

Analysis of Moisture Sources and Spatial-Temporal Patterns Affecting Spring Snowfall in Chaharmahal and Bakhtiari Province of Iran

Zahra Ghassabi ^{1*}, Maede Fathi ², Masoumeh Norouzi ³, Parviz Rezazadeh ⁴

¹Assistant Professor of Atmospheric Hazards Prognostic Research Group of Atmospheric Science & Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran

ASMERC, Pajooresh Blvd, Shahid Kharrazi highway, Shahid Hemmat highway (west), Tehran, I.R. of Iran,

²Ph.D of Meteorology, Iran Meteorological Organization (IRIMO), Tehran, Iran

³M.S of Meteorology, Chaharmahal & bakhtiyari Meteorological Administration, Shahrekord, Iran

⁴M.S of Meteorology, Iran Meteorological Organization (IRIMO), Tehran, Iran

Introduction

The climatic history of Chaharmahal and Bakhtiari province in the Central Zagros region shows a huge amount of snowfall in the cold season. In recent years, the tendency of precipitation from snow to rain has increased in autumns and winters and wintertime snowfall has decreased compared to the long-term average of the province, while sometimes springtime snowfall can be seen in the province. In spring, dynamic systems that stimulate atmospheric instability are still present in the region, and sometimes the combination of dynamic-thermodynamic conditions causes heavy rainfalls. In the present study, the dynamic and thermodynamic conditions for three springtime snowfalls were analyzed and the effective moisture sources in springtime snowfall were obtained.

Methodology

Precipitation and temperature values in synoptic stations of Chaharmahal and Bakhtiari province in the period of 2000 to 2018 were provided by the Meteorological Organization. To select abnormal springtime precipitation, the anomaly of temperature, precipitation, and geopotential height at the level of 500-hPa were analyzed. The ERA5 analysis of the data from ECMWF with a horizontal resolution of 0.25° was used to calculate moisture flux, perceptible water and vorticity advection, the monthly anomaly of precipitation, height and temperature of 500-hPa, and instability indices. To analyze the causes of snowfall in spring and also to investigate the sources of moisture, the monthly anomalies of rainfall, the temperature at a height of 2 meters above the ground and height, and temperature of 500-hPa level were compared to the 30-year average (1981-2010). In a dynamic study, vorticity advection at the level of 500-hPa was measured. To identify the trajectory of atmospheric moisture, moisture flux at the level of 850-hPa and perceptible water were calculated. To investigate the thermodynamic

conditions and atmospheric instability, Skew-T diagram and atmospheric instability indices including KI, TT, PW, and CAPE were used at Shahrekord station at 00 UTC on the day of snowfall.

Discussion

Snowfall is a climatic feature of Chaharmahal and Bakhtiari province that also occurs in spring, but in recent years, due to warmer weather and reduced snowfall in winter, snowfall in spring seems somewhat unexpected. Precipitation is one of the quantities whose prediction of location and intensity is associated with uncertainty. Therefore, in this study, for more accurate prediction, the moisture sources, and the dynamic and thermodynamic conditions of spring snowfall in the province were investigated. To select unusual springtime precipitation, anomalies of temperature, precipitation, and geopotential height at 500-hPa were examined. As a result, snowfalls were selected in the spring of 2004, 2009, and 2016, which were different from normal compared to the long-term 30-year average.

Examination of the dynamic conditions of the mentioned systems showed that at the level of 500-hPa with the formation of a deep trough in the eastern Mediterranean to the Red Sea, the location of the study area in the east of this trough has caused instability and upward movements. In addition, there is a positive vorticity at the level of 500-hPa. Given that these conditions have occurred for all three systems, it can be concluded that the occurrence of snowfall in spring is due to a dynamic process. It is noteworthy that in April 2016, when the amount of snow was more than the other two cases, the trough formed in the area was much deeper than the other two ones, and the vorticity advection was higher. Analysis of the quantities of moisture flux and perceptible water showed that these systems supplied their moisture from the Arabian Sea, the southern Red Sea, the Sea of Oman, and the northern Indian Ocean. The sources of moisture for precipitation in the region are mainly the Arabian Sea, the Red Sea, the Sea of Oman, and the North Indian Ocean are located more than 2000 km far from the southwest of Iran.

Moisture flux continues from a few days before the operation of the system with south and the southwest winds from the Arabian Sea and south of the Red Sea to the southwest of Iran. In addition, the amount of perceptible water on the day of the event increases sharply. Temperature analysis showed that the decrease in temperature on the days of the phenomenon was more severe than the previous days and compared to the climatic average, and the coldness of the entire air column illustrates snowfall in spring. Examination of climatic conditions including anomaly analysis of precipitation showed that their values in all cases were much higher than the long-term and the normal average of the region, and is consistent with prominent temperature and height anomalies at the level of 500-hPa. 15 to 30 decameter drop in height and more than 1° drop in temperature were observed at this level compared to the long term. Cooling of the atmospheric column due to the process of evaporation or melting along the path and especially in the adjacent layers of the earth's surface has an important role in precipitation in snow form. Examination of the values of instability indices in

Shahrekord station also showed that these indices were prominent in the hours before the event and intensified the activity and convective cooling of the system.

Conclusion

The results showed that the sources of moisture for precipitation in the region are mainly the Red Sea, Arabian Sea, Oman Sea, and the North Indian Ocean, which were associated with a positive vorticity advection. Examination of thermodynamic conditions also showed that the instability indices in the hours before the onset of precipitation were favorable and intensified the convective activity of the systems. Convection cooling along with a severe decrease in temperature has shifted rain to snow. A significant decrease in temperature compared to the long-term average and the atmospheric cold column justifies the snowfall occurrence in spring.

Keywords: Springtime Snowfall, Moisture Sources, Dynamic Analysis, Precipitation Anomaly, Chaharmahal and Bakhtiyari Province.

References

- Banacos, P. C., & Schultz, D. M. (2005). The Use of Moisture Flux Convergence in Forecasting Convective Initiation: Historical and Operational Perspectives. *Journal of Weather and Forecasting*, 20, 351- 366.
- Dayan, U., Nissen, K., & Ulbrich, U. (2015). Atmospheric Conditions Inducing Extreme Precipitation Over the Eastern and Western Mediterranean. *Natural Hazards Earth System Sciences Journal*, 15, 2525- 2544.
- Dyer, J. L., & Mote, T. L. (2006). Spatial Variability and Trends in Observed Snow Depth Over North America. *Journal of Geophysical Research Letters*, 33, 16503.
- Frei, A., & Robinson, D. A. (1999). Northern Hemisphere Snow Extent: Regional variability. *International Journal of Climatology*, 19, 1535- 1560.
- Gutzler, D. S. (2000). Covariability of Spring Snowpack and Summer Rainfall Across the Southwest United States. *Journal of Climate*, 13, 4018- 4027.
- Holton, J. R. (2004). *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Fourth Edition, San Diego, California, USA: Elsevier Academic Press.
- Panziera, L., & Hoskins, B. (2014). *Weather Developments Leading to Heavy Snow in the South-Eastern Lpine Region*. National Weather Science.
- Perry, B., & Konrad, C. E. (2006). *Synoptic Patterns Associated with the Record Snowfall of 1960 in the Southern Appalachians*. 63rd Eastern Snow Conference, Newark, Delaware USA.
- Quiring, S. M., & Kluver, D. B. (2009). Relationship Between Winter/Spring Snowfall and Summer

- Precipitation in the Northern Great Plains of North America. *Journal of Hydrometeorology*, 10, 1203- 1217.
- Stander J. H., Dyson, L., & Engelbrecht, C. J. (2016). A Snow Forecasting Decision Tree for Significant Snowfall Over the Interior of South Africa, South African. *Journal of Science*, 112.
- Vuille, M., & Ammann, C. (1997). Regional Snowfall Patterns in the High, Arid Andes. *Journal of Climate Change*, 36, 413-423.
- Zhang, Y., Li, T., & Wang, B. (2004). Decadal Change of the Spring Snow Depth Over the Tibetan Plateau: The Associated Circulation and Influence on the East Asian Summer Monsoon. *Journal of Climate*, 17, 2780- 2793.





جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی

سال ۳۱، پیاپی ۷۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹، صص ۵۶-۴۳

نوع مقاله: پژوهشی

وصول: ۱۳۹۹/۳/۷ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۵

واکاوی چشمه‌های رطوبت و الگوهای فضایی - زمانی مؤثر بر بارش برف بهاره در استان چهارمحال و بختیاری

زهرآ قصابی^{*}، استادیار گروه پژوهشی پیش‌آگاهی مخاطرات جوی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

z.ghassabi@gmail.com

مائه فتحی، دکترای تخصصی هواشناسی، سازمان هواشناسی کشور، تهران، ایران

maede.fathi@yahoo.com

معصومه نوروزی، کارشناسی ارشد هواشناسی، اداره کل هواشناسی چهارمحال و بختیاری، شهرکرد، ایران

masoumn@gmail.com

پرویز رضازاده، کارشناسی ارشد هواشناسی، سازمان هواشناسی کشور، تهران، ایران

rezazadeh.pr@gmail.com

چکیده

تاریخچه اقلیمی استان چهارمحال و بختیاری در منطقه زاگرس مرکزی نشان‌دهنده فراوانی بارش برف در فصل سرد است. در سال‌های اخیر گرایش بارش‌ها از برف به باران در فصول پاییز و زمستان افزایش و بارش برف در فصل زمستان در استان نسبت به میانگین بلندمدت کاهش یافته است؛ این در حالی است که گاهی شاهد بارش برف بهاری در استان هستیم. در این پژوهش شرایط دینامیکی و ترمودینامیکی برای سه بارش فرین برف در فصل بهار با استفاده از داده‌های era5 با تفکیک شبکه‌ای ۰/۲۵ درجه تحلیل می‌شود. برای بررسی اقلیمی، نابهنجاری‌های دما، بارش و ارتفاع ژئوپتانسیلی طی دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۱-۲۰۱۰) محاسبه شد؛ همچنین کمیت‌های فرارفت تاوایی، شار رطوبت و آب قابل بارش برای دستیابی به منابع رطوبت مؤثر در ریزش برف در سطح استان بررسی شد. تحلیل نابهنجاری‌های بارش نشان می‌دهد مقدار آنها در همه رویدادهای بارشی بیش از میانگین بلندمدت بوده است که با نابهنجاری دما و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال همخوانی دارد.

نتایج نشان داد رطوبت سامانه‌های مطالعه‌شده بیشتر از دریای سرخ، دریای عرب، دریای عمان و شمال اقیانوس هند تأمین شده و با فرارفت تاوایی مثبت همراه بوده است. بررسی شرایط ترمودینامیکی نیز نشان داد شاخص‌های ناپایداری در ساعات پیش از آغاز بارش مساعد بوده و فعالیت همرفتی سامانه‌ها را تشدید کرده است. سرمایه همرفتی همراه با کاهش شدید دما سبب تبدیل باران به برف شده است. کاهش چشمگیر دما نسبت به میانگین بلندمدت و سرد بودن ستون جو، بارش برف را در فصل بهار توجیه می‌کند.

واژه‌های کلیدی: بارش برف بهاره، منابع رطوبت، تحلیل دینامیکی، نابهنجاری بارش، استان چهارمحال و بختیاری

*نویسنده مسئول

Copyright©2020, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they can't change it in any way or use it commercially.

Doi: [10.22108/gep.2020.123237.1310](https://doi.org/10.22108/gep.2020.123237.1310)

۱. مقدمه

بارش برف از ویژگی‌های اقلیمی مناطق سردسیر است. پوشش برف به توازن انرژی سطح زمین، نگهداشت آب زمستانی و رواناب سالیانه کمک می‌کند و اهمیت فراوانی در مدیریت آب به‌ویژه در بخش کشاورزی دارد. کاهش بارش برف در زمستان و رخداد آن در فصل بهار به‌ویژه پس از بهاری شدن درختان، رویدادی مهم است که تحلیل و شناسایی آن برای واکنش بهنگام و کاهش خسارات جانی و مالی مفید خواهد بود. به دلیل کوهستانی بودن منطقه غرب ایران، تغییرات زمانی مکانی بارش در این منطقه زیاد است و بارش برف بهاره، یکی از مشخصه‌های اقلیمی آن محسوب می‌شود؛ به طوری که استان چهارمحال و بختیاری سهم زیادی از بارش‌های فصلی و سالیانه دارد. به این دلایل، رخداد بارش برف در فصل بهار اهمیت دارد و بررسی می‌شود. در فصل بهار سامانه‌های دینامیکی محرک ناپایداری جو هنوز در منطقه وجود دارد و در بعضی مواقع ترکیب شرایط دینامیکی و ترمودینامیکی موجب رخداد بارش‌های سنگین در این فصل می‌شود.

ویلی و آمان^۱ (۱۹۹۷) دلیل بارش برف را در آند طی زمستان نیمکره جنوبی (مه - سپتامبر)، جابه‌جایی شمال‌سوی کم‌فشارهای بریده توده‌های هوای سرد از اقیانوس آرام دانستند. برهم‌کنش هوای سرد همراه با بادهای غربی با هوای گرم و بسیار مرطوب روی قاره سبب افزایش فراوانی بارش برف می‌شود. الگوهای هم‌مدیدی بارش برف در جنوب آلپ نشان داد این پدیده بر اثر جبهه‌زایی و همسو با شارش غالب است. ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال خیلی کمتر از میانگین بلندمدت بود و ناهنجاری دمای تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال به حدود ۸- درجه سانتی‌گراد رسید (Perry and Konrad, 2006: 61). بررسی ارتباط بین بارش برف بهاره با بارش فصل تابستان در شمال آمریکا نشان داد ناهنجاری برف بهاره شرایط رطوبت تابستان را متأثر می‌کند؛ به طوری که ناهنجاری مثبت (منفی) برف با شرایط مرطوب‌تر (خشک‌تر) از شمال طی تابستان همراه است و به ناهنجاری رطوبت خاک، دمای سطح و تبخیر منجر می‌شود؛ به گونه‌ای که ناهنجاری مثبت (منفی) برف با تأخیر (تعمیل) در ذوب برف، خاک مرطوب‌تر (خشک‌تر)، دمای هوای خنک‌تر (گرم‌تر) و تبخیر بیشتر (کمتر) در بهار و تابستان همراه است (Quiring & Kluver, 2009: 1213).

پانزرا و هاسکینز^۲ (۲۰۱۴) چهار الگوی هم‌مدیدی را برای بارش فرین در منطقه اروپا - آتلانتیک معرفی کردند؛ در الگوی اول، ناوه در غرب و مرکز اروپاست، گردش چرخندی در وردسپهر پایین باعث فرارفت هوای گرم و مرطوب از جنوب ایتالیا به سوی جنوب شرق آلپ می‌شود و از آن صعود می‌کند؛ در الگوی دوم، ناوه پهناوری روی مرکز اروپا بین واچرخند قوی اطلس و واچرخند شرق اروپا قرار دارد و بادهای جنوب غربی در وردسپهر بالا و پایین سبب شار رطوبت به منطقه آلپ می‌شود؛ در الگوی سوم، بادهای شمال غربی هوای سرد را به پشته آلپ هدایت می‌کند و روی اطلس واچرخند قوی دیده می‌شود. گردش چرخندی به فرارفت هوای گرم از جنوب شرق به شرق و جنوب آلپ منجر می‌شود؛ در الگوی چهارم، واچرخند بندالی در وردسپهر بالایی در شمال غرب اسکاتلند، هوای با تاوایی پتانسیل زیاد را از شمال شرق به سوی آلپ می‌راند؛ بخش چرخندی بندال سبب شارش شدید گرم و مرطوب جنوبی به سوی ایتالیا می‌شود و شرایط مناسب را برای بارش سنگین برف روی پشته آلپ ایجاد می‌کند.

1. Vuille & Ammann
2. Panziera & Hoskins

دیان و همکاران^۱ (۲۰۱۵) عوامل دینامیکی و ترمودینامیکی بارش‌های فرین را در غرب و شرق دریای مدیترانه، فرایندهای جوئی در مقیاس‌های مختلف مانند همرفت محلی، ناوه تراز بالا در مقیاس همدیدی و سامانه‌های همرفتی میان مقیاس عنوان کردند. سامانه‌های گردش همدیدی وابسته به بارش برف در آفریقای جنوبی همراه با ناوه‌های عمیق در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و فرارفت شدید هوای سرد در سطح به‌سوی شبه‌قاره است (Stander et al., 2016: 8).

در ایران نیز پژوهش‌هایی درباره بارش برف انجام شده است. این پژوهش‌ها بیشتر بر تحلیل‌های همدیدی هواشناسی و یافتن الگوهای جوئی مؤثر بر این گونه بارش‌ها متمرکز بوده است.

