

## Patterning and Synoptic Analysis of Heavy Precipitation in the Cold Season in Northwest Iran

Salahi, B.<sup>1</sup>  | Shahi, A.<sup>2</sup> 

1. Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
2. PhD of climatology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil.

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

*(Received: 13 Jul 2025, Revise: 14 Nov 2025, Accepted: 25 Nov 2025, Published online: 25 Nov 2025)*

### Abstract

This study was conducted to identify the patterns leading to generate heavy precipitation in the cold season of the northwest region of Iran. For this purpose, daily precipitation data from 19 selected synoptic meteorological stations between 2000 and 2019 were received from the Iran Meteorological Organization and upper atmosphere data for parameters effective in the occurrence of heavy precipitation, including zonal and meridional wind, specific humidity, omega, sea level pressure, and geopotential height, were received from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Using an environmental approach to circulation and a 99% percentile threshold along with a 30% spatial extent condition, heavy precipitation events were extracted, and then, using factor and cluster analysis, the main factors and synoptic patterns were determined. Based on the results, 16 heavy precipitation events were identified in the region and three main patterns were extracted, among which pattern number two (integration of Sudanese, Mediterranean, and Icelandic systems) was recognized as the dominant pattern. The maximum heavy rainfall in all three patterns occurred in the southwest of the study area, especially at the Piranshahr and Sardasht stations. The results also showed that the most important source of moisture for heavy rainfall in northwest Iran was the Mediterranean Sea. In the lower, middle, and upper levels of the troposphere, the land front, blocking, and jet-stream systems played a key role in the formation of heavy rainfall events, respectively. Overall, the findings indicate the completely dynamic nature of these precipitation events and the simultaneous influence of large-scale systems in their creation.

**Keywords:** Cluster Analysis, Factor Analysis, Heavy Rainfall, Northwest Iran, Patterning, Synoptic Analysis

**Cite this article:** Salahi,B. and Shahi,A. (2025). Patterning and Synoptic Analysis of Heavy Precipitation in the Cold Season in Northwest Iran. *Nivar*, 00(00-00), 00-00. Doi: <https://doi.org/10.30467/nivar.2025.534278.1344>

**E-mail:** (2) [Ali.shahi@uma.ac.ir](mailto:Ali.shahi@uma.ac.ir)



## الگویابی و واکاوی هم‌دیدگی بارش‌های سنگین فصل سرد شمال غرب ایران

برومند صلاحی<sup>۱</sup> | علی شاهی<sup>۲</sup>

۱. استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

۲. دکترای آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

رایانامه نویسنده مسئول: [salahi@uma.ac.ir](mailto:salahi@uma.ac.ir)

(دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۲، بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۳، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۴، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۰۹/۰۴)

### چکیده

این مطالعه با هدف شناسایی الگوهای مولد بارش سنگین در فصل سرد منطقه شمال غرب ایران انجام شده است. برای این منظور، داده‌های بارش روزانه ۱۹ ایستگاه هواشناسی هم‌دیدگی منتخب در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ از سازمان هواشناسی ایران و داده‌های جو بالا برای فراسنج‌های مؤثر در وقوع بارش سنگین شامل باد مداری، باد نصف‌النهاری، رطوبت ویژه، امگا، فشار سطح دریا و ارتفاع ژئوپتانسیل از پایگاه ملی اقیانوسی و جوی آمریکا (NOAA) دریافت گردید. با استفاده از رویکرد محیطی به گردشی و آستانه صدک ۹۹ درصد همراه با شرط گستره مکانی ۳۰ درصد، رخداد‌های بارش سنگین استخراج و سپس با تحلیل عاملی و خوشه‌ای، عامل‌های اصلی و الگوهای هم‌دیدگی تعیین شدند. بر اساس نتایج، ۱۶ رخداد بارش سنگین در منطقه شناسایی و سه الگوی اصلی استخراج شد که در این میان، الگوی شماره دو (ادغام سامانه‌های سودانی، مدیترانه‌ای و ایسلندی) به‌عنوان الگوی غالب شناخته شد. بیشینه بارش سنگین در هر سه الگو در جنوب غربی منطقه مورد مطالعه به‌ویژه در ایستگاه‌های پیرانشهر و سردشت، رخ داده است. نتایج همچنین نشان داد که مهم‌ترین منبع تأمین‌کننده رطوبت بارش‌های سنگین شمال غرب ایران، دریای مدیترانه بوده است. در سطوح زیرین، میانی و فوقانی وردسپهر، به‌ترتیب سامانه‌های جبهه زمینی، بندالی و رودباد نقش کلیدی در شکل‌گیری رخداد‌های بارش سنگین داشته‌اند. در مجموع، یافته‌ها حاکی از ماهیت کاملاً دینامیکی این بارش‌ها و تأثیر هم‌زمان سامانه‌های بزرگ‌مقیاس در ایجاد آن‌ها است.

**واژه‌های کلیدی:** الگویابی، بارش سنگین، تحلیل خوشه‌ای، تحلیل عاملی، تحلیل هم‌دیدگی، شمال غرب ایران.

### ۱. مقدمه

محلی تغییر می‌کند (علی‌جانی و همکاران، ۱۳۸۹). در این میان، اقلیم‌شناسی هم‌دیدگی با تکیه بر روابط بین سامانه‌های جوی، منابع رطوبتی و پویایی‌های قائم جو، ابزار مؤثری برای تبیین این رخدادها به شمار می‌رود (غیور و همکاران، ۱۳۹۱). تحلیل‌های سینوپتیکی و هم‌دیدگی در تحقیقات بین‌المللی الگوهای متفاوتی را به‌عنوان موجد بارش‌های سنگین معرفی کرده‌اند. برای نمونه، سانچز و همکاران (۲۰۲۲) با مطالعه رخداد‌های  $\leq 100$  میلی‌متر در ۲۴ ساعت در سواحل مدیترانه اسپانیا نشان دادند که ترکیب ناپایداری در لایه‌های میانی-فوقانی جو و ورود جریان‌های سطحی مرطوب و گرم، به‌ویژه

بارش‌های سنگین از مهم‌ترین پدیده‌های جوی هستند که در چارچوب الگوهای ویژه گردش جو شکل گرفته و اغلب منجر به رخداد سیلاب‌های شدید می‌شوند. از آنجاکه سیلاب‌ها در زمره پرخسارت‌ترین بلایای طبیعی به شمار می‌روند، شناسایی سامانه‌های مؤثر در شکل‌گیری بارش‌های سنگین و الگوهای هم‌دیدگی آن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است (حلیان و حسینعلی‌پورجزی، ۱۳۹۱). با این حال، تعریف بارش‌های سنگین در مناطق مختلف یکسان نیست و آستانه وقوع آن بسته به شرایط اقلیمی، توپوگرافی و ویژگی‌های

استناد: صلاحی، برومند و شاهی، علی. (۱۴۰۴). الگویابی و واکاوی هم‌دیدگی بارش‌های سنگین فصل سرد شمال غرب ایران. نیوار، ۰۰(۰۰-۰۰)، ۰۰-۰۰.

<https://doi.org/10.30467/nivar.2025.534278.1344>

رایانامه: (۲) [Ali.shahi@uma.ac.ir](mailto:Ali.shahi@uma.ac.ir)



موضوعی که در پژوهش‌های داخلی نیز با ویژگی‌های اقلیمی متفاوت ایران قابل بررسی است.

