






The effect of mid-latitude atmospheric circulation changes on the position of the Mediterranean trough and the occurrence of super heavy precipitation in Iran

Mirzaei, N.¹  | Alijani, B.¹  | Hejazizadeh, Z.¹  | Darand, M.²  | Nasserzadeh, M. H.¹ 

1. Department of Climatology, Faculty of Geographical Sciences, University of Kharazmi, Tehran, Iran.

2. Department of Climatology, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

Corresponding Author E-mail: nabimirzaei71@gmail.com

(Received: 29 Oct 2023, Revised: 5 Dec 2023, Accepted: 9 Jan 2024, Published online: 6 July 2024)

Summary

Spatial variations of pressure patterns under the influence of large-scale atmospheric circulation create different conditions in terms of the intensity of synoptic systems affecting on extreme climatic phenomena. Regarding large-scale patterns, not only the changes of extreme events are considered, but also the changes and developments of synoptic systems on a regional scale are studied. Weather extremes have a great significance for society, as they pose a threat to human life and can result in enormous economic damage and disruption. The physical understanding and timely prediction of extreme weather events are of enormous importance to society regarding associated impacts. Extreme precipitation events (EPEs) is one of the most frequent natural hazards that affects the domain, eventually leading to floods. Synoptic systems in mid-latitudes such as blocking, ridge and troughs cause spatial changes in westerly waves. Spatial variations of atmospheric waves occur when, which normally move from west to east, change their main direction to the north or south. The occurrence of precipitation in the Middle East is related to the changes in waves and the position of the Mediterranean trough. Extreme precipitation events in the Middle East often result from tropical-extratropical interaction, whereby midlatitude forcing and poleward transport of tropical moisture are of central importance. The Mediterranean Sea region is considered to be one of the most important and major areas for circulation in the Northern Hemisphere, so that most of Iran's rain cyclones are formed over the Mediterranean Sea. In other words, Iran's rainfall in the cold period of the year is influenced by the Mediterranean circulation patterns. Evidence shows that the large-scale atmospheric circulation over the North Atlantic plays an important role in the Mediterranean circulation changes. We investigated the effect of mid-latitude atmospheric circulation changes on the position of the Mediterranean trough and the occurrence of super heavy precipitation in Iran. In this research, two category of upper atmosphere data were used. The first is daily precipitation data for 350 stations that were made available by the Iranian Meteorological Organization (IRIMO). The second dataset is the geopotential height, relative vorticity, potential vorticity, U, V-component of wind and Relative humidity, extracted from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF-ERA5) reanalysis with grids at 0.25×0.25 resolution. In this regard, 150 extreme and widespread rains were identified, then using the sinuosity index, the changes of the most frequent contours (550, 565 and 575 decimeters) during the precipitations were identified over the North Atlantic and Mediterranean. The aim of this study was to find the relationship between the spatial variations of the upper level waves over the North Atlantic and the Mediterranean (-80° W to 70° E, 10° N to 60° N). According to sinuosity index, the minimum sinuosity value is about 1 indicating zonal flow. Any sinuosity value greater than 1 indicates an increase in atmospheric waves. The spatial changes of the Mediterranean trough are due to the meridian changes of currents over the North Atlantic, Europe. The blocking system over the Atlantic was responsible for both the amplification of the downstream trough, as well as the formation and expansion of the trough towards the Eastern Mediterranean. The results show that extremely heavy and widespread rains occur under the influence of the formation of the Mediterranean trough and the expansion of winds from the European side and the strengthening of the North Atlantic trough. The results showed that the position and changes of the Mediterranean trough are associated with the circulation pattern of the North Atlantic. Multiple Atlantic trough are associated with each case of Mediterranean trough downstream. The formation of the Atlantic trough causes an increase in the range of atmospheric waves and the formation of a ridge over Europe and the development of the Mediterranean trough. Under these conditions the Mediterranean Sea experiences 8 longitudinal and latitudinal changes compared to its average. Therefore, the spatial variations of the Mediterranean trough are due to the meridian changes of the European flows and the expansion of the high north side (tropical side) downstream of the western wind. Simultaneously with the formation of blocking over Europe in its eastern part, the dynamic ridge causes the transfer of cold winds over the Mediterranean, which strengthens and expands the Mediterranean trough to the east. These conditions, with the strengthening of the conditions of ascent and eastward movement of the Mediterranean trough, the Arabian Subtropical Anticyclone (ASA) also expands eastward. During the heavy rains of Iran, by strengthening the conditions of ascent and eastward expansion to the Mediterranean trough, the ASA also expands to the east. Therefore, with the location of the ASA over the northern Indian Ocean, the Arabian Sea, and the Oman Sea, more moisture is provided to the atmosphere, which is accompanied by the intensification of extremely intense and widespread precipitation. In general, the position of the Mediterranean trough during heavy rains is such that the western and southwestern regions of the country receive most of the precipitation. These conditions are more severe due to the orographic factor of ascent caused by the Zagros mountains in this region.

Keywords: Mediterranean trough; sinuosity index; super heavy precipitation; Iran.

Cite this article: Mirzaei, N., Alijani, B., Hejazizadeh, Z., Darand, M., & Nasserzadeh, M. H. (2024). The effect of mid-latitude atmospheric circulation changes on the position of the Mediterranean trough and the occurrence of super heavy precipitation in Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 50(2), 521-540. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2024.367094.1007571>

E-mail: (1) bralijani@gmail.com | hedjazizadeh@yahoo.com | nasserzadeh@khu.ac.ir (2) darand_mohammad@yahoo.com



اثر تغییرات گردش‌های جوی عرض‌های میانی بر موقعیت ناوه مدیترانه و رخداد بارش‌های فوق‌سنگین ایران

نبی میرزایی^۱ | بهلول علیجانی^۱ | زهرا حجازی زاده^۱ | محمد دارند^۲ | محمد حسین ناصرزاده^۱

۱. گروه آب و هواشناسی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
۲. گروه آب و هواشناسی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: nabimirzai71@gmail.com

(دریافت: ۱۴۰۲/۸/۷، بازنگری: ۱۴۰۲/۹/۱۴، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۱۰/۱۹، انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۴/۱۶)

چکیده

در این پژوهش اثر گردش بزرگ مقیاس عرض‌های میانی بر موقعیت ناوه مدیترانه برای بارش‌های فوق‌سنگین طی بازه زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۲ بررسی شد. در این راستا با استفاده از شاخص موج تغییرات موج و با تحلیل همبندی الگوی گردشی جو برای ۱۵۰ بارش فوق‌سنگین کشور تحلیل شد. نتایج نشان داد که بارش‌های فوق‌سنگین تحت تأثیر تقویت ناوه اطلس، گسترش جریانات از سمت اروپا و شکل‌گیری ناوه مدیترانه رخ می‌دهد. شکل‌گیری ناوه اطلس سبب افزایش دامنه امواج، شکل‌گیری پشته بر روی اروپا و ناوه مدیترانه می‌شود. با شکل‌گیری این الگو، ناوه مدیترانه تغییرات طول و عرض جغرافیایی ۸ درجه را نسبت به میانگین خود تجربه می‌کند. تغییرات مکانی ناوه مدیترانه به دلیل تغییرات نصف‌النهاری امواج باد غربی بر روی اروپا و موقعیت ارتفاع زیاد جنب‌حاره است. متغییرترین قسمت باد غربی منطبق بر بلاکینگ شرق اطلس و ناوه مدیترانه است که با تشدید شیو بین ارتفاع زیاد و کم ارتفاع، جریانات نصف‌النهاری شده و مقدار موج افزایش می‌یابد. این شرایط منجر به تقویت پشته اروپا، افزایش دامنه امواج، تکوین بندال و گسترش ناوه مدیترانه تا عرض ۲۵ درجه می‌شود. تکوین بلاکینگ اطلس سبب تقویت پشته بر روی اروپا و گسترش جریانات به سمت مدیترانه می‌شود. همچنین گسترش نصف‌النهاری ارتفاع زیاد اروپایی منجر به تشدید شیو فشار، شارش جریانات سرد شمالی، تشدید جبهه‌زایی، تعمیق ناوه مدیترانه تا دریای سرخ می‌شود. همزمان با تقویت ناوه مدیترانه گسترش شرق‌سوی واچرخند عربستان علاوه بر این که منجر به گسترش شرق‌سوی ناوه مدیترانه می‌شود، رطوبت مناسبی نیز برای رخداد بارش‌های فوق‌سنگین کشور تأمین می‌کند.

واژه‌های کلیدی: ناوه مدیترانه، شاخص موج، بارش فوق‌سنگین، ایران.

۱. مقدمه

ماهیت پویا و تغییرپذیر، کاملاً درهم‌تنیده است (حیدری و خوش‌اخلاق، ۱۳۹۴) به طوری که در بررسی سامانه‌های بزرگ جوی، نه تنها تغییر در شدت و پراکندگی عناصر اقلیمی، بلکه تغییر و تحولات سامانه‌های همبندی در مقیاس منطقه‌ای نیز مطالعه می‌شود، سپس اثرات آن بر پدیده‌های سطحی مانند بارش تبیین می‌شود. مطالعه عوامل مؤثر بر رخداد بارش زمانی مفید خواهد بود که نوسانات شدید بارش از جمله بارش‌های سنگین را به‌عنوان چالش اصلی پیش‌بینی‌های جوی مد نظر قرار گیرد. بارش‌های

اقلیم هر منطقه متأثر از سامانه‌های جوی است که در مقیاس کلان نقش آفرینی می‌کنند. سامانه‌های جوی تحت تأثیر گردش بزرگ مقیاس جو آرایش منظمی از الگوهای کم‌فشار و پرفشار را نمایان می‌سازد، به طوری که عناصر اقلیمی به تبع گردش بزرگ مقیاس جو در طول زمان دچار نوسان زیادی می‌شوند. اساساً مطالعه تغییرات عناصر سطحی، توسط الگوی گردشی، ماهیت اصلی مطالعات علوم جوی را نمایان می‌سازد. تغییرپذیری از ویژگی‌های ذاتی سامانه‌ی اقلیم است که ضمن داشتن

استناد: میرزایی، نبی؛ علیجانی، بهلول؛ حجازی زاده، زهرا؛ دارند، محمد و ناصرزاده، محمد حسین (۱۴۰۳). اثر تغییرات گردش‌های جوی عرض‌های میانی بر موقعیت ناوه مدیترانه و رخداد بارش‌های فوق‌سنگین ایران. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۵۰(۲): ۵۲۱-۵۴۰. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2024.367094.1007571>

رایانامه: (۱) bralijani@gmail.com | hedjazizadeh@yahoo.com | nasserzadeh@khu.ac.ir (۲) darand_mohammad@yahoo.com



ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2024.367094.1007571>

رفتار سامانه‌های جوی و موقعیت ناوه مدیترانه نقش دارد، تغییرات مکانی بادهای غربی به واسطه افزایش (کاهش) دامنه و عمق سامانه‌های فشاری است (علیجانی و نظاماتی، ۱۳۹۳). تغییرات مکانی امواج باد غربی در قالب عمیق‌شدن جریانات جوی به سمت عرض‌های پایین‌تر و افزایش عمر سامانه‌های جوی و یا کاهش دامنه امواج بر روی مدیترانه ظاهر می‌شود. منطقه مدیترانه تحت تأثیر مسیر توفان اطلس بوده و عمده شار ورودی از مناطق شمالی مدیترانه مربوط به قسمت غربی آن است (اسعدی و همکاران، ۱۳۹۵). رضیعی و همکاران (۲۰۱۲) نیز نشان دادند که ناوه مدیترانه عامل اصلی رخنمود بارش ایران زمین است. رضائیان و همکاران (۱۳۹۳) به این نتیجه رسیدند که در فاز مثبت نوسان اطلس شمالی (North Atlantic Oscillation) منطقه مدیترانه بیشتر از فاز منفی تحت تأثیر چرخندزایی در شمال شرق اطلس و شمال اروپا است. به عبارت دیگر بیشترین چرخندها و کم‌فشارهای دینامیکی در عرض‌های میانی با جریانات تراز بالا بر روی اطلس و مدیترانه مرتبط هستند (سahین و همکاران، ۲۰۱۵). منطقه دریای مدیترانه نیز از جمله عمده‌ترین مناطق برای چرخندزایی در نیمکره شمالی به حساب می‌آید (احمدی گیوی و نصرافهانی، ۱۳۸۲) و اکثر چرخندهای بارشی ایران بر روی دریای مدیترانه یا روی اقیانوس اطلس شکل می‌گیرند و بر روی دریای مدیترانه تقویت می‌شوند (احمدی گیوی و نصر اصفهانی، ۱۳۸۲؛ رضایی و همکاران، ۲۰۱۲؛ رومیم و سارونی، ۲۰۰۷؛ ساهین و همکاران، ۲۰۱۵). در زمینه نقش تغییرات دینامیکی امواج باد غربی بر روی ناوه مدیترانه، مطالعاتی با رویکردهای مختلفی انجام شده است که برای نمونه می‌توان به مطالعات: اثر گرمایش جهانی بر چرخندزایی مدیترانه (حیدری و خوش‌اخلاق، ۱۳۹۴)، نقش سامانه‌های بندالی در چرخندزایی شرق مدیترانه (حبیبی، ۱۳۸۶)، تغییرات زمانی و مکانی ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (علیجانی و ۲۰۰۲)، بررسی تغییرات مکانی ناوه مدیترانه (علیجانی و نظاماتی، ۱۳۹۳)، فراوانی ورود چرخندهای مدیترانه‌ای به ایران و اثر آنها بر بارش‌های فراگیر (عساکره و خجسته،

