

*Research Article***Tracking moisture sources and analysis of instability indicators leading to heavy rains in Northwest Iran****Ali Shahi<sup>1</sup>, Bromand Salahi<sup>1\*</sup>**

1-Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Received: 05 Jun 2024 Accepted: 01 Jan 2025

**Extended Abstract****Introduction**

The study of climate hazards such as heavy precipitation is very important due to its direct impact on flooding. Due to the climate change that the world has experienced, climate hazards have increased. What is certain is that humans cannot prevent the occurrence of climate hazards, but by being aware of these events in advance, under the influence of climate forecasts, they can reduce the destructive consequences of these hazards. Also, considering the very prominent role of humans in increasing the most important climate forcing, namely greenhouse gases, especially carbon dioxide, by managing fossil fuels and increasing new energy power plants, which are known as clean energies, climate changes that cause extreme events can be reduced. Another issue is the management of heavy precipitation to control large amounts of water for use in agriculture, which seems to be able to benefit from this weather event by taking measures. Another important point regarding heavy precipitation in the northwest region of Iran is to pay attention to the construction of residential areas in places far from rivers, which are vulnerable to flooding caused by heavy precipitation. The most important cause of extreme events such as heavy precipitation is currently climate change. The main factor causing climate change and desertification is greenhouse gases. The most important type of greenhouse gas is carbon dioxide. The main reason for the increase in this gas, which has a long life and is very poorly degradable, is humans. In other words, the main cause of the increase and intensification of extreme events is human misbehavior in dealing with nature. The northwest region of Iran is prone to heavy precipitation due to its mountainous topography and location on the main path of Mediterranean cyclones. This research was conducted with the aim of identifying the moisture sources of heavy precipitation in northwest Iran and also analyzing the instability indicators related to it.

**Materials and Methods**

The study area in this study is northwest Iran, including West Azarbaijan, East Azarbaijan, Ardabil, North Kurdistan, and West Zanzan provinces. In this study, daily and hourly (3-hour) precipitation data and hourly (3-hour) wind data (speed and direction) were obtained from the Iranian Meteorological Organization ([www.irimo.ir](http://www.irimo.ir)) for 23 synoptic stations located in northwest Iran during the period 1990-2019. The upper atmosphere data of the Tabriz station (the only upper atmosphere station in northwest Iran) were obtained from the University of Wyoming website (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). The upper atmosphere data of this study were obtained from the NCEP/NCAR database ([www.cdc.noaa.gov](http://www.cdc.noaa.gov)). Trial and error estimates showed that if the percentile is higher than 99 and the area covered by heavy precipitation is more than 30%, synoptic conditions will provide a good justification for heavy precipitation.

**Citation:** Shahi, A. and Salahi, B., 2025. Tracking moisture sources and analysis of instability indicators, *Res. Earth. Sci.* 16(1), (128-151) DOI: 10.48308/esrj.2025.235940.1225

\* Corresponding author E-mail address: [salahi@uma.ac.ir](mailto:salahi@uma.ac.ir)



In this paper, days when at least 7 stations in the study area simultaneously had at least 20 mm of precipitation were selected. In this study, using TTI, CAPE, KI, LI, SI and SWEAT indices, the state of atmospheric instability in northwest Iran was evaluated at a representative station in the region (Tabriz) on days of heavy precipitation (43 days). Based on factor analysis in the SPSS software environment, the main factors were identified from among the 6 indicators, then using cluster analysis, the main clusters were extracted and the Skew-T diagram of the representative days of each cluster was drawn and interpreted in the RAOB software environment. To select representative stations for the northwest region of Iran, 15% (3 synoptic stations) of the stations in the study area were selected based on altitude (meters), climate (number of heavy precipitation and average heavy precipitation during the study period), and large distance from each other (based on kilometers and geographical location). Using cluster analysis in the SPSS software environment, clusters were extracted based on the effective variables (relative humidity, wind vector, precipitable water) of the mid-level atmosphere in the northwest region of Iran. Then, the representative of each cluster was determined and for each representative day of heavy precipitation event (4 days out of 43 heavy precipitation events), in each of the 3 representative stations of the study area (3 stations out of 23 synoptic stations), the path and source of moisture of heavy precipitation were traced using the backward method (72 hours before the days of heavy precipitation in northwest Iran) and using global data analyzed at the National Centers for Environmental Prediction and the National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) with a time step of 6 hours with a spatial resolution of  $2.5 \times 2.5$  longitude and latitude for the levels of 850, 700 and 550 hectopascals, with the HYSPLIT web model. The wind gust diagram was drawn and interpreted using the WRPLOT software for the representative days at the representative stations of northwest Iran. The combined wind and precipitation diagram was drawn and interpreted hourly in the Excel software environment for the representative days at the representative stations of the study area.

### Results and Discussion

According to the criteria for heavy precipitation in this study, 43 extreme precipitation events were identified in the observation period (1990-2019). Using hierarchical cluster analysis using the Ward method with Euclidean distance, 2 main clusters were extracted from the 43 extreme precipitation events. The first cluster shows heavy precipitation events with dynamic ascent in the study area, and the second cluster includes heavy precipitation events with convective ascent in the research area. Of the two clusters, the first cluster has a higher frequency and indicates the dominance of heavy precipitation with dynamic origin over heavy precipitation with thermodynamic nature in the study area during the period under study. By drawing the Skew-T diagram in the RAOB software environment for representative days of each cluster, the instability conditions on representative days indicated the intensification and stability of atmospheric instability at levels above 850 hectopascals for the representative dynamic cluster. In the representative day's Skew-T diagram, the thermodynamic instability cluster was observed up to a maximum level of 850 hectopascals. Calculations showed that, considering the instability indices and the Skew-T thermodynamic diagram, the role of the convection factor in heavy precipitation in northwest Iran was low and the dynamic factor was the main reason for heavy precipitation. The results of the study based on the windrose diagram indicate that the prevailing winds causing heavy precipitation events blew from the southwest and had an average speed of 3.5 m/s. The output of the HYSPLIT diagram also confirms the southwest direction of the study area for the moisture input path of extreme precipitation. Also, the results of the combined hourly wind speed and precipitation diagram showed that the maximum wind speed and maximum precipitation on heavy precipitation days were at 12:00 GMT, equivalent to 15:30 local time, which indicates the strengthening of the effective dynamic system in the region at this hour. In other words, the cyclone located at this hour, with the convergence created, has brought maximum humidity to the region and, with its sharp ascent, has provided the cause of heavy precipitation in northwest Iran. Based on the calculations, the average atmospheric variability of precipitable water, relative humidity, and wind speed in extreme precipitation events in northwest Iran has been 16 g/m<sup>2</sup>, 68 percent, and 20 m/s, respectively.


### Conclusion

Based on the research conducted in the northwest region of Iran, in the period 1990-2019 on heavy precipitation, the results showed that, considering the instability indices and the Skew-T thermodynamic diagram, the role of the convection factor in heavy precipitation was very low and the dynamic factor was the main reason for heavy precipitation. The results of the study based on the HYSPLIT model showed that the main path of moisture entry into the study area is the southwest and the main source of moisture supply for heavy precipitation is the Red Sea. The results of the study based on the windrose diagram indicate that the prevailing winds in heavy precipitation events blew from the southwest and their speed was 3.5 m/s on

average. The combined hourly wind speed and precipitation diagram showed that the maximum wind speed on heavy precipitation days was at 12:00 GMT, equivalent to 15:30 local time, which indicates the strengthening of the effective dynamic system in the study area at this hour. Humans cannot eliminate weather hazards. Weather hazards are part of nature, and humans can only reduce the frequency and severity of these events. In the northwest of Iran, the best solution to deal with the risks caused by heavy precipitation is to identify the causes of this event, such as the moisture sources that provide heavy precipitation, and to evaluate instability indicators that indicate the conditions for the formation of heavy precipitation. The next step is to inform the residents of the region, such as farmers, travelers, and others, about the occurrence of this event and warn them of the possibility of flooding. Insuring crops and residential houses, constructing residential houses in susceptible areas on high foundations with a height of 3 or 4 meters, increasing vegetation cover and planting seedlings with the aim of increasing soil permeability, dredging rivers to prevent water levels from rising due to sediment deposition, taking protective measures on river banks with the aim of reducing soil erosion in coastal areas, using mobile concrete dams during precipitation in agricultural and residential areas with the aim of preventing possible flood damage during heavy precipitation, and avoiding unnecessary transportation due to reduced visibility, slipperiness, and flooding of urban and roadways are considered major solutions to reduce losses caused by heavy precipitation. The results of this study are in good agreement with the results of other researchers in terms of the dominance of dynamic instability in heavy rainfall, the occurrence of heavy rainfall in the spring due to convective causes, the occurrence of extreme rainfall due to the supply of moisture to the Red Sea by the Mediterranean cyclone, and the confirmation of the strengthening of cyclones causing heavy rainfall at 12:00 GMT.

**Keywords:** Cluster Analysis, Factor Analysis, Heavy Precipitation, HYSPLIT, RAOB, Northwest Iran.

## ردیابی منابع رطوبتی و تحلیل شاخص‌های ناپایداری منجر به بارش‌های سنگین شمال غرب ایران

علی شاهی<sup>۱</sup>، برومند صلاحی<sup>۱\*</sup> 

۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۱۶ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲

### چکیده گسترده

#### مقدمه

مطالعه مخاطرات اقلیمی نظیر بارش سنگین به دلیل تأثیر مستقیم در ایجاد سیل بسیار حائز اهمیت است. به دلیل تغییرات اقلیمی که جهان دچار آن شده است مخاطرات اقلیمی افزایش یافته است. آنچه مسلم است انسان نمی‌تواند از بروز مخاطرات جوی جلوگیری کند ولی در پیش‌آگاهی از این رخدادها تحت تأثیر پیش‌بینی‌های اقلیمی می‌تواند از نتایج مخرب این مخاطرات بکاهد. همچنین با توجه به نقش بسیار پررنگ انسان در افزایش مهم‌ترین واداشت اقلیمی یعنی گازهای گلخانه‌ای به‌طور ویژه گاز دی‌اکسید کربن، با مدیریت سوخت‌های فسیلی و افزایش نیروگاه‌های انرژی‌های نو که به انرژی‌های پاک معروف هستند می‌توان از تغییرات اقلیمی که مسبب رخدادهای حدی هستند کاست. مطلب دیگر مدیریت بارش سنگین برای مهار آب عظیم برای استفاده در کشاورزی است که به نظر می‌رسد با انجام تدابیر بتوان از این رخداد جوی بهره برد. نکته مهم دیگر در زمینه بارش سنگین در منطقه شمال غرب ایران توجه به احداث مناطق مسکونی در جاهای دور از مسیل‌ها می‌باشد که با شروع سیل ناشی از بارش سنگین آسیب‌پذیر هستند. مهم‌ترین مسبب رخدادهای حدی نظیر بارش سنگین در حال حاضر تغییرات اقلیمی است. عامل اصلی ایجاد تغییرات اقلیمی واداشت گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. مهم‌ترین نوع گازهای گلخانه‌ای گاز کربنیک (دی‌اکسید کربن) است. اصلی‌ترین دلیل افزایش این گاز که عمر زیاد داشته و تجزیه‌پذیری بسیار کمی دارد، انسان می‌باشد. به عبارت دیگر، مسبب اصلی افزایش و تشدید رخدادهای حدی عملکرد نادرست انسان در مواجهه با طبیعت است. منطقه شمال غرب ایران به علت توپوگرافی کوهستانی و قرارگیری در مسیر اصلی عبور سیکلون‌های مدیترانه، مستعد رخداد بارش‌های سنگین است. این پژوهش با هدف شناسایی منابع رطوبتی بارش سنگین شمال غرب ایران و همچنین تحلیل شاخص‌های ناپایداری مرتبط با آن انجام گرفته است.

#### مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، شمال غرب ایران شامل استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، اردبیل، شمال کردستان و غرب زنجان می‌باشد. در این پژوهش داده‌های بارش به‌صورت روزانه و ساعتی (۳ ساعته) و داده‌های باد (سرعت و جهت) به‌صورت ساعتی (۳ ساعته) برای ۲۳ ایستگاه سینوپتیک واقع در شمال غرب ایران در دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۹ از سازمان هواشناسی ایران [www.irimo.ir](http://www.irimo.ir) اخذ گردید.

استناد: شاهی، ع. و صلاحی، ب. ۱۴۰۴. ردیابی منابع رطوبتی و تحلیل شاخص‌های ناپایداری منجر به بارش‌های سنگین شمال، پژوهشهای

دانش زمین: ۱۶(۱)، (۱۵۱-۱۲۸)، DOI: 10.48308/esrj.2025.235940.1225

E-mail: [salahi@uma.ac.ir](mailto:salahi@uma.ac.ir)

\* نویسنده مسئول:



داده‌های جو بالای ایستگاه تبریز (تنها ایستگاه جو بالا در شمال غرب ایران) از طریق سایت دانشگاه وایومینگ آمریکا <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> به دست آمد. داده‌های سطح فوقانی جوی این پژوهش از پایگاه NCEP/NCAR تارنمای [www.cdc.noaa.gov](http://www.cdc.noaa.gov) اخذ شد. برآوردهای حاصل از آزمون و خطا نشان داد که اگر صدک بالاتر از ۹۹ و مساحت تحت پوشش بارش سنگین بیش از ۳۰ درصد انتخاب شود، شرایط همدید توجیه مناسبی برای بارش‌های سنگین ارائه خواهند داد. در این مقاله، روزهایی که حداقل ۷ ایستگاه به‌طور هم‌زمان در منطقه مورد مطالعه دارای بارش حداقل ۲۰ میلی‌متر بودند انتخاب شدند. در این مطالعه با استفاده از شاخص‌های TTI, CAPE, KI, LI, SI و SWEAT وضعیت ناپایداری جو در شمال غرب ایران در ایستگاه نماینده منطقه (تبریز)، در روزهای رخداد بارش سنگین (۴۳ روز) مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس تحلیل عاملی در محیط نرم‌افزار SPSS از بین ۶ شاخص، عامل‌های اصلی شناسایی شد، سپس با استفاده از تحلیل خوشه‌ای، خوشه‌های اصلی استخراج گردید و نمودار اسکویوتی روزهای نماینده هر خوشه در محیط نرم‌افزار RAOB ترسیم و تفسیر شدند. برای انتخاب ایستگاه‌های نماینده منطقه شمال غرب ایران، ۱۵ درصد (۳ ایستگاه همدید) ایستگاه‌های منطقه تحقیق، بر اساس ارتفاع از سطح دریا (متر)، اقلیم (تعداد بارش سنگین و میانگین بارش سنگین در بازه زمانی مورد مطالعه) و فاصله زیاد از همدیگر (بر اساس کیلومتر و موقعیت جغرافیایی) انتخاب شدند. با استفاده از تحلیل خوشه‌ای در محیط نرم‌افزار SPSS، بر اساس متغیرهای مؤثر (رطوبت نسبی، بردار باد، آب قابل بارش) تراز میانی جو در منطقه شمال غرب ایران، خوشه‌ها استخراج شدند. سپس نماینده هر خوشه تعیین گردید و برای هر روز نماینده رخداد بارش سنگین (۴ روز از ۴۳ رخداد بارش سنگین)، در هر ۳ ایستگاه نماینده منطقه مورد مطالعه (۳ ایستگاه از ۲۳ ایستگاه همدیدی)، مسیر و منشأ رطوبت بارش‌های سنگین با روش پس‌رو (۷۲ ساعت قبل از روزهای بارش سنگین در شمال غرب ایران) و با استفاده از داده‌های جهانی آنالیز شده در مرکز ملی پیش‌بینی محیطی و تحقیقات جوی آمریکا (NCEP/NCAR) با گام زمانی ۶ ساعته با قدرت تفکیک مکانی  $2/5 \times$  طول و عرض جغرافیایی برای ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۵۰ هکتوپاسکال، با مدل تحت وب HYSPLIT ردیابی انجام شد. با استفاده از نرم‌افزار WRPLOT نمودار گلباد برای روزهای نماینده در ایستگاه‌های نماینده شمال غرب ایران ترسیم و تفسیر شد. نمودار ترکیبی باد و بارش به‌صورت ساعتی، در محیط نرم‌افزار Excel برای روزهای نماینده در ایستگاه‌های نماینده منطقه پژوهش ترسیم و تفسیر شد.

