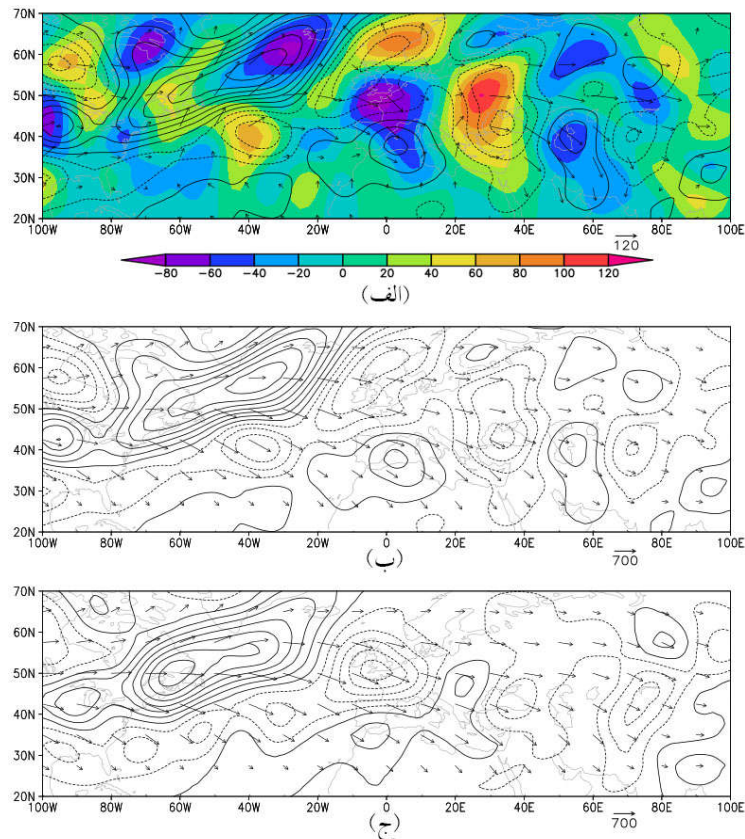
مشخص کننده مسیره‌های توفان اطلس و مدیترانه است.

۴ پاسخ مسیره‌های توفان به گرمایش زمین در شبیه‌سازی‌های CMIP5

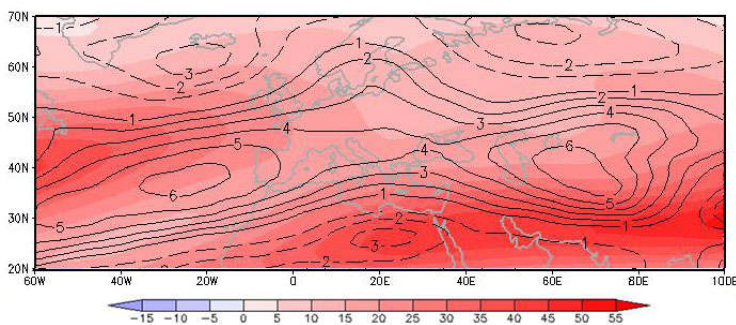
۴-۱ وردسپهر زبرین

در این قسمت تغییرات مسیر توفان ناشی از گرمایش زمین در فصل زمستان در ترازهای بالای وردسپهر بررسی می‌شود. برای این منظور، با تحلیل میدان‌های مرتبط با فعالیت موج و شار افقی آن در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال،

استواسوی "فعالیت موج، مسیر توفان را نشان می‌دهند و با مقایسه شکل‌های ۱-د و ۱-ب می‌توان دریافت که این نواحی دقیقاً بر محور مراکز بیشینه یا زبانه‌های مقدار زیاد فعالیت موج انطباق دارند. همچنین با توجه به شکل‌های ۱-د و ۱-الف، مشاهده می‌شود که هر ناحیه بیشینه شار استواسوی فعالیت موج متناظر است با یک زوج واگرایی-همگرایی شار فعالیت موج که بر محور تقارن آن زوج قرار دارد. در شکل ۱-د، وجود دو ناحیه بیشینه شار استواسوی فعالیت موج در اطلس و مدیترانه به ترتیب



شکل ۲. 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 (پربندها)، (ب) و (ج) شار افقی فعالیت موج (بردارها) و میدان واگرایی آن (پربندها) به ترتیب برای دوره‌های گذشته (historical) و آینده (RCP8.5). بازه پربندها مانند شکل ۱-الف است. مقیاس بردارها در پایین و سمت راست شکل‌ها نمایش داده شده و مؤلفه نصف‌النهاری آن برای نمایش بهتر در ۱۰ ضرب شده است.



شکل ۳. میانگین بلندمدت زمستانی باد مداری تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال در دوره تاریخی (سایه رنگی) و تغییرات آن از دوره تاریخی به دوره آینده (پرندها) تحت سناریوی RCP8.5 پروژه CMIP5 در مدل MPI-ESM-LR.

مشخصه‌های دو شاخه شمالی و جنوبی مسیر توفان اطلس بودند، در آینده (شکل ۲-ج) هر دو شاخه تضعیف و تقریباً از بین می‌روند و به جای آنها یک زوج واگرایی-همگرایی در عرض ۵۰ درجه شکل می‌گیرد. به بیانی، دو شاخه شمالی و جنوبی با یکدیگر ادغام شده و ساختار دو شاخه شمالی-جنوبی مسیر توفان اطلس در گذشته (شکل ۲-ب) به یک ساختار تک‌شاخه مرکزی در آینده (شکل ۲-ج) تبدیل می‌شود. علت این تغییرات براساس ارتباط دینامیکی بین تغییرات میدان دمای ناشی از گرمایش زمین با تغییرات میدان باد و ارتباط تغییرات شیو دمایی با رشد کرفشار پیچک‌ها توجیه می‌شود. به‌علاوه، سازوکارهای دینامیکی بازخورد پیچک-شارش میانگین در چگونگی اثر متقابل تغییرات میدان باد و تغییرات پیچک‌ها تعیین‌کننده است. به‌طور مثال، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در دوره آینده جت تراز فوقانی جو (شکل ۳) در محل شاخه‌های شمالی و جنوبی مسیر توفان اطلس تضعیف و به‌عکس در عرض‌های میانی بین این دو شاخه تقویت می‌شود که سازگاری شایان توجهی با تک‌شاخه شدن مسیر توفان در این ناحیه دارد. به‌دنبال این تبدیل ساختار دوشاخه‌ای مسیر توفان اطلس به ساختار تک‌شاخه‌ای، در قطاع اروپا-آسیا از غرب اروپا تا شرق دریای خزر نیز مشابه همین تبدیل رخ می‌دهد؛ یعنی

