



Analyzing the Role of Polar Vortex on Daily Extreme Precipitation in the Northwest of Iran

Nafiseh Rahimi ¹

1. Corresponding Author, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Zanjan University, Zanjan, Iran. E-mail: rahimi.nafiseh2@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 24 Aug 2021

Received in revised form: 24

Nov 2021

Accepted: 28 Nov 2021

Available online: 19 Dec 2021

Keywords:

Polar Vertex,

Daily Precipitation Extremes,

North-West of Iran,

Principle Component.

ABSTRACT

The polar vortex oscillation is one of the prominent manifestations of troposphere and stratosphere interaction, which plays an important role on the climate extremes. Therefore, in the present study, the concept of linking the daily extreme precipitation with the polar vortex and its control effect on synoptic systems was analyzed in the temporal-spatial analysis of the polar vortex at north-west stations of Iran. In this study, according to the statistic-synoptic approach, at first, the homogeneity of precipitation data and precipitation trend of all six stations were examined by linear regression test. 6 components explaining 90% of the data variance were identified in order to analyze the companionship and awareness of the trajectory and the effect of polar vortex on the studied stations, the location of the polar vortex investigated by T-type principal component analysis. Then, the position of vortex in each of these patterns was investigated by considering the polar vertex reagent contour in the geopotential elevation maps of 500 hPa level. 6 general patterns were recognized by analyzing temporal and spatial position of the vertex during the given days in which spatial position, the extension and depth of the ridges were different. The highest positioning of the vertex was seen in the first pattern and the ridges obtained from vertex had the highest depth and expanse on the Black Sea. In all patterns, the daily extreme precipitation was caused by the placement of the receiving vessel from the polar vortex on the required area, which was due to the establishment of the massive Rex and Omega dams on Europe.

Cite this article: Rahimi, N. (2021). Analyzing the Role of Polar Vortex on Daily Extreme Precipitation in the Northwest of Iran. *Geography and Environmental Sustainability*, 11 (4), 59-82. DOI: 10.22126/GES.2022.6844.2437



© The Author(s).

Publisher: Razi University

DOI: 10.22126/GES.2022.6844.2437



واکاوی ارتباط تاوه قطبی با بارش‌های روزانه فرین بالا

در شمال غرب ایران

نفیسه رحیمی^۱

۱. نویسنده مسئول، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: rahimi.nafiseh2@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	نوسان تاوه قطبی یکی از نمودهای برجسته برهم‌کنش پوشن سپهر و وردسپهر است که در فرین‌های آب‌وهوایی نقش بسزایی دارد. بنابراین در پژوهش حاضر، به‌منظور شناسایی پیوند بارش روزانه فرین بالا با تاوه قطبی و تأثیر کنترلی آن بر سامانه‌های همدید، به تحلیل زمانی-مکانی تاوه قطبی برای ایستگاه‌های واقع در شمال غرب پرداخته شد. در این پژوهش، با توجه به رویکرد آماری-همدیدی، ابتدا همگنی داده‌های بارش و روند بارش در هر شش ایستگاه به‌ترتیب به کمک آزمون‌های نرمال استاندارد مطلق و آزمون رگرسیون خطی مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس به‌منظور تحلیل همدید و آگاهی از چگونگی گسترش و اثرگذاری تاوه قطبی بر ایستگاه‌های مورد مطالعه، موقعیت مکانی تاوه قطبی با اعمال تحلیل مؤلفه‌های اصلی از نوع T بر روی داده‌های ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای ۱۷۷ روز بررسی و ۶ مؤلفه تشخیص داده شد که ۹۰ درصد واریانس داده‌ها را تبیین می‌کند. با تحلیل همدید موقعیت زمانی و مکانی تاوه قطبی طی روزهای منتخب، شش الگوی کلی شناسایی شد که در هریک از این الگوها موقعیت مکانی تاوه، امتداد و عمق تاوه متفاوت بود. بیشترین موقعیت قرارگیری تاوه در الگوی اول دیده شد که تاوه‌های حاصل از تاوه بیشترین عمق و گستردگی را بر روی دریای سیاه داشت. در تمامی الگوها، بارش روزانه فرین بالا بر اثر قرارگیری تاوه حاصل از تاوه قطبی در نزدیکی منطقه مورد مطالعه ایجاد شده بود که هم‌زمان با استقرار بندهای عمیق رگس و امگایی بر روی اروپا بود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۲	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۰۳	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۷	
دسترسی آنلاین: ۱۴۰۰/۰۹/۲۸	
کلیدواژه‌ها: تاوه قطبی، بارش روزانه فرین بالا، شمال غرب، مؤلفه اصلی.	

استناد: رحیمی، نفیسه (۱۴۰۰). واکاوی ارتباط تاوه قطبی با بارش‌های روزانه فرین بالا. جغرافیا و پیداری محیط. ۱۱ (۴)، ۵۹-۸۲. DOI: 10.22126/GES.2022.6844.2437

10.22126/GES.2022.6844.2437



مقدمه

در کشور ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص، بارش، در مقایسه با عناصر اقلیمی دیگر، پیچیدگی رفتاری چشمگیرتری دارد. با اینکه بارش مهم‌ترین عامل پایداری و توسعه جمعیت‌های انسانی در کره زمین است، میزان نوسانات آن موجودیت جوامع انسانی، گیاهی و سایر موجودات را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. توزیع زمانی-مکانی نامنظم بارش‌های سنگین باعث رخداد پدیده‌های پیچیده و مخرب طبیعی از قبیل سیل می‌شود و هرساله خسارات فراوانی را به کشور تحمیل می‌کند. در دهه‌های اخیر، به دلیل دخالت‌های نابجا و مدیریت نادرست انسان در استفاده از سرزمین، شدت و تواتر وقوع این بلایای طبیعی افزایش یافته است (عباس‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹). درک علل و ماهیت فرین‌های اقلیمی از اهم اهداف پایش پدیده‌های اقلیمی است. در وقوع بارش‌های فرین بالا، با توجه به پیوستگی پدیده‌ها در کنش‌های جو، علاوه بر وردسپهر^۱، پوشش سپهر^۲ نیز فعالانه نقش دارند. از برجسته‌ترین ویژگی پوشش سپهر تاوه قطبی است. تاوه یک گردش چرخندی^۳ بزرگ‌مقیاس است که در زمستان هر دو نیمکره و در فاصله بین عرض‌های ۵۰ تا ۹۰ درجه در بالاتر از وردایست^۴ (تقریباً ۱۰۰ hPa) تا میان‌سپهر (بالاتر از ۱ hPa) به دلیل فقدان دریافت تابش خورشیدی شکل می‌گیرد (رن و کای^۵، ۲۰۰۶) و جزء شکل دینامیکی غالب گردش زمستانی در وردسپهر و پوشش سپهر محسوب می‌شود. طبق مطالعات چند دهه اخیر، جریان‌ها و گردش‌های وردسپهری تحت‌تأثیر گردش‌های پوشش سپهری است (کیروز^۶، ۱۹۸۰؛ هینز^۷ و همکاران، ۱۹۹۱؛ بالدوین^۸ و همکاران، ۲۰۰۷) و آشفستگی‌های حاصل از تغییر در گردش‌های وردسپهری نیز شارش در پوشش سپهر را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (پولوانی و واف^۹، ۲۰۰۴). به این ترتیب، با سازوکار واهلش تابشی، تاوه قطبی شکل می‌گیرد و دستخوش نوسان بین دو حالت قوی و ضعیف می‌شود (پرلویتز و گرف^{۱۰}، ۱۹۹۵). معمولاً تصور بر این است که تاوه قطبی در مرکز قطب شمال مستقر است؛ درحالی که مرکز آن اغلب بین جنوب قطب شمال، شمال کانادا یا شمال اوراسیا جابه‌جا می‌شود. با جابه‌جایی این سامانه نسبت به موقعیت نرمال آن، تغییراتی در هوای عرض‌های میانی در نیمکره شمالی، مسیرهای طوفان‌ها، تقویت اثر شمالگان و غیره ایجاد می‌شود (حمیدیان‌پور و خسروی، ۱۳۹۸). با تقویت تاوه قطبی، رویدادهای حدی، همچون بارش‌های سنگین، امواج گرمایی و سرمای، در عرض‌های میانی افزایش می‌یابد (فرانسیس و واوروس^{۱۱}، ۲۰۱۲؛ اسکرین و سیموندز^{۱۲}، ۲۰۱۴؛ واوروس و همکاران^{۱۳}، ۲۰۱۷). شناخت تاوه به آگاهی کاملی از سامانه‌های گردش اتمسفر در عرض‌های میانی می‌انجامد؛ بنابراین می‌توان آن را ابزاری مفید برای درک بهتر اقلیم دانست. طبق گفته مسعودیان (۱۳۸۵)، علم اقلیم‌شناسی همدید رابطه میان گردش‌های اتمسفر را با محیط سطحی یک منطقه بررسی می‌کند؛ از این رو شناخت تاوه قطبی، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های گردش عمومی اتمسفر، دارای اهمیت ویژه‌ای است و تبیین حرکات و جابه‌جایی آن، در ترازهای مختلف جو، زاینده پیش‌آگاهی‌ها و پیش‌بینی‌هایی می‌شود که به کاهش خسارات بارش‌های سنگین کمک می‌کند.

1. Troposphere
2. Stratosphere
3. Polar vortex
4. Tropopause
5. Ren and Cai
6. Quiroz
7. Haynes
8. Baldwin
9. Polvani and Waugh
10. Perlwitz and Graf
11. Francis & Vavrus
12. Screen & Simmonds
13. Vavrus

دربارهٔ تاوهٔ قطبی مطالعات متعددی در جهان انجام شده است. تامپسون^۱ و همکاران (۲۰۰۲) با توجه به جفت‌شدگی دینامیکی میان گردش‌های وردسپهری و پوشش‌سپهری به مطالعهٔ پیش‌بینی‌پذیری رویدادهای بسیار سرد در عرض‌های میانی و بالا در بازهٔ زمانی ۱۹۵۸ تا ۱۹۹۹ پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با شروع شرایط تاوهٔ قطبی پوشش‌سپهری ضعیف، بیشتر خشکی‌های واقع در عرض‌های میانی و بالا به‌طور غیرعادی سرد می‌شود. همچنین مناطق پرجمعیت مانند شرق آمریکای شمالی، اروپای شمالی و آسیای شرقی به‌دنبال شروع رخداد تاوهٔ قطبی ضعیف، ۱ تا ۲ کلوین نسبت به تاوهٔ قطبی قوی سردتر می‌گردد.

وارونا^۲ (۲۰۰۵) با بررسی تأثیر فصلی تاوهٔ قطبی نیمکرهٔ شمالی با پوشش زمانی ۱۹۵۱ تا ۲۰۰۱ در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال با لحاظ پربندها، مساحت و شکل و گرانیگاه‌های تاوهٔ قطبی را محاسبه کرد و به این نتیجه رسید که گرانیگاه‌های تاوهٔ قطبی به‌سمت اقیانوس آرام متمایل است و شاخص نوسان قطبی با مساحت تاوهٔ قطبی، به‌جز در فصل بهار در ماه‌های دسامبر، فوریه و آوریل، ارتباط معناداری دارد. همچنین وی بیان کرد ویژگی‌های هندسی تاوهٔ قطبی ارتباط بین گردش‌های نیمکره‌ای و ناهنجاری‌های دمایی را در سراسر سال مشخص می‌کند.

بینگ^۳ و همکاران (۲۰۰۸) با شناسایی ساختار ناهنجاری دوقطبی در قطب شمال برای بارندگی‌های تابستانهٔ شمال شرق چین دریافتند که این ساختارها حاصل نمایهٔ دوم تحلیل توابع متعامد تجربی میانگین فشار تراز دریا در شمال ۷۰ درجهٔ عرض شمالی در ماه‌های تابستان در بازهٔ زمانی ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۶ است و قدرت تبیین آن ۱۲٫۹۴ درصد است. مرکز این ناهنجاری دوقطبی بر روی جهت‌های قطبی کانادا و دریای بوفورت و بین دریای کارا و لیتویو قرار دارد و بین نواحی شرقی و غربی قطب شمال جابه‌جا می‌شود و در فاز مثبت ضمن انطباق بر ناحیهٔ غربی قطب باعث افزایش میانگین بارندگی تابستانی در شمال شرق چین می‌گردد.

چوی^۴ و همکاران (۲۰۰۹) تغییرات و ارتباط تاوهٔ قطبی نیمکرهٔ شمالی را با سایر متغیرهای اقلیمی در تراز ۵۰۰ hpa برای بازهٔ زمانی ۱۹۴۸ تا ۲۰۰۸ بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که مساحت تاوهٔ قطبی در ماه‌های مارس و جولای کاهش شدیدی داشته است. ضمن اینکه اندازهٔ تاوهٔ قطبی در ماه مارس با گسترهٔ برف در ماه‌های فوریه، مارس و آوریل رابطهٔ خطی مستقیم معنادار و با نمایهٔ نوسان قطبی در ماه‌های فوریه و مارس رابطهٔ معکوس معنادار داشته است.

هوسر^۵ (۲۰۱۰) تأثیر تاوهٔ قطبی نیمکرهٔ شمالی را بر آب‌وهوای وردسپهری در ماه‌های زمستان در بازهٔ زمانی ۱۹۸۹ تا ۲۰۰۹ بررسی کرد. وی تاوهٔ قطبی را بر روی سطح همدرگاشت ۸۵۰ کلوین از لحاظ شکل، اندازه و موقعیت تحلیل خوشه‌ای کرد و مرز تاوهٔ قطبی را ۵۰۰ واحد تاوایی پتانسیل در نظر گرفت و هر یاخته‌ای را که مقدار آن بیشتر از این مقدار بود، تاوهٔ قطبی معرفی کرد. وی همچنین اثر تاوهٔ قطبی را بر میدان باد در تراز ۲۰۰ hpa و دمای سطحی بررسی نمود.