مطالعات ملی نیز بر نقش ناوه‌ها، سامانه‌های کم‌فشار سطحی و انتقال رطوبت از دریاها در تولید بارش‌های شدید تأکید کرده‌اند. به‌عنوان مثال، سلیمانی و صلاحی (۱۴۰۱) نقش زبانه پرفشار دریای سیاه و سامانه شبه‌بلو کینگ امگایی را در انتقال رطوبت از دریای مدیترانه و خزر به شمال ایران مؤثر دانستند؛ بیرانوند و همکاران (۱۴۰۱) نیز با تحلیل رخدادهای سیلابی لرستان نشان دادند که ناوه‌های عمیق مدیترانه‌ای همراه با کم‌فشار سطحی غرب ایران و جریان‌های رطوبتی از منابع متنوع (مدیترانه، عمان، عرب) موجب صعود گسترده و ناپایداری لازم برای بارش‌های سنگین شده‌اند. از جنبه تغییر اقلیم و روندهای بلندمدت، مطالعاتی مانند صفوی و همکاران (۱۴۰۱) و جوانشیری و همکاران (۱۴۰۳) تغییر الگوها و نمایه‌های فرین بارش را گزارش کرده‌اند؛ یافته‌ها حاکی از تغییرات فضایی-زمانی در فراوانی و شدت بارش‌های سنگین است که می‌تواند ماهیت الگوهای همدیدی را در آینده تغییر دهد. در پژوهش‌های اخیر نیز (صادقی و همکاران، ۱۴۰۲؛ بنی‌نعیمه و همکاران، ۱۴۰۲؛ مزیدی و راوری، ۱۴۰۳) نقش همزیستی سامانه‌های سطحی و فوقانی (کم‌فشار، ناوه، جت و امگا) در انگیزش ناپایداری‌های شدید و تولید بارش‌های فوق‌سنگین در مناطق مختلف ایران تأیید شده است.

با وجود این پیشینه گسترده، دو نکته قابل توجه باقی می‌ماند: اول آنکه بیشتر مطالعات یا در مقیاس‌های منطقه‌ای-بزرگتر یا به‌صورت رخدادمحور بوده‌اند و دوم آنکه بررسی‌های هم‌زمان رویکرد چرخندگی (vorticity-driven perspective) همراه با تحلیل‌های همدیدی و ترکیب جامع پارامترهای رطوبتی و عوامل صعودی در مقیاس ناحیه‌ای شمال غرب ایران هنوز به‌صورت یکپارچه انجام نشده است. با توجه به پیچیدگی توپوگرافی منطقه و تأثیر هم‌زمان سامانه‌های مدیترانه‌ای، قفقازی و سودانی، پرداختن به این خلأ و آشکارسازی الگوهای مولد بارش سنگین با رویکرد

در پاییز، عامل اصلی ایجاد این رخدادهای بوده و افزایش دمای سطح آب غرب مدیترانه می‌تواند تکرار و شدت این رویدادها را تقویت کند. مشابه آن، هو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۲) در جنوب شرقی آسیا رابطه مستقیمی میان آغاز موسمی دریای چین جنوبی و افزایش فراوانی بارش‌های شدید یافته‌اند که نشان‌دهنده نقش حیاتی منابع رطوبتی و سامانه‌های همدیدی در تعیین فراوانی و شدت بارش‌های سنگین است. در اروپای غربی نیز مطالعات سینوپتیکی مانند ایبوچی<sup>۲</sup> (۲۰۲۲) نشان داده‌اند که نوسان اطلس شمالی و تغییرات چرخندگی در لایه‌های میانی جو می‌تواند مسیر و فرکانس ناوه‌ها و سامانه‌های کم‌فشار را تغییر دهد و از این طریق زمینه‌ساز رخدادهای بارش سنگین شود؛ بدین گونه که ترکیب کم‌ارتفاع میانی، سیکلون سطحی و جریان رطوبتی از اقیانوس، شرایط لازم برای بارش‌های شدید را فراهم می‌آورد. در مقیاس منطقه‌ای‌تر، قصابی و همکاران (۲۰۲۲) با خوشه‌بندی گردش‌های روزانه نشان دادند که گسترش جریان‌های جنوب و جنوب غربی (منشأ دریای سرخ) می‌تواند موجب تکوین مراکز کم‌فشار و تمرکز بارش روی دامنه‌های غربی زاگرس شود. در نهایت، لی<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی همدیدی طی دوره‌ی ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۹ در شمال چین، نقش سامانه‌های رطوبتی و صعودی را در شکل‌گیری بارش‌های سنگین بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که دو الگوی اصلی در رخدادهای بارش سنگین مؤثر است: در نوع نخست، رطوبت عمدتاً از غرب اقیانوس آرام شمالی تأمین می‌شود و ناپایداری ناشی از جت در تراز فوقانی نقش غالب دارد؛ در نوع دوم، رطوبت از دریای عرب و خلیج بنگال به منطقه انتقال می‌یابد و یک ناوه عمیق موجب اغتشاش و صعود قوی در منطقه می‌شود.

یافته‌های این گونه پژوهش‌ها نشان می‌دهد که ترکیب عوامل صعودی و رطوبتی با ساختار چرخندگی ترازهای میانی و فوقانی جو، سازوکار اصلی در تولید بارش‌های سنگین است؛

و دوم، بررسی علل و سازوکارهای بارش سنگین برای هر الگو شامل منابع رطوبتی، روند صعودی و ویژگی‌های دینامیکی روزهای نماینده. این رویکرد مکمل، امکان تحلیل جامع و دقیق رخدادهای شدید را فراهم می‌کند. بر این اساس، سؤال اصلی پژوهش این است که مهم‌ترین الگوی همیدی مؤثر در وقوع بارش‌های سنگین فصل سرد شمال غرب ایران کدام است و فرض بر این است که سامانه‌های رطوبتی و صعودی با منشأ غربی نقش اصلی در شکل‌گیری این رخدادها دارند.