تغییرات مربوط به انتشار افقی امواج و بسته‌موج‌ها در اردسپهر زبرین از دوره تاریخی به دوره آینده مدل بررسی خواهد شد. با توجه به شکل ۲، تغییرات میدان واگرایی شار افقی فعالیت موج بر اثر گرمایش زمین شامل سه جنبه مهم تغییرات شدت مسیرهای توفان، جابه‌جایی مداری در الگوی بسته‌موج‌ها و جابه‌جایی نصف‌النهاری در الگوها است. همان‌طور که در شکل ۲-الف مشخص است، در بیشتر مناطق حوزه مورد بررسی، نوساناتی که در تغییرات آینده میدان واگرایی شار فعالیت موج (سایه رنگی) وجود دارد، با نوسانات این میدان در دوره گذشته (پرندها) اختلاف فاز دارد؛ یعنی در مناطقی که میدان واگرایی شار دوره گذشته مثبت (منفی) بود، تغییرات آن در آینده منفی (مثبت) است. این نتیجه به معنای کاهش دامنه نوسانات در میدان واگرایی و به‌عبارتی، تضعیف زوج‌های واگرایی-همگرایی شار فعالیت موج و در نتیجه، کاهش شدت مسیر توفان در بیشتر مناطق است.

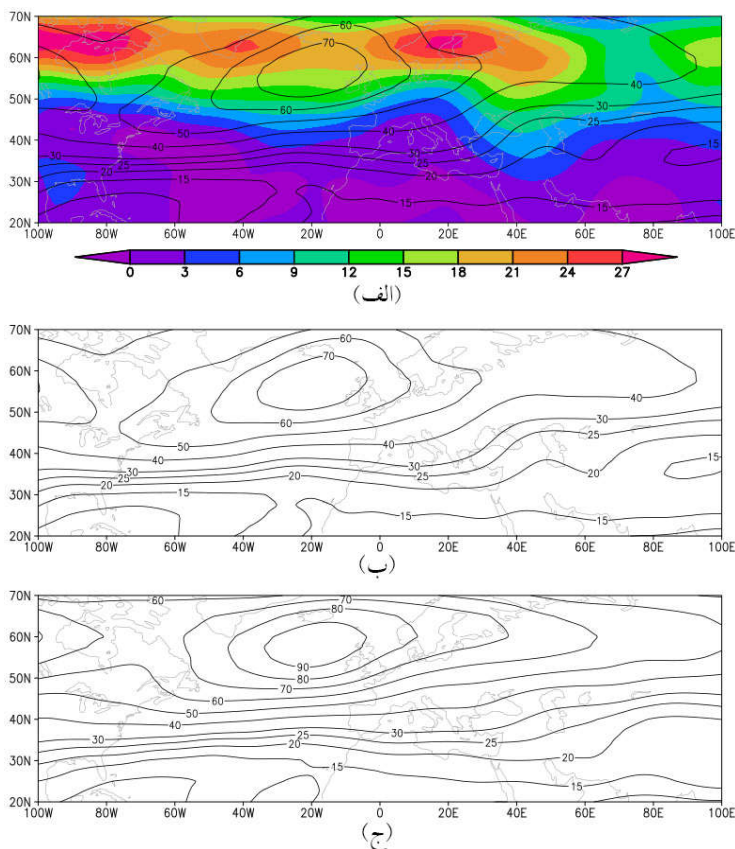
در بیشتر مناطق، الگوی تغییرات به‌گونه‌ای است که علاوه بر شدت، توزیع فضایی بسته‌موج‌ها هم تغییر کرده و سبب جابه‌جایی مداری یا نصف‌النهاری آنها می‌شود. در قطاع اطلس، برخلاف گذشته (شکل ۲-ب) که یک زوج واگرایی-همگرایی در عرض ۶۰ درجه شمالی و یک زوج دیگر در عرض ۴۰ درجه وجود داشت که به ترتیب

جفت شده با آن که در گذشته در نیمه شرقی مدیترانه، شمال شرق آفریقا و دریای سرخ مستقر بود و دامنه نفوذ آن در خاورمیانه فقط تا مرزهای جنوب غربی و غربی ایران گسترش داشت، در آینده با جابه جایی شمال شرق سوی قابل توجه، روی نیمه غربی ایران و شمال خلیج فارس قرار خواهد گرفت. نتایج مربوط به تغییرات جت (شکل ۳) نیز نشان دهنده کشیدگی شرق سوی جت اطلس و جت آفریقا-آسیا است. بنابراین می توان گفت یکی از دلایل جابه جایی شرق سوی مسیرهای توفان اطلس و مدیترانه، گسترش شرق سوی امتداد جت در این نواحی است. نفوذ بیشتر ناحیه همگرایی مربوط به مسیر توفان مدیترانه و نیز شاخه مرکزی اروپا-دریای سیاه به ایران نتایج مطلوب و امیدوارکننده ای از نظر افزایش فعالیت سامانه های همدیدی در ایران در فصل زمستان است.

نتایج مربوط به میدان فعالیت موج در شکل ۴ نیز مؤید تغییرات ذکر شده در مسیر توفان است. با توجه به شکل های ۴-ب و ۴-ج، در منطقه مدیترانه، زبانه مقدار زیاد میدان فعالیت موج که در گذشته در مرکز مدیترانه بین مراکز واگرایی غرب مدیترانه و همگرایی شرق مدیترانه واقع بود، در آینده تبدیل به زبانه مقدار کم شده و به جای آن، یک زبانه مقدار زیاد بین شرق مدیترانه و غرب ایران و یک زبانه مقدار زیاد دیگر در غرب مدیترانه شکل گرفته است. در شکل ۴-الف هم یک زبانه مقدار کم تغییرات فعالیت موج روی زبانه مقدار زیاد فعالیت موج در مرکز مدیترانه تا شمال آفریقا و نیز دو زبانه مقدار زیاد تغییرات فعالیت موج در دو سوی آن در خاورمیانه و شمال غرب آفریقا دیده می شود. این نتیجه با دو نیم شدن زوج واگرایی-همگرایی مسیر توفان مدیترانه در آینده و تبدیل آن به دو زوج واگرایی-همگرایی شرقی و غربی موجود در شکل ۲، که پیش تر شرح داده شد، همخوانی دارد. بنابراین براساس شکل های ۴-ب و ۴-ج، پیش بینی این مدل نشان می دهد که در آینده در مرکز تا شرق