## نتایج

با توجه به معیارهای بارش سنگین در این مطالعه، ۴۳ رخداد حدی بارش در دوره مشاهداتی (۱۹۹۰-۲۰۱۹) شناسایی شد. با استفاده از تحلیل خوشه‌ای سلسه مراتبی به روش وارد با فاصله اقلیدوسی، از ۴۳ رخداد بارش حدی، ۲ خوشه اصلی استخراج شد. خوشه اول، رخدادهای بارش سنگین با صعود دینامیکی در منطقه مطالعه را نشان می‌دهد و خوشه دوم، شامل رخدادهای بارش سنگین با صعود همرفتی در منطقه پژوهش هستند. از بین دو خوشه، خوشه اول فراوانی بیشتری دارد و نشان از غالب بودن بارش‌های سنگین با منشأ دینامیکی به بارش‌های سنگین با ماهیت ترمودینامیکی در منطقه مطالعه در دوره مورد بررسی را دارد. با ترسیم نمودار اسکویوتی در محیط نرم‌افزار RAOB برای روزهای نماینده هر خوشه، شرایط ناپایداری در روزهای نماینده نشان از تشدید و ثبات ناپایداری جو در ترازهای بالای ۸۵۰ هکتوپاسکال برای نماینده خوشه دینامیکی را داشت. در نمودار اسکویوتی روز نماینده، خوشه ترمودینامیکی ناپایداری حداکثر تا تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال مشاهده گردید. محاسبات نشان داد که با توجه به شاخص‌های ناپایداری و نمودار ترمودینامیکی اسکویوتی، نقش عامل همرفت در بارش‌های سنگین شمال غرب ایران کم و عامل دینامیکی دلیل اصلی بارش‌های سنگین بوده است. نتایج مطالعه بر اساس نمودار گلباد، حاکی از آن است که بادهای غالب مسبب رخدادهای بارش سنگین از سمت جنوب غربی وزیده‌اند و به‌طور متوسط  $3/5$  متر بر ثانیه سرعت داشته‌اند. خروجی نمودار HYSPLIT نیز تأییدکننده جهت جنوب غربی منطقه مطالعه برای مسیر ورودی رطوبت بارش‌های حدی است. همچنین نتایج نمودار ترکیبی سرعت باد و بارش به‌صورت ساعتی نشان داد که حداکثر سرعت باد و بیشینه بارش در روزهای بارش سنگین، ساعت ۱۲:۳۰ گریونویچ معادل ۱۵:۳۰ به‌وقت محلی بوده است که نشان از تقویت سیستم دینامیکی مؤثر در منطقه در این ساعت هست؛ به عبارت دیگر، چرخند مستقر در این ساعت با همگرایی ایجاد شده، بیشینه رطوبت را به منطقه کشانده و با صعود شدید موجبات رخداد بارش‌های سنگین شمال غرب ایران را مهیا کرده است. بر اساس محاسبات انجام‌گرفته متوسط

متغیری‌های جوی آب قابل بارش، رطوبت نسبی و سرعت بردار باد در رخدادهای حدی بارش در شمال غرب ایران به ترتیب ۱۶ کیلوگرم بر متر مربع، ۶۸ درصد و ۲۰ متر بر ثانیه بوده است.

### نتیجه‌گیری

بر اساس پژوهش انجام شده در منطقه شمال غرب ایران، در دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۹ در زمینه بارش سنگین، نتایج نشان دادند که با توجه به شاخص‌های ناپایداری و نمودار ترمودینامیکی اسکیتی، نقش عامل همرفت در بارش‌های سنگین بسیار کم و عامل دینامیکی دلیل اصلی بارش‌های سنگین بوده است. نتایج مطالعه بر اساس مدل HYSPLIT نشان داد که مسیر اصلی ورود رطوبت به منطقه مورد مطالعه، سمت جنوب غربی است و منشأ اصلی تأمین رطوبت بارش سنگین، دریای سرخ است. نتایج مطالعه بر اساس نمودار گلباد، حاکی از آن است که بادهای غالب در رخدادهای بارش سنگین از سمت جنوب غربی وزیده‌اند و سرعت آن‌ها به‌طور متوسط ۳/۵ متر بر ثانیه بوده است. نمودار ترکیبی سرعت باد و بارش به‌صورت ساعتی نشان داد که حداکثر سرعت باد در روزهای بارش سنگین، ساعت ۱۲ گرینویچ معادل ۱۵:۳۰ به‌وقت محلی بوده است که نشان از تقویت سیستم دینامیکی مؤثر در منطقه مورد مطالعه در این ساعت است. انسان توانایی حذف مخاطرات جوی را ندارد. مخاطرات جوی جزئی از طبیعت هستند و انسان فقط قادر است از فراوانی و شدت این رخدادهای بکاهد. در شمال غرب ایران نیز بهترین راهکار مقابله با خطرات ناشی از بارش سنگین، شناسایی علل پیدایش این رخداد، از قبیل منابع رطوبتی تأمین‌کننده بارش سنگین و ارزیابی شاخص‌های ناپایداری که نشان از شرایط صعود برای تشکیل بارش سنگین هستند است. در گام بعدی اطلاع‌رسانی از وقوع این رخداد و هشدار بابت احتمال سیل به ساکنان منطقه نظیر کشاورزان، مسافران و ... است. بیمه کردن محصول و خانه‌های مسکونی، احداث خانه‌های مسکونی مناطق مستعد بر روی پایه‌های بلند با ارتفاع ۳ یا ۴ متری، افزایش پوشش گیاهی و نهال‌کاری با هدف افزایش نفوذپذیری خاک، لایروبی رودخانه‌ها برای جلوگیری از افزایش ارتفاع آب در اثر ته‌نشین شدن رسوبات، انجام اقدامات حفاظتی در ساحل رودخانه‌ها با هدف کاهش فرسایش خاک در مناطق ساحلی، استفاده از آب‌بندهای بتونی سیار در موقع بارش در مناطق کشاورزی و مسکونی با هدف جلوگیری از آسیب‌های سیل احتمالی در مواقع بارش سنگین و اجتناب از حمل و نقل‌های غیر ضروری به دلیل کاهش دید، لغزندگی و آب‌گرفتگی معابر شهری و جاده‌ای از راهکارهای عمده برای کاهش تلفات ناشی از بارش سنگین محسوب می‌شوند. نتایج این پژوهش از لحاظ غالب بودن ناپایداری دینامیکی در بارش‌های سنگین، رخداد بارش سنگین در فصل بهار با علل همرفتی، رخداد بارش حدی با تأمین رطوبتی دریای سرخ توسط سیکلون مدیترانه و در تأیید تقویت سیکلون‌های مسبب بارش سنگین در ساعت ۱۲ به‌وقت گرینویچ با نتایج سایر پژوهشگران همخوانی مطلوبی دارد.

**واژگان کلیدی:** تحلیل خوشه‌ای، تحلیل عاملی، بارش سنگین، HYSPLIT، RAOB، شمال غرب ایران.

### مقدمه

(hossienalipour, 2016). حدود ۵۲ درصد از مقدار کل بارش‌ها در ایران، در ۲۵ درصد از مناطق کشور رخ می‌دهد، این مورد در آینده‌ای نزدیک منجر به کمبود منابع آب و ایجاد بحران در رابطه با ذخایر آب کشور خواهد شد (Javanmard et al, 2010). مناطق کوهستانی نظیر شمال غرب کشور ایران دارای شرایط صعود مکانیکی هستند که مکملی برای انواع صعودهای دینامیکی و ترمودینامیکی می‌باشد (تشدید ناپایداری به صورت اجباری در منطقه بادگیر). از طرفی در مناطق کوهستانی به دلیل ارتفاع زیاد رطوبت نسبی تقویت می‌گردد. با توجه به موارد مذکور و همچنین فراوانی سیکلون‌های مدیترانه در شمال

مخاطرات اقلیمی رخدادهای اقلیمی خیلی بزرگی هستند که با شدت زیادی رخ می‌دهند (Farajzadeh, 2013). یکی از رسالت‌های مهم علم اقلیم‌شناسی سینوپتیک، شناسایی و تحلیل بارش‌های سنگین می‌باشد (Alijani, 2013). شاخص‌های حدی اقلیمی توسط سازمان هواشناسی جهانی (WMO) به‌عنوان پدیده‌های اقلیمی و هواشناسی نادر تعریف شده‌اند که بالاتر یا پایین‌تر از یک حد آستانه هستند (Kouzegaran et al, 2015). به‌طور کلی رایج‌ترین روش محاسبه بارش‌های حدی استفاده از شاخص صدک است (Alexander et al, 2006; Halabian and

پورکریمیان و همکاران (Pourkarimian et al, 2021) ردیابی منشأ اقیانوسی محتوای آب بارشی بندر دیر در اسفندماه ۱۳۹۵ را انجام دادند، برای این منظور از مدل HYSPLIT استفاده کردند، نتایج نشان داد که منشأ اصلی محتوای رطوبت سامانه بارشی اسفند ۱۳۹۵، شمال اقیانوس هند (دریای عربی) و شرق اقیانوس اطلس بوده است. بیرانوند و همکاران (Beiranvand et al, 2022) در تحلیل آماری سینوپتیکی بارش‌های سنگین منجر به سیلاب فروردین ۱۳۹۸ در حوزه آبریز درود بروجرد، با استفاده از نمودار اسکیتوی و شاخص‌های ناپایداری KI و LI به این نتیجه رسیدند که یک سامانه سینوپتیک سراسری، کل منطقه را درگیر کرده است و عامل همرفت محلی نقشی نداشته است. راشدی و همکاران (Rashedi et al, 2023) به معرفی و مطالعه ابرهای خزری پرداختند و برای شناسایی مسیر جریان رطوبت از مدل HYSPLIT و روش عقب‌گرد استفاده کردند، نتایج ردیابی نشان داد که منشأ اصلی رطوبت منطقه از دریای خزر بوده است. محمد و همکاران (Mohammed et al, 2023) در مطالعه بارش‌های کشور عراق در دوره ۱۹۹۴-۲۰۱۹، با استفاده از مدل HYSPLIT به این نتیجه رسیدند که منشأ اصلی رطوبت بارش‌های این منطقه دریای سرخ و خلیج فارس است که توسط سیکلون‌های مدیترانه به این منطقه گسیل شده‌اند. طاووسی و رستمی جلیلیان (Tavousi and rostami-Jalilian, 2023) بر اساس تحقیقات انجام گرفته در زمینه طوفان‌های تندری در کرمانشاه به‌وسیله شاخص‌های ناپایداری LI, TT, SI, KI, PW و CAPE به این نتیجه رسیدند که بارش‌های شدید در زمستان با ناپایداری همرفتی کمتر و در فصل بهار با ناپایداری حرارتی بیشتر همراه بوده است. شی و همکاران (Shi et al, 2024) به مطالعه رطوبت بارش‌های منجر به سیل در شهر تیانجین چین طی سال‌های ۲۰۱۲-۲۰۲۰ با مدل HYSPLIT پرداختند، نتایج حاکی از آن بود که مسیر اصلی رطوبت منجر به بارش، از جنوب غرب وارد منطقه شده بود. از آنجایی‌که نواحی کوهستانی و ناهموار شمال غرب ایران همواره مستعد بروز بارش‌های سنگین، سیلاب‌های شدید و فرسایش خاک است لذا در این پژوهش سعی شده است منابع رطوبتی این بارش‌ها ردیابی و شاخص‌های ناپایداری هواهای منجر به بارش‌های سنگین آن تحلیل گردد.