علیجانی و همکاران (۱۳۸۹) شرایط همدیدی بارش سنگین را در جنوب شرق ایران در تاریخ ۶ ژانویه ۲۰۰۸ بررسی کردند. نتایج نشان داد رخداد بارش سنگین مطالعه‌شده با شرایط مطلوب همدیدی نظیر وجود رطوبت زیاد در تراز پایین جو به‌ویژه تخلیه رطوبتی شدید از خلیج فارس، بی‌هنجاری‌های منفی شدید در ترازهای میانی جو و استقرار جریان جتی جنب حاره‌ای در غرب منطقه مرتبط است. مطالعه دینامیکی ناوه فشاری دریای سرخ نشان می‌دهد اگر فرارفت تاوایی نسبی در شرق دریای مدیترانه یا شمال دریای سرخ مثبت باشد، ناوه فشاری دریای سرخ به‌سوی شرق دریای مدیترانه حرکت و سامانه بارشی غرب و شمال غرب ایران را متأثر می‌کند و چنانچه فرارفت تاوایی نسبی مثبت در شمال شرق دریای سرخ صورت گیرد، سلول‌های کم‌فشار کوچکی از ناوه فشاری دریای سرخ جدا می‌شود و به‌سوی شمال شرق حرکت می‌کند؛ در این حالت غرب، جنوب غرب و جنوب ایران متأثر می‌شوند (مشکواتی و مرادی، ۱۳۸۳: ۶۴). رخداد بارش‌های سنگین و سیل‌آسا در جنوب ایران بر اثر تقویت و گسترش مرکز کم‌فشار شمال شرق آفریقا و منطقه همگرایی دریای سرخ و در مواقعی ناشی از ادغام کم‌فشار سودان با کم‌فشار مدیترانه است (پرنده‌خوزانی و لشکری، ۱۳۸۹: ۷۱).

در پژوهشی دیگر، کریمی و فرج‌زاده (۱۳۹۰) مهم‌ترین منابع رطوبتی بارش‌های ایران را دریا‌های عرب و مدیترانه بیان کردند. دریا‌های سرخ، خزر، عمان و خلیج فارس، دیگر منابع رطوبتی هستند؛ همچنین الگوی انتقال رطوبت متأثر از الگوی جریان و گردش جوئی منطقه در روزهای مختلف سال است؛ به‌طوری که پرفشار شرق شبه‌جزیره عربستان و پرفشار شمال آفریقا، تزریق‌کننده‌های اصلی رطوبت هستند.

نوری و همکاران (۱۳۹۲) در تحلیل همگرایی شار رطوبت و منابع تأمین رطوبت بارش‌های سنگین و فوق سنگین سواحل جنوبی خزر نشان دادند دریای خزر، نخستین تأمین‌کننده منابع رطوبتی بارش‌های سنگین و فوق سنگین (به‌ویژه در ترازهای ۱۰۰۰ تا ۸۵۰ هکتوپاسکال) در سواحل خزر است. دریا‌های مدیترانه و سیاه در بارش‌های سنگین نقش مؤثرتری دارند.

رضایی بنفشه و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از رویکرد محیطی به گردشی، فراوانی تابع همگرایی شار رطوبت را در زمان رخداد بارش‌های سنگین شمال غرب ایران در ۶ تراز ۱۰۰۰، ۹۲۵، ۸۵۰، ۷۰۰، ۶۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال بررسی کردند. نتایج نشان داد سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال به دلیل داشتن بیشترین فراوانی تابع همگرایی شار رطوبت

روی ایران به‌ویژه شمال غرب ایران اهمیت بیشتری دارد. ریزش هوای سرد از کمربند پرفشار ناشی از گسترش پرفشار سیبری به نیمه شمالی ایران و پرفشار سرد شرق اروپا، همزمان با فعالیت کم‌فشار دینامیکی مدیترانه‌ای جفت‌شده با کم‌فشار حرارتی دریای سرخ، سبب همایش دو توده هوای سرد قطبی و گرم و مرطوب حاره‌ای و در نتیجه بارش برف سنگین در غرب و جنوب غرب ایران می‌شود که با گسترش ناوه قوی در شرق اروپا تا دریای سرخ در تراز میانی جو همراه است (فتاحی و شیراوند، ۱۳۹۳: ۱۰).

شادمانی و همکاران (۱۳۹۷) منابع رطوبت و مسیر حرکت توده‌های هوای مرطوب بر بارش‌های سیل‌آسا را در غرب و جنوب ایران مطالعه کردند. آنها نشان دادند برای سیل غرب ایران، دریای عرب و دریای سرخ سهم یکسانی در تأمین منبع رطوبت بارش رخ داده دارند و مسیر حرکت بیان‌کننده این است که منبع اصلی و مسیر حرکت رطوبت از سوی دریای سرخ است. برای سیل جنوب ایران، منبع اصلی تأمین رطوبت در روزهای پیش از بارش، نواحی جنوبی دریای سرخ است؛ ولی در روزهایی که با بارش همراه بوده است، خلیج فارس نقشی اساسی در تأمین رطوبت آن دارد.

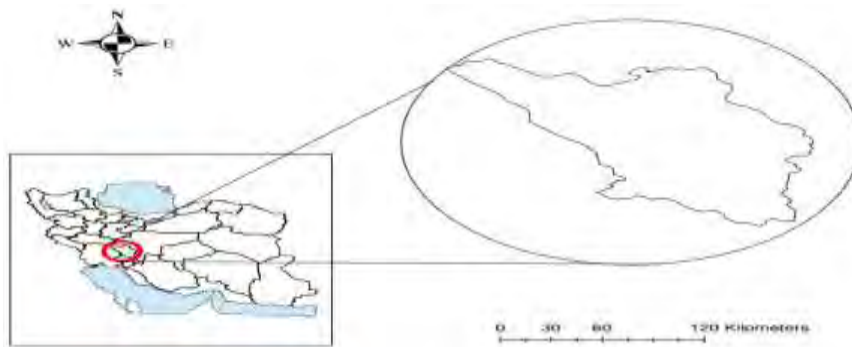
روشنی و پرک (۱۳۹۷) در بررسی شار رطوبت بارش‌های نیمه جنوبی کشور در دوره‌های خشک و تر نشان دادند در زمان ترسالی، میزان بارش منطقه بسیار بیشتر از میانگین است و میزان رطوبت واگراشده از منابع رطوبتی با توجه به شرایط جوی و سامانه‌های باران‌زا حدود ۴ برابر دوره‌های خشک بوده است. در این زمینه غرب اقیانوس هند (دریای عرب و عمان)، اصلی‌ترین منبع رطوبتی بارش‌های نیمه جنوبی کشور شناخته شد.

هدف از انجام این پژوهش، دستیابی به منابع رطوبت مؤثر بر ریزش برف در فصل بهار و همچنین بررسی شرایط دینامیکی و ترمودینامیکی بارش برف در استان چهارمحال و بختیاری است. پژوهش‌های انجام‌شده درباره دلایل رخداد بارش برف بیشتر به فصل سرد سال مربوط است یا پژوهشگران پوشش برف و عمق برف و ارتباط آن را با ذوب برف در فصل بهار بررسی کرده‌اند (Dyer & Mote, 2006: 1; Frei & Robinson, 1999: 1542; Gutzler, 2000: 4019; Zhang et al., 2004: 2782). داده و روش پژوهش در بخش ۲ آورده شد که در آن، چگونگی شرایط تبدیل بارش باران به برف در فصل بهار بررسی شد. برای بررسی اقلیمی، نابهنجاری‌های دما، بارش و ارتفاع ژئوپتانسیلی محاسبه شد. بخش ۳ به بررسی نتایج مربوط است و در انتها نتیجه‌گیری آورده شده است.

۲. روش‌شناسی پژوهش

استان چهارمحال و بختیاری با متوسط بارش سالیانه حدود ۵۹۱ میلی‌متر، در ارتفاعات زاگرس واقع شده است (آمار اداره کل هواشناسی استان چهارمحال و بختیاری)^۱ و سرچشمه اصلی کارون و زاینده‌رود است. شکل ۱ محدوده پژوهش را نشان می‌دهد.