لیانگ^۶ و همکاران (۲۰۱۵) با واکاوی شاخص‌های بارش در حوضهٔ رودخانهٔ زرد در مرکز چین، بیان کردند که دو سامانهٔ همدید مقیاس پرفشار جنب‌حاره و تاوهٔ قطبی مهم‌ترین نقش را در تغییرات شاخص‌های بارش ایفا می‌کنند و ارتباط معنادار منفی با تاوهٔ قطبی و ارتباط معنادار مثبت با پرفشار جنب‌حاره طی دورهٔ آماری ۱۹۶۱ تا ۲۰۱۲ را نشان می‌دهند.

1. Thompson
2. Wrona
3. Bing
4. Choi
5. Hauser
6. Liang

واف^۱ و همکاران (۲۰۱۷) بیان کردند که تاوه های قطبی جزء پدیده های غیرمعمول و حدی نیستند، بلکه از سیماهای اساسی اقلیم زمین محسوب می شوند. در واقع رخداد پدیده های حدی در جو در مناطق گوناگون، مانند رخداد هوای سرد حدی در اوایل زمستان سال ۲۰۱۴ در ایالات متحده آمریکا، را نباید ناشی از تغییرات بزرگ در گردش کلی جو دانست، بلکه رخداد آن ها مربوط به جابه جایی محلی و گذرای لبه تاوه قطبی وردسپهری است. همچنین آن ها نتیجه گرفتند که در رخداد های وضع هوای سطح، تاوه وردسپهری ضمن وجود داشتن، نقش اصلی را هم ایفا می کند، حال آنکه تاوه پوشن سپهری در برخی موارد وجود دارد و اثر آن نیز کمتر و به صورت غیرمستقیم است.

در ایران، مطالعات اندکی در زمینه تاوه قطبی و اثرات آن بر اقلیم و پدیده های فرین کشور انجام شده است. پاک نظر (۱۳۸۳: ۳) تاوه قطبی و اثر آن را بر سرماهای شدید شمال شرق ایران در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکالی با استفاده از داده های میانگین ماهیانه دما در ماه های سرد سال، در ایستگاه های همدید مشهد، سبزوار و تربت حیدریه، در بازه زمانی ۱۹۷۷ تا ۱۹۸۶ مطالعه کرد و به این نتیجه رسید که وقوع کمینه و بیشینه دما به ترتیب با بیشینه انبساط و انقباض تاوه به اندازه یک ماه تأخیر دارد و مساحت تاوه با میانگین ماهیانه دما همبستگی منفی دارد. عرض جغرافیایی مرکز تاوه در نیمکره شرقی و موقعیت مرز تاوه در ناحیه بین ۵۰ تا ۶۰ درجه طول شرقی با دمای هوا همبستگی مثبت قوی دارد؛ بنابراین با قرارگیری مرز تاوه یا مرکز آن در عرض پایین تر، دما در شمال شرق ایران کاهش می یابد.

عباس زاده اقدام و همکاران (۱۳۹۳) با بررسی اثرهای اقلیم شناختی تاوه قطبی پوشن سپهر در منطقه جنوب غرب آسیا نتیجه گرفتند که به دنبال رویداد تاوه قطبی ضعیف، از یک سو دمای میانگین روزانه سطح زمین در بیشتر نقاط منطقه نسبت به حالت قوی تاوه قطبی کاهش می یابد و از سوی دیگر تعداد رویدادهای سرد شمارش شده در کل منطقه نیز کمتر می شود. آن ها همچنین نشان دادند پس از رویداد تاوه قطبی ضعیف، بیشتر نقاط نسبت به تاوه قطبی قوی با افزایش رطوبت نسبی همراه بوده است.

چنگیزی (۱۳۹۳) با استفاده از داده های بازتحلیل NCEP/NCAR در بازه زمانی ۱۹۴۹ تا ۲۰۱۳، به بررسی اقلیم شناختی ساختار وردایست دینامیکی برای منطقه ایران پرداخت و نشان داد از نظر الگوهای آماری حاکم بر داده های اصلی و پریشیدگی های فشار، ارتفاع ژئوپتانسیلی و دمای پتانسیلی وردایست دینامیکی، مناطق شرق و غرب ایران بیشترین شباهت را به کل ایران دارند و به نوعی این دو منطقه مانند منطقه گذار میان عرض های شمالی و جنوبی ایران عمل می کنند. نویسنده همچنین با استفاده از روش فرایابی در دو مقیاس متفاوت نشان داد که آشفتگی های موجود روی وردایست به دو نوع چرخندی و واچرخندی تقسیم می شود و بیشترین آشفتگی های چرخندی و واچرخندی روی این سطح به ترتیب در مناطق جنوب شرق و شمال غرب ایران است.

برهانی و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی سازوکار جفت شدگی پوشن سپهر وردسپهر در منطقه جنوب غرب آسیا با داده های بازتحلیل NCEP/NCAR که شامل میدان فشار، دما و سرعت باد و ارتفاع ژئوپتانسیل است، در ۱۷ سطح فشار از سال ۱۹۶۸ تا ۲۰۱۵ پرداختند و نشان دادند در طی رخداد های تاوه قطبی ضعیف، بخش های زیادی از منطقه مورد مطالعه و ایران در ناحیه شکست امواج راسبی قرار دارد؛ بنابراین آثار ناشی از تاوه ها بر این منطقه زیاد نبوده است. اما در رخداد های تاوه قوی، عرض های بالاتر در منطقه مورد مطالعه و برخی نواحی از عرض های میانی آن، در محدوده درون تاوه قرار می گیرد. آن ها همچنین با بررسی همبستگی بین شاخص تاوه قطبی تامپسون با سه کمیت وردایست فوق به این نتیجه رسیدند که شاخص تاوه قطبی همبستگی مستقیم با فشار و همبستگی معکوس با دما و ارتفاع ژئوپتانسیلی با تأخیرهای زمانی هشت تا ده روز دارد.

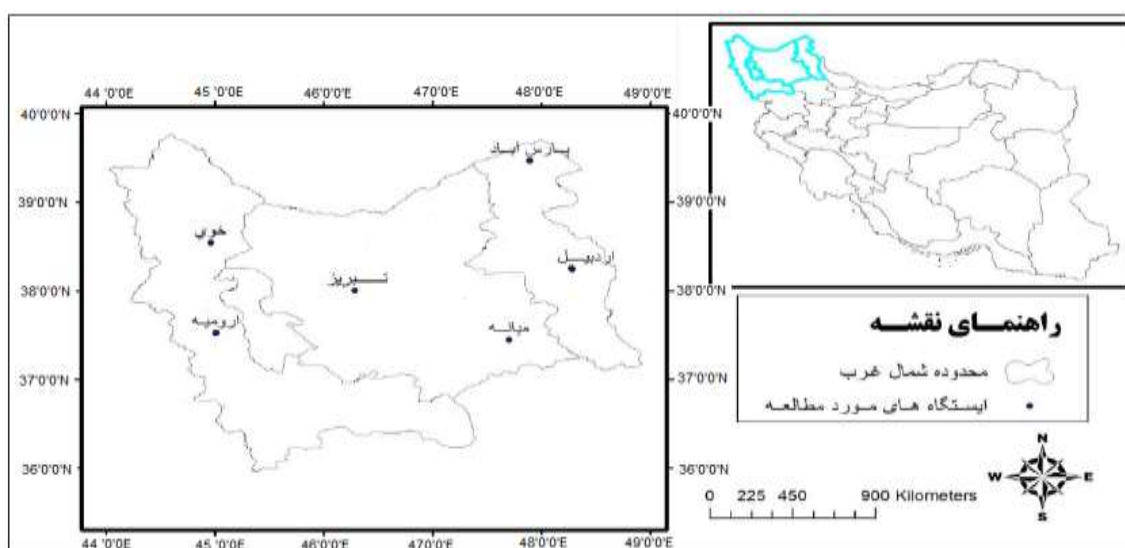
محمدی و همکاران (۱۳۹۹) با تحلیل زمانی مکانی تاوه قطبی و نقش آن در وقوع روزهای بارش سنگین حوضه آبریز قره سو در بازه زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۵ به این نتیجه رسیدند که موقعیت و تمرکز الگوهای تاوه در هریک از فصول متغیر

بوده و کمترین نفوذ آن در فصل پاییز و بیشترین نفوذ آن در فصل زمستان ثبت شده است. همچنین نتایج پژوهش آن‌ها حاکی از این است که در طی رخداد بارش سنگین و فراگیر ناوه حاصل از تاوه قطبی بر روی منطقه مورد مطالعه ایجاد شده که هم‌زمان با استقرار بندال‌های عظیم رکس و امگایی بر روی اروپا است.

با توجه به اینکه عموم تحقیقات انجام‌شده در منطقه مطالعاتی به تحلیل‌های همدیدی بارش پرداخته و نقش ناوه‌های حاصل از بندال و تاوه قطبی برای بارش‌های فرین بررسی نشده است، در تحقیق حاضر سعی شد با در نظر گرفتن اطلاعات ترازهای جوّی مؤثر و به‌صورت ترکیبی، ویژگی‌های همدیدی و ترمودینامیکی و نقش تاوه قطبی در بارش‌های ابر سنگین ایستگاه‌های شمال غرب بررسی شود تا با شناخت عوامل منجر به بارش روزانه فرین بالا، بتوان در جهت کاهش تأثیرات سوء فرین‌های بارش گامی مؤثر برداشت.

معرفی منطقه مورد مطالعه

در این مقاله، منظور از شمال غرب کشور پهنه‌ای است که استان‌های اردبیل، آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی را دربر می‌گیرد. ایستگاه‌های منتخب برای مطالعه در این منطقه اردبیل، ارومیه، تبریز، خوی، میانه و پارس‌آباد است که در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت منطقه شمال غرب ایران و ایستگاه‌های مورد مطالعه

با توجه به تغییرات زمانی مکانی بارش شدید، برای تجزیه و تحلیل داده‌های آن از رویکرد محیطی به گردشی استفاده شد تا فقط بارش‌های مورد نظر بررسی شود. در این مطالعه، به‌منظور شناسایی چگونگی جریان‌های جوّی، از دو پایگاه داده محیطی و پایگاه داده جوّی استفاده شد. ابتدا داده‌های بارش ایستگاه‌های مذکور در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ از ایستگاه هواشناسی کشور دریافت شد؛ سپس داده‌های بازتجزیه روزانه مربوط به مراکز پیش‌بینی محیطی / مرکز ملی پژوهش‌های جوّی آمریکا موسوم به NAEP/NCAR شامل ارتفاع ژئوپتانسیل (بر حسب ژئوپتانسیل) و فشار تراز دریا جمع‌آوری گردید. این داده‌ها با توان تفکیک مکانی 2.5×2.5 درجه در راستای نصف‌النهار و مداری به‌منظور شناسایی پدیده‌های همدید و آگاهی از مسیر حرکت سامانه‌های گردشی و چگونگی گسترش و اثرگذاری تاوه قطبی بر روی ایستگاه‌های بررسی‌شده، گسترده‌تر از قلمرو مورد مطالعه (از 20° تا 70° درجه شرقی و از 20° تا 60° درجه شمالی) انتخاب شد. قبل از انجام هرگونه تحلیلی، ابتدا همگنی داده‌های میانگین مجموع بارش سالیانه ایستگاه‌های مذکور به کمک آزمون نرمال استاندارد مطلق (SNHT) مورد واکاوی قرار گرفت؛ سپس معناداری روند آن با آزمون رگرسیون خطی بررسی شد. به‌منظور شناسایی و

استخراج بارش روزانه فرین بالا و فراگیر، به دلیل حجم زیاد داده‌ها، دانشمندان حدود یا ملاک کمی معینی را در مطالعات خود برای انتخاب فرین‌های بالای بارشی به کار برده‌اند. این ملاک‌ها برای مناطق جغرافیایی متفاوت بوده است؛ برای نمونه حد انتخاب فرین‌های بالای بارشی در شرق فرانسه بارش روزانه ۲۰ میلی‌متر (میزرهی^۱، ۲۰۰۰)، برای سوئد ۴۰ میلی‌متر (هلستروم^۲، ۲۰۰۵) و برای سئول ۷۵ میلی‌متر (وانگ^۳ و همکاران، ۲۰۰۶) در نظر گرفته شد. در پژوهش حاضر نیز، پس از بررسی روزهای بارشی، بیشینه بارش روزانه ۲۰ میلی‌متر و بیشتر در سطح منطقه به‌عنوان حد و ملاک کمی در نظر گرفته شد. بر اساس معیار فوق، ۱۷۷ روز بارش روزانه فرین بالا در ایستگاه‌های مورد مطالعه برای تحلیل همیدی و ترمودینامیکی انتخاب شد.