نشان گره های دو شاخه جنوبی (مدیترانه) و شمالی (اسکاندیناوی) فعالیت توفان به ترتیب در عرض های جنب حاره و جنب قطبی تضعیف شده و به جای آنها، مشخصه های مسیر توفان در یک شاخه مرکزی واقع در عرض های میانی (۴۰ تا ۵۵ درجه شمالی) متمرکز می شوند. قطار موج ناشی از این مسیر توفان به صورت زوج های واگرایی-همگرایی در مرکز و نیمه شرقی اروپا و دریای سیاه تا دریای خزر و دریاچه آرال مشاهده می شود (شکل ۲-ج) که در جریان سو و هم عرض با همگرایی مسیر توفان اطلس واقع است. الگوی شار مداری فعالیت موج (شکل ۵) نیز سازگار با تبدیل ساختار دوشاخه مسیر توفان به ساختار تک شاخه مرکزی در هر دو قطاع اطلس و اروپا-غرب آسیا است. با توجه به شکل ۵-الف و تغییرات میدان شار افقی فعالیت موج (بردارها) در شکل ۲-الف، مشاهده می شود که شار شرق سوی فعالیت موج در عرض های جنب قطبی یا شاخه شمالی مسیر توفان و همچنین در عرض های جنب حاره ای یعنی شاخه جنوبی مسیر توفان تضعیف می گردد، ولی در عرض های میانی یا شاخه مرکزی مسیر توفان تقویت می شود.

علاوه بر جابه جایی نصف النهاری در الگوی مسیرهای توفان، جابه جایی مداری نیز رخ می دهد. در ساختار آینده مسیر توفان اطلس (شکل ۲-ج)، مرکز همگرایی آن در شرق اطلس علاوه بر جابه جایی استواسو نسبت به دوره گذشته (شکل ۲-ب) و قرار گرفتن در جنوب انگلستان، به سمت شرق هم گسترش یافته و تا نواحی جنوب غربی، جنوبی و مرکزی اروپا را دربر خواهد گرفت. به دنبال آن، زوج واگرایی-همگرایی مرکز اروپا-دریای سیاه نیز به سمت شرق جابه جا شده و دامنه نفوذ آن به داخل مرزهای ایران و نیمه غربی و شمال غربی ایران گسترش می یابد. همچنین با مقایسه شکل های ۲-ب و ۲-ج می توان دریافت که با دو نیم شدن واگرایی مدیترانه و جابه جایی شرق سوی هسته شرقی آن به جنوب شرق مدیترانه، ناحیه همگرایی



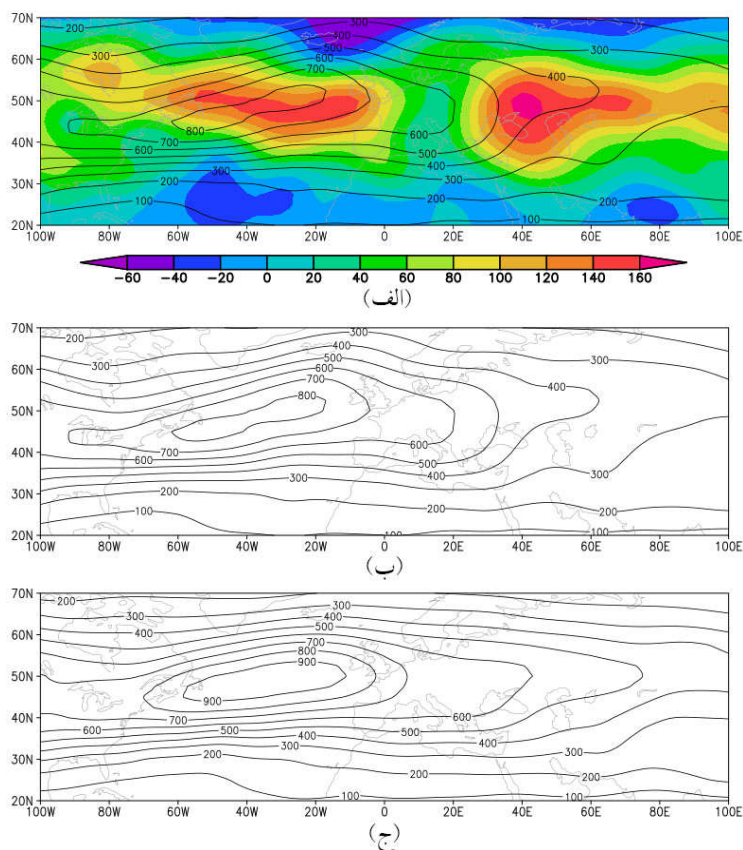
شکل ۴. مانند شکل ۲ ولی برای میدان فعالیت موج. بازه پربندها مانند شکل ۱-ب است.

مدیترانه، با تبدیل شدن زبانه مقدار زیاد فعالیت موج در مرکز مدیترانه به زبانه مقدار کم، مسیر طوفان در این ناحیه تضعیف و تقریباً از بین می‌رود که این یک پیش‌بینی ناگوار و نامطلوب برای این نواحی است. این در حالی است که با جابه‌جایی زبانه مقدار زیاد فعالیت موج به سمت خاورمیانه و از بین رفتن زبانه مقدار کم در نیمه غربی ایران، مسیر طوفان در نیمه شرقی خاورمیانه و ایران تقویت می‌شود که یک پیش‌بینی خوب برای ایران و به‌ویژه نیمه غربی کشور است. مشابه این تغییرات در میدان شار مداری فعالیت موج (شکل ۵) مشخص است. مطابق شکل ۵-الف، در ناحیه مدیترانه، روی زبانه مقدار زیاد این میدان در گذشته، که مشخصه

مسیر طوفان مدیترانه است، در شمال آفریقا تغییرات منفی و در مدیترانه تا جنوب و مرکز اروپا، زبانه مقدار کم تغییرات مثبت منطبق است؛ بنابراین در آینده (شکل ۵-ج)، زبانه مقدار زیاد در این قسمت به زبانه مقدار کم تبدیل می‌شود. در مقابل، در دو سوی زبانه مقدار زیاد پیشین، در خاورمیانه و در شمال غرب آفریقا، زبانه مقدار زیاد تغییرات مثبت بر زبانه‌های مقدار کم قرار دارد که در نتیجه آن در آینده، دو زبانه مقدار زیاد در خاورمیانه و شمال غرب آفریقا شکل می‌گیرد. به عبارت دیگر، زبانه مقدار زیاد شار مداری فعالیت موج مدیترانه به دو زبانه شرقی و غربی تقسیم و زبانه شرقی به خاورمیانه منتقل می‌شود.