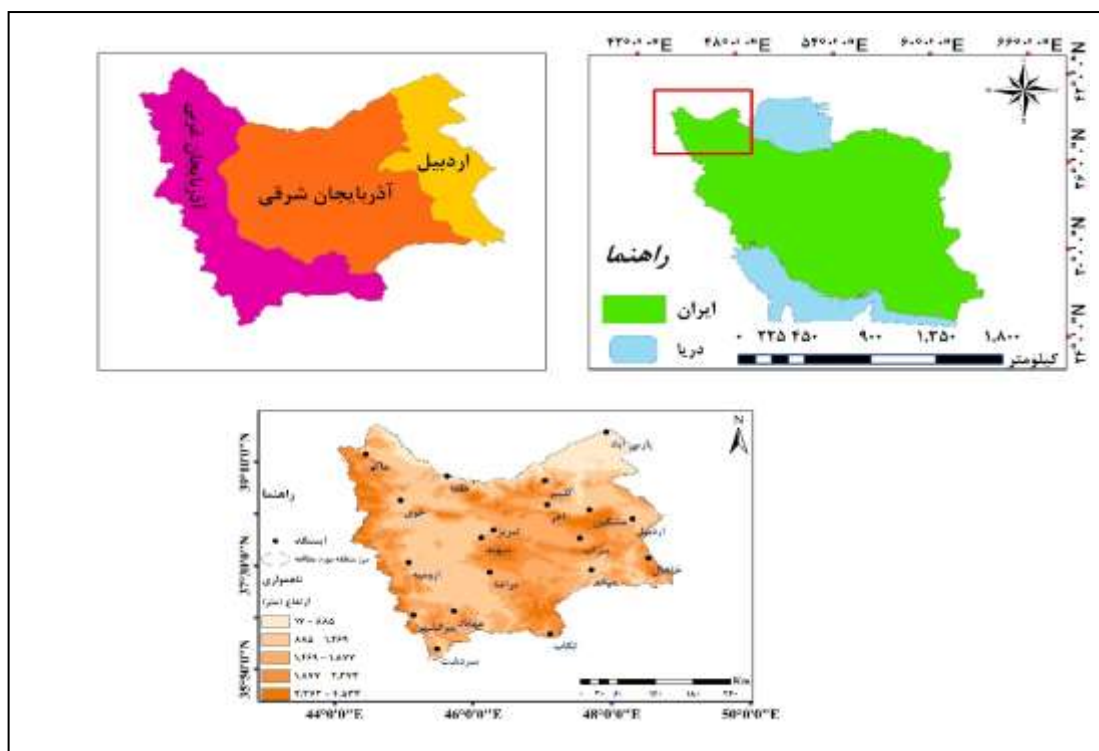
## ۲. روش تحقیق

### ۲-۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، شمال غرب ایران، محدوده عرض‌های جغرافیایی ۳۶ تا ۴۰ درجه شمال و طول‌های جغرافیایی ۴۴ تا ۴۹ درجه شرقی است که شامل استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و اردبیل می‌شود (شکل ۱).

چرخندگی و تحلیل‌های همیدی، می‌تواند فهم علت- معلولی رخدادهای حدی فصل سرد در این ناحیه را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد.

شمال غرب ایران به دلیل اجتماع شرایط توپوگرافی، دینامیکی (حضور چرخندهای خاورمیانه) و ترمودینامیکی (همرفت دامنه‌ای در فصول بهار و پاییز) پتانسیل بالایی در رخداد بارش سنگین دارد و در اغلب این رویداد حدی شاهد مخاطره دیگر سیل بوده است. با توجه به پیامدهای جانی و مالی این بلای طبیعی و تکرار مخاطره ذکر شده ارزیابی علل تشکیل بارش سنگین در منطقه مورد مطالعه اجتناب‌ناپذیر است. این مطالعه برای اولین بار در شمال غرب ایران با استفاده از داده‌های همیدی ۱۹ ایستگاه در بازه ۲۰۰۰-۲۰۱۹ و پارامترهای جامع جو بالا، الگوهای مولد بارش‌های سنگین در فصل سرد (پاییز و زمستان) را با تمرکز ویژه بر تحلیل‌های همیدی و رویکرد چرخندگی شناسایی می‌کند. با بهره‌گیری از روش‌های آماری دقیق شامل تحلیل صدک ۹۹، تحلیل عاملی و خوشه‌بندی، دو هدف اصلی دنبال شده است: اول، شناسایی الگوهای غالب بارش سنگین در منطقه؛



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

## ۲-۲. مواد و روش

در این مطالعه از داده‌های روزانه بارش ۱۹ ایستگاه همدیدی شمال غرب ایران و داده‌های جو بالا طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ استفاده شده است. داده‌ها از سازمان هواشناسی کشور ([www.irimo.ir](http://www.irimo.ir)) دریافت شد.

داده‌های جو بالا این پژوهش از پایگاه NCEP<sup>4</sup>/NCAR<sup>5</sup> اخذ شد، این داده‌ها شامل میانگین روزانه فشار تراز دریا (۱۰۰۰ هکتوپاسکال)، ارتفاع ژئوپتانسیل، باد مداری، باد نصف‌النهاری، امگا، رطوبت ویژه و رطوبت نسبی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال می‌شوند که در تارنمای [www.cdc.noaa.gov](http://www.cdc.noaa.gov) قابل دریافت هستند. منطقه مورد مطالعه به صورت یک محدوده مشخص بین طول جغرافیایی ۰ تا ۱۰۰ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۱۰ تا ۷۰ درجه شمالی تعریف گردید. بارش سنگین در این مطالعه بر اساس ۲ معیار تعیین شد. ۱- شدت بارش (صدک مساوی و بالاتر از ۹۹) و ۲- فراگیری بارش (مساحت تحت پوشش بارش سنگین حداقل ۳۰ درصد ایستگاه‌های هواشناسی) (صادقی و همکاران، ۱۴۰۲؛ مصطفایی و همکاران، ۱۳۹۴؛ علیجانی و همکاران، ۱۳۸۹). با محاسبه صدک ۹۹ (رابطه ۱) برای بارش‌های دوره مطالعه در فصول پاییز و زمستان شمال غرب ایران، آستانه ۲۰/۵ میلی‌متر به دست آمد. در نهایت با توجه به لحاظ کردن هم‌زمان ۲ شرط صدک و مساحت پوشش بارش، روزهایی که حداقل ۵ ایستگاه به‌طور هم‌زمان در منطقه مورد مطالعه دارای بارش حداقل ۲۰/۵ میلی‌متر بودند؛ به‌عنوان بارش سنگین انتخاب شدند.

$$P = \frac{aN}{100} + \frac{1}{2} \quad a = 99 \quad \text{تعداد}$$

رابطه (۱)

N: داده‌ها

برای شناسایی رخداد‌های بارش سنگین، از صدک ۹۹ استفاده شد که در مطالعات مشابه معیار مناسبی برای بارش حدی محسوب می‌شود. آستانه ۲۰/۵ میلی‌متر نیز بر اساس

میانگین صدک ۹۹ محاسبه شده برای ۱۹ ایستگاه در دوره ۲۰ ساله (۲۰۰۰-۲۰۱۹) به دست آمده است؛ بنابراین، این آستانه به‌طور دقیق نمایانگر رخداد‌های بارش شدید منطقه‌ای است و امکان شناسایی رخداد‌های حدی متناسب با ویژگی‌های محلی هر ایستگاه را فراهم می‌کند. پس از اخذ داده‌های جو بالا از سایت NOAA<sup>6</sup>، برای رسیدن به مهم‌ترین عوامل مؤثر در بارش سنگین، از تحلیل عاملی به روش PCA<sup>7</sup> و چرخش ماتریس با روش واریمکس استفاده شد. تحلیل عاملی با چرخش واریمکس برای شناسایی عوامل اصلی مؤثر بر رخداد‌های بارش سنگین انتخاب شد، زیرا این روش امکان کاهش ابعاد داده‌های پیچیده و استخراج ساختارهای پنهان (latent structures) در مجموعه داده‌های چندمتغیره را فراهم می‌کند. شاخص KMO برای داده‌ها برابر ۰/۸۲ بود که نشان‌دهنده کفایت نمونه و مناسب بودن داده‌ها برای تحلیل عاملی است. استفاده از چرخش واریمکس به ویژه باعث شد تا بارهای عاملی به شکل ساده‌تر و تفسیرپذیرتری ارائه شوند؛ به طوری که هر عامل بیشترین همبستگی را با تعداد محدودی از متغیرها داشته باشد و تداخل بین عامل‌ها کاهش یابد؛ بنابراین، ترکیب تحلیل عاملی با چرخش واریمکس، شفافیت و وضوح در شناسایی خوشه‌ها و الگوهای مولد بارش سنگین را افزایش داده و امکان استخراج نتیجه‌گیری‌های علمی معتبر را فراهم می‌سازد.