^۱. chbmet.ir



شکل ۱. محدوده پژوهش (استان چهارمحال و بختیاری)؛ (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۹)

مقادیر بارش و دما در ایستگاههای همدیدی استان چهارمحال و بختیاری در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. برای انتخاب بارش‌های غیرمعمول بهاره، نابهنجاری دما، بارش و ارتفاع ژئوپتانسیلی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بررسی شد. در ادامه سه رویداد بارش برف در فصل بهار سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۶ برای مطالعه انتخاب شدند؛ این سه رویداد بیشترین مقدار بارش را داشتند و در مقایسه با میانگین بلندمدت ۳۰ ساله متفاوت از نرمال بودند.

از داده‌های باز تحلیل ERA5 از مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت جوئی^۱ (ECMWF) با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه برای محاسبه شار رطوبت، آب قابل بارش، فرارفت تاوایی، نابهنجاری ماهانه بارش، ارتفاع و دمای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و شاخص‌های ناپایداری استفاده شد.

برای تحلیل دلایل بارش برف در فصل بهار و همچنین بررسی منابع رطوبت، نخست نابهنجاری ماهانه بارش، دما در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین و ارتفاع و دمای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نسبت به میانگین ۳۰ ساله (۱۹۸۱-۲۰۱۰) با استفاده از داده‌های باز تحلیل ERA5 بررسی شد.

در بررسی دینامیکی کمیت فرارفت تاوایی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال براساس رابطه^۱ (Holton, 2004: 152) و برای شناسایی مسیر حرکت رطوبت جوئی کمیت‌های شار رطوبت تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال براساس رابطه^۲ (Banacos and Schultz, 2005: 352) و آب قابل بارش براساس رابطه^۳ محاسبه و تحلیل شد. محدوده پژوهش به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که همه پهنه‌های آبی مؤثر بر ایران شامل دریای مدیترانه، دریای سرخ، دریای عرب، اقیانوس هند و دریای عمان را دربرگیرد. این پهنه‌ها از منابع مهم رطوبتی بارش هستند.

$$-V_g \cdot \nabla(\xi_g + f) = -V_g \cdot \nabla \xi_g - \beta v_g \tag{۱}$$

رابطه (۱)

$$MFC = -\nabla \cdot (q \bar{V}_h) = -\bar{V}_h \cdot \nabla q - q \nabla \cdot \bar{V}_h, \tag{۲}$$

$$MFC = [-u \frac{\partial q}{\partial x} - v \frac{\partial q}{\partial y}] - q(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y})$$

رابطه (۲)

در رابطه^۱، دو جمله سمت راست به ترتیب فرارفت تاوایی نسبی و تاوایی سیاره‌ای را نشان می‌دهد. در رابطه^۲، MFC همگرایی شار رطوبت (گرم بر کیلوگرم بر ثانیه)، در سمت راست رابطه نیز جمله اول، فرارفت افقی رطوبت ویژه و جمله دوم، همگرایی افقی رطوبت ویژه را نشان می‌دهد. در مقیاس همدیدی با مقیاس زمانی از مرتبه یک روز و مقیاس فضایی از

1. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
2. Moisture Flux Convergence

مرتبه ۱۰۰۰ کیلومتر، جمله اول (فرافت افقی رطوبت ویژه) از مرتبه $10^{-4} gr kg^{-1} s^{-1}$ و جمله دوم (همگرایی افقی رطوبت ویژه) از مرتبه $10^{-5} gr kg^{-1} s^{-1}$ هستند. جمله دوم یک مرتبه کوچک‌تر از جمله اول است و از این رو فقط جمله فرافت افقی در محاسبه همگرایی شار رطوبت در نظر گرفته شد (Banacos and Schultz, 2005: 352).

$$PW = -\frac{1}{\rho_w g_m} \int q. dp \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه ۳، q رطوبت ویژه برحسب گرم بر کیلوگرم و $\rho_w = 1000 kg/m^3$ و g_m میانگین شتاب جاذبه زمین برحسب متر بر مجذور ثانیه است.

برای بررسی شرایط ترمودینامیکی و ناپایداری جو از نمودار skew-T و شاخص‌های ناپایداری جو شامل KI^1 ، TT^2 ، PW^3 و $CAPE^4$ در ایستگاه شهرکرد در ساعت ۰۰ UTC در روز رخداد بارش برف استفاده شد.

۳. یافته‌های پژوهش

الف. بررسی آماری

جدول ۱ مجموع بارش را در ایستگاه‌های استان در سه رویداد انتخابی و نیز میانگین بارش یک سال زراعی همان ایستگاه (از بدو تأسیس تا سال ۲۰۱۹) را نشان می‌دهد. بارش این سامانه‌ها در ایستگاه‌های استان در مقایسه با بارش سالیانه جالب توجه است که یک علت آن، کاهش چشمگیر بارش برف زمستانی استان در سال‌های اخیر است. بارش برف در بهار سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۶ پس از تغییر فصل، خسارات زیادی به کشاورزی استان، عشایر منطقه و حمل‌ونقل درون‌استانی وارد کرد. براساس جدول ۱ در ایستگاه شهرکرد، میانگین بارش سالیانه ۳۲۵ میلی‌متر است؛ اما در بهار سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۶ به ترتیب ۲۷، ۵۲/۳ و ۷۷ میلی‌متر طی چند روز بوده که نسبت به میانگین سالیانه مقدار چشمگیری است. در دیگر ایستگاه‌های استان نیز، همین شرایط برقرار است.

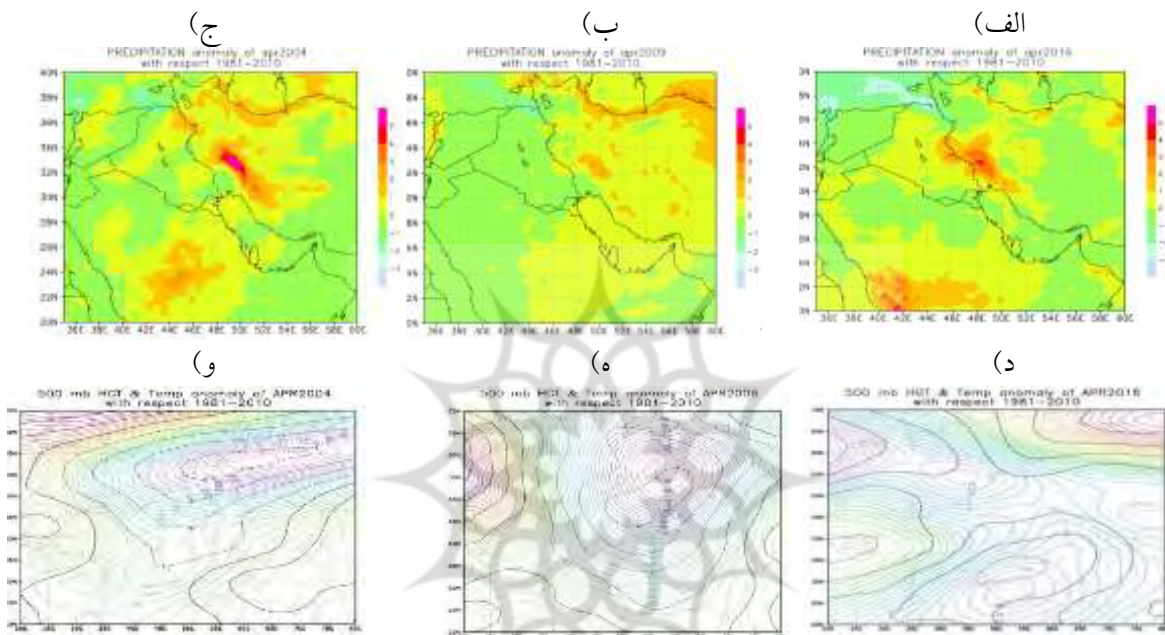
جدول ۱. مجموع بارش در ایستگاه‌های استان چهارمحال و بختیاری در سه رویداد پژوهش

ایستگاه	شهرکرد	بروجن	کوه‌رنگ	لردگان	اردل	فارسان	سامان	بن	دزک	آورگان
مجموع بارش (mm) ۱۱-۱۵ آوریل ۲۰۱۶	۷۷	۴۱	۱۴۷	۷۲	۱۱۶	۸۷	۷۷	۷۶	۹۴	۷۳
مجموع بارش (mm) ۸-۱۳ آوریل ۲۰۰۹	۵۲/۳	۱۲	۱۲۳	۳۰/۲	۳۲/۵	۳۷	۵۴/۶	۲۸/۵	۳۴/۵	۱۵/۳
مجموع بارش (mm) ۳-۵ آوریل ۲۰۰۴	۲۷	۳۶	۱۶۰	۲۹/۹	۳۰	۶۰/۶	۳۶	۴۳	۶۹/۷	-
میانگین بارش سالیانه زراعی (mm)	۳۲۵	۲۴۷	۱۳۸۰	۵۳۷	۵۵۰	۵۲۴	۳۴۶	۳۶۰	۴۵۰	۵۳۲