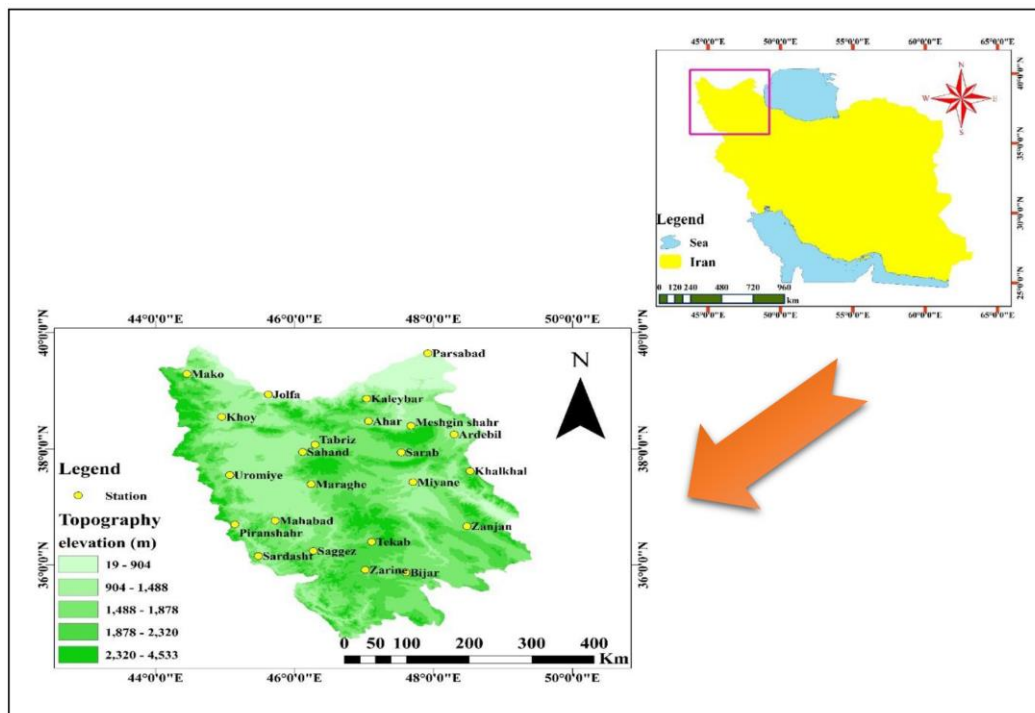
غرب ایران، رخداد‌های بارش سنگین در این منطقه دور از انتظار نیست. از طرف دیگر، بیش‌ترین سیکلون‌های ایران در منطقه شمال غرب تشکیل می‌گردد، چون مسیر اصلی سیکلون‌های خاورمیانه از منطقه شمال غرب ایران می‌گذرد (Alijani, 2013). مدل HYSPLIT مدلی دوگانه است و برای محاسبات خط سیر حرکت بسته‌های هوایی با استفاده از رویکرد PUFF و ذرات عمل می‌کند (Draxler et al, 2009). نتایج به دست آمده از مدل HYSPLIT در مقایسه با اندازه‌گیری شار بخار آب از لحاظ کمی دقیق‌تر است (Li et al, 2016). نمودارهای ترمودینامیکی جوی به‌منظور تفسیر ساختار عمودی (دما و رطوبت) جو طراحی شده و به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده جامعه علمی قرار گرفته‌اند مانند تفی‌گرام، اسکیتوی (Asakereh, 2017). شاخص‌های ناپایداری جهت بررسی ساختار قائم و چگونگی ناپایداری در جو به کار رفته و مناسب بودن یا نبودن شرایط را برای تشکیل پدیده‌های مخرب نشان می‌دهند (Salehi et al, 2014). شفییعی و همکاران (Shafiee et al, 2017) به تحلیل ترمودینامیکی بارش‌های فرین غرب ایران در دوره ۱۹۶۱-۲۰۱۰ با استفاده از شاخص‌های ناپایداری SW, SI, KI, VT, CT, TT و PW در سطح ایستگاه کرمانشاه پرداختند. نتایج نشان داد که شرایط ناپایداری بالقوه در هنگام رخداد بارش فرین بر نیمرخ قائم جو مستولی گشته بود. شمسی‌پور و همکاران (Shamsipoor et al, 2018) به واکاوی همدیدی - ترمودینامیکی بارش‌های سنگین غرب و جنوب غرب ایران با استفاده از شاخص‌های ناپایداری TTI, CAPE, KI, LI و SWEAT در ایستگاه‌های کرمانشاه و اهواز پرداختند، نتایج نشان داد که میزان ناپایداری جو در بیشتر موارد متوسط بوده است. راپولاکي و همکاران (Rapolaki et al, 2020) در مطالعه منشأ رطوبت بارش‌های سنگین دوره (۱۹۸۱-۲۰۱۶) در لیمپوپو واقع در جنوب آفریقا با استفاده از مدل HYSPLIT به این نتیجه رسیدند که اقیانوس هند مهم‌ترین منبع رطوبت بارش سنگین در منطقه پژوهش بوده است. ژانگ و همکاران (Zhang et al, 2021) به مطالعه بارش‌های دوره گرم طی سال‌های (۱۹۸۱-۲۰۱۷) در جنوب غربی چین پرداختند، با استفاده از مدل HYSPLIT مشخص شد که مسیر جنوب غربی منطقه پژوهش بزرگ‌ترین سهم را دارد و منشأ اصلی رطوبت بارش‌ها اقیانوس هند بوده است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، شمال غرب ایران شامل استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، اردبیل، شمال کردستان و غرب زنجان می‌باشد (شکل ۱). در این پژوهش داده‌های بارش به صورت روزانه و ساعتی (۳ ساعته) و داده‌های باد (سرعت و جهت) به صورت ساعتی (۳ ساعته) برای ۲۳ ایستگاه سینوپتیک واقع در شمال غرب ایران در دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۹ از سازمان هواشناسی ایران [www.irimo.ir](http://www.irimo.ir) اخذ گردید. داده‌های جو بالای ایستگاه تبریز (تنها ایستگاه جو بالا در شمال غرب ایران) از طریق سایت دانشگاه وایومینگ امریکا <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> به دست آمد همچنین داده‌های سطح فوقانی جوی این پژوهش از پایگاه NCEP/NCAR تارنمای [www.cdc.noaa.gov](http://www.cdc.noaa.gov) اخذ شد. برآوردهای حاصل از آزمون

و خطا نشان داد که اگر صدک بالاتر از ۹۹ و مساحت تحت پوشش بارش سنگین بیش از ۳۰ درصد انتخاب شود، شرایط همدید توجیه مناسبی برای بارش‌های سنگین ارائه خواهند داد (Sotodeh and alijani, 2015; Mofidi et al, 2008; Alijani et al, 2011). در این مقاله، روزهایی که حداقل ۷ ایستگاه به طور هم‌زمان در منطقه مورد مطالعه دارای بارش حداقل ۲۰ میلی‌متر بودند انتخاب شد. در این مطالعه با استفاده از شاخص‌های TTI, CAPE, KI, LI, SI و SWEAT وضعیت ناپایداری جو در شمال غرب ایران در ایستگاه نماینده منطقه (تبریز)، در روزهای رخداد بارش سنگین (۴۳ روز) مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس تحلیل عاملی در محیط نرم‌افزار SPSS از بین ۶ شاخص، عامل‌های اصلی شناسایی شد، سپس با استفاده از تحلیل خوشه‌ای خوشه‌های اصلی استخراج گردید و نمودار اسکمیوتی روزهای نماینده هر خوشه در محیط نرم‌افزار RAOB ترسیم و تفسیر شدند.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Fig. 1: Geographical location of the study area

سمت و سرعت باد در جو بالا به کار می‌روند. دستگاه رادیوسوند از دو قسمت اصلی «سنجنده» و «فرستنده» تشکیل شده است. برای انتخاب ایستگاه‌های نماینده منطقه شمال غرب ایران، ۱۵ درصد (۳ ایستگاه همدید)

جدول ۱ مقیاس‌های طبقه‌بندی شاخص‌های ناپایداری جو را برای تعیین وضعیت پایداری یا ناپایداری و همچنین شدت آن را نشان می‌دهد. رادیوسوندها از دستگاه‌های هواشناسی هستند که برای اندازه‌گیری دما، رطوبت، فشار،



ساعت قبل از روزهای بارش سنگین در شمال غرب ایران) و با استفاده از داده‌های جهانی آنالیز شده در مرکز ملی پیش‌بینی محیطی و تحقیقات جوی آمریکا (NCEP/NCAR) با گام زمانی ۶ ساعته با قدرت تفکیک مکانی  $2/5 \times 2/5$  طول و عرض جغرافیایی برای ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۵۰ هکتوپاسکال، با مدل تحت وب HYSPLIT ردیابی انجام شد. با استفاده از نرم‌افزار WRPLOT نمودار گلباد برای روزهای نماینده در ایستگاه‌های نماینده شمال غرب ایران ترسیم و تفسیر شد. نمودار ترکیبی باد و بارش به صورت ساعتی، در محیط نرم‌افزار Excel برای روزهای نماینده در ایستگاه‌های نماینده منطقه پژوهش ترسیم و تفسیر شد.

ایستگاه‌های منطقه تحقیق، بر اساس ارتفاع (از سطح دریا برحسب متر)، اقلیم (تعداد بارش سنگین و میانگین بارش سنگین در بازه زمانی مورد مطالعه) و فاصله زیاد از همدیگر (براساس کیلومتر و موقعیت جغرافیایی) انتخاب شدند. با استفاده از تحلیل خوشه‌ای در محیط نرم‌افزار SPSS، بر اساس متغیرهای مؤثر (رطوبت نسبی، بردار باد، آب قابل بارش) تراز میانی جو در منطقه شمال غرب ایران، خوشه‌ها استخراج شدند. سپس نماینده هر خوشه تعیین گردید و سپس برای هر روز نماینده‌ی رخداد بارش سنگین (۴ روز از ۴۳ رخداد بارش سنگین)، در هر ۳ ایستگاه نماینده‌ی منطقه مورد مطالعه (۳ ایستگاه از ۲۳ ایستگاه همدیدی)، مسیر و منشأ رطوبت بارش‌های سنگین با روش پس‌رو (۷۲

جدول ۱: محدوده‌های شاخص‌های دینامیکی مورد استفاده (Sioutas and flocas, 2003)

Table 1: Ranges of used dynamic indicators (Sioutas and flocas, 2003)

میزان ناپایداری و همرفت					شاخص
The degree of instability and convection					INDEX
LI < -7	-7 > LI > -6	-4 > LI > -3	-2 > LI > 0	LI > 0	LI
Instability super intense	Extreme instability	unstable	weak unstable	stable	
SI < -11	-10 > SI > -8	-7 > SI > -5	-4 > SI > -1	SI > 0	SI
Instability super intense	Extreme instability	Relatively unstable	Conditional instability	stable	
	KI > 40	39 < KI < 26	15 < KI < 25	KI < 15	KI
	High potential for convection	Moderate potential for convection	Little potential for convection	improbability Convection	
TT > 56	53 < TT < 56	51 < TT < 52	44 < TT < 50	TT < 44	TT
Distribution of severe storms	Scattered severe storms on a large scale	Isolated severe storms	Probability of convection	improbability Convection	
	CAPE > 2500	1500 < CAPE < 2500	1 < CAPE < 1500	0	CAPE
	very unstable	Relatively unstable	A little unstable	stable	
	SWEAT > 500	400 < SWEAT < 500	300 < SWEAT < 400	SWEAT < 300	SWEAT
	Possibility of tornadoes	Extreme instability	Scattered CB	stable	

شناسایی شدند. در جدول ۲ مقادیر شاخص‌های ناپایداری جو، در ایستگاه تبریز در روزهای رخداد حدی بارش در شمال غرب ایران نشان داده شده است.

## نتایج

با توجه به معیارهای بارش سنگین در این مطالعه، ۴۳ رخداد حدی بارش در دوره مشاهداتی (۱۹۹۰-۲۰۱۹)

جدول ۲: شاخص‌های ناپایداری جو در روزهای وقوع بارش سنگین در ایستگاه تبریز (۱۹۹۰-۲۰۱۹)

Table 2: Indices of atmospheric instability on the days of heavy rainfall in Tabriz station (1990-2019)

Heavy rain day	si	li	ki	cape	swet	tt
29/04/1990	4.52	4.22	28.5	0	80	43.2
24/03/1991	10.15	9.17	16.9	0	56.99	36.6
09/12/1991	*	24.31	*	0	*	*
24/02/1992	4.18	3.31	17.8	0	81	49.5
08/03/1993	5.24	4.95	17.2	0	97.62	46.9
02/11/1993	5.77	5.42	22.5	0	87.19	43.7
11/11/1993	2.2	3.23	29	0	98.79	49
05/11/1994	5.74	5.72	26.1	0	95.41	42.3
06/11/1994	9.92	9.28	17.2	0	100	37.8
07/11/1994	11.7	11.43	16.2	0	138	35.1
09/01/1999	9.62	8.95	19	0	*	39.8
24/03/2000	3.85	3.46	24.5	0	74.62	48
18/11/2001	1.65	1.66	29.3	0	124.4	51.8
02/04/2002	1.86	1.85	29.3	0	85.71	50.6
26/03/2003	7.79	6.28	22.1	0	73.38	39.4
27/04/2003	4.47	4.93	16.9	0	80.04	45.2
23/04/2004	1.88	1.69	28.3	0	106.3	48.2
01/05/2004	4.61	4.67	26	0	114.5	43.8
18/11/2004	3.12	2.86	27.8	0	*	47.6
23/11/2004	2.23	2.01	28.4	0	*	51.2
03/02/2006	11.55	10.87	15.4	0	69.93	36.1
04/02/2006	10.32	9.4	16.9	0	56.33	37.1
11/04/2007	2.05	2.18	20.4	0	93.94	50.5
17/11/2009	1.49	1.65	15.9	0	100.2	51.6
18/11/2009	2.27	2.5	28.9	0.15	104.6	49.6
02/05/2010	-0.71	6.68	33.9	0	194.9	52.2
22/04/2011	3.39	10.66	30.3	0	156	45.2
12/11/2012	3.57	3.27	28.4	0	111	46.4
09/11/2013	4.73	5.53	28.6	0	136	42.3
30/03/2014	1.5	1.55	25.1	17.05	72.99	49.8
03/10/2014	2.82	2.07	28.8	0	149.4	45.8
<b>20/10/2014</b>	<b>11.96</b>	<b>11.77</b>	<b>18.3</b>	<b>0</b>	<b>75.82</b>	<b>32.7</b>
02/12/2016	0.48	0.48	27.8	27.41	277.7	53.8
18/02/2018	8.48	8.63	22.5	0.26	77.39	39.6
<b>30/03/2018</b>	<b>-1.27</b>	<b>-0.87</b>	<b>36.3</b>	<b>139.2</b>	<b>260</b>	<b>54.6</b>
28/01/2019	4.53	3.68	25.1	0	86.57	46.9
25/03/2019	3.85	3.62	27.5	0	75.01	47

آمدند. با توجه به مقادیر به دست آمده برای KMO که بالاتر از ۰/۶ و بارتلت که زیر ۰/۰۵ هستند، صحت انجام

جدول ۳ نتایج آزمون KMO و Bartlett را نشان می‌دهد، مقادیر این آزمون به ترتیب ۰/۷۷۳ و ۰ (sig) به دست

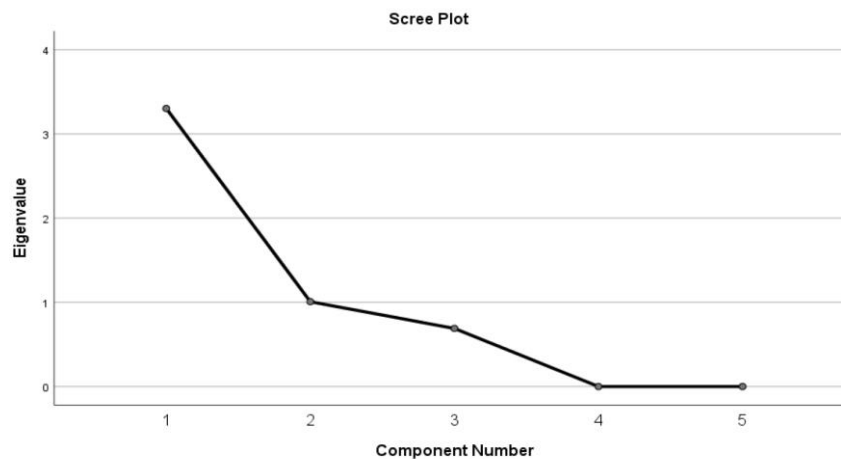
نشان از دقت بالای عامل‌ها و مناسب بودن تحلیل عاملی است (جدول ۴).