پس از تعیین عوامل اصلی، با استفاده از تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی تراکمی به روش وارد با فاصله اقلیدسی، الگو یابی انجام گرفت. روزهای نماینده هر الگو (روز دارای بارش سنگین با بیشترین پوشش ایستگاهی در هر خوشه، داشتن پوشش ایستگاهی در هر ۳ استان و بیشینه بودن شدت بارش‌های سنگین در ایستگاه‌های دارای بارش سنگین) با ترسیم نقشه‌های سینوپتیک در محیط نرم‌افزار گردس برای متغیرهای جوی ترسیم و تفسیر شد. برای هر الگوی بارشی، روز قبل از رخداد نیز مورد تفسیر قرار گرفت. در ادامه پهنه‌بندی بارش سنگین در محیط GIS با روش میان‌یابی وزن

6- National Oceanic and Atmospheric Administration  
7- Principal Component Analysis

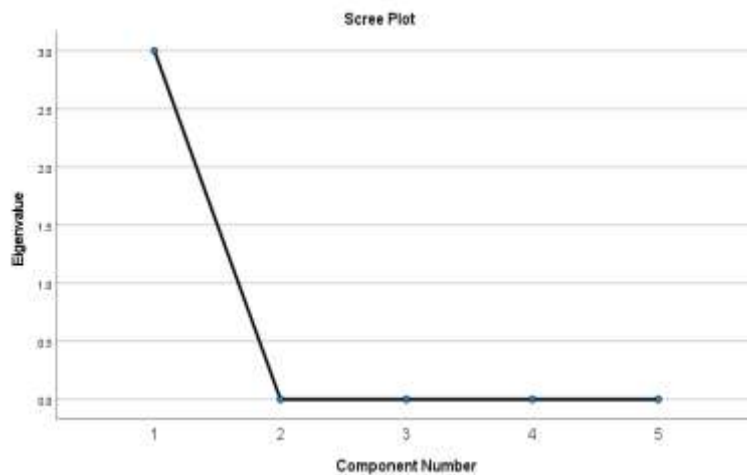
4- National Centers for Environmental Prediction  
5- National Center for Atmospheric Research

هدف اصلی این پژوهش یعنی شناسایی الگوهای همبندی و خوشه‌ای بارش سنگین، استفاده از روش IDW مناسب و قابل اعتماد ارزیابی می‌شود.

### ۳. نتایج و بحث

با توجه به معیارهای بارش سنگین (شدت و گستردگی) در این مطالعه، ۱۶ رخداد حدی بارش در دوره ۲۰ ساله (۲۰۰۰-۲۰۱۹) در فصل‌های پاییز و زمستان در شمال غرب ایران بر اساس ۱۹ ایستگاه هواشناسی همبندی منتخب شناسایی شدند (جدول ۱). جدول (۲) نتایج آزمون KMO و Bartlet را نشان می‌دهد، مقادیر این آزمون به ترتیب ۰/۸۱۸ و ۰ (sig) به دست آمدند. با توجه به مقادیر به دست آمده برای KMO که بالاتر از ۰/۶ و بارتلت که زیر ۰/۰۵ هستند، صحت انجام تحلیل عاملی تأیید شد. با استفاده از روش تحلیل عاملی ۱ عامل استخراج شد (شکل ۲). با استفاده از تحلیل خوشه‌ای سلسه‌مراتبی به روش وارد با فاصله اقلیدسی، از ۱۶ رخداد بارش سنگین، ۳ خوشه اصلی استخراج شدند (شکل ۳).

دهی فاصله معکوس انجام شد. در این پژوهش برای پهنه‌بندی رخدادهای بارش سنگین از روش وزن‌دهی معکوس (IDW) استفاده شد. انتخاب این روش به دلیل سادگی، شفافیت محاسبات و کارایی مناسب آن در شرایطی با تعداد نسبتاً محدود ایستگاه‌ها انجام گرفت. بررسی‌ها نشان داده‌اند که در مطالعات با کمتر از ۳۰ ایستگاه، روش IDW عملکردی پایدارتر نسبت به کریجینگ دارد، زیرا برخلاف کریجینگ، نیازمند مدل‌سازی و تخمین واریوگرام نیست؛ موضوعی که در شرایط پراکندگی مکانی اندک ایستگاه‌ها می‌تواند منجر به ناپایداری نتایج شود. با این حال، با توجه به ماهیت کوهستانی منطقه، احتمال برآورد کمتر از مقدار واقعی یا هموارسازی نوسانات فضایی توسط IDW وجود دارد. به‌منظور کاهش این خطا، از داده‌های میانگین‌گیری شده در کل دوره آماری (۲۰۰۰-۲۰۱۹) و بهره‌گیری از تراکم نسبی مناسب ایستگاه‌ها استفاده گردید. نتایج مطالعات تطبیقی پیشین نیز نشان می‌دهد که الگوهای کلی بارش و خوشه‌های مکانی حاصل از دو روش IDW و کریجینگ مشابه بوده و اختلاف اصلی صرفاً در جزئیات محلی است؛ از این رو، برای



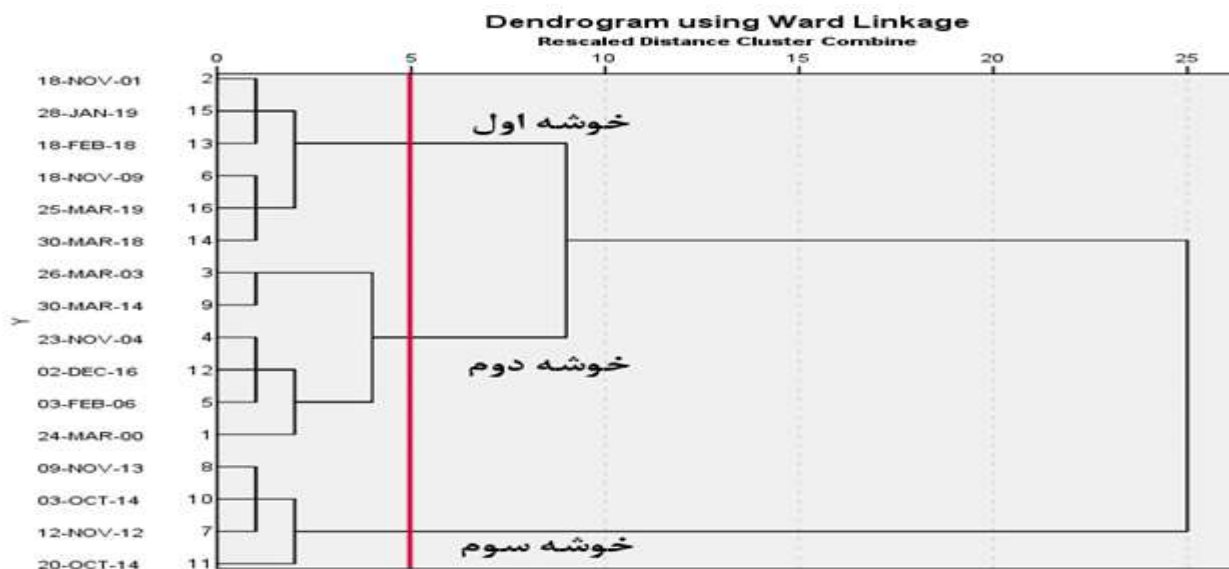
شکل ۲. نمودار سنگ‌ریزه (صخره‌ای) عامل‌ها