آزمون همگنی غیرمستقیم نرمال استاندارد مطلق^۴

فرض اولیه در آزمون نرمال استاندارد مطلق، نرمال بودن توزیع آماری داده‌هاست. بر اساس رابطه ۱، سری Q_i با انجام محاسبات به سری استاندارد Z_i با میانگین صفر و انحراف معیار واحد تبدیل می‌شود:

$$Z_i = Q_i - \bar{Q} / \sigma_Q \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن، \bar{Q} و σ_Q به ترتیب میانگین و انحراف معیار سری Q_i است. برای یک تغییر ناگهانی در میانگین سری داده‌های مورد نظر، فرض صفر و فرض یک به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود:

$$H_0: Z_i \sim N(0,1) \quad \text{for } i=1, \dots, n \quad \text{رابطه ۲}$$

$$H_1: \begin{cases} Z_i \sim N(\mu_1, 1) & \text{for } i=1, \dots, a \\ Z_i \sim N(\mu_2, 1) & \text{for } i=a+1, \dots, n \end{cases}$$

که در آن، N معرف توزیع نرمال با پارامترهای مربوطه است. الکساندر^۵ و همکاران (۲۰۰۶) برای آزمودن درستی هریک از فرض‌های صفر و یک مسئله، یک روش آماری بر اساس نسبت راستی‌آزمایی ارائه دادند که در آن، نسبت احتمال درستی H_0 و H_1 برای سری داده Z_i مشاهده شده بر اساس رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$T_0 = \max \{ aZ_1^2 + (n-a)Z_2^2 \quad a=1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه ۳}$$

$$1 \leq a \leq n-1$$

که در آن، Z_1 و Z_2 مقادیر میانگین Z_i قبل و بعد از تغییر است. مقدار α نیز محتمل‌ترین زمان بروز تغییر ناگهانی در داده‌ها و یا به بیان دیگر، آخرین زمان در سری زمانی جزئی با میانگین Z_i است. در این آزمون، اگر مقدار آماره از مقدار بحرانی آزمون برای سطح بحرانی مشخص بیشتر باشد، فرض همگنی صفر در سطح اطمینان مربوطه رد خواهد شد (قاجارنیا و همکاران، ۱۹۹۳).

رگرسیون خطی معمولی

مدل رگرسیون خطی معمولی به منظور بررسی رابطه بین میانگین توزیع متغیر تصادفی Y با تعدادی متغیر تشریحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرم مدل رگرسیون خطی معمولی به صورت رابطه ۴ است.

$$Y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i \quad \text{رابطه ۴}$$

1. Mizrahi
2. Hellstrom
3. Wang
4. Absolute Standard Normal Homogeneity Test
5. Alexander

که در آن، α و β پارامترهای نامعلوم مدل که باید برآورد شود، x_i مقادیر معلوم متغیر مستقل و ε_i متغیر تصادفی است (برارخان پور و همکاران، ۱۳۹۹)، فرض صفر در این آزمون مبنی بر نبود رابطه خطی معنادار بین زمان و پارامترهای هواشناسی است. سطح معناداری در این پژوهش ۵ درصد است.

تعیین موقعیت تاوه قطبی

روش تشخیص تاوه قطبی در پژوهش حاضر، بر اساس پربندهای معرف تاوه در هر ماه برحسب ژئوپتانسیل متر در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال مطابق روش فرونفیلد و دیویس^۱ (۲۰۰۳) است. فرونفیلد و دیویس در پژوهش خود، روند تاوه قطبی را در ارتباط با تغییرات اقلیمی برای ترازهای ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال در مقیاس نیمکره شمالی، طی دوره ۱۹۴۹ تا ۲۰۰۰ (۶۲۴ ماه)، به کمک داده‌های میانگین ارتفاعات ژئوپتانسیل انجام دادند و تغییرات ارتفاع ژئوپتانسیل را در هر ۵ درجه طول شرقی و شمالی بررسی کردند تا پربندی که هسته جریان بادهای غربی را بهتر توصیف می‌کند، شناسایی شود و مبنایی برای سنجش مساحت و گستره نفوذ تاوه قطبی به تفکیک ماهیانه قرار گیرد و به‌عنوان شاخصی برای تاوه قطبی معرفی گردد. پربندهای معرف تاوه قطبی طی یک دوره بلندمدت ۵۱ ساله و برای همه مناطق از عرض صفر تا ۹۰ درجه شمالی و سراسر طول شرقی بررسی شده است (جدول ۱). از این رو، این مقادیر مشخص شده پربندی در این تحقیق نیز قابل قبول است و می‌توان از آن استفاده کرد. بنابراین در تحقیق حاضر، موقعیت تاوه در مناطق جغرافیایی مختلف در ۱۷۷ روز بارش روزانه فرین بالا به کمک تحلیل مؤلفه‌های اصلی بررسی شد. اعمال این روش آماری با آرایه T و چرخش به روش واریمکس بر روی داده‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی جو بالا به شناسایی شش الگو انجامید و در آخر روزهایی که بیشترین میزان هم‌بستگی را با میانگین هر الگو داشتند، شناسایی و استخراج شد و برای هر روز نماینده، ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال و فشار سطح دریا مورد بررسی قرار گرفت تا سازوکار همدیدی و دینامیکی در موقعیت‌های مختلف تاوه قطبی مقایسه گردد.

جدول ۱. پربند مشخصه تاوه قطبی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در ماه‌های مختلف سال، فرونفیلد و دیویس (۲۰۰۳)

ماه	پربند	ماه	پربند	ماه	پربند	ماه	پربند	ماه	پربند	ماه	پربند
ژانویه	۵۴۶۰	مارس	۵۵۲۰	می	۵۶۴۰	جولای	۵۷۰۰	سپتامبر	۵۶۴۰	نوامبر	۵۵۲۰
فوریه	۵۴۶۰	آوریل	۵۵۸۰	ژوئن	۵۷۰۰	اوت	۵۷۶۰	اکتبر	۵۵۸۰	دسامبر	۵۴۶۰

نتایج

نتایج برازش آزمون همگنی و روند بر روی سری زمانی میانگین مجموع بارش سالیانه طی دوره مورد مطالعه در جدول ۲ آمده است. در طی دوره مورد بررسی، سری زمانی بارش در ایستگاه همدید تبریز، اردبیل، ارومیه، خوی، میانه و پارس‌آباد با ۹۹ درصد اطمینان (با سطح معناداری ۱ درصد) کوچک‌تر از مقادیر بحرانی (۹،۵۶) بود؛ از این رو توزیع داده‌های بارش در شش ایستگاه مورد بررسی همگن بوده است. همچنین برازش آزمون رگرسیون خطی بر روی سری زمانی ۲۱ ساله نشان داد که بارش در ایستگاه تبریز، ارومیه، خوی و میانه روند معنادار افزایشی را به‌لحاظ آماری در سطوح اطمینان ۹۵ درصد داشته، ولی در ایستگاه اردبیل و پارس‌آباد روند کاهش مشاهده شد.

جدول ۲. معناداری همگنی و روند بارش سالیانه ایستگاه های مورد مطالعه

ایستگاه	آزمون همگنی SNHT	آزمون رگرسیون خطی	وضعیت روند (در سطح ۰/۹۵)	معادله خط رگرسیون	وضعیت همگنی (در سطح ۰/۹۹)	مقادیر T0
تبریز	همگن	$y = 4.4x - 8727.6$	افزایشی		همگن	$T0 = 5,11$
ارومیه	همگن	$y = 5.3x - 10434$	افزایشی		همگن	$T0 = 7,63$
اردبیل	همگن	$y = -0.1x + 495.78$	کاهشی		همگن	$T0 = 2,32$
پارس آباد	همگن	$y = -1.6x + 3402.6$	کاهشی		همگن	$T0 = 4,16$
خوی	همگن	$y = 2.7x - 5258.4$	افزایشی		همگن	$T0 = 4,89$
میانه	همگن	$y = 0.9x - 1569.1$	افزایشی		همگن	$T0 = 2,53$

مشخصات آماری بارش فرین بالای شش ایستگاه منتخب در جدول ۳ بیان شده است. بیشترین فراوانی بارش فرین بالا در ایستگاه های واقع در غرب منطقه مورد بررسی (ارومیه و خوی) بوده است. بررسی رکوردهای ثبت شده از فراوانی سالیانه روزهای دارای بارش فرین بالای این منطقه در طی ۲۱ سال حاکی از این است که فراوانی بارش های فرین بالا در طی سال های اخیر، به جز در ایستگاه پارس آباد و میانه، روند افزایشی داشته؛ به طوری که در مجموع شش ایستگاه مذکور در سال ۲۰۱۹، ۱۶ روز و در سال ۲۰۰۱، ۲ روز بارش سنگین ثبت شده است. فراوانی ماهیانه نیز نشان می دهد که در طی ۲۵۲ ماه، بیشترین بارش های فرین بالا متعلق به ماه آوریل با ۳۴ روز و کمترین آن در ماه آگوست با ۵ روز بوده است. بر اساس مشخصات پراکندگی ایستگاه ها، ایستگاه پارس آباد پایین ترین انحراف معیار را داراست؛ بنابراین داده های بارش فرین بالای پارس آباد پراکندگی اندکی دارد و به میانگین نزدیک تر است.

جدول ۳. مشخصات توصیفی بارش روزانه فرین بالا در ایستگاه های مورد مطالعه

ایستگاه	مشخصات فراوانی	رشد فراوانی سالیانه	حداکثر بارش	ضریب تغییرات	انحراف معیار	تعداد بیشترین فراوانی ماهیانه	بیشترین فراوانی ماهیانه	تعداد فراوانی سالیانه
اردبیل	۰,۳۵	۷,۳	۴۳	افزایشی	۱۰ مورد	اکتبر	۲۲	اردبیل
ارومیه	-۰,۴	۹,۶	۶۶	افزایشی	۱۶ روز	آوریل	۶۱	ارومیه
پارس آباد	۰,۳۲	۶,۹	۴۸	کاهشی	۷ روز	سپتامبر	۲۴	پارس آباد
تبریز	۰,۷۲	۱۵,۰۷	۷۰	افزایشی	۵ مورد	آوریل	۲۴	تبریز
خوی	۰,۳۵	۷,۴	۵۰	افزایشی	۷ مورد	آوریل	۲۷	خوی
میانه	۰,۳۴	۷,۳	۴۷	کاهشی	۲ مورد	فوریه-آوریل-جولای	۲۰	میانه

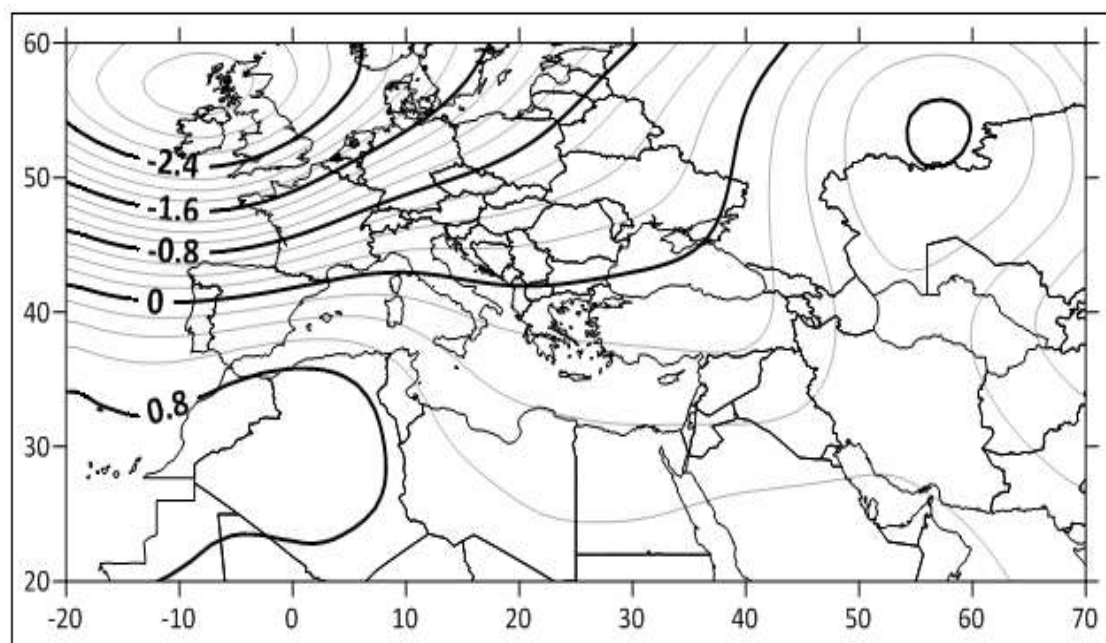
نتایج به دست آمده از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی با آرایش T و چرخش واریماکس در جدول ۴ با ماتریس اولیه ۱۷۷×۶۲۹ نشان‌دهنده ۹۰ درصد واریانس جمعی است. این شش عامل اولیه که معرف آرایش اصلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال است، در ذیل به صورت نقشه نشان داده شده است. با عنایت به اینکه برای تاوه قطبی در هر ماه، پربند معرف جداگانه‌ای تعریف شده، برای شناسایی این پربندهای معرف در تراز ۵۰۰ ژئوپتانسیل، روزهای نماینده‌ای که بیشترین همبستگی را با هر عامل داشت، برای هر الگو انتخاب شد.

