

## Statistical-Synoptic Analysis of April 2019 Heavy Rainfall in Doroud-Boroujerd Basin

Ibrahim Beiranvand<sup>1</sup> , Amir Gabdomkar<sup>2\*</sup> , Alireza Abbasi<sup>3</sup> , Morteza Khodagholi<sup>4</sup> 

1. PhD student in Meteorology, Department of Geography, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najaf-Abad, Iran.
2. *Corresponding Author*, 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 Division, Rangelands and Forests of Institute Research, Agricultural Research Extension Education Organization (AREEO), Tehran, Iran.

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

### Article history:

**Received:** 16 May 2021  
**Revised:** 19 February 2022  
**Accepted:** 09 March 2022

### Keywords:

Heavy rainfall,  
Mediterranean trough,  
Skew-T diagram,  
Silakhor plain.

### ABSTRACT

The occurrence of catastrophic floods in March-April 2019 in Lorestan province was a clear example of heavy rains that caused very heavy damage to agricultural, urban, transportation, and communications infrastructure. The purpose of this study is to investigate the March-April 2019 rainfall in the Droud-Boroujerd catchment area in terms of statistical, synoptic, and dynamic characteristics. In this regard, from the data related to the daily station rainfall in March-April 2019 of Boroujerd and Doroud synoptic stations, NOAA climate Synoptic factor data for the 25th March and 2nd April 2019, and upper atmospheric data from the University of Wyoming database for the mentioned days of April 2019. The results of statistical analysis showed that the occurrence of rainfall in April 2019 was one of the heavy rains that in the first wave (25th March) 2019 was 15% of the total annual rainfall and in the second wave (2nd April 2019) 20% of the total annual rainfall was recorded. Analysis of synoptic patterns of these heavy rainfall events showed that a similar synoptic pattern produced these two waves of heavy rainfall in the region. On both days, the presence of a strong trough a height of 5500 and 5550 geopotential meters, on the east of the Mediterranean Sea that the western region of Iran located in the front of this trough, lead to heavy rainfall. In these two days, the omega index had reached a significant critical value (-0.2). Moisture injection in the study area was done by the interaction of two cyclonic systems (east of the Mediterranean Sea) and anti-cyclone (on the Gulf of Aden) and the source of moisture supply was the Mediterranean Sea, the Red Sea, and the Persian Gulf, respectively. High atmospheric instability indices did not confirm the existence of very severe instability in the region. Moderate instability in the lower levels of the atmosphere, which could not be extended to the upper level (Skew-T diagram), indicated that a global synoptic system was involved in the whole region and no local convection factor played a role.

**Cite this article:** Beiranvand, I., Gabdomkar, A., Abbasi, A., Khodagholi, 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



© Amir Gabdomkar

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

DOI: 10.22111/jneh.2022.38564.1806

\* Corresponding Author Email: [aagandomkar@gmail.com](mailto:aagandomkar@gmail.com)



مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۱، شماره ۲۲، تابستان ۱۴۰۱

## تحلیل آماری-سینوپتیکی بارش‌های سنگین منجر به سیلاب فروردین ۱۳۹۸ در حوضه آبریز درود بروجرد

ابراهیم بیرانوند<sup>۱</sup>، امیر گندمکار<sup>۲\*</sup>، علیرضا عباسی<sup>۳</sup>، مرتضی خداقلی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
۲. دانشیار گروه جغرافیا، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران (نویسنده مسئول)
۳. استادیار گروه جغرافیا، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
۴. دانشیار بخش تحقیقات مرتع، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	رخداد بارش سیل‌آسای فروردین ۱۳۹۸ در استان لرستان نمونه‌ای بارز از بارش‌های سنگینی بود که خسارت‌های بسیار قابل توجهی به زیرساخت‌های کشاورزی، شهری، حمل‌ونقل و ارتباطات برجای گذاشت. هدف از این پژوهش، بررسی و الگویابی سینوپتیکی-آماری بارش سنگین فروردین ۱۳۹۸ در حوضه آبریز درود-بروجرد است. در این راستا، از داده‌های مربوط به میزان بارش روزانه ایستگاهی ماه فروردین ۱۳۹۸ ایستگاه‌های سینوپتیک بروجرد و درود، داده‌های فاکتورهای سینوپتیکی پایگاه اقلیمی NOAA برای دو روز ۵ و ۱۲ فروردین ۱۳۹۸ و داده‌های جو بالای پایگاه دانشگاه وایومینگ برای روزهای ۵ و ۱۲ فروردین ۱۳۹۸ استفاده شد. نتایج تحلیل آماری نشان داد که رخداد بارشی فروردین ۱۳۹۸، از جمله بارش‌های سنگینی بوده که در موج اول (۵ فروردین) ۱۵ درصد از کل بارش سال و در موج دوم (۱۲ فروردین) ۲۰ درصد از کل بارش متوسط سالانه منطقه، ثبت شده است. تحلیل الگوهای سینوپتیکی این رخدادها بارش سنگین نشان داد که الگوی سینوپتیک مشابهی مولد این دو موج بارش سنگین در منطقه بوده است. در هر دو روز وجود یک ناوه عمیق با یک هسته بسته‌شده با ارتفاع ۵۵۰۰ و ۵۵۵۰ ژئوپتانسیل متر بر 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 به صورت معنی‌داری به مقدار حدی (۰٫۲-) رسیده بود. از لحاظ تأمین رطوبت بارش‌های این دو روز نتایج نشان داد که در سطح ۸۵۰ میلی-بار، تزیق رطوبت در منطقه مورد مطالعه با تعامل دو سیستم سیکلونی (در شرق دریای مدیترانه) و آنتی سیکلونی (روی خلیج عدن) صورت گرفته است و منبع تأمین رطوبت نیز به ترتیب دریای مدیترانه، دریای سرخ و خلیج فارس بوده است که رطوبت را در سطح منطقه به ۱۱ تا ۱۳ گرم در کیلوگرم هوای خشک رسانده است. شاخص‌های ناپایداری جو بالا، وجود ناپایداری بسیار شدید را در منطقه تأیید نمی‌کرد. ناپایداری متوسط در ترازهای پایین جو که قابلیت گسترش به تراز فوقانی را نداشته است (نمودار Skew-T)، بیانگر آن بوده است که یک سامانه سینوپتیک سراسری، کل منطقه را درگیر کرده است و عامل همرفت محل نقشی نداشته است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۶	
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۸	
واژه‌های کلیدی:	
بارش سنگین،	
ناوه دریای مدیترانه،	
نمودار Skew-T،	
دشت سیلاخور.	

استناد: بیرانوند، ابراهیم، گندمکار، امیر، عباسی، علیرضا، خداقلی، مرتضی. (۱۴۰۱). تحلیل آماری-سینوپتیکی بارش‌های سنگین منجر به سیلاب

فروردین ۱۳۹۸ در حوضه آبریز درود بروجرد. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۱(۳۲)، ۱۸۸-۱۶۹. DOI: 10.22111/jneh.2022.38564.1806



© ابراهیم بیرانوند، امیر گندمکار<sup>\*</sup>، علیرضا عباسی، مرتضی خداقلی.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

## مقدمه

امروزه پدیده عمومی و رو به گسترش تغییر اقلیم به یکی از مهم‌ترین جنبه‌های آب‌وهوا شناختی تبدیل شده است. گرمایش جهانی به‌عنوان پیش‌رانه تغییر اقلیم است و به‌طور ساده به معنی افزایش میانگین دمای اتمسفر بوده، از سال ۱۹۵۰ به بعد به‌صورت پیوسته، خزنده و افزایشی در پی انباشت گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر آغاز شده است. از مهم‌ترین جنبه‌های این رخداد عمومی بزرگ‌مقیاس (تغییر اقلیم)، افزایش آنتروپی یا ناهنجاری سیستم اتمسفر زمین می‌باشد. به‌دنبال افزایش ناهنجاری‌های اتمسفری برخی رخدادهای حدی مانند خشکسالی‌های شدید، بارش‌های رگباری و سیل‌آسا، دماهای فرا گرم (امواج گرم) در تابستان و یخبندان‌های دیررس در بهار، به‌صورت معنی‌داری در سراسر کشور افزایش داشته است (تئون<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۲).

رفتار اقلیم طبیعی منطقه هر سال به‌صورت معنی‌داری به سمت بی‌نظمی و ناهنجاری میل می‌کند و نمونه بارز آن خشکسالی‌های مداوم، امواج گرم (موج‌های گرم خوزستان و تهران در سال ۱۳۹۷) و نمونه اخیر آن بارش‌های رگباری شدید و سیل‌آسا در نقاط مختلف کشور می‌باشد. زمانی که دستگاه اقلیم به‌صورت نرمال و طبیعی عمل می‌کند، رفتاری در چهارچوب میانگین‌های بلندمدت خواهد داشت؛ اما رخداد کلان‌مقیاس تغییر اقلیم و گرمایش جهانی، با وارد کردن ناهنجاری و بی‌نظمی‌های بسیاری زیادی به اتمسفر، رفتار اتمسفر را از حالت نرمال خارج ساخته و رفتارهای حدی آن هر ساله رو به افزایش است. بارش سیل‌آسای فروردین ۱۳۹۸ را که بخش وسیعی از غرب و جنوب غرب کشور را نیز درگیر کرد در راستای همین ناهنجاری سامانه اقلیم باید در نظر گرفت.

گزارش‌های سازمان‌های معتبر جهانی طی سالیان اخیر بیانگر این مسئله است که اثرات تغییر اقلیم با تغییر در رویدادهای حدی اقلیمی چون سیل، توفان، خشکسالی نمود بیشتری یافته است (WMO, 2011). همه‌ساله بخش‌های مهمی از پهنه وسیع کشورمان تحت تأثیر مخاطره اقلیمی بارش سنگین قرار گرفته و خسارت‌های فراوانی به کشور وارد می‌آید. از پیامدهای بارش سنگین در ایران وقوع سیل‌های شدید و مخربی است که خسارت‌های زیانباری به بار می‌آورد. در سال‌های اخیر مطالعات سینوپتیک زیادی در ارتباط با بارش‌های سنگین و سیل‌آسا در کشورهای مختلف انجام شده است. در این رابطه مطالعات زیادی در داخل و خارج کشور انجام گرفته که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

دهبان و همکاران (۱۳۹۸) به ارزیابی دقت مدل‌های NNME در پیش‌بینی بارش ماهانه (مطالعه موردی حوضه سفیدرود) پرداختند. 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. همچنین تحلیل عدم قطعیت مدل‌های پیش‌بینی نیز نشان داد که با ترکیب نتایج مدل‌های مختلف، می‌توان بازه عدم قطعیت را کاهش داد. قاسمی فر و همکاران (۱۳۹۵) به مطالعه شناسایی الگوهای سینوپتیکی بارش‌های سیل‌خیز غرب ایران پرداختند. نتایج بیانگر آن بود که در روزهای همراه با بارش حدی امگای منفی (از سطح ۱۰۰۰ تا ۲۰۰ میلی‌باری و با هسته بیشینه ۰/۳- پاسکال بر ثانیه) بر روی

<sup>1</sup> Theoen

غرب ایران قرار داشته است. علاوه بر آن رطوبت بالای ۷۰ درصد، قرارگیری در جلوی تراف‌هایی که از کم ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۸۵۰ و به‌ویژه ۵۰۰ میلی‌باری بر منطقه نفوذ داشته، رودبادهایی با سرعت بالای ۳۰ متر بر ثانیه در تراز ۲۰۰ میلی‌بار، سرعت باد سطحی بالای ۱۰ متر بر ثانیه و هسته‌های تاوایی مثبت همگی شرایط موجود را به نفع تشکیل سیکلون قوی فراهم کرده‌اند. درنهایت پردازش تصاویر رادار هواشناسی این نتایج را تایید نمود. داداشی و همکاران (۱۳۹۵) به مطالعه تحلیل تغییرهای بارش حوضه‌ی آبریز هراز با استفاده از روش‌های آماری و فن تحلیل طیفی پرداختند. باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده، شیب‌خط روند به‌دست‌آمده برای بارش سالانه‌ی حوضه‌ی آبریز هراز ۶۷/۷ میلی‌متر بر دهه به‌دست آمد. مهم‌ترین سازوکاری که می‌توان بر اساس آن باوجود روند افزایشی دما، مقادیر مثبت بارش را در حوضه‌ی آبریز هراز توجیه نمود، سازوکار «مرطوب‌ترشدن گرم‌تر» است که بر اساس آن هر چه دمای سطحی منطقه بالاتر باشد، مقدار بارندگی بیشتر است.