تحلیل عاملی تأیید شد. با استفاده از روش تحلیل عاملی دو عامل استخراج شدند (شکل ۲). واریانس کل داده‌ها ۸۶/۱۹۸ می‌باشد که با توجه به داشتن مقدار بالای ۸۰

جدول ۳: آزمون بارتلت و کایزر مایر اولکین به منظور اطمینان از مناسب بودن داده‌ها برای تحلیل عاملی

Table 3: Bartlett and Kaiser-Meier-Olkin test to ensure the suitability of the data for factor analysis

KMO and Bartlett's Test		
Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		.773
Bartlett's Test of Sphericity	Approx. Chi-Square	757.284
	df	10
	Sig.	.000



شکل ۲: نمودار سنگ‌ریزه (صخره‌ای) عامل‌ها

Fig. 2: Scree Plot of factors

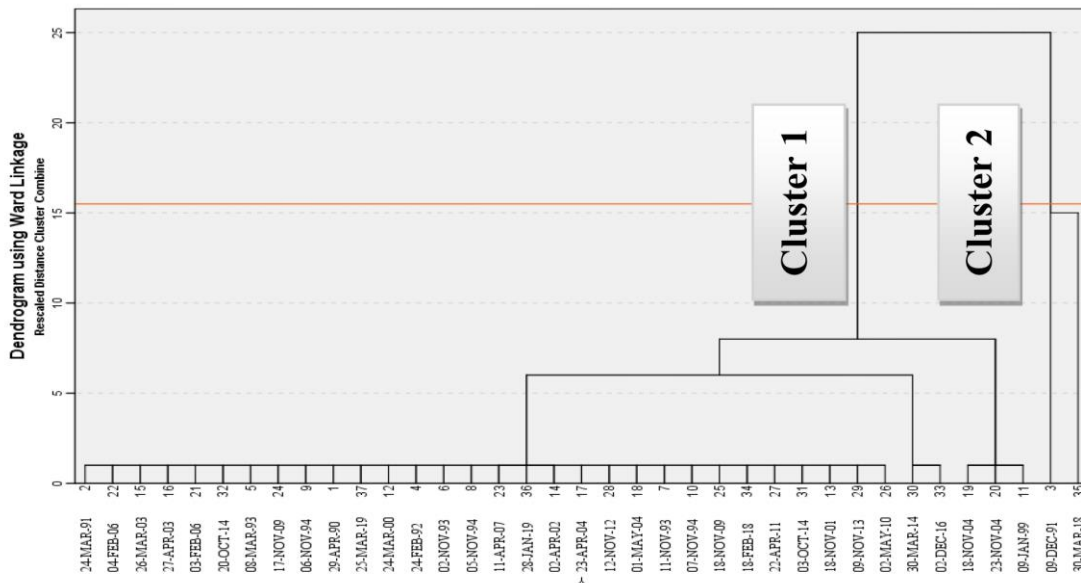
جدول ۴: واریانس کل تبیین شده

Table 4: Total explained variance

Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	3.302	66.045	66.045	3.302	66.045	66.045	3.299	65.974	65.974
2	1.008	20.153	86.198	1.008	20.153	86.198	1.011	20.224	86.198
3	.690	13.801	100.000						
4	1.521E-005	.000	100.000						
5	4.358E-006	8.716E-005	100.000						

بیشتری دارد و نشان از غالب بودن بارش‌های سنگین با منشأ دینامیکی به بارش‌های سنگین با ماهیت ترمودینامیکی در منطقه مطالعه در دوره مورد بررسی را دارد (شکل ۳)، بعد از تعیین نماینده خوشه‌ها، برای روزهای نماینده در محیط نرم‌افزار RAOB نمودار اسکویوتی ترسیم و تفسیر شد (شکل ۴).

با استفاده از تحلیل خوشه‌ای سلسه مراتبی به روش وارد با فاصله اقلیدوسی، از ۴۳ رخداد بارش حدی، ۲ خوشه اصلی استخراج شدند. خوشه اول، رخدادهای بارش سنگین با صعود دینامیکی در منطقه مطالعه را نشان می‌دهد و خوشه دوم، شامل رخدادهای بارش سنگین با صعود همرفتی در منطقه پژوهش هستند. از بین دو خوشه، خوشه اول فراوانی



شکل ۳: دندروگرام بر اساس شاخص‌های ناپایداری برای روزهای بارش حدى شمال غرب ایران در دوره ۳۰ ساله  
 Fig. 3: Dendrogram based on instability indices for the extreme rainfall days of northwest Iran in the 30-year period.

همرفتی) بوده است. در روز نماینده ۲۰۱۸/۰۳/۳۰ شاخص ناپایداری شولتر (SI)، ۱/۲۷- بوده که مقدار منفی داشته، با توجه به جدول ۱ نشان از ناپایداری ترمودینامیکی جو در این روز می‌باشد. شاخص بالابری (LI)، ۰/۸۷- بوده که مقدار منفی داشته، با توجه به جدول ۱ نشان از ناپایداری همرفتی جو در این روز می‌باشد. شاخص ناپایداری ویتینگ (KI)، ۳۶/۶ بوده که با توجه به جدول ۱ در محدوده ۲۶ تا ۳۹ قرار گرفته و نشان از پتانسیل همرفت است. شاخص ناپایداری (CAPEI)، ۱۳۹/۲ بوده که با توجه به جدول ۱ نشان دهنده ناپایداری جو است. شاخص ناپایداری (SWEATI)، ۲۶۰ بوده با توجه به مقدار پایین‌تر از ۳۰۰ در جدول ۱ حاکی از پایداری جو است. شاخص ناپایداری (TTI)، ۵۴/۶ بوده که با مراجعه به جدول راهنما ۱ به علت قرارگیری در محدوده ۵۳ تا ۵۶ معرف طوفان‌های شدید پراکنده در مقیاس وسیع است. ارزیابی انجام شده بر اساس ۶ شاخص ناپایداری جو در روز مذکور نشان داد که در روز نماینده ۲۰۱۸/۰۳/۳۰ جو ایستگاه تبریز ناپایدار (از لحاظ همرفتی) بوده است. در روز ۲۰۱۴/۱۰/۲۰ (نماینده خوشه اول) بر اساس نمودار اسکيوتی ساعت ۱۵:۳۰ بعدازظهر به وقت محلی (شکل ۴: الف) ناپایداری در ترازهای بالای ۸۵۰ هکتوپاسکال شروع شده است. در تراز ۸۰۰ هکتوپاسکال دو منحنی دما و دمای نقطه شبنم همدیگر را قطع کرده‌اند و پایه ابر در این نقطه قرار دارد و ناپایداری تا ترازهای بالای

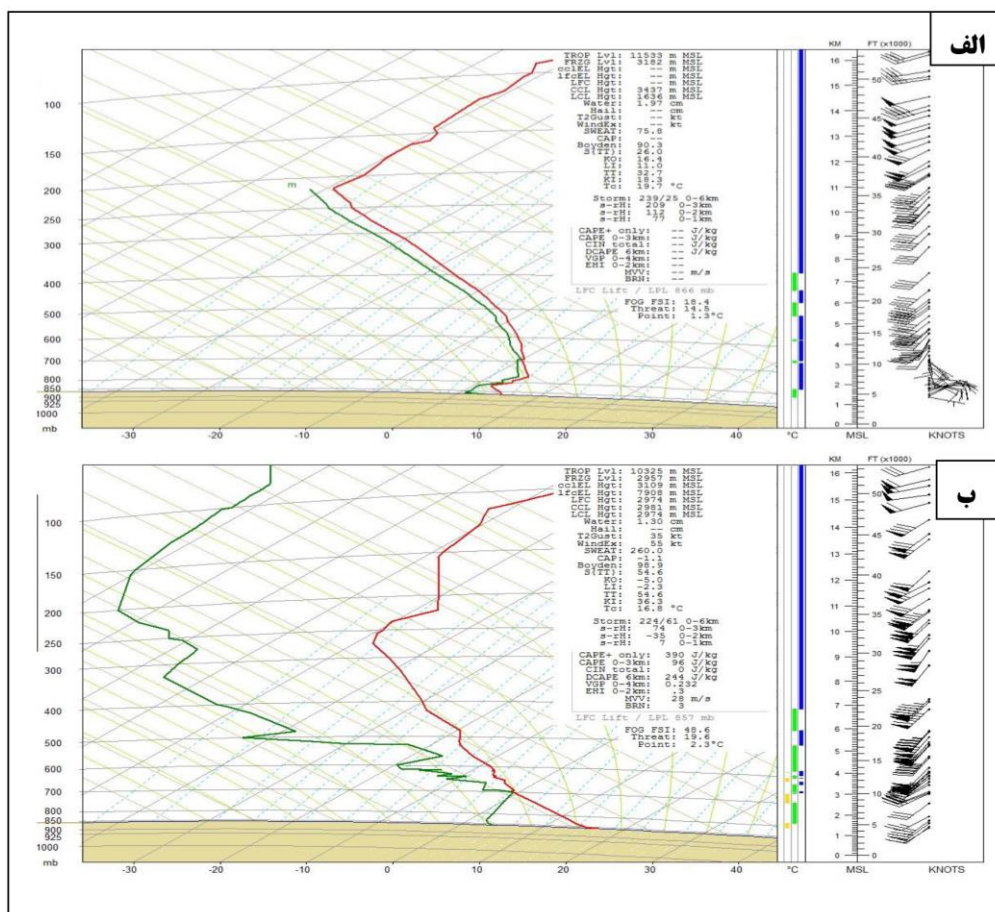
در جدول ۲، روزهای ۲۰۱۴/۱۰/۲۰ و ۲۰۱۸/۰۳/۳۰ که شاخص‌های ناپایداری قوی‌تری داشتند به‌عنوان روزهای نماینده مشخص شدند (۲ روز نماینده به‌صورت پررنگ تفکیک شده است). در جدول ۵ مقدار بارش ایستگاه‌های دارای بارش سنگین در روزهای نماینده هر خوشه درج شده است. در روز نماینده ۲۰۱۴/۱۰/۲۰ شاخص ناپایداری شولتر (SI)، ۱۱/۹۶ بوده که مقدار مثبت داشته و از عدد صفر فاصله دارد، با توجه به جدول ۱ نشان از پایداری ترمودینامیکی جو در این روز می‌باشد. شاخص بالابری (LI)، ۱۱/۷۷ بوده که مقدار مثبت داشته و از عدد صفر فاصله دارد، با توجه به جدول ۱ نشان از پایداری ترمودینامیکی جو در این روز می‌باشد. شاخص ناپایداری ویتینگ (KI)، ۱۸/۳ بوده که با توجه به جدول ۱ در محدوده ۱۵ تا ۲۵ قرار گرفته و نشان از پتانسیل اندک برای همرفت است. شاخص ناپایداری (CAPEI)، صفر بوده که با توجه به جدول ۱ نشان دهنده پایداری جو است. شاخص ناپایداری (SWEATI)، ۷۵/۸۲ بوده که با توجه به مقدار بسیار پایین‌تر از ۳۰۰ در جدول ۱ حاکی از پایداری جو است. شاخص ناپایداری (TTI)، ۳۲/۷ بوده که با مراجعه به جدول راهنما ۱ به علت کمتر بودن از ۴۴ معرف عدم احتمال صعود همرفتی است. ارزیابی انجام شده بر اساس ۶ شاخص ناپایداری جو در روز مذکور نشان داد که در روز نماینده ۲۰۱۴/۱۰/۲۰ جو ایستگاه تبریز پایدار (از لحاظ

شبنم با همدیگر برخورد کرده‌اند و ناپایداری رخ داده است و به دلیل اشباع بسته‌های هوای تراکم ایجاد شده و ابر تشکیل شده است. بر اساس مقادیر شاخص‌های ناپایداری این روز (جدول ۲) و مقایسه با آستانه‌های شاخص‌ها (جدول ۱)، ناپایداری همرفتی در این روز تأیید می‌شود. در این روز به دلیل فصل بهار، عامل همرفت دامنه‌ای مسبب بارش سنگین منطقه بوده است.

جو ادامه یافته است. با توجه به مقادیر شاخص‌های ناپایداری در این روز طبق جدول ۲ و مقایسه آن‌ها با مقیاس‌های استاندارد در جدول ۱، نتایج حاکی از عدم ناپایداری همرفتی در این روز می‌باشد و بارش‌های رخ داده در این روز به دلیل ناپایداری دینامیکی اتفاق افتاده است. در روز ۲۰/۱۸/۰۳/۳۰ (نماینده خوشه دوم) بر اساس نمودار اسکیتوی ساعت ۱۵:۳۰ بعدازظهر به وقت محلی (شکل ۴: ب) در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال دو منحنی دما و دمای نقطه

جدول ۵: ایستگاه‌های دارای بارش سنگین در روزهای نماینده ۲ خوشه  
Table 5: Stations with heavy rainfall on representative days of 2 clusters

Station	بارش سنگین (میلی‌متر) Heavy rain (mm)											ایستگاه Station	رخداد Event
	Sarab	urumiyeh	sagez	kaleybar	ardabil	khoy	mahabad	piranshahr	sardasht	sahand	tabriz		
23	44	20	43.01	43	-	40	80	38	32	37	34	2014/10/20	
-	-	-	-	-	28	29	48	51	29	25.3	29.6	2018/03/30	



شکل ۴: نمودار اسکیتوی، الف: روز رخداد بارش سنگین ۲۰/۱۴/۱۰/۲۰، ب: روز رخداد بارش سنگین ۲۰/۱۸/۰۳/۳۰  
Fig. 4: Skew-T diagram, A: the day of heavy rain event 20/10/2014; B: The day of heavy rain 30/03/2018

مذکور، بیشترین فراوانی را خوشه ۴ با ۱۴ رخداد دارد و کمترین فراوانی به خوشه دوم با ۷ رخداد اختصاص دارد. همچنین در جدول ۸ بر اساس مقادیر میانگین ۳ کمیت جوی مذکور، حداکثر و حداقل سرعت باد در منطقه مطالعه به ترتیب در رخدادهای خوشه دوم و خوشه اول قرار دارد. حداکثر و حداقل رطوبت نسبی در منطقه مطالعه به ترتیب در رخدادهای خوشه اول و خوشه چهارم قرار گرفته است. حداکثر و حداقل آب قابل بارش در منطقه مطالعه به ترتیب در رخدادهای خوشه سوم و خوشه چهارم قرار گرفته است.