واچرخندی مسیر توفان مدیترانه و امتداد آن تا جنوب غرب آسیا، تغییرات مثبت یا تضعیف شکست واچرخندی در نیمه غربی این ناحیه روی مرکز مدیترانه و تغییرات منفی یا تقویت شکست واچرخندی در نیمه شرقی این ناحیه روی جنوب غرب آسیا دیده می‌شود. به بیان دیگر، بیشینه شکست واچرخندی مسیر توفان مدیترانه که در گذشته (شکل ۶-ب) در مرکز مدیترانه واقع بود، در آینده (شکل ۶-ج) به شرق مدیترانه و غرب خاورمیانه منتقل می‌شود. به این ترتیب، در حالی که در گذشته نفوذ ضلع شرقی مرکز شکست واچرخندی مسیر توفان مدیترانه حداکثر تا شرق مدیترانه و غرب خاورمیانه بود (شکل ۶-ب)، در آینده نفوذ آن تا شرق خاورمیانه و شرق ایران گسترش خواهد یافت (شکل ۶-ج).

نتایج مربوط به تغییرات شار نصف‌النهاری فعالیت موج یا شکست موج بر اثر گرمایش زمین در شکل ۶ نشان داده شده است. براساس شکل ۶-الف، قرار گرفتن تغییرات مثبت در نیمه غربی اطلس روی بیشینه شار منفی یا استواسوی فعالیت موج، به معنای کاهش شار استواسو یا به عبارتی، تضعیف شکست واچرخندی موج در این ناحیه است. در مقابل، وجود تغییرات منفی در نیمه شرقی این اقیانوس به معنای افزایش شار استواسوی فعالیت موج یا تقویت شکست واچرخندی موج در این منطقه است. به عبارتی، بیشینه شکست واچرخندی مسیر توفان اطلس که در گذشته در غرب این اقیانوس قرار داشت (شکل ۶-ب)، در آینده به شرق این اقیانوس منتقل می‌شود (شکل ۶-ج). در شکل ۶-الف، در ناحیه بیشینه شکست

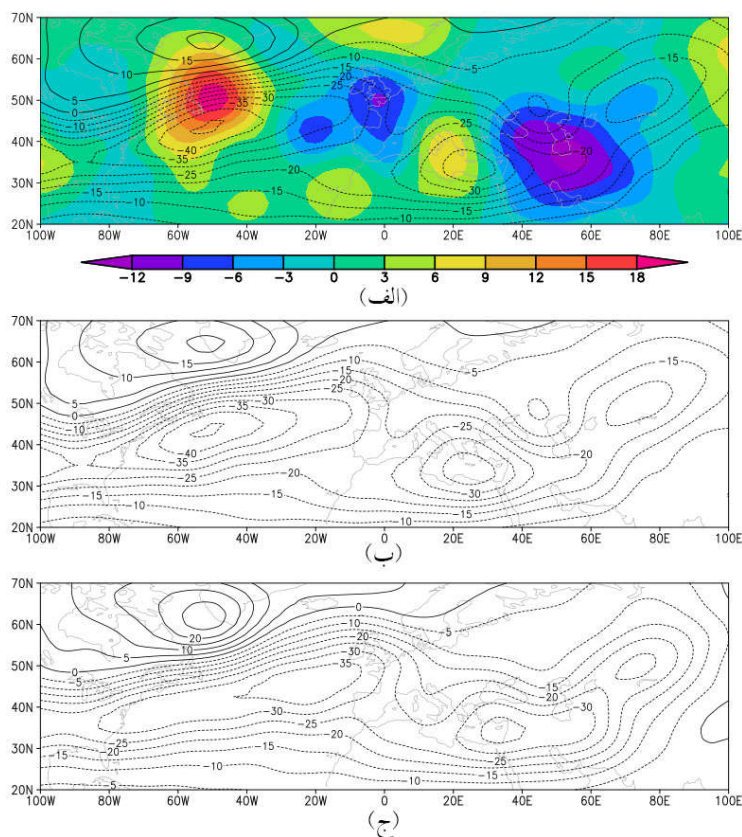


شکل ۵. مانند شکل ۲ ولی برای میدان شار مداری فعالیت موج. بازه پرندها مانند شکل ۱-ج است.

۲-۴ برش قائم

در این قسمت، چگونگی تغییرات شدت و موقعیت الگوی فعالیت و انتشار موج با رهیافت سطح مقطع نصف‌النهاری شار فعالیت موج و واگرایی آن در قطاع‌های مختلف بررسی می‌شود. میانگین مداری سطح مقطع نصف‌النهاری این میدان‌ها در یک قطاع خاص، ویژگی‌های انتشار فعالیت موج و برهم‌کنش پیچک-شارش میانگین را به‌صورت «محلی» برای آن قطاع در صفحه نصف‌النهار-قائم یا صفحه $\phi-p$ نشان می‌دهد (رضاییان و همکاران، ۲۰۱۶). در این پژوهش، سطح مقطع نصف‌النهاری شار فعالیت موج $F_{\perp} = (\overline{F^{(\phi)}}, \overline{F^{(p)}})$ و واگرایی آن $(\nabla \cdot F_{\perp})$ ، برای چهار قطاع مختلف در محدوده غرب اقیانوس اطلس تا جنوب غرب آسیا محاسبه و بررسی شده