مهدی نسب و همکاران (۱۳۹۳) به پیش‌بینی احتمال وقوع سیل و حداکثر بارش متحمل زیر حوضه پل‌دختر با استفاده از روش سری‌های جزئی پرداختند. نتایج نشان داد که هر سال به احتمال ۹۹/۹۹ درصد سیلی با میزان دبی ۶۶۰/۳۲ مترمکعب و بارش ۲۴ ساعته‌ای به میزان ۴۳/۰۷ میلی‌متر در زیر حوضه پل‌دختر به وقوع می‌پیوندد. نگارش و ویسی (۱۳۹۲) به مطالعه تجزیه‌وتحلیل اثرات تغییرهای بارش در سیل‌خیزی حوضه آبریز رودخانه راوند (منطقه اسلام‌آباد غرب - استان کرمانشاه) پرداختند. دوره‌های بازگشت و روند و پیش‌بینی بارش و دبی تا ده سال آینده نیز موردبررسی قرار گرفت و به نتیجه رسیدیم که بارش‌های منطقه مورد مطالعه در حال کم‌شدن و شدت بارش‌ها بیشتر و سیل‌خیزی به علت عوامل انسانی و طبیعی افزایش یافته است. گندمکار و ریسی (۱۳۹۱) به مطالعه بررسی رابطه بارش و رواناب در حوضه گوجان (سرشاخه کارون) پرداختند. بررسی رابطه بارش و رواناب ماهانه بین متوسط بارش ماهانه در حوضه گوجان و رواناب ماهانه ایستگاه هیدرومتری ورکش نشان می‌دهد که این رابطه معنی‌دار نیست. پس از آن بین بارش ماهانه در حوضه گوجان و رواناب یک ماه بعد در ایستگاه هیدرومتری ورکش رابطه برقرار شد که این رابطه معنی‌دار بود. بررسی رابطه بارش و رواناب سالانه نشان داد بین رواناب حوضه با بارش همان سال و سال قبل به‌طور هم‌زمان رابطه معنی‌داری وجود دارد. علت این امر هم همان دو دلیلی است که در مورد رابطه بارش و رواناب ماهانه وجود دارد.

جوان و همکاران (۱۳۹۰) به مطالعه روشی جدید جهت پیش‌بینی پراکنش مکانی دما و بارش در حوضه آبریز رودخانه قره‌سو (اردبیل) پرداختند. در این مقاله الگوریتم روشی بیان شده که می‌توان به کمک آن پراکنش‌های مکانی بارش و دما در آینده را تهیه کرد. برای پیش‌بینی پراکنش‌های مکانی دما و بارش در آینده نیاز به یک مدل پیش‌بینی‌کننده متغیرهای آب‌وهوایی است که در این مقاله از داده‌های مدل اقلیمی منطقه‌ای PRECIS استفاده شده است. خروجی داده‌های مدل PRECIS با قدرت تفکیک ۵۰×۵۰ کیلومتر بر اساس سناریوی B2 از سری سناریوی SERS و برای سال‌های ۲۰۷۱ تا ۲۱۰۰ است. نتایج پراکنش‌های مکانی دما در حوضه نشان می‌دهد که دما در تمامی حوضه آبریز رودخانه قره‌سو نسبت به دوره پایه بین ۲ تا ۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد و همچنین نتایج پراکنش‌های مکانی بارش در حوضه به‌دلیل افزایش و کاهش در ماه‌های مختلف سال روند خاصی را نسبت به

دوره پایه نشان نمی‌دهد. فدریکو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۸) سازوکار دینامیکی بارش‌های سنگین روزانه چلبریا (جنوب ایتالیا) را با استفاده از داده‌های شبکه‌بندی‌شده RAMS ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ و ۹۲۵ هکتوپاسکال مطالعه کردند. نتایج حاصل از روش تحلیل مؤلفه اصلی و تحلیل خوشه‌ای نشان داد که ارتباط روشنی بین هر الگوی گردشی با گروه‌های بارشی وجود دارد.

چن<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی رخداد بارش‌های سنگین (بیش از ۳۷۹ میلی‌متر) در جنوب غرب تایوان پرداختند. این رخدادها با چرخندهای کوچک‌تر از ابعاد همدید همراه بودند. ایشان از داده‌های ECMWF، تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های راداری و داده‌های بارش سنگین استفاده کردند. بررسی ایشان نشان داد که چرخندهای کوچک‌تر از ابعاد همدید در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال که از یک مرکز کم‌فشار و یک تاوه تشکیل شده باشند، همراه با یک موج کوتاه در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال که در جانب منطقه‌ی چینش باد بر فراز تبت شرقی قرار گرفته باشد، موجب ریزش بارش سنگین می‌شوند. متئو و همکاران (۲۰۰۸) رخداد بارش سنگین و توفان ۱۳ سپتامبر ۲۰۰۶ کاتالونیا را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و راداری و داده‌های رادیوسنجی خودکار ایستگاه‌های هواشناسی کاتالونیا مطالعه کردند. بررسی ایشان نشان داد که عبور خط توفان از ناحیه‌ی ساحلی کاتالونیا (شمال شرق اسپانیا) عامل رخداد بارش سنگین و وقوع توفان‌ها در این منطقه بوده است.

مولر<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۹) الگوهای گردشی پدیدآورنده بارش‌های سنگین و فراگیر اروپای مرکزی را بررسی کردند. ایشان بارش‌های مربوط به ۱۴ سیل تابستانی مهم در دوره‌ی ۱۹۵۰ تا ۲۰۰۳ را به‌عنوان رخدادهای مرجع برگزیدند و نشان دادند که الگوی همدید می‌تواند شرایط دینامیک و ترمودینامیک رویدادها را نمایندگی کنند. نتایج این پژوهش نشان داد که این شیوه در مناطقی که بارش آن‌ها ارتباط چشمگیری با الگوهای همدید دارد نیز قابل اجراست و می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای شناسایی رویدادهای بارشی بسیار شدید که در آینده ممکن است رخ دهند به کار گرفته شود. کوتس<sup>۴</sup> (۲۰۱۰) به بررسی روند تغییرهای بارش سالانه بارش‌های سنگین و دما در حوضه آبی تاهو در آمریکا و ارتباط این روند با تغییرهای اقلیمی منطقه با کمک آزمون من‌کندل پرداخت. نتیجه این پژوهش چندین رخداد را طی دوره ۵۰ ساله اخیر مشخص نمود. اولاً فراوانی روزهای بارش سنگین در منطقه افزایش پیدا کرده است. دوما نسبت بارش باران به برف به‌صورت چشمگیری افزایش داشته است.

چنگ<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۳) برای پیش‌بینی روند سیلاب‌های شدید در حوضه آبخیز شمین در تایوان از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS استفاده کردند و با استفاده از داده‌های سه سیلاب خطرناک با دوره‌های بازگشت ۱ تا ۹۰ ساله رواناب حاصل از بارش‌های سیل‌آسا را در مدل HEC-HMS شبیه‌سازی کردند. آن‌ها با توجه به رضایت‌بخش بودن یافته‌ها به این نتیجه رسیدند که مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS قادر به پیش‌بینی سیلاب است. سمپات<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۵) شبیه‌سازی رواناب در رودخانه دورا اوپا در سریلانکا را با استفاده از روش انحرافات درون حوضه‌ای بارش و رواناب انجام دادند. ایشان برای نمونه‌برداری از داده‌های ثبت‌شده رواناب در زیر حوضه‌های انحرافی از مخازن

1 Federico

2 Chen

3 Moller

4 Cauts

5 Cheng

6 Sampat

ذخیره‌های استفاده کردند و مدل HEC-HMS را توسعه دادند. مدل ایشان بیانگر آن بود که میزان رواناب سطح حوضه و تغییرهای آن، وابستگی زیادی به بارش درون حوضه دارد. اثرات تغییر اقلیم و اقدامات انسانی بر رواناب حوضه لوان در دوره زمانی ۲۰۰۰-۱۹۵۶ توسط وانگ و همکاران (۲۰۱۶) مطالعه شد. نتایج نشان داد جریان رودخانه در مقیاس سالانه و فصلی روند نزولی دارد که در سال ۱۹۷۹ افت ناگهانی داشته است. شامیر<sup>۱</sup> (۲۰۱۷) پژوهشی در رابطه با استفاده از پیش‌بینی‌های جریان فصلی در مدیریت منابع آب یکی از حوضه‌های آبریز آریزونا که با محدودیت ذخیره آبخوان مواجه بود انجام داد. او با استفاده از شاخص‌های نوسان جنوبی و همچنین مدل پیش‌بینی فصلی اقلیمی Cfs پیش‌بینی پارامترهای هواشناسی را تا ۴ ماه آینده مورد بررسی قرار داد. نتایج این پژوهش نشان داد که با به‌کارگیری نتایج پیش‌بینی در مدیریت و بهره‌برداری از مخازن آب زیرزمینی باعث می‌شود تا در منطقه مورد مطالعه از شدت افت سطح آب زیرزمینی کاسته شود.

احمد (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای به بررسی الگوهای سینوپتیکی مرتبط با بارش سنگین در ۵ منطقه مختلف عربستان می‌پردازد. در پژوهش ایشان الگوهای سینوپتیکی مختلف برای بارش سنگین با استفاده از یک نقشه مبتنی بر همبستگی برای ۱۰۰۰ هکتوپاسگال برای دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ به‌دست آمد. نتایج این پژوهش بیانگر آن بود که شش ویژگی اصلی سیستم‌های سینوپتیکی بر مقدار کل بارش تأثیرگذار هستند. 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 می‌گیرد.

## داده‌ها و روش‌ها

در ابتدا، ویژگی‌های آماری بارش دو موج بارشی ۵ و ۱۲ فروردین مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های بارش این دو موج بارشی سنگین با استفاده از داده‌های روزانه دو ایستگاه سینوپتیک دورود و بروجرد مورد بررسی قرار گرفت. این بررسی هم به‌صورت روزانه از روز یک ۱ تا ۳۱ فروردین ۱۳۹۸ براساس مقادیر بارش ثبت‌شده دو ایستگاه دورود بروجرد، انجام گرفت. این بارش‌ها با بارش متوسط ۲۰ ساله ماه فروردین دو ایستگاه دورود و بروجرد و نیز با بارش متوسط سالانه دو ایستگاه یادشده مقایسه شد.

شرایط سینوپتیکی مولد این بارش‌ها با استفاده از داده‌های ترازهای میانی و فوقانی جو داده‌های پایگاه NOAA مورد بررسی قرار گرفت. برای تحلیل سینوپتیکی در این پژوهش، از آنجا که ابتدا دو رخداد بارش سنگین انتخاب شده بودند و سپس اقدام به تحلیل شرایط سینوپتیکی آن‌ها می‌شود، بنابراین از رویکرد محیطی به‌گردشی استفاده شده است. ابتدا الگوهای ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ میلی‌بار (HGT)، برای دیدبانی ساعت ۰۶ UTC برای دو روز یادشده یعنی ۵ و ۱۲ فروردین ۱۳۹۸، با استفاده از داده‌های روزانه پایگاه اقلیمی NOAA تحلیل شد. به موازت بررسی وضعیت ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ میلی‌بار، فشار سطح زمین نیز به‌عنوان ساختار سینوپتیکی سطح زمین با استفاده از داده‌های SLP همین پایگاه بررسی شد. وضعیت حرکت عمودی جو در تراز سطح ۸۵۰ میلی‌بار، نیز با استفاده از شاخص OMEGA به‌صورت نمودار هاف مولر زمانی (از روز ۳ فروردین تا ۱۴ فروردین) و نقشه‌های توزیع فضایی

OMEGA بررسی شد تا این بخش مکانیسم‌های سینوپتیکی منجر به صعود هوا، بررسی شده بود. اما برای تحلیل الگوی تزریق رطوبتی مؤلفه رطوبت ویژه (Shum)، در ارتباط با مؤلفه بادماری و نصف‌النهاری (Uwnd-Vwnd)، در تراز ۸۵۰ میلی‌باری برای دو روز یادشده تحلیل شد تا به این صورت جریان وزرش رطوبتی و الگوی تزریق رطوبتی این بارش‌ها نیز آشکار گردد.

ساختار ترمودینامیکی جو در دو روز رخداد بارش سنگین، با استفاده از مؤلفه‌های نمودار قائم جو (Skew-T)، شامل دو شاخص ناپایداری L و K، برای موقعیت ایستگاه کرمانشاه (ایستگاه جو بالای نزدیک منطقه) مورد بررسی قرار گرفت. شاخص K معرف احتمال وقوع توفان به صورت تابعی برحسب آهنگ کاهش قائم دما بین ترازهای ۸۵۰ و ۵۰۰ میلی‌بار (T850-T500)، محتوی رطوبت برحسب دمای نقطه شبنم در تراز ۸۵۰ میلی‌بار (Td850) و عمق لایه مرطوب در تراز ۷۰۰ میلی‌بار (T700-Td700) بوده که در رابطه ۱ نشان داده شده است. مقادیر کوچک جمله سوم این شاخص نشان از همرفت عمیق در تراز ۷۰۰ میلی‌بار است. چنانچه رطوبت فراوانی در تراز ۷۰۰ میلی‌بار وجود نداشته باشد و محیط در این تراز خشک باشد، بسته هوا از ترازهای زیرین به سمت بالا با شدت بیشتری حرکت کند. مقادیر عددی بزرگ این شاخص بر فعالیت شدید توده هوا دلالت دارد که به شدت به رطوبت در تراز ۸۵۰ میلی‌بار وابسته است.

رابطه ۱- شاخص ناپایداری K

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

جدول ۱: آستانه‌های شاخص KI (قوبدل، ۱۳۹۰)

آستانه مقادیر	احتمال وقوع توفان
۱۵-۰	صفر درصد
۲۰-۱۵	٪۲۰
۲۵-۲۱	٪۲۰ تا ٪۴۰
۳۰-۲۶	٪۴۰ تا ٪۶۰
۳۵-۳۱	٪۶۰ تا ٪۸۰
۴۰-۳۶	٪۸۰ تا ٪۹۰
>۴۰	٪۱۰۰

شاخص ناپایداری L: در نمودار اسکیوتی، از LCL (محل تلاقی خطوط افتاهنگ ادیاباتیکی خشک و بی دررو و نسبت) ارتفاع ۵۰۰ متری زمین به موازات افتاهنگ بی دررو اشباع خطی ترسیم می‌شود تا در نقطه‌ای بنا م D، خط فشار ۵۰۰ میلی‌بار را قطع کند. شاخص بالاروی براساس معادله زیر مورد محاسبه قرار می‌گیرد:

رابطه ۲- شاخص LI:

$$KI = T500 - Td$$

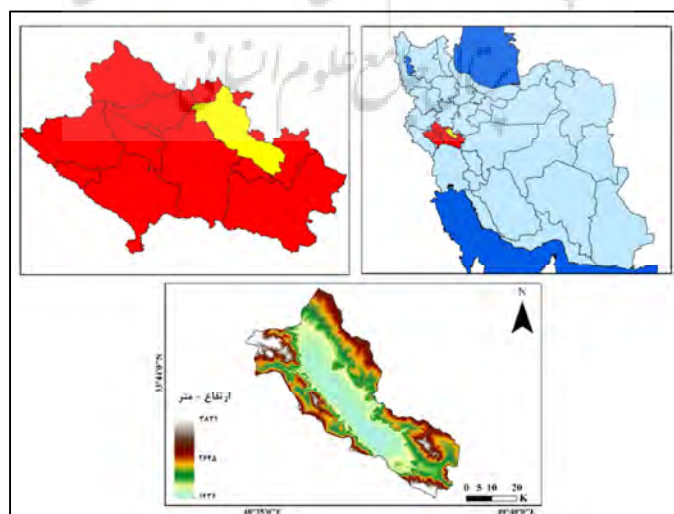
در رابطه بالا Td دمای نقطه D برحسب درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

جدول ۲: آستانه‌های شاخص LI (قویدل، ۱۳۹۰)

وضعیت	شاخص LI
احتمال وقوع رگبارهای باران و برف	بین ۰ تا ۲-
احتمال وقوع طوفان	بین ۲- تا ۵-
احتمال وقوع طوفان شدید	بین ۵- تا ۶-
احتمال وقوع تورنادو	کمتر از ۶-

## موقعیت منطقه

منطقه مورد مطالعه این پژوهش، حوضه آبریز دورود بروجرد در استان لرستان است (شکل ۱). این حوضه آبریز یکی از زیر حوضه‌های حوضه آبریز کارون بزرگ است. زیر حوضه دورود-بروجرد با وسعت نسبتاً زیاد به میزان ۲۵۴۶ کیلومترمربع در شمالی‌ترین قسمت حوضه آبریز کارون بزرگ و در جنوب محدوده مطالعاتی اشترینان واقع شده است که از لحاظ مدیریتی زیر مجموعه شرکت منابع آب استان لرستان است. ۵۶۶ کیلومترمربع از وسعت این حوضه را دشت و ۱۹۹۷ کیلومترمربع از وسعت محدوده را ارتفاعات تشکیل می‌دهند. به علت ورود جریان‌های سطحی به این محدوده و همچنین وجود بارندگی کافی و برف‌گیر بودن ارتفاعات این محدوده، آبراهه‌های واقع در آن دائمی بوده و زهکش اصلی این محدوده را رودخانه‌های سیلاخور، ماربره و رودخانه تیره تشکیل می‌دهند. کمترین ارتفاع محدوده ۱۴۳۷ متر، مربوط به بخش‌های خروجی حوضه و بیشترین ارتفاع محدوده ۴۰۱۵ متر از سطح دریا، مربوط به جنوب شرقی محدوده می‌باشد. در خصوص رودخانه‌هایی که به این محدوده وارد شده و جریان می‌یابند، می‌توان به رودخانه سیلاخور که از مخلوط‌کنی‌های کوه گرین در ۲۸ کیلومتری شمال غرب بروجرد سرچشمه می‌گیرد اشاره داشت. رودخانه یادشده در امتداد شمال شرق به جنوب غرب جریان یافته تا به جنوب بروجرد می‌رسد.

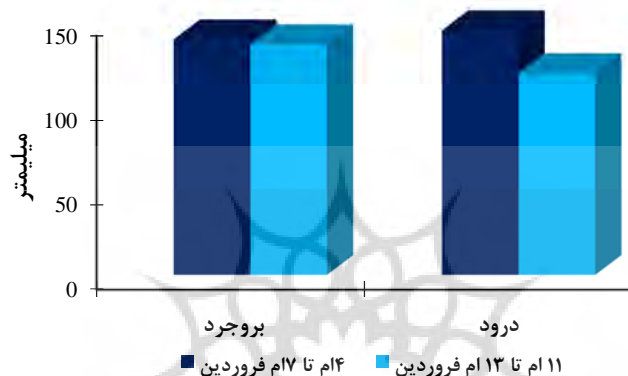


شکل ۱: موقعیت منطقه مطالعاتی حوضه دورود و بروجرد



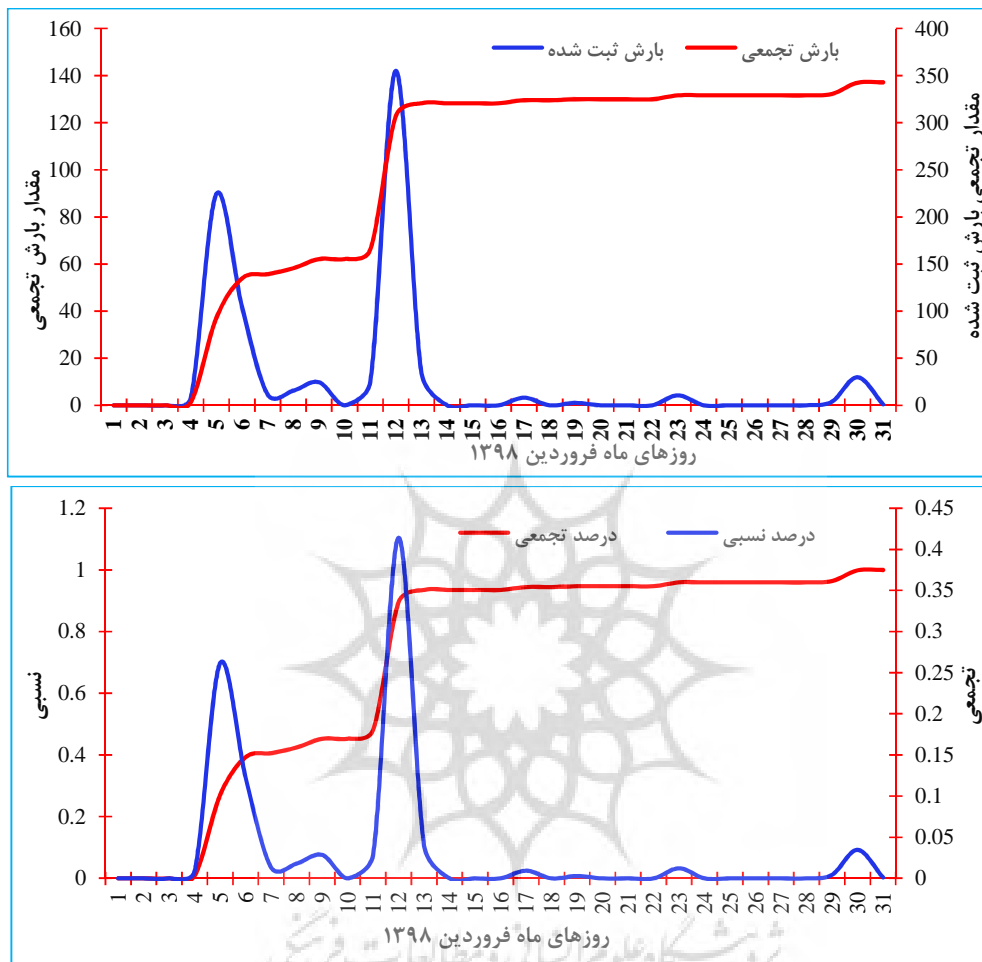
## یافته‌های پژوهش

در شکل ۲ مقدار تجمعی بارش طی دو موج بارشی فروردین ۱۳۹۸ ارائه شده است. در موج بارشی ۴ تا ۷ فروردین ماه، ایستگاه درود ۱۴۴/۶ میلی‌متر و ایستگاه بروجرد ۱۳۹/۳ میلی‌متر بارش دریافت کرده‌اند، در حالی که در موج دوم بارشی ۱۱ تا ۱۳ فروردین ۱۳۹۸ ایستگاه درود ۱۱۹/۴ میلی‌متر و بروجرد ۱۳۶/۴ میلی‌متر بارش دریافت کرده‌اند.



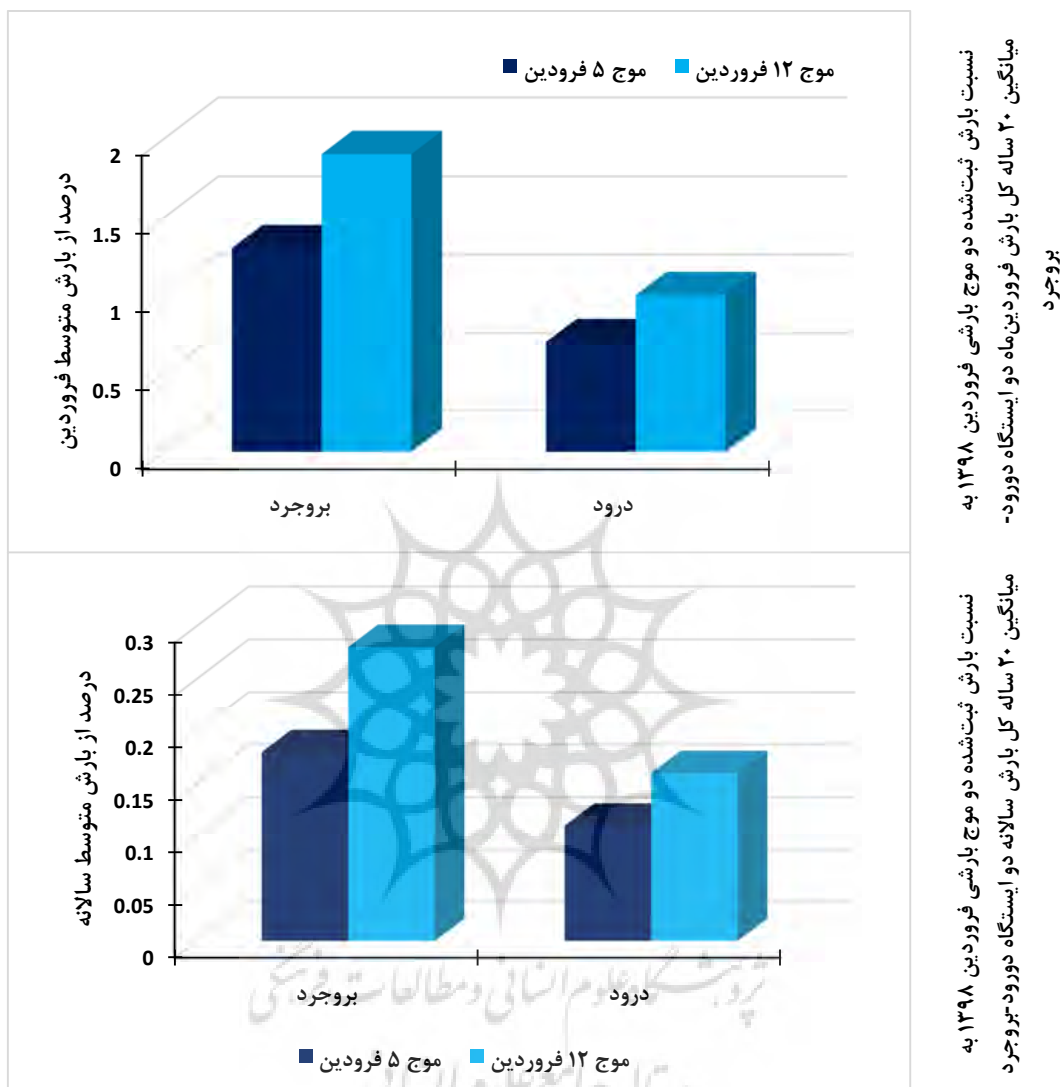
شکل ۲: میزان بارش ایستگاه‌های بروجرد و درود طی موج بارشی فروردین ۱۳۹۸

همان‌طور که در این اشکال مشاهده می‌گردد، دو پیک بارشی در روزهای ۵ فروردین با بارش ۸۹/۷ میلی‌متر و روز ۱۲ فروردین با بارش ۱۴۲ میلی‌متر ثبت شده است. نمودار تجمعی بارش نشان‌دهنده آن است که از روز ۱ تا ۶ فروردین ۰/۴۰ از کل بارش ثبت‌شده همه ماه فروردین ۱۳۹۸ (میانگین دو ایستگاه دورود و بروجرد) که برابر ۱۳۵ میلی‌متر بوده است، ثبت شده است. یک جهش دیگر در بارش این دو ایستگاه در روز ۱۲ فروردین ثبت شده است. در این روز به‌تنهایی ۰/۴۱ از کل بارش ثبت‌شده ماه فروردین ۱۳۹۸، ثبت شده است. نمودار تجمعی روزانه بارش نشان می‌دهد که ۹۳ از کل بارش ثبت‌شده ماه فروردین این دو ایستگاه تا روز ۱۳ فروردین ثبت شده است و از ۱۳ فروردین تا ۳۱ فروردین تنها ۷ درصد از کل بارش ماه باریده است. در موج بارشی ۵ فروردین به‌تنهایی ۲۶ درصد از کل بارش ماه فروردین ثبت شده است و در موج بارشی ۱۲ فروردین ۴۱ درصد از کل بارش ماه فروردین ثبت شده است.



شکل ۳: مقایسه مقادیر بارش ثبت شده و تجمعی روزانه دو ایستگاه دورود و بروجرد در فروردین ۱۳۹۸

مقدار مطلق بارش ثبت شده به خودی خود شاید زیاد گویا نباشد؛ اما زمانی که مقدار بارش ثبت شده این دو موج بارشی با بارش های میانگین بلندمدت سالانه و فروردین ماه سال های قبل مقایسه شود، میزان بزرگی این بارش ها به نوعی آشکارتر خواهد شد. همان طور که در شکل ۴ دیده می شود، در ایستگاه بروجرد بارش ثبت شده روز ۵ فروردین ۱۳۰ درصد مجموع بارش متوسط ماه فروردین و ۱۸ درصد مجموع بارش متوسط سالانه این ایستگاه بود و در ایستگاه دورود نیز بارش این روز ۷۰ درصد مجموع بارش متوسط ماه فروردین و ۱۱ درصد مجموع بارش متوسط سالانه بود. اما بارش ثبت شده در روز ۱۲ فروردین در ایستگاه بروجرد، ۱۹۰ درصد مجموع بارش متوسط ماه فروردین ۲۸ درصد مجموع بارش متوسط سالانه این ایستگاه بود. اما در ایستگاه دورود این بارش ۱۰۰ درصد مجموع بارش متوسط ماه فروردین و ۱۶ درصد مجموع بارش متوسط سالانه این ایستگاه بوده است.

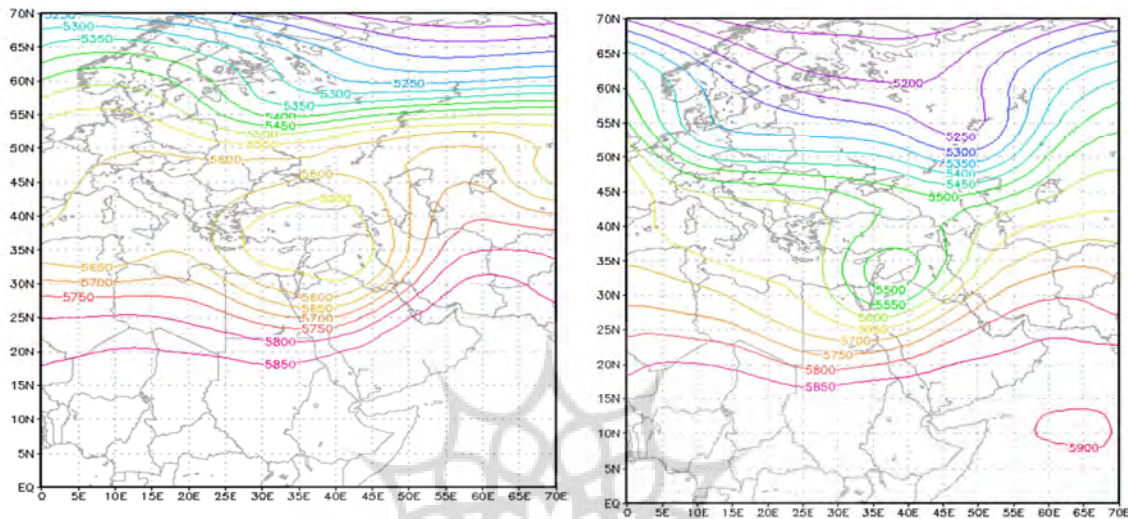


شکل ۴: مقایسه نسبت بارش ثبت شده ایستگاه‌های سینوپتیک دورود و بروجرد طی دو موج بارشی منجر به سیل فروردین ۱۳۹۸

#### تحلیل الگوهای سینوپتیکی منجر به بارش سنگین فروردین ۱۳۹۸

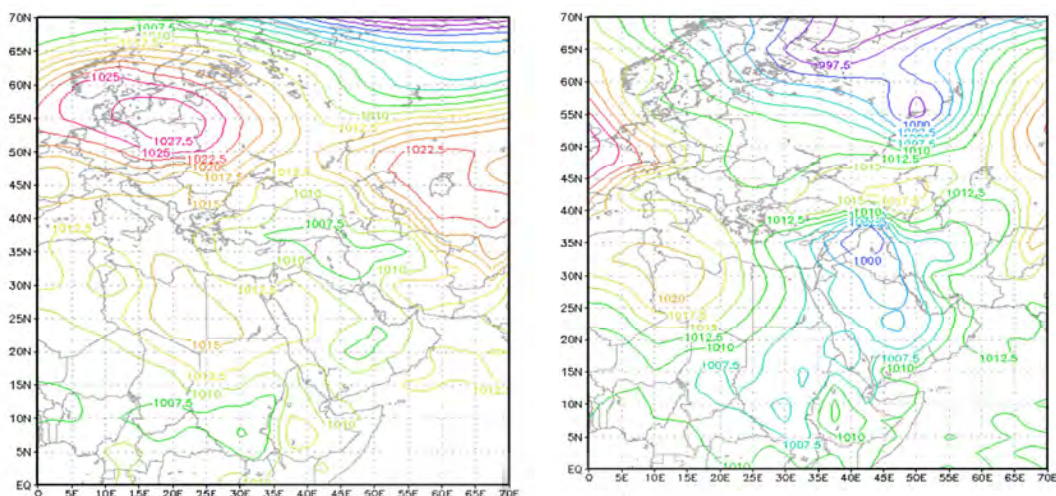
بعد از توصیف و تبیین بزرگی بارش رخ داده در دو موج یادشده در استان لرستان، سیستم‌های جوی مولد این بارش-ها نیز برای یک روز قبل از بارش و روز بارش مورد بررسی قرار گرفته است. در این بخش شرایط جوی روزهای بارشی، برای آگاهی از سیستم بارش‌زای مولد این بارش‌های ابرسنگین، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در تراز ۵۰۰ میلی‌بار که تراز اصلی مشاهده سیستم‌های مولد پدیده‌های اصلی جو است، (شکل ۵) مشاهده می‌شود که در هر دو موج بارشی یک هسته بسیار قوی کم ارتفاع با ارتفاع مرکزی ۵۵۵۰ ژئوپتانسیل متر بر روی شرق دریای مدیترانه بسته شده است

و بخش غربی ایران در بخش جلویی یک ناوه بسیار عمیق قرار گرفته است که گویای حاکمیت یک سیستم سیکلونی بسیار شدید در غرب ایران است.



شکل ۵: نقشه ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ میلی‌بار روز ۵ فروردین (سمت راست) نقشه ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ میلی‌بار روز ۱۲ فروردین (سمت چپ)

در نقشه‌های فشار تراز دریا مشاهده شد که سیستم مولد بارش ابر سنگین غرب کشور در دو موج بارشی ۵ و ۱۲ فروردین، در واقع یک مرکز فعال سیکلونی (کم ارتفاع) است که در شرق دریای مدیترانه قرار گرفته است و شرایط سیکلونی بسیار حادی را بر غرب ایران حاکم کرده است. اما سیستم تزریق رطوبت این سیستم سیکلونی شدید که در واقع مولد این بارش سنگین بوده است، در این دو روز همان‌طور که مشاهده می‌شود دو منبع اصلی رطوبت تأمین شارژکننده اصلی رطوبت این بارش سنگین بوده است. 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 تزریق شده است (شکل ۶).



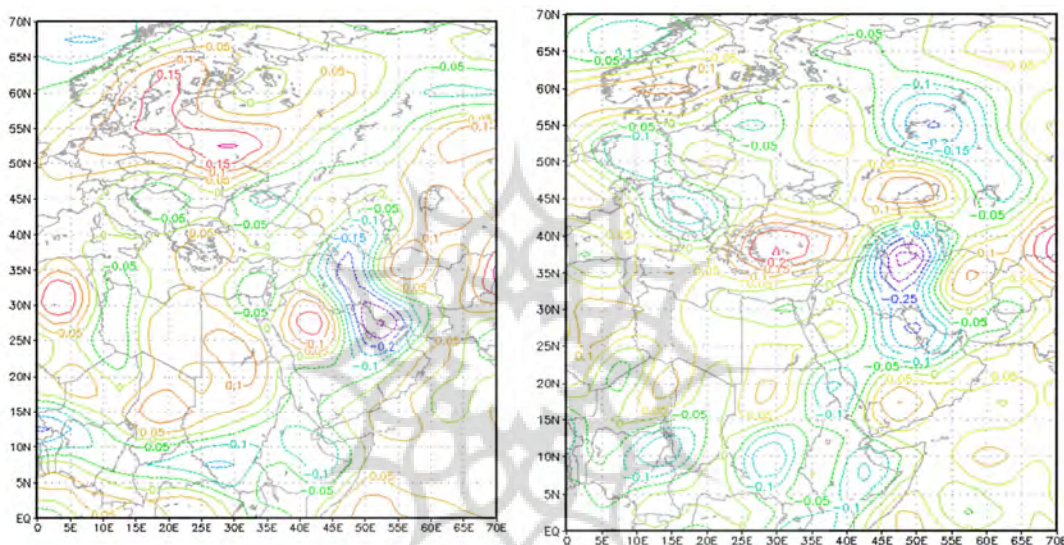
شکل ۶: نقشه فشار تراز دریا روز ۵ فروردین (سمت راست) نقشه فشار تراز دریا روز ۱۲ فروردین (سمت چپ)

یکی دیگر از پارامترهای سینوپتیکی مورد بررسی برای آشکارسازی بارش‌های سنگین فروردین‌ماه، شاخص امگای تراز ۸۵۰ میلی‌بار است که در نمودار هاف مولر شکل ۷ مقدار این شاخص برای موقعیت ایستگاه بروجرد (براساس شبکه‌بندی‌های ۰/۵ درجه قوسی داده‌های پایگاه NOAA) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، مقدار شاخص امگای تراز ۸۵۰، حرکات قائم هوا در تراز یادشده را نشان می‌دهد. در روز ۵ فروردین به مقدار منفی بحرانی (۰/۲۱- پاسکال بر ثانیه) و در روز ۱۲ فروردین نیز به مقدار منفی بحرانی (۰/۲۳- پاسکال بر ثانیه) رسیده است. این مقادیر حدی شاخص امگا در این دو روز که توأم با سنگین‌ترین بارش‌های فروردین‌ماه در ایستگاه بروجرد است، بیانگر آن است که در موقعیت این ایستگاه، در دو روز یادشده در تراز ۸۵۰ میلی‌بار، صعود شدید و ناپایداری قوی برقرار بوده است.



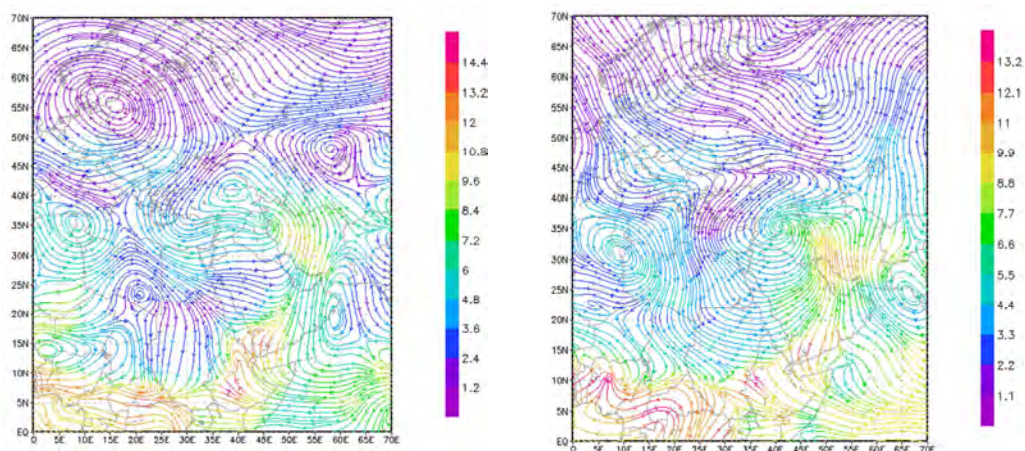
شکل ۷: نمودار هاف مولر شاخص ناپایداری امگای تراز ۸۵۰ میلی‌بار طی ۴ فروردین تا ۱۳ فروردین ۱۳۹۸

نقشه امگای تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در روز ۵ و ۱۲ فروردین ناپایداری را در بخش‌های غربی فرود ایجاد شده در نقشه سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال دو روز یاد شده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نقشه امگا از فرود ایجاد شده تبعیت می‌کند، به طوری که نوار غربی ایران و شمال خلیج فارس یک هسته صعود تشکیل شده که دلیلی بر وجود ناپایداری در بخش‌های غربی کشور است، به طوری که در تمامی نواحی غرب ایران هسته‌های صعود هوا استقرار یافته این هسته‌های صعود وجود ناپایداری شدید را در روز ۵ و ۱۲ فروردین در منطقه مورد مطالعه تأیید می‌کند (شکل ۸).



شکل ۸: نقشه امگا تراز ۸۵۰ میلی‌بار روز ۵ فروردین (سمت راست) نقشه امگا تراز ۸۵۰ میلی‌بار روز ۱۲ فروردین (سمت چپ)

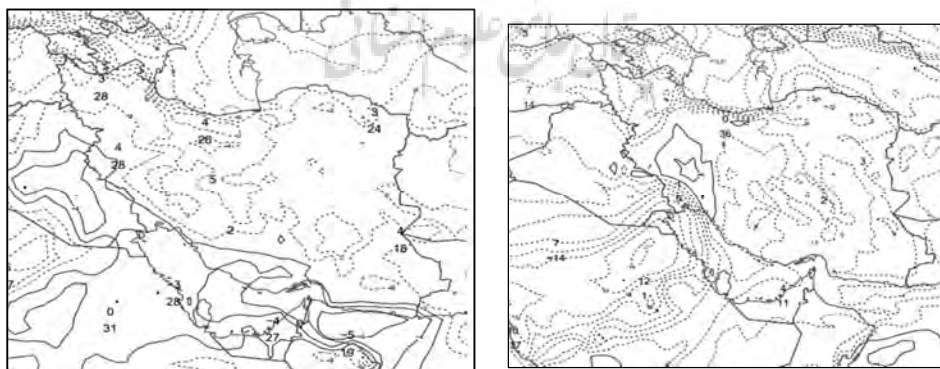
شکل ۹ وزش رطوبت تراز ۸۵۰ میلی‌بار را برای دو روز ۵ و ۱۲ فروردین ۱۳۹۸ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، استقرار یک آنتی سیکلون بر روی خلیج عدن دیده می‌شود که با حرکت آنتی سیکلونی خود رطوبت دریای عمان، دریای سرخ و خلیج فارس را به مناطق جنوب غرب و غرب ایران تزریق کرده، وجود چرخندگی مثبت واقع در شمال دریای سرخ و دریای مدیترانه با حرکت پادساعت‌گرد رطوبت دریای سرخ و خلیج فارس را به غرب ایران انتقال داده که به موازات حرکت شرق‌سوی چرخندها و واچرخندها، زبانه‌های مرطوب نیز به سمت ایران منتقل می‌کند. بنابراین تزریق رطوبت در منطقه مورد مطالعه با تعامل دو سیستم سیکلونی و آنتی سیکلونی مشاهده شده در شکل ۹ صورت گرفته است و منبع تأمین رطوبت نیز به ترتیب دریای مدیترانه، دریای سرخ و خلیج فارس بوده است که رطوبت را در سطح منطقه به ۱۱ تا ۱۳ گرم در کیلوگرم هوای خشک رسانده است.



شکل ۹: نقشه وزش رطوبتی روز ۵ فروردین (سمت راست) نقشه وزش رطوبتی روز ۱۲ فروردین (سمت چپ)

#### تحلیل ترمودینامیکی و شاخص‌های ناپایداری

برای بررسی وضعیت ترمودینامیکی هوا در منطقه مورد مطالعه، از دو شاخص ناپایداری  $K$  index و  $Lifted\ index$  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 می‌باشد، بنابراین از نقشه درون‌یابی‌شده شاخص‌های ناپایداری جو بالا که از محصولات پایگاه اتمسفری دانشگاه ایومینگ می‌باشد، استفاده شده است. همان‌طور که در نقشه‌های مربوط به روزهای ۵ و ۱۲ فروردین ۱۳۹۸ مشاهده می‌گردد، در روز ۵ فروردین منحنی مربوط به شاخص ناپایداری  $K$  در منطقه برابر ۲۸ بوده است که نشان‌دهنده میزان ناپایداری بیش از ۵۰ درصد در منطقه است. در حالی که در روز ۱۲ فروردین مقدار این شاخص برای منطقه برابر ۳۶ بوده است که نشان‌دهنده بالاتر بودن میزان ناپایداری (بیش از ۶۵ درصد) بوده است. شاخص  $L$  نیز همان‌طور که در نقشه مشاهده می‌گردد، (خطوط پر در نقشه) در روز ۵ و ۱۲ فروردین منحنی ۲- به‌طور نسبی منطقه را در برگرفته است که نشان‌دهنده ناپایداری نسبی در منطقه است. (شکل ۱۰).

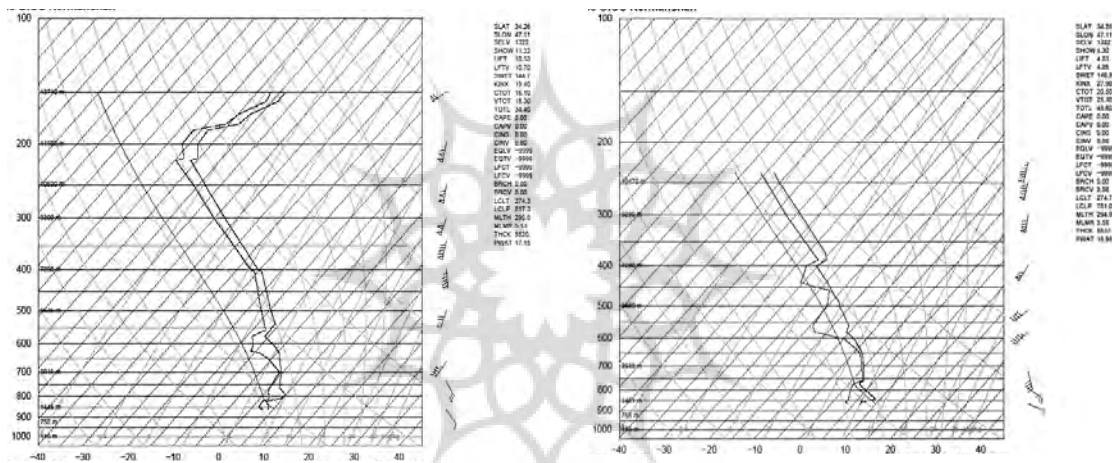


روز ۲۵ مارس ۲۰۱۹ (۵ فروردین ۱۳۹۸)

روز ۱ آوریل ۲۰۱۹ (۱۲ فروردین ۱۳۹۹)

شکل ۱۰: شاخص‌های ناپایداری  $k$  index و  $Lifted\ index$  برای منطقه مطالعاتی (خطوط نقطه چین شاخص  $k$  را نشان می‌دهند و خطوط پر شاخص ناپایداری  $L$  را نشان می‌دهند)

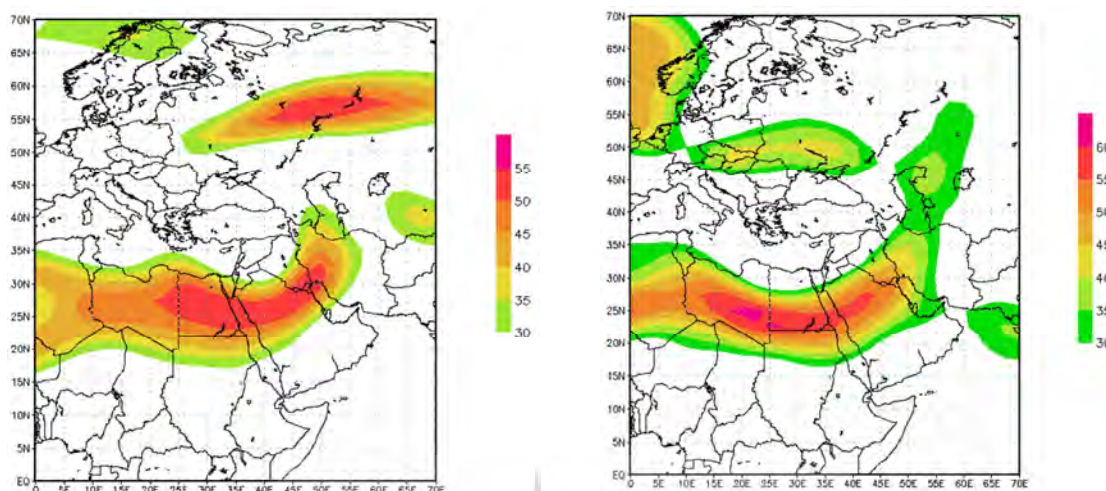
در شکل ۱۱، نموداری های ترمودینامیکی مربوط به رادیوسوند برای ایستگاه جو بالای اهواز (به دلیل نزدیکی به پلدختر) ارایه شده است. همان طور که مشاهده می گردد، دو منحنی دما و دمای نقطه شبنم در روز ۵ فروردین در موقعیت ایستگاه جو بالای اهواز در تراز ۹۰۰ میلی بار با هم تماس پیدا کرده اند و این ناپایداری به ترازهای بالاتر گسترش پیدا نکرده است. در حالی که در ایستگاه کرمانشاه در همین تاریخ، دو منحنی یادشده در تراز ۷۵۰ میلی بار با هم تماس داشته اند و تا تراز ۶۰۰ میلی بار این دو منحنی بسیار به هم نزدیک بوده اند که بدان معنی است که تا تراز ۶۵۰ میلی باری ناپایداری ادامه داشته است. در روز ۱۲ فروردین همان طور که مشاهده می گردد، در تراز ۹۰۰ میلی بار، دو منحنی دما و دمای نقطه شبنم به هم نزدیک شده و این ناپایداری به ترازهای بالاتر گسترش نداشته است.



شکل ۱۱: نمودار ترمودینامیکی (اسکیوتی) جو بالای ایستگاه کرمانشاه در روزهای ۵ و ۱۲ فروردین ۱۳۹۸

داده های مربوط به رادیوسوند ارسال شده در تاریخ های یادشده (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 میلی بار) از تراز ۴۵۰ میلی بار به بالا بوده است. در همین راستا، نقشه جت استریم یا رودباد منطقه در تراز ۳۰۰ میلی بار به صورت شکل ۱۲ برای ساعت ۱۵/۳۰ دو روز یادشده ترسیم شد. در سطح ۳۰۰ هکتوپاسکال در روز ۵ فروردین ۱۳۹۸ نشان دهنده وجود رودبادی با سرعت ۴۰ تا ۵۰ متر بر ثانیه در سطح منطقه می باشد و در روز ۱۲ فروردین ۱۳۹۸ نیز رودبادی با سرعت ۵۰ تا ۵۵ متر بر ثانیه بوده است.





شکل ۱۲: نقشه رودباد تراز ۳۰۰ میلی‌بار روز ۵ فروردین (سمت راست) نقشه رودباد تراز ۳۰۰ میلی‌بار روز ۱۲ فروردین (سمت چپ)

سیل فروردین ۱۳۹۸ در استان لرستان، از نمونه‌های بارز و تپیک رخداد‌های حدی بارشی بود که می‌توان آن را از مظاهر اصلی افزایش ناهنجاری‌های ناشی از گرمایش جهانی به حساب آورد. از روز ۵ فروردین سال ۱۳۹۸ هم‌زمان با اعلام سازمان هواشناسی مبنی ورود سامانه بارشی مترکم در شمال و غرب ایران، بر اثر بارندگی‌های شدید در شهرهای استان لرستان از جمله خرم‌آباد، معمولان، کوه‌دشت، پلدختر، نورآباد، ویسیان و دورود، رواناب‌های گسترده-ای هم به صورت بالا آمدن سطح آب رودخانه‌ها و هم به صورت ایجاد رواناب آزاد، ایجاد شد. این سامانه بارشی در دو موج در تاریخ‌های ۵ تا ۷ فروردین و نیز موج دوم از ۱۱ تا ۱۳ فروردین موجب ایجاد سیلاب و خسارت در شهرستان‌های استان لرستان شد. در موج دوم بارش‌ها نیز خسارت‌هایی همچون رانش زمین و به زیر آب رفتن بخش‌هایی از دورود، خرم‌آباد، معمولان و پلدختر گزارش شد. ابعاد خسارت‌بار این سیل بسیار وسیع و گسترده بود، براساس برآورد اولیه بنیاد مسکن استان لرستان، بین ۷ تا ۸ هزار واحد مسکونی، بر اثر سیل خسارت اساسی دیده‌اند و علاوه بر آن به ۷۲۰۰۰ واحد مسکونی خسارت متوسط تا کم وارد کرده‌است و تعداد ۴۹ روستا نیز در لرستان دچار رانش شده‌اند. در زمینه کشاورزی، حدود ۳۰ هزار هکتار از ۸۵۰ هزار هکتار اراضی کشاورزی از بین رفتند و به ۱۵۰ مزرعه پرورش ماهی در این استان خسارت وارد شد (سازمان جهاد کشاورزی استان لرستان، ۱۳۹۸) و بیش از ۱۵ هزار رأس دام عشایر در جریان سیل تلف شد (سازمان امور عشایر ایران، ۱۳۹۸). به لحاظ نتایج تحلیل آماری نشان داد که رخداد بارشی فروردین ۱۳۹۸، از جمله بارش‌های سنگینی بوده که در موج اول (۵ فروردین) ۱۵ درصد از کل بارش سال و در موج دوم (۱۲ فروردین) ۲۰ درصد از کل بارش متوسط سالانه منطقه، ثبت شده است. تحلیل الگوهای سینوپتیکی این رخداد‌های بارش سنگین نشان داد که الگوی سینوپتیک مشابهی مولد این دو موج بارش سنگین در منطقه بوده است. در هر دو روز وجود یک ناوه عمیق با یک هسته بسته‌شده با ارتفاع ۵۵۰۰ و ۵۵۵۰ ژئوپتانسیل متر در سطح ۵۰۰ میلی‌بار، بر روی شرق دریای مدیترانه و قرارگیری غرب ایران در بخش جلویی این ناوه بسیار عمیق شرایط صعود و ورود سیستم‌های کم‌فشار را برای غرب کشور به‌وضوح فراهم کرده بود. یکی از مهم‌ترین کاراکترهای سینوپتیکی در این دو روز بارش سنگین منجر به سیل، وجود شاخص امگای منفی قوی بود. در هر دو

روز شاخص امگای تراز ۸۵۰ میلی‌بار، به‌صورت معنی‌داری به مقدار حدی (۰,۲-) رسیده بود. از لحاظ تأمین رطوبت بارش‌های این دو روز، نتایج نشان داد که در سطح ۸۵۰ میلی‌بار، تزریق رطوبت در منطقه مورد مطالعه با تعامل دو سیستم سیکلونی (در شرق دریای مدیترانه) و آنتی سیکلونی (روی خلیج عدن) صورت گرفته است و منبع تأمین رطوبت نیز به ترتیب دریای مدیترانه، دریای سرخ و خلیج فارس بوده است که رطوبت را در سطح منطقه به ۱۱ تا ۱۳ گرم در کیلوگرم هوای خشک رسانده است.

از آنجا که این پژوهش در پی تعمیم الگو نبوده و صرفاً یک بارش سنگین را بررسی کرده است، بنابراین الگوی سینوپتیکی به دست آمده برای این دو بارش سنگین را نمی‌توان تعمیم داد. اما در پژوهش‌های مشابهی که عموماً با هدف الگویابی انجام گرفته است، تا حدود زیادی با نتایج این بخش از پژوهش مشابهت داشته است. قاسمی فر و همکاران (۱۳۹۶)، اقدام به پژوهش در مورد الگویابی بارش‌های سنگین منجر به سیل غرب ایران در طی یک دوره ۱۵ ساله (۲۰۰۰-۲۰۱۵)، با استفاده از مدل‌های آماری چندمتغیره، به این نتیجه رسیدند که در بین الگوهای منفرد رخداد هر کدام از این بارش‌های سیل‌آسا، یک الگو وجود دارد که ۹۹ درصد از کل واریانس الگوهای منفرد را می‌تواند تبیین کند و در این الگوی ۹۹ درصدی، حاکمیت امگای منفی شدید در تراز ۱۰۰۰ تا ۲۰۰ میلی‌بار، (با هسته بیشینه ۰,۳- پاسکال بر ثانیه) بر روی غرب ایران قرار داشته است که در این پژوهش نیز این کاراکتر مهم مشاهده شد. مشخصه بارز دیگر این الگوی ۹۹ درصدی که در این پژوهش نیز مشاهده شد، وجود یک ترفاق قوی در سطح ۵۰۰ میلی‌بار و قرارگیری غرب ایران در جلوی این ترفاق عمیق بوده است. وجود رودباد در تراز ۲۰۰ میلی‌بار، نیز از مشابهت یافته‌های این پژوهش با این الگوی مولد ۹۹ درصدی آشکار شده در پژوهش قاسمی فر و همکاران بود. اما اختلاف عمده‌ای که در یافته‌های این پژوهش با الگوی مولد ۹۹ درصدی بارش‌های سیل‌خیز غرب کشور که در پژوهش قاسمی فر و همکاران (۱۳۹۶) دیده شد، مربوط به منبع تزریق رطوبت بود. در این پژوهش مشاهده شد که تزریق رطوبت در موج بارشی ۵ و ۱۲ فروردین ۱۳۹۸ در منطقه مورد مطالعه، با تعامل دو سیستم سیکلونی و آنتی سیکلونی از منابع متعددی تأمین شده است که شامل دریای مدیترانه، دریای سرخ و خلیج فارس بوده است و رطوبت را در سطح منطقه به ۱۱ تا ۱۳ گرم در کیلوگرم هوای خشک رسانده است. در این پژوهش مشاهده شد که بارش سنگین حادث شده، در نتیجه تعامل دو سیستم هم‌دید بوده است؛ اما چنین نتیجه‌ای در پژوهش‌های دیگری نیز دیده شده است. در پژوهش لشکری و اسفندیاری (۱۴۰۰) که اقدام به بررسی الگوهای هم‌دید و ترمودینامیکی رودخانه‌های جوی منجر به بارش سنگین دوره سرد ایران شده بود، مشاهده گردید که بارش‌های سنگین بخش‌های غرب و جنوب غرب کشور بیشترین اثر پذیری را از الگوی ترکیبی کم‌فشار سودان و مدیترانه داشته است. در پژوهش عساکره و خجسته (۱۴۰۰) نیز دیده شده که بیشترین بارش‌های سنگین شمال غرب ایران ناشی از ترکیب سیکلون-های دو مسیر دریای سرخ و سیاه است.

علاوه بر نقش‌آفرینی ترفاق روی دریای مدیترانه که رطوبت دریای مدیترانه را به منطقه تزریق کرده است، استقرار یک آنتی سیکلون بر روی خلیج عدن نیز با حرکت آنتی سیکلونی خود رطوبت دریای عمان، دریای سرخ و خلیج فارس را به مناطق جنوب غرب و غرب ایران تزریق کرده که در غرب و جنوب غرب ایران تجمیع این منابع رطوبتی منجر به رخداد این حجم از بارش شدند. در حالی که در الگوی مولد ۹۹ درصدی که در پژوهش قاسمی فر و

همکاران استخراج شده بود، عموماً، منبع تزریق رطوبت، دریای مدیترانه و تنها توسط تراف روی مدیترانه انجام گرفته بود. بنابراین به‌طور کلی می‌توان گفت بارش سنگین ثبت‌شده در این دو موج ۵ و ۱۲ فروردین ۱۳۹۸، دارای خصوصیت‌های عمومی بارش‌های سنگین قبلی ایران بوده و از این لحاظ یک نمونه جدید به شمار نمی‌رود؛ اما از لحاظ سیستم تزریق رطوبت متمایز بوده و دو سیستم رطوبت‌رسان یعنی سیکلون روی دریای مدیترانه و آنتی سیکلون روی خلیج عدن و منابع تزریق رطوبت متعددی به‌طور هم‌زمان کار تزریق رطوبت را به آن انجام داده‌اند که این مسئله خود را در حجم بارش‌ها و ابعاد سیل ایجادشده و میزان خسارت‌زایی آن نشان داد.

### نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از تحلیل آماری بیانگر وجود دو رخداد بارشی سنگین در روزهای ۵ و ۱۲ فروردین‌ماه ۱۳۹۸ بوده است. رخداد بارش‌های سنگین یکی از رخدادهای حدی است که در دو دهه اخیر فراوانی آن در کشور افزایش داشته است. رخداد بارشی فروردین ۱۳۹۸، از جمله بارش‌های سنگینی بوده که در موج اول (۵ فروردین) ۱۵ درصد از کل بارش سال و در موج دوم ۲۰ درصد از کل مجموع بارش متوسط سالانه منطقه، در این دو روز ثبت شد. تحلیل الگوهای سینوپتیکی این رخدادهای بارش سنگین نشان داد که الگوی سینوپتیک مشابهی مولد این دو موج بارش سنگین در منطقه بوده است. در هر دو روز وجود یک ناوه عمیق با یک هسته بسته شده با ارتفاع ۵۵۰۰ و ۵۵۵۰ ژئوپتانسیل متر، بر روی شرق دریای مدیترانه بسته شده است و بخش غربی ایران در بخش جلویی یک ناوه بسیار عمیق قرار گرفته است که شرایط صعود و ورود سیستم‌های کم فشار را برای غرب کشور به وضوح فراهم کرده است. در گزارش نهایی کارگروه سیل (کارگروه اقلیم‌شناسی و هواشناسی) نیز در تحلیل علل سینوپتیک بارش سنگین روز ۵ فروردین (۲۵ مارس) به وجود ناوه عمیق در غرب ایران در تراز ۵۰۰ میلی‌بار اشاره شده است که در این پژوهش نیز چنین نتیجه‌ای به‌دست آمد. در سطح زمین هم حاکمیت کم‌فشاری در سطح زمین در غرب ایران قابل مشاهده بود. از لحاظ تأمین رطوبت، بارش‌های این دو روز نیز نقشه‌های وزش رطوبت تراز ۸۵۰ میلی‌بار نشان داد که تزریق رطوبت در منطقه مورد مطالعه با تعامل دو سیستم سیکلونی (در شرق دریای مدیترانه) و آنتی سیکلونی (روی خلیج عدن) صورت گرفته است و نکته مهمی که در این پژوهش به‌دست آمد و در گزارش کارگروه سیل (کارگروه اقلیم‌شناسی و هواشناسی) نیز به وضوح بر آن تأکید شده است، این است که در بارش‌های یادشده، منبع تأمین رطوبت علاوه بر دریای سرخ و خلیج فارس، دریای مدیترانه نیز بوده است که رطوبت را در سطح منطقه به ۱۱ تا ۱۳ گرم در کیلوگرم هوای خشک رسانده است. شاخص‌های ناپایداری جو بالا که با تأکید بر ایستگاه‌های جو بالای کرمانشاه بررسی شده بود، وجود ناپایداری بسیار شدید را در منطقه تأیید نمی‌کرد. ناپایداری متوسط در ترازهای پایین جو که قابلیت گسترش به تراز فوقانی را نداشته است (نمودار Skew-T) بیانگر آن بوده است که یک سامانه سینوپتیک سراسری کل منطقه را درگیر کرده است و عامل همرفت محل نقشی نداشته است.

## منابع

- جوان، کاظم؛ طاهری شهرآیینی، حمید؛ نصیری صالح، فرزین؛ حبیبی نوخندان، مجید. (۱۳۹۰). روشی جدید جهت پیش‌بینی پراکنش مکانی دما و بارش در حوضه آبریز رودخانه قره سو اردبیل. نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۲(۵ و ۶)، ۱۱۷-۱۳۰.
- داداشی رودباری، عباسعلی؛ فلاح قاله‌ری، غلام عباس؛ کرمی، مختار؛ باعقیده، محمد. (۱۳۹۵). تحلیل تغییرات بارش حوضه آبریز هراز با استفاده از روش‌های آماری و تکنیک تحلیل طیفی. هیدروژئومورفولوژی، ۳(۷)، ۵۹-۸۶.
- دهبان، حسین؛ ابراهیمی، کیومرث؛ عراقی نژاد، شهاب؛ بذرافشان، جواد. (۱۳۹۸). ارزیابی دقت مدل‌های NMME در پیش‌بینی بارش ماهانه مطالعه موردی حوضه سفید رود. نشریه هواشناسی کشاورزی، ۷(۱)، ۳-۱۲.
- قاسمی فر، الهام؛ ناصرپور، سمیه؛ آرزومندی، لیلی. (۱۳۹۶). شناسایی الگوهای سینوپتیکی بارش‌های سیل‌خیز غرب ایران. نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۴(۲)، ۶۹-۸۶.
- گندمکار، امیر؛ ریسی، توران. (۱۳۹۱). رابطه بارش و رواناب در حوضه گوجان، مجله جغرافیایی سپهر، ۲۱(۱)، ۳۸-۴۰.
- مهدی نسب، مهدی؛ طاووسی، تقی؛ میرزایی، رضا. (۱۳۹۳). پیش‌بینی احتمال وقوع سیل و حداکثر بارش متحمل زیر حوضه پلدختر با استفاده از روش سری‌های جزئی. فصلنامه علمی پژوهشی اکوسیستم‌های طبیعی ایران، ۵(۱)، ۹۷-۱۰۹.
- نگارش، حسین؛ ویسی، جلیل. (۱۳۹۲). تجزیه و تحلیل اثرات تغییر بارش در سیل‌خیزی حوضه آبریز رودخانه راوند منطقه اسلام آباد غرب استان کرمانشاه. فصلنامه علمی پژوهشی برنامه‌ریزی منطقه‌ای، ۳(۱۱)، ۷۹-۹۸.
- لشکری، حسن؛ اسفندیاری، ندا. (۱۴۰۰). الگوهای همدیدی و ترمودینامیکی رودخانه‌های جوی منجر به بارش سنگین دوره سرد کشور ایران. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۰(۲۹)، ۱۲۵-۱۴۴.
- عساکره، حسین؛ خجسته، آتوسا. (۱۴۰۰). فراوانی ورود چرخندهای مدیترانه‌ای به ایران و اثر آن‌ها بر بارش‌های فراگیر، مخاطرات محیط طبیعی، ۱۰(۲۷)، ۱۵۹-۱۷۶.
- Ahmad, E. S., William, A.G. (2018). A classification of synoptic patterns inducing heavy precipitation in Saudi Arabia during the period 2000-2014. The Journal of Atmosfera, 31, pp 47-67.
- Chang, C.H., W. Huang. (2013). Hydrological modeling of typhoon-induced extreme storm runoffs from Shihmen watershed to reservoir. Taiwan. Nat Hazards, 67, pp 747-761.
- Chen, C.S., Yuh-Lang, L., Wen-Chun, P., Che-Ling, L. (2010). Investigation of a heavy rainfall event over southwestern Taiwan associated with a ub synoptic cyclone during the 2003 Mei-Yu season. Atmospheric Research, 1-20.
- Chen, Ch., Lin, Y., Hsu, N., Liu, C., Chen., C. (2011). Orographic effects on localized heavy rainfall events over southwestern Taiwan on 27 and 28 June 2008 during the post-MeiYu period. Atmospheric Research, 101, pp 595-610.
- Coats, R. (2010). Climate Change in the Tahoe Basin: Regional Trends, Impact and Drivers. Climate change, 102, pp 435-466.
- Federico, S., Avolio, E., Pasqualoni, L., Bellecci, C. (2008). Atmospheric patterns for heavy rain events in Calabria. Natural Hazards and Earth System Sciences, 8, pp 1173-1186.
- Kumar, A.J., R.Dudhia, Rotunno, D., Mohanty, U.C. (2008). Analysis of the 26 July 2005 Heavy rain event over Mumbai. India using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. Quarterly journal of the royal meteorological society, 134 (636), pp 1897-1910.
- Lana, A. J., Campins, A., Genov, A. (2007). Atmospheric patterns for heavy rain events in the Balearic Islands. Advances in Geosciences, 12, pp 27-32.
- Mateo, J., Ballart, D., Brucet, C M., Aran, J. (2009). A study of a heavy rainfall event and a tornado outbreak during the passage of a squall line over Catalonia. Meteorological Service of Catalonia, Berlín 38, Barcelona E - 08029, Spain.
- Matlik, O., Post, P. (2008). Synoptic weather types have caused heavy precipitation in Estonia in the period 1961-to 2005. Estonian Journal of Engineering, 14(3), pp 195-208.
- Mohanty, M., Mohapatra, M., Jaafry, S. N. A. (2014). Characteristic features of heavy rainfall over Gujarat and Rajasthan states of India due to very severe cyclonic storm phet over the Arabian Sea (31 May to 07 June 2010). Monitoring and Prediction of Tropical Cyclones in the Indian Ocean and Climate Change. Springer, Amsterdam, Netherlands, 35, pp 412-421.
- Muller, M., spar, M., Matschullat, J. (2009). Heavy rains and extreme rainfall-runoff events in Central Europe from 1951 to 2002. Natural Hazards and Earth System Sciences, 9, pp 441-450.
- Pineda, N., Bech, J., Rigo, T., Montanya, J. (2011). A Mediterranean nocturnal heavy rainfall and tornadic event, Part II: Total lightning analysis. Atmospheric Research, 100, pp 638-648.
- Sampath, D.S., Weerakoon, S.B., Herath, S. (2015). HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment with intra-basin diversions – a case study of the Deduru Oya river basin. Sri Lanka. ENGINEER, 1, pp 1-9.