جدول ۱. رخدادهای بارش سنگین در منطقه مورد مطالعه

ردیف	روز رخداد	تعداد ایستگاههای دارای بارش سنگین در روز رخداد
۱	۲۰۰۰/۰۳/۲۴	۶
۲	۲۰۰۱/۱۱/۱۸	۵
۳	۲۰۰۳/۰۳/۲۶	۶
۴	۲۰۰۴/۱۱/۲۳	۵
۵	۲۰۰۶/۰۲/۰۳	۹
۶	۲۰۰۹/۱۱/۱۸	۶
۷	۲۰۱۲/۱۱/۱۲	۶
۸	۲۰۱۳/۱۱/۰۹	۵
۹	۲۰۱۴/۰۳/۳۰	۵
۱۰	۲۰۱۴/۱۰/۰۳	۹
۱۱	۲۰۱۴/۱۰/۲۰	۹
۱۲	۲۰۱۶/۱۲/۰۲	۶
۱۳	۲۰۱۸/۰۲/۱۸	۱۰
۱۴	۲۰۱۸/۰۳/۳۰	۷
۱۵	۲۰۱۹/۰۱/۲۸	۹
۱۶	۲۰۱۹/۰۳/۲۵	۶

جدول ۲. آزمون بارتلت و کایزر مایر اولکین به منظور اطمینان از مناسب بودن داده‌ها برای تحلیل عاملی

KMO and Bartlett's Test		
Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		.818
Bartlett's Test of Sphericity	Approx. Chi-Square	40.692
	Df	10
	Sig.	.000



شکل ۳: نمودار دندروگرام بر اساس عامل اصلی برای روزهای بارش سنگین شمال غرب ایران در دوره ۲۰ ساله برای فصل سرد

شدند و نماینده شایسته هر الگو بر اساس ۳ معیار ذکر شده، در ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه انتخاب شد (جدول ۳).

با توجه به تعیین خوشه‌ها، ۳ الگوی مسبب بارش سنگین در منطقه مورد مطالعه در فصل سرد در دوره ۲۰ ساله شناسایی

الگو	نماینده هر الگو			درصد رخداد هر الگو
	روز	ماه	سال	
اول	۳۰	۰۳	۲۰۱۸	۳۷/۵۰
دوم	۰۳	۰۲	۲۰۰۶	۳۷/۵۰
سوم	۲۰	۱۰	۲۰۱۴	۲۵

### ۱-۳. الگوی نوع اول (جبهه): تحلیل همدید بارش

سنگین تاریخ ۲۰۱۸/۳/۳۰ (۱۳۹۷/۱/۱۰)

تفسیر نقشه‌های فشار سطح دریا (برحسب هکتوپاسکال) در تاریخ ۲۰۱۸/۳/۲۹ برای ۲۴ ساعت قبل از بارش سنگین، سیستم‌های پرفشاری که فعالیت دارند عبارت‌اند از: ۱- پرفشار سبیری در شمال شرق کشور با فشار مرکزی ۱۰۲۵ هکتوپاسکال که بر روی تاجیکستان قرار گرفته است. ۲- پرفشار اروپایی با هسته مرکزی ۱۰۲۰ هکتوپاسکال در مختصات طول جغرافیایی ۳۵ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۵۳ درجه شمالی قرار گرفته است. ۳- پرفشاری بر روی آفریقا با هسته مرکزی ۱۰۲۰ هکتوپاسکال بر روی لیبی قرار گرفته است. ۴- پرفشاری با فشار مرکزی ۱۰۱۵ هکتوپاسکال در داخل کشور ایران در حال فعالیت است. سیستم‌های کم‌فشار فعال عبارت‌اند از: ۱- سیستم کم‌فشاری در عرض‌های بالا با مرکز ۹۹۷/۵ هکتوپاسکال قرار دارد. ۲- یک کم‌فشار هسته سرد با فشار مرکزی ۹۹۷/۵ هکتوپاسکال بر روی قزاقستان قرار گرفته است. ۳- یک کم‌فشار با مرکز ۱۰۰۲/۵ هکتوپاسکال در اروپا شکل گرفته است. همچنین سامانه کم‌فشار سودانی-مدیترانه‌ای به صورت چند هسته‌ای، با هسته‌ای در ترکیه (فشار مرکزی ۱۰۰۲/۵ هکتوپاسکال و زبان‌های تا دریای سیاه) و هسته‌ای دیگر در عراق با فشار مرکزی ۱۰۰۵ هکتوپاسکال دیده می‌شود. برهم‌کنش پرفشار اروپایی (ناقل هوای سرد) و کم‌فشار ادغامی (ناقل هوای گرم) منجر به تشکیل جبهه زمینی بر روی شمال دریای سیاه شد. همچنین بر روی شمال دریای مدیترانه، تعامل هوای سرد کم‌فشار ادغامی با هوای گرم ناشی از پرفشار آفریقا جبهه زمینی ایجاد کرد. در ایران، غلبه سیستم پرفشار سبب پایداری

جو و کاهش بارش در اکثر ایستگاه‌ها گردید (شکل ۴-الف).