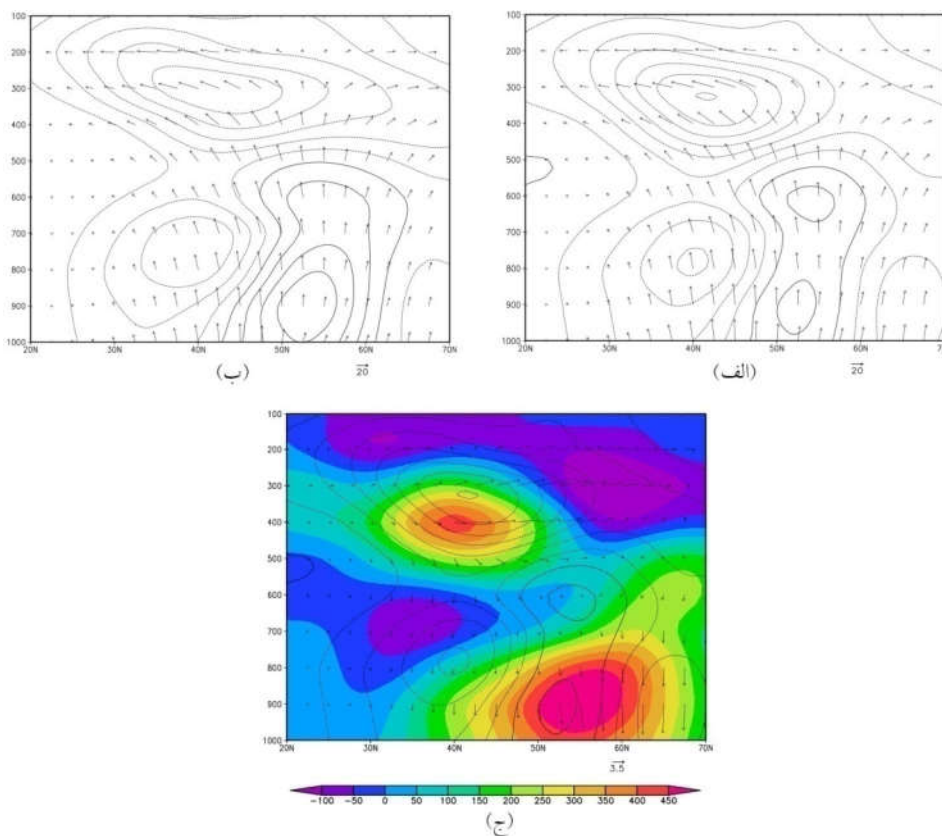
است که مبنای انتخاب این قطاع‌ها، الگوی چهارتایی تغییرات مثبت و منفی شار نصف‌النهاری فعالیت موج است که در قسمت قبل (شکل ۶-الف) شرح داده شد. این چهار قطاع عبارت‌اند از: نیمه غربی اطلس، نیمه شرقی اطلس، مدیترانه مرکزیو جنوب غرب آسیا. در اینجا برای پرهیز از حجم بالای مطالب، فقط نتایج مربوط به دو قطاع نیمه غربی اطلس (شکل ۷) و جنوب غرب آسیا (شکل ۸) نشان داده می‌شود. یکی از کاربردهای مهم سطح مقطع نصف‌النهاری شار فعالیت موج و واگرایی آن، بررسی انتشار بسته‌موج‌گونه قائم و نصف‌النهاری امواج است. با توجه به شکل‌های ۷ و ۸، مشاهده می‌شود که انتشار موج در ترازهای زیرین و ردسپهر اغلب قائم و بالاسو و در ترازهای زیرین و ردسپهر نصف‌النهاری و اغلب استواسو



شکل ۶. مانند شکل ۲ ولی برای میدان شار نصف‌النهاری فعالیت موج. بازه پرنده‌ها مانند شکل ۱-د است.

با توجه به شکل ۷-الف، در قطاع نیمه غربی اطلس و در دوره تاریخی، ناحیه بیشینه واگرایی شار فعالیت موج در عرض‌های میانی (۵۰ تا ۵۵ درجه شمالی) دیده می‌شود که از ترازهای زیرین وردسپهر به صورت عمیق تا ترازهای میانی وردسپهر گسترش یافته است. از سوی دیگر، ناحیه بیشینه همگرایی در ترازهای بالای وردسپهر (۴۰۰ تا ۲۰۰ هکتوپاسکال) واقع است که مرکز آن در عرض‌های ۴۰ تا ۴۵ درجه شمالی قرار دارد. این دو ناحیه واگرایی و همگرایی به ترتیب نواحی گسیل و دریافت موج مربوط به مسیر توفان اطلس را نشان می‌دهند. براساس شکل ۷-

است. نواحی واگرایی شار فعالیت موج یا مراکز مثبت $\nabla \cdot \mathbf{F}_{\perp}$ ، نشان‌دهنده نواحی گسیل موج است که بیشتر در ترازهای زیرین و در عرض‌های میانی بوده و مناطق رشد کژ فشار امواج را مشخص می‌کند که منطبق بر عرض جغرافیایی هسته جت است. نواحی همگرایی شار فعالیت موج یا مراکز منفی $\nabla \cdot \mathbf{F}_{\perp}$ نیز نشان‌دهنده نواحی دریافت و شکست موج است که بیشتر در ترازهای زیرین وردسپهر و در عرض‌های جغرافیایی شاخه‌های جت، به ویژه شاخه استواسوی جت قرار دارند و بیشترین دریافت و شکست موج در آن رخ می‌دهد.



شکل ۷. نتایج فصل زمستان در قطاع ۸۰ تا ۳۰ درجه غربی (بخش شرقی آمریکا و نیمه غربی اطلس) مربوط به سطح مقطع نصف‌النهاری میدان‌های: (الف) و (ب) شار فعالیت موج (بردارها) و واگرایی آن (پربندها) به ترتیب در دوره‌های گذشته (historical) و آینده (RCP8.5)، (ج) تغییرات شار فعالیت موج (بردارها) و تغییرات واگرایی آن (سایه رنگی) از دوره تاریخی به دوره آینده براساس سناریوی RCP8.5-historical همراه با واگرایی آن در دوره گذشته (پربندها). مقادیر مثبت و صفر یا خط پر و مقادیر منفی با نقطه‌چین نشان داده شده است. بازه پربندها $2 \times 10^8 \text{ m}^2$ است. مقیاس بردارها در پایین و سمت راست شکل‌ها نمایش داده شده و مؤلفه قائم آن برای نمایش بهتر در ۱۰ ضرب شده است.

مثبت (رنگ قرمز) و منفی (رنگ آبی-بنفش) میدان واگرایی شار فعالیت موج به ترتیب واقع در استواسو و قطب سوی عرض ۵۵ درجه شمالی، نشان دهنده این مطلب است.