به‌منظور رديابی رطوبت منجر به بارش سنگین در منطقه پژوهش، از ۲۳ ایستگاه همدید در این مطالعه از طریق نمونه‌برداری، ۳ ایستگاه سردشت، خوی و پارس‌آباد انتخاب شدند (جدول ۶). بر اساس تحليل خوشه‌ای با استفاده از ۳ متغیر مؤثر سرعت بردار باد برحسب متر بر ثانیه، رطوبت نسبی برحسب درصد و آب قابل بارش با واحد کیلوگرم بر مترمربع برای روزهای حدی بارش در دوره ۳۰ ساله شمال غرب ایران (جدول ۷)، ۴ خوشه استخراج شدند (شکل ۵). مشخصات خوشه‌ها و روز نماینده هر خوشه در جدول ۸ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۷، از ۴ خوشه

جدول ۶: ۳ ایستگاه همدیدي منتخب از منطقه مورد مطالعه

Table 6: 3 synoptic stations selected from the study area

میانگین بارش سنگین در دوره مطالعه	تعداد بارش سنگین در دوره مطالعه	ارتفاع (متر)	موقعیت جغرافیایی در منطقه مورد مطالعه	ایستگاه همدیدي
Average heavy rainfall during the study period	The number of heavy rains during the study period	Elevation (m)	Geographical location in the study area	Synoptic station
22.43	6	77.8	Northeast	parsabad
27.98	12	1103.4	Northwest	khoy
55.04	37	1556.8	Southwest	sardasht

جدول ۷: روزهای بارش سنگین عضو هر خوشه و مقادیر کمیت‌های مؤثر در خوشه‌بندی

Table 7: Heavy rain days of each cluster member and the values of the effective quantities in clustering

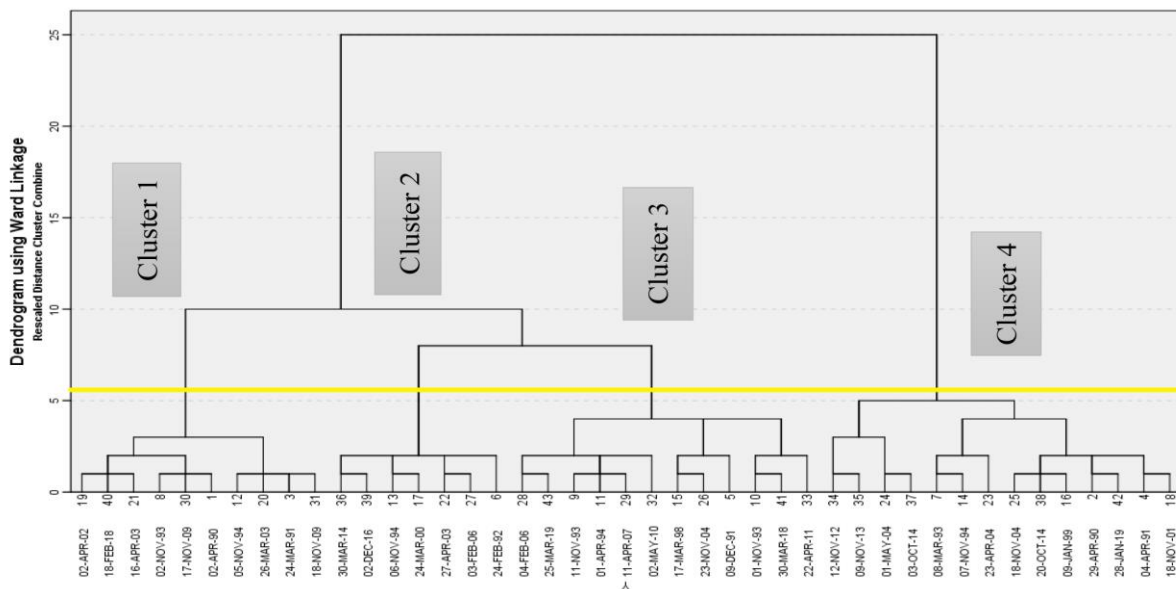
آب قابل بارش (کیلوگرم بر مترمربع)	رطوبت نسبی (درصد)	بردار باد (متر بر ثانیه)	خوشه	رخداد
Precipitable water (kg/m <sup>2</sup> )	Relative humidity (%)	wind vector (m/s)	cluster	Event
12.5	75	20	Cluster 1	02/04/1990
15	60	20	Cluster 4	29/04/1990
15	80	17.5	Cluster 1	24/03/1991
12.5	60	17.5	Cluster 4	04/04/1991
12.5	65	27	Cluster 3	09/12/1991
12.5	80	27.5	Cluster 2	24/02/1992
10	55	25	Cluster 4	08/03/1993
20	70	20	Cluster 3	01/11/1993
15	75	17.5	Cluster 1	02/11/1993
17.5	65	17.5	Cluster 3	11/11/1993
17.5	65	18.75	Cluster 3	01/04/1994
20	80	18.75	Cluster 1	05/11/1994
15	75	25	Cluster 2	06/11/1994
12.5	50	23.75	Cluster 4	07/11/1994
15	65	22.5	Cluster 3	17/03/1998
10	55	17.5	Cluster 4	09/01/1999
18	75	23.75	Cluster 2	24/03/2000
10.5	62.5	18	Cluster 4	18/11/2001
18	75	16.25	Cluster 1	02/04/2002
18	82.5	18.75	Cluster 1	26/03/2003
17.5	75	15	Cluster 1	16/04/2003
17.25	70	23.75	Cluster 2	27/04/2003
17.5	55	28.5	Cluster 4	23/04/2004
16.5	47.5	17.25	Cluster 4	01/05/2004
15	55	17.5	Cluster 4	18/11/2004
13.5	65	20	Cluster 3	23/11/2004
15	70	26.25	Cluster 2	03/02/2006
15.75	65	14.25	Cluster 3	04/02/2006
18.75	65	16.5	Cluster 3	11/04/2007

15.75	72.5	17.25	Cluster 1	17/11/2009
16.5	80	14.25	Cluster 1	18/11/2009
21.25	67.5	14.25	Cluster 3	02/05/2010
22.5	75	20	Cluster 3	22/04/2011
18.75	60	12	Cluster 4	12/11/2012
20.25	55	11.25	Cluster 4	09/11/2013
14.25	70	30	Cluster 2	30/03/2014
21	47.5	12.5	Cluster 4	03/10/2014
16.5	57.5	16.5	Cluster 4	20/10/2014
16.25	72.5	31.25	Cluster 2	02/12/2016
17.5	75	16.5	Cluster 1	18/02/2018
21	67.5	22.5	Cluster 3	30/03/2018
14.25	60	21.25	Cluster 4	28/01/2019
15	65	13.75	Cluster 3	25/03/2019

جدول ۸: مشخصات خوشه‌های روزهای بارش سنگین در شمال غرب ایران در دوره ۳۰ سال

Table 8: Characteristics of clusters of heavy rain days in northwest Iran in a period of 30 years

بردار باد (سرعت) (متر بر ثانیه) wind vector (m/s)			رطوبت نسبی (درصد) Relative humidity (%)			آب قابل بارش (کیلوگرم بر متر مربع) Precipitable water (kg/m <sup>2</sup> )			رطوبت نسبی روز نماینده humidity relative day representative	روز نماینده خوشه representative day cluster	درصد خوشه percentage cluster	فراوانی خوشه Abundance cluster	ردیف Row
Min	Average	Max	Min	Average	Max	کمینه Min	میانگین Average	بیشینه Max					
14.25	17.17	20	72.5	77	82.5	12.5	16.57	20	80	2009/11/18	23.26	10	1
23.75	26.78	31.25	72.5	73.21	80	12.5	15.46	18	72.5	2016/12/02	16.28	7	2
14.25	18.91	27	65	66.66	75	12.5	17.52	22.5	75	2011/04/22	27.90	12	3
11.25	17.18	28.5	47.5	55.71	62.5	10	15	20.25	60	2019/01/28	32.56	14	4



شکل ۵: دندروگرام روزهای بارش سنگین شمال غرب ایران در دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۹ بر اساس متغیرهای مؤثر در رطوبت

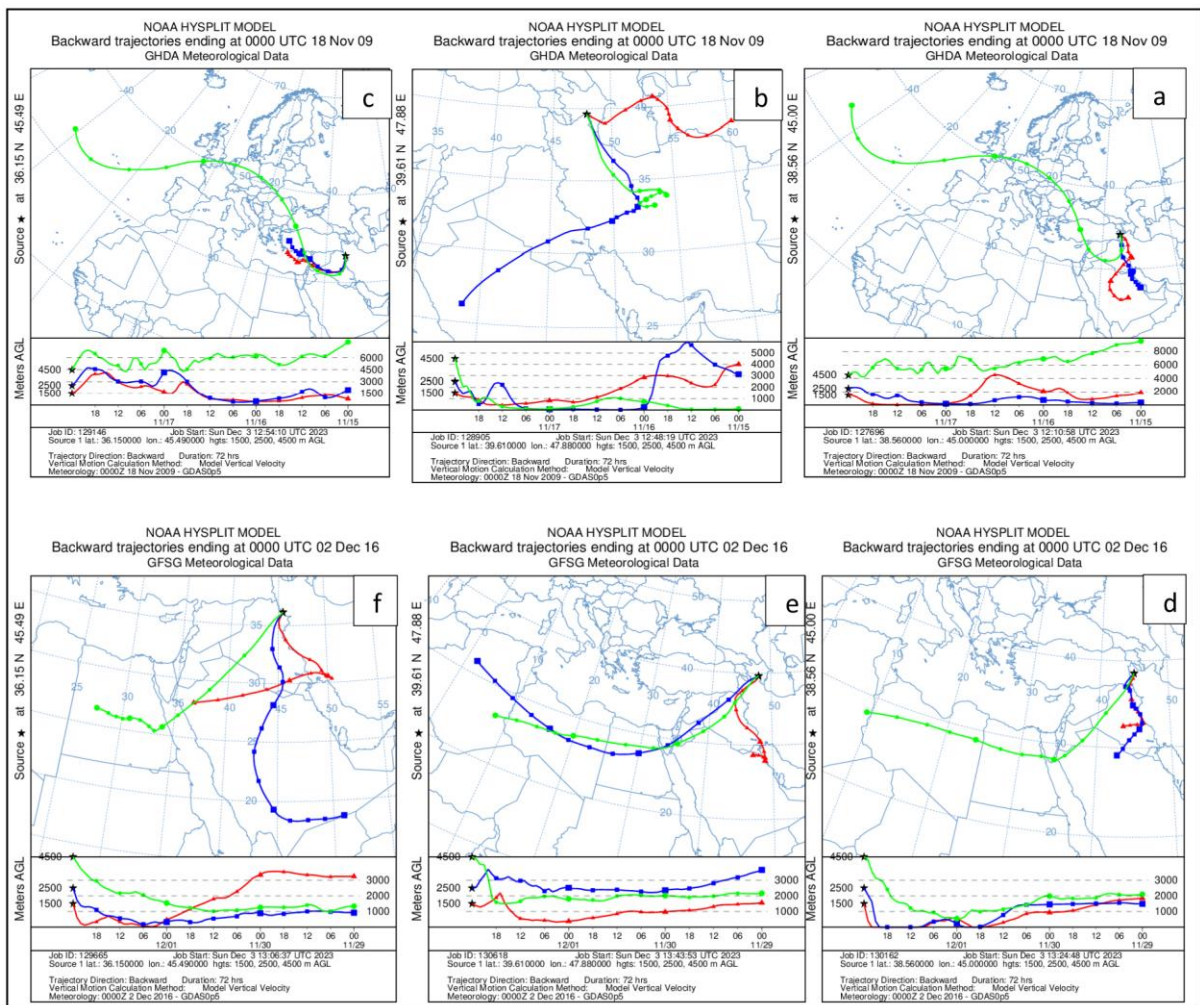
Fig. 5: Dendrogram of days of heavy rain in northwestern Iran in the period of 1990-2019 based on variables affecting humidity.

است. در نمودار علامت ستاره محل ایستگاه مورد نظر را نشان می‌دهد. منحنی‌های قرمز تراز ۱۵۰۰ متری، آبی‌رنگ تراز ۲۵۰۰ متری و سبزرنگ تراز ۴۵۰۰ متری مسیر حرکتی بسته‌های هوایی را نشان می‌دهد. نقاط گره دایره، مثلث و مربع در طول مسیر روی منحنی‌ها نشان دهنده

خروجی مدل HYSPLIT برای ۴ روز نماینده بارش سنگین در ۳ ایستگاه نماینده منطقه مورد مطالعه، با ترازهای (۸۵۰ هکتوپاسکال) ۱۵۰۰ متری، (۷۵۰ هکتوپاسکال) ۲۵۰۰ متری و (۵۵۰ هکتوپاسکال) ۴۵۰۰ متری از سطح زمین در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده

از سمت جنوب غربی وارد منطقه تحقیق شده‌اند. در شکل ۶ d، منشأ رطوبت منطقه مطالعه در تراز ۴۵۰۰ متری، دریای سرخ بوده است که بسته‌های هوایی حامل رطوبت با گذر از روی کشور عراق از سمت جنوب غربی وارد منطقه تحقیق شده است. در شکل ۶ e، منشأ رطوبت منطقه مطالعه در تراز ۱۵۰۰ متری، خلیج فارس و ترازهای ۲۵۰۰ متری و ۴۵۰۰ متری، دریای سرخ بوده است که با عبور از روی کشور عراق از سمت جنوب غربی وارد منطقه تحقیق شده‌اند. در شکل ۶ f، منشأ رطوبت منطقه مطالعه در تراز ۴۵۰۰ متری، دریای سرخ بوده است که بسته‌های هوایی حامل رطوبت با گذر از روی کشور عراق از سمت جنوب غربی وارد منطقه تحقیق شده است.