فرین نمود اصلی تحولات دینامیکی وردسپهر است که برای جوامع بشری به‌عنوان یک مخاطره جدی تلقی شده، خطر رخداد سیل را افزایش داده و زمان محدودی برای هشدار باقی می‌گذارند (اسدی و همکاران، ۱۴۰۰؛ ماسترانتوناس و همکاران، ۲۰۲۱). این بارش‌ها نقشی بنیادین در وقوع شرایط خاص و بحرانی ایفا می‌کنند (سلیمانی‌زاده و مرادی، ۱۳۹۹). تقویت امواج غربی در دوره سرد سال در قالب کم‌فشار دینامیکی و حرکت چرخندی آن در شرق مدیترانه منجر به بارش سنگین ایران زمین می‌شود. به عبارتی دیگر تغییرات زمانی و مکانی امواج بادهای غربی در مقیاس همدیدی نقش مهمی در بی‌هنجاری‌های بارش و به تبع آن رخداد بارش‌های فوق‌سنگین مناطق واقع در عرض‌های میانی دارد (هچمان و همکاران، ۲۰۱۹). امواج جوی عرض‌های میانی با جریان جتی تراز بالا ارتباط دارد و هنگامی که انحرافی در جریان جتی به وجود می‌آید، آنها جریان‌های مختلفی مانند کم‌فشار بریده، بن‌دال، چرخند و واچرخند را تشکیل می‌دهند. توسعه چرخندهای عرض‌های میانی (بیل و بوسرت، ۱۹۸۹؛ لی و همکاران، ۲۰۱۶؛ دینگک و لی، ۲۰۱۷) و رخداد سیلاب‌های شدید (ایسر، ۲۰۲۰) با تغییرات مکانی امواج باد غربی مرتبط است. این تغییرات عامل مهمی در شناسایی رفتار سامانه‌های آب و هوایی است (چاسی و همکاران، ۲۰۱۳؛ رضیعی و همکاران، ۲۰۱۲) به‌طوری‌که پدیده‌های هواشناسی عرض‌های میانه مانند بن‌دال‌ها، پشته‌ها و ناوه‌ها منجر به تغییرات الگوهای بارشی می‌شوند. موقعیت ایران در عرض‌های میانی به‌گونه‌ای است که بارش‌های دوره سرد سال تحت تأثیر امواج منطقه مدیترانه رخ می‌دهد. ناوه‌های تراز فوقانی جو و حالت کژفشار حاکم در تراز پایین وردسپهر به واسطه پستی و بلندی‌های سواحل دریای مدیترانه ایجاد می‌شوند (حبیبی، ۱۳۸۶). این چرخندها در زمستان قوی‌تر بوده و چرخندزایی در ناحیه پشت به باد کوه‌های آلپ تشکیل می‌شود و در زمانی که حرکت ناوه توسط کوه‌ها مسدود می‌شود بر روی مدیترانه دچار تغییرات مکانی می‌شوند (تریگو و همکاران، ۲۰۰۲). یکی از پارامترهایی که در

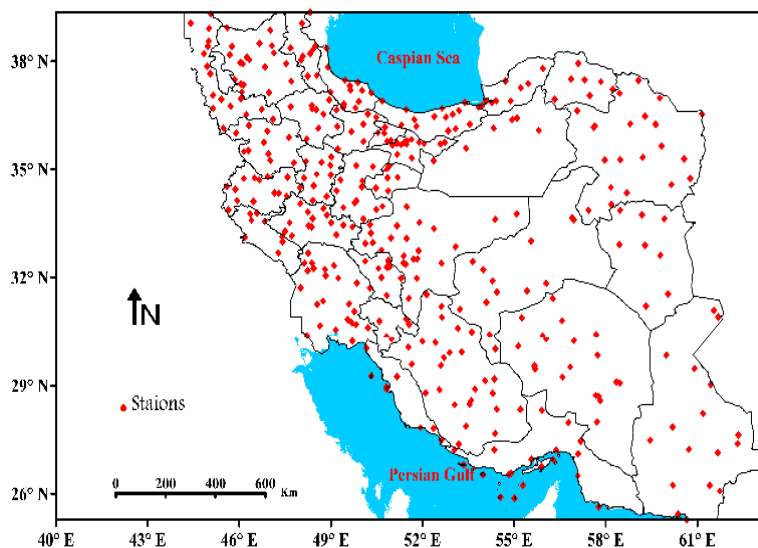
جوی عرض‌های میانی بر چیدمان امواج مؤثر بر بارش‌های فوق‌سنگین کشور را واکاوی کند. در این راستا با مقایسه تغییرات ت موج بر روی اطلس و مدیترانه سعی می‌شود گامی در جهت نقش تغییرات امواج باد غربی بر تکوین، موقعیت و تغییرات مکانی ناوه مدیترانه و بارش‌های فوق‌سنگین کشور باشد.

ساختار این پژوهش به این صورت است که بخش ۱ مقدمه، بخش ۲ داده‌ها و روش پژوهش، بخش ۳ به نتایج محاسبات مربوط به الگوی ت موج و تحلیل همبندی برای منطقه موردنظر اختصاص دارد و در بخش ۴ نتیجه‌گیری حاصل از این پژوهش ارائه شده است.

۲. روش پژوهش

برای انجام این مطالعه، از دو دسته داده شامل داده‌های بارش ایستگاهی و داده الگوهای جوی استفاده شده است. در ابتدا با استفاده از داده‌های بارش روزانه بارش‌های فوق‌سنگین و فراگیر بین سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۰ مرور شد سپس بارش‌های فوق‌سنگین بر اساس صدک ۹۹م برای ۳۵۰ ایستگاه همدید و بارانسنجی کشور محاسبه شد (شکل ۱). در این پژوهش روزهای با بی‌هنجاری مثبت بارش (بارش بیشتر از آستانه ۰/۱) که میانگین بارش آن از ۹۹ درصد بارش‌های ثبت شده بیشتر بود، انتخاب شدند. بارش فراگیر بارشی در نظر گرفته شد که حداقل در ۴۰ درصد از ایستگاه‌ها منطقه مورد مطالعه رخ داده باشد. به عبارتی ملاک انتخاب بارش‌های فراگیر ۴۰ درصد از ایستگاه‌های مطالعه شده بود که بارش بیشتر از ۰/۱ میلی‌متر را ثبت کرده باشند. در این راستا ۱۵۰ روز توأم با بارش فراگیر و فوق‌سنگین برای ماه‌های سرد سال (از ژانویه تا مارس و اکتبر تا دسامبر) شناسایی و جهت تحلیل انتخاب شد.

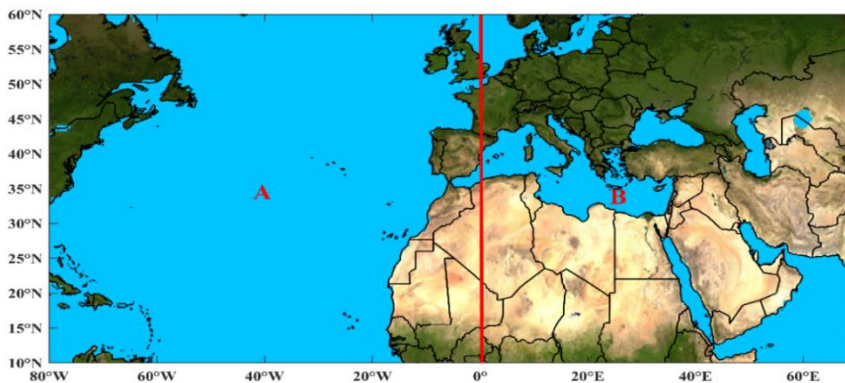
(۱۴۰۰)، مطالعه چرخندهای مدیترانه در دوره یک ساله و تأثیر آن بر آب و هوای خاورمیانه (احمدی گیوی و نصر اصفهانی، ۱۳۸۲)، بررسی رابطه تغییر تراز فشار وردایست با چرخندهای توأم با بارش‌های فراگیر ایران (عساکره و همکاران، ۱۴۰۱)، بررسی دینامیک مسیر توفان مدیترانه از دیدگاه شار فعالیت موج راسبی (اسعدی و همکاران، ۱۳۹۵) و تحلیل آماری-دینامیکی رابطه بین مسیر توفان مدیترانه و نوسان اطلس شمالی بر مبنای فرایافت فعالیت موج (رضائیان و همکاران، ۱۳۹۳) اشاره کرد. با وجود این مطالعات تاکنون سازوکار اصلی حاکم بر تکوین و تغییرات مکانی ناوه مدیترانه در مقیاس همبندی در زمان بارش‌های فرین کشور توجیه نشده است. در این رابطه مطالعات مختلفی پیرامون چرخندهای مدیترانه و بارش سنگین کشور انجام شده است، اما تغییرات امواج جوی خارج از منطقه مدیترانه که بر سامانه‌های مؤثر بر بارش ایران تأثیر می‌گذارد، به صورت جامع مطالعه نشده است. شواهد متعددی از تأثیر گردش‌های جوی واقع بر روی اقیانوس اطلس بر چرخندایی و مسیر چرخند مدیترانه وجود دارد (رادول و همکاران، ۱۹۹۹؛ هارال، ۱۹۹۵؛ حبیبی، ۱۳۸۶؛ رضائیان و همکاران، ۱۳۹۳؛ راویروین و فلاپونس، ۲۰۱۷؛ ملاشریفی و همکاران، ۱۳۹۷). همان‌طور که ملاحظه شد بیشتر مطالعات پیشین نقش الگوهای گردش بر رخداد بارش سنگین را به صورت موردی مطالعه کردند. از همه مهم‌تر تاکنون اثر امواج جوی اطلس شمالی بر موقعیت امواج جوی مؤثر بر بارش ایران به صورت جامع مطالعه نشده است. پژوهش حاضر با هدف مطالعه نقش تغییرات گردش‌های جوی عرض‌های میانی بر موقعیت ناوه مدیترانه که بر بارش‌های سنگین ایران نقش آفرینی می‌کند، می‌کوشد نقش الگوی گردش



شکل ۱. پراکنش مکانی ایستگاه‌های سینوپتیک و بارنسجی جهت تحلیل بارش‌های فوق‌سنگین.

ابتدا توسط (کوتکس و همکاران، ۲۰۱۶؛ مارتین و همکاران، ۲۰۱۶) برای بررسی شناسایی امواج جوی وردسپهر و اثر گرمایش سریع شمالگان و تغییر گردش‌های جوی از وردایی دمای ایران توسط حجتی و مسعودیان (۱۴۰۰) استفاده شد. الگوی موج تغییرات طول پربند ارتفاع ژئوپتانسیل در حالت موجی را نشان می‌دهد. موج تحت عنوان نسبت طول منحنی یکی از هم ارتفاع‌های تراز میانی جو به فاصله معادل عرض جغرافیایی آن تعریف می‌شود (حجتی و مسعودیان، ۱۴۰۰؛ کوتکس و همکاران، ۲۰۱۶). در این پژوهش جهت شناسایی تغییرات موج بر روی اطلس و مدیترانه بر اساس پربند مشخص در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، محدوده در نظر گرفته شده به دو قطاع تقسیم شد. در این راستا مقدار موج در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای دو محدوده اقیانوس اطلس شمالی از ۰ تا ۸۰ درجه طول غربی و ۱۰ تا ۶۰ درجه عرض شمالی و محدوده مدیترانه نیز از ۰ تا ۷۰ درجه طول شرقی و ۱۰ تا ۶۰ درجه عرض شمالی محاسبه شد (شکل ۲). هدف از این کار آن بود که مقادیر موج برای دو محدوده اطلس و مدیترانه همزمان با بارش‌های فوق‌سنگین کشور تحلیل شود.