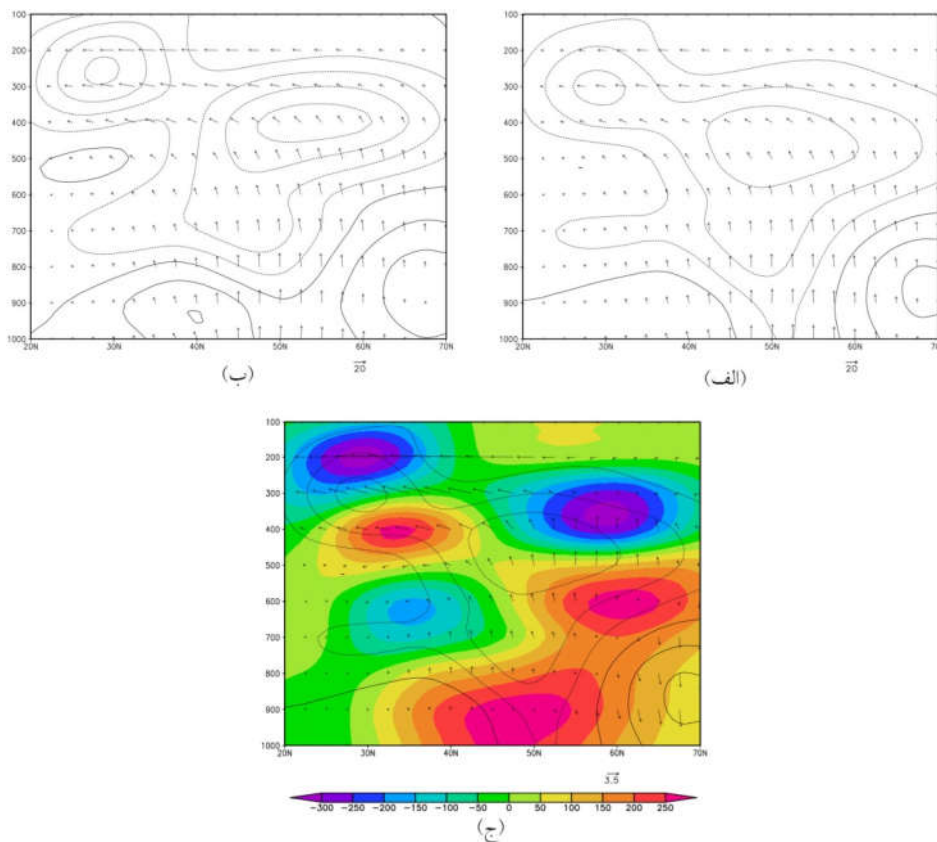
این تغییرات در چگونگی انتشار افقی و شکست امواج در ترازهای زیرین با تغییرات در نحوه انتشار بالاسو و گسیل امواج از ترازهای زیرین مرتبط و با آن جفت شده است. در دوره آینده (شکل ۷-ب)، مرکز واگرایی و گسیل امواج در ترازهای زیرین، نسبت به گذشته (شکل ۷-الف)، دچار جابه‌جایی قطب‌سوی شده است و برخلاف گذشته که مرکز واگرایی علاوه بر بیشینه واقع در سطح زمین، یک بیشینه دوم هم در ترازهای میانی داشت، در آینده تنها یک بیشینه در ترازهای زیرین دارد و به عبارتی، بیشینه گسیل موج به ترازهای پایین‌تر محدود می‌شود. قرار گرفتن بیشینه تغییرات مثبت در قطب‌سو و پایین‌سوی مرکز واگرایی گذشته (پربندها) در شکل ۷-ج نیز به ترتیب، نشان‌دهنده جابه‌جایی نسبی قطب‌سوی مرکز واگرایی و متمرکز شدن آن در ترازهای زیرین است. به علاوه، با توجه به پایین‌سو بودن بردارهای تغییرات شار فعالیت موج در کلّ وردسپهر زیرین و میانی (شکل ۷-ج)، انتشار بالاسوی امواج از ترازهای زیرین به ترازهای زیرین تضعیف خواهد شد. برای جمع‌بندی می‌توان گفت که در قطاع نیمه غربی اطلس با تضعیف انتشار بالاسوی امواج از ترازهای زیرین به زیرین و نیز محدود شدن عمق ناحیه بیشینه گسیل موج به ترازهای زیرین یا عقب‌نشینی آن از ترازهای میانی و جابه‌جایی قطب‌سوی آن، انتشار استواسو و شکست و اچرخندی امواج در ترازهای زیرین در عرض‌های میانی و جنب‌حاره تضعیف و انتشار قطب‌سو و شکست و اچرخندی آنها در عرض‌های جنب‌قطبی تقویت می‌شود. در قطاع نیمه شرقی اطلس، که شکل آن نشان داده نشده است، برخلاف غرب اطلس، ناحیه واگرایی شار فعالیت موج یا گسیل موج به ترازهای

الف، امواج پس از رشد در ترازهای زیرین در جهت بالاسو منتشر و در ترازهای زیرین بخشی از این امواج (در قطب‌سوی ۵۵ درجه شمالی) به سمت قطب و بخش بزرگ‌تری (در استواسوی ۵۵ درجه شمالی) به سمت استوا منتشر می‌شوند. بزرگ‌تر بودن انتشار استواسو، به معنای غالب بودن شکست و اچرخندی امواج راسبی است و این رفتار سبب می‌شود که ناحیه بیشینه همگرایی یا شکست موج ترازهای زیرین، در استواسوی مرکز گسیل ترازهای زیرین قرار گیرد. انتشار استواسو (قطب-سو) و در نتیجه، شکست امواج یا همگرایی شار فعالیت موج در استواسوی (قطب‌سوی) ناحیه گسیل موج، مربوط به نوعی از رفتار امواج کژفشار است که شکست و اچرخندی یا LC1 (شکست چرخندی یا LC2) نامیده می‌شود (تورنکرافت و همکاران، ۱۹۹۳). در دوره آینده (شکل ۷-ب)، در ترازهای بالا (۴۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال)، انتشار استواسوی امواج در سمت استواسوی ۵۵ درجه شمالی تضعیف و انتشار قطب‌سوی امواج در سمت قطب‌سوی ۵۵ درجه شمالی تقویت می‌شود. قطب‌سو بودن بردار تغییرات یا بی‌هنجاری شار قطب‌سوی فعالیت موج در ترازهای بالا در شکل ۷-ج نیز همین امر را نشان می‌دهد. به این ترتیب، شکست و اچرخندی موج، کاهش می‌یابد و در نتیجه، همگرایی ترازهای بالا در استواسوی عرض ۵۵ درجه شمالی تضعیف می‌شود و در مقابل، شکست چرخندی موج افزایش می‌یابد و در اثر آن همگرایی ترازهای بالا در قطب‌سوی عرض ۵۵ درجه تقویت می‌شود. این نتیجه را می‌توان در شکل ۷-ب به صورت ضعیف شدن مرکز همگرایی ترازهای زیرین در عرض‌های پایین‌تر از ۵۵ درجه، در مقایسه با شکل ۷-الف، از یک سو و پهن شدن و کشیدگی ناحیه همگرایی به عرض‌های بالاتر از ۵۵ درجه و در نتیجه، تقویت همگرایی در این نواحی از سوی دیگر، مشاهده کرد. همچنین در شکل ۷-ج، تغییرات