جدول ۴. درصد واریانس عامل‌های انتخابی

عامل‌ها	عامل اول	عامل دوم	عامل سوم	عامل چهارم	عامل پنجم	عامل ششم	
میزان تبیین واریانس	۳۴	۲۲،۵	۲۱،۱	۴،۴	۳،۶	۳،۵	ماتریس اولیه ۱۷۷×۶۲۹
درصد جمعی	۳۴	۵۶،۵	۷۷،۶	۸۲	۸۵،۶	۸۹،۱	

مؤلفه اول

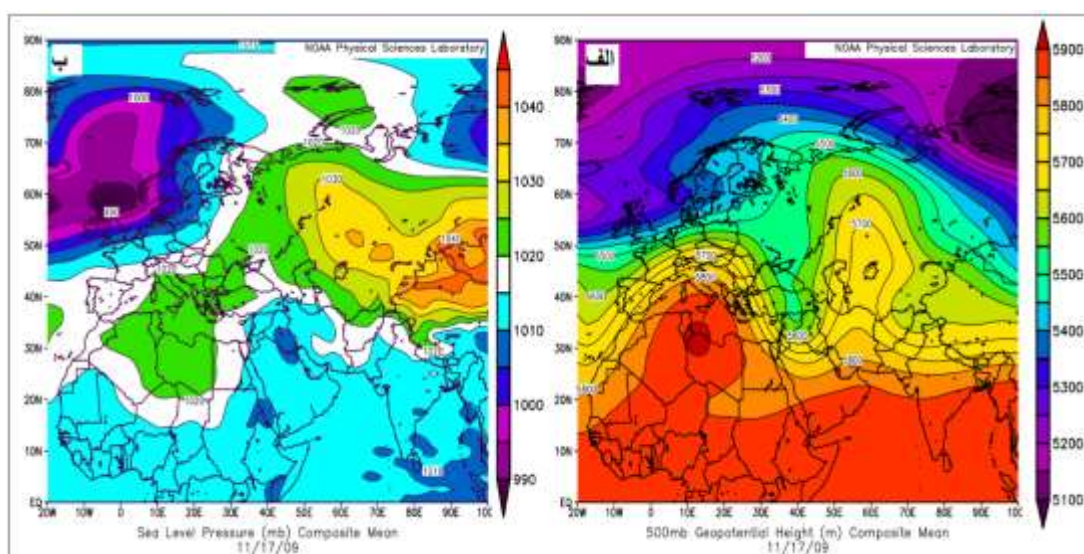
مؤلفه اول حدود ۳۳،۸ درصد از تغییرات داده‌ها را تبیین می‌کند. الگوی مکانی بارهای عاملی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال این مؤلفه دو هسته پرارتفاع را نشان می‌دهد که هسته مرکزی یکی از آن‌ها در جنوب روسیه قرار دارد و زبانه‌های آن به سمت جنوب کشیده شده است. این سلول همان هسته پرارتفاع آسیای مرکزی است. هسته پرارتفاع دیگر نیز بر روی الجزایر استقرار یافته که زبانه‌های آن به سمت آفریقا جریان یافته است. در شمال انگلستان و ایرلند نیز یک هسته کم‌ارتفاع استقرار یافته که زبانه‌های آن به سمت عرض‌های جنوبی و شرقی با حالت مداری کشیده شده و سرتاسر اروپا تا دریای سیاه را فراگرفته است (شکل ۲).



شکل ۲. نقشه الگوی مکانی بارهای عاملی مؤلفه اول

روز نماینده برای مؤلفه اول

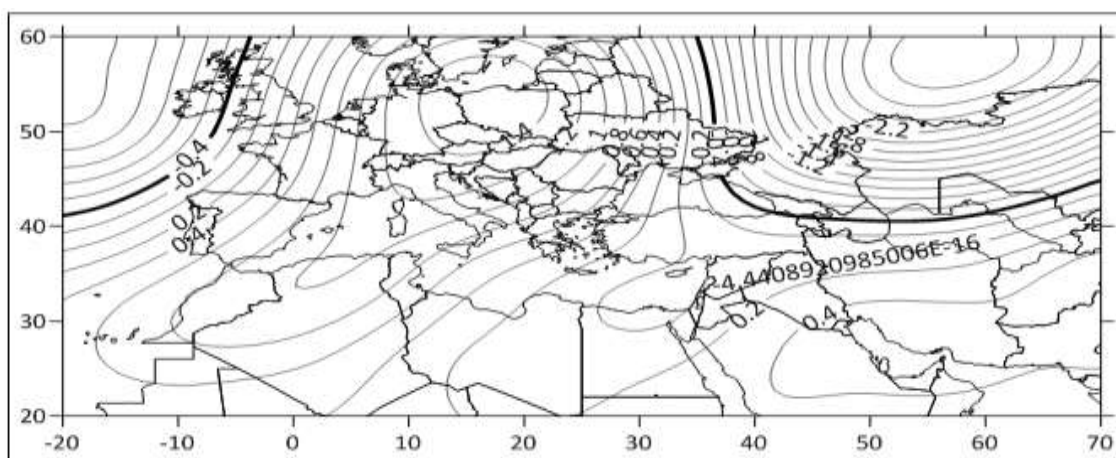
از بین ۱۷۷ روز بارش سنگین، روز ۱۷ نوامبر ۲۰۰۹، ۰٫۸۵ همبستگی با این الگو داشت؛ بنابراین این روز جهت بررسی موقعیت پریند تاوه قطبی انتخاب شد. سامانه تاوه قطبی در این روز دچار گسستگی شده و به چندین سلول بر روی گرینلند، شمال آمریکای شمالی و اقیانوس اطلس تقسیم شده است. پریند ۵۵۲۰ ژئوپتانسیل متر که مشخصه تاوه قطبی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای ماه نوامبر است، در این روز بر روی شمال دریای سیاه با راستای نصف‌النهاری همراه با کجی محور با کنتورهای هم‌شار در عرض‌های ۴۷ درجه شمالی و ۳۸ درجه شرقی قرار گرفته است. بسط یافتن این پریند تا عرض‌های میانی موجب شکل‌گیری ناوه با انحناى نصف‌النهاری و عمق زیاد از شمال دریای سیاه تا سوریه شده و سامانه‌های عرض‌های میانی به سمت عرض‌های جنوبی‌تر نفوذ یافته است. جابه‌جایی پریندهای تاوه قطبی به عرض‌های پایین باعث کاهش شیو نصف‌النهاری و افزایش شیو مداری و جایگزینی الگوی نصف‌النهاری با الگوی مداری در سامانه‌های عرض‌های میانی شده است؛ از این رو سامانه‌های کم‌ارتفاع و پرارتفاع مستقر در عرض‌های میانی به حالت شمالی-جنوبی تغییر یافته و بلوکینگ شکل گرفته است. وجود پرارتفاع حاصل از بادهای گرم عرض‌های پایین در اروپا و پرارتفاع واقع در شمال شرق ایران با ایجاد جریان‌های جبهه‌ای باعث شده است شمال غرب ایران که در معرض تاوایی مثبت و ناپایداری شدید حاصل از آن قرار دارد، بارش‌های شدیدی را تجربه کند (شکل ۳-الف). بررسی نقشه فشار تراز دریا نشان می‌دهد که در این روز، چندین مرکز فشار، شامل کم‌فشار اقیانوس اطلس با چندین هسته (۹۹۲۵ هکتوپاسکال)، کم‌فشار عراق (۱۰۱۰ هکتوپاسکال)، کم‌فشار شمال روسیه (۱۰۰۲ هکتوپاسکال)، پرفشار آسیا (۱۰۴۰ هکتوپاسکال)، وجود داشته است. کم‌فشار مستقر در عراق که از نوع ادغامی کم‌فشار حرارتی دینامیکی سودان و عربستان است و از روزهای قبل با حرکتی هم‌گرا بر روی کشور عراق ادغام شده، منطبق با مرکز چرخندی سطوح میانی وردسپهر است و زبانه‌های آن در راستای جنوبی-شمالی با کجی محور تا شمال کشور عراق پیشروی کرده است. این زبانه‌ها با عبور از دریاهای گرم و مرطوب جنوبی شرایط هم‌گرایی ترازهای پایین و به تبع آن واگرایی سطوح میانی را تقویت کرده و باعث شده است شمال غرب ایران که مابین زبانه‌های کم‌فشار ادغامی و پرفشار سرد خزری واقع شده، شرایط دوگانه‌ای را در جریان هوا تجربه کند. این شرایط ناپایداری و جبهه‌ای در سطح زمین، منطقه شمال غرب ایران را برای رخداد یک روز بارشی سنگین و فراگیر آماده کرده است (شکل ۳-ب).



شکل ۳-الف. نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل برای سطح فشار ۵۰۰ هکتوپاسکال؛ ۳-ب. فشار تراز دریا

مؤلفه دوم

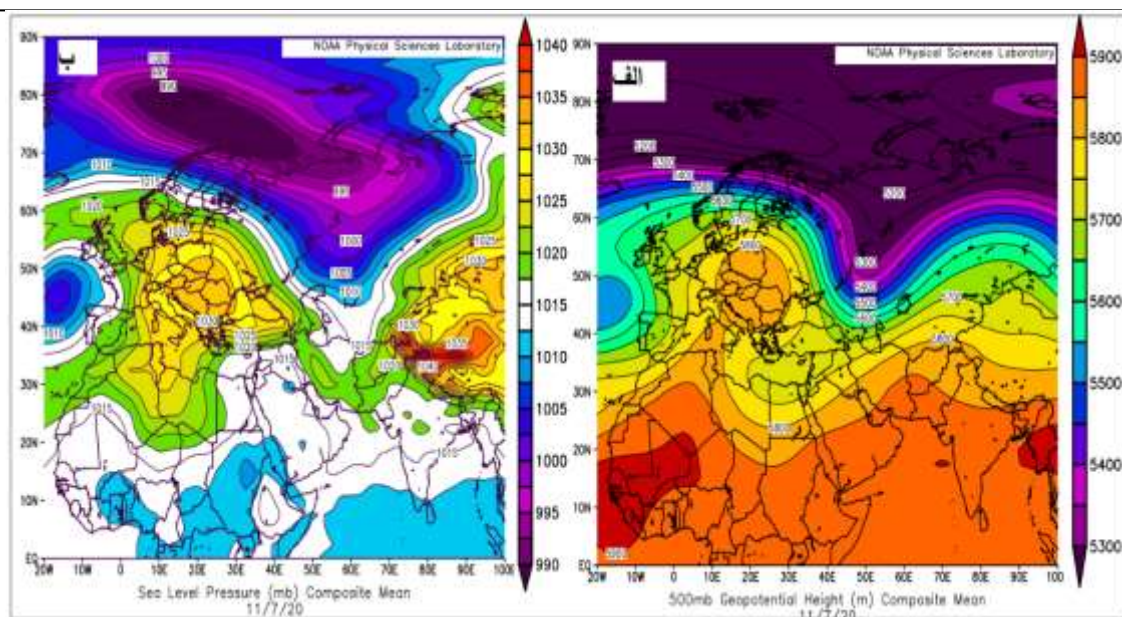
مؤلفه دوم ۲۲,۵ درصد از تغییرات داده‌ها را تبیین می‌کند. آرایش مکانی این مؤلفه نشانگر یک پراتفاح گسترده است که هسته مرکزی آن در شمال اروپا است و زبانه‌های آن با گسترش به سمت شمال شرق، غرب دریای سیاه و مدیترانه را تحت تأثیر قرار داده است. در این مؤلفه، یک هسته کم‌ارتفاع در غرب روسیه استقرار یافته است. با پیشروی این کم‌ارتفاع به سمت عرض‌های پایین‌تر، ضمن اینکه در نیمه شمالی ایران تأثیر گذاشته، پربند آن تا شرق دریای مدیترانه کشیده شده و موجب شکل‌گیری ناوه شده است (شکل ۴).



شکل ۴. نقشه الگوی مکانی بارهای عاملی مؤلفه دوم

روز نماینده برای الگوی دوم

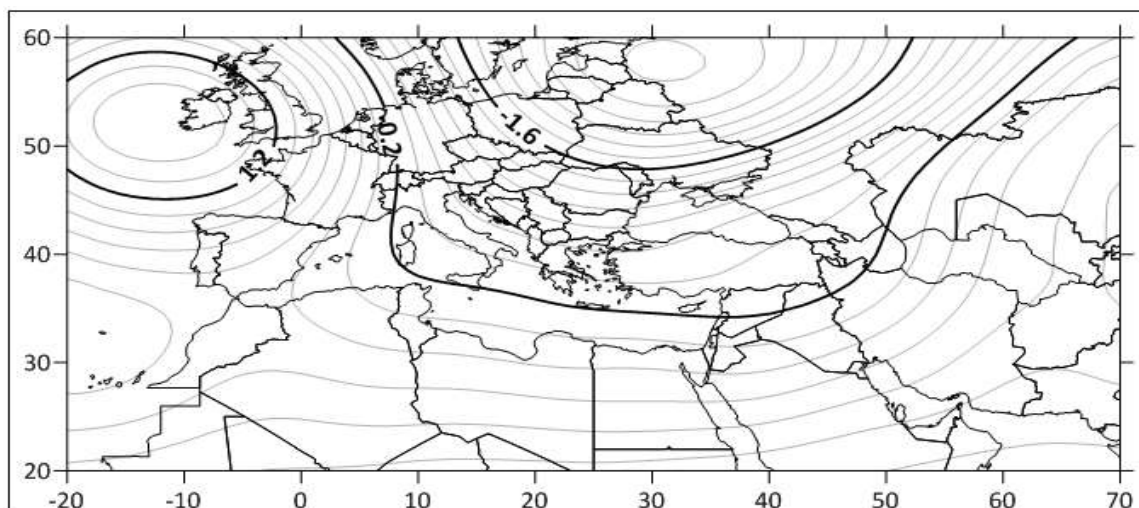
روز ۷ نوامبر ۲۰۲۰، با ۰,۸۷ هم‌بستگی با الگوی دوم، به‌عنوان نماینده، برای بررسی پربند معرف تاوه انتخاب شد. در شکل ۵-الف تاوه از لحاظ موقعیت مکانی با یک هسته قوی در شمال روسیه نزدیک کلاهدک قطبی، بر روی عرض ۸۰ درجه شمالی قرار گرفته است. این تاوه با الگوی چرخشی پادساعت‌گرد، به‌دلیل کژفشاری زیادی که دارد، باعث نفوذ هوای سرد و خشک به عرض‌های پایینی و شکل‌گیری ناوه روی دریای خزر شده است. پربند ۵۵۲۰ ژئوپتانسیل‌متر که مشخصه تاوه قطبی برای این ماه است، با انحنای نصف‌النهاری و عمق زیاد با کنتورهای هم‌شار بدون کجی محور در عرض ۴۶ درجه شمالی در شمال دریای خزر دیده می‌شود. افزایش تاوایی پتانسیل در شمال دریای خزر و ریزش هوای سرد در سردچال‌ها باعث عمیق‌تر شدن کم‌فشار بریده و شکل‌گیری بلوکینگ شده است. استقرار پراتفاح در اروپا باعث شده است هوای سرد در شمال غرب ایران از طریق نیمه شرقی فراز اروپا سرازیر شود. پرفشار شرق ایران نیز با فرارفت هوای گرم و مرطوب باعث ایجاد تاوایی مثبت و ناپایداری در شمال غرب ایران شده است. در نقشه تراز دریا چندین مرکز فشار، شامل کم‌فشار گرینلند (۹۸۸۰ هکتوپاسکال)، کم‌فشار اطلس (۱۰۰۸ هکتوپاسکال)، پرفشار آسیا (۱۰۳۶ هکتوپاسکال) و پرفشار اروپا (۱۰۲۸ هکتوپاسکال)، وجود داشت. زبانه پرفشار سرد سیبری که مرکز آن در آسیا است و از شرق ایران تا شمال روسیه کشیده شده، باعث انتقال هوای سرد به شرق ایران گردیده است. سلول پرفشار دیگری نیز که بر روی اروپا بسته شده، ضمن گسترش به سمت عرض‌های پایین‌تر، باعث انتقال رطوبت دریای مدیترانه و سیاه به سمت شمال غرب ایران گردیده است. شکل‌گیری کم‌فشار سودانی و گسترش آن در عربستان، عراق و غرب ایران باعث تقویت و تشدید شیو فشاری و دمایی شده است و این فرایند سبب شده که شمال غرب ایران روز پربارش را تجربه کند (شکل ۵-ب).