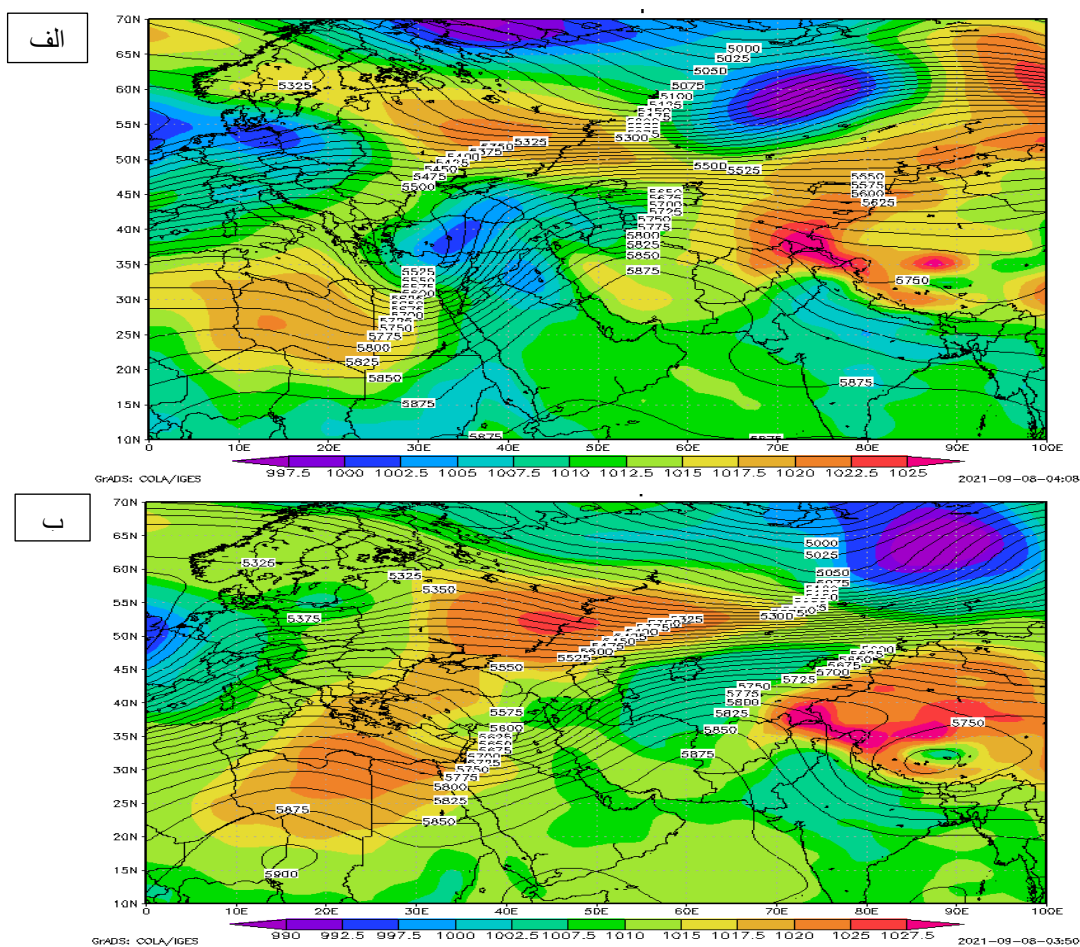
تفسیر نقشه‌های فشار سطح دریا (برحسب هکتوپاسکال) تاریخ ۲۰۱۸/۳/۳۰ روز اوج بارش سنگین، سیستم کم‌فشار قزاقستان به سمت شرق حرکت کرده و تقویت شد (فشار مرکزی ۹۹۰ هکتوپاسکال) که همگرایی شدید و تقویت چرخند مرتبط را به همراه داشت. پرفشار سبیری در تاجیکستان تقویت و پرفشار اروپا با فشار ۱۰۲۵ هکتوپاسکال به سمت شرق کشیده شد که منجر به افزایش واگرایی سطح پایین و توسعه سیستم شد. پرفشار آفریقا نیز به سمت دریای مدیترانه گسترش یافت. کم‌فشار اروپایی به سمت شرق حرکت و تضعیف شد و کم‌فشار ادغامی ترکیه به شرق و قسمت شمال دریای خزر منتقل شد (مرکز فشار ۱۰۰۷/۵ هکتوپاسکال). گرادیان فشار میان کم‌فشار ادغامی و پرفشار اروپا باعث تزیق رطوبت دریای سیاه به شمال غرب ایران شد و صعود توده‌های مرطوب از دریای خزر شرایط بارش سنگین را فراهم کرد. همچنین تعامل هوای سرد پرفشار اروپا (چرخش ساعت‌گرد) با هوای گرم کم‌فشار مدیترانه-سودانی (چرخش پادساعت‌گرد) سبب گسستگی جریان‌ها و افزایش ناپایداری جو در منطقه گردید (شکل ۴-ب).

تفسیر نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیل (برحسب ژئوپتانسیل متر) در تاریخ ۲۰۱۸/۳/۲۹ برای ۲۴ ساعت قبل از بارش سنگین، نشان داد که یک فرود عمیق بر روی دریای مدیترانه با هسته مرکزی ۵۵۲۵ متر ژئوپتانسیل قرار گرفته است. محور فرود شمال غرب-جنوب شرق است و منطقه شمال غرب ایران زیر محور یک فراز نه‌چندان عمیق قرار دارد. در این موقعیت، منطقه تحت تأثیر پرفشار حرارتی است که با توجه به

هوای سرد به هسته فرود است. منطقه شمال غرب ایران زیر جلوی فرود موج بلند مدیترانه قرار گرفته و در ناحیه‌ای با چرخندگی مثبت قرار دارد که باعث افزایش ناپایداری و خروج منطقه از شرایط پایدار روز گذشته می‌شود. همچنین، مرکز کم‌فشار تحت تأثیر این فرود در نیمه شرقی دریای خزر مستقر شده است. در اثر تعامل بین کم‌فشار شرق دریای خزر و پرفشار ترکیه، جبهه زمینی در شمال غرب ایران شکل گرفته است. این جبهه موجب افزایش همگرایی و کژفشاری شده و رطوبت دریای سیاه و دریای خزر را به منطقه جذب می‌کند. افزون بر این، چرخندگی مثبت فرود و جریان رطوبتی دریای مدیترانه باعث تأمین رطوبت بارش سنگین شد و فرآیند صعود در منطقه را تقویت کرد (شکل ۴-ب).

کوهستانی بودن و فصل سرد تقویت شده است. در سطح میانی جو، اوج فراز به دلیل چرخندگی منفی ساعت‌گرد نیمکره شمالی حاوی هوای گرم بوده و باعث ایجاد کم‌فشار حرارتی در زیر محور فرود می‌شود. در این شرایط، سیستم‌های دینامیکی تأثیر چندانی ندارند و فرآیند حرارتی غالب است، بنابراین منطقه تحقیق در این روز تحت شرایط پایدار قرار دارد (شکل ۴-الف).

تفسیر نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیل (برحسب ژئوپتانسیل متر) تاریخ ۲۰۱۸/۳/۳۰ روز اوج بارش سنگین، فرود مدیترانه با حرکت شرق‌سوی بادهای غربی به سمت ترکیه و منطقه تحقیق نزدیک شد (مرکز فرود ۵۵۷۵ متر ژئوپتانسیل). عمق فرود نسبت به روز قبل کاهش یافته و محور فرود به وضعیت شمالی-جنوبی تغییر کرده است، نشان‌دهنده کاهش ریزش