جریان‌سوی مدیترانه یعنی در قطاع جنوب‌غرب آسیا (دوره گذشته، شکل ۸-الف)، مشخصه‌های دو شاخه جنوبی و شمالی از فعالیت پیچکی دیده می‌شود. در ترازهای زیرین، دو مرکز واگرایی شاخه‌های جنوبی و شمالی به ترتیب در عرض‌های جنب‌حاره (۳۰ تا ۴۰ درجه) و عرض‌های شمالی (۶۰ تا ۷۰ درجه) به چشم می‌خورد. جفت‌شده با این دو مرکز در ترازهای زیرین، دو ناحیه پیشینه همگرایی شاخه‌های شمالی و جنوبی به ترتیب در عرض‌های میانی (۵۰ تا ۶۰ درجه شمالی) و عرض‌های جنب‌حاره (۲۰ تا ۳۵ درجه) وجود دارد. شاخه شمالی مربوط به شمال‌غرب و غرب روسیه و کوه‌های آرال و شاخه جنوبی مربوط به جنوب‌غرب آسیا، خاورمیانه و شرق مدیترانه است. مطابق شکل ۸-ج، در جنوب‌غرب آسیا، برخلاف مدیترانه مرکزی، همراه با تقویت شاخه

بالتر گسترش یافته است و انتشار بالاسو و استواسوی امواج در ترازهای میانی و زیرین جو افزایش می‌یابد و در نتیجه، شکست و اچرخندی موج تقویت می‌شود. این نتایج با نتایج قسمت الف در شکل ۶ مبنی بر تضعیف (تقویت) شکست و اچرخندی در قطاع نیمه غربی (شرقی) اطلس و جابه‌جایی پیشینه شکست موج مسیر توفان اطلس از غرب به شرق این اقیانوس سازگار است.

در قطاع مدیترانه مرکزی (شکل آن نشان داده نشده است) و در عرض‌های بین ۲۰ تا ۴۵ درجه شمالی، متناظر با تضعیف همگرایی و شار استواسوی مربوط به مسیر توفان مدیترانه در ترازهای زیرین، ناحیه واگرایی و گسیل مربوط به این مسیر توفان در ترازهای زیرین نیز تضعیف و دچار جابه‌جایی قطب‌سو می‌شود. همچنین، شار بالاسوی امواج در ترازهای میانی و زیرین کاهش می‌یابد. در



شکل ۸. مانند شکل ۷ ولی برای قطاع جنوب‌غرب آسیا و شرق مدیترانه (۳۰ تا ۸۰ درجه شرقی).

فعالیت در قطار موج شاخه مرکزی بین دو شاخه مدیترانه و اسکاندیناوی از مرکز اروپا تا دریاها سیاه و خزر متمرکز می‌شود. هم‌زمان، بسته‌موج این شاخه روی دریای سیاه و نیز بخش جداشده‌ای از مسیر توفان مدیترانه به سمت شرق جابه‌جا می‌شود و به این ترتیب، نفوذ هر دو شاخه به ایران افزایش می‌یابد که این موضوع نتیجه‌ای مطلوب از نظر اثر بر افزایش انتقال سامانه‌های همدیدی به ایران تلقی می‌شود.

سیاسگزاری

نگارندگان از کارگروه مدل‌سازی اقلیمی در «برنامه جهانی پژوهش اقلیمی» (WCRP) که مسئول CMIP است و از گروه مدل‌سازی اقلیمی ماکس پلانک برای تولید و در دسترس قرار دادن خروجی مدل خود صمیمانه تشکر می‌کنند. شایان ذکر است که «برنامه فرایابی و تقابل مدل اقلیمی (PCMDI) در اداره انرژی ایالات متحده آمریکا (DOE)»، حمایت راهبردی برای CMIP را فراهم و در همکاری با «سازمان جهانی دروازه‌های علوم سامانه زمین» (GO-ESSP)، توسعه زیرساخت نرم‌افزاری را هدایت کرده است.

منابع

- Ahmadi-Givi, F., Nasr-Esfahany, M. A., 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**, 754–765.
- Andrews, D. G., Holton, J. R., and Leovy, C. B., 1987, Middle Atmosphere Dynamics: Academic Press, 489 pp.
- Arblaster, J., and Meehl, G., 2006, Contributions of external forcings to southern annular mode trends: Journal of Climate, **19**, 2896–2905.
- Booth, J. F., Kwon, Y. O., Ko, S., Small, R. J., and Msadek, R., 2017, Spatial patterns and intensity of the surface storm tracks in CMIP5 models: Journal of Climate, **30**, 4965–4981.

جنوبی و اگرایی یا گسیل موج در ترازهای زیرین و همچنین تقویت شار بالاسوی امواج مربوط به این شاخه در ترازهای زیرین و میانی و ردسپهر، در ترازهای بالا نیز در عرض‌های استواسوی ۵۰ درجه شمالی، شار استواسوی فعالیت موج افزایش می‌یابد. به این ترتیب، شکست و اچرخندی موج و در نتیجه، مرکز همگرایی و دریافت موج مربوط به شاخه جنوبی در خاورمیانه و جنوب غرب آسیا تقویت خواهد شد. تقویت این ناحیه شکست یا دریافت موج ترازهای زیرین در شاخه جنوبی به صورت تقویت مرکز همگرایی شار فعالیت موج در عرض‌های ۲۰ تا ۳۵ درجه شمالی در شکل ۸-ب (آینده)، در مقایسه با شکل ۸-الف (گذشته) دیده می‌شود.