1. K Index
2. Total Totals Index
3. Precipitation Water
4. Convective Available Potential Energy

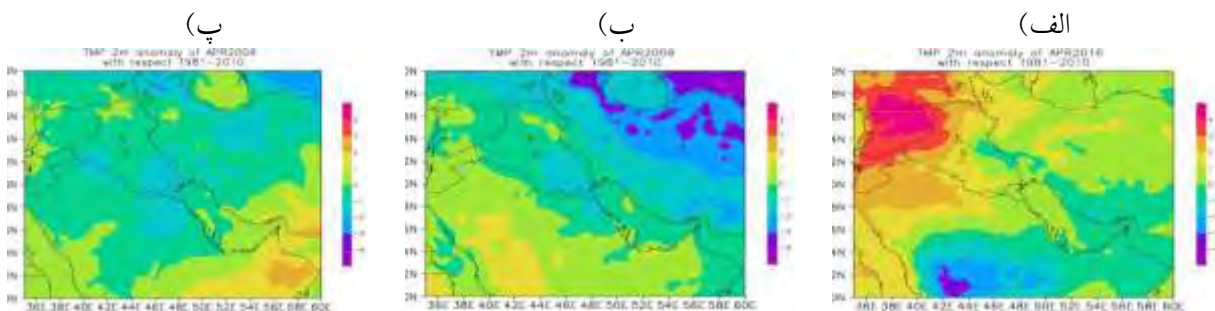
ب. تحلیل اقلیمی

الگوهای نابهنجاری ماهانه بارش در سه نمونه پژوهش (شکل ۲، «الف» تا «ج») نشان‌دهنده بارش بیش از نرمال در منطقه است؛ به علاوه الگوهای نابهنجاری ماهانه ارتفاع ژئوپتانسیل و دمای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۲ «د» تا «و») بیان‌کننده افت ارتفاع و کاهش دماست؛ به طوری که در الگوی نابهنجاری ماهانه ارتفاع ژئوپتانسیل در آوریل ۲۰۱۶، ۲۰۰۹ و ۲۰۰۴ به ترتیب ۱۵، ۲۵ تا ۳۰ و ۲۰ دکامتر افت ارتفاع داشته‌اند. نابهنجاری ماهانه دما در آوریل ۲۰۱۶، ۲۰۰۹ و ۲۰۰۴ به بیش از ۱- درجه در منطقه رسید و در دوره رخداد بارش برف، کاهش دما بیش از ۵ درجه بوده است. سردبودن کل ستون هوا سبب می‌شود فرایند تبخیر یا ذوب در طی مسیر به حداقل برسد و نقش مهمی در ریزش بارش به صورت برف دارد.



شکل ۲. نابهنجاری بارش؛ الف. آوریل ۲۰۱۶، ب. آوریل ۲۰۰۹، ج. آوریل ۲۰۰۴ و نابهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل (رنگی) و دما (مشکی) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، د. آوریل ۲۰۱۶، ه. آوریل ۲۰۰۹، و. آوریل ۲۰۰۴

در شکل ۳، نابهنجاری دمای ۲ متری در آوریل الف. ۲۰۱۶، ب. ۲۰۰۹ و پ. ۲۰۰۴ نشان داده شده است. شکل الف نشان می‌دهد در ماه آوریل سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۰۹ و ۲۰۰۴ به ترتیب کاهش دمای ۲ متری نسبت به میانگین بلندمدت ۱، ۲ و ۱/۵ درجه است؛ بنابراین حضور استخر هوای سرد روی مناطق غربی کشور در هر سه سامانه آشکار است.

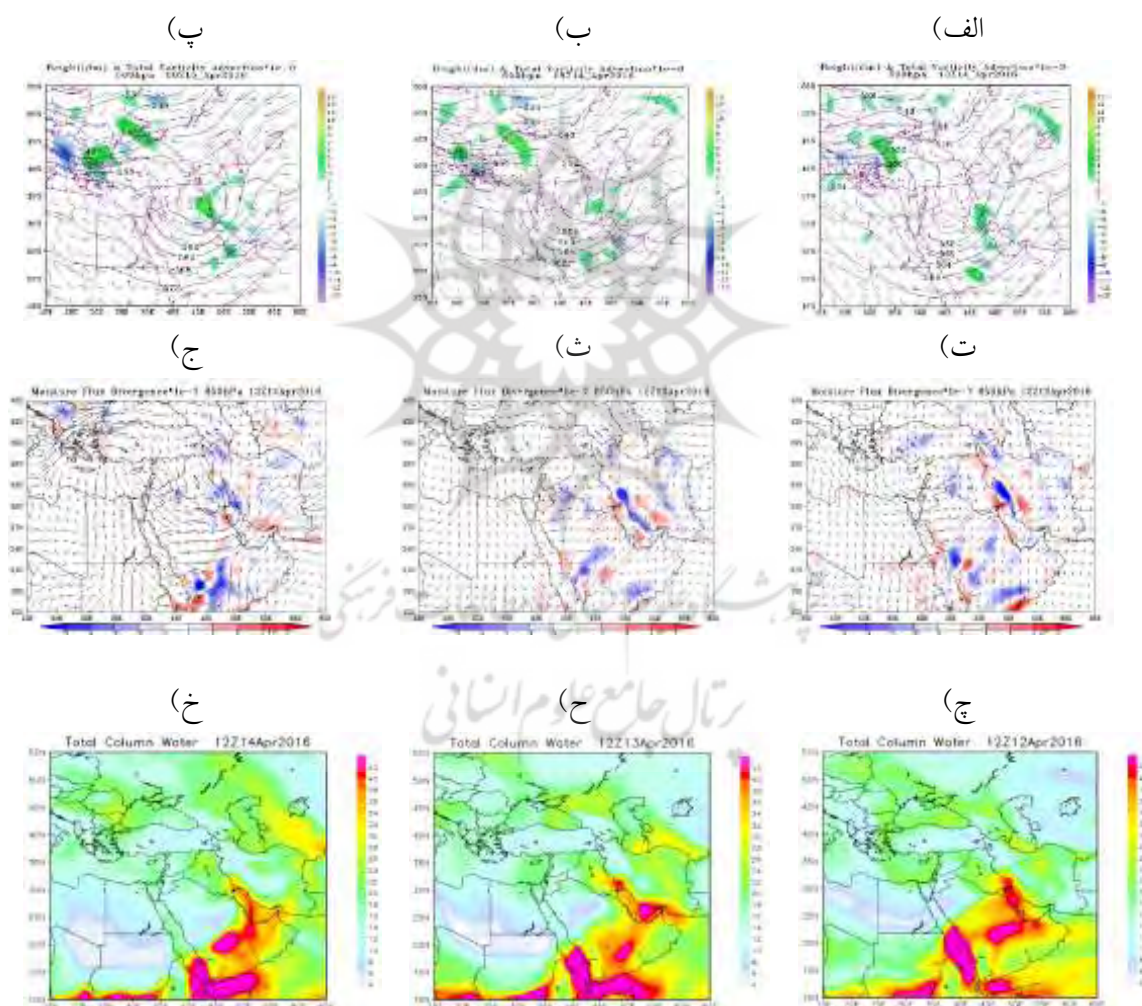


شکل ۳. نابهنجاری دمای ۲ متری در آوریل الف. ۲۰۱۶، ب. ۲۰۰۹ و پ. ۲۰۰۴

1. Cold pool

پ. تحلیل دینامیکی

در تحلیل دینامیکی از کمیت‌های فرارفت تاوایی، شار رطوبت و آب قابل بارش استفاده شد. در آوریل ۲۰۱۶، بیشینه فرارفت مثبت تاوایی در بعدازظهر روز ۱۴م و طی روز ۱۵م در منطقه مشاهده شد (شکل ۴، «الف» تا «پ»). بیشینه همگرایی شار رطوبت تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال به روزهای ۱۲ تا ۱۴ آوریل مربوط است. شار رطوبت همراه با بادهای جنوبی و جنوب غربی از دریای عرب و دریای سرخ به سوی جنوب غرب ایران بود (شکل ۴، «ت» تا «ج»). استقرار ناوه در راستای نصف‌النهاری از شرق مدیترانه تا دریای سرخ به همراه همگرایی در سطح زمین و حرکات صعودی ناشی از آن و انتقال رطوبت از دو روز پیش از رخداد بارش به سوی جنوب غرب کشور سبب تقویت سامانه و تشدید بارش در روزهای ۱۴ و ۱۵ آوریل در منطقه شده است. آب قابل بارش (شکل ۴، «چ» تا «خ») نیز مقادیر درشتی را نشان می‌دهد (جدول ۲).