شکل ۵-الف. ارتفاع ژئوپتانسیل برای سطح فشار ۵۰۰ هکتوپاسکال؛ ۵-ب. نقشه فشار تراز دریا

مؤلفه سوم

مؤلفه سوم ۲۱,۱ درصد از تغییرات داده‌ها را تبیین می‌کند و نشانگر یک هستهٔ پرارتفاع در شرق اقیانوس اطلس است که زبانه‌های آن غرب اروپا را به سیطره درآورده است. در این مؤلفه، یک هستهٔ کم‌ارتفاع بر روی غرب روسیه قرار گرفته است. پربندهای این کم‌فشار ضمن پوشش دادن شمال اروپا و قسمت‌هایی از مرکز روسیه، با گسترش به سمت جنوب تمامی وسعت اروپای مرکزی و شرقی و شمال غرب ایران تا دریای مدیترانه نفوذ یافته است (شکل ۶).

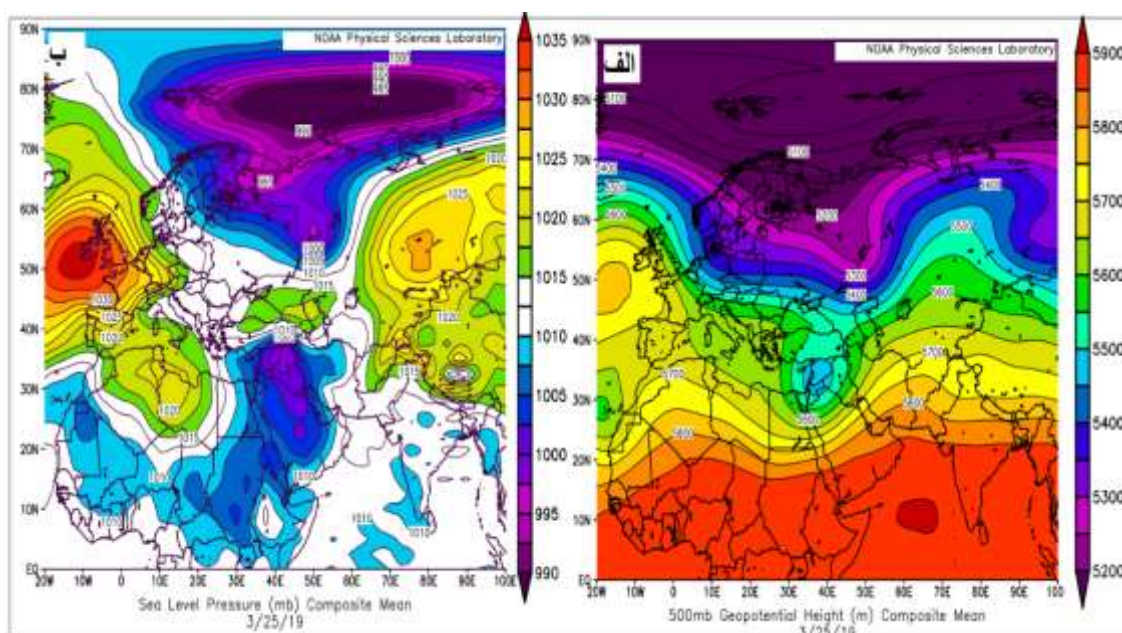


شکل ۶. نقشه الگوی مکانی بارهای عاملی مؤلفه سوم

روز نماینده برای الگوی سوم

روز ۲۵ مارس ۲۰۱۹، ۰,۸۶ هم‌بستگی با الگوی سوم داشت؛ بنابراین این روز برای بررسی پربند معرف تاوه قطبی انتخاب شد. در شکل ۷-الف، زبانهٔ تاوه قطبی بر روی شمال اروپا مستقر شده است. پربند معرف تاوه قطبی که فشار ۵۵۲۰ ژئوپتانسیل‌متر است، در عرض ۳۰ درجهٔ شمالی و ۳۸ درجهٔ شرقی در شرق دریای مدیترانه قرار گرفته و حد جنوبی ناوه

با محور شمالی-جنوبی تا شمال عربستان گسترش یافته است. مرکز چرخند در این الگو بیشترین نفوذ را از نظر عرض جغرافیایی در میان الگوهای دیگر دارد. با نفوذ آشفتگی‌های سطوح بالا به بخش‌های پایینی، سامانه‌های کم‌ارتفاع و پراارتفاع در عرض‌های میانی تغییر حالت داده و ناهه‌های مداری کشیده در عرض‌های میانی شکل گرفته است. افزایش تاوایی پتانسیل باعث گسترش و نفوذ ناهه‌ها به عرض‌های پایین‌تر تا شرق دریای مدیترانه گردیده است. قرارگیری محدوده مورد مطالعه در شرق ناهه که بیشترین چرخندگی و جریانات صعودی و ناپایدار را دارد، باعث بارش سنگین شده است.

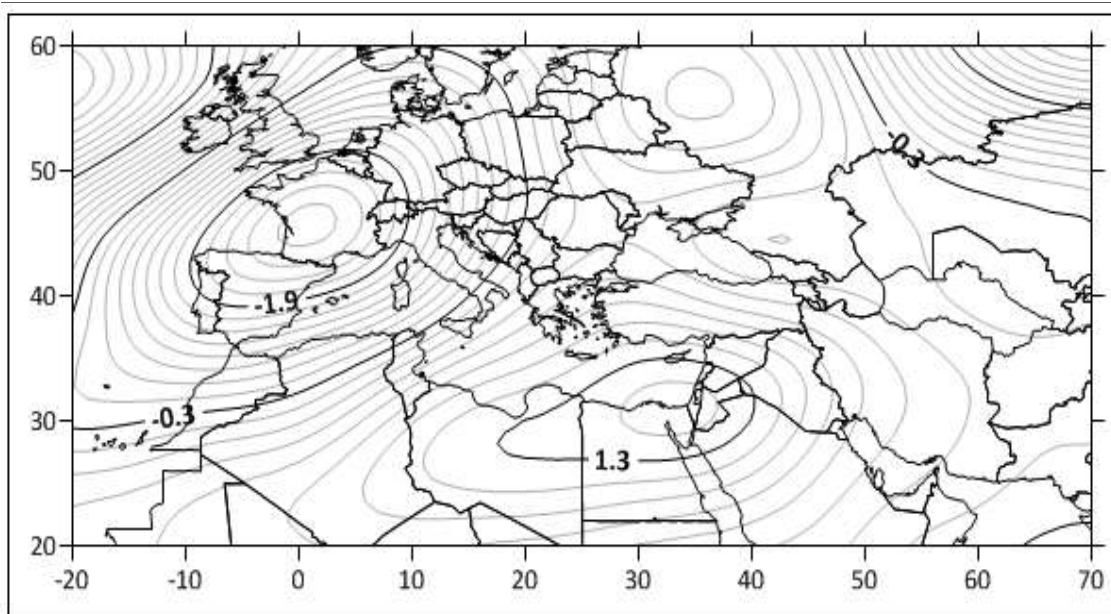


شکل ۷-الف. نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل برای سطح فشار ۵۰۰ هکتوپاسکال؛ ۷-ب. فشار تراز دریا

بررسی نقشه فشار سطح دریا در این روز نیز نشان از یکپارچگی مراکز کم‌فشار از روی سودان تا شمال غرب ایران است. در این روز، هسته کم‌فشار با فشار ۱۰۰۸ هکتوپاسکال بر روی شمال عراق قرار گرفته است. سلول پرفشار مستقر در شرق اطلس که تا شمال آفریقا و غرب اروپا و مدیترانه کشیده شده است، هوای گرم و مرطوب را به داخل کم‌فشار سودانی انتقال می‌دهد و موجب ایجاد شیو فشاری و شرایط جبهه‌ای با کژفشاری شدید می‌شود که با تقویت کم‌فشار سودانی و دینامیکی شدن آن، منطقه شمال غرب ایران ناپایداری را تجربه می‌کند (شکل ۷).

مؤلفه چهارم

این مؤلفه ۴٫۴ درصد از تبیین داده‌ها را برعهده دارد. الگوی مکانی بارهای عاملی این مؤلفه بیانگر دو هسته پراارتفاع است که هسته یکی از آن‌ها بر روی شمال دریای سرخ و شرق مدیترانه است و زبانه‌های شرقی آن قسمت‌های شمال غرب ایران را تحت‌تأثیر قرار داده و هسته پراارتفاع دیگر آن بر روی غرب روسیه قرار گرفته و پربندهای آن تا عرض‌های جنوبی کشیده شده است. دو هسته کم‌ارتفاع نیز در این مؤلفه وجود دارد که هسته یکی از آن‌ها بر روی شمال شرق روسیه و دریای بارتندر است و زبانه‌های آن تا آسیای مرکزی کشیده شده و شرق دریای خزر را متأثر کرده است. هسته کم‌ارتفاع دیگر نیز در غرب اروپا واقع شده و پربندهای آن با حرکت شرق سو تا اروپای مرکزی کشیده شده است (شکل ۸).