میانگین موقعیت بسته هوا در هر ۲۴ ساعت است. در شکل ۶ a، منشأ رطوبت منطقه مطالعه در تراز ۲۵۰۰ متری، خلیج فارس و در تراز ۴۵۰۰ متری، شرق اقیانوس اطلس شمالی (با تقویت در دریای سیاه و دریای مدیترانه) بوده است که با عبور از روی کشور عراق از سمت جنوب غربی وارد منطقه تحقیق شده‌اند. در شکل ۶ b، منشأ رطوبت منطقه مطالعه در تراز ۱۵۰۰ متری، دریای خزر بوده است که از سمت شرق وارد منطقه تحقیق شده است. در شکل ۶ c، منشأ رطوبت منطقه مطالعه در تراز ۱۵۰۰ متری و ۲۵۰۰ متری، دریای مدیترانه و در تراز ۴۵۰۰ متری، شرق اقیانوس اطلس شمالی (با تقویت در دریای سیاه و دریای مدیترانه) بوده است که با عبور از روی کشور عراق



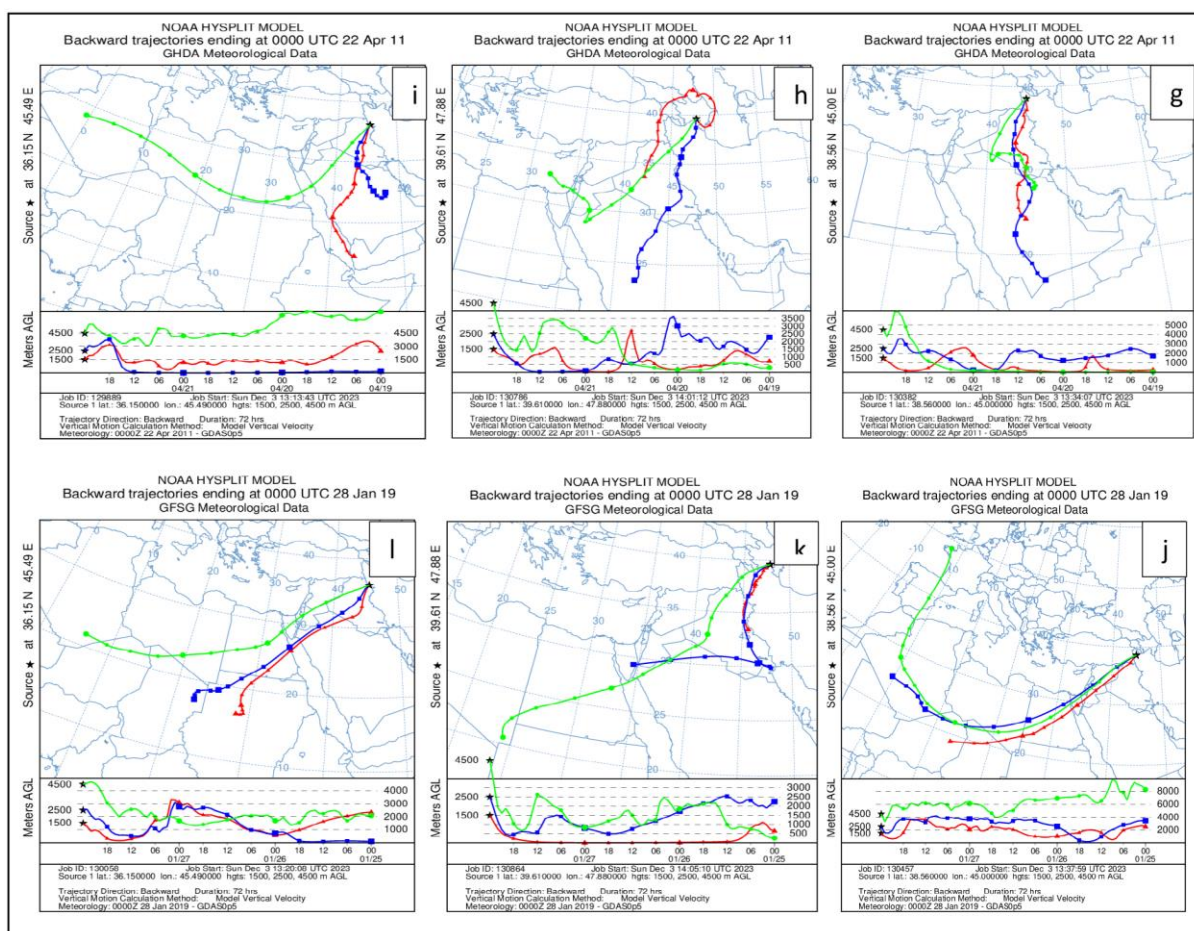
شکل ۶: رديابی مسیر عقب‌گرد حرکت بسته هوا، a: ایستگاه خوی، روز ۲۰۰۹/۱۱/۱۸ b: ایستگاه پارس‌آباد، روز ۲۰۰۹/۱۱/۱۸ c: ایستگاه سردشت، روز ۲۰۰۹/۱۱/۱۸ d: ایستگاه خوی، روز ۲۰۱۶/۱۲/۰۲ e: ایستگاه پارس‌آباد، روز ۲۰۱۶/۱۲/۰۲ f: ایستگاه سردشت، روز ۲۰۱۶/۱۲/۰۲

Fig. 6: Tracing the backward trajectory of the air parcel, a: Khoi station, 18/11/2009 b: Parsabad station, 18/11/2009 c: Sardasht station, 18/11/2009 d: Khoi station, 02/12/2016 e: Parsabad station, 02/12/2016 f: station Sardasht, 02/12/2016



در شکل ۷، در سه روز مورد ارزیابی، رطوبت از منابع رطوبتی به ایستگاه خوی در هیچ‌یک از ترازهای سه‌گانه منتقل نشده است. در شکل ۷، منشأ رطوبت منطقه مطالعه در تراز ۴۵۰۰ متری، دریای مدیترانه بوده است که بسته‌های هوایی حامل رطوبت با گذر از روی کشور عراق از سمت جنوب غربی وارد منطقه تحقیق شده است. در شکل ۷، منشأ رطوبت منطقه مطالعه در هر ۳ تراز، دریای سرخ بوده است که بسته‌های هوایی حامل رطوبت با گذر از روی کشور عراق از سمت جنوب غربی وارد منطقه تحقیق شده‌اند. در شکل ۷، منشأ رطوبت منطقه مطالعه در هر ۳ تراز، دریای سرخ بوده است که بسته‌های هوایی حامل رطوبت با گذر از روی کشور عراق از سمت جنوب غربی وارد منطقه تحقیق شده است.

در شکل ۷، در سه روز مورد ارزیابی، رطوبت از منابع رطوبتی به ایستگاه خوی در هیچ‌یک از ترازهای سه‌گانه منتقل نشده است. در شکل ۷، منشأ رطوبت منطقه مطالعه در تراز ۴۵۰۰ متری، دریای مدیترانه بوده است که بسته‌های هوایی حامل رطوبت با گذر از روی کشور عراق از سمت جنوب غربی وارد منطقه تحقیق شده است. در شکل ۷، منشأ رطوبت منطقه مطالعه در هر ۳ ترازهای ۴۵۰۰ متری و ۱۵۰۰ متری، دریای سرخ بوده است که بسته‌های هوایی حامل رطوبت با گذر از روی کشور عراق از سمت جنوب غربی وارد منطقه تحقیق شده است. در شکل ۷، منشأ



شکل ۷: ردیابی مسیر عقب‌گرد حرکت بسته هوا، g: ایستگاه خوی، روز ۲۰۱۱/۰۴/۲۲، h: ایستگاه پارس‌آباد، روز ۲۰۱۱/۰۴/۲۲، i: ایستگاه سردشت، روز ۲۰۱۱/۰۴/۲۲، z: ایستگاه خوی، روز ۲۰۱۹/۰۱/۲۸، k: ایستگاه پارس‌آباد، روز ۲۰۱۹/۰۱/۲۸، l: ایستگاه سردشت، روز ۲۰۱۹/۰۱/۲۸

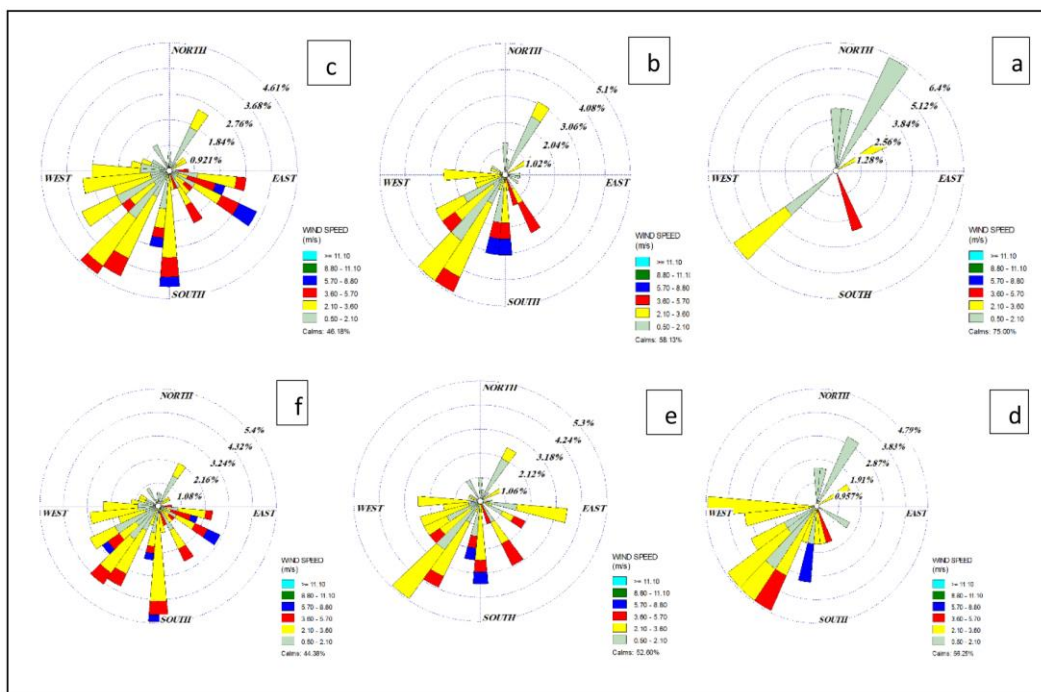
Fig. 7: Tracing the backward trajectory of the air parcel, g: Khoi station, 22/04/2011 h: Parsabad station, 22/04/2011 i: Sardasht station, 22/04/2011 j: Khoi station, 28/01/2019 k: Parsabad station, 28/01/2019 l: station Sardasht, 28/01/2019

نتایج ردیابی انجام گرفته در منطقه پژوهش بر اساس شکل‌های ۶ و ۷ نشان داد که بسته‌های هوای حامل رطوبت از دو مسیر غرب و جنوب غرب وارد منطقه شده‌اند که مسیر اصلی انتقال رطوبت جنوب غربی منطقه بوده است. منشأ رطوبت بارش سنگین در دوره ۳۰ ساله در شمال غرب ایران: خلیج فارس، شرق اقیانوس اطلس شمالی با تقویت

اصلی انتقال رطوبت جنوب غربی منطقه بوده است. منشأ رطوبت بارش سنگین در دوره ۳۰ ساله در شمال غرب ایران: خلیج فارس، شرق اقیانوس اطلس شمالی با تقویت

در دریای سیاه، دریای خزر، دریای مدیترانه و دریای سرخ بوده که منشأ اصلی تأمین رطوبت بارش سنگین دریای سرخ بوده است. تراز غالب در خط سیر بسته‌های هوای ۴۵۰۰ متر (۵۵۰ هکتوپاسکال) بوده است. در تمام مسیرهای ورودی بسته‌های هوای به منطقه مطالعه عبور از کشور عراق مشاهده شد. شکل‌های ۸ و ۹ نمودارهای گلباد برای ۴ روز نماینده بارش سنگین در ۳ ایستگاه نماینده منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهند (نمودارهای گلباد ترسیم شده در هر رخداد شامل روز بارش سنگین و ۷۲ ساعت قبل از بارش سنگین می‌باشند). در شکل ۸، ا، باد غالب دارای جهت جنوب غربی بوده و بیشینه سرعت

۳/۶۰-۲/۱۰ متر بر ثانیه داشته است. در شکل ۸، ب، باد غالب دارای جهت جنوب غربی بوده و بیشینه سرعت ۳/۶۰-۵/۷۰ متر بر ثانیه داشته است. در شکل ۸، ج، باد غالب دارای جهت جنوب غربی بوده و بیشینه سرعت ۳/۶۰-۵/۷۰ متر بر ثانیه داشته است. در شکل ۸، د، باد غالب دارای جهت جنوب غربی بوده و بیشینه سرعت ۳/۶۰-۵/۷۰ متر بر ثانیه داشته است. در شکل ۸، e، باد غالب دارای جهت جنوب غربی بوده و بیشینه سرعت ۳/۶۰-۵/۷۰ متر بر ثانیه داشته است. در شکل ۸، f، باد غالب دارای جهت جنوبی بوده و بیشینه سرعت ۳/۶۰-۵/۷۰ متر بر ثانیه داشته است.

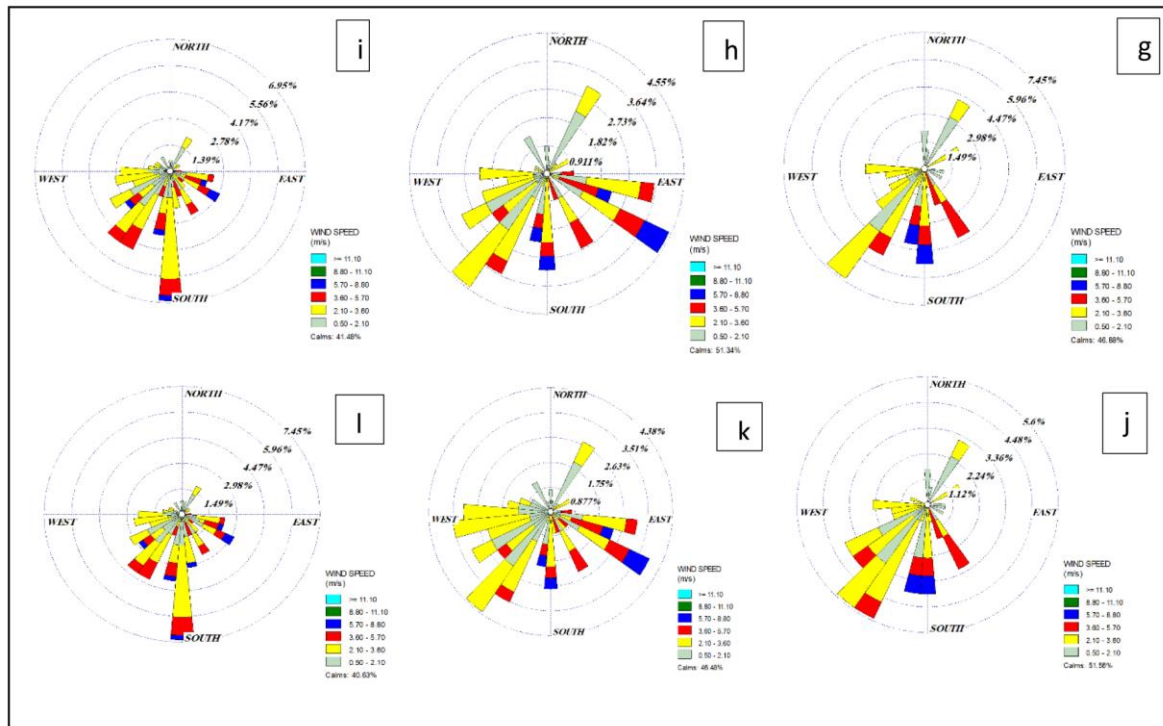


شکل ۸: نمودار گلباد روز رخداد و ۷۲ ساعت قبل از رخدادها، a: ایستگاه خوی، روز ۲۰۰۹/۱۱/۱۸، b: ایستگاه پارس‌آباد، روز ۲۰۰۹/۱۱/۱۸، c: ایستگاه سردشت، روز ۲۰۰۹/۱۱/۱۸، d: ایستگاه خوی، روز ۲۰۱۶/۱۲/۰۲، e: ایستگاه پارس‌آباد، روز ۲۰۱۶/۱۲/۰۲، f: ایستگاه سردشت، روز ۲۰۱۶/۱۲/۰۲

Fig. 8: Wind rose diagrams the day of the incident and 72 hours before the incidents, a: Khoi station, 18/11/2009 b: Parsabad station, 18/11/2009 c: Sardasht station, 18/11/2009 d: Khoi station, 02/12/2016 e: Parsabad station, 02/12/2016 f: Sardasht station, 02/12/2016

جهت جنوب غربی بوده و بیشینه سرعت ۳/۶۰-۵/۷۰ متر بر ثانیه داشته است. در شکل ۹، ک، باد غالب دارای جهت جنوب غربی بوده و بیشینه سرعت ۳/۶۰-۲/۱۰ متر بر ثانیه داشته است. در شکل ۹، ل، باد غالب دارای جهت جنوبی بوده و بیشینه سرعت ۳/۶۰-۵/۷۰ متر بر ثانیه داشته است.