دومین دسته از داده‌های مورد استفاده شامل داده‌های ارتفاع ژئوپتانسیل (بر حسب gpm)، مؤلفه نصف‌النهاری باد، جریان جتی (بر حسب m/s)، دما (بر حسب °C)، رطوبت ویژه (بر حسب gr/kg) تاوایی پتانسیل (بر حسب $10^{-6} \text{ ms}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$) و تاوایی نسبی (بر حسب 10^{-5} s^{-1}) با تفکیک مکانی 0.25×0.25 درجه در راستای مداری و نصف‌النهاری است که از پایگاه مرکز اروپایی پیش‌بینی میان مدت وضع هوا (ECMWF-Era5) برداشت شد. در مطالعات مختلفی از داده‌های شبکه‌ای پایگاه ECMWF نسخه‌ی Era5 برای شناسایی امواج جوی (برکویچ و راوه روبین، ۲۰۲۲؛ نی و همکاران، ۲۰۲۳) و چرخندزایی مدیترانه (آراگانو و پورکو، ۲۰۲۲؛ کوستیاس و همکاران، ۲۰۲۳) و بارش‌های فرین (ماسترانیوس و همکاران، ۲۰۲۰؛ آنتوخینا و همکاران، ۲۰۲۳) استفاده شده است. در این پژوهش ابتدا بارش‌های فوق‌سنگین با استفاده از صدک ۱۹۹ام شناسایی شد سپس روند آن با استفاده از آزمون ناپارامتریک من‌کنندال تحلیل شد. در این راستا ۶ بارش فوق‌سنگین به‌عنوان نماینده بارش‌های بیشتر از آستانه ۱۹۹ام جهت تحلیل گردشی مؤثر بر رخداد آن انتخاب شدند. سپس با استفاده از روش موج (sinuosity) تغییرات امواج بر روی منطقه مورد مطالعه واکاوی شد. این روش



شکل ۲. منطقه مورد مطالعه برای محاسبه موج وردسپهر قطاع اول: ۰ تا ۸۰- درجه طول غربی و ۱۰ تا ۶۰ درجه عرض شمالی (A)، قطاع دوم: ۰ تا ۷۰ درجه طول شرقی و ۱۰ تا ۶۰ درجه عرض شمالی (B).

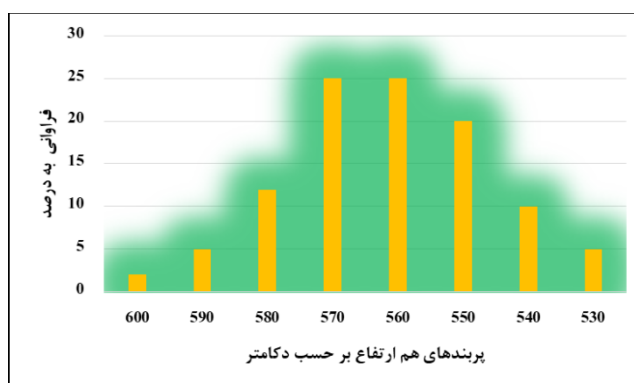
ابعاد مشخص مدیترانه مشخص شد. محاسبه شاخص موج با ترسیم پربندهای انتخاب شده (شکل ۲) امکان شناسایی ناوه مدیترانه و اطلس را میسر می‌سازد. بر این اساس افزایش (کاهش) موج در پربندهای تراز میانی جو به دلیل عمیق تر شدن ناوه است و بر عکس. برای تعیین محل دقیق ناوه پایین‌ترین نقطه از منحنی‌های تراز میانی به صورت یک نقطه به هم وصل شد (علیچانی و نظامی، ۱۳۹۳). در بررسی جابه‌جایی ناوه مدیترانه در راستای عرض جغرافیایی، تغییرات مکانی پربند ۵۷۵ ژئوپتانسیل دکامتر (معرف بیرونی‌ترین پربند) استفاده شد، به طوری که با اتصال پایین‌ترین نقطه در پربندهای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال موقعیت ناوه تراز میانی برای محدوده مورد نظر در راستای طول و عرض جغرافیایی مشخص شد. در نهایت برای تحلیل گردش بزرگ مقیاس جو همزمان با بارش‌های فوق‌سنگین مقادیر تاوایی پتانسیلی ترازهای ۳۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال، میدان‌های نم و ویژه و باد در ترازهای ۷۰۰، ۸۵۰ و ۹۲۵ هکتوپاسکال تحلیل شد.

برای محاسبه موج تجمیعی نخست منحنی‌های هم‌ارتفاع (بر حسب دکامتر) برای روزهای توأم با بارش سنگین در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال انتخاب شد (شکل ۳).

برای کاهش حجم محاسبات تنها پربندهای که فراوانی بیشتری داشتند، انتخاب شدند (۵۵۰، ۵۶۰ و ۵۷۰ دکامتر) موج تجمیعی (مارتین و همکاران، ۲۰۱۶؛ حجتی و مسعودیان، ۱۴۰۰؛ کوتکس و همکاران، ۲۰۱۶) بر اساس رابطه ۱ به دست آمد:

$$Asin = \frac{L_{iso1} + L_{iso2} + L_{iso3}}{EL_{\phi1} + EL_{\phi2} + EL_{\phi3}} \quad (1)$$

که L طول منحنی هم‌ارتفاع مورد نظر و EL طول معادل عرض جغرافیایی آن است. منظور از طول کوتاه‌ترین فاصله ممکن میان نقطه آغاز و پایان حلقه مداری است. با توجه به نقش مهم ناوه مدیترانه بر بارش‌های ایران زمین در دوره سرد سال جابه‌جایی مکانی محور ناوه مدیترانه بر اساس پایین‌ترین پربند تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (ورنیل و شوینز، ۲۰۰۶) و مقادیر بیشینه تاوایی نسبی (فلاوینس و همکاران، ۲۰۱۵؛ راویروبن و فلاوینس، ۲۰۱۷) در یک



شکل ۳. پربندهای تراز میانی جو درون مرزهای ایران در زمان بارش‌های فرین بر اساس صدک ۱۹۹م.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. تحلیل بارش‌های فوق‌سنگین

که توزیع زمانی و مقدار بارش فوق‌سنگین طی دوره مورد مطالعه یکسان نبوده و این بارش‌ها طی بازه زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۰ بسیار متغیر بوده است. بیشینه میانگین بارش‌ها به‌عنوان بارش فوق‌سنگین طی دوره فوق با نرخ ۰/۰۷۶ میلی‌متر به‌ازای هر سال افزایش یافته است. بر اساس شکل ۵-الف بیشینه بارش فوق‌سنگین (طی یک روز) نیز طی دوره مورد مطالعه با نرخ ۱/۴۷ میلی‌متر در سال افزایش یافته است. ملاحظه می‌شود که طی دوره ۱۹۸۴ تا ۱۹۹۲ و ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ میانگین و نرخ بارش سنگین نسبت به کل دوره بیشتر بوده است. در حالی که طی دوره‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۱ مقدار بارش و میانگین بارش فوق‌سنگین کمینه بوده است. به‌طور کلی بارش‌های فوق‌سنگین به‌طور میانگین بارشی معادل ۱۵ میلی‌متر در سطح کشور ایجاد می‌کند. نکته قابل توجه افزایش میانگین و نرخ بارش فوق‌سنگین با وجود کاهش بارش سالانه طی دهه اخیر است (جهانبخش اصل و همکاران، ۱۳۹۹). این شرایط بیانگر کاهش بارش کل و افزایش سهم بارش‌های فوق‌سنگین از بارش سالانه است که احتمال رخداد سیل و خسارات جانی و مالی را افزایش می‌دهد.

۳-۲. توزیع مکانی بارش‌های فوق‌سنگین

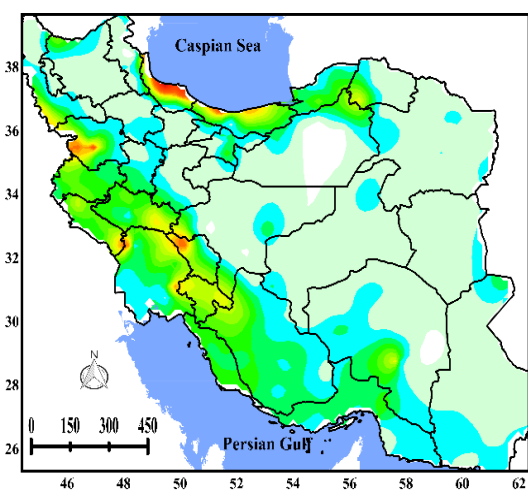
پراکنش مکانی بارش تجمعی روزهای همراه با بارش فوق‌سنگین و فراگیر برای ۱ فوریه ۱۹۹۴ (شکل ۶-الف)، ۱۳ مارس ۱۹۹۶ (شکل ۶-ب)، ۲ فوریه ۲۰۱۲ (شکل ۶-پ)، ۲۵ مارس ۲۰۱۵ (شکل ۶-ت)، ۲ دسامبر ۲۰۱۶ (شکل ۶-ث) و ۲۵ مارس ۲۰۱۹ (شکل ۶-ج) در شکل ۶ ارائه شده است. در نمونه‌های مذکور حداقل ۵۰ درصد از ایستگاه‌های کشور بارش و ۳۰ درصد از گستره کشور بارش فوق‌سنگین را تجربه کرده‌اند. بالاترین درصد مساحت زیر پوشش بارش نیز به‌ترتیب در ۱۳ مارس ۱۹۹۶ و ۲۵ مارس ۲۰۱۹ بوده است که بیش از ۶۰ درصد کشور را در بر گرفته است. میانگین بارش دریافتی برای ۱ فوریه ۱۹۹۴، ۱۳ مارس ۱۹۹۶، ۲ فوریه ۲۰۱۲، ۲۵ مارس ۲۰۱۵،

میانگین بارش و فراوانی روزهای همراه با بارش فوق‌سنگین برای ۱۵۰ روز منتخب در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود بیشتر بارش‌های فوق‌سنگین در نیمه غربی، رشته‌کوه‌های زاگرس و شمال غرب و سواحل دریای خزر رخ داده است. رخداد بارش بیش از ۳۰ میلی‌متر نیز در نیمه غربی، شمال غرب و سواحل غربی دریای خزر بیشتر از مناطق دیگر است (شکل ۴-الف). از لحاظ مکانی بخش‌های از زاگرس مرکزی، جنوب غرب، بخش‌های غربی و سواحل جنوبی دریای خزر از جمله مناطقی هستند که بارش بیشتر از ۵۰ میلی‌متر را طی یک روز تجربه کردند. دلیل این امر عبور سامانه‌های کم‌فشار از روی منطقه و فراهم‌بودن شرایط صعود به‌دلیل رشته‌کوه‌های متراکم زاگرس و البرز در منطقه است. همچنین در مناطق شمالی کشور به‌دلیل انتقال رطوبت دریای خزر و فراهم‌بودن شرایط همرفت مقدار بارش نسبت به مناطق دیگر بیشینه است. بنابراین در زمان حاکمیت شرایط ناپایداری در جو برای رخداد بارش سنگین، مناطق غربی کشور به‌صورت یکپارچه بارش سنگین را تجربه می‌کنند. در صورتی که در سایر مناطق کشور مقدار بارش بین ۱ تا ۲۵ میلی‌متر متغیر است (شکل ۴-الف). پراکنش روزهای توأم با بارش فرین نیز بیانگر آن است که پراکنش مکانی روزهای با بارش سنگین در گستره کشور یکسان نیست؛ به‌طوری‌که فراوانی روزهای همراه با بارش سنگین در بخش‌های شمالی و غربی کشور بیشینه است. دلیل این امر عبور امواج باد غربی و چرخندهای مدیترانه و فراهم‌بودن شرایط صعود هوا ناشی از کوهساری زاگرس و البرز می‌باشد. در حالی که فراوانی بارش سنگین در بخش‌های مرکزی و جنوب شرقی کشور کمینه است (شکل ۴-ب).