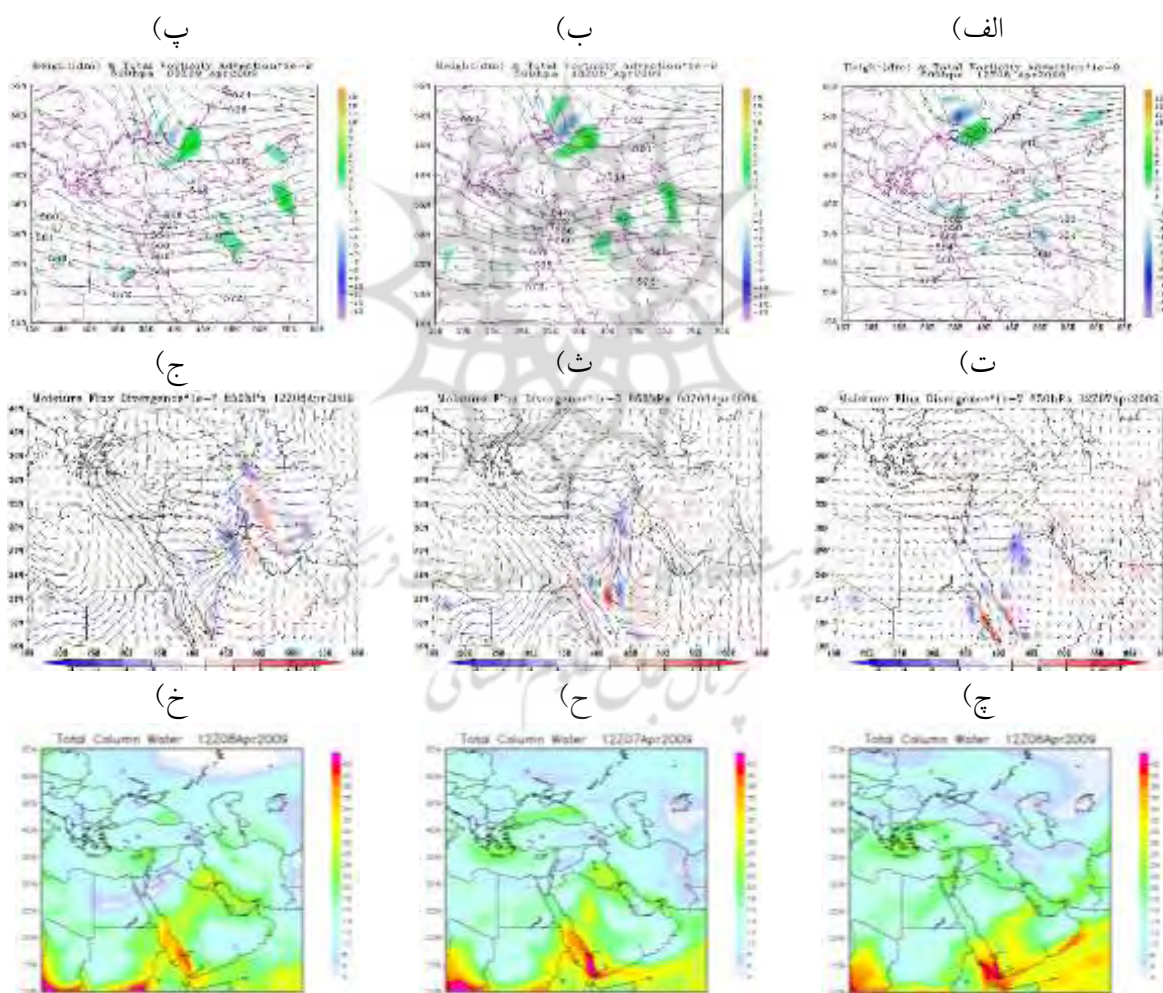


شکل ۴. الف، ب و ج. فرارفت تاوایی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ۱۴ و ۱۵ آوریل ۲۰۱۶، ج، د و ه. شار رطوبت (همگرایی به رنگ آبی و واگرایی به رنگ قرمز) تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال ۱۲ تا ۱۴ آوریل ۲۰۱۶ و ج، ح و خ. آب قابل بارش (کیلوگرم بر مترمربع) ۱۲ تا ۱۴ آوریل ۲۰۱۶ (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۹)

جدول ۲. مقادیر آب قابل بارش (کیلوگرم بر مترمربع) در آوریل ۲۰۱۶

منطقه	۲۰۱۶ آوریل ۱۲	۲۰۱۶ آوریل ۱۳	۲۰۱۶ آوریل ۱۴
جنوب دریای سرخ	۴۲	۴۲	۴۲
عربستان	۴۲ تا ۳۲	۴۰ تا ۳۰	۴۲ تا ۲۸
خلیج فارس	۴۲ تا ۴۰	۴۲ تا ۳۶	۴۰ تا ۳۰
منطقه پژوهش	۳۸ تا ۳۰	۳۸ تا ۳۰	۳۴ تا ۲۲

در آوریل ۲۰۰۹، بیشینه فرارفت مثبت تاوایی در بعدازظهر روز ۸م و روز ۹م در منطقه مشاهده شد (شکل ۵، «الف» تا «پ»). بیشینه همگرایی شار رطوبت تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در منطقه به بعدازظهر ۸ آوریل مربوط است. شار رطوبت با بادهای جنوب غربی از جنوب دریای سرخ به سوی جنوب غرب ایران بود (شکل ۵، «ت» تا «ج») و آب قابل بارش (شکل ۵، «چ» تا «خ») نیز روند افزایشی در منطقه داشته است (جدول ۳).

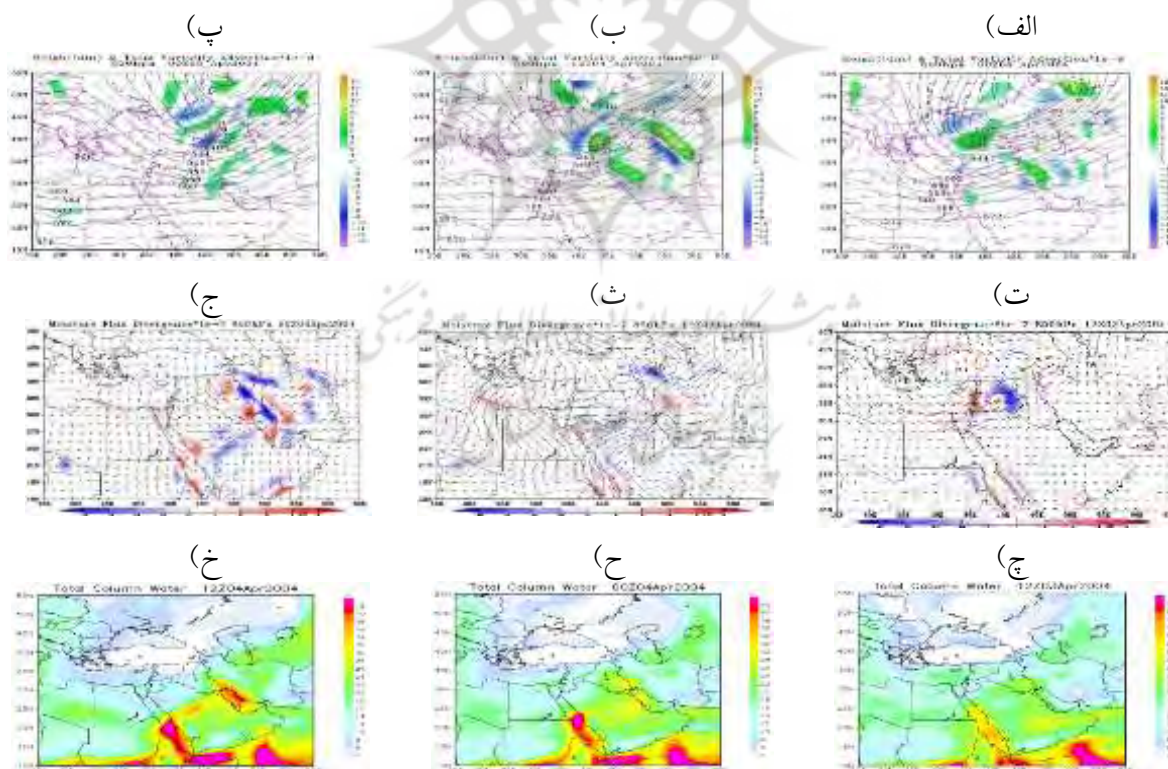


شکل ۵. الف، ب و پ. فرارفت تاوایی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ۸ تا ۹ آوریل ۲۰۰۹، ت، ث و ج. شار رطوبت (همگرایی به رنگ آبی و واگرایی به رنگ قرمز) تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال ۷ و ۸ آوریل ۲۰۰۹، چ، ح و خ. آب قابل بارش (کیلوگرم بر مترمربع) ۶ تا ۸ آوریل ۲۰۰۹: (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۹)