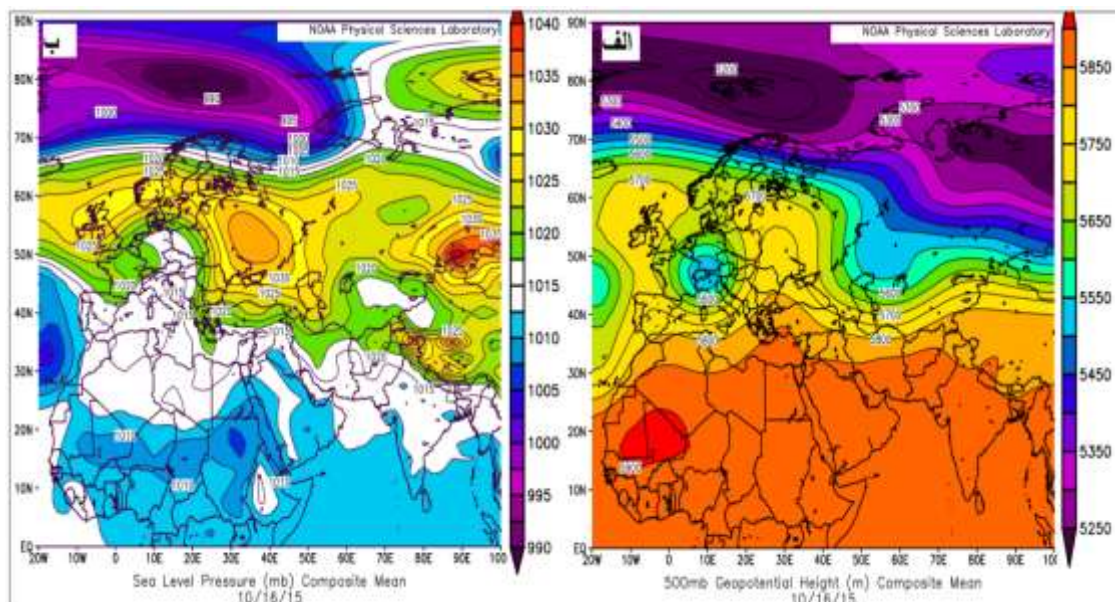


شکل ۸. نقشه الگوی مکانی بارهای عاملی مؤلفه چهارم

روز نماینده برای الگوی چهارم

روز ۱۶ اکتبر ۲۰۱۵، به دلیل همبستگی زیاد با این الگو، برای بررسی موقعیت پربند تاوۀ قطبی انتخاب شد. در شکل ۹الف، تاوۀ قطبی به چندین هسته کم ارتفاع در بالاتر از عرض ۶۵ درجه با فشار مرکزی ۵۲۰۰ بر روی روسیه و گرینلند تقسیم شده است. پربند ۵۵۸۰ ژئوپتانسیل متر که مشخصه تاوۀ قطبی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای ماه اکتبر است، در این روز با راستای نصف النهاری همراه با کجی محور در عرض های ۵۵ درجه شمالی و ۵۲ درجه شرقی بین خزر و بالخاش بر روی قزاقستان قرار گرفته است. هسته کم ارتفاع دیگری نیز در غرب دریای مدیترانه با پربند ۵۵۸۰ ژئوپتانسیل متر شکل گرفته، اما پربند واقع شده بر روی قزاقستان نزدیک ترین موقعیت را به کشور و منطقه مورد بررسی دارد؛ از این رو اثرات آن نیز بیشتر است. با جابه جایی تاوۀ قطبی نسبت به موقعیت متوسط خود و قرارگیری هسته آن در عرض ۶۵ درجه شمالی، با افزایش کثافتی تاوایی پتانسیل، دارای آنومالی مثبت بالایی است؛ بنابراین باعث فرود هوای سرد و خشک به عرض های پایینی می شود. این فرود ضمن موج کردن بادهای غربی، باعث شده است سامانه ها از حالت شرقی و غربی به حالت شمال شرقی و جنوب غربی تغییر یابند؛ لذا با افزایش شیو فشاری علاوه بر شکل گیری ناوه بین خزر و بالخاش (که با فرارفت هوای سرد از مناطق قطبی بر روی شمال دریای خزر، موجب شار رطوبت و تزریق رطوبتی به عرض های پایین تر شده است)، چندین ناوه دیگر از آسیای مرکزی تا غرب اروپا شکل گرفته و بلاکینگی امگا بر روی اروپا ظاهر شده است. استقرار این پشته بر روی اروپا و پشته دیگر در شرق ایران باعث شده است شمال غرب ایران که در جنوب شرق پشته اروپا قرار گرفته، با چرخندزایی و تشدید شیو فشار و افزایش واگرایی بارش سنگینی را تجربه کند. در شکل ۹ب، زنجیره یکپارچه ای از سامانه های پرفشار بر روی آسیا و اروپا گسترش یافته و باعث انتقال هوای مرطوب دریای خزر و دریای سیاه به سمت عرض های پایین تر شده است. هسته یک سلول کم فشار نیز بر روی سودان بسته شده و زبانه های آن به طرف عرض های شمالی تر کشیده شده و رطوبت آب های دریای سرخ و عرب را به سمت عرض های بالاتر تا عراق و غرب ایران گسترش داده است. نفوذ زبانه هایی از دریای عمان و خلیج فارس و دریای مدیترانه به این مناطق رطوبت بسیار زیادی را تزریق کرده و باعث تقویت شرایط هم گرایی عرض های

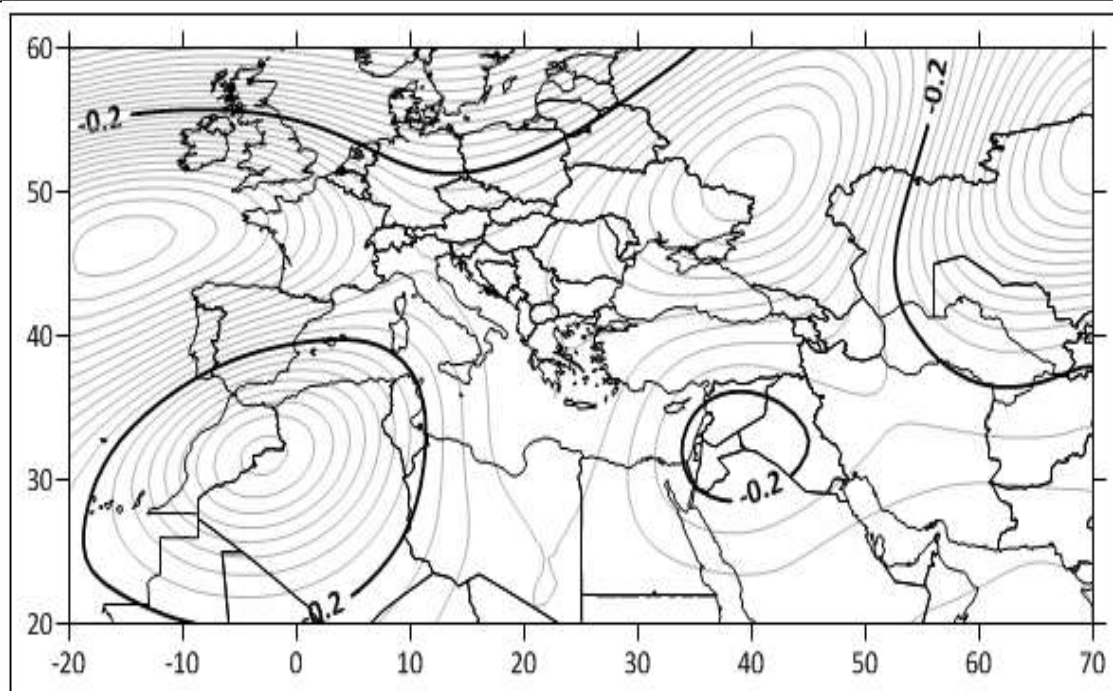
پایین و به تبع آن واگرایی عرض‌های میانی شده است؛ لذا شمال غرب ایران که مابین زبانه‌های کم‌فشار ادغامی و پرفشار خزر قرار گرفته، بارش‌های سنگینی را تجربه می‌کند.



شکل ۹-الف. نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل برای سطح فشار ۵۰۰ هکتوپاسکال؛ ۹-ب. فشار تراز دریا

مؤلفه پنجم

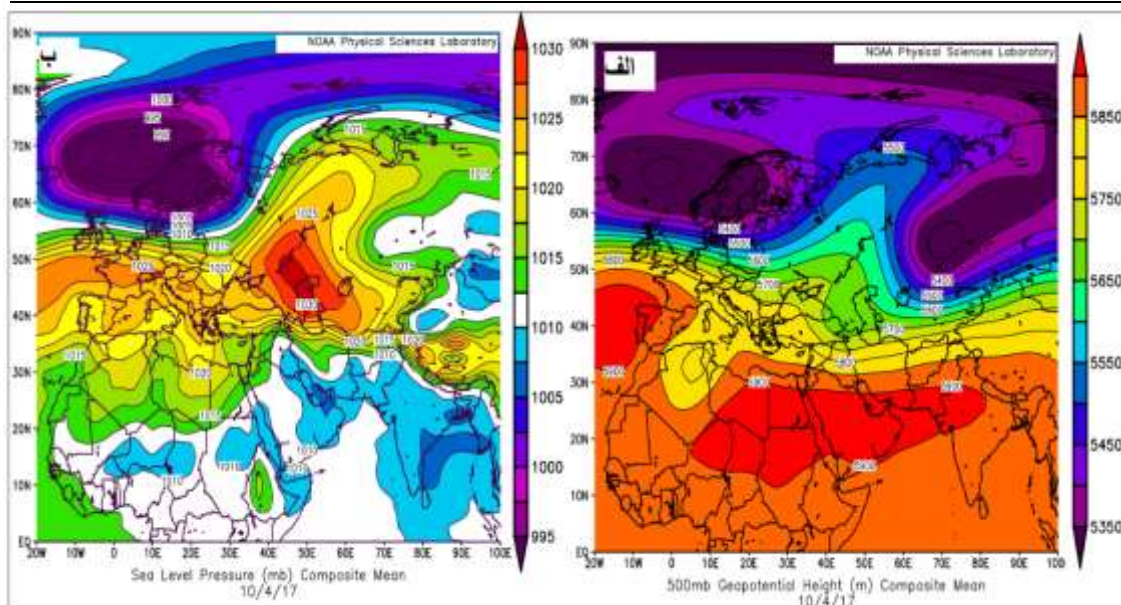
مؤلفه پنجم ۳,۶ درصد از تبیین داده‌ها را نشان می‌دهد. الگوی مکانی بارهای عاملی این مؤلفه سه هسته پراکنده دارد: اولی در روسیه است و زبانه‌های آن نیمه شمالی ایران را تحت تأثیر قرار داده، هسته دوم در شمال آفریقا است و تا غرب مدیترانه کشیده شده و هسته سوم در شمال عربستان قرار گرفته است. همچنین دو هسته کم‌ارتفاع دارد: یکی بر روی جنوب غرب روسیه است و پربندهای جنوبی آن تا شمال غرب ایران کشیده شده و کم‌ارتفاع دیگر نیز بر روی شرق اطلس واقع شده و قسمت‌های غرب روسیه را تحت تأثیر قرار داده است.



شکل ۱۰. نقشه الگوی مکانی بارهای عاملی مؤلفه پنجم

روز نماینده برای الگوی پنجم

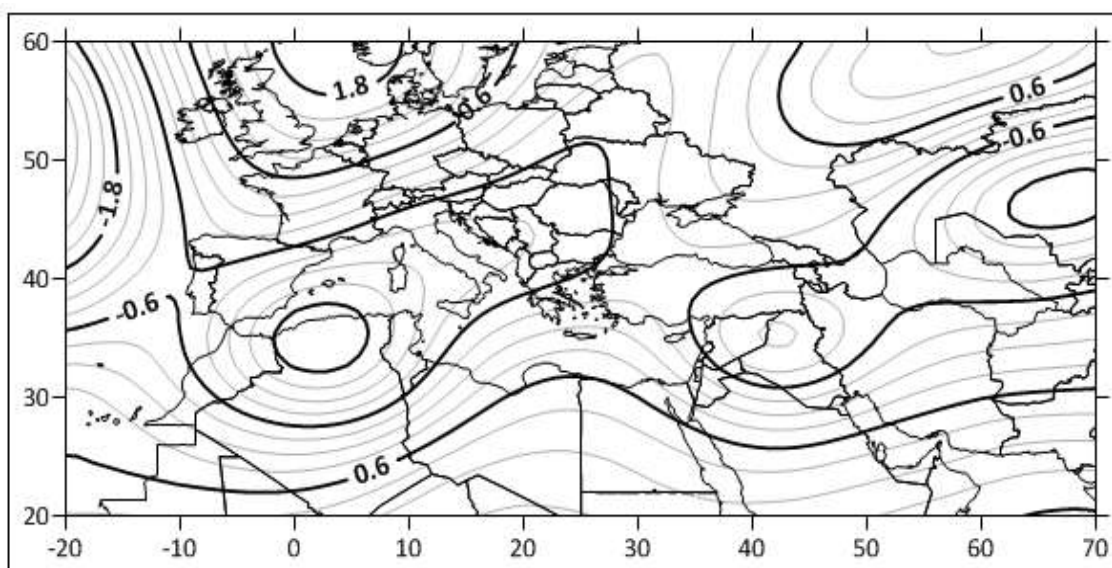
روز ۴ اکتبر ۲۰۱۷، به دلیل هم‌بستگی زیاد با این الگو، جهت بررسی موقعیت پربند تاوه قطبی انتخاب شد. در شکل ۱۱الف، ساختار تاوه قطبی از هم گسسته و به چندین سلول تقسیم شده است. تغییر حالت در ساختار تاوه موجب کشیده شدن زبانها تا عرض‌های ۵۲ درجه شمالی و ۶۵ درجه غربی تا آسیای مرکزی شده است. پربند معرف تاوه قطبی بر روی ازبکستان با فشار ۵۵۸۰ هکتوپاسکال در عرض ۴۱ درجه شمالی و ۶۲ درجه شرقی قرار گرفته است. تضعیف تاوه قطبی موجب شده است این پربند فرودی عمیق با راستای شمال شرقی-جنوب غربی بر روی آسیای مرکزی داشته باشد و باعث شکل‌گیری ناوهای تک‌دامنه و بلاکینگ رکس شود. با توجه به اینکه بلاکینگ بر روی شمال خزر شکل گرفته، با سرازیر شدن هوای سرد از روی عرض‌های جغرافیای بالاتر به منطقه مورد مطالعه که در جنوب شرقی محور سیستم بلاکینگ و فرارفت هوای گرم و مرطوب قرار دارد، ناپایداری و بارش در منطقه ایجاد شده است. در شکل ۱۱ب، زنجیره یکپارچه‌ای از سامانه‌های پرفشار بر روی دریای مدیترانه، اروپا، شمال روسیه و آسیای مرکزی که هسته آن بر روی شمال دریای خزر و اطراف آن است، گسترش یافته و هوای سرد و مرطوب عرض‌های شمالی را بر روی نیمه شمالی ایران سرازیر کرده است. هسته یک سلول کم‌فشار نیز بر روی خلیج فارس بسته شده و زبان‌های آن به طرف عرض‌های شمالی‌تر کشیده شده است. این کم‌فشار رطوبت آب‌های عمان و غرب اقیانوس هند و خلیج فارس را به درون کم‌فشار سودانی و غرب ایران انتقال می‌دهد. با ورود این جریان‌ها به شمال غرب ایران، شرایط کژفشاری خوبی برای ایجاد اغتشاشات بارش فراهم می‌شود؛ لذا این منطقه بارش شدیدی را تجربه می‌کند.