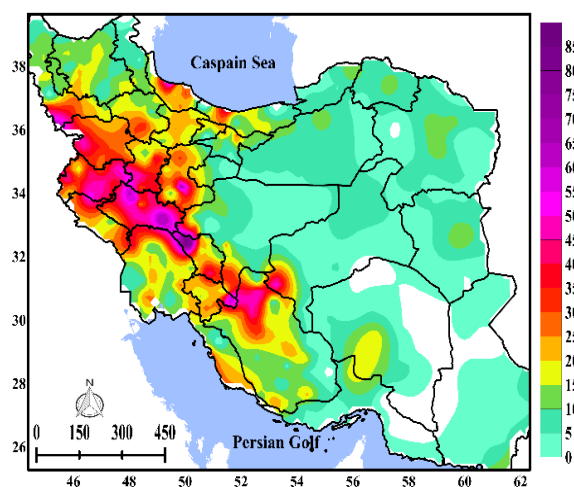
سری زمانی و روند تغییرات میانگین بارش‌های فوق‌سنگین و بیشینه بارش ثبت‌شده بر اساس سطح اطمینان ۹۵ درصد در شکل ۵ آورده شده است. ملاحظه می‌شود

متر رخ داده است (شکل ۶-الف). در ۱۳ مارس ۱۹۹۶ در مناطق غربی و بخش‌های گسترده‌ای از شمال شرق کشور بارش تجمعی ۵۰ میلی‌متر یا بیشتر ثبت شد و این شرایط برای ۲ فوریه ۲۰۱۲ نیز مشابه بود (شکل ۶-ب). در نمونه‌های مطالعه‌شده سنگین‌ترین بارش طی مارس ۲۰۱۹ روی داد، طوری که بارش تجمعی ۱۰۰ میلی‌متر و بیشتر بر روی زاگرس مرکزی و ۵۰ میلی‌متر در سراسر نیمه غربی ریزش کرد و بیش از ۷۰ درصد کشور شاهد بارندگی بود (شکل ۶-ج).

۲ دسامبر ۲۰۱۶ و ۲۵ مارس ۲۰۱۹ به ترتیب ۱۵، ۱۸، ۲۰، ۱۴، ۱۵ و ۳۰ میلی‌متر است. هدف از انتخاب این نمونه‌ها نشان دادن توزیع گستره بارش فوق‌سنگین در سطح و در منطقه خاص است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در نمونه‌های انتخاب شده اغلب بارش‌های فوق‌سنگین و بیشتر از ۱۰۰ میلی‌متر در نیمه غربی کشور بیشتر از مناطق دیگر رخ نمود داشته است. بیشینه بارش تجمعی طی ۱ فوریه ۱۹۹۴ بر روی نیمه غربی و شمالی کشور بوده است؛ به طوری که در غالب مناطق مذکور بارش بیشتر از ۲۰ میلی

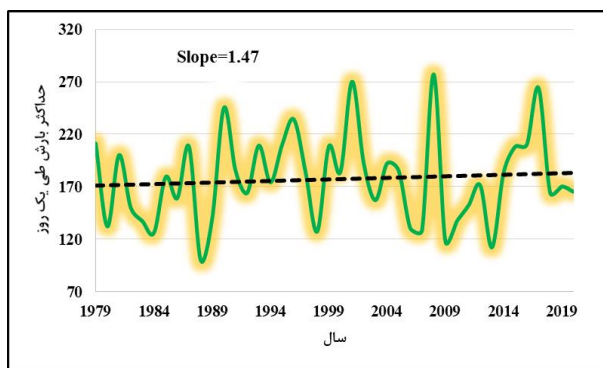


(ب)

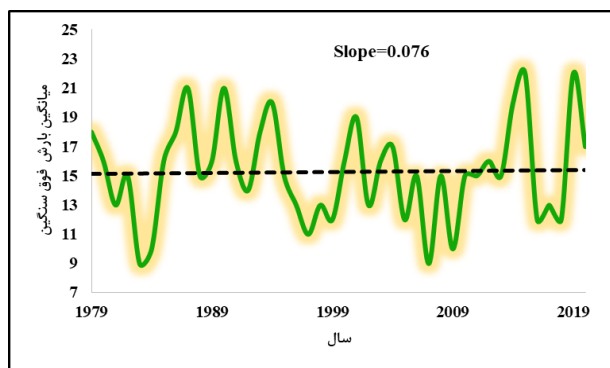


(الف)

شکل ۴. پراکنش مکانی میانگین بارش (الف) و فراوانی روزهای بارش فوق‌سنگین بر اساس صدک ۹۹ام (ب) برای ۱۵۰ روز توأم با بارش فوق‌سنگین.

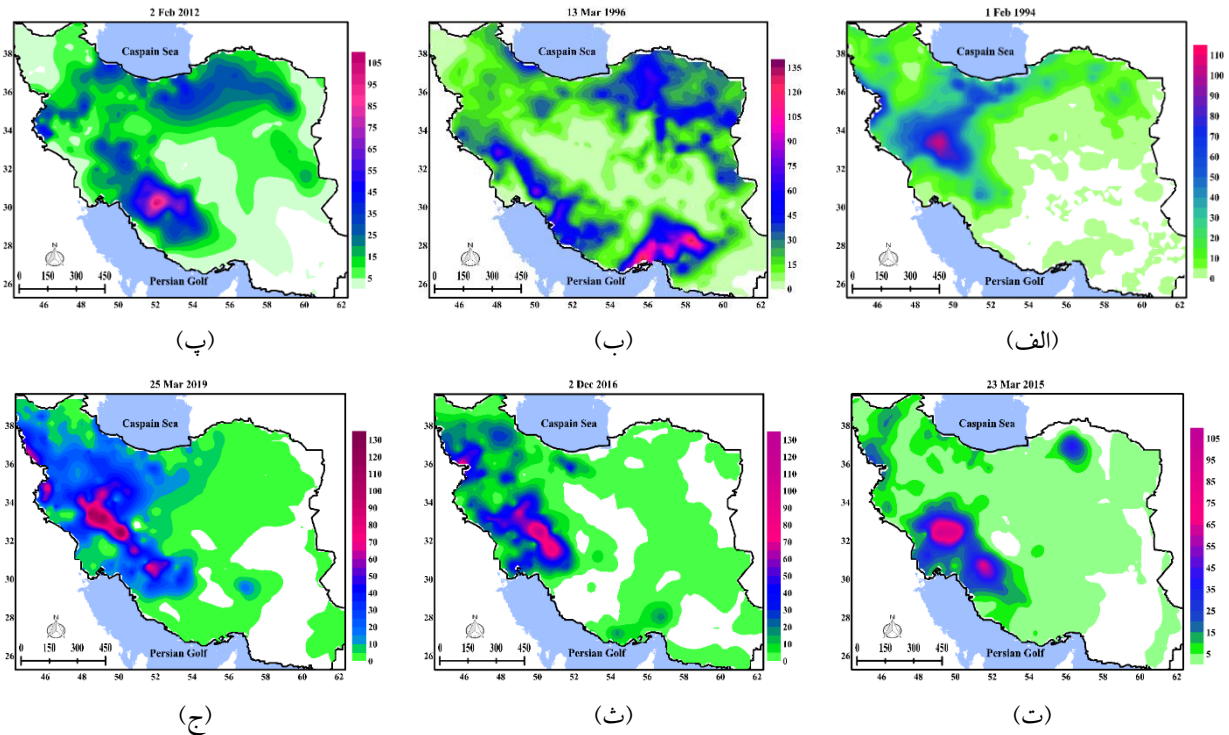


(ب)



(الف)

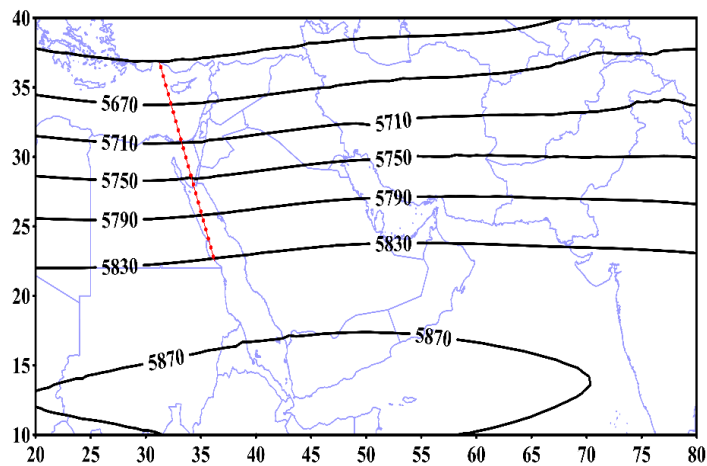
شکل ۵. سری زمانی میانگین و روند تغییرات بارش‌های فوق‌سنگین (الف) و بیشینه بارش ثبت شده طی یک روز (ب) طی بازه زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۰.



شکل ۶. بارش تجمعی برای ۱ فوریه ۱۹۹۴ (الف)، ۱۳ مارس ۱۹۹۶ (ب)، ۲ فوریه ۲۰۱۲ (پ)، ۲۳ مارس ۲۰۱۵ (ت)، ۲ دسامبر ۲۰۱۶ (ث) و ۲۵ مارس ۲۰۱۹ (ج) به‌عنوان نمونه‌های منتخب از بارش‌های فوق‌سنگین بر اساس صدک ۹۹ام.

ارتفاع زیاد جنب حاره دچار تغییرات طولی و عرضی زیادی می‌شود. در دوره سرد سال محور ناوه مدیترانه بین نصف‌النهار ۲۰ تا ۳۵ درجه طول شرقی قرار می‌گیرد و بخش جنوبی ناوه مدیترانه نیز بین عرض ۲۵ تا ۳۵ درجه جغرافیایی قرار می‌گیرد (شکل ۷). تقویت دینامیکی ناوه توسعه ناپایداری منجر به بارش می‌شود و دوره بارندگی در ایران و تغییرات زمانی و مکانی آن تحت تأثیر بسیار زیاد موقعیت چرخندهای مدیترانه است (علیچانی و نظاماتی، ۱۳۹۳).

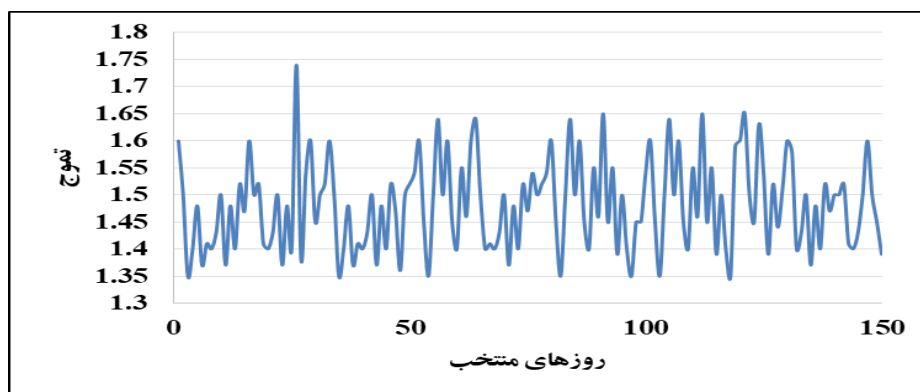
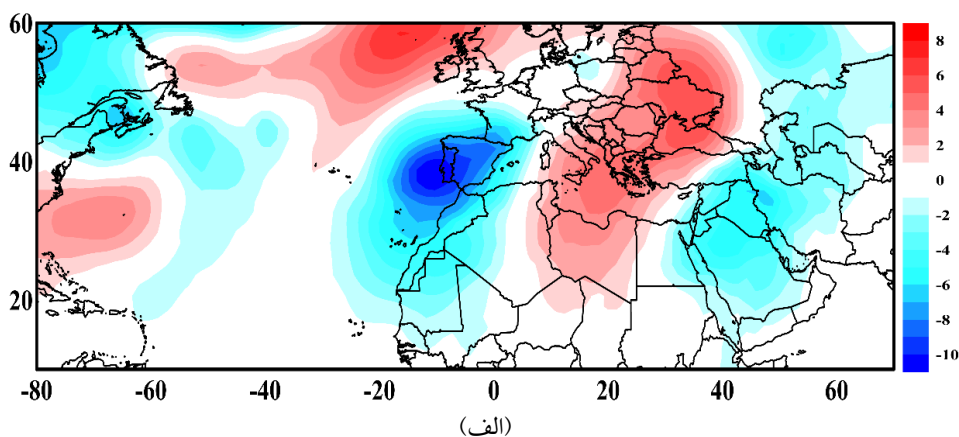
۳-۳. موقعیت ناوه مدیترانه در دوره سرد سال الگوی گردشی بر روی منطقه مدیترانه مهم‌ترین الگوی جوی مؤثر بر اقلیم ایران در دوره سرد سال است. همان‌طور که شکل ۷ نشان می‌دهد در دوره سرد سال ناوه مدیترانه در طول جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه طول شرقی شکل می‌گیرد. در ترازهای بالا عامل دینامیکی مؤثر بر تکوین و گسترش آن تقویت نصف‌النهاری و گسترش جریان‌ها از سمت اطللس شمالی است. ناوه مدیترانه تحت تأثیر تغییرات الگوی فشار جوی از جمله الگوی



شکل ۷. موقعیت ناوه مدیترانه در طول دوره سرد سال طی بازه ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۰.