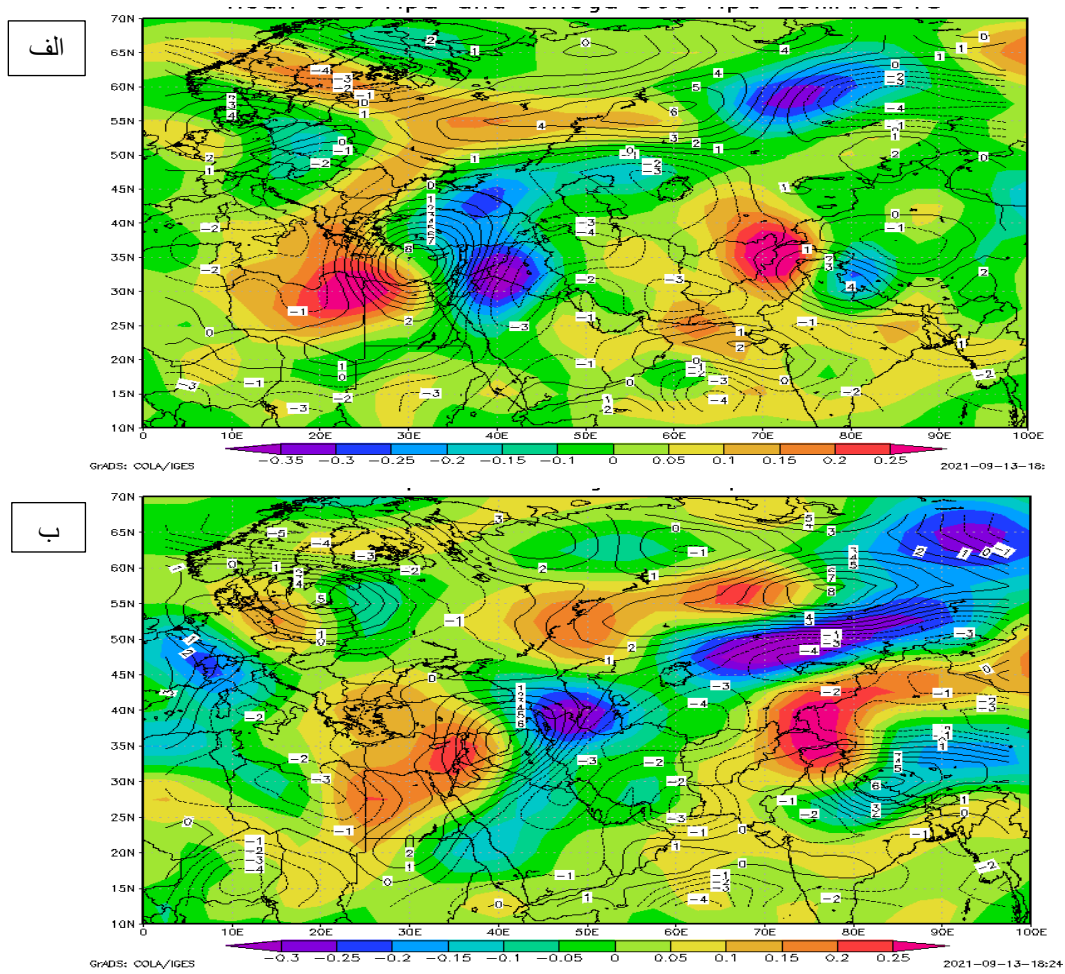


شکل ۴. نقشه ترکیبی، فشار سطح دریا برحسب هکتوپاسکال و ارتفاع ژئوپتانسیل برحسب ژئوپتانسیل متر، الف- تاریخ ۲۰۱۸/۳/۲۹ و ب- تاریخ ۲۰۱۸/۳/۳۰

شدید فشار نشان‌دهنده تغییرات سریع و ناپایداری دینامیکی سیستم‌ها و حرکت‌های مداری قوی است (شکل ۵-ب).  
تفسیر نقشه‌های امگا (برحسب پاسکال بر ثانیه) در تاریخ ۲۰۱۸/۳/۲۹، ۲۴ ساعت پیش از بارش سنگین، هسته امگای منفی بیشینه (۰/۳۵ Pa/s) در طول جغرافیایی ۴۰ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه شمالی قرار داشته و خطوط هم‌امگا به سمت شمال غرب ایران کشیده شده‌اند. این هسته نشان‌دهنده منطقه صعودی در نیمه شرقی محور فرود است و جنوب شرقی آن با بیشینه چرخندگی مثبت منطبق است. در غرب این فرود، هسته امگای مثبت (۰/۲۵ Pa/s) در شمال آفریقا (لیبی و مصر) قرار دارد که شرایط نزول و پایداری را نشان می‌دهد. در نقشه ترکیبی با چرخندگی، بخش غربی فرود (غرب حداکثر چرخندگی مثبت) محدوده نزول است که ناشی از برهم‌کنش چرخندگی مثبت (۸+ نیوتن.متر) و چرخندگی منفی (۲- نیوتن.متر) است. در سطح زمین، این ناحیه با وزش افقی چرخندگی منفی و واگرایی (آنتی‌سیکلون) همراه است (شکل ۵-الف).  
تفسیر نقشه‌های امگا (برحسب پاسکال بر ثانیه) تاریخ ۲۰۱۸/۳/۳۰، روز اوج بارش سنگین، هسته امگای منفی (۰/۳- Pa/s) به شمال غرب ایران انتقال یافت و نسبت به روز قبل کاهش جزئی داشت. این کاهش به دلیل حضور هسته منفی امگا در محدوده سرد شده دریای خزر و فعالیت پرفشار حرارتی بر روی آن است که شدت صعود هوا را کاهش داده است. با این حال، ناپایداری شدید و حرکت‌های صعودی کافی برای بارش سنگین در منطقه مشاهده شد. در جنوب غربی هسته منفی، هسته امگای مثبت (۰/۲۵ Pa/s) بر روی دریای مدیترانه قرار داشته و نسبت به روز قبل تغییری نداشته است (شکل ۵-ب).

تفسیر نقشه‌های تاوایی (برحسب نیوتن در متر) در تاریخ ۲۰۱۸/۳/۲۹ برای ۲۴ ساعت قبل از بارش سنگین، نشان‌دهنده استقرار هسته چرخندگی مثبت (۸+ نیوتن.متر) بر روی دریای مدیترانه بود که بیشینه تاوایی در محدوده جغرافیایی مطالعه را نشان می‌دهد. این هسته با محور فرود موجود در نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل منطبق بوده و حرکت‌های پادساعت‌گرد را همراه دارد. در همان روز، هسته چرخندگی منفی (۴-) نیوتن.متر) در محدوده جنوبی دریای خزر و متمایل به شمال غرب کشور قرار داشت و شرایط نزولی و هوای پایدار را در شمال غرب ایران ایجاد کرده بود. حضور پشته‌ای در جنوب دریای خزر نیز باعث شد منطقه تحت تأثیر هوای صاف و آرام قرار گیرد و در سطح پایین، فرابار حرارتی قابل مشاهده باشد (شکل ۵-الف).