جدول ۳. مقادیر آب قابل بارش (کیلوگرم بر مترمربع) در آوریل ۲۰۰۹

منطقه	۶ آوریل ۲۰۱۶	۷ آوریل ۲۰۱۶	۸ آوریل ۲۰۱۶
جنوب دریای سرخ	۴۰ تا ۳۰	۴۲ تا ۳۰	۴۰ تا ۳۴
عربستان	۳۲ تا ۲۲	۳۲ تا ۱۸	۳۲ تا ۱۸
خلیج فارس	۲۴ تا ۱۸	۲۸ تا ۱۶	۲۸ تا ۲۰
منطقه پژوهش	۱۶ تا ۸	۱۸ تا ۱۰	۲۶ تا ۱۸

در آوریل ۲۰۰۴، بیشینه فرارفت مثبت تاوایی طی روز ۴م و روز ۵م در منطقه مشاهده شد (شکل ۶، «الف» تا «پ»). بیشینه همگرایی شار رطوبت منطقه در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال طی روز ۴ آوریل رخ داد. شار رطوبت با بادهای جنوبی و جنوب غربی از دریای عرب و جنوب دریای سرخ به سوی جنوب غرب ایران است. شکل ۶، «ت» تا «ج» فرایند انتقال رطوبت از چشمه‌ها را در رخدادهای بارش به سوی جنوب غرب کشور نمایان می‌کند. جریان‌های ضعیف جنوب غربی، انتقال رطوبت را به عرض‌های شمالی در روز دوم آوریل نشان می‌دهد که برای روزهای بعد تقویت می‌شوند و در چهارم آوریل همگرایی شدید شار رطوبت در منطقه زاگرس مشهود است که مؤید تشدید بارش در این روز است. آب قابل بارش (شکل ۶، «ج» تا «خ») نیز در این روز به شدت افزایش داشته است (جدول ۴). چشمه‌های رطوبت برای رخدادهای بارش در منطقه، عمدتاً دریای عرب و دریای سرخ هستند که با توجه به فاصله بیش از ۲۰۰۰ کیلومتری آنها، انتقال رطوبت باید از چند روز پیش از فعالیت سامانه شروع شود.



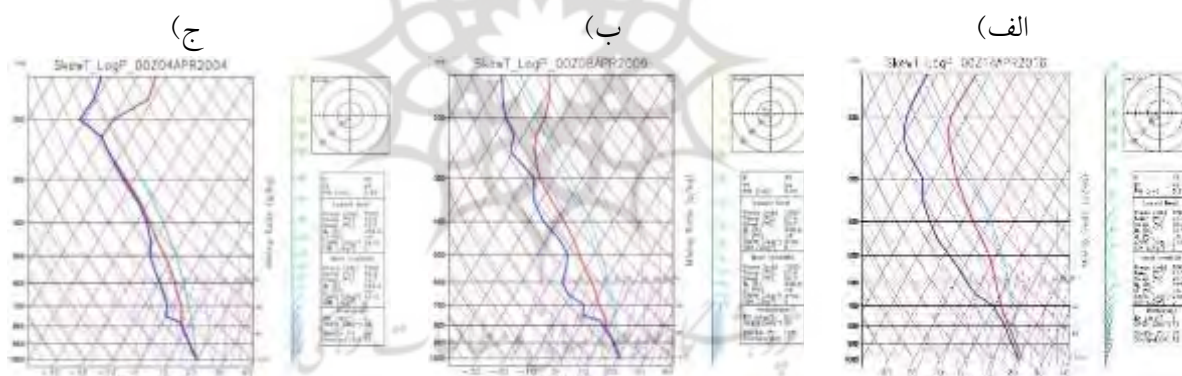
شکل ۶. الف، ب و پ. فرارفت تاوایی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ۴ و ۵ آوریل ۲۰۰۴، ت، ث و ج. شار رطوبت (همگرایی به رنگ آبی و واگرایی به رنگ قرمز) تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال ۲ تا ۴ آوریل ۲۰۰۴ و ج، ح و خ. آب قابل بارش (کیلوگرم بر مترمربع) ۳ تا ۴ آوریل ۲۰۰۴: (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۹)

جدول ۴. مقادیر آب قابل بارش (کیلوگرم بر مترمربع) در آوریل ۲۰۰۴

منطقه	۱۲ آوریل ۲۰۱۶	۱۳ آوریل ۲۰۱۶	۱۴ آوریل ۲۰۱۶
جنوب دریای سرخ	۳۰ تا ۳۶	۳۰ تا ۴۲	۳۰ تا ۴۰
عربستان	۱۸ تا ۳۰	۲۲ تا ۳۰	۲۲ تا ۳۴
خلیج فارس	۱۶ تا ۲۶	۲۴ تا ۳۰	۳۰ تا ۴۰
منطقه پژوهش	۱۸ تا ۲۴	۱۸ تا ۲۸	۲۰ تا ۳۸

ت. بررسی شرایط ترمودینامیکی

برای بررسی شرایط ترمودینامیکی و ناپایداری جو از نمودار skew-T و شاخص‌های ناپایداری جو شامل TT ، KI ، PW و $CAPE$ در ایستگاه شهرکرد استفاده شد (شکل ۷). با توجه به شکل ۷ الف در ساعت ۰۰ UTC روز ۱۴ آوریل ۲۰۱۶، مقادیر شاخص‌های ناپایداری $TT=49^{\circ}C$ ، $KI=33^{\circ}C$ ، $CAPE=2129 J/kg$ و $PW=3.2 inches$ به دست آمد که حاکی از شرایط مساعد برای تشدید بارش همرفتی در ساعات آینده است؛ همچنین در شکل ۷ ب در ساعت ۰۰ UTC روز ۱۸ آوریل ۲۰۰۹، مقادیر شاخص‌های ناپایداری $TT=54^{\circ}C$ ، $KI=33^{\circ}C$ ، $CAPE=3142 J/kg$ و $PW=3.25 inches$ و در شکل ۷ ج در ساعت ۰۰ UTC روز ۴ آوریل ۲۰۰۴، مقادیر شاخص‌های ناپایداری $TT=47^{\circ}C$ ، $KI=29^{\circ}C$ ، $CAPE=1910 J/kg$ و $PW=3.43 inches$ به دست آمد که گویای شرایط مناسب برای بارش شدید است.



شکل ۷. نمودار skew-T و شاخص‌های ناپایداری در الف. آوریل ۲۰۱۶، ب. آوریل ۲۰۰۹ و ج. آوریل ۲۰۰۴

(منبع: نویسندگان، ۱۳۹۹)

۴. نتیجه‌گیری

بارش برف، ویژگی اقلیمی استان چهارمحال و بختیاری است که در فصل بهار نیز وجود دارد؛ اما در سال‌های اخیر با توجه به گرم شدن هوا و کاهش بارش برف در فصل زمستان، بارش برف در فصل بهار غیرمنتظره به نظر می‌رسد. بارش از جمله کمیت‌هایی است که پیش‌بینی مکان و شدت آن با خطا همراه است؛ از این رو در این پژوهش برای پیش‌بینی با دقت بیشتر، منابع رطوبت و شرایط دینامیکی و ترمودینامیکی بارش برف بهاره در استان بررسی شد. برای انتخاب بارش‌های غیرمعمول بهاره، نابهنجاری دما، بارش و ارتفاع ژئوپتانسیلی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بررسی شد؛ در نتیجه بارش برف در فصل بهار سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۶ برای بررسی انتخاب شد. این بارش‌ها در مقایسه با میانگین بلندمدت ۳۰ ساله متفاوت از نرمال بود.