شکل ۱۱-الف. نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل برای سطح فشار ۵۰۰ هکتوپاسکال؛ ۱۱-ب. فشار تراز دریا

الگوی ششم

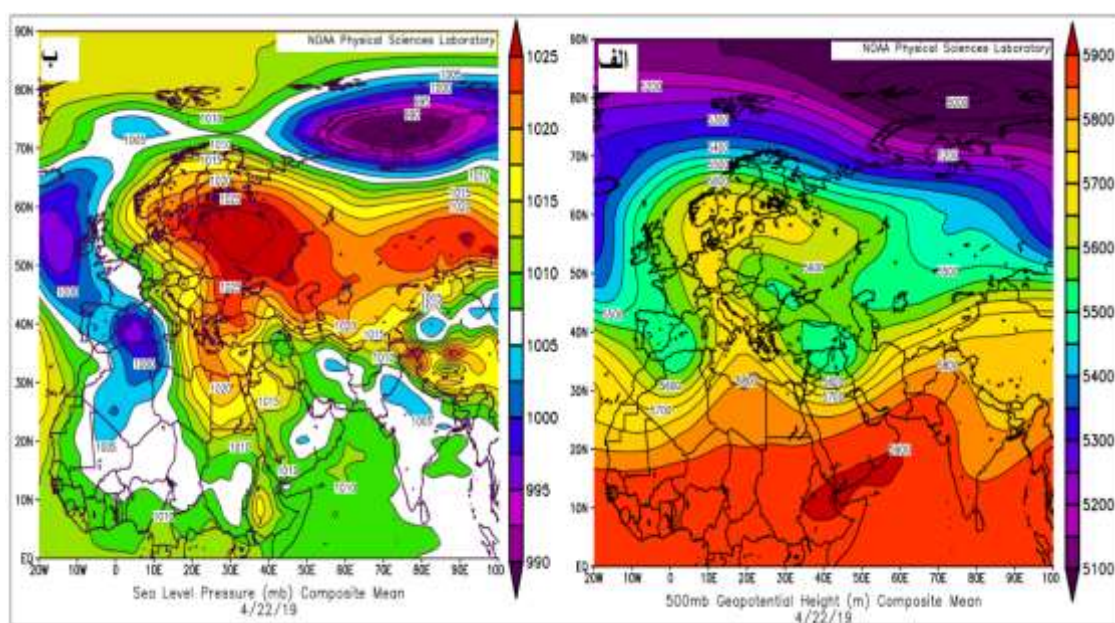
این مؤلفه فقط ۳٫۵ درصد از تبیین داده‌ها را برعهده دارد و کم‌اثرترین مؤلفه در بین مؤلفه‌های یادشده است. الگوی مکانی بارهای عاملی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال این مؤلفه یک مرکز پرارتفاع را بر روی اقیانوس اطلس و چهار مرکز کم‌ارتفاع را نشان می‌دهد که بر روی قزاقستان واقع شده و زبانه‌های شمال و شمال غرب ایران را تحت تأثیر قرار داده است. ادامه این زبانه‌ها منتهی به هسته کم‌ارتفاع دیگری شده که بر روی عراق قرار گرفته است. همچنین هسته پرارتفاع دیگری یکی بر روی شرق اطلس و دیگری شمال آفریقا قرار گرفته است (شکل ۱۲).



شکل ۱۲. نقشه الگوی مکانی بارهای عاملی مؤلفه ششم

روز نماینده برای الگوی ششم

روز ۲۲ آوریل ۲۰۱۹ برای نمایندگی این الگو انتخاب شد. سامانه تاوه قطبی در این روز دارای یک مرکز قوی است که بر روی دریای کارا در عرض ۸۰ درجه شمالی و ۴۰ درجه شرقی با فشار ۵۰۳۰ قرار گرفته است. پربند معرف تاوه قطبی که فشار ۵۵۸۰ است، پربند معرف تاوه قطبی با فشار ۵۵۸۰، در عرض ۳۱ درجه شمالی و ۴۲ درجه شرقی بر روی شمال عربستان قرار گرفته است. نفوذ پربندهای معرف تاوه قطبی باعث عمیق تر شدن ناوه واقع بر روی شرق مدیترانه و عراق و موجب توسعه جنوب محور ناوه تا شمال عربستان شده است. کشیدگی پربند معرف تاوه قطبی با موج کردن بادهای غربی باعث شده سامانه های کم ارتفاع و پر ارتفاع بر روی این منطقه از حالت شمالی-جنوبی به جنوب غربی-شمال شرقی تغییر یابد و بلاکینگ امگایی شکل گیرد. در این روز، ناوه های پر دامنه زنجیره وار از غرب مدیترانه تا آسیای مرکزی کشیده شده اند. نزدیک ترین ناوه به شمال غرب ایران، در غرب کشور قرار گرفته است و دریای مدیترانه نقش عمده ای در تزریق رطوبت به این ناوه دارد. استقرار پشته های عظیم ارتفاعی واقع در اروپا با سرازیر کردن هوای سرد قطبی از یال غربی ناوه و پشته واقع در شرق ایران نیز با فرارفت هوای گرم و مرطوب از طریق یال شرقی ناوه، شرایط را برای جریان های جبهه ای قوی و تقویت واگرایی و صعود هوا فراهم کرده است. قرارگیری شمال غربی ایران در جلوی ناوه باعث شده است تحت تأثیر این ناپایداری ها بارش های سنگینی را تجربه کند (شکل ۱۳-الف). در این روز، زبانه ای از کم فشار سیبری با دو هسته بر روی غرب مدیترانه و شرق اطلس گسترش می یابد و رطوبت چشمگیری را به سمت عرض های پایین تر سرازیر می کند. هسته کم فشار دیگری بر روی شرق ایران و هند شکل می گیرد و رطوبت اقیانوس هند را به داخل این کم فشار تزریق می کند. با گسترش زبانه کم فشار سودانی به سمت عرض های بالاتر و یکپارچه شدن آن، رطوبت آب های عمان و خلیج فارس و دریای عرب به داخل کم فشار سودانی و جنوب ایران انتقال می یابد. حضور زبانه ای از پرفشار آرزو که مرکزش در شمال اروپا بسته شده و تا آسیا و شرق مدیترانه کشیده شده، موجب گردیده هوای مرطوبی در عرض های پایین سرازیر کند. لذا منطقه شمال غرب ایران که بین دو سیستم فشار قرار گرفته است، شرایط جبهه ای و کژفشاری شدیدی را تجربه می کند (شکل ۱۳-ب).



شکل ۱۳-الف. نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل برای سطح فشار ۵۰۰ هکتوپاسکال؛ ۱۳-ب. فشار تراز دریا

بحث

بارش‌های روزانه فرین بالا در هر نقطه، به بارش‌های نادر و نابهنجاری گفته می‌شود که بالاتر از میانگین بلندمدت آن نقطه باشد. برای شناسایی بارش‌های فرین بالا معیارهای متفاوتی وجود دارد. از آنجا که میزروی (۲۰۰۰) در مطالعه خود در مورد شرق فرانسه بارش روزانه ۲۰ میلی‌متر و بالاتر را معیاری برای شناسایی فرین بالا معرفی کرده است، برای شناسایی بارش فرین شمال غرب ایران نیز از بارش ۲۰ میلی‌متر و بالاتر استفاده شد. با توجه به اینکه دوره مرطوب در این منطقه از کشور از پاییز تا بهار است و تابستان کمابیش خشک است، بررسی روند بارش فرین شمال غرب کشور نشان می‌دهد که بیشینه بارش فرین در ماه آوریل و کمترین آن در ماه آگوست بوده است. در دهه‌های اخیر، بارش فرین بالا روند افزایشی داشته است. بررسی مطالعات انجام‌شده در زمینه بارش‌های فرین حاکی از این است که در طول زمان، حد این بارش‌ها تغییر کرده است. عواملی همچون گرمایش جهانی، تغییرات دما و نوسانات سطح آب اقیانوس‌ها در کاهش یا افزایش حد بارش‌های روزانه اثرگذار بوده است (بارچیکوفسکا^۱ و همکاران، ۲۰۱۹؛ پاپالکسیو^۲ و همکاران، ۲۰۱۷؛ داس^۳ و همکاران، ۲۰۱۸).

یافته‌های مقاله مرادی (۱۳۹۰)، برهانی (۱۳۹۹) و محمدی (۱۳۹۹) نشان داده است که در بیشتر موارد با توجه به پیوستگی پدیده‌ها، در کنش‌های جوی علاوه بر ورود سپهر، پوشش سپهر نیز در وقوع بارش‌های فرین بالا نقش دارد. با توجه به اینکه برجسته‌ترین ویژگی پوشش سپهر تاوه قطبی است، موقعیت قرارگیری آن و پربندهای آن در روزهایی که حد بارش از ۲۰ میلی‌لیتر فراتر رفته، متفاوت‌تر از سایر رخدادهای معمولی بارش در سطح منطقه است. با جابه‌جایی تاوه قطبی نسبت به موقعیت متوسط خود، پربند معرف تاوه قطبی تا نزدیکی شمال غرب ایران (عمدتاً بین دریای سیاه و خزر و شمال دریای خزر) کشیده می‌شود و به شکل‌گیری ناوه می‌انجامد. لذا با افزایش تاوایی پتانسیل و نفوذ این پربندها به بخش‌های پایینی، الگوهای نصف‌النهاری با ایجاد ناپایداری جایگزین الگوهای مداری می‌شود.

ویژگی مهم درباره رخداد بارش‌های روزانه فرین بالا که در پژوهش‌های قبلی به‌طور دقیق بررسی نشده، همدید موقعیت تاوه قطبی است. با بررسی رفتار همدید تاوه قطبی، شش مؤلفه اصلی که تغییرات مکانی تاوه قطبی را نشان می‌دهد، شناسایی شد. در مؤلفه اول که در مسافت دورتری از کشور ایران قرار گرفته، پربند معرف تاوه قطبی از غرب اروپا تا دریای سیاه کشیده شده است و عمده رطوبت آن از دریای سیاه تأمین می‌شود. در مؤلفه دوم، ناوه‌ها با موقعیت خزری و انحنای نصف‌النهاری و عمق زیاد است و چندین منبع در تأمین رطوبت نقش دارد. در مؤلفه سوم، ناوه‌ها با موقعیت مدیترانه‌ای و انحنای مداری با عمق کمتر دیده می‌شود. در مؤلفه چهارم، ناوه‌ها عموماً دو دامنه با اتصال زنجیروار از آسیای مرکزی تا غرب آسیا کشیده شده‌اند و رطوبت مورد نیاز این ناوه‌ها از چندین منبع تأمین می‌شود. مؤلفه پنجم، در شرق دریای خزری عموماً دو دامنه و در مسافت دورتری از کشور قرار گرفته است. مؤلفه ششم با ناوه‌های چند دامنه در شرق مدیترانه قرار دارد. با اینکه تفاوت الگوها بسیار بوده است و منابع مختلفی در تأمین رطوبت نقش دارد، اما یکی از ویژگی‌های مشترک تمامی الگوها در تراز میانی جو در هنگام رخداد بارش‌های فرین بالا، تضاد حرارتی شدید به‌علت فعالیت دو نوع توده هوا با ماهیت دمایی و منشأ متفاوت است. این تضاد دمایی به‌وجودآمده ناشی از ناوه و پشته‌های عظیم ارتفاعی واقع در اروپا و دریای مدیترانه و شرق ایران است که با سرازیر کردن هوای سرد قطبی از یال غربی ناوه و پشته واقع در شرق ایران و دریای عرب نیز با فرارفت هوای گرم و مرطوب از طریق یال شرقی ناوه، شرایط را برای جریان‌های

1. Barcikowska

2. Papalexioiu

3. Das

جبهه‌ای قوی و تقویت واگرایی و صعود هوا مهیا کرده است. این نتایج با یافته‌های پژوهش محمدی (۱۳۹۹) برای حوضه آبریز قره‌سو کرمانشاه و نتایج علی‌دادی (۱۳۸۹) برای غرب میانه ایران در ارتباط با نقش موقعیت تاوه در شرق مدیترانه، همسو بود.

نتیجه‌گیری

به‌منظور نمایش ردپای تاوه قطبی در بارش‌های فرین ایستگاه‌های اردبیل، تبریز، ارومیه، خوی، میانه و پارس‌آباد تاوه قطبی مورد تحلیل زمانی-مکانی قرار گرفت. ابتدا برای بررسی همگنی یا ناهمگنی داده‌ها و مشخص کردن نقاط جهش و تغییر سری زمانی بارش ایستگاه‌ها از آزمون نرمال استاندارد مطلق استفاده شد و همگنی داده‌های ایستگاه‌های مذکور تأیید گردید. سپس معناداری روند بارش هر سه ایستگاه ذکرشده با روش رگرسیون خطی مورد آزمون قرار گرفت. یافته‌های پژوهش نشان داد که روند کلی بارش در ایستگاه‌های مذکور، به‌جز پارس‌آباد و اردبیل، روند معناداری نداشت. بررسی روزهای دارای بارش سنگین حاکی از این بود که ایستگاه ارومیه با ۶۱ روز بیشترین و میانه با ۲۰ روز کمترین بارش سنگین را در طی ۲۱ سال داشته است. تحلیل موقعیت تاوه قطبی به روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی با ماتریکس ۱۷۷×۶۲۹ نمودار این است که ۱۷۷ روز بارش سنگین تحت ۶ الگوی کلی رخ می‌دهد. الگوی اول ۳۴ درصد، الگوی دوم ۲۲٫۵ درصد، الگوی سوم ۲۱٫۱ درصد، الگوی چهارم ۴٫۴ درصد، الگوی پنجم ۳٫۶ درصد و الگوی ششم ۳٫۵ درصد واریانس داده‌ها را به خود اختصاص داده است. بیشترین روزهای بارش سنگین با شکل‌گیری الگوی اول (موقعیت دریای سیاه) رخ داده است و کمترین بارش‌های سنگین نیز در الگوی ششم (شرق مدیترانه) دیده می‌شود. تحلیل موقعیت تاوه قطبی در ۱۷۷ روز بارش سنگین نشان داد که ویژگی مشترک در بیشتر الگوهای مختلف موقعیت تاوه قطبی در تراز میانی جو این بود که پشته‌های واقع در اروپا با سرازیر کردن هوای سرد قطبی از یال غربی ناوه و پشته واقع در عرض‌های پایین نیز با فرارفت هوای گرم و مرطوب از طریق یال شرقی ناوه، شرایط را برای جریان‌های جبهه‌ای قوی و تقویت واگرایی و صعود هوا فراهم کرده‌اند؛ اما تفاوت الگوها بسیار بوده، به‌نحوی که به‌طور مشخصی در شش الگوی (موقعیت) مختلف قرار می‌گیرد. در این تحقیق، رفتار همدید تاوه قطبی به‌صورت همدید مورد بررسی قرار گرفت تا ارتباط آن با روزهای بارشی سنگین و مخاطره‌آمیز و تأثیر کنترلی آن بر سامانه‌های همدید مقیاس واکاوی شود. لذا می‌توان آن را رویکردی نوین در مباحث اقلیم‌شناسی همدید دانست که موجب بررسی دقیق‌تر رفتار سامانه‌های گردشی جو مؤثر در بروز مخاطرات اقلیمی، به‌ویژه بارش‌های سیل‌آسا، می‌گردد.