سبب ریزش هوای سرد شمال اروپا به سمت مدیترانه می‌شود. این شرایط با کاهش ارتفاع تراز میانی جو، تشدید گردادیان و تقویت ناوه در شرق مدیترانه همراه شده است. در زمان بارش‌های سنگین و فراگیر کشور، ارتفاع ژئوپتانسیل بر روی منطقه مورد مطالعه کاهش ۶ تا ۸ ژئوپتانسیل متری را نسبت به میانگین تجربه می‌کند. در الگوی تراز بالا کاهش ارتفاع روی شرق اطلس و شرق مدیترانه و افزایش ارتفاع روی اروپا و تقویت الگوی ارتفاع زیاد مشاهده می‌شود. همچنین مقادیر موج برای روزهای با بارش فوق‌سنگین نشان می‌دهد که در بیشتر نمونه‌ها مقدار موج بیشتر از ۱/۴ بوده است که خود دلیل بر افزایش موج غربی و حاکمیت ناپایداری در منطقه است.

۳-۴. بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در زمان بارش‌های فرین
بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در شکل ۸-الف و مقادیر موج (ب) برای روزهای توأم با بارش سنگین کشور ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بی‌هنجاری‌های مثبت و منفی ارتفاع ژئوپتانسیلی ناشی از حضور پشته و ناوه در شرق اطلس و اروپا است که سبب تشدید شیو فشار بر روی مدیترانه شده است. افزایش ارتفاع به دلیل استقرار سامانه ارتفاع زیاد بر روی اروپا در بازه زمانی بارش‌های فوق‌سنگین همزمانی کاملی با کاهش ارتفاع در نیمه شرقی اطلس و مناطق واقع در شرق مدیترانه دارد. در این زمان تقویت شاخص نصف‌النهاری



(ب)

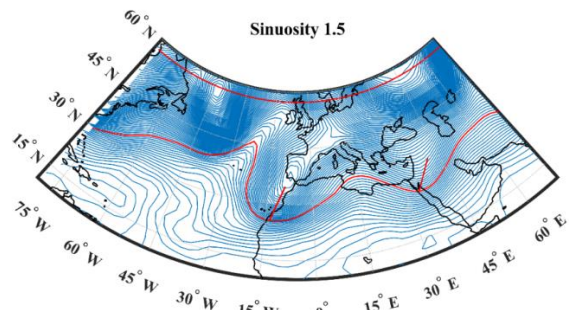
شکل ۸. بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (بر حسب gpm) پایگاه داده ECMWF-ERA5 با تفکیک مکانی ۰/۲۵×۰/۲۵ درجه و مقادیر موج برای روزهای همراه با بارش‌های فوق‌سنگین کشور.

۳-۶. تموج در زمان بارش‌های فوق‌سنگین

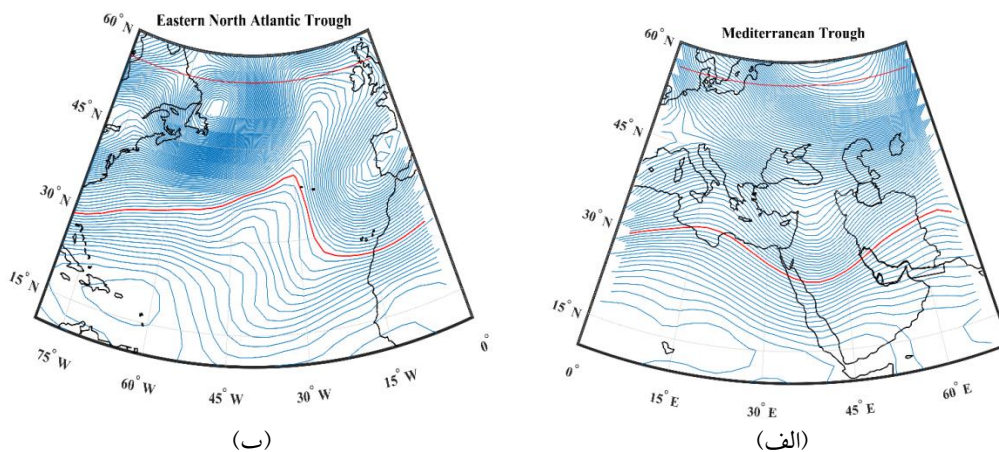
همان‌طور که در بخش قبلی نیز بیان شد، در زمان بارش‌های فوق‌سنگین ایران زمین همزمانی کاملاً مشخصی بین شکل‌گیری و توسعه ناوه برروی اطلس، پشته برروی غرب مدیترانه و تکوین ناوه شرق مدیترانه (برای روزهای منتخب) وجود دارد به‌طوری‌که تشدید شیو بین پشته و ناوه برروی اروپا بر موقعیت مکانی ناوه مدیترانه قابل مشاهده است. افزایش دامنه امواج عامل مؤثر بر جابه‌جایی ناوه مذکور بوده و حد جنوبی آن توسط پشته شمال آفریقا و پشته دریای عمان و عرب محدود شده است. با جابه‌جایی طولی و عرضی هر کدام از این سامانه‌ها، امواج همدیدی برروی مدیترانه تغییرات طولی و عرضی را تجربه می‌کند. افزایش دامنه امواج و تشدید نصف‌النهاری شدن جریانات شرایط برای شکل‌گیری بندال را فراهم کرده است. در این زمان با شکل‌گیری ناوه برروی شرق اطلس مقادیر تاوایی مثبت جریانات تراز فوقانی افزایش یافته است و در بازوی شرقی ناوه اطلس به‌دلیل کاهش تاوایی مثبت (تاوایی منفی) پشته برروی شمال آفریقا و غرب مدیترانه تکوین یافته است (شکل ۱۰-ب). تقویت پشته مذکور با افزایش جابه‌جایی شمال‌سوی ارتفاع زیاد جنب‌حاره همراه می‌شود که این شرایط بر موجی شدن امواج باد غربی و انتقال جریانات سرد از روی اروپا به سمت مدیترانه و افزایش شیو برروی مدیترانه نقش‌آفرینی می‌کند. مقادیر تموج برای پربند ژئوپتانسیل ۵۶۵ دکامتر نیز گویای این موضوع است، به‌گونه‌ای که افزایش تموج به‌دلیل موجی شدن امواج و تقویت ناوه برروی شرق مدیترانه و اطلس است. در این زمان با تقویت جریانات‌های نصف‌النهاری مقدار تموج به ۱/۶ رسیده است که بیانگر افزایش ناپایداری است به‌طوری‌که تشدید شیو فشار در راستای محور شرایط برای صعود و ناپایداری در منطقه مورد مطالعه را فراهم کرده است.

۳-۵. شناسایی محور ناوه برروی اطلس و مدیترانه

موقعیت مکانی ناوه برروی اطلس شمالی و شرق مدیترانه بر اساس پربندهای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در شکل ۹ ارائه شده است. در زمان بارش‌های فوق‌سنگین موجی شدن پربندهای تراز میانی و ایجاد ناوه و پشته در مسیر امواج تراز میانی سبب افزایش دامنه و عمق امواجی می‌شود که از اطلس به سمت مدیترانه گسترش می‌یابد. الگوی تموج در زمان بارش‌های فوق‌سنگین کشور بیانگر وجود دو ناوه قوی برروی شرق اطلس و شرق مدیترانه است که با افزایش فرارفت و ناپایداری همراه شده است. حد جنوبی ناوه‌ها در زمان بارش‌های سنگین کشور در عرض ۳۰ درجه شمالی و پایین‌تر قرار می‌گیرد. از لحاظ مکانی ناوه شرق اطلس و مدیترانه تا عرض ۳۰ درجه و در مواردی تا عرض ۲۰ درجه گسترش می‌یابد به‌طوری‌که در این زمان مقدار تموج نیز به ۱/۵ می‌رسد. این مقدار بیانگر تشدید شیو بین جریانات‌های نصف‌النهاری ناشی از تقویت کم‌ارتفاع و ارتفاع زیاد دینامیکی و افزایش عمق امواج برروی منطقه است. به‌طور کلی در زمان بارش‌های سنگین کشور محور ناوه اطلس شمالی بین عرض‌های ۳۰ تا ۴۰ درجه و محور ناوه مدیترانه برروی طول ۴۵ درجه شرقی و عرض‌های ۳۰ تا ۳۵ درجه شمالی استقرار می‌یابد. بنابراین می‌توان دریافت که هماهنگی کاملی بین شکل‌گیری امواج برروی اطلس و تکوین ناوه مدیترانه وجود دارد (شکل ۹).



شکل ۹. موقعیت مکانی ناوه برروی اطلس شمالی و مدیترانه، مقادیر تموج پربندهای معرف ناوه تراز میانی.



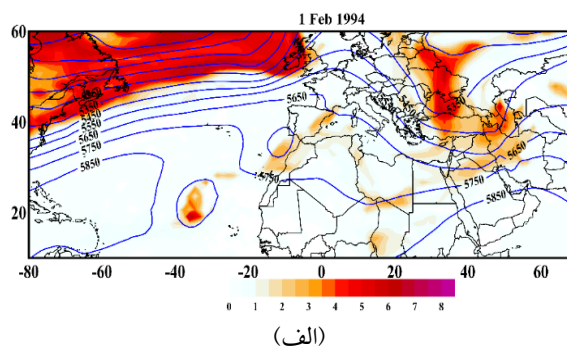
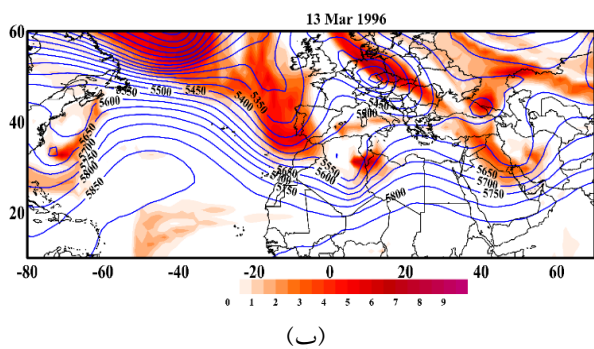
شکل ۱۰. الگوی موج و موقعیت مکانی ناوه مدیترانه و ناوه اطلس (خط قرمز ژئوپتانسیل ۵۶۵ دکامتر).

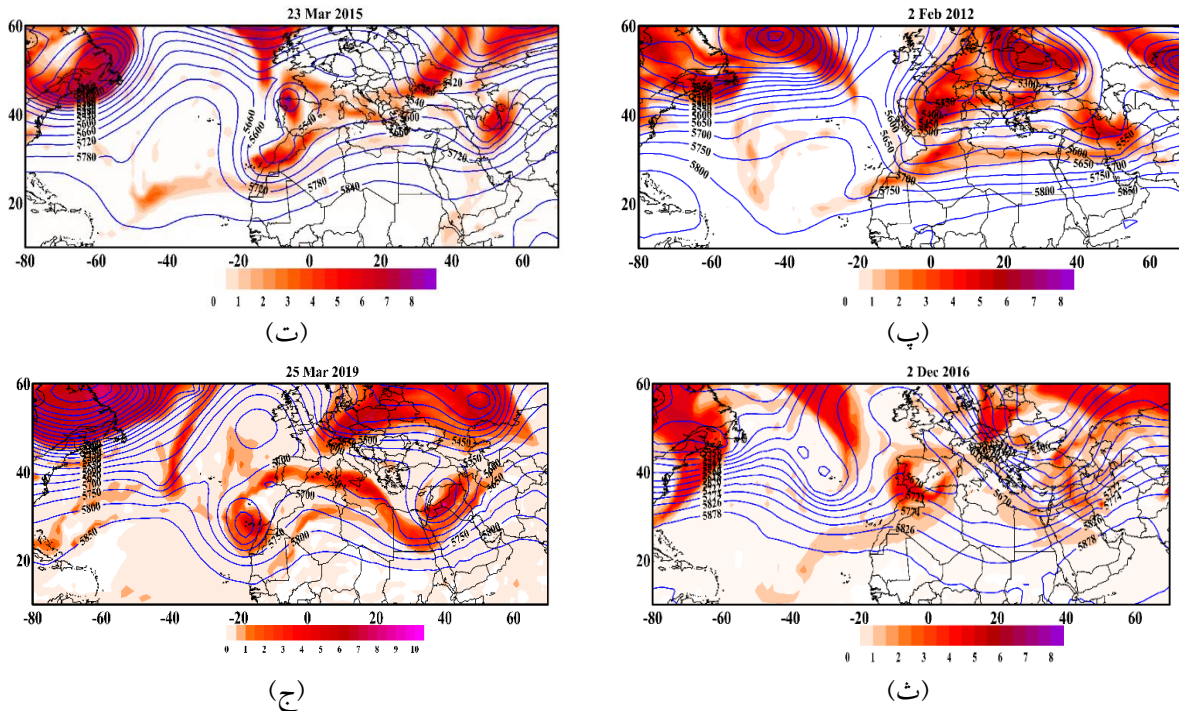
حسب $10^{-6} \text{ ms}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ در مرکز ناوه اطلس و ناوه مدیترانه دیده می‌شود. به‌طور مثال در ۱۳ مارس ۱۹۹۶ فرارفت شدید در راستای ناوه با فرارفت تاوایی پتانسیلی همراه شده است. در الگوی ۲۳ مارس ۲۰۱۵ و ۲ فوریه ۲۰۱۲ نیز با شکل‌گیری بندال بر روی اروپا و تکوین کم‌ارتفاع بریده بر روی دریای سرخ محور ناوه کم‌ارتفاع بر روی کشور قرار گرفته است. در ۲ دسامبر ۲۰۱۶ نیز با شکل‌گیری بندال بر روی شرق اطلس و اروپا و گسترش جریانات در راستای بخش شرقی بندال شرایط برای تکوین و توسعه ناوه مدیترانه فراهم شده است (شکل ۱۱-ث). در این زمان بیشینه فرارفت ناشی از دو شاخه شدن جریانات غربی بر روی اطلس شمالی و شکل‌گیری کم‌ارتفاع در شرق مدیترانه دیده می‌شود به‌طوری‌که با شکل‌گیری الگوی مذکور بخش زیادی از کشور ناپایداری را تجربه کرده است. با گسترش جریانات از سمت اروپا به بر روی مدیترانه، محور ناوه بر روی کشور قرار گرفته و بارش‌های سنگین کشور را منجر شده است.