در شکل ۹، گ، باد غالب دارای جهت جنوب غربی بوده و بیشینه سرعت ۳/۶۰-۲/۱۰ متر بر ثانیه داشته است. در شکل ۹، ه، باد غالب دارای جهت جنوب غربی بوده و بیشینه سرعت ۳/۶۰-۲/۱۰ متر بر ثانیه داشته است. در شکل ۹، ا، باد غالب دارای جهت جنوبی بوده و بیشینه سرعت ۳/۶۰-۵/۷۰ متر بر ثانیه داشته است. در شکل ۹، ز، باد غالب دارای



شکل ۹: نمودار گلباد روز رخداد و ۷۲ ساعت قبل از رخدادها، g: ایستگاه خوی، روز ۲۰۱۱/۰۴/۲۲؛ h: ایستگاه پارس‌آباد، روز ۲۰۱۱/۰۴/۲۲؛ i: ایستگاه سردشت، روز ۲۰۱۱/۰۴/۲۲؛ j: ایستگاه خوی، روز ۲۰۱۹/۰۱/۲۸؛ k: ایستگاه پارس‌آباد، روز ۲۰۱۹/۰۱/۲۸؛ l: ایستگاه سردشت، روز ۲۰۱۹/۰۱/۲۸

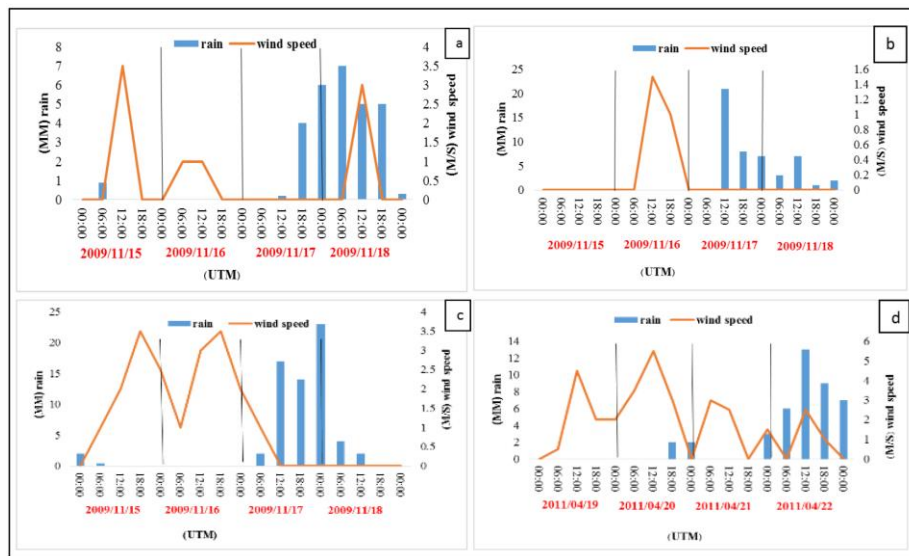
Fig. 9: Wind rose diagrams on the day of the incident and 72 hours before the incidents, g: Khoi station, 22/04/2011 h: Parsabad station, 22/04/2011 i: Sardasht station, 22/04/2011 j: Khoi station, 28/01/2019 k: Parsabad station, 28/01/2019 l: Sardasht station, 28/01/2019

بارش در این روز در ساعت ۶ به وقت گرینویچ با مقدار ۷ میلی‌متر ثبت گردیده است. در روزهای قبل از رخداد، بارش خاصی در ایستگاه رخ نداده ولی حداکثر سرعت باد، ۳ روز قبل رخداد در ساعت ۱۲ به وقت گرینویچ ۷ متر بر ثانیه بوده است. در شکل ۱۰ b، در روز رخداد، ایستگاه جو آرامی داشته وزش باد نداشته و حداکثر بارش در این روز در ساعت ۱۲ به وقت گرینویچ با مقدار ۷ میلی‌متر ثبت گردیده است. در روزهای قبل از رخداد، حداکثر بارش در ایستگاه، روز قبل رخداد با مقدار ۲۲ میلی‌متر ثبت شده و حداکثر سرعت باد، ۲ روز قبل رخداد در ساعت ۱۲ به وقت گرینویچ ۱/۵ متر بر ثانیه بوده است. در شکل ۱۰ c، در روز رخداد، ایستگاه مربوطه وزش باد نداشته و حداکثر بارش در ساعت صفر به وقت گرینویچ ۲۳ میلی‌متر ثبت شده است. در روزهای قبل از رخداد، بارش خاصی در ایستگاه رخ نداده ولی حداکثر سرعت باد ۲ بار به ۳/۵ متر بر ثانیه رسیده است. در شکل ۱۰ d، در روز رخداد، حداکثر سرعت باد در ساعت ۱۲ به وقت گرینویچ با سرعت ۲/۵ متر بر ثانیه

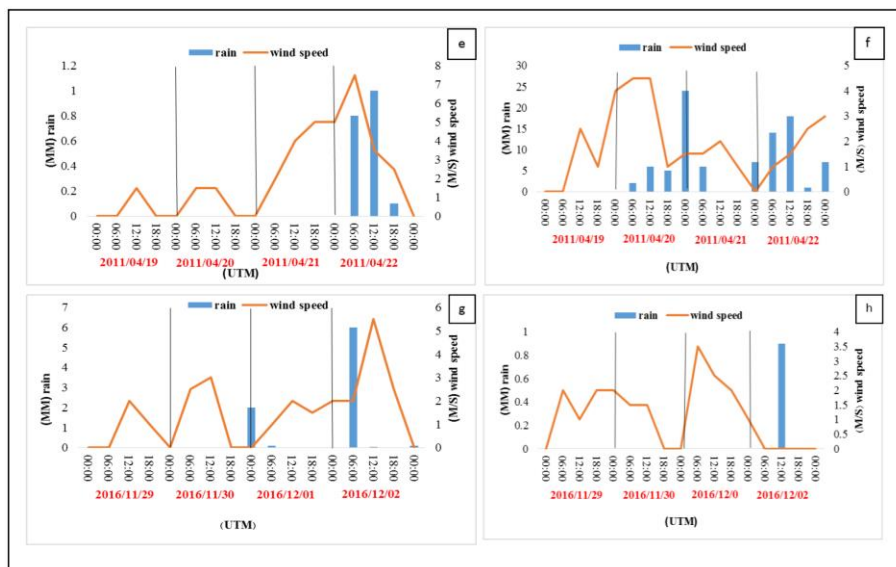
بر اساس نمودارهای گلباد ترسیم شده (شکل‌های ۸ و ۹)، بادهای غالب و حتی اکثر بادهای وزیده در منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی ۳ روز قبل رخداد حدی تا روز بارش سنگین از سمت جنوب و جنوب غربی بوده‌اند که سهم جهت جنوب غربی بیشتر است و همچنین سرعت بادهای وزیده از سمت جنوب غربی نیز نسبت به بادهای دیگر با شدت زیادی بوده است و سمت اصلی وزش باد جنوب غربی بوده است که با تأیید خروجی نمودار HYSPLIT نشان از حضور سیستم دینامیکی در منطقه تحقیق در روزهای رخداد بوده که با چرخندگی پادساعتگرد با جمع‌آوری رطوبت از دریای سرخ مسبب بارش‌های سنگین در شمال غرب ایران شده است. شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ نمودارهای ترکیبی سرعت باد و بارش را در روزهای نماینده رخداد حدی بارش سنگین به همراه ۳ روز قبل رخداد به صورت ساعتی در ایستگاه‌های نماینده نشان می‌دهد. در شکل ۱۰ a، در روز رخداد، حداکثر سرعت باد در ساعت ۱۲ به وقت گرینویچ با سرعت ۳ متر بر ثانیه مشاهده شده و حداکثر

روزهای قبل از رخداد، بارش خاصی در ایستگاه رخ نداده ولی حداکثر سرعت باد به ۵/۵ متر بر ثانیه رسیده است.

مشاهده شده و حداکثر بارش در این روز در ساعت ۱۲ به وقت گرینویچ با مقدار ۱۳ میلی‌متر ثبت گردیده است. در



شکل ۱۰: نمودار سرعت باد و بارش به صورت ساعتی (۶ ساعته)، روزهای بارش سنگین و ۷۲ ساعت قبل از رخدادها، a: ایستگاه خوی، روز ۲۰۱۶/۱۲/۰۲ b: ایستگاه پارس‌آباد، روز ۲۰۰۹/۱۱/۱۸ c: ایستگاه سردشت، روز ۲۰۰۹/۱۱/۱۸ d: ایستگاه خوی، روز ۲۰۱۶/۱۲/۰۲  
 Fig. 10: Graph of wind speed and precipitation hourly (6 hours), days of heavy rain and 72 hours before the events, a: Khoi station, 18/11/2009 b: Parsabad station, 18/11/2009 c: Sardasht station, 18/11/2009 d: Khoi station, 02/12/2016



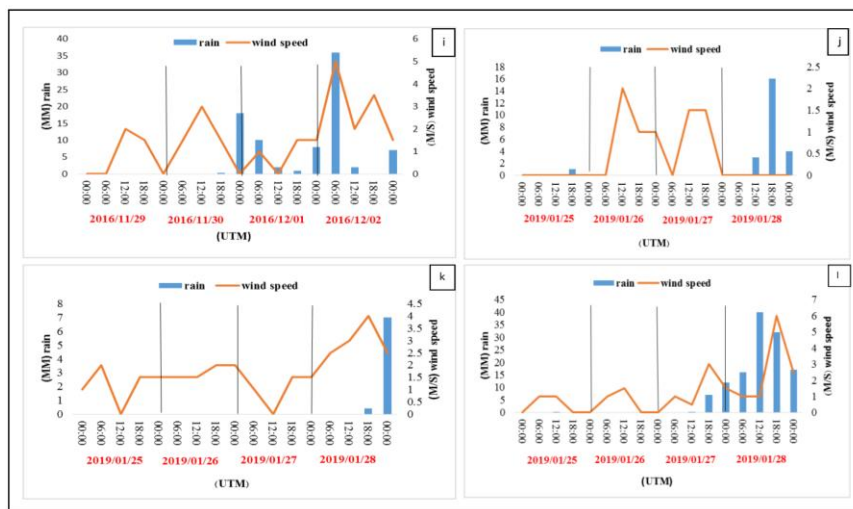
شکل ۱۱: نمودار سرعت باد و بارش به صورت ساعتی (۶ ساعته)، روزهای بارش سنگین و ۷۲ ساعت قبل از رخدادها، e: ایستگاه پارس‌آباد، روز ۲۰۱۶/۱۲/۰۲ f: ایستگاه سردشت، روز ۲۰۱۶/۱۲/۰۲ g: ایستگاه خوی، روز ۲۰۱۱/۰۴/۲۲ h: ایستگاه پارس‌آباد، روز ۲۰۱۱/۰۴/۲۲  
 Fig. 11: Graph of wind speed and precipitation hourly (6 hours), heavy rain days and 72 hours before the events, e: Parsabad station, 02/12/2016 f: Sardasht station, 02/12/2016 g: Khoi station, 22/04/2011 h: Parsabad station, 22/04/2011

با مقدار ۱ میلی‌متر ثبت گردیده است. در روزهای قبل از رخداد، بارش نبوده و ایستگاه باد با سرعت بالای نداشته است. در شکل ۱۱ f، در روز رخداد، حداکثر سرعت باد در

در شکل ۱۱ e، در روز رخداد، حداکثر سرعت باد در ساعت ۶ به وقت گرینویچ با سرعت ۷/۵ متر بر ثانیه مشاهده شده و حداکثر بارش در این روز در ساعت ۱۲ به وقت گرینویچ

سرعت باد در همین ساعت با سرعت ۵ متر بر ثانیه ثبت گردیده است. در روزهای قبل از رخداد، حداکثر بارش ۱۸ میلی‌متر و حداکثر سرعت باد تا ۳ متر بر ثانیه رسیده است. در شکل ۱۲، در روز رخداد، حداکثر بارش در ساعت ۱۸ به وقت گرینویچ ۱۶ میلی‌متر بوده و ایستگاه باد نداشته است. در روزهای قبل از رخداد، بارش رخ نداده ولی حداکثر سرعت باد تا ۲ متر بر ثانیه رسیده است. در شکل ۱۲، k، در روز رخداد، حداکثر بارش در ساعت صفر به وقت گرینویچ ۷ میلی‌متر بوده و حداکثر سرعت باد در ساعت ۱۸ به وقت گرینویچ به ۴ متر بر ثانیه رسیده است. در روزهای قبل از رخداد، بارش رخ نداده ولی حداکثر سرعت باد تا ۲ متر بر ثانیه رسیده است. در شکل ۱۲، l، در روز رخداد، حداکثر بارش در ساعت ۱۲ به وقت گرینویچ ۴۰ میلی‌متر و حداکثر سرعت باد ایستگاه تا ۶ متر بر ثانیه رسیده است. در روزهای قبل از رخداد، بارش رخ نداده ولی حداکثر سرعت باد تا ۳ متر بر ثانیه رسیده است.

ساعت صفر به وقت گرینویچ به ۳ متر بر ثانیه رسیده و حداکثر بارش در این روز در ساعت ۱۲ به وقت گرینویچ ۱۸ میلی‌متر بوده است. در روزهای قبل از رخداد، حداکثر بارش ۲۳ میلی‌متر بوده و سرعت باد به ۴/۵ متر بر ثانیه رسیده است. در شکل ۱۱، g، در روز رخداد، حداکثر سرعت باد در ساعت ۱۲ به وقت گرینویچ به ۵/۵ متر بر ثانیه رسیده و حداکثر بارش در این روز در ساعت ۶ به وقت گرینویچ ۶ میلی‌متر بوده است. در روزهای قبل از رخداد، حداکثر بارش به ۲ میلی‌متر و حداکثر سرعت باد تا ۳ متر بر ثانیه رسیده است. در شکل ۱۱، h، در روز رخداد، حداکثر بارش در ساعت ۱۲ به وقت گرینویچ ۰/۸ میلی‌متر و در ایستگاه باد وزش نداشته به جز در ساعات اولیه صبح به صورت ملایم ثبت شده است. در روزهای قبل از رخداد، بارش رخ نداده ولی حداکثر سرعت باد تا ۳/۵ متر بر ثانیه رسیده است. در شکل ۱۲، i، در روز رخداد، حداکثر بارش در ساعت ۶ به وقت گرینویچ ۳۵ میلی‌متر بوده و حداکثر



شکل ۱۲: نمودار سرعت باد و بارش به صورت ساعتی (۶ ساعته)، روزهای بارش سنگین و ۷۲ ساعت قبل از رخدادها، i: ایستگاه سردشت،

روز ۲۰۱۱/۰۴/۲۲؛ ایستگاه خوی، روز ۲۰۱۹/۰۱/۲۸؛ ایستگاه پارس‌آباد، روز ۲۰۱۹/۰۱/۲۸؛ ایستگاه سردشت، روز ۲۰۱۹/۰۱/۲۸  
 Fig. 12: Graph of wind speed and precipitation hourly (6 hours), heavy rain days and 72 hours before the events, i: Sardasht station, 22/04/2011 j: Khoi station, 01/28/2019 k: Parsabad station, 28/01/2019 l: Sardasht station, 28/01/2019

بیشینه سرعت باد، در ساعت‌های ۱۲، ۱۸ و ۰۶ رخ داده که فراوانی آن در ساعت ۱۲ گرینویچ (۱۵:۳۰ به وقت محلی) بیشتر بوده است. می‌توان دریافت که در روزهای بارش سنگین در منطقه شمال غرب ایران، توان سیکلون مؤثر در منطقه در ساعت ۱۲ گرینویچ در بیشینه خود بوده است.

بر اساس این نمودارها حداکثر بارش در روزهای رویداد، در ساعت‌های ۰۶، ۰۰، ۱۲ و ۱۸ رخ داده است، به‌ویژه در ساعت ۱۲ گرینویچ (۱۵:۳۰ به وقت محلی)، حداکثر سرعت باد در روزهای رویداد، در ساعت‌های ۱۲، ۰۶ و ۱۸ بوده است، به‌ویژه در ساعت ۱۲ گرینویچ (۱۵:۳۰ به وقت محلی)، از طرفی در روزهای قبل از رخداد حدی بارش،

## نتیجه‌گیری

بر اساس پژوهش انجام‌شده در منطقه شمال غرب ایران، در دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۹ درزمینه بارش سنگین، نتایج نشان دادند که با توجه به شاخص‌های ناپایداری و نمودار ترمودینامیکی اسکیتوتی، نقش عامل همرفت در بارش‌های سنگین بسیار کم و عامل دینامیکی دلیل اصلی بارش‌های سنگین بوده است. نتایج مطالعه بر اساس مدل HYSPLIT نشان داد که مسیر اصلی ورود رطوبت به منطقه مطالعه جنوب غربی است و منشأ اصلی تأمین رطوبت بارش سنگین دریای سرخ است. نتایج مطالعه بر اساس نمودار گلباد، حاکی از آن است که بادهای غالب در رخدادهای بارش سنگین از سمت جنوب غربی وزیده‌اند و سرعت به‌طور متوسط ۳/۵ متر بر ثانیه را داشته‌اند. همچنین نتایج بر طبق نمودار ترکیبی سرعت باد و بارش به‌صورت ساعتی نشان داد که حداکثر سرعت باد در روزهای بارش سنگین، ساعت ۱۲ گرینویچ معادل ۱۵:۳۰ به‌وقت محلی بوده است که نشان از تقویت سیستم دینامیکی مؤثر در منطقه در این ساعت است. پژوهش حاضر از لحاظ غالب بودن ناپایداری دینامیکی در بارش‌های سنگین با تحقیق بیرانوند و همکاران (Beiranvand et al, 2022) همسو است. از لحاظ رخداد بارش سنگین در فصل بهار با علت همرفتی با نتایج تحقیق سلیقه و همکاران (Saligeh et al, 2018) هم‌راستا است. از لحاظ رخداد بارش حدی با تأمین رطوبتی دریای سرخ توسط سیکلون مدیترانه با تحقیق محمد و همکاران (Mohammed et al, 2023) همسو است. همچنین به دلیل تأیید تقویت سیکلون‌های مسبب بارش سنگین در ساعت ۱۲ به‌وقت گرینویچ با مطالعه بیات و همکاران (Bayat et al, 2017) همخوانی مطلوبی دارد. انسان توانایی حذف

مخاطرات جوی را ندارد. مخاطرات جوی جزئی از طبیعت هستند و انسان فقط قادر است از فراوانی و شدت این رخدادهای بکاهد. در شمال غرب ایران نیز بهترین راهکار مقابله با خطرات ناشی از بارش سنگین، شناسایی علل پیدایش این رخداد، از قبیل منابع رطوبتی تأمین‌کننده بارش سنگین و ارزیابی شاخص‌های ناپایداری که نشان از شرایط صعود برای تشکیل بارش سنگین هستند است. در گام بعدی اطلاع‌رسانی از وقوع این رخداد و هشدار بابت احتمال سیل به ساکنان منطقه نظیر کشاورزان، مسافران و ... است. راهکارهای دیگر کاهش تلفات ناشی از بارش سنگین عبارت‌اند از بیمه کردن محصول و خانه‌های مسکونی، احداث خانه‌های مسکونی مناطق مستعد بر روی پایه‌های بلند با ارتفاع ۳ یا ۴ متری، افزایش پوشش گیاهی و نهال‌کاری با هدف افزایش نفوذپذیری خاک، لایه‌روبی رودخانه‌ها برای جلوگیری از افزایش ارتفاع آب در اثر ته‌نشین شدن رسوبات، سوار کردن لاستیک‌ها روی هم و کشیدن نایلون روی آن‌ها در ساحل رودخانه‌ها با هدف کاهش فرسایش خاک در مناطق ساحلی، استفاده از آب‌بندهای بتونی سیار در موقع بارش جلوی مناطق کشاورزی و مناطق مسکونی با هدف جلوگیری از آسیب‌های سیل احتمالی در مواقع بارش سنگین و اجتناب از حمل‌ونقل‌های غیرضروری به دلیل کاهش دید، لغزندگی و آب‌گرفتگی معابر شهری و جاده‌ای.

## سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از هیچ سازمان یا ارگانی کمک مالی دریافت نکرده‌اند.

## پانویس

- 1-Hybrid Single Particle Lagrangian Integrate Trajectory
- 2-Showalter Index
- 3-Lifted Index
- 4-K Index
- 5-Total Totals Index

- 6-Severe Weather Threat Index
- 7-Convective Available Potential Energy
- 8-Lifting Condensation Level
- 9-Convective Condensation Level
- 10-Level of Free Convection
- 11-Convective Inhibition Energy

## References

Alexander, L.V., Zhang, X., Peterson, T.C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A.M.G. and

Vazquez-Aguirre, J.L., 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 111(D5). <https://doi.org/10.1029/2005JD006290>

- Alijani, B., 2013. Climate of Iran. Payam Noor University Publications. The twelfth print (In Persian).
- Alijani, B., 2013. Synoptic Climatology. Samt Publications. The seventh edition (In Persian).
- Alijani, B., Khosravi, M. and Esmailnejad, M., 2011. A synoptic analysis of January 6, 2008 heavy precipitation in the southeast of Iran, *Journal of Climate Research*, v. 1(3-4), p. 3-14. SID. <https://sid.ir/paper/213093/en> (In Persian).
- Asakereh, H., 2017. Fundamentals of Research in Climatology. Zanjan University Press, First Edition (In Persian).
- Ashrafi, K., Motlagh, M.S. and Aslmand, A., 2013. Investigating the paths of dust storms over Iran using numerical modeling and satellite images, *Environmental Science and Bioengineering*, v. 56, p. 3-12
- Bayat, A., Saligeh, M. and Akbari, M., 2017. Climatology of mediterranean winter season rain producing cyclones in Iran, *journal of spatial analysis environmental hazards*, v. 4(2), p. 1-18. Sid. <https://sid.ir/paper/264783/en>
- Beiranvand, I., Gabdomkar, A., Abbasi, A. and Khodaghali, M., 2022. Statistical-Synoptic Analysis of April 2019 Heavy Rainfall in Doroud-Boroujerd Basin, *Journal of Natural Environmental Hazards*, v. 11(32), p. 169-188. Doi: 10.22111/jneh.2022.38564.1806 (In Persian). Doi: 10.22113/jmst.2019.182862.2282 (in Persian).
- Draxler, R., Stunder, B., Rolph, G., Stein, A. and Taylor, A., 2009. HYSPLIT4 user's guide, Version 4.9. 1-231.
- Farajzadeh, M., 2013. Climate Risks in Iran. Samt Publications. The First print (In Persian).
- Halabian, A.H. and Hossienalipour, J.F., 2016. Synoptic analysis of climatic hazards in southwestern Iran (case study: flood generating heavy precipitation of Azar 1391), *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, v. 2(4), p. 31-46. <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2530-fa.html> (In Persian). [http://www.jesb.ir/article\\_4388.html](http://www.jesb.ir/article_4388.html) (In Persian). <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05336-w> [https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article\\_7884.html?lang=en](https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_7884.html?lang=en) (In Persian).
- Javanmard, S., Yatagai, A., Nodzu, M.I., BodaghJamali, J. and Kawamoto, H., 2010. Comparing high-resolution gridded precipitation data with satellite rainfall estimates of TRMM\_3B42 over Iran, *Advances in Geosciences*, v. 25, p. 119-125. <https://doi.org/10.5194/adgeo-25-119-2010>, 2010
- Kouzegaran, S. and Mousavi Baygi, M., 2015. Investigation of Meteorological Extreme Events in the North-East of Iran, *Water and Soil*, v. 29(3), p. 750-764. Doi: 10.22067/jsw.v0i0.40845 (In Persian).
- Li, X., Zhou, W. and Chen, Y.D., 2016. Detecting the origins of moisture over southeast China: Seasonal variation and heavy rainfall, *Advances in Atmospheric Sciences*, v. 33, p. 319-329. <https://doi.org/10.1007/s00376-015-4197-5>
- Mofidi, A., Zarrin, A. and Janbaz Ghobadi, G., 2008. Determining the synoptic pattern of autumn heavy and extreme precipitations on the southern coast of the Caspian Sea, *Earth Space Phys*, v. 33(30), p. 131-154. <https://doi.org/10.1001.1.2538371.1386.33.3.10.7> (In Persian).
- Mohammed, A.J., Hashim, A.A., Kadhum, J.H. and Mohammed, S.K., 2023. The Back Trajectory Study for Selected Extreme Rainfall Events over Iraq, In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 1223(1), p. 012006. IOP Publishing. DOI 10.1088/1755-1315/1223/1/012006
- Pourkarimian, A., Soyuf Jahromi, M. and Malakooti, H., 2021. Tracking of the Oceanic Water Content Resources of the Precipitation In Dayyer Port (March 2017), *Journal of Marine Science and Technology*, v. 20(3), p. 31-49.
- Rapolaki, R.S., Blamey, R.C., Hermes, J.C. and Reason, C.J.C., 2020. Moisture sources associated with heavy rainfall over the Limpopo River Basin, southern Africa, *Climate Dynamics*, v. 55(5), p. 1473-1487.
- Rashedi, S., jahanbakhsh, S., Khorshiddoust, A. and Mohammadi, G.H., 2023. Introduction and study of Caspian Clouds (Case study from July 20 to 31, 2013), *Journal of Geography and Planning*, v. 27(84), p. 71-79. Doi: 10.22034/gp.2023.14431 (In Persian).
- Salehi, H., Saneinejad, H. and Mousavi Baygi, M., 2014. Analysis of Instability Indices during severe weathers, in Mashhad Metropolis, *Journal of Geography and Environmental Hazards*, v. 3(1), p. 113-123. Doi: 10.22067/geo.v3i1.27409 (In Persian).
- Saligeh, M., naserzadeh, M. and ghaffari, A., 2018. Investigation of spring convection loads of northwest of Iran using unstable indices (case study of Tabriz station), *Journal of Geography and Planning*, v. 22(64), p. 129-147. [https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article\\_8107.html?lang=en](https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_8107.html?lang=en) (In Persian).
- Shafiee, S., Mozafari, G.A. and Ghaderi, F., 2017. Thermodynamic analysis of extreme precipitation for the West of Iran and presenting instability model for this area, *Nivar*, v. 41(98-99), p. 49-60. Doi: 10.30467/nivar.2017.51898 (In Persian).
- Shamsipoor, A.S., Kaki, S., Jafari, A. and Jasemi, S.M., 2018. Synoptic and Thermodynamic Analysis of Heavy rainfall in the west and southwest of Iran. (Case Study: 12-15 April 2016), *Journal of Geography and Planning*, v. 22(64), p. 149-167.

- Shi, K., Lang, Q., Huang, Y., Zhao, J., Wang, H., Chen, G. and Wang, P., 2024. Analysis of the water-vapor sources in rainstorm processes in Tianjin city based on the trajectory method, *Atmospheric Science Letters*, v. 25(2), e1196. <https://doi.org/10.1002/asl.1196>
- Sioutas, M.V. and Flocas, H.A., 2003. Hailstorms in Northern Greece: synoptic patterns and thermodynamic environment, *Theoretical and Applied Climatology*, v. 75(3), p. 189-202. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-003-0734-8>
- Sotodeh, F. and Alijani, B., 2015. The relationship between spatial distribution of heavy precipitation and pressure patterns in Guilan province, *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, v. 2(1), p. 63-73. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jsaeh.2.1.63> (In Persian).
- Tavousi, T. and Rostami Jalilian, S., 2023. Analysis of Thunderstorms Using Atmospheric Instability Indices in Kermanshah, *Geographic Space*, v. 23(83), p. 71-96. <http://geographical-space.iauar.ac.ir/article-1-3357-en.html>
- Zhang, F., Li, G. and Yue, J., 2019. The moisture sources and transport processes for a sudden rainstorm associated with double low-level jets in the northeast Sichuan Basin of China, *Atmosphere*, v. 10(3), 160. <https://doi.org/10.3390/atmos10030160>
- Zhang, S., Liu, B., Ren, G., Zhou, T., Jiang, C., Li, S. and Su, B., 2021. Moisture sources and paths associated with warm-season precipitation over the Sichuan Basin in southwestern China: climatology and interannual variability, *Journal of Hydrology*, v. 603, 127019. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127019>