منابع

- بازگیر، سعید؛ عباسی، فائزه؛ اسعدی اسکویی، ابراهیم؛ حقیقت، مسعود؛ رضازاده، پرویز (۱۳۹۸). تحلیل همگنی داده‌های دما و بارش در ایران با رویکرد اقلیمی. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۶(۱)، ۵۱-۷۰.
- برهانی، نجمه؛ احمدی گیوی، فرهنگ؛ محب‌الحجه، علیرضا؛ میرزائی، محمد (۱۳۹۹). بررسی ارتباط تاوه قطبی پوشش سپهری با ساختار وردایست دینامیکی در منطقه جنوب غرب آسیا همراه با دو مطالعه موردی. ژئوفیزیک ایران، ۱۴(۲)، ۱۵-۳۲.
- برارخان‌پور، صدیقه؛ قربانی، خلیل؛ سالاری جزی، میثم؛ رضایی قلعه، لاله (۱۳۹۹). مطالعه روند تغییرات فصلی و سالانه بارش با روش رگرسیون چندک (مطالعه موردی: ایستگاه هاشم‌آباد گرگان). پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۰(۳۹)، ۸۹-۱۰۴.
- پاک‌نظر، سارا (۱۳۸۳). بررسی موقعیت تاوه قطبی و اثر آن بر سرماهای شدید در شمال شرق ایران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد هواشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران.

- چنگیزی، هاجر (۱۳۹۳). بررسی اقلیم‌شناختی وردایست دینامیکی روی ایران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران.
- حسینی صدر، عاطفه؛ راشدی، شهناز؛ محمدی، غلامحسن (۱۳۹۸). تحلیل آماری رود تغییرات بارش در حوضه آبریز دریاچه ارومیه و ارتباط آن با کاهش تراز آب. سومین کنفرانس ملی هیدرولوژی ایران، تبریز. در: <https://civilica.com/doc/951015>.
- حمیدیان پور، محسن؛ خسروی، محمود (۱۳۹۸). رد پای گرمایشی جهانی در بارش‌های بهار ۱۳۹۸ غرب ایران. کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم، تهران، ۶، ۱-۱۰. در: <https://civilica.com/doc/1002746>.
- دانشور وثوقی، فرناز (۱۳۹۹). تعیین تناوب تأثیرگذار در روند سری‌های زمانی بارش و رواناب؛ مطالعه موردی: دشت اردبیل. مهندسی منابع آب، ۱۳(۴)، ۲۷-۴۲.
- عباس‌زاده آقدم، کیارا؛ محب‌الحجه، علیرضا؛ احمدی گیوی، فرهنگ (۱۳۹۳). بررسی اثرهای اقلیم‌شناختی تاوه قطبی پوشن‌سپهر در منطقه جنوب غرب آسیا. فیزیک زمین و فضا، ۴۰(۴)، ۱۲۷-۱۳۸.
- عباس‌زاده تهرانی، نادیا؛ مخدوم، مجید؛ مهدوی، محمد (۱۳۸۹). بررسی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر میزان دبی سیلاب‌ها با کاربرد فناوری سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) منطقه مورد مطالعه: حوضه آبریز رودخانه مادرسو. پژوهش‌های محیط‌زیست، ۱(۲)، ۷۸-۹۰.
- علی‌دادی، معصومه (۱۳۸۹). نقش تاوه قطبی در تعیین نوع و مقدار بارش در میانه غرب ایران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران.
- قاجارنیا، نوید؛ لیاقت، عبدالمجید؛ دانش‌کار آراسته، پیمان (۱۳۹۳). صحت‌سنجی داده‌های بارندگی ایستگاه‌های غیرثبات سازمان هواشناسی و تماب در حوضه آبریز دریاچه ارومیه. حفاظت منابع آب‌وخاک، ۴(۱)، ۹۱-۱۰۹.
- محمدی، غلامرضا؛ برنا، رضا؛ اسدیان، فریده (۱۳۹۹). تحلیل زمانی-مکانی تاوه قطبی و نقش آن در وقوع روزهای بارش روزانه فرین بالا و فراگیر حوضه آبریز قره‌سو در استان کرمانشاه. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۷(۳)، ۱۷۹-۲۰۶.
- مرادی، حمیدرضا (۱۳۸۰). تحلیل سینوپتیکی تاوه قطبی و اثرهای آن بر اقلیم ایران. رساله دکتری جغرافیای طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
- مسعودیان، سید ابوالفضل (۱۳۸۵). اقلیم‌شناسی هم‌دید و کاربرد آن در مطالعات محیطی. اصفهان: دانشگاه اصفهان.

Abbaszadeh Aghdam, K., Mohabbat al-Hajjah, A. & Ahmadiygi, F. (2015). Investigation of Climatological Effects of Stratosphere Polar Vertex in Southwest Asia. *Earth and Space Physics*, 40(4), 127-138 (In Persian).

Abbaszadeh Tehrani, N., Makhdoum, M. & Mahdavi, M. (2011). Studying the impacts of land use changes on flood flows by using remote sensing (RS) and geographical information system (GIS) techniques- a case study in dough river watershed, northeast of Iran. *Environmental researches*, 1(2), 1-14. <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=274674> (In Persian).

Alexander, L. V. et al. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Geophysical Research*, 111, 1-22.

- Alidadi, M. (2011). The role of polar vortex in determining the type and amount of precipitation in midwestern Iran. Master Thesis. Faculty of Geography, University of Tehran (In Persian).
- Baldwin, M. P., Dameris, M. & Shepherd, T. D. (2007). How will stratosphere affect climate change?. *Science*, 316(5831), 1576-1577. <https://doi:10.1126/science.1144303>.
- Bararkhanpour, S., Ghorbani, K., Salari Jazi, M. & Rezaei Ghaleh, L. (2020). Study of Seasonal and Annual Rainfall Changes with Quantile regression method (Case Study: Gorgan Hashem-Abad Station. *Journal of Climate Research*, 10(39), 89-104 (In Persian).
- Barcikowska, M. J., Weaver, S. J., Feser, F., Russo, S., Schenk, F. & Stone, D. A. (2018). Euro-Atlantic winter storminess and precipitation extremes under 1.5°C vs. 2°C warming scenarios. *Journal of Earth System Dynamics*, 9, 679-699.
- Bazgeer, S., Asadi Oskouei, E., Abbasi, F., Rezazadeh, P. & Haghghat, M. (2021). Comparative Study of Efficiency of Some Meteorological Drought Indices in Different Climate Regions of Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(11), 2751-2760. <https://doi:10.22059/ijswr.2020.301067.668581> (In Persian).
- Bing, Y. W., RenHe, Z. & D'Arrigo, R. (2008). Arctic dipole anomaly and summer rainfall in Northeast China. *Chinese Science Bulletin*, 53(14), 2222-2229.
- Borhani, N., Ahmadi-Givi, F., Mohebalhojeh, A. & Mirzaei, M. (2020). Investigation of the relationship between the stratospheric polar vortex and dynamical tropopause structure in the southwest Asia along with two case studies. *Iranian journal of Geophysics*, 14(2), 15-32. <https://doi:10.30499/IJG.2020.107465> (In Persian).
- Changizi, H. (2015). Climatic study of dynamic troposphere on Iran. Master Thesis in Geophysics, Institute of Geophysics, University of Tehran (In Persian).
- Choi, G., Robinson, D. A. & Won-Tae, W. (2009). Won-Tae Kwon, Recent Changes in the Northern Hemisphere Circumpolar Vortex, Association of American Geographers. Las Vegas, USA.
- Daneshvar Vousoughi, F. (2020). Determination of Dominant Periods in Rainfall and Runoff Time Series (Case Study: Ardabil Plain). *Water Resources Engineering*, 13(47), 27-42 (In Persian).
- Das, S., Zhu, D. & Chi-Han, C. (2018). An assessment temporal effect on extreme rainfall estimates. *PIHAS Journal*, 379, 145-150.
- Francis, J. A. & Vavrus, S. J. (2012). Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L06801, <https://doi:10.1029/2012GL051000>.
- Frauenfeld, O. W. & Davis, R. E. (2003). Northern Hemisphere circumpolar vortex trends and climate change implications. *Journal of Geophysical Research*, 108(14), 4423.
- Ghajarnia, N., Liaghat, A. & Daneshkar Arasteh, P. (2014). Verifying precipitation data of TAMAB and meteorology institute in Urmia basin. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 4(1), 91-109 (In Persian).
- Hamidianpour, M. & Khosravi, M. (2020). Traces of global warming in spring rains in western Iran in 1398. *Regional Climate Change Conference*, Tehran, 6, 1-10. <https://civilica.com/doc/1002746> (In Persian).
- Hauser, M. (2010). Cluster analysis of the polar vortex 1989 to 2009. Bachelor Thesis. Supervisor: Olivia Martius. Sebastian Schemm. Dynamical Meteorology Group.
- Haynes, P. H., McIntyre, M. E., Shepherd, T. G., Marks, C. J. & Shine, K. P. (1991). On the "downward control" of extratropical diabatic circulations by eddy-induced mean zonal forces: *Journal of the Atmospheric Sciences*, 48, 651-678.

- Hellstrom, C. (2005). Atmospheric conditions during extreme and non-extreme precipitation events in Sweden. *International Journal Climatology*, 5(25), 631-648.
- Hosseini Sadr, A., Rashedi, Sh. & Mohammadi, Gh. H. (2019). Statistical analysis of precipitation changes in the catchment area of Lake Urmia and its relationship with water level reduction. Third National Hydrology Conference of Iran, Tabriz, <https://civilica.com/doc/951015> (In Persian).
- Kidston, J., Scaife, A. A., Hardiman, S. C., Mitchell, D. M., Butchart, N., Baldwin, M. P. & Gray, L. J. (2015). Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather. *Nature Geoscience*, 8, 433-440.
- Liang, K., Liu, S., Bai, P. & Nie, R. (2015). The Yellow River basin becomes wetter or drier? The case as indicated by mean precipitation and extremes during 1961–2012. *Theor Appl Climatol*, 119, 701-722.
- Masoudian, S. A. (2007). Synoptic climatology and its application in environmental studies. Isfahan: University of Isfahan (In Persian).
- Mizrahi, F. (2000). Heavy daily Precipitation distribution in east–central France and west European meteorological patterns. *Journal of Theoretical Application Climatology*, 66, 199-210.
- Mohammadi, Gh., Borna, R. & Asadian, F. (2021). Temporal-spatial analysis of the polar vortex and its role in the occurrence of heavy and pervasive rainy days in Qarasu catchment in Kermanshah province. *Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 7(3), 179-206 (In Persian).
- Moradi, H. R. (2002). Synoptic analysis of polar vertex and its effect on Iranian climate. PhD Thesis in Natural Geography, Tarbiat Modares University (In Persian).
- Paknazar, S. (2005). Investigation of polar vortex position and its effect on severe cold in northeastern Iran. Master Thesis in Meteorology, North Tehran Azad University (In Persian).
- Papalexiou, S. M. & Montanari, A. (2017). Global and regional increase of precipitation extremes under global warming. *Water Resources Research*, 1-35.
- Pearson, K. (1895). Notes on regression and inheritance in the cases of two parents. *Proceedings of the Royal Socitey of London*, 58, 347-352. <https://doi.org/10.1098/rspl.1895.0041>
- Perlwitz, J. & Graf, H. F. (1995). The statistical connection between troposphere and stratospheric circulation of the Northern Hemisphere in winter. *Journal of Climate*, 8, 2281-2295.
- Polvani, L. M. & Waugh, D. W. (2004). Upward wave activity flux as precursor to extreme stratospheric events and subsequent anomalous surface weather regimes. *Journal of Climate*, 17, 3548-3554.
- Quiroz, R. S. (1980). Variations in zonal mean and planetary wave properties of the stratosphere and links with the troposphere. *Pure and Applied Geophysics*, 118, 416-427.
- Ren, R. C. & Cai, M. (2006). Polar vortex oscillation viewed in an isentropic potential vorticity coordinate. *Advances in Atmospheric Sciences*, 23, 884-900.
- Screen, J. A. & Simmonds, I. (2014). Amplified mid-latitude planetary waves favour particular regional weather extremes. *Nature Climate Change*, 4, 704-709.
- Thompson, D. W. J. Baldwin, M. P., & Wallace, J. M. (2002). Stratosphere connection to Northern Hemisphere wintertime weather: Implications for prediction. *Journal of Climate*, 15, 1421-1428.
- Vavrus, S. J., Wang, F., Martin, J., Francis, J., peings, Y. & Cattiaux, J. (2017). Changes in North American Atmospheric Circulation and Extreme Weather: Influence of

- Arctic Amplification and Northern Hemisphere Snow Cover. *Journal of Climate*. 30, 4317-4333. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0762.1>
- Wang, B., Ding-Qing, H. & Jhun, T. (2006). Trends in Seoul 1778-2004 summer precipitation. *Geophysical Research Letters*, 33, 1-5.
- Waugh, D. W., Sobel, A. H. & Polvani, L. M. (2017). What is the polar vortex and how does it influence weather?. *Bulletin of American Meteorological Society*, 98, 37-44.
- Wrona, K. M. (2005). Long-term Changes and Variability in Northern Hemisphere Circumpolar Vortex. LSU Master's Theses. 3286. https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_theses/3286.