بررسی شرایط دینامیکی سامانه‌های یادشده نشان داد در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، شکل‌گیری ناوه عمیق در منطقه شرق مدیترانه تا دریای سرخ و استقرار منطقه پژوهش در شرق این ناوه باعث ایجاد ناپایداری و حرکات صعودی در منطقه شده و همچنین همراه با فرارفت تاوایی مثبت در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال است. با توجه به اینکه این شرایط برای هر سه سامانه رخ داده، وقوع بارش برف در فصل بهار بر اثر فرایند دینامیکی رخ داده است. شایان توجه است که در آوریل ۲۰۱۶ که مقدار برف بیش از دو سامانه دیگر بوده است، ناوه ایجادشده در منطقه بسیار عمیق‌تر از دو سامانه دیگر بوده و فرارفت تاوایی نیز مقدار بیشتری داشته است.

تحلیل کمیت‌های شار رطوبت و آب قابل بارش نشان داد این سامانه‌ها رطوبت خود را از دریای عرب، جنوب دریای سرخ، دریای عمان و شمال اقیانوس هند تأمین کردند. چشمه‌های رطوبت برای رخداد بارش در منطقه عمدتاً دریای عرب، دریای سرخ، دریای عمان و شمال اقیانوس هند هستند و در فاصله بیش از ۲۰۰۰ کیلومتری از جنوب غرب ایران قرار دارند و شار رطوبت از چند روز پیش از فعالیت سامانه با بادهای جنوبی و جنوب غربی از دریای عرب و جنوب دریای سرخ به سوی جنوب غرب ایران ادامه دارد؛ همچنین کمیت آب قابل بارش در روز رخداد به شدت افزایش دارد.

تحلیل دما نشان داد کاهش دما در روزهای رخداد پدیده نسبت به روزهای قبل و همچنین نسبت به میانگین اقلیمی شدید است و سردبودن کل ستون هوا، بارش به صورت برف را در فصل بهار توجیه می‌کند.

بررسی شرایط اقلیمی از جمله تحلیل نابهنجاری کمی بارش‌ها نشان داد مقدار آنها در همه رویدادهای بارشی خیلی بیشتر از میانگین بلندمدت و نرمال منطقه بود و با نابهنجاری برجسته دما و ارتفاع در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال هماهنگ است؛ به طوری که ۱۵ تا ۳۰ دکامتر افت ارتفاع و بیش از ۱ درجه افت دما در این تراز نسبت به بلندمدت مشاهده شد. سرمایش ستون جو ناشی از فرایند تبخیر یا ذوب در طی مسیر به ویژه در لایه‌های مجاور سطح زمین نقش مهمی در نزول بارش به صورت برف دارد.

بررسی مقادیر شاخص‌های ناپایداری در ایستگاه شهرکرد نیز نشان داد شاخص‌های ناپایداری در ساعات پیش از رخداد پدیده برجسته بوده و باعث تشدید فعالیت و سرمایش همرفتی سامانه‌ها شده‌اند.

منابع

پرنده‌خوزانی، اکرم، لشکری، حسن، (۱۳۸۹). بررسی سینوپتیکی سیستم‌های سیل‌زا در جنوب ایران، تحقیقات منابع آب ایران، سال ۶، شماره ۲، ۶۶-۷۳.

رضایی بنفشه، مجید، جعفری شندی، فاطمه، پورگزی، حسین‌علی، علی‌محمدی، مجید، (۱۳۹۵). تحلیل همدید فراوانی تابع شار رطوبت در زمان رخداد بارش‌های سنگین شمال غرب ایران، جغرافیا و برنامه‌ریزی، سال ۲۰، شماره ۵۶، ۱۰۷-۱۲۶.

روشنی، احمد، پرک، فاطمه، (۱۳۹۷). تحلیل واگرایی شار رطوبت از منابع رطوبتی اطراف ایران و اثرات آن بر توزیع فضایی نابرابر بارش در نیمه جنوبی کشور، هواشناسی و علوم جو، جلد ۱، دوره ۱، شماره ۱، ۲۵-۳۸.

- شادمانی، ناهید، نصرافهانی، محمدعلی، قاسمی، احمدرضا، (۱۳۹۷). تشخیص منابع تأمین رطوبت و مسیر دقیق حرکت توده‌های هوای مرطوب مؤثر بر بارش‌های سیل‌آسا در غرب و جنوب ایران؛ مطالعه موردی: سیل ۷ و ۲۰ آبان ۱۳۹۴، مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۱۲، دوره ۱۲، شماره ۲، ۵۰-۶۳.
- علیجانی، بهلول، خسروی، محمود، اسماعیل‌نژاد، مرتضی، (۱۳۸۹). تحلیل همدیدی بارش سنگین ششم ژانویه ۲۰۰۸ در جنوب شرق ایران، پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، سال ۱، دوره ۱، شماره ۳، ۳-۱۴.
- فتاحی، ابراهیم، شیراوند، هنگامه، (۱۳۹۳). بررسی الگوهای گردش جوی روزهای همراه با بارش برف سنگین در غرب ایران، تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال ۱، دوره ۱، شماره ۱، ۹۷-۱۰۷.
- کریمی، مصطفی، فرج‌زاده، منوچهر، (۱۳۹۰). شار رطوبت و الگوهای فضایی- زمانی منابع تأمین رطوبت بارش‌های ایران، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، جلد ۱۹، دوره ۱۱، شماره ۲۲، ۱۰۹-۱۲۷.
- مشکواتی، امیرحسین، مرادی، محمد، (۱۳۸۳). بررسی ناوه فشاری دریای سرخ از دیدگاه دینامیکی، نیوار، شماره ۵۲، ۵۳-۷۴.
- نوری، حمید، غیور، حسنعلی، مسعودیان، سید ابوالفضل، آزادی، مجید، (۱۳۹۲). تحلیل فراوانی تابع همگرایی شار رطوبت و منابع رطوبتی بارش سواحل جنوبی خزر، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۴، پیاپی ۵۱، شماره ۳، ۱-۱۴.
- Banacos, P.C., Schultz, D.M., (2005). **The Use of Moisture Flux Convergence in Forecasting Convective Initiation: Historical and Operational Perspectives**, Journal of Weather and Forecasting, Vol 20, Pp 351- 366.
- Dayan, U., Nissen, K., Ulbrich, U., (2015). **Atmospheric conditions inducing extreme precipitation over the eastern and western Mediterranean**, Natural Hazards Earth System Sciences, Vol 15, Pp 2525- 2544, DOI: 10.5194/nhess-15-2525-2015.
- Dyer, J.L., Mote, T.L., (2006). **Spatial variability and trends in observed snow depth over North America**, Geophys. Res. Lett., 33, L16503, doi: 10.1029/2006GL027258.
- Frei, A., Robinson, D.A., (1999). **Northern Hemisphere snow extent: Regional variability**, Int. J. Climatol., 19, Pp 1535- 1560.
- Gutzler, D.S., (2000). **Covariability of spring snowpack and summer rainfall across the southwest United States**, J. Climate, 13, Pp 4018- 4027.
- Holton, J.R., (2004). **An Introduction to Dynamic Meteorology. Fourth Edition**, Elsevier Academic Press, San Diego, California, USA.
- Panziera, L., Hoskins, B., (2014). **Weather Developments Leading to Heavy Snow in the South-Eastern Lpine Region**, National Weather Science.
- Perry, B., Konrad, C.E., (2006). **Synoptic Patterns Associated with the Record Snowfall of 1960 in the Southern Appalachians**, 63rd Eastern Snow Conference, Newark, Delaware USA.
- Quiring, S.M., Kluver, D.B., (2009). **Relationship between Winter/Spring Snowfall and Summer Precipitation in the Northern Great Plains of North America**, Journal of Hydrometeorology, Vol 10, Pp 1203- 1217.
- Stander J.H., Dyson, L., Engelbrecht, C.J., (2016). **A snow forecasting decision tree for significant snowfall over the interior of South Africa**, South African Journal of Science, Vol 112, DOI: 10.17159/sajs.2016/20150221.
- Vuille, M., Ammann, C., (1997). **Regional Snowfall Patterns in the High, Arid Andes**, DOI: 10.1023/A: 1005330802974.
- Zhang, Y., Li, T., Wang, B., (2004). **Decadal change of the spring snow depth over the Tibetan plateau: The associated circulation and influence on the East Asian summer monsoon**, J. Climate, 17, Pp 2780- 2793.



پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی