

Revealing the dynamic patterns of heavy rains causing floods in Lorestan Province based on synoptic systems

Ebrahim Beiranvand¹ , Amir Gandomkar^{2*} , Alireza Abbasi³ , Morteza Khodaghali⁴ 

¹ Ph.D. Student, Department of Geography, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

² Associate Professor, Department of Geography, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

³ Assistant Professor, Department of Geography, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

⁴ Associate Professor, Rangeland Research Department, Forest and Rangeland Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran

Extended Abstract

Introduction

Heavy rains are one of the climate phenomena that leads to human and financial losses. Since Iran is located in a dry and low rainfall region, this type of rain leads to flooding in a short period and causes huge damages that cannot be compensated in the short term. Due to its mountainous nature, the western region of Iran is suitable for the intensification and expansion of rainfall and flooding. Because mountains play an important role in increasing atmospheric precipitation by trapping air humidity. Today, the general and expanding climate change phenomenon has become one of the most important aspects of meteorology. Global warming is the driver of climate change and simply means an increase in the average temperature of the atmosphere. It has started continuously, creeping, and increasing since 1950 due to the accumulation of greenhouse gases in the atmosphere. One of the most important aspects of this large-scale general event (climate change) is the increase in entropy or anomaly of the earth's atmospheric system. Following the increase in atmospheric anomalies, some extreme events such as severe droughts, torrential rains, floods, extremely hot temperatures (heat waves) in summer, and late frosts in spring have increased significantly across the country. The behavior of the natural climate of the region tends towards disorder and abnormality in a significant way every year. Accordingly, the current research was done to reveal the dynamic patterns of heavy rains causing floods in Lorestan Province based on synoptic systems.

Materials and Methods

In this research, three types of data were used. The first category is the daily rainfall data of the synoptic stations from 2000 to 2020, which was obtained from the meteorological organization of Lorestan Province. The second set of data related to the factors of the middle and lower levels of the atmosphere, including geopotential height, sea level pressure, Omega, moisture, wind, an orbital and meridional component of wind level 300 hectopascal for 5 March and 1 April 2019, 15 February 2006, 29 October 2015 from NCEP/NCAR. The third group of data is related to the data of the upper atmospheric station of Kermanshah which were obtained from the University of Wyoming database for selected days. using the 95th percentile method, the heavy rainfalls of the studied stations were determined. In the following, the statistical features of rainfall of four selected heavy rainfall were analyzed. The synoptic conditions that produced these rains were investigated using the data of the middle and upper levels of the atmosphere of the ECMWF database version ERA-Interim. To examine the patterns of the middle and upper levels of the atmosphere, the maps of the daily synoptic factors of these two precipitations are analyzed. Finally, using thermodynamic indices, the thermodynamic status of the upper atmosphere of the region is investigated.

Results and Discussion

At the level of 500 millibars, which is the main level of observing the systems that produce the main atmospheric phenomena, in two rain waves on 25 March and 12 April 2018, a very strong low-altitude core with a central height of 5550 geopotential meters was closed over the eastern Mediterranean Sea and the western part of Iran is located in the front part of a very deep trough, which indicates the dominance of a very strong circulation system

in the west of Iran. Low pressure was visible on the surface of the earth in the west of Iran. The moisture map of level 850 for 15 February 2014 showed that the moisture cores are completely located in Lorestan Province. One of the moisture cores from the Persian Gulf has strengthened with a curve of 5 to 9 gr and covers the south to the northeast and has provided the conditions for the creation and fall of heavy rains in the province. The moisture sources of the system are provided by the Black Sea and the Red Sea, as well as the Persian Gulf. The trough of the Red Sea is associated with the establishment in the middle level of the atmosphere, and it has brought heavy rains and floods in the west. In the humidity map, it can be seen that a circulation center has formed over the Oman Sea and the Persian Gulf, which directs moisture from the Oman and Arabian Seas to the south and southwest of Iran. In addition, another circulation center has formed over the Mediterranean Sea, which it sends the Mediterranean and Black Seas to the west and southwest of Iran. This means that these two centers concentrate the moisture of the South, West, and North-West seas of the country on Lorestan and Kermanshah provinces, and the atmospheric systems are fully nourished in terms of moisture.

Conclusion

The analysis of the co-occurrence patterns of extreme rainfall events showed that a similar co-occurrence pattern was the generator of heavy rainfall waves in the region. In the studied days, the presence of a deep trough on the eastern Mediterranean Sea and the western part of Iran is located in the front part of a very deep trough, which has provided the conditions for the ascent and entry of low-pressure systems for the west of the country. The instability indices of the upper atmosphere, which were analyzed with emphasis on the upper atmospheric stations of Kermanshah, did not confirm the existence of extreme instability in the region. The Skew-T diagram indicated that a global synoptic system involved the entire region and the local convection factor did not play a critical role.

Keywords: Heavy rain, Lorestan Province, Synoptic analysis, Thermodynamic indices

Article Type: Research Article

Acknowledgment

The authors thank the Meteorological Organization of Lorestan Province for providing the data required for this research.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

All data generated during the manuscript analysis are included in the article. Further datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Ebrahim Beiranvand: Writing, methodology; **Amir Gandomkar:** Conceptualization, supervision, final editing; **Alireza Abbasi:** Maps drawing; **Morteza Khodaghali:** Supervision.

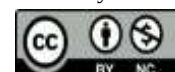
*Corresponding Author, E-mail: aagandomkar@gmail.com

Citation: Beiranvand, E., Gandomkar, A., Abbasi, A., & Khodaghali, M. (2024). Revealing the dynamic patterns of heavy rains causing floods in Lorestan Province based on synoptic systems. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(3), 53-74.
DOI: 10.22098/mmws.2023.12695.1265

Received: 13 April 2023, Received in revised form: 06 May 2023, Accepted: 07 May 2023, Published online: 07 May 2023
Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 3, pp. 53-74

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





آشکارسازی الگوهای پویای بارش های سنگین مولد سیلاب در استان لرستان بر اساس سامانه های هم دیدی

ابراهیم بیرانوند^۱، امیر گندمکار^{۲*}، علیرضا عباسی^۳، مرتضی خداقلی^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه جغرافیا، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

^۲ دانشیار، گروه جغرافیا، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

^۳ استادیار، گروه جغرافیا، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

^۴ دانشیار، تحقیقات مرتع، مؤسسه تحقیقات جنگل ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

چکیده

در دهه های اخیر فراوانی رخدادهای حدی بارش در کل کشور روند افزایشی داشته است. از این رو، شناسایی الگوهای هم دید بارش های سیل آسا، برای کاهش خسارات و مدیریت بهینه آن بسیار حایز اهمیت است. هدف از این پژوهش، آشکارسازی و طبقه بندی الگوهای هم دیدی-دینامیکی مولد بارش های سنگین استان لرستان است. در این راستا از داده های بارش روزانه ایستگاه های سینوپتیک نه گانه استان لرستان طی دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۰۰، داده های عوامل هم دید پایگاه اقلیمی ECMWF، و داده های جو بالای پایگاه دانشگاه وایومینگ استفاده شد. ابتدا با استفاده از روش صدک ۹۵م، بارش های سنگین ایستگاه های مورد مطالعه مشخص شدند. در ادامه، ویژگی های آماری بارش چهار موج بارشی ۵ و ۱۲ فروردین ۱۳۹۸، ۷ آبان ۱۳۹۴ و ۱۵ بهمن ۱۳۸۴ مورد بررسی قرار گرفت. شرایط هم دیدی مولد این بارش ها با استفاده از داده های ترازهای میانی و فوقانی جو مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی الگوهای ترازهای میانی و فوقانی جو، نقشه های عوامل هم دیدی روزانه این دو بارش مورد تحلیل قرار گرفت. در نهایت، با استفاده از شاخص های ترمودینامیکی، وضعیت ترمودینامیک جو بالای منطقه به کار گرفته شد. نتایج نشان داد در روزهای مورد مطالعه یک ناوه عمیق روی شرق دریای مدیترانه و بخش غربی ایران قرار گرفته که شرایط صعود و ورود سیستم های کم فشار را برای غرب کشور مهیا کرده است. در سطح زمین هم کم فشاری در غرب ایران حاکمیت داشته است. مرکز و اچر خندی روی دریای عمان و خلیج فارس تشکیل شده است که رطوبت را از دریای عمان و عرب به سمت جنوب و جنوب غربی ایران هدایت می کند. هم چنین، مرکز چرخندی دیگری روی مدیترانه تشکیل شده که رطوبت دریای مدیترانه و سیاه را به سمت غرب و جنوب غرب ایران می فرستد. ناپایداری متوسط در ترازهای پایین جو بیان گر آن بود که یک سامانه هم دید سراسری کل منطقه را درگیر کرده و عامل همرفت محلی نقشی نداشته است.

واژه های کلیدی: استان لرستان، بارش سنگین، تحلیل هم دیدی، شاخص های ترمودینامیکی

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: aagandomkar@gmail.com

استناد: بیرانوند، ابراهیم، گندمکار، امیر، عباسی، علیرضا، و خداقلی، مرتضی (۱۴۰۳). آشکارسازی الگوهای پویای بارش های سنگین مولد سیلاب در استان لرستان بر اساس سامانه های هم دیدی. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۴(۳)، ۵۳-۷۴.
doi: 10.22098/mmws.2023.12695.1265

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۴، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۷، تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۲/۱۷

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۳، صفحه ۵۳ تا ۷۴

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

بارش های سنگین از جمله پدیده های حدی هستند که وقوع ناگهانی آن ها منجر به خسارت های جانی و مالی می شود. کشور ایران به دلیل آن که در منطقه خشک و کم بارانی قرار گرفته، وقوع این نوع بارش ها منجر به جاری شدن سیل در مدت زمان کوتاه شده و خسارت های هنگفتی به بار می آورد که جبران آن در کوتاه مدت امکان پذیر نیست (Salamati Hormazi et al., 2016). منطقه غرب ایران نیز به سبب ماهیت کوهستانی، ناحیه مناسبی برای تشدید و گسترش بارندگی و جاری شدن سیل است؛ زیرا کوهستان ها با گیرش رطوبت هوا، نقش مهمی در افزایش ریزش های جوی ایفا می کنند (Omidvar et al., 2018). امروزه پدیده عمومی و روبه گسترش تغییر اقلیم به یکی از مهم ترین جنبه های آب و هواشناسی تبدیل شده است. گرمایش جهانی به عنوان پیشران تغییر اقلیم شناخته شده و به طور ساده به معنی افزایش میانگین دمای اتمسفر بوده که از سال ۱۹۵۰ به صورت پیوسته، خزنده و افزایشی در پی انباشت گازهای گلخانه ای در اتمسفر تشدید یافته است. از مهم ترین جنبه های این رخداد عمومی بزرگ مقیاس (تغییر اقلیم) افزایش آنتروپی یا ناهنجاری سامانه جو زمین است. به دنبال افزایش ناهنجاری های جوی برخی رخدادهای حدی مانند خشکسالی های شدید، بارش های رگباری و سیل آسا، دماهای فراگرم (امواج گرم) در تابستان و یخبندان های دیررس در بهار، به صورت معناداری در سراسر کشور افزایش داشته است (Panahi and Esmaeel Darjani, 2020). رفتار اقلیم طبیعی منطقه هر سال به صورت معناداری به سمت بی نظمی و ناهنجاری میل می کند. گزارش های سازمان های معتبر جهانی طی سال های اخیر بیان گر اثرات تغییر اقلیم با تغییر در رویدادهای حدی اقلیمی چون سیل، توفان، خشکسالی نمود بیش تری یافته است (WMO, 2011).

همه ساله بخش های مهمی از پهنه وسیع کشور ما تحت تأثیر مخاطره حدی بارش سنگین قرار گرفته و خسارت فراوانی به کشور وارد می آید. از پیامدهای بارش سنگین در ایران وقوع سیل های شدید و مخربی است که خسارت زیان باری به بار می آورد. در سال های اخیر مطالعات هم دید زیادی در ارتباط با بارش های سنگین و سیل آسا در کشورهای مختلف انجام شده است. به عنوان مثال، Van Oldenborgh et al. (2015) به بررسی توفان شدید دوزموند در شمال انگلستان و اسکاتلند

پرداختند. ایشان با بررسی ویژگی های ترمودینامیکی این بارش های شدید نشان دادند که اولاً میزان ناپایداری نیمرخ قائم جو طی این بارش ها نسبت به گذشته تا حد کمی تقویت شده، اما این روند معنادار نبوده است. از سویی، آن ها مشاهده کردند که شدت و فراوانی موجود را به نفع تشکیل چرخند قوی فراهم رخدادهای بارش شدید افزایش داشته است. در پژوهشی، Ghasemifar et al. (2016) به الگوهای هم دیدی بارش های سیل خیز غرب ایران پرداختند. آن ها نتیجه گرفتند که روزهای همراه با بارش حدی، اُمگای منفی (از سطح ۱۰۰۰ تا ۲۰۰ هکتوپاسکالی و با هسته بیشینه ۰/۳- پاسکال بر ثانیه) روی غرب ایران قرار داشته است. علاوه بر آن رطوبت بالای ۷۰ درصد، قرارگیری در جلوی تراف هایی که از کم ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۸۵۰ و به ویژه ۵۰۰ هکتوپاسکالی بر منطقه نفوذ داشته، رودادهایی با سرعت بالای ۳۰ متر بر ثانیه در تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال، سرعت باد سطحی بالای ۱۰ متر بر ثانیه و هسته های تاوایی مثبت همگی شرایط کرده اند. در نهایت پردازش تصاویر رادار هواشناسی این نتایج را تأیید کرد. در پژوهش دیگری، Hidayat et al. (2016) در بررسی علل رخداد بارش های سنگین در فصول مرطوب در دریای جاوا به این نتیجه رسیدند که همرفت بین نسیم دریا و خشکی و بازتابش امواج از سطح خشکی علت بارش های سنگین است. در ادامه، Salamati Hormazi et al. (2016) به شناسایی و تحلیل هم دیدی-دینامیکی الگوهای جوی موجد سیلاب آبان ۱۳۹۴ در استان های ایلام و لرستان پرداختند. نتایج مطالعه آن ها نشان داد از یک سو چرخندهای مدیترانه ای به قلمرو ایران وارد و از سوی دیگر استقرار واچرخند روی دریای عرب سبب برقراری جریان قطاع گرم و مرطوب به قطاع گرم سامانه های بارش زا و احیای آن شده است. همزمان با این وضعیت، پرفشار مستقر روی ارتفاعات البرز و دشت های میانی کشور باعث کندی حرکت سامانه ناپایدار و ماندگاری بیش تر این سامانه شد. ناوه دریای سرخ با استقرار در تراز میانه جو همراه بوده و امکان صعود عمیق و تشکیل ابر و بارش را فراهم کرده و ایجاد بارش های سیل آسا در غرب را به همراه داشته است.

از سایر پژوهش ها، Samman and Gallus (2017) الگوهای هم دیدی مرتبط با بارش سنگین در پنج منطقه مختلف عربستان بررسی کردند. در پژوهش آن ها الگوهای هم دیدی مختلف برای بارش سنگین با استفاده از یک نقشه مبتنی بر

همبستگی برای ۱۰۰۰ هکتوپاسکال برای دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ به‌دست آمد. نتایج پژوهش آن‌ها بیان‌گر شش ویژگی اصلی سیستم‌های هم‌دیدگی بر مقدار کل بارش تأثیرگذار بود. رطوبت کل سیستم، فشار، دمای لایه‌های مختلف جو، ویژگی‌های ترمودینامیکی سیستم، و شرایط توپوگرافی منطقه در رخداد بارش سنگین تأثیرگذار است. توزیع فصلی بیان‌گر آن بود که بارش باران‌های سنگین در زمستان و سپس بهار صورت می‌پذیرد. در چین، Wei et al. (2017) روند شاخص‌های حدی بارش و ارتباط آن‌ها با الگوهای پیوند از دور را مورد بررسی قرار دادند. نتیجه پژوهش آن‌ها نشان داد که بیش‌تر شاخص‌ها دارای روند کاهشی هستند که بیان‌گر جابه‌جایی اقلیم منطقه با یک اقلیم خشک‌تر است. همچنین به این نتیجه رسیدند که تغییرات در این شاخص‌ها می‌تواند متأثر از شاخص انسو، مونسون تابستانی شرق آسیا و شاخص دهه‌ای اقیانوس آرام باشد. در شمال شرق ایالت متحده نیز Agel et al. (2018) با تحلیل دینامیکی بارش حدی بر اساس الگوهای هواشناسی بزرگ‌مقیاس به این نتیجه رسیدند که عواملی چون انتقال یکپارچه رطوبت، همگرایی رطوبت سطح پایین، و کمربندهای گرم سبب تفاوت بین روزهای با و بدون بارش حدی در شمال شرق ایالت متحده می‌شوند. همچنین، Kai et al. (2018) در بررسی جفت پارامترهای رطوبت‌دهی در بارش‌های سنگین منطقه‌ای به این نتیجه رسیدند واگرایی و همگرایی، اساس تغییرات رودباد برای فراهم‌کردن رطوبت لازم برای بارش‌های سنگین است.

در ایران نیز، Omidvar et al. (2018) به تحلیل هم‌دید و ترمودینامیک بارش سنگین و سیلابی روزهای ۵ و ۸ آبان ۱۳۹۴ استان کرمانشاه پرداختند. نقشه‌های تراز دریا بیان‌گر آن بود که گرادیان شدید فشار بین کم‌فشار سودان و پرفشار اروپایی عامل اصلی رخداد بارش فرین در منطقه یادشده هستند. ضمن این‌که ریزش هوای سرد عرض‌های بالا توسط تاوه قطبی، تغذیه رطوبت از جنوب در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال و بیشینه سرعت باد بر فراز منطقه در سطح ۲۵۰ هکتوپاسکال، امکان بروز ناپایداری‌های جوی و شروع بارندگی در غرب کشور را فراهم آورده‌اند. نتایج نشان داد طبق شاخص ناپایداری LI^۱ در روز ۲۸ اکتبر (روز اوج بارش‌ها) رعد و برق پراکنده و بر اساس شاخص

SI^۲ در همان روز رگبار پراکنده با احتمال خیلی ضعیف وجود دارد. طبق شاخص KI^۳ در روز اوج بارش‌ها، این احتمال به ۶۰ تا ۸۰ درصد می‌رسد. در مشهد، Salajegheh et al. (2011) مطالعه مدل‌سازی بارش-رواناب مبتنی بر رویکرد پویایی سامانه حوضه کارده پرداختند. برای واسنجی مدل از داده‌های روزانه دبی خروجی حوضه کارده در بازه زمانی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۸ و برای دوره اعتبارسنجی آمار سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۲ استفاده شد. نتایج تحلیل حساسیت مدل نشان داد که پارامترهای مربوط به دما از حساسیت بیش‌تر برخوردار بوده و تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای روی دبی و دبی پیک حوضه دارند. همچنین، مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای تطابق خوبی دارند و دامنه ضریب ناش-سانتکیلف به‌دست آمده در دوره اعتبارسنجی بین ۰/۶۷ تا ۰/۵۷ است که نشان‌دهنده توانایی بالای روش‌های پویایی سامانه در مدل‌سازی بارش-رواناب حوضه است. در حوضه سفیدرود نیز Dehban et al. (2018) دقت مدل‌های NNME در پیش‌بینی بارش ماهانه ارزیابی کردند. ترکیب نتایج چند مدل پیش‌بینی نشان داد که دقت پیش‌بینی‌ها را می‌توان تا حد قابل‌قبولی افزایش داد، به‌طوری‌که میانگین مقادیر ضریب تبیین به ۰/۷ افزایش یافت. همچنین، برای بررسی عدم قطعیت پیش‌بینی بارش، ۷۸ عضو از مدل‌های پیش‌بینی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج، مدل‌ها در برخی از ماه‌های سال بیش‌برآورد (با احتمال نزدیک به ۸۰ درصد)، دارند. تحلیل عدم قطعیت مدل‌های پیش‌بینی نیز نشان داد که با ترکیب نتایج مدل‌های مختلف، می‌توان بازه عدم قطعیت را کاهش داد. در ادامه، Remy (2019) به تحلیل و آشکارسازی ارتباط بین بارش‌های حدی مناطق حاره با وضعیت ترمودینامیک لایه هوای نزدیک سطح زمین پرداختند. ایشان با به‌کارگیری صدک‌های ۹۹/۹ و ۹۹ نشان دادند که بارش‌های حدی یا بارش سنگین در منطقه حاره در این صدک‌ها برش آستانه ۱۱۰ میلی‌متر در روز است. نتایج نشان داد که بارش‌های حدی در رژیم‌هایی که دمای لایه جو زیرین زمین گرم است الگوی کاهشی دارد، در حالی‌که در بخش‌هایی از منطقه که دمای لایه هوای نزدیک سطح زمین سردتر از میانگین بود ارتباطی بین شدت بارش‌های حدی و شرایط ترمودینامیکی جو

² Showalter index³ K index¹ Lifted index

شود، دارد. شناخت و آگاهی از الگوهای هم‌دید که مولد چنین رخدادهای بارشی سنگینی هستند، می‌تواند منجر به ارائه پیش هشدارهای دقیق‌تر و به موقع‌تر شده که می‌تواند تا حد قابل توجهی از خسارات جانی و مالی این بارش‌های سنگین در سطح استان بکاهد. لذا هدف اساسی این پژوهش استخراج و تحلیل الگوهای هم‌دید منجر به بارش‌های سنگین در سطح استان است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

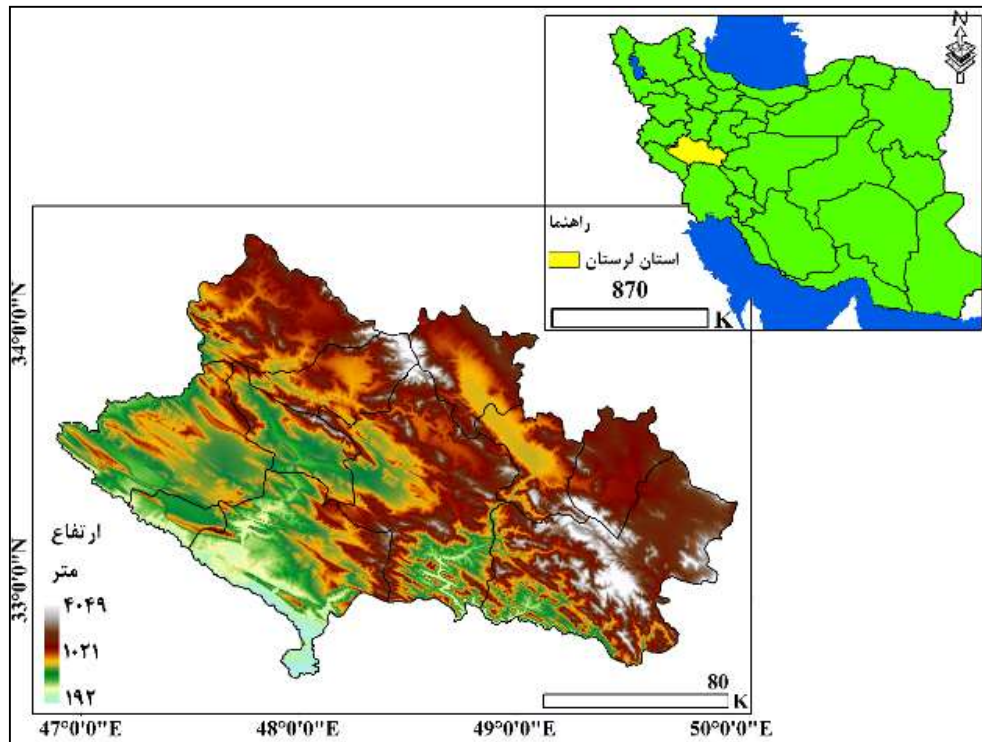
استان لرستان در غرب ایران، بین $31^{\circ} 46'$ تا $3^{\circ} 50'$ طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ و بین $33^{\circ} 37'$ تا $34^{\circ} 22'$ عرض شمالی از خط استوا قرار گرفته و حدود 28307 کیلومترمربع مساحت دارد. بر اساس آخرین تقسیمات کشوری، استان لرستان دارای ۱۱ شهرستان، ۲۵ شهر، ۲۹ بخش، ۸۵ دهستان و ۳۲۹۷ آبادی دارای سکنه بوده و مرکز آن شهر خرم‌آباد است. در شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.

۲-۲ داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش از سه دسته داده استفاده شد؛ دسته اول داده‌های بارش ایستگاه‌های هم‌دید سطح لرستان در دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ است که از سازمان هواشناسی استان لرستان دریافت شد. دسته دوم، داده‌های مربوط به عواملی تراز میانی و پایینی جو شامل ارتفاع ژئوپتانسیل، فشار سطح دریا، امگا، رطوبت تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، مؤلفه مداری و نصف‌النهاری باد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال برای روزهای ۵ و ۱۲ فروردین ۱۳۹۸، ۱۵ بهمن‌ماه ۱۳۸۴، ۷ آبان ۱۳۹۴ از سایت NCEP/NCAR دریافت شد. دسته سوم داده‌ها مربوط به داده‌های ایستگاه جو بالای ایستگاه‌های کرمانشاه است (چون استان لرستان ایستگاه جو بالا ندارد از نزدیک‌ترین ایستگاه‌ها استفاده شد) که از پایگاه دانشگاه وایومینگ برای روزهای ۵ و ۱۲ فروردین ۱۳۹۸، ۱۵ بهمن ۱۳۸۴ و ۷ آبان ۱۳۹۴ دریافت شد.

نزدیک سطح زمین دیده نشد. همچنین، Oueslati et al. (2020) به واکاوی فرایندهای ترمودینامیکی در بارش سنگین ژانویه ۲۰۱۴ جنوب انگلستان پرداختند. نتایج نشان داد که در این مقاله چارچوبی را پیشنهاد می‌کند که این اصطلاحات را از اصول اولیه فیزیکی تجزیه می‌کند که شامل حرکت عمودی جوی است که اغلب نادیده گرفته شده و یک نمونه بارندگی شدید را که واکاوی کرده و به‌طور گسترده طریق ارتباط آن با گردش هوا بررسی شده است. نتایج نشان داد که گرچه حرکت افقی نقشی جزئی (اما مهم) دارند، اما حرکت عمودی غالب است. در نهایت، Beiranvand et al. (2022) به تحلیل آماری-سینوپتیکی بارش‌های سنگین منجر به سیلاب فروردین ۱۳۹۸ در حوضه آبریز درود بروجرد پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که وجود یک ناوه عمیق با یک هسته بسته شده با ارتفاع ۵۵۰۰ و ۵۵۵۰ ژئوپتانسیل متر روی شرق دریای مدیترانه و قرارگیری غرب ایران در بخش جلویی یک ناوه بسیار عمیق شرایط صعود و ورود سیستم‌های کم‌فشار را برای غرب کشور به وضوح فراهم کرده است. در این دو روز شاخص امگا به‌صورت معناداری به مقدار حدی (-0.2) رسیده بود.

تحلیل شرایط هم‌دید و دینامیکی الگوهای گردش جوی، در شناسایی عوامل مؤثر بر رخداد بارش‌های سنگین، بسیار حائز اهمیت است. به‌ویژه آن‌که، این نوع بارش با تبدیل به رواناب، می‌تواند منجر به سیلاب و عواقب مصیبت‌باری شود. بنابراین، لازم است با شناخت سازوکار تکوین، تقویت و قانونمندی حاکم بر حرکت و گسترش سامانه‌های اقلیمی بارش‌زا از آثار مثبت آن بهره گرفت و از نتایج زیان‌بار آن دوری کرد و یا آن را به حداقل ممکن رساند. برای استفاده بهتر از بارش یک منطقه، ابتدا ضرورت دارد شناختی کافی از شرایط هم‌دید، دینامیک و ترمودینامیک جو، هنگام رخداد بارش در آن ناحیه انجام شود. استان لرستان با توجه به توپوگرافی پیچیده‌ای که دارد، و علاوه بر آن با توجه به موقعیت آن که در محل ورود سامانه‌های مهاجر باران اور غربی است، پتانسیل بالایی برای ایجاد بارش‌های حدی و رگباری که در تعامل با توپوگرافی پیچیده آن می‌تواند تبدیل به سیلاب‌های مخرب و خسارت بار



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران

Figure 1- Location of the study area in Iran

۳-۲- روش کار

برای انجام این پژوهش، ابتدا با استفاده از روش صدک ۹۵، بارش‌های شدید یا بارش‌های سنگین ایستگاه‌های هم‌دید درود و بروجرد در استان لرستان طی دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۰۰، تعیین شدند. بارش‌های روزانه ایستگاه‌های هم‌دید استان لرستان، طی دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۰۰ به صورت نزولی مرتب شد. بارش‌هایی که احتمال رخداد آن‌ها در طی دوره مورد بررسی کمتر از پنج درصد بوده است، به عنوان بارش‌های سنگین هر ایستگاه انتخاب شدند. آن‌گاه از بین این روزها، روزهایی که حداقل در بین ۵۰ درصد ایستگاه‌های منطقه مشترک باشد به عنوان بارش سنگین فراگیر انتخاب و مورد تحلیل قرار گرفتند. لذا، دو شرط انتخاب روزها یعنی بالاتر بودن بارش ثبت شده روزانه از آستانه صدک ۹۵ و ثبت شدن حداقل در ۵۰ درصد از ایستگاه‌های استان مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه، ویژگی‌های آماری بارش چهار موج بارشی ۵ و ۱۲ فروردین ۱۳۹۸ (۲۵ مارس ۲۰۱۹ و ۱ آوریل ۲۰۱۹) ۱۵ بهمن ۱۳۸۴ (۴ فوریه ۲۰۰۶) و ۷ آبان ۱۳۹۴ (۲۹ اکتبر ۲۰۱۵) بررسی شد. شرایط هم‌دیدی مولد این بارش‌ها با استفاده از داده‌های ترازهای میانی و فوقانی جو داده‌های پایگاه ECMWF نسخه

ERA-Intrim مطالعه شد. برای بررسی الگوهای ترازهای میانی و فوقانی جو، نقشه‌های عواملی هم‌دید روزانه این بارش‌ها تحلیل می‌شود. در نهایت، با استفاده از شاخص‌های ترمودینامیکی وضعیت ترمودینامیک جو بالای منطقه (با استفاده از داده‌های جو بالای دانشگاه وایومینگ) برای ایستگاه کرمانشاه (به عنوان نزدیک‌ترین ایستگاه جو بالای منطقه) بررسی شد. برای تحلیل ترمودینامیکی وضعیت بارش‌های مورد بررسی از سه شاخص ترمودینامیکی شامل شاخص شولتر (Showalter Index)، شاخص K (K-Index) و شاخص مجموع مجموعه‌ها (Total of Totals Index-TT) استفاده شد. شاخص شولتر بر اساس ارزیابی شرایط پایداری یا ناپایداری بسته هوا در تراز ۸۵۰ میلی‌بار تعریف و به کمک رابطه (۱) محاسبه شد:

$$SI = T500 - TP500 \quad (1)$$

در رابطه بالا، TP500 معرف دمای بسته هوا در تراز ۵۰۰ میلی‌بار است که از تراز ۸۵۰ میلی‌بار صعود کرده است. مقادیر منفی این شاخص نشان می‌دهد بخش‌های بالایی لایه مرزی تا تروپوسفر میانی ناپایدار است (جدول ۱).

$$TT = VT + CT \quad (3)$$

در این رابطه، VT مجموع قائم و CT مجموع تقاطع‌ها است. مجموع تقاطع‌ها معرف چگونگی شنواری بسته هوا در ترازهای زیرین جو است. مجموع قائم‌ها و مجموع تقاطع‌ها به صورت رابطه (۴) است (جدول ۳).

$$VT = T850 - T500, CT = Td850 - T500 \quad (4)$$

در رابطه (۴)، T850 دمای هوا در تراز ۸۵۰ T500 دمای هوا در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال است. Td850 نیز معرف دمای نقطه شبنم در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال است.

جدول ۳- آستانه‌های وقوع توفان بر اساس شاخص TT
(Ghavidel Rahimi, 2011)

Table 3 - Storm occurrence thresholds based on the TT index
(Ghavidel Rahimi, 2011)

وضعیت وقوع توفان	آستانه مقادیر
شانس وقوع توفان شدید بسیار ضعیف است	کمتر از 44
شانس وقوع توفان شدید متوسط است	44-55
شانس وقوع توفان شدید بسیار قوی است	بیشتر از 55

۳- نتایج و بحث

با اجرای روش صدک‌ها روی بارش‌های روزانه نه ایستگاه سینوپتیک استان لرستان که طی دوره آماری ۲۰۰۰-۲۰۲۰ دارای داده بودند، از بین سنگین‌ترین بارش‌های فراگیر در استان لرستان که در آن میزان بارش روزانه (۲۴ ساعته) بالاتر از صدک ۹۵ کل بارش‌ها بود، چهار رخداد بارش سنگین انتخاب شد (جدول ۴). این چهار موج بارش سنگین منتخب شامل امواج بارشی ۵ و ۱۲ فروردین ۱۳۹۸، ۱۵ بهمن ۱۳۸۴ و ۷ آبان ۱۳۹۴ بود، که در جدول ۴ مقادیر بارش ۲۴ ساعته متوسط سطح ایستگاه‌های استان لرستان برای این روزها ارائه شده است.

جدول ۴- مقادیر بارش ۲۴ ساعته روزهای بارش سنگین منتخب

Table 4- 24-hour rainfall values of selected heavy rainfall days

وضعیت وقوع توفان	میانگین 24 ساعت بارش ایستگاه‌های نه‌گانه لرستان
5 فروردین 1398	74 میلی‌متر
12 فروردین 1398	65 میلی‌متر
15 بهمن 1384	57 میلی‌متر
7 آبان 1394	54 میلی‌متر

۳-۱- تحلیل الگوهای هم‌دید منجر به بارش سنگین

فروردین ۱۳۹۸

در تراز ۵۰۰ میلی‌بار که تراز اصلی مشاهده سیستم‌های مولد پدیده‌های اصلی جو است (شکل ۲)، مشاهده می‌شود که در دو

جدول ۱- آستانه‌های شاخص SI (Zahedi and Chobdar, 2007)

Table 1- SI Indicator thresholds (Zahedi and Chobdar, 2007)

وضعیت جو	آستانه مقادیر
پایدار	مقادیر مثبت
آستانه ناپایداری	صفر تا -4
ناپایداری زیاد	-4 تا -7
ناپایداری بسیار شدید	-8 و کمتر از آن

شاخص K برای شناسایی و پیش‌بینی توفان‌هایی استفاده می‌شود که منشأ وقوع آن‌ها توده هوا است. KI معرف احتمال وقوع توفان به صورت تابعی بر حسب آهنگ کاهش قائم دما بین ترازهای ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال (T850-T500)، محتوی رطوبت بر حسب دمای نقطه شبنم در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (Td850) و عمق لایه مرطوب در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال (T700-Td700) بوده که در رابطه (۲) نشان داده شده است. مقادیر کوچک جمله سوم این شاخص نشان از همرفت عمیق در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال است. (Zahedi and Chobdar (2007) مقادیر عددی بزرگ این شاخص بر فعالیت شدید توده هوا دلالت دارد که شدیداً به رطوبت در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال وابسته است (جدول ۲).

$$KI = (T850 - T500) + Td850 - (T700 - Td700) \quad (2)$$

جدول ۲- آستانه‌های شاخص KI (Ghavidel Rahimi, 2011)

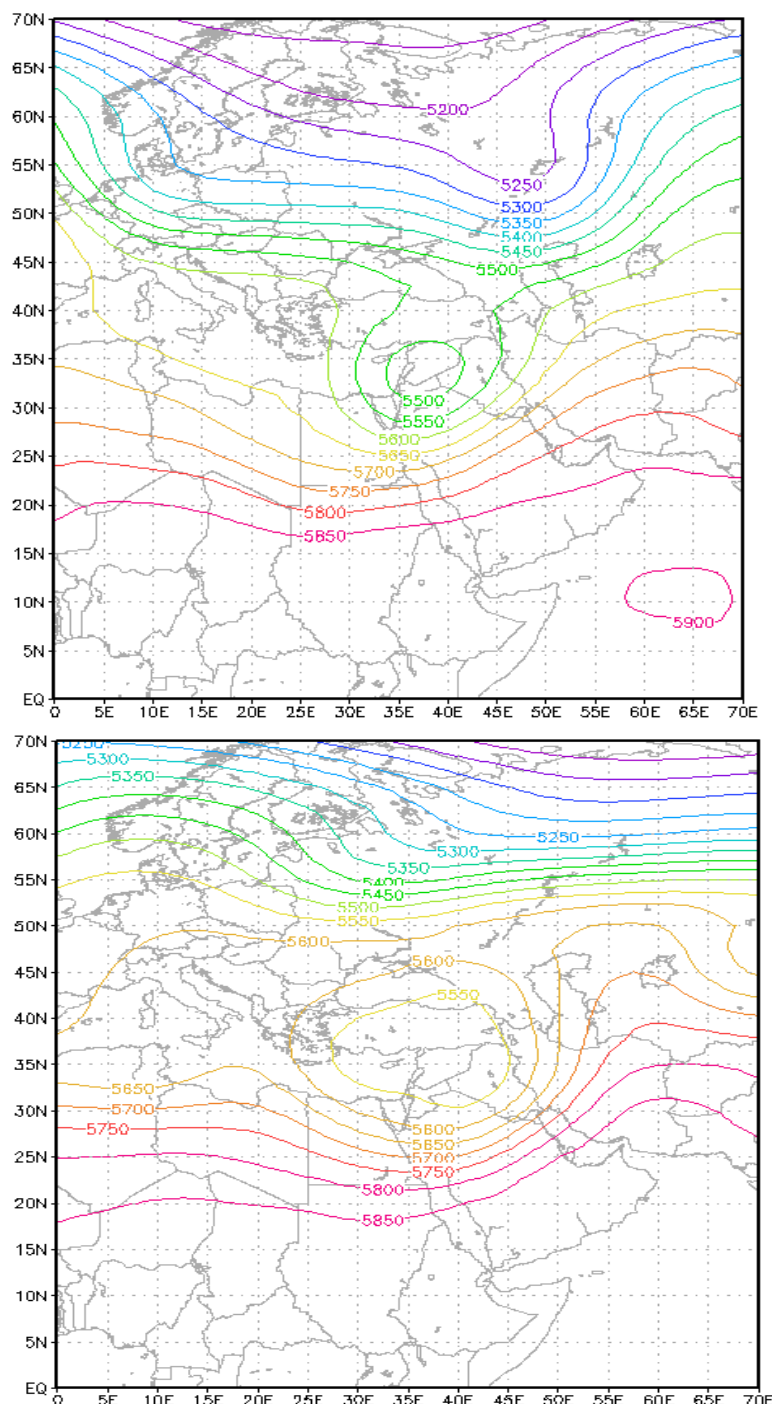
Table 2 - KI Indicator thresholds (Ghavidel Rahimi, 2011)

احتمال وقوع توفان	واحد	آستانه مقادیر
0	درصد	0 - 15
20	درصد	15 - 20
20 to 40	درصد	21 - 25
40 to 60	درصد	26 - 30
60 to 80	درصد	31 - 35
80 to 90	درصد	36 - 40
100	درصد	40 and up

در نهایت شاخص TT شاخصی است که از دیگر شاخص‌ها، به علت ترکیب دو شاخص مجموع دیگر، قابل اعتمادتر است. این شاخص به رطوبت تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال بسیار وابسته است. چنان‌چه ناپایداری در اثر هوای سرد سطوح بالای جو باشد و در سطح زیرین جو رطوبت کافی موجود باشد، شاخص مجموع مجموع‌ها بیش‌تر از دیگر شاخص‌ها قابل اعتماد است. این شاخص به صورت رابطه (۳) است.

یک ناوه بسیار عمیق قرار گرفته است که گویای حاکمیت یک سیستم چرخندی بسیار شدید در غرب ایران است.

موج بارشی ۵ و ۱۲ فروردین ۱۳۹۸ یک هسته بسیار قوی کم‌ارتفاع با ارتفاع مرکزی ۵۵۵۰ ژئوپتانسیل متر، روی شرق دریای مدیترانه بسته شده و بخش غربی ایران در بخش جلویی



شکل ۲- نقشه ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ میلی‌بار روز ۵ فروردین (بالا) و نقشه ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ میلی‌بار روز ۱۲ فروردین (پایین)

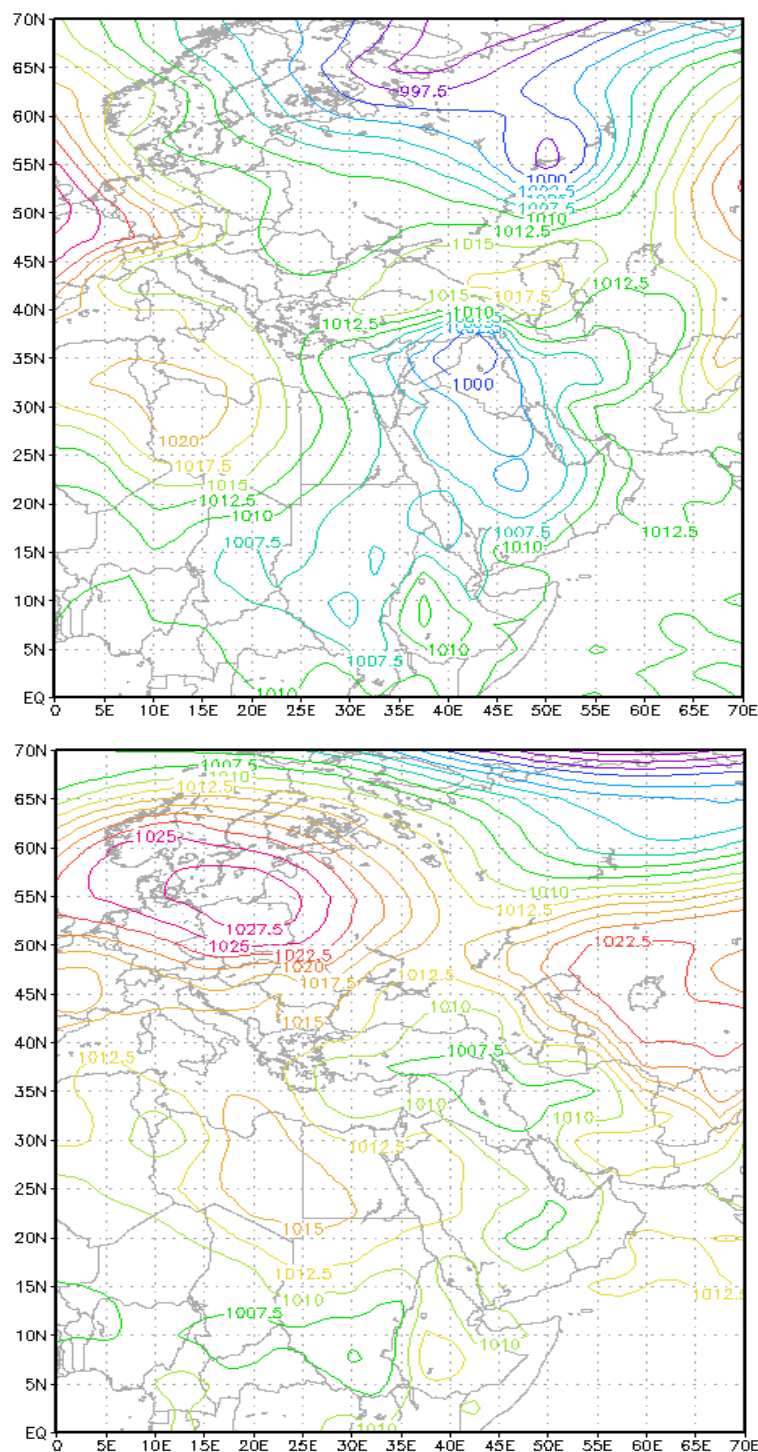
Figure 2 - 500 millibar level geopotential map on 25 March (top) and 500 millibar level geopotential map on 1 April (bottom)

در واقع یک مرکز فعال سیکلونی (کم‌ارتفاع) است که در شرق دریای مدیترانه قرار گرفته است و شرایط سیکلونی بسیار حادی را

در نقشه‌های فشار تراز دریا مشاهده شد که سامانه مولد بارش ابرسنگین غرب کشور در دو موج بارشی ۵ و ۱۲ فروردین

بر غرب ایران حاکم کرده است. اما سامانه تزیق رطوبت این سامانه سیکلونی شدید که در واقع مولد این بارش سنگین بوده است در این دو روز همان طور که مشاهده می شود دو منبع اصلی رطوبت تأمین شارژ کننده اصلی رطوبت این بارش سنگین بوده است. همان طور که مشاهده می شود در هر دو روز بارش از دریای

سرخ در غرب ایران وارد شده و در مسیر ورود به ایران روی خلیج فارس به شدت تقویت شده است و حجم عظیمی از رطوبت به آن تزیق شده است (شکل ۳).

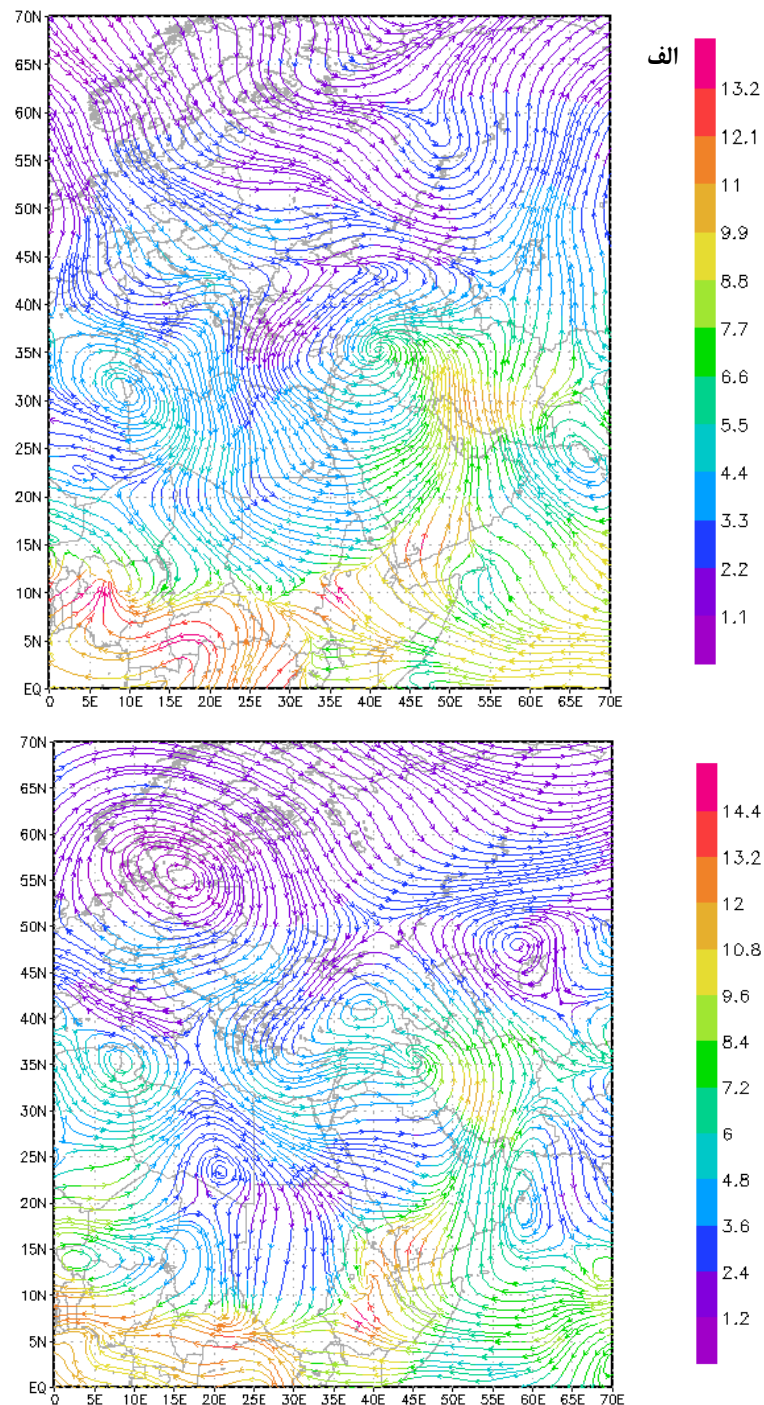


شکل ۳- نقشه فشار سطح دریای آزاد روز ۵ فروردین (بالا) و نقشه فشار سطح دریای آزاد روز ۱۲ فروردین (پایین)

Figure 3- Sea level pressure map 25 March (top) and Sea level pressure map 1 April (bottom)

حرکت شرق سوی چرخندها و واچرخندها، زبانه‌های مرطوب نیز به سمت ایران منتقل می‌کند. بنابراین، تزریق رطوبت در منطقه مورد مطالعه با تعامل دو سامانه سیکلونی و آنتی سیکلونی مشاهده شده در شکل ۳ صورت گرفته است. منبع تأمین رطوبت نیز به ترتیب دریای مدیترانه، دریای سرخ و خلیج فارس بوده که رطوبت را در سطح منطقه به ۱۱ تا ۱۳ گرم در کیلوگرم هوای خشک رسانده است.

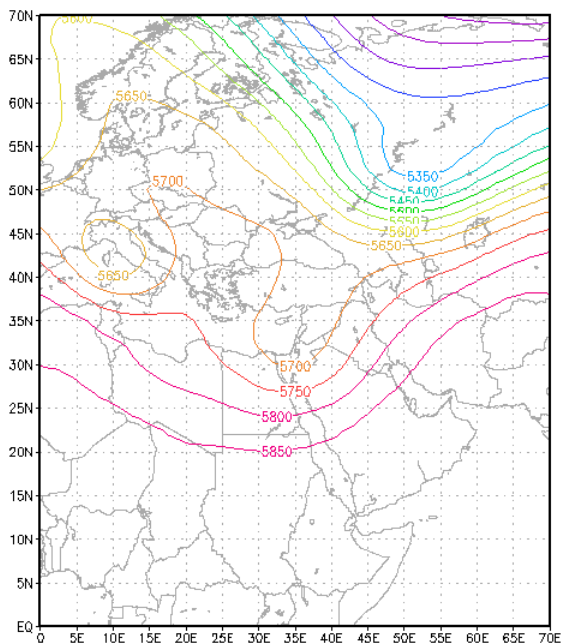
شکل ۴ وزش رطوبت تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال را برای دو روز ۵ و ۱۲ فروردین ۱۳۹۸ نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود استقرار یک، روی خلیج عدن دیده می‌شود که با حرکت واچرخندی خود رطوبت دریای عمان، دریای سرخ و خلیج فارس را به مناطق جنوب غرب و غرب ایران تزریق کرده وجود چرخندگی مثبت واقع در شمال دریای سرخ و دریای مدیترانه با حرکت پادساعت گرد رطوبت دریای سرخ و خلیج فارس را به غرب ایران انتقال داده که به موازات



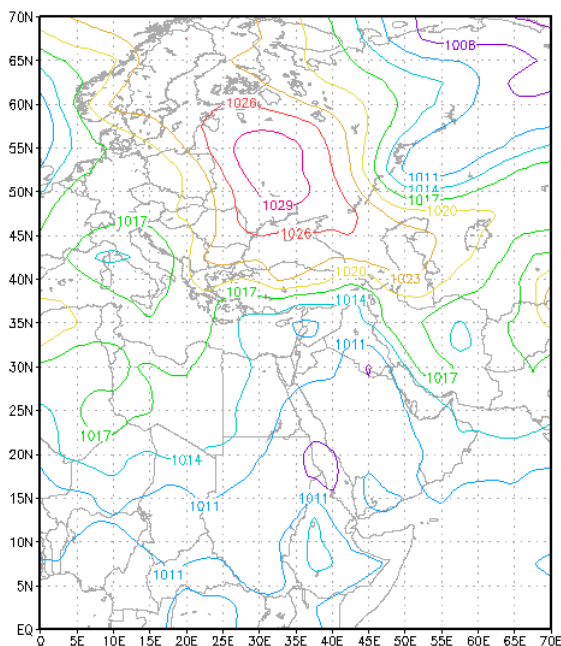
شکل ۴- نقشه رطوبت سطح ۸۵۰ میلی باری روز ۵ فروردین (بالا) و نقشه رطوبت سطح ۸۵۰ میلی باری روز ۱۲ فروردین (پایین)
Figure 4- Map of humidity and wind 25 March (top) and Map of humidity and wind 1 April (bottom)

۳-۲- تحلیل الگوهای هم‌دید منجر به بارش سنگین آبان ۱۳۹۴

در شکل ۵ نقشه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای روز ۲۹ اکتبر سال ۲۰۱۵ ارائه شده است. در نقشه ۵۰۰ فراز قرار گرفته روی ایران در حال تضعیف شدن است و از طرفی ناوه روی کشور ترکیه، مدیترانه و شمال عراق در حال پیشروی بوده؛ به‌طوری‌که زبانه آن از شمال غرب کشور در حال وارد شدن به ایران است. ناوه در حال تقویت با خطوط پربندی ۵۶۸ و شرق سوی به سمت شمال و شمال غرب کشور حرکت کرده که امتداد آن تا ۲۲ درجه شمالی گسترش دارد. در تراز دریا از جنوب کشور عربستان؛ یعنی در حوالی ۱۰ درجه شمالی و ۴۰ درجه شرقی یک کم‌فشار با خطوط هم فشار ۱۰۰۸ هکتوپاسکال با توجه به اثر دریای عرب و دریای سرخ تقویت شده و تا شمال کشور عراق و مرزهای غربی ایران و استان لرستان گسترش یافته و باعث تقویت سامانه کم‌فشار مستقر در مرزهای غربی ایران شده است. هم‌زمان با این وضعیت پرفشار مستقر روی ارتفاعات البرز و دشت‌های میانی کشور باعث کندی حرکت سامانه ناپایدار و ماندگاری بیش‌تر سامانه مستقر روی غرب ایران شده است؛ به‌طوری‌که بیش‌ترین حجم بارش سامانه مذکور در روز ۱۹ اکتبر سال ۲۰۱۵ بوده است. پرفشار روی اروپا حرکت شرق سوی خود را ادامه داده و هم‌چنان تأثیری روی ایران ندارد (شکل ۶). نقشه رطوبتی روز ۲۹ اکتبر (شکل ۷) یک مرکز واچرندی روی دریای عمان و خلیج فارس تشکیل شده است که رطوبت را از روی دریای عمان و عرب به سمت جنوب و جنوب غربی ایران هدایت می‌کند. هم‌چنین، مرکز چرخندی دیگری روی مدیترانه تشکیل شده است که رطوبت دریای مدیترانه و سیاه را به سمت غرب و جنوب غرب ایران هدایت می‌کند. منبع رطوبتی سامانه‌های بارشی این روز دریای عمان، خلیج فارس، دریای عرب، دریای مدیترانه و سیاه هستند. رطوبت را روی استان‌های غربی متمرکز کرده و سیستم‌های جوی از لحاظ رطوبتی کاملاً تغذیه شده‌اند که شرایط را برای تزریق رطوبت زیاد به استان‌های غربی و خصوصاً استان لرستان فراهم کرده و باعث بارندگی سنگین در غرب کشور و استان لرستان شده است.



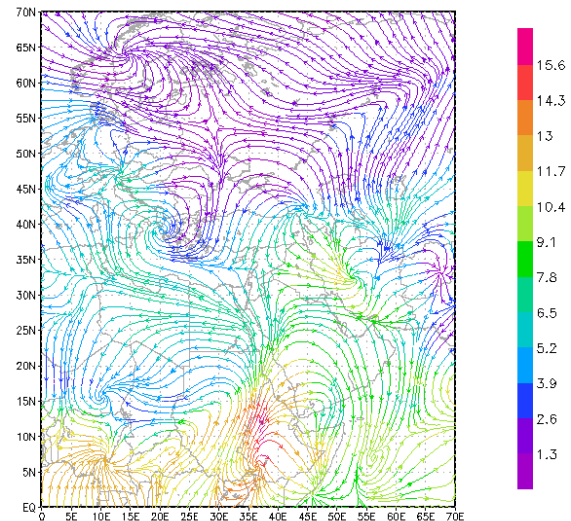
شکل ۵- نقشه ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ میلی‌بار روز ۲۹ آبان ۱۳۹۴
Figure 5- Geopotential map of level 500 m bar 29 October 2015



شکل ۶- نقشه فشار سطح دریای آزاد روز ۲۹ آبان ۱۳۹۴
Figure 6- Sea level pressure map 29 October 2015

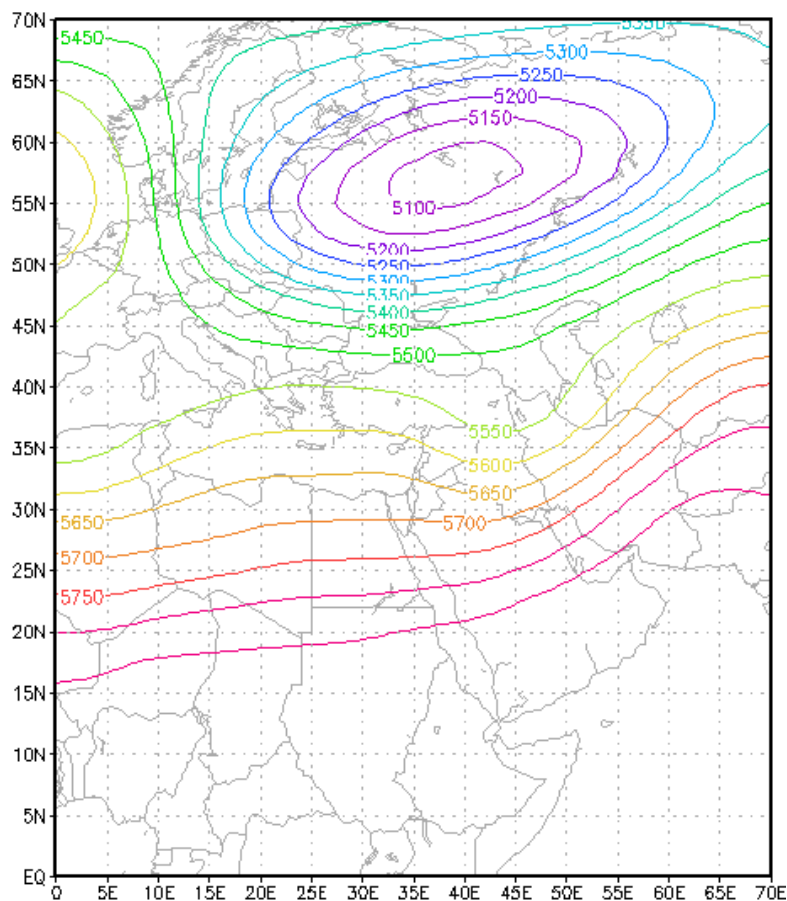
۳-۴- تحلیل الگوهای هم‌دید منجر به بارش سنگین بهمن ۱۳۸۴

در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال در روز ۱۵ بهمن ۱۳۸۴، ناوهای که روزهای قبل در مرکز مدیترانه بود، در این روز به شرق مدیترانه منتقل شده و منطقه فرارفت ناوۀ بادهای غربی روی غرب ایران قرار گرفته و بارش‌ها روی منطقه آغاز شده است. مرکز کم ارتفاع نیز همچنان روی روسیه مرکزی واقع شده به‌طوری که با نزدیک شدن منطقه واگرایی بالایی و فراهم شدن شرایط چرخندگی مثبت در منطقه مورد مطالعه، باعث ریزش باران شده است. در روز بارش استان لرستان کاملاً در جلوی ناوه و در زیر منطقه فرارفت هوا قرار گرفته و ناپایداری شدید هوا و افزایش شدت بارش‌های سیل‌آسا در این روز را در استان موجب شده است (شکل ۸).



شکل ۷- نقشه رطوبت سطح ۸۵۰ میلی‌باری روز ۷ آبان ۱۳۹۴

Figure 7- Map of wind and humidity on 29 October 2015



شکل ۸- نقشه ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ میلی‌بار روز ۱۵ بهمن ۱۳۸۴

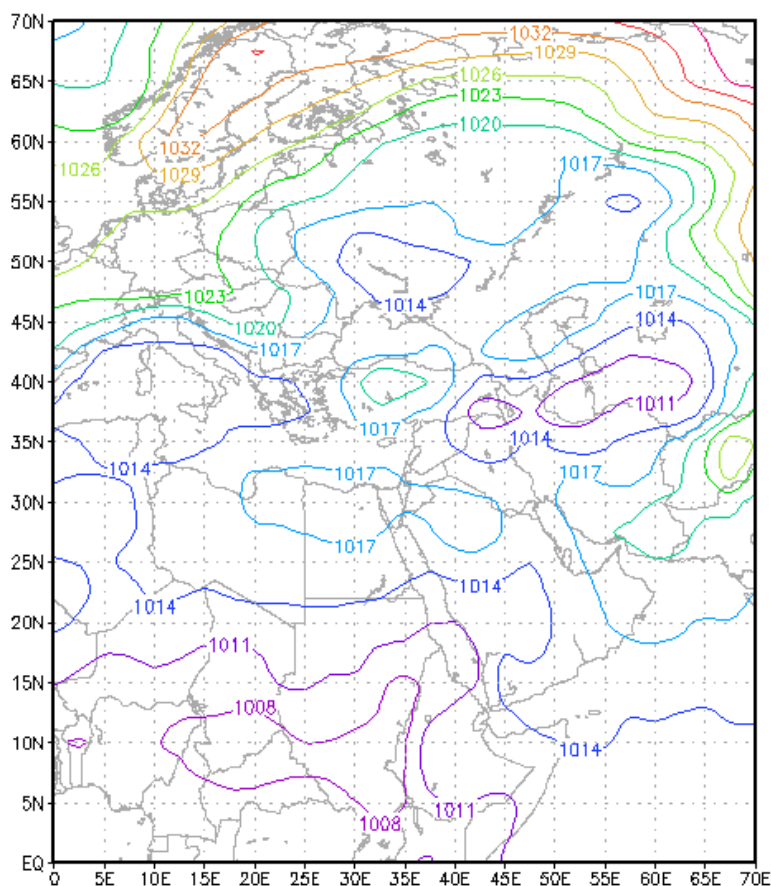
Figure 8- Geopotential map of level 500 millibar 29 October 2015

روی قفقاز، استان لرستان و دامنه‌های جنوبی زاگرس و جنوب کشور کاملاً مشخص است.

نقشه تراز دریا در روز ۱۵ بهمن ۱۳۸۴ در شکل ۹ حاکی از این است که مرکز کم‌فشار قفقاز-زاگرس با سه مرکز کم‌فشار

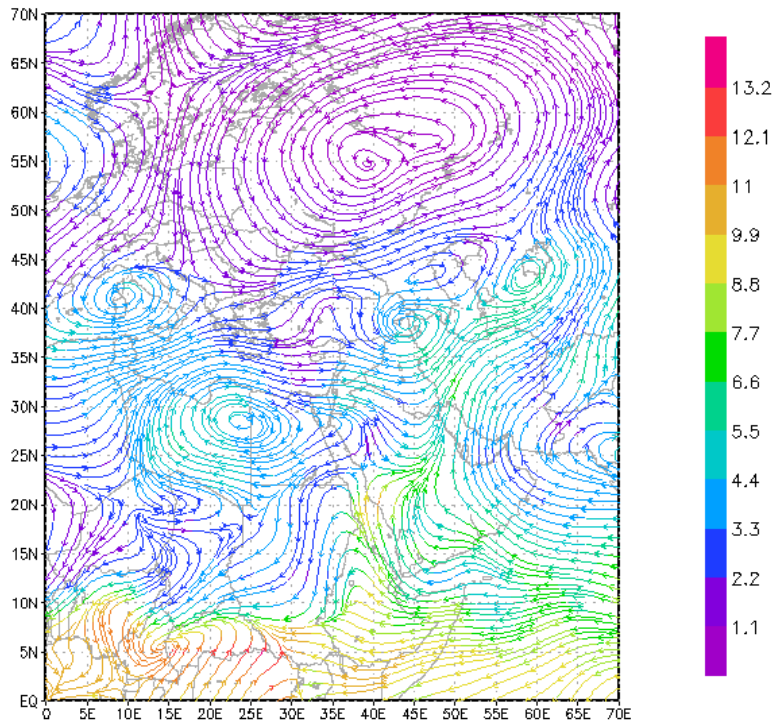
خلیج فارس با منحنی ۵ تا ۹ گرم تقویت شده و جنوب تا شمال شرق را دربرگرفته و شرایط را برای ایجاد و ریزش بارش‌های سنگین در سطح استان لرستان فراهم کرده است.

در شکل ۱۰ نقشه رطوبت تراز ۸۵۰ برای روز ۱۵ بهمن ۱۳۸۴ ارائه شده است. در این روز هسته‌های رطوبتی کاملاً روی استان لرستان قرار دارند. یکی از هسته‌های رطوبتی از روی



شکل ۹- نقشه فشار سطح دریای آزاد روز ۱۵ بهمن ۱۳۸۴

Figure 9- Sea level pressure map 4 February 2006



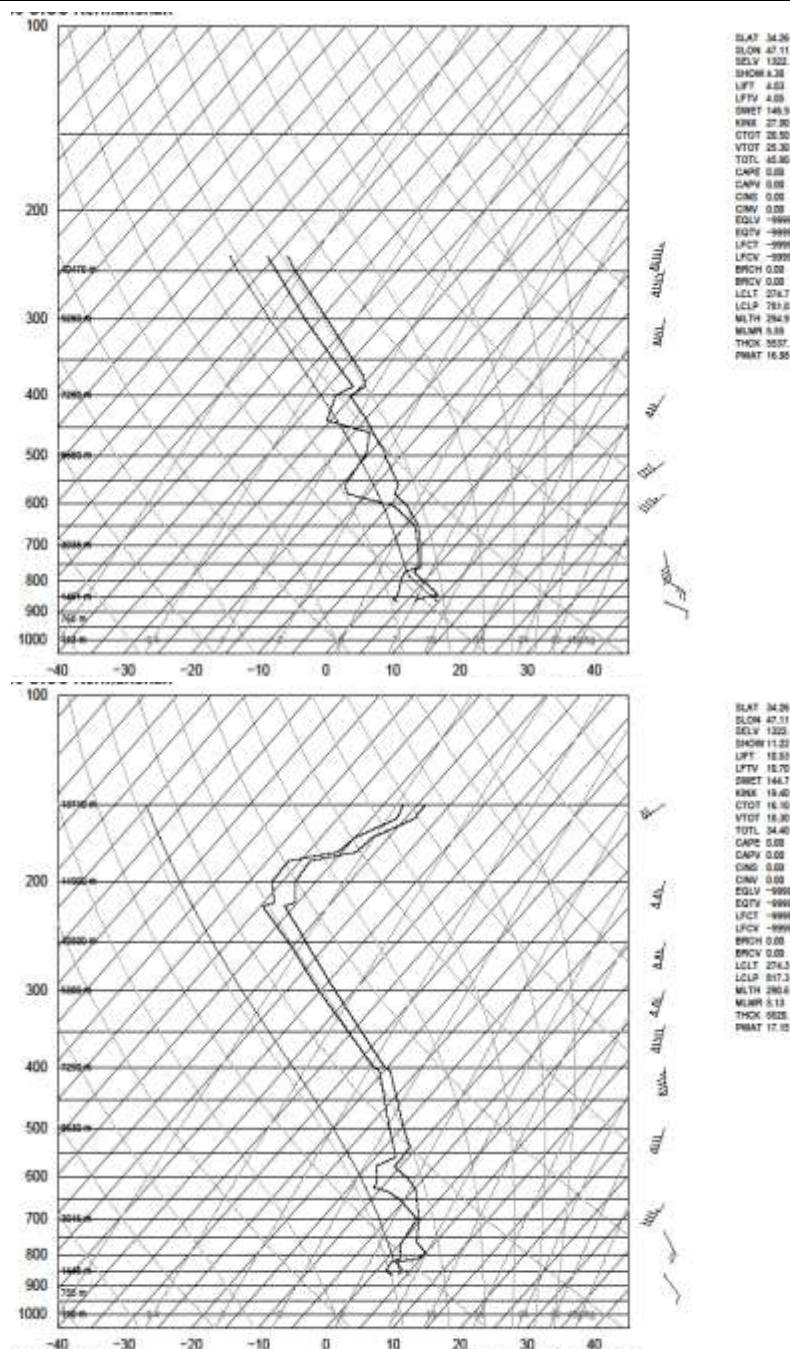
شکل ۱۰- نقشه رطوبت تراز ۸۵۰ میلی بادی روز ۱۵ بهمن ۱۳۸۴

Figure 10- Map of wind and humidity 4 February 2006

۳-۵- تحلیل ترمودینامیکی و شاخص‌های ناپایداری

برای بررسی وضعیت ترمودینامیکی هوا در منطقه مورد مطالعه از شاخص‌های ناپایداری K index، شاخص SI و شاخص TT برای جو بالای منطقه استفاده شد. از آنجا که در منطقه مورد مطالعه یعنی استان لرستان هیچ ایستگاه جو بالایی وجود ندارد و نزدیک‌ترین ایستگاه جو بالای منطقه ایستگاه کرمانشاه است. لذا، از نقشه‌های شاخص‌های ناپایداری جو بالا ایستگاه کرمانشاه استفاده شده است. در شکل ۱۱ نمودارهای ترمودینامیکی مربوط به رادیو سوند برای ایستگاه جو بالای کرمانشاه ارائه شده است.

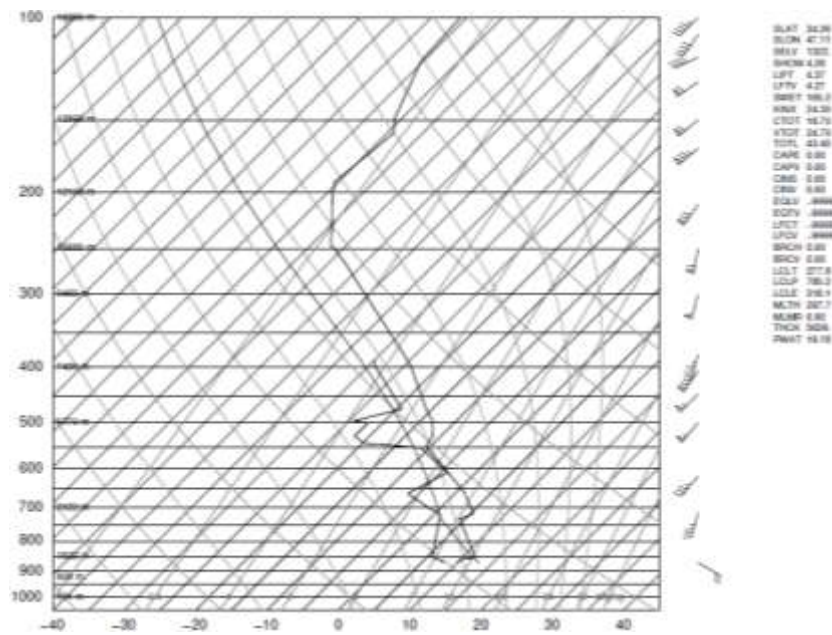
همان‌طور که مشاهده می‌شود، دو منحنی دما و دمای نقطه شبنم در روز ۵ فروردین در موقعیت ایستگاه جو بالای کرمانشاه در تراز ۹۰۰ میلی‌بار با هم تماس پیدا کرده‌اند و این ناپایداری به ترازهای بالاتر گسترش پیدا نکرده است. در حالی که در ایستگاه کرمانشاه در روز ۱۲ فروردین، دو منحنی مذکور در تراز ۷۵۰ میلی‌بار با هم تماس داشته‌اند و تا تراز ۶۰۰ میلی‌بار این دو منحنی بسیار به هم نزدیک بوده‌اند که بدان معناست که تا تراز ۶۵۰ میلی‌باری ناپایداری ادامه داشته است.



شکل ۱۱- نمودار ترمودینامیکی (اسکیوتی) جو بالای ایستگاه کرمانشاه در روزهای ۵ (بالا) و ۱۲ (پایین) فروردین ۱۳۹۸
Figure 11- The thermodynamic diagram of the atmosphere above Kermanshah station 25 March (top) and 1 April (bottom) 2019

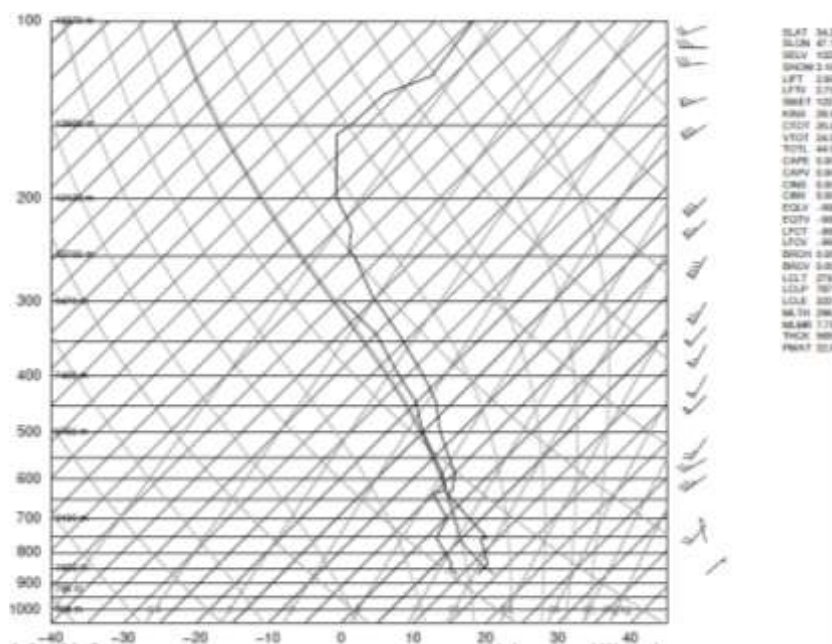
ترمودینامیکی مربوط به رادیو سوند برای ایستگاه جو بالای کرمانشاه ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، دو منحنی دما و دمای نقطه شبنم در روز ۱۵ بهمن ۱۳۸۴ در موقعیت ایستگاه جو بالای کرمانشاه در تراز ۷۵۰ میلی بار بسیار به هم نزدیک شده اند و این ناپایداری به ترازهای بالاتر گسترش پیدا نکرده است.

در شکل ۱۲ نمودارهای ترمودینامیکی مربوط به رادیو سوند برای ایستگاه جو بالای کرمانشاه ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، دو منحنی دما و دمای نقطه شبنم در روز ۷ آبان در موقعیت ایستگاه جو بالای کرمانشاه در تراز ۶۰۰ میلی بار با هم تماس پیدا کرده اند و این ناپایداری تا ترازهای ۵۵۰ گسترش پیدا کرده است؛ ولی در ترازهای بالاتر مشاهده نشده است. در شکل ۱۳ نمودارهای



شکل ۱۲- نمودار ترمودینامیکی (اسکیوتی) جو بالای ایستگاه کرمانشاه در روز ۷ آبان ۱۳۹۴

Figure 12- The thermodynamic diagram of the atmosphere above Kermanshah station 29 October 2015

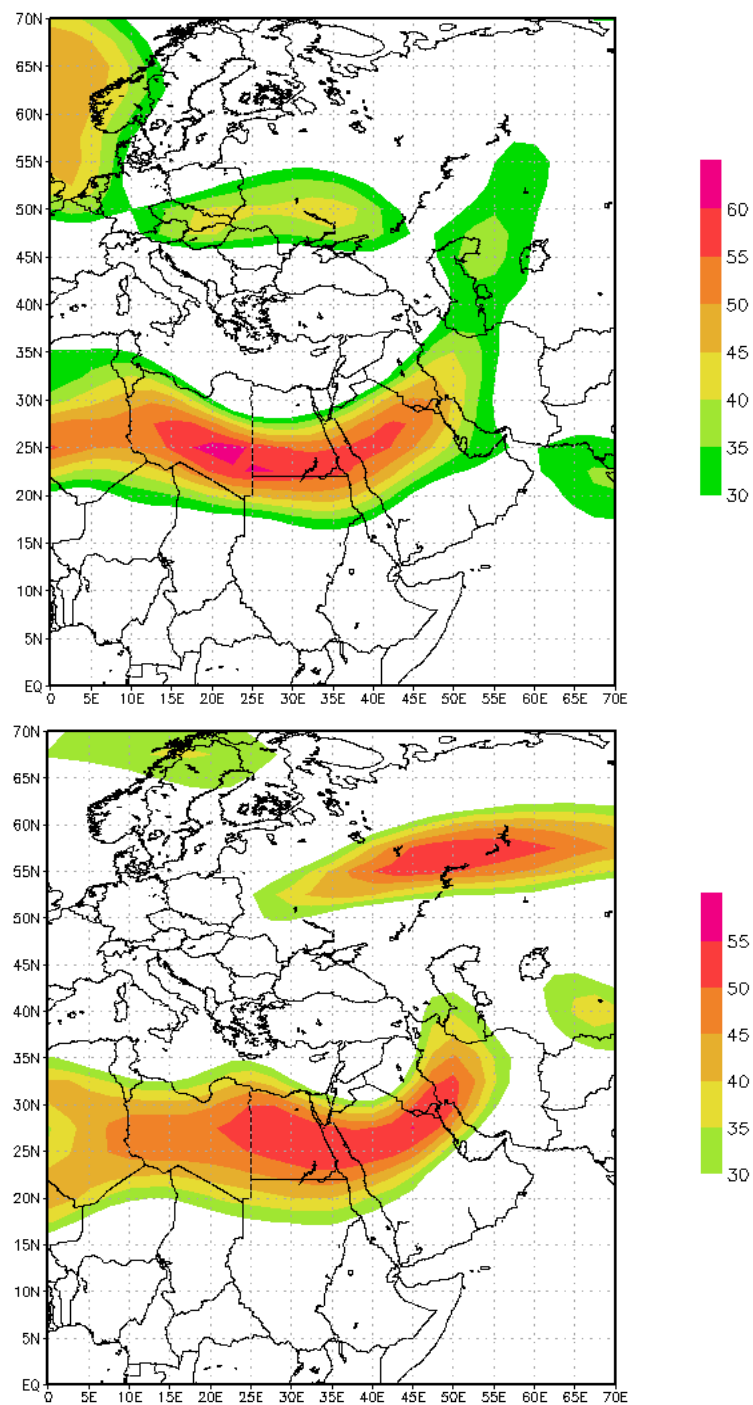


شکل ۱۳- نمودار ترمودینامیکی (اسکیوتی) جو بالای ایستگاه کرمانشاه در روز ۱۵ بهمن ۱۳۸۴

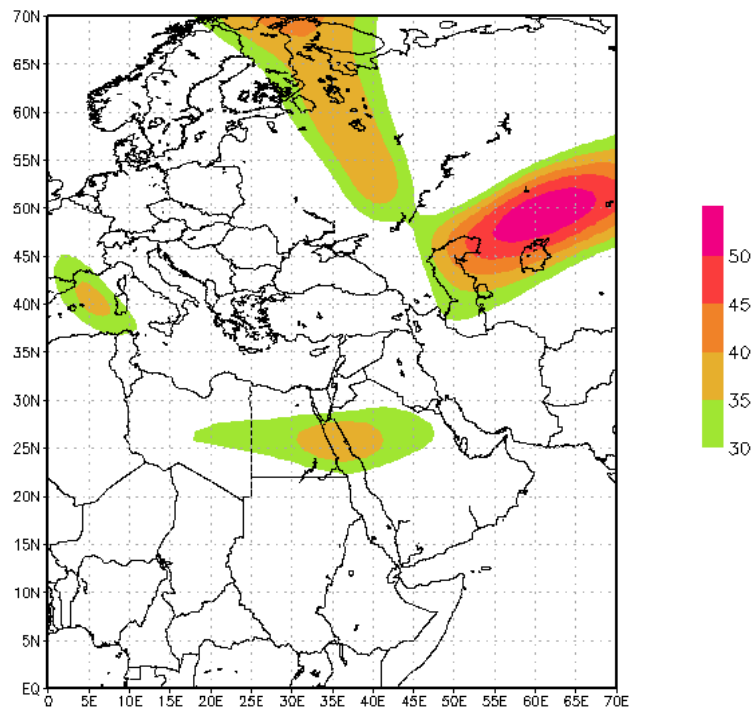
Figure 13- The thermodynamic diagram (skewty) of the atmosphere above Kermanshah station on 4 February 2006

برای ساعت ۱۵/۳۰ دو روز مذکور ترسیم شد (شکل ۱۴). در سطح ۳۰۰ هکتوپاسکال در روز ۵ فروردین ۱۳۹۸ نشان‌دهنده وجود رودبادی با سرعت ۴۰ تا ۵۰ متر بر ثانیه در سطح منطقه است و در روز ۱۲ فروردین ۱۳۹۸ نیز رودبادی با سرعت ۵۰ تا ۵۵ متر بر ثانیه بوده است.

داده‌های مربوط به رادیو سوند ارسال شده در تاریخ‌های مذکور (۵ و ۱۲ فروردین ۱۳۹۸) در ساعت ۱۵/۳۰ به وقت محلی بیان‌گر وجود بادهای با سرعت بالای ۳۰ متر بر ثانیه (۶۲ نات در تراز ۴۳۹ میلی‌بار) از تراز ۴۵۰ میلی‌بار به بالا بوده است. در همین راستا، نقشه رودباد منطقه در تراز ۳۰۰ میلی‌بار به صورت شکل ۱۵



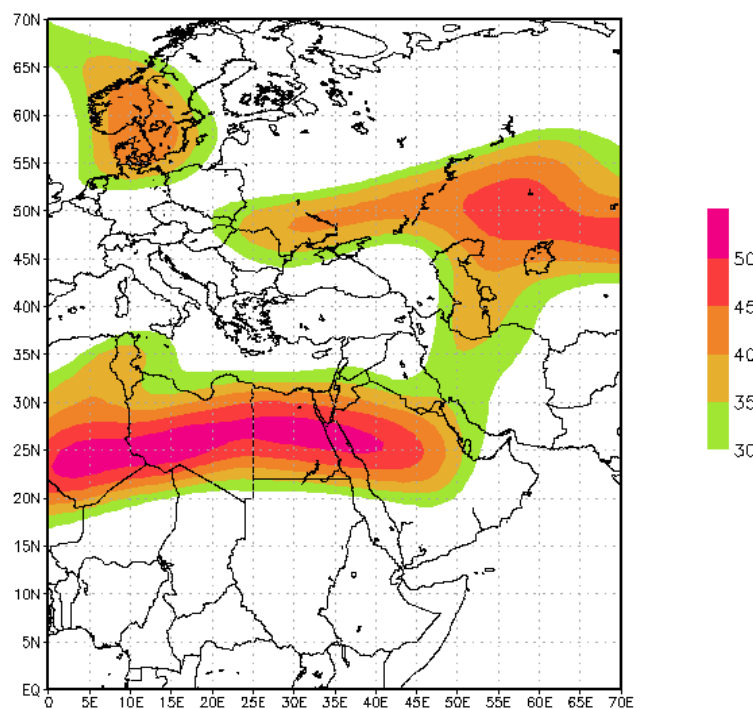
شکل ۱۴- نقشه رودباد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال روز ۵ فروردین (بالا) و نقشه رودباد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال روز ۱۲ فروردین (پایین)
Figure 14- The map of the level of 300 hPascal wind 25 March (top) and the map of the level of the 300 hPascal river 1 April (bottom)



شکل ۱۵- نقشه رودباد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال روز ۷ آبان ۱۳۹۴
Figure 15- Map of Rodbad Taraz level 300 hPa 29 October 2015

و ایجاد صعود دینامیکی در ترکیب با رودباد جنب‌حاره‌ای نقش داشته است (شکل ۱۶). این امر شرایط را برای افزایش چرخندگی مثبت روی فرارفت هوا در سطح ۵۰۰ میلی‌بار فراهم کرده و باعث ایجاد ناپایداری شدید هوا و وقوع بارش‌های سیل‌آسا شده است.

نقشه رودباد ۱۵ بهمن ۱۳۸۴ در شکل ۱۶ ارائه شده است. قسمت چپ خروجی محور رودباد جنب حاره روی فرارفت بادهای غربی روی استان لرستان قرار گرفته و سمت راست ورودی رودباد جبهه قطبی روی استان لرستان است که در تقویت اثر مکش هوا



شکل ۱۶- نقشه رودباد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال روز ۱۵ بهمن ۱۳۸۴
Figure 16- The map of Rodbad Taraz 300 HPa 4 February 2006

ناپایداری شاخص SI است که شرایط پایداری یا ناپایداری بسته هوا در تراز ۸۵۰ میلی باری را نشان می دهد. با توجه به جدول ۵ این شاخص در روزهای ۵ و ۱۲ فروردین ۱۳۹۸، ۷ آبان ۱۳۹۴ و ۱۵ بهمن ۱۳۸۴ به ترتیب برابر با ۴/۵، ۱۱/۲۲، ۵/۵ و ۳/۱ بوده که نشان دهنده شرایط ناپایداری است.

شکل های ۱۱ تا ۱۳، نمودارهای ترمودینامیکی (Skew-t) جو بالا در روزهای ۵ و ۱۲ فروردین ۱۳۹۸، ۷ آبان ۱۳۹۴ و ۱۵ بهمن ۱۳۸۴ را نشان می دهند. بر اساس نمودار ترمودینامیکی این روزها نزدیک شدن منحنی دمای نقطه شبنم (رطوبت) به منحنی دما به ویژه در تراز ۶۵۰ به بالا نشان دهنده افزایش ناپایداری و وجود رطوبت زیاد و وجود جریانات جنوبی در لایه میانی و پایین جو در منطقه است.

نتایج حاصل از محاسبه هریک از شاخص های آشکارسازی بارش سنگین برای روزهای ۵ و ۱۲ فروردین ۱۳۹۸، ۷ آبان ۱۳۹۴ و ۱۵ بهمن ۱۳۸۴ در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به جدول ۵، شاخص KI نشان می دهد حرکات همرفتی یکی از ملزومات و نشانه های وقوع بارش های سنگین است. در ایستگاه کرمانشاه در ساعت ۳:۳۰ به ترتیب برابر با ۲۷/۹، ۲۷/۴، ۲۶/۶ و ۲۸/۹ است که وقوع ناپایداری در روزهای مورد مطالعه بین ۴۰ تا ۶۰ درصد را نشان می دهد. بر اساس محاسبات انجام گرفته شاخص TTI (مجموع مجموع ها) در ساعت ۳/۳۰ در روزهای مورد بررسی به ترتیب برابر با ۴۵، ۴۴/۴، ۴۴/۶ و ۴۴/۵ بوده که نشان گر حرکات بالاروی همرفتی در حد امکان ایجاد ناپایداری در منطقه مطالعاتی بوده است. یکی از نشانه های وقوع یا احتمال

جدول ۵- شاخص های ترمودینامیکی وقوع بارش سنگین

Table 5- Estimation of thermodynamic indicators of heavy rainfall

ساعت دیدبانی	مقدار شاخص روز ۵ فروردین	مقدار شاخص روز ۱۲ فروردین	مقدار شاخص روز ۱۵ بهمن	مقدار شاخص روز ۷ آبان
	1398	1398	1384	1394
شاخص K	27.9	27.4	28.9	26.6
شاخص شولتر (SI)	-4.5	-11.22	-3.1	-5.56
شاخص مجموع مجموع ها (TT)	45	44.4	44.5	44.6

۴- نتیجه گیری

تحلیل الگوهای هم دیدی این رخدادهای بارش حدی نشان داد که الگوی هم دید مشابهی مولد این موج های بارش سنگین در منطقه بوده است. در روزهای مورد مطالعه وجود یک ناوه عمیق روی شرق دریای مدیترانه و بخش غربی ایران در بخش جلویی یک ناوه بسیار عمیق قرار گرفته است که شرایط صعود و ورود سیستم های کم فشار را برای غرب کشور به وضوح فراهم کرده است در سطح زمین نیز حاکمیت سامانه کم فشار مشهود است. متناسب با عمیق شدن ناوه بادهای غربی منابع رطوبتی سیستم علاوه بر مدیترانه از دریای سیاه و دریای سرخ و نیز خلیج فارس تأمین می شود که حضور کم فشار در سطح زمین در جهت دادن به ریزش هوای مرطوب از مناطق اطراف مؤثر است. فرود دریای سرخ با استقرار در تراز میانی جو همراه بوده و امکان صعود عمیق و تشکیل ابر و بارش را فراهم کرده و ایجاد بارش های سنگین و سیل آسا در غرب را به همراه داشته است. در نقشه وزش رطوبتی مشاهده می شود یک مرکز و اچرخندی روی

دریای عمان و خلیج فارس تشکیل شده است که رطوبت را از روی دریای عمان و عرب به سمت جنوب و جنوب غربی ایران هدایت می کند. همچنین، مرکز چرخندی دیگری روی مدیترانه تشکیل شده است که رطوبت دریای مدیترانه و سیاه را به سمت غرب و جنوب غرب ایران می فرستد؛ یعنی این دو مرکز رطوبت دریاهای جنوبی، غربی و شمال غربی کشور را روی این استان ها متمرکز کرده و سیستم های جوی از لحاظ رطوبتی کاملاً تغذیه شده اند. شاخص های ناپایداری جو بالا که با تأکید بر ایستگاه های جو بالای کرمانشاه بررسی شده بود، وجود ناپایداری بسیار شدید را در منطقه تأیید نمی کرد. ناپایداری متوسط در ترازهای پایین جو که قابلیت گسترش به تراز فوقانی را نداشته است، نمودار (Skew-T) بیان گر آن بوده که یک سامانه هم دید سراسری کل منطقه را درگیر کرده و عامل همرفت محل نقشی نداشته است.

محیط طبیعی، ۱۱(۳۲)، ۱۶۹-۱۸۸. doi: 10.22111/jneh. 2022.38564.1806

پناهی، حسین، و اسمعیل درجانی، نجمه (۱۳۹۹). بررسی اثر گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی بر رشد اقتصادی (مطالعه موردی: استان‌های ایران طی دوره ۱۳۹۰-۱۳۸۰. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۲(۱)، ۷۹-۸۸. doi: 10.30495/jest. 2020.22073.3114

دهبان، حسین، ابراهیمی، کیومرث، عراقی‌نژاد، شهاب، و بذرافشان، جواد (۱۳۹۸). ارزیابی دقت مدل‌های NMME در پیش‌بینی بارش ماهانه مطالعه موردی حوزه سفیدرود. هوشناسی کشاورزی، ۷(۱)، ۳-۱۲. doi: 10.22125/agmj.2019.154084.1043

زاهدی، مجید، و چویدار، اصغر، (۱۳۸۶). مقایسه شاخص‌های جوی حوزه آبخیز آجی چای با استانداردهای ناپایداری جوی و تعیین الگو برای حوزه جغرافیا و توسعه ناحیه/ای، ۹(۱)، ۲۳-۴۴. <https://www.sid.ir/paper/98969/fa>

سلاجقه، علی، مقدم نیا، علیرضا، خلیقی سیگارودی، شهرام، آذرخشی، مریم، و رستمی خلج، محمد (۱۳۹۰). مدل‌سازی بارش رواناب مبتنی بر رویکرد پویایی سامانه مطالعه موردی حوزه کارده مشهد. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۱(۱)، ۱۵-۲۷. doi: 10.22092/ijwmse.2019.118432

سلامتی هرمزی، وحید، امیدوار، کمال، کاوسی، رضا، و حمزه‌نژاد، مجتبی (۱۳۹۶). شناسایی و تحلیل همدیدی-دینامیکی الگوهای جوی سیلاب آبان ۱۳۹۴ در استان‌های ایلام و لرستان. نیوار، ۹، ۲۷-۹۷. doi: 10.30467/nivar.2017.48071

قاسمی‌فر، الهام، ناصرپور، سمیه، و آرزومندی، لیلی (۱۳۹۶). شناسایی الگوهای هم‌دیدگی بارش‌های سیل‌خیز غرب ایران. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۴(۲)، ۶۹-۸۶. <https://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2717-fa.html>

قویدل رحیمی، یوسف (۱۳۹۰). کاربرد شاخص‌های ناپایداری جوی برای آشکارسازی و تحلیل دینامیک طوفان تندی روز ۵ اردیبهشت ۱۳۸۹ تبریز. فضای جغرافیایی، ۱۱(۳۳)، ۱۸۲-۲۰۸. <https://www.sid.ir/paper/91677/fa>

سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند که از سازمان هواشناسی استان لرستان جهت همکاری در فرآیند دریافت داده‌ها تشکر کنند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش وجود ندارند.

دسترسی به داده‌ها

تمام داده‌های به‌دست آمده در مقاله ارائه شده است. مجموعه داده‌های بیش‌تر بر اساس درخواست معقول به نویسندهٔ مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

ابراهیم بیرانوند: نگارش نسخهٔ اولیهٔ مقاله؛ امیر گندمکار: راهنمایی، مفهوم‌سازی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛ علیرضا عباسی: تهیهٔ نقشه‌ها؛ مرتضی خداقلی: ویرایش مقاله.

منابع

امیدوار، کمال، سپندار، نسا، و شفیعی، شهاب (۱۳۹۷). تحلیل همدید و ترمودینامیک بارش سنگین و سیلابی روزهای ۵ تا ۸ آبان ۱۳۹۴ در استان کرمانشاه. اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، ۲۷(۱۰۷)، ۳۲۷-۲۵۲. doi: 10.22131/sepehr.2018.33581

بیرانوند، ابراهیم، گندمکار، امیر، عباسی، علیرضا، و خداقلی، مرتضی (۱۴۰۱). تحلیل آماری-سینوپتیکی بارش‌های سنگین منجر به سیلاب فروردین ۱۳۹۸ در حوزه آبریز درود بروجرد. مخاطرات

References

Agel, L., Barlow, M., Colby, F., Binder, H., Catto, J., Hoell, A., & Cohen, J. (2018). Dynamical analysis of extreme precipitation in the US northeast based on large-scale meteorological patterns. *Climate Dynamics*, 52(3-4), 1739-1760. doi:10.1007/s00382-018-4223-2

Beiranvand, I., Gabdomkar, A., Abbasi, A., & Khodaghali, M. (2022). Statistical-synoptic analysis of April 2019 heavy rainfall in Doroud-Boroujerd Basin. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11(32), 169-188. doi: 10.22111/jneh.2022.38564.1806. [In Persian]

Dehban, H., Ebrahimi, K., Araghinejad, Sh., & Bazrafshan, J. (2018). Evaluation of NMME models in forecasting of monthly rainfall (Case study: Sefidrood Basin). *Scientific Journal of Agricultural Meteorology*, 7(1), 3-12. doi: 10.22125/agmj.2019.154084.1043 [In Persian]

Ghasemifar, A., Naserpour, S., & Arzumandi, L. (2016). Analysis of synoptic patterns related to extreme precipitation over west of Iran. *Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 4(2), 69-86. <https://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2717-fa.html> [In Persian]

- Ghavidel Rahimi, Y. (2010). The use of atmospheric instability indicators to reveal and analyze the dynamics of the thunderstorm on 2011 May 5, in Tabariz. *Geographical Space*, 11(33), 182-208. <https://www.sid.ir/paper/91677/en> [In Persian]
- Hidayat, R., Pawitan, H., Aldrian, E., & Nuryanto, D., (2016). "Heavy rainfall distributions over Java Sea in wet season". *Procedia Environmental Sciences*, 33, 178-186. doi:10.1016/j.proenv.2016.03.068
- Omidvar, K., Sepandar, N., & Shafiei, Sh. (2017). Synoptic and thermodynamic analysis of heavy rainfall and flooding on November 5 to 8, 2014 in Kermanshah province. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (Sephr)*, 27(107), 237-252. doi:10.22131/sephr.2018.33581 [In Persian]
- Oueslati, B., Yiou, P., & Jézéquel, A. (2020). Revisiting the dynamic and thermodynamic processes driving the record-breaking January 2014 precipitation in the southern UK. *Scientific Reports*, 9, 2859. doi.org/10.1038/s41598-019-39306-y
- Panahi, H., & Esmaeel Darjani, N. (2020). Effects of global warming and climate changes on economic growth (Case Study: Iran provinces during 2002-2012). *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(1), 79-88. doi:10.30495/jest.2020.22073.3114. [In Persian]
- Remy, R. (2019). Estimation of extreme daily precipitation thermodynamic scaling using gridded satellite precipitation products over tropical land. *Environmental Research Letters*, 14(9), 1-9. doi:10.1088/1748-9326/ab35c6
- Salamati Hormazi, V., Omidar, K., Kaousi, R., & Hamzenejad, M. (2016) Identification and synoptic-dynamic analysis of atmospheric patterns of floods in November 2014 in Ilam and Lorestan provinces. *Nivar*, 97, 9-27. doi: 10.30467/nivar.2017.48071 [In Persian]
- Samman, A.E., & Gallus, Jr, W.A. (2017). A classification of synoptic patterns inducing heavy precipitation in Saudi Arabia during the period 2000-2014. *Atmosphere*, 31(1), 47-67. doi:10.20937/ATM.2018.31.01.04
- Salajegheh, A., Moghadamnia, A., Khalighi Sigaroudi, Sh., Azarakhshi, M., & Rostami Khalaj, M. (2011). Runoff rainfall modeling based on system dynamics approach, a case study of Karde Basin of Mashhad. *Watershed Engineering and Management*, 11(1), 15-27. doi:10.22092/ijwmse.2019.118432 [In Persian]
- Van Oldenborgh, G.J., Otto, F.E.L., Haustein, K., & Cullen, H. (2015). Climate change increases the probability of heavy rains like those of storm Desmond in the UK—an event attribution study in near-real time. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 13197-13216. doi:10.5194/hessd-12-13197-2015
- Wei, W., Shi, Z., Yang, X., Wei, Z., Liu, Y., Zhang, Z., Ge, G., Zhang, X., Guo, H., Zhang, K., & Wang, B. (2017). Recent trends of extreme precipitation and their teleconnection with atmospheric circulation in the beijing-tianjin sand source region, China, 1960-2014. *Atmosphere*, 8(83), 1-18. doi:10.3390/atmos8050083
- World Meteorological Organization. (2011). Weather extremes in a changing climate: hindsight on foresight, ISBN:978-92-63-11075-6
- Zahedi, M., & Chobdar, A. (2007). Comparison of atmospheric indicators of Aji Chai watershed with atmospheric instability standards and determination of model for the basin. *Journal of Geography and Regional Development*, 9(1), 23-44. <https://www.sid.ir/paper/98969/en> [In Persian]