- Seibert, P., Frank, A., Formayer, H. (2007). Synoptic and regional patterns of heavy Precipitation in Austria. *Theoretical and Applied Climatology*, 87, pp 139-153.
- Shamir, E. (2017). The value and skill of seasonal forecasts for water resources management in the Upper Santa Cruz River basin in southern Arizona. *Journal of Arid Environments*, 137, pp 35-45.
- Tank, A. K., Zwiers, F. W., Zhang, X. (2009). *Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation*. World Meteorological Organization, pp. 52
- Wang, H., Chen Yu, L. (2016). Distinguishing human and climate influences on streamflow changes in the Luan River basin in China. *Catena*, 136, pp 182–188.
- Weldon, D., Reason, C. J. C. (2014). Variability of rainfall characteristics over the South Coast region of South Africa. *Theoretical and Applied Climatology*, 115, pp 177-185
- World Meteorological Organization. (2011). *Weather extremes in a changing climate: hindsight on foresight*, ISBN:978-92-63-11075-6
- Yan, Z., Jones, P.D., Davies, T.D., Moberg, A., Bergstrom, H., Camuffo, D., Cocheoc, M., Demaree, G. R., Verhoeve, T., Theoen, E., Barriendos, M., Rodriguez, R., MartinVide, J., Yang, C. (2002). Trends of extreme temperature in Europe and China are based on daily observations. *Climatic Change*. *Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation*.). *Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation*, 53, pp 355- 392.



## References

### References (in Persian)

- Dadashi Roudbari, A., Fallah Ghalheri, Gh., Karami, M., Baaghde, M. (2016). Analysis of Precipitation Variations of Haraz Watershed Using Statistical Methods and Spectrum Analysis Technique. *Journal of Hydro geomorphology*, 3(7), pp59-86. [In Persian]
- Dehban , H., Ebrahimi , K., Araghinejad, S., Bazrafshan , J.(2019). Evaluation of NMME models in the forecasting of monthly rainfall (Case study: Sefidrood Basin). *Journal of Agricultural Meteorology*, 7(1), pp 3-12. [In Persian]
- Gandomkar, A., Ra'eesi, T.(2012). Investigation of the relationship between precipitation and runoff in the Goujan basin (Karoon branch). *Scientific - Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 21(81), pp38-40. [In Persian]
- Gasemifar, E., naserpour, S., arezomandi, L. (2017). Analysis of synoptic patterns related to extreme precipitation over west of Iran. *Jsaeh*, 4 (2), pp 69-86. [In Persian]
- Ghavidel Y., (2011). Applications of the instability indices for detection and dynamic analysis of 25 April 2010 thunderstorm in Tabriz. *Geographical Space*, 11(34), pp182-208. [In Persian]
- Javan, K., Taheri shahr aeini, H., nsiri saleh, F., Habibinokhandan, M. (2011). A new method for the forecasting of Spatial Distribution of Precipitation and Temperature in Gharehsoo River Watershed. *Journal of climate research*, 5(5), pp 117-130. [In Persian]
- Mehdinasab, M., Tavoosi , T., Mirzaei , R.(2014). Prediction Probable Flood and Maximum precipitation Using Poldukhtar Basin Suffered partial Series. *Journal of Natural Ecosystems of Iran*, 5(1), pp97-109. [In Persian]
- Negaresh, H., Weiss, J. (2013). Analysis of the effects of rainfall change in flooding of Ravand River catchment area, Islamabad region, west of Kermanshah province. *Journal of Regional Planning*, 3 (11), pp 79-98. [In Persian]
- Rostami Khalaj, M., Salajeghe, A., moghadamnia, A., Khalighi sigarodi, Sh., Azarakhshi, M.(2019). Rainfall-runoff modeling based on system dynamics approach (Case study: Mashhad Kardeh dam basin). *Watershed Engineering and Management*, 11(1), pp 15- 27. [In Persian]
- Lashkari H., Esfandiari, N., (2021), Synoptic and thermodynamic patterns of atmospheric rivers associated with heavy precipitation in the cold period of Iran, *Journal of Natural Environmental Hazards (JNEH)*, 10(29), pp125-144. [In Persian]
- Asakereh, H., Khojasteh, A., (2021), Frequency of entrance Mediterranean Cyclones to Iran and Their Impact on Widespread precipitation, *Journal of Natural Environmental Hazards (JNEH)*, 10(27), pp159-176. [In Persian]

### References (in English)

- Ahmad, E. S., William, A.G. (2018). A classification of synoptic patterns inducing heavy precipitation in Saudi Arabia during the period 2000-2014. *The Journal of Atmosfera*, 31(1), pp 47-67.
- Chang, C.H., W. Huang. ( 2013). Hydrological modeling of typhoon-induced extreme storm runoffs from Shihmen watershed to reservoir. *Taiwan. Nat Hazards*, 67(2), pp 747- 761.
- Chen, C h., Lin, Y., Hsu, N., Liu, C., Chen., C. (2011). Orographic effects on localized heavy rainfall events over southwestern Taiwan on 27 and 28 June 2008 during the post-MeiYu period. *Atmospheric Research*, 101(3), pp 595-610.
- Chen, C.S., Yuh-Lang, L., Wen-Chun, P., Che-Ling, L. (2010). Investigation of a heavy rainfall event over southwestern Taiwan associated with a subsynoptic cyclone during the 2003 Mei-Yu season. *Atmospheric Research*, 95(2-3), 1-20.
- Coats, R. (2010). Climate Change in the Tahoe Basin: Regional Trends, Impact and Drivers. *Climate change*, 102(3), pp 435-466.
- Federico, S., Avolio, E., Pasqualoni, L., Bellecci, C. (2008). Atmospheric patterns for heavy rain events in Calabria. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8(5), pp 1173-1186.
- Kumar, A.J., R.Dudhia. Rotunno, D., Mohanty, U.C. (2008). Analysis of the 26 July 2005 Heavy rain event over Mumbai. India using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, 134 (636), pp 1897-1910.
- Lana, A. J., Campins, A., Genov, A. (2007). Atmospheric patterns for heavy rain events in the Balearic Islands. *Advances in Geosciences*, 12, pp 27-32. [DOI:10.5194/adgeo-12-27-2007](https://doi.org/10.5194/adgeo-12-27-2007)
- Matlik, O., Post, P. (2008). Synoptic weather types have caused heavy precipitation in Estonia in the period 1961–to 2005. *Estonian Journal of Engineering*, 14(3), pp 195-208.
- Mohanty, M., Mohapatra, M., Jaafry, S. N. A. (2014). Characteristic features of heavy rainfall over Gujarat and Rajasthan states of India due to very severe cyclonic storm phet over the Arabian Sea (31 May to 07 June 2010). *Monitoring and Prediction of Tropical Cyclones in the Indian Ocean and Climate Change*. Springer, Amsterdam, Netherlands, 35, pp 412-421 [DOI:10.1007/978-94-007-7720-0\\_35](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7720-0_35)

- Muller, M., spar, M., Matschullat, J. (2009). Heavy rains and extreme rainfall-runoff events in Central Europe from 1951 to 2002. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, pp 441-450. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-9-441-2009>
- Pineda, N., Bech, J., Rigo, T., Montanya, J. (2011). A Mediterranean nocturnal heavy rainfall and tornadic event, Part II: Total lightning analysis. *Atmospheric Research*, 100, pp 638–648. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.10.027>
- Sampath, D.S., Weerakoon, S.B., Herath, S. (2015). HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment with intra-basin diversions – a case study of the Deduru Oya river basin. Sri Lanka. *ENGINEER*, 1, pp 1-9. DOI:10.4038/engineer.v48i1.6843
- Seibert, P., Frank, A., Formayer, H. (2007). Synoptic and regional patterns of heavy Precipitation in Austria. *Theoretical and Applied Climatology*, 87(1), pp 139-153.
- Shamir, E. (2017). The value and skill of seasonal forecasts for water resources management in the Upper Santa Cruz River basin in southern Arizona. *Journal of Arid Environments*, 137, pp 35-45. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.10.011>
- Tank, A. K., Zwiers, F. W., Zhang, X. (2009). Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. *World Meteorological Organization*, pp. 52
- Wang, H., Chen Yu, L. (2016). Distinguishing human and climate influences on streamflow changes in the Luan River basin in China. *Catena*, 136, pp 182–188. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.02.013>
- Weldon, D., Reason, C. J. C. (2014). Variability of rainfall characteristics over the South Coast region of South Africa. *Theoretical and Applied Climatology*, 115(1-2), pp 177-185
- World Meteorological Organization. (2011). *Weather extremes in a changing climate: hindsight on foresight*, ISBN:978-92-63-11075-6
- Yan, Z., Jones, P.D., Davies, T.D., Moberg, A., Bergstrom, H., Camuffo, D., Cocheoc, M., Demaree, G. R., Verhoeve, T., Theoen, E., Barriendos, M., Rodriguez, R., MartinVide, J., Yang, C. (2002). Trends of extreme temperature in Europe and China are based on daily observations. *Climatic Change.*, 53, pp 355- 392. [https://doi.org/10.1007/978-94-010-0371-1\\_13](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0371-1_13).