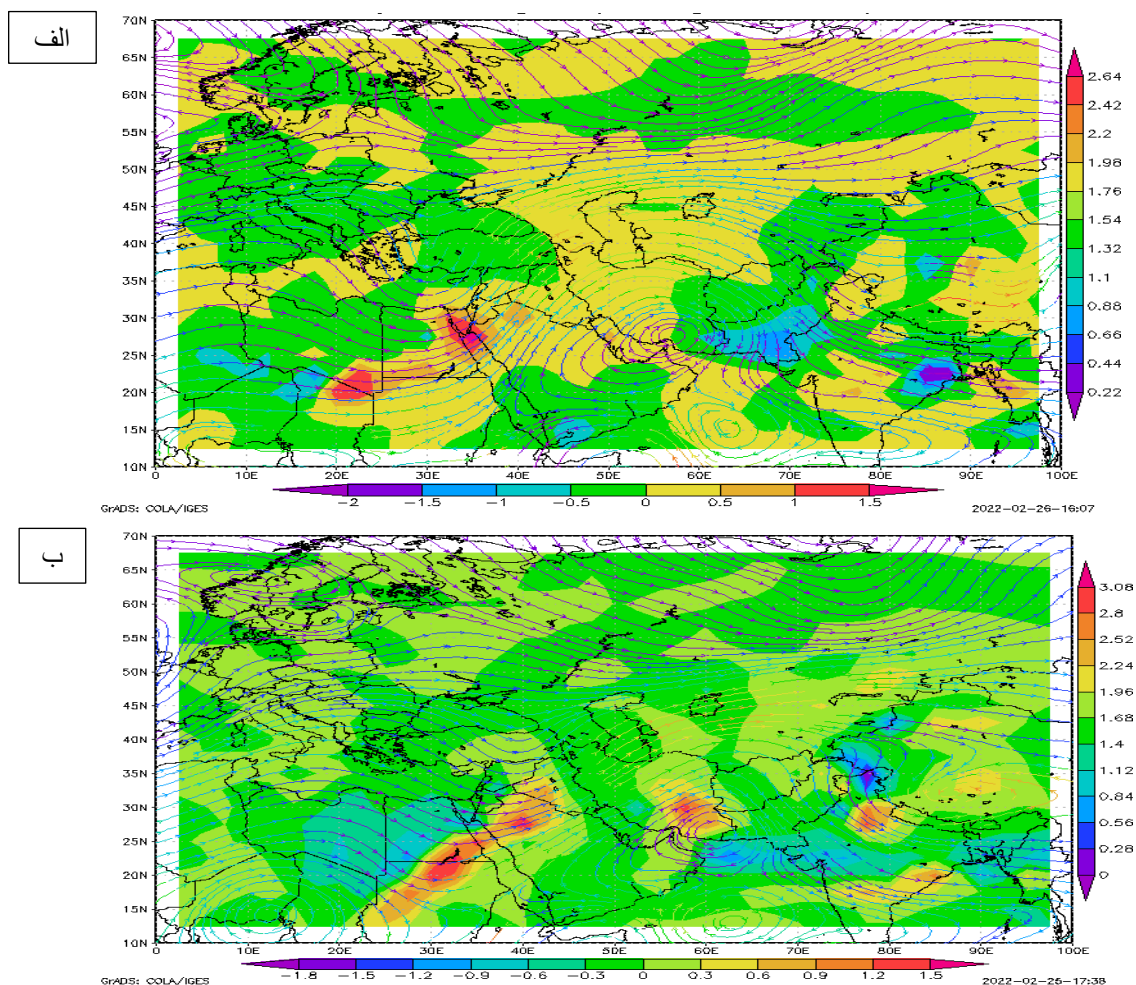
تفسیر نقشه‌های تاوایی (برحسب نیوتن در متر) تاریخ ۲۰۱۸/۳/۳۰، روز اوج بارش سنگین، هسته چرخندگی مثبت (۶+ نیوتن.متر) با حرکت فرود به سمت شرق، بر روی ناحیه مشترک عراق، سوریه و ترکیه مستقر شد و نسبت به روز قبل کاهش جزئی نشان داد که ناشی از کاهش عمق فرود فوقانی است. این هسته دارای چرخندگی سیکلونی مثبت بوده و باعث افزایش ناپایداری در شمال غرب ایران شد. در شرق هسته مثبت، در مرز شمال شرق ایران و ترکمنستان، هسته چرخندگی منفی (۴- نیوتن.متر) با چرخندگی آنتی‌سیکلونی (ساعت‌گرد) مشاهده می‌شود که محدوده واگرایی بالایی را تشکیل داده و با بازوی بالارو فرود منطبق است. این ترکیب موجب اوج صعود هوا در مناطق شرق و جنوب شرق هسته تاوایی مثبت شد و شرایط بارش سنگین در شمال غرب ایران فراهم گردید. کاهش عمق فرود در این روز و وجود گرادبان



شکل ۵- نقشه ترکیبی، تاوایی برحسب نیوتن در متر و امگا برحسب پاسکال بر ثانیه، الف- تاریخ ۲۰۱۸/۰۳/۲۹ و ب- تاریخ ۲۰۱۸/۰۳/۳۰

در روز اوج بارش (۲۰۱۸/۳/۳۰)، مسیر بادهای غربی تغییر کرد و عبور آنها از دریای مدیترانه موجب تأمین رطوبت در شمال غرب ایران شد، اگرچه رطوبت ویژه با  $1/68$  گرم بر کیلوگرم کمی کاهش یافت (شکل ۶-ب). این کاهش نسبت به روز قبل به دلیل قرارگیری منطقه تحقیق در محدوده واگرایی بالایی و تضعیف چرخندگی مثبت فرود فوقانی است که شدت همگرایی رطوبتی را کاهش داده است. با این وجود، شرایط رطوبتی کافی برای وقوع بارش سنگین در شمال غرب ایران برقرار بوده است.

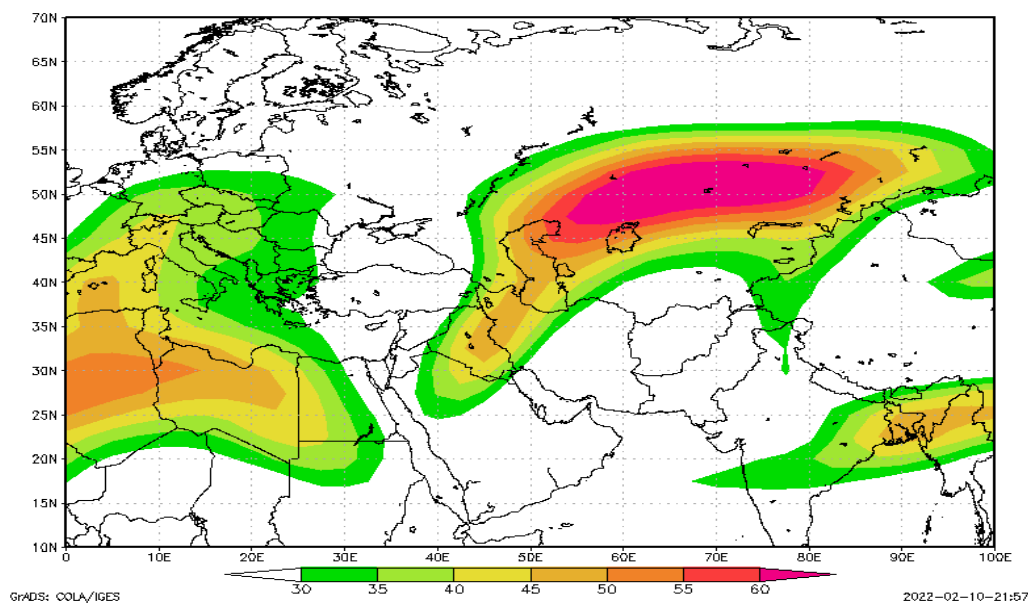
تفسیر نقشه‌های وزش رطوبتی (برحسب گرم بر کیلوگرم در متر بر ثانیه) و نقشه‌های همگرایی و واگرایی رطوبتی (برحسب گرم بر کیلوگرم) در تاریخ ۲۰۱۸/۳/۲۹ برای ۲۴ ساعت قبل از بارش سنگین، تغذیه رطوبتی شمال غرب ایران عمدتاً توسط بادهای غربی عبوری از دریای سرخ تأمین شده است، به طوری که رطوبت ویژه در منطقه حدود  $2/2$  گرم بر کیلوگرم بوده است (شکل ۶-الف). در همین روز، بیشینه همگرایی رطوبتی بر روی شمال دریای سرخ نزدیک شبه‌جزیره سینا قرار داشته و عبور بادهای غربی موجب انتقال رطوبت به شمال غرب ایران شده است؛ میزان رطوبت ویژه در این ناحیه حدود  $1/5$  گرم بر کیلوگرم بوده است.



شکل ۶- نقشه ترکیبی، وزش رطوبتی بر حسب گرم بر کیلوگرم در متربرثانه، نقشه همگرایی رطوبتی بر حسب گرم بر کیلوگرم، الف- تاریخ ۲۰۱۸/۰۳/۲۹ و ب- تاریخ ۲