۳-۷. تحلیل همبندی تاوایی پتانسیلی و ارتفاع

ژئوپتانسیلی

نمونه میدان‌های تاوایی پتانسیلی تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال و ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال مربوط به بارش‌های فوق‌سنگین در شکل ۱۱ ارائه شده است. در زمان بارش‌های فوق‌سنگین ناوه قوی با محور شمال شرقی-جنوب غربی ایران زمین را دربرگرفته است و غرب ناوه جریان با محور شمالی-جنوبی سبب تعمیق ناوه شرق مدیترانه شده است. همزمان با شکل‌گیری ناوه مذکور وجود بندال سبب تقویت پشته روی اروپا و ریزش هوای سرد در شرق آن و بر روی مدیترانه شده است. تقویت تاوایی در ارتباط با جریان شمالی و توسعه آن بر روی ناوه مدیترانه سبب تقویت جو برای رخداد بارش شدید شده است. می‌توان دید که هر چه پشته اروپایی به سمت عرض‌های بالاتر گسترش یابد ناوه مدیترانه نیز قوی‌تر می‌شود. در زمان بارش‌های فوق‌سنگین کشور بیشینه تاوایی پتانسیلی تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال (بر



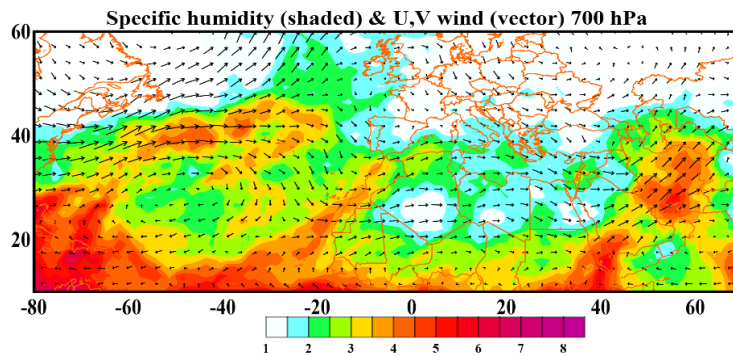


شکل ۱۱. میدان‌های ناوایی پتانسیلی تراز 300 hPa (نقشه رنگی) و ارتفاع ژئوپتانسیل 500 hPa (نقشه پریندها) هکتوپاسکال برای ۱ فوریه ۱۹۹۴ (الف)، ۱۳ مارس ۱۹۹۶ (ب)، ۲ فوریه ۲۰۱۲ (پ)، ۲۵ مارس ۲۰۱۵ (ت)، ۲ دسامبر ۲۰۱۶ (ث) و ۲۵ مارس ۲۰۱۹ (ج).

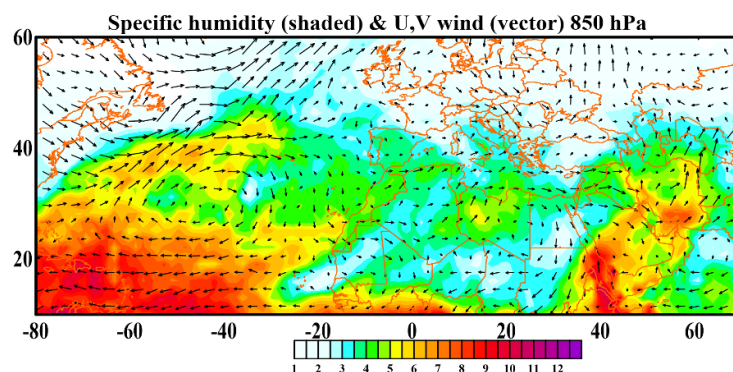
گردش و اچرخندی ارتفاع زیاد عربستان رطوبت از سمت شمال اقیانوس هند، دریای عرب، خلیج فارس همراه با رطوبت دریای سرخ به سمت کشور شارش پیدا کرده است. در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال حجم رطوبت قابل ملاحظه‌ای از سمت بازوی غربی ارتفاع زیاد عربستان با رطوبت دریای سرخ با جهت جنوب غربی-شمال شرقی شرایط لازم برای تشدید ناپایداری در نیمه غربی کشور را فراهم کرده است (شکل ۱۲-الف). در ترازهای زیرین جو نیز مقدار رطوبت زیادی از سمت دریاهای جنوب به سمت کشور گسیل شده است. بنابراین علاوه بر وجود شرایط ناپایدار به دلیل حاکمیت ناوه مدیترانه، تقویت رطوبت در تراز زیرین جو به تبعیت از حضور و اچرخند عربستان بر روی دریاهای جنوب شرایط مناسبی برای تشدید شیو فشار و رخداد بارش فوق‌سنگین فراهم گشته است (شکل ۱۲-پ).

۳-۸. میدان‌های نم ویژه و باد

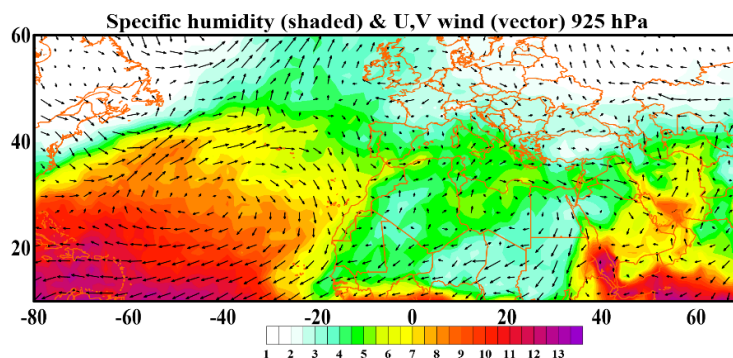
میانگین نم ویژه و باد در ترازهای ۷۰۰، ۸۵۰ و ۹۲۵ hPa در زمان بارش‌های فوق‌سنگین در شکل ۱۲ ارائه شده است. گردش بزرگ مقیاس جو تقویت و اچرخندی بر روی اطلس شمالی، ناوه عمیق در شرق دریای مدیترانه و گردش و اچرخندی در شمال اقیانوس هند و دریای عرب را نشان می‌دهد. همچنین ناوه قوی بر روی شرق اطلس و شرق مدیترانه دیده می‌شود. در این نقشه بخش زیادی از ایران به دلیل استقرار ناوه دینامیکی مدیترانه، شار رطوبت و حاکمیت جریان‌ات جنوب غربی، بارش شدید را تجربه می‌کنند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود رطوبت لازم برای رخداد بارش سنگین در این زمان به دلیل وجود و اچرخند عربستان و شرایط صعود در ترازهای پایین و میانی جو بر روی منطقه به بیشترین مقدار خود رسیده است به طوری که به دلیل



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۱۲. میانگین رطوبت ویژه و میدان باد برای نمونه‌های مطالعه شده از بارش فوق‌سنگین در ترازهای ۷۰۰ (الف)، ۸۵۰ (ب) و ۹۲۵ hPa (پ).

ناوه بر روی شرق اطلس و غرب آفریقا و هسته دوم ناهه بر روی مدیترانه تکوین می‌یابد. موقعیت مکانی ناهه در زمان بارش‌های سنگین منطبق بر شرق و جنوب مدیترانه و دریای سرخ است. همچنین در شکل ۱۳-ب، حد جنوبی ناهه اطلس بر روی عرض ۲۰ تا ۳۵ درجه شمالی و طول ۰ تا ۴۰ درجه غربی توسعه می‌یابد و در عرض ۲۰ تا ۴۰ درجه طول شرقی و عرض ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی ناهه مدیترانه تقویت می‌شود. عمیق شدن ناهه مدیترانه تحت تأثیر تغییرات مداری پشته‌های ارتفاع زیاد بر روی اروپا، نصف‌النهار گرینویچ و پشته عربستان است. به‌طور

۳-۹. موقعیت حد جنوبی امواج و موقعیت ناهه‌های

اطلس و مدیترانه

موقعیت مکانی حد جنوبی امواج جوی در زمان بارش‌های فرین کشور نشان دهنده گسترش ناهه‌های تراز بالا بر روی عرض جغرافیایی ۲۰ تا ۳۵ درجه شمالی است. حد جنوبی امواج باد غربی بین عرض ۲۰ تا ۳۰ درجه شمالی قرار دارد که بیانگر عمیق‌تر شدن ناهه دینامیکی و گسترش امواج به سمت عرض‌های پایین منطقه است (شکل ۱۳-الف). هماهنگی کاملی بین شکل‌گیری ناهه شرق اطلس و ناهه مدیترانه وجود دارد. در زمان بارش‌های فوق‌سنگین

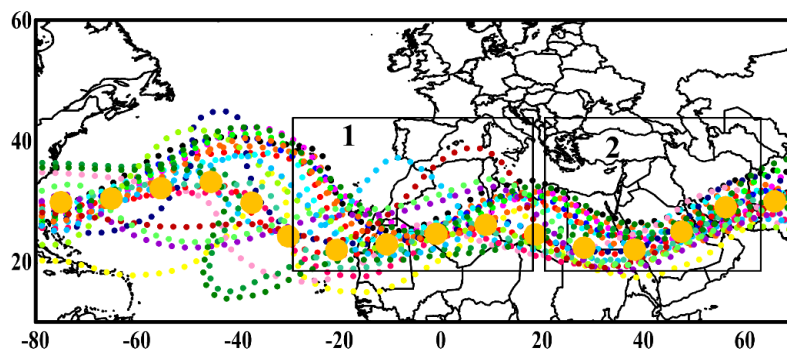
است. در زمان بارش‌های فوق‌سنگین کشور محور ناوه مدیترانه از عرض ۳۰ درجه به عرض ۲۰ درجه جغرافیایی جابه‌جا شده است. در راستای طول جغرافیایی نیز ناوه مدیترانه از محدوده ۲۵ تا ۳۵ درجه طول شرقی به محدوده طول ۳۵ تا ۴۰ درجه شرقی گسترش یافته است. به‌طور میانگین محور ناوه در زمان گسترش خود، تغییرات عرضی ۷ درجه و تغییرات طولی ۸ درجه را تجربه می‌کند. این شرایط سبب رخداد بارش بر روی کشور می‌شود. می‌توان دید که بیشینه مقدار تاوایی نسبی در مرکز ناوه تراز میانی جو است (زیو و همکاران، ۲۰۲۲) که بیانگر تقویت ناپایداری به واسطه چرخند قوی شرق مدیترانه است. مرکز چرخند در راستای ناوه تراز میانی با مقدار تاوایی نسبی ۶ تا ۱۴ واحد شرایط برای تشدید اغتشاشات جوی بر روی منطقه را فراهم کرده است. ایران زمین نیز در جلوی این ناوه و منطقه واگرایی آن قرار گرفته است (شکل ۱۴-الف). با توجه به گسترش پرنده‌های ۵۷۵۰، ۵۶۵۰ و ۵۵۵۰ ژئوپتانسیل متر به سمت عرض جغرافیایی ۳۰ درجه شمالی و عمیق‌تر شدن ناوه مدیترانه مقدار موج نیز افزایش به ۱/۷ رسیده است. به‌طور کلی در زمان بارش‌های فوق‌سنگین کشور محور ناوه اطلس در غرب مدیترانه، شمال غرب آفریقا و جنوب اروپا با بیشینه مقدار تاوایی مشاهده می‌شود. وجود پشته قوی اروپایی بین دو ناوه تراز میانی بر موقعیت مکانی ناوه مدیترانه اثر می‌گذارد، به‌طوری‌که گسترش شمال سوی پشته مذکور با عمیق‌تر شدن ناوه مدیترانه بر روی دریای سرخ و جابه‌جایی شرق-سوی آن همراه می‌شود. (شکل ۱۴-الف).