۵ خلاصه و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تغییرات مسیر توفان در اطلس، مدیترانه و جنوب غرب آسیا در فصل زمستان بر اثر گرمایش زمین و براساس داده‌های خروجی مدل MPI-ESM-LR در فاز پنجم از پروژه CMIP موسوم به CMIP5 ارزیابی و تحلیل شده است. به طور 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 قطاع‌های جریان‌سوی خود از اروپا و مدیترانه تا سبیری و جنوب غرب آسیا است. براساس نتایج، در قطاع اطلس، تضعیف بسته‌موج‌ها و انتشار شرق‌سوی فعالیت موج در دو شاخه شمالی و جنوبی مسیر توفان و تقویت و تمرکز آن در شاخه مرکزی و هم‌زمان، جابه‌جایی آن به سمت شرق رخ خواهد داد. به دنبال آن، در جریان‌سوی شاخه شمالی این مسیر توفان، از شمال اروپا و اسکاندیناوی تا سبیری و همچنین در جریان‌سوی شاخه جنوبی آن، در مدیترانه و شمال آفریقا، قطار موج و مسیر توفان تضعیف و درمقابل،

- Esler, J. G., and Haynes, P. H., 1999, Baroclinic wave breaking and the internal variability of the tropospheric circulation: *Journal of the Atmospheric Sciences*, **56**, 4014–4031.
- Hodges, K. I., 1995, Feature tracking on the unit sphere: *Monthly Weather Review*, **123**, 3458–3465.
- Hoskins, B. J., and Hodges, K. I., 2002, New perspectives on the northern hemisphere winter storm tracks: *Journal of the Atmospheric Sciences*, **59**, 1041–1061.
- Hoskins, B. J., and Hodges, K. I., 2005, A new perspective on southern hemisphere storm tracks: *Journal of Climate*, **18**, 4108–4129.
- Lee, R. W., Hodges, K. I., and Woollings, T., 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., Chen, G., and Frierson, D. M. W., 2008, Response of the zonal mean atmospheric circulation to El Niño versus global warming: *Journal of Climate*, **21**, 5942–5959.
- Lu, J., Vecchi, G. A., and Reichler, T., 2007, Expansion of the Hadley cell under global warming: *Geophysical Research Letters*, **34**, L06805, doi:10.1029/2006GL028443.
- Miller, R. L., Schmidt, G. A., and Shindell, D. T., 2006, Forced annular variations in the 20th century intergovernmental panel on climate change fourth assessment report models: *Journal of Geophysical Research*, **111**, D18101, doi:10.1029/2005JD006323.
- 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**, 749–756.
- Rezaeian, M., Mohebalhojeh, A. R., Ahmadi-Givi, F., and Nasr-Esfahany, M. A., 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**, 1662–1671.
- Tamarin, T., and Kaspi, Y., 2017, Enhanced poleward propagation of storms under climate change: *Nature Geoscience*, **10**, 908–913.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., and Meehl, G. A., 2012, An overview of CMIP5 and the experiment design: *Bulletin of the American Meteorological Society*, **93**, 485–498.
- Thompson, D. W. J., Wallace, J., and Hegerl, G., 2000, Annular modes in the extratropical circulation, Part II: Trends: *Journal of Climate*, **13**, 1018–1036.
- Thorncroft, C. D., Hoskins, B. J., and McIntyre, M. E., 1993, Two paradigms of baroclinic life-cycle behavior: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **119**, 17–35.
- Yang, M., Zuo, R., Wang, L., Chen, X., Tan, Y., and Li, X., 2018, Interannual variability of the winter North Atlantic storm track in CMIP5 models: *Scientific online letters on the atmosphere, SOLA*, **14**, 74–78.
- Zappa, G., Hawcroft, M. K., Shaffrey, L., Black, E., and Brayshaw, D. J., 2015, Extratropical cyclones and the projected decline of winter Mediterranean precipitation in the CMIP5 models: *Journal of the Climate Dynamics*, **45**, 1727–1738.

Projected changes in winter-time storm tracks over Atlantic-Mediterranean-Southwest Asia using the MPI-ESM-LR model for RCP8.5 scenario in CMIP5

Shahin Alemzadeh¹, Farhang Ahmadi-Givi^{2*}, Alireza Mohebalhojeh³ and Mohammad Ali Nasr Esfahany⁴

¹ Ph.D student, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

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

³ Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

⁴ Assistant Professor, Department of Water Engineering, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran

(Received: 14 January 2018, Accepted: 14 May 2019)

Summary

In this study, the “MPI-ESM-LR” model output from phase 5 of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) is used to assess the response of the North Atlantic (NA) 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 used as a diagnostic tool to investigate the eddy activity dynamics. A pair of large centers of divergence-convergence for the horizontal wave activity flux (wave packet) in the NA region forms the signatures of the NA storm track. The NA storm track has a double-branch structure consisting of northern and southern branches. The Mediterranean storm track is identified by a pair of positive/negative centers of wave activity flux in the west/east of the Mediterranean sea. The convergence area extends from the eastern Mediterranean and north-eastern Africa to the Middle-east and western and south-western parts of Iran.

The dynamical analysis of the MPI-ESM-LR results shows that the response of the upper-tropospheric wave activity, propagation and breaking in the northern and southern branches of the NA storm track to global warming, determines the changes of eddy activity in the northern and southern latitudes in its downstream sectors from Europe to Siberia and from Mediterranean Sea to Southwest Asia, respectively. In winter, intensity and number of wave packets decrease in both northern latitudes from the northern branch of the NA storm track to the Scandinavia and Siberia and southern latitudes in the southern branch of the NA storm track, the Mediterranean storm track and the Northern Africa region, while the central branch of wave activity in the middle and eastern NA and its downstream wave packets in the central Europe–Black Sea–Caspian Sea turns out to be the dominant path for the storm activity in the future. Moreover, the eastward flux of wave activity decreases in both the northern and southern latitudes, while it gets stronger in middle latitudes. These results indicate that the double-branch structure of the storm track in the NA and its downstream region in Europe and west Asia will turn to a single-branch pattern at the end of 21st century. Furthermore, the wave breaking and wave packets maxima associated with both the NA and Mediterranean storm tracks and the central branch of wave activity in the Europe–Black Sea will also undergo an eastward shift. Corresponding to that, the tongue of high values of wave activity in the central Mediterranean will also move to the eastern Mediterranean and the tongue of low values of wave activity in the middle-east will disappear. This leads to a considerable increase in penetration of both the Mediterranean and Black Sea wave packets and wave activity to Iran which may result in higher synoptic wave activity in this country in a warming climate.

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

*Corresponding author:

ahmadig@ut.ac.ir