مشخص پشته عربستان بر میزان تعمیق‌شدگی ناوه مدیترانه و گسترش شرق‌سوی آن اثر بیشتری دارد (شکل ۱۳-الف). در زمان بارش‌های سنگین تقویت ارتفاع زیاد در غرب مدیترانه و جنوب اروپا مشاهده می‌شود، به‌گونه‌ای که تغییرات طولی و عرضی این ارتفاع زیاد منجر به تغییرات عرضی ناوه مدیترانه می‌شود. این شرایط نشان می‌دهد که الگوی گردش بزرگ مقیاس جو مؤثر بر رخداد بارش‌های فوق‌سنگین ایران تحت‌تأثیر امواج باد غربی بر روی اطلس و مدیترانه و موقعیت مراکز فشار زیاد جنب حاره‌ای است.

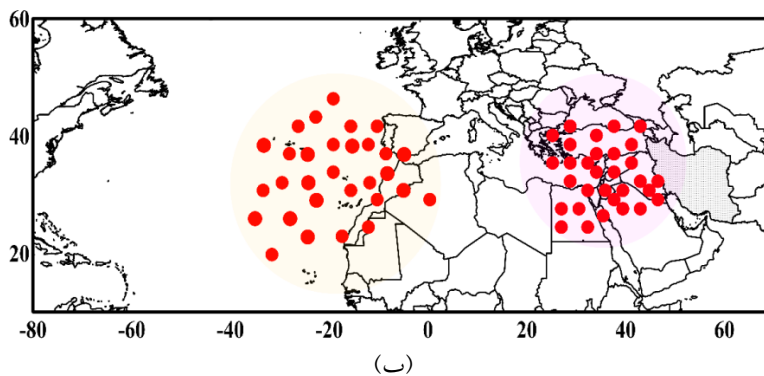
۱۰-۳. الگوی موج و موقعیت ناوه‌های مدیترانه و

اطلس

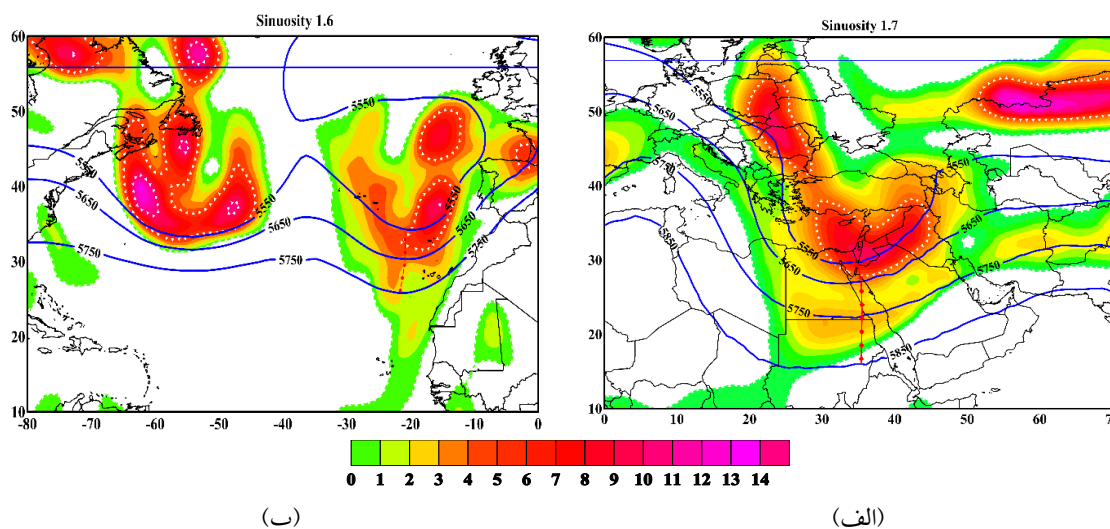
الگوی هم‌مدیدی غالب مؤثر بر بارش ایران عمیق‌تر شدن ناوه مدیترانه در تراز میانی جو است. همان‌طور که شکل ۱۴ نشان می‌دهد الگوی گردش تراز بالا نیز نشان دهنده دو شاخه شدن باد غربی، تکوین دو ناوه بر روی اطلس و شرق مدیترانه است. همچنین الگوی موج برای بارش‌های فوق‌سنگین نشان می‌دهد که تغییرات طولی و عرضی ناوه مدیترانه ناشی از تغییرات مکانی باد غربی بر روی اروپا و سلول‌های واچرخند جنب حاره بر روی شمال آفریقا و عربستان است. حضور پشته قوی بر روی جنوب اروپا سبب تزریق جریانات سرد شمالی بر روی مدیترانه شده است. هم‌زمان با این شرایط شاخه جنوبی باد غربی نیز سبب جابه‌جایی جنوب‌سو و ریزش جریانات سرد شمالی و جابه‌جایی عرضی ناوه به سمت عرض‌های پایین‌تر شده



(الف)



شکل ۱۳. حد جنوبی پربند ناوه‌های اطلس و مدیترانه در زمان بارش‌های فوق‌سنگین (الف) و موقعیت مرکز ناوه‌های اطلس و مدیترانه (ب).



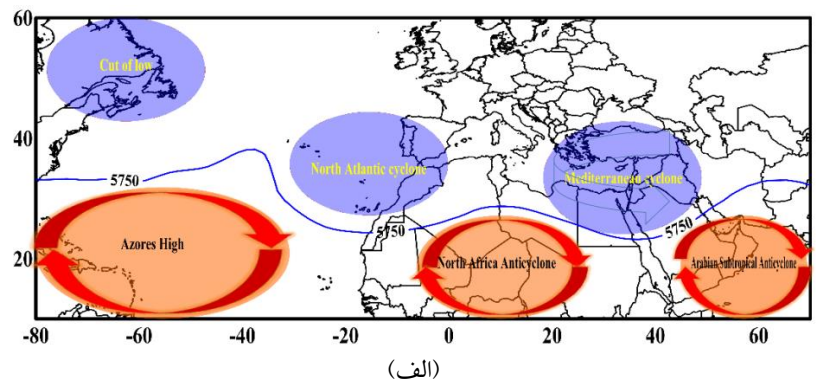
شکل ۱۴. مقادیر موج ناوه‌های اطلس و مدیترانه بر اساس پربندهای ۵۷۵۰، ۵۶۵۰ و ۵۵۵۰ ژئوپتانسیل متر و تاوایی نسبی ($10^{-5} s^{-1}$) برای دو قطاع در نظر گرفته شده، در زمان بارش‌های فوق‌سنگین کشور.

واچرخند عربستان و واچرخند شمال آفریقا بر موقعیت ناوه مدیترانه محسوس‌تر است. می‌توان دید که موقعیت واچرخند آفریقا بر تکوین و توسعه ناوه مدیترانه و موقعیت واچرخند عربستان در تعمیق و گسترش شرق سوی ناوه مذکور بسیار قابل توجه است. همچنین نقش بسیار مهم واچرخند عربستان در تأمین رطوبت برای بارش‌های شدید قابل مشاهده است به گونه‌ای که با جابه‌جایی شرقی سوی این واچرخند رطوبت قابل ملاحظه‌ای در بازوی غربی آن به سمت منطقه گسترش می‌یابد. در این شرایط استقرار سامانه مذکور بر روی دریای عرب و خلیج فارس سبب فرارفت رطوبت از روی این منابع گرم جنوبی شده که با رخداد شدیدترین بارش‌های کشور همزمان شده است (شکل ۱۵-ب).

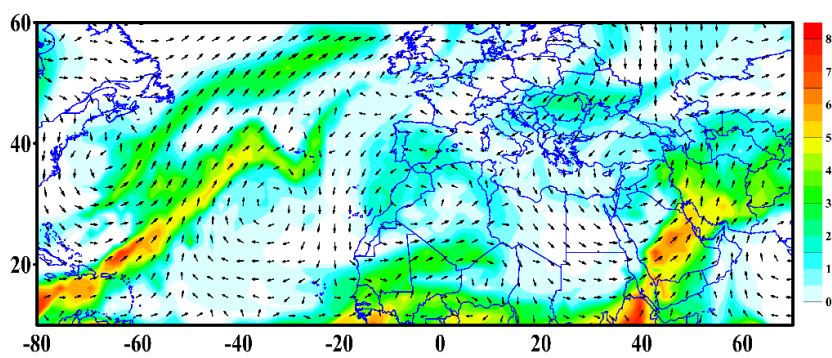
۱۱-۳. موقعیت ناوه و پشته‌های جنب حاره‌ای در زمان

بارش‌های فوق‌سنگین

با هدف نشان دادن نقش پشته‌های ارتفاع زیاد جنب‌حاره بر موقعیت مکانی ناوه مدیترانه (شکل ۱۵-الف) و شار رطوبت (شکل ۱۵-ب) در زمان شدیدترین بارش‌ها نقشه شماتیکی از موقعیت پشته‌های ارتفاع زیاد جنب حاره و ناوه‌ها و میدان‌های نم و ویژه و باد تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال در شکل ۱۵ ارائه شده است. بر اساس شکل ۱۵-الف در زمان بارش‌های فوق‌سنگین سامانه جنب‌حاره‌ای به صورت سه سلول قوی در عرض‌های پایین‌تر از ۳۰ درجه شمالی بر روی اطلس شمالی، آفریقا و عربستان (تا دریای عرب) مستقر می‌شود که بر موقعیت امواج جوی عرض‌های میانی تأثیر زیادی می‌گذارد. نقش



(الف)



(ب)

شکل ۱۵. (الف) موقعیت پشته ارتفاع زیاد جنب حاره و امواج کم ارتفاع تراز 500 hPa، (ب) میدان‌های رطوبت و باد تراز 700 hPa در زمان بارش‌های فوق‌سنگین.

۴. نتیجه‌گیری

جابه‌جایی شمال سوی پشته به سمت شمال غرب مدیترانه ناوهای کم عمق بر روی مدیترانه ظاهر می‌شود. تقویت و عمیق شدن ناوه مدیترانه تحت تأثیر تغییرات طولی و عرضی ارتفاع زیاد بر روی اروپا در بالادست و موقعیت مکانی ارتفاع زیاد جنب حاره در پایین دست جریان است. بنابراین الگوی گردش بزرگ مقیاس جو بر روی اطلس شمالی و اروپا با شکل‌گیری الگوی بلاکینگ بر امواج جوی مدیترانه اثر می‌گذارند. تحلیل همیدی نشان داد که تغییرات طولی و عرضی ناوه مدیترانه تحت تأثیر جابه‌جایی الگوهای بزرگ مقیاس از جمله پشته پرفشار اروپا است، به طوری که گسترش شمال سوی این ارتفاع زیاد اروپا تا عرض ۴۰ درجه و بالاتر علاوه بر تشدید شیو در شرق اطلس، زمینه را برای شکل‌گیری ناوه مدیترانه فراهم می‌کند (ملاشریفی و همکاران، ۱۳۹۷ و علیجانی، ۱۳۷۸). در زمان بارش‌های فوق‌سنگین محور ناوه مدیترانه از ۳۵ و ۲۵ درجه طول شرقی به سمت طول ۴۵ تا ۳۵ درجه شرقی گسترش می‌یابد. به طور میانگین محور ناوه

در این مطالعه نقش تغییرات گردش جوی عرض‌های میانی بر موقعیت ناوه مدیترانه که در رخدادهای سنگین‌ترین بارش‌های کشور مؤثر است، بررسی شد. برای این کار ۱۵۰ روز با بارش فوق‌سنگین و فراگیر انتخاب و سپس موقعیت ناوه مدیترانه، گردش بزرگ مقیاس جو با استفاده از شاخص تموج و تحلیل همیدی واکاوی شد. نتایج نشان داد که ناوه مدیترانه مهم‌ترین الگوی مؤثر بر رخداد بارش‌های فوق‌سنگین کشور تحت تأثیر تغییرات مکانی امواج جوی اطلس شمالی و اروپا قرار دارد. در زمان بارش‌های فوق‌سنگین مقدار تموج به دلیل تعمیق ناوه مدیترانه و تغییرات مکانی جریان‌های باد غربی بر روی اطلس افزایش می‌یابد. از لحاظ مکانی تغییرات طولی و عرضی ناوه مدیترانه تحت تأثیر گردش جو و افزایش دامنه و عمق امواج بر روی اطلس شمالی است. گسترش جریان از سمت اروپا بر روی مدیترانه، سبب تشدید شیو فشار بین ارتفاع زیاد اروپا و کم‌فشارهای تراز پایین شده که با

بارش‌ها در سال‌های آتی از طرف دیگر ضرورت انجام مطالعات بیشتر جهت درک بهتر از نقش تغییرات اقلیم بر رخداد بارش‌های فوق‌سنگین کشور را دو چندان کرده است.

تشکر و قدردانی

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوریان کشور (INSF) برگرفته شده و از طرح شماره ۴۰۰۵۶۲۳ انجام شده است. بدینوسیله از حمایت صورت گرفته قدردانی می‌شود.

مراجع

احمدی گیوی، ف. و نصر اصفهانی، م.ع. (۱۳۸۲). مطالعه چرخندهای مدیترانه در دوره یک ساله و تأثیر آن بر آب و هوای خاورمیانه، *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۲، ۶۶-۷۱.

اسدی رحیمی، ن.؛ زرین، آ.؛ مفیدی، ع. و داداشی رودباری، ع. (۱۴۰۰). تحلیل پراکنش فصلی بارش‌های فرین در ایران با استفاده از پایگاه AgERA5. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۲(۱۱)، ۲۷۲۳-۲۷۳۷.

اسعدی، ع.؛ احمدی گیوی، ف.؛ قادر، س. و محب‌الحجه، ع. (۱۳۹۵). بررسی دینامیک مسیر توفان مدیترانه از دیدگاه شار فعالیت موج راسبی. *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۵(۵)، ۴-۳۱.

حبیبی، ف. (۱۳۸۶). نقش سامانه‌های بندالی در چرخندزایی روی شرق مدیترانه و بررسی نقش آن در سیل روی منطقه غرب ایران در مارس ۲۰۰۰. *پژوهش‌های جغرافیایی*، ۶۲، ۱۰۹-۱۲۷.

حجتی، ز. و مسعودیان، ا. (۱۴۰۰). واکاوی تغییرات گردش‌های جوی عرض‌های میانه و پیوند آن با وردش‌های دمایی در ایران. *فصلنامه جغرافیا و توسعه*، ۱۹(۶۲)، ۵۲-۳۱.

حیدری م. ا. و خوش اخلاق، ف. (۱۳۹۴). اثر گرمایش جهانی بر مرکز چرخندزایی شرق مدیترانه و ارتباط

در زمان گسترش خود، تغییرات عرضی ۷ درجه و تغییرات طولی ۸ درجه را تجربه می‌کند. چیدمان الگوی بزرگ

جو به گونه‌ای است که الگوی بندالی بر روی اطلس منجر به دو شاخه شدن جریانات غربی می‌شود (حبیبی، ۱۳۸۶). در این زمان با تقویت پشته بر روی اروپا و گسترش شاخه جنوبی جریان‌های غربی بر روی مدیترانه، ناوه مدیترانه به سمت دریای سرخ گسترش می‌یابد. این شرایط سبب تقویت و عمیق‌تر شدن ناوه و گسترش آن تا دریای سرخ می‌شود (دی‌واریس و همکاران، ۲۰۱۳). گسترش جنوب سوی ناوه مدیترانه محرک دینامیکی مهمی در تقویت و تغییرات مکانی ناوه دریای سرخ می‌باشد، به گونه‌ای که با گسترش ناوه مدیترانه بر روی دریای سرخ، کم‌فشار دریای سرخ و سودان از حالت گرمایی خارج شده و با ناوه دینامیکی تراز میانی جو ادغام می‌شوند. نتایج پژوهش حاضر همچنین گویای آن است که متغیرترین قسمت باد غربی (و طولی و عرضی امواج) منطبق بر شرق اطلس شمالی و حوزه دریای مدیترانه می‌باشد. سازوکار شکل‌گیری و گسترش امواج و میزان عمیق‌شدگی آنها ناشی از تغییرات طولی و عرضی امواج باد غربی بر روی اطلس، اروپا است. علاوه بر تغییرات امواج بر روی اطلس و مدیترانه، تغییرات مکانی و تغییرات طولی و عرضی پرفشار جنب حاره نیز بر موقعیت و میزان عمیق شدن ناوه مدیترانه و فراگیر شدن بارش‌های کشور نقش زیادی دارد. در پایین دست ناوه مدیترانه گسترش شرق‌سوی مرکز ارتفاع زیاد عربستان زمینه برای گسترش شرق‌سوی ناوه مدیترانه و تزریق رطوبت به واسطه دسترسی به منابع رطوبتی را فراهم می‌کند. در این زمان و اچرخند عربستان به سمت شرق جابه‌جا می‌شود که علاوه بر این که شرایط برای گسترش شرق‌سوی ناوه مدیترانه فراهم می‌کند، به دلیل دسترسی به منابع رطوبتی دریا‌های جنوب رطوبت لازم برای رخداد شدیدترین بارش‌های را فراهم می‌کند. به‌طور کلی افزایش رخداد بارش‌های فوق‌سنگین طی سال‌های اخیر همزمان با تغییرات اقلیمی از یک طرف و احتمال افزایش این

- آن با ناهنجاری بارش نیمه‌ی غربی ایران. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۶ (۲۲)، ۷۲-۸۸.
- جهانبخش اصل، س.؛ ساری صراف، ب.؛ عساکره، ح. و شیرمحمدی، س. (۱۳۹۹). واکاوی تغییرات زمانی- مکانی بارش‌های بحرانی (فرین بالا) در غرب ایران طی سال‌های ۱۹۶۵-۲۰۱۶. *نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۷(۱)، ۸۹-۱۶۰.
- رضائیان، م.؛ محب‌الحجه، ع.؛ احمدی گیوی، ف. و نصرافنهانی، م. ع. (۱۳۹۳). تحلیل آماری-دینامیکی رابطه بین مسیر توفان مدیترانه و نوسان اطللس شمالی بر مبنای فرایافت فعالیت موج. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۵(۴)، ۳۱-۴۵.
- سلیمانی زاده، م. ج. و مرادی، م. (۱۳۹۹). بررسی هم‌مدیدی بارش‌های فرین در شهر تهران. *جغرافیا و روابط انسانی*، ۳(۳)، ۶۴-۷۹.
- علیجانی، ب. (۱۳۷۸). نوسانات مکانی و زمانی ارتفاع سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال در مدیترانه و اثر آن بر اقلیم ایران در ماه فوریه. *دومین کنفرانس منطقه ای تغییرات اقلیم*.
- Aljani, B. (2002). Variation of 500hpa flow patterns over Iran and surrounding areas and their relationship with climate of Iran. *Theoretical and applied climatology*, 71, 41-4.
- Antokhina, O., Antokhin, P., Gochakov, A., Zbirannik, A., & Gazimov, T. (2023). Atmospheric Circulation Patterns Associated with Extreme Precipitation Events in Eastern Siberia and Mongolia. *Atmosphere*, 14(3), 480.
- Aragão, L., & Porcù, F. (2022). Cyclonic activity in the Mediterranean region from a high-resolution perspective using ECMWF ERA5 dataset. *Climate Dynamics*, 58(5-6), 1293-1310.
- Bell, G. D., & Bosart, L. F. (1989). A 15-year climatology of Northern Hemisphere 500 mb closed cyclone and anticyclone centers. *Monthly Weather Review*, 117(10), 2142-2164.
- Berkovic, S., & Raveh-Rubin, S. (2022). Persistent warm and dry extremes over the eastern Mediterranean during winter: The role of North Atlantic blocking and central Mediterranean cyclones. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148(746), 2384-2409.
- Chase, B. M., Boom, A., Carr, A. S., Meadows, M. E., & Reimer, P. J. (2013). Holocene climate change in southernmost South Africa: rock hyrax middens record shifts in the southern westerlies. *Quaternary Science Reviews*, 82, 199-205.
- De Vries, A. J., Tyrlis, E., Edry, D., Krichak, S. O., Steil, B., & Lelieveld, J. (2013). Extreme precipitation events in the Middle East: dynamics of the Active Red Sea Trough. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(13), 7087-7108.
- Ding, F., & Li, C. (2017). Subtropical westerly jet waveguide and winter persistent heavy rainfall in south China. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, 7385-7400, doi:10.1002/2017JD026530.
- Ezer, T. (2020). Analysis of the changing patterns of seasonal flooding along the US East Coast. *Ocean Dynamics*, 70(2), 241-255.
- Flaounas E, Raveh-Rubin S, Wernli, H, Drobinski P, & Bastin S. (2015). The dynamical structure of intense Mediterranean cyclones. *Climate Dynamics*, 44, 2411-2427.
- Hochman, A., Alpert, P., Harpaz, T., Saaroni, H., & Messori, G. (2019). A new dynamical systems perspective on atmospheric predictability: Eastern Mediterranean weather regimes as a case study. *Science advances*, 5(6), eaau0936

- Hurrell, J. W. (1995). Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science*, 269, 676-679.
- Kotsias, G., Lolis, C. J., Hatzianastassiou, N., Bakas, N., Lionello, P., & Bartzokas, A. (2023). Objective climatology and classification of the Mediterranean cyclones based on the ERA5 data set and the use of the results for the definition of seasons. *Theoretical and Applied Climatology*, 152 (1-2), 581-597.
- Li, Z., Li, T., Yu, W., Li, K., & Liu, Y. (2016). What controls the interannual variation of tropical cyclone genesis frequency over Bay of Bengal in the post-monsoon peak season?. *Atmospheric Science Letters*, 17(2), 148-154.
- Mastrantonas, N., Herrera-Lormendez, P., Magnusson, L., Pappenberger, F., & Matschullat, J. (2021). Extreme precipitation events in the Mediterranean: Spatiotemporal characteristics and connection to large-scale atmospheric flow patterns. *International Journal of Climatology*, 41 (4), 2710-2728.
- Nie, Y., Zhang, Y., Zuo, J., Wang, M., Wu, J., & Liu, Y. (2023). Dynamical processes controlling the evolution of early-summer cut-off lows in Northeast Asia. *Climate Dynamics*, 60(3-4), 1103-1119.
- Raveh-Rubin, S., & Flaounas, E. (2017). A dynamical link between deep Atlantic extratropical cyclones and intense Mediterranean cyclones. *Atmospheric Science Letters*, 18(5), 215-221.
- Raziei, T., Mofidi, A., Santos, J. A., & I. (2012). Spatial patterns and regimes of daily precipitation in Iran in relation to large-scale atmospheric circulation. *International Journal of Climatology*, 32(8), 1226-1237.
- Rodwell, M. J., Rowell, D. P. & Folland, C. K. (1999). Oceanic forcing of the wintertime North Atlantic Oscillation and European climate. *Nature*, 398, 320-323.
- Romem, M., Ziv, B., & Saaroni, H. (2007). Scenarios in the development of Mediterranean cyclones. *Advances in Geosciences*, 12, 59-65.
- Şahin, S., Türkeş, M., Wang, S. H., Hannah, D., & Eastwood, W. (2015). Large scale moisture flux characteristics of the Mediterranean basin and their relationships with drier and wetter climate conditions. *Climate Dynamics*, 45, 3381-3401.
- Trigo, I. F., Bigg, G. R., & Davies, T. D. (2002). Climatology of cyclogenesis mechanisms in the Mediterranean. *Monthly Weather Review*, 130, (3), 549-569.
- Wernli H., & Schwierz C. (2006). Surface cyclones in the ERA-40 Dataset (1958–2001). Part I: novel identification method and global climatology. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 63, 2486–2507.
- Zhu, N., Zhang, Z., Gnanamanickam, E., & Leishman, J. G. (2022). Dynamics of large-scale flow structures within ship airwakes. In AIAA Scitech 2022 Forum (p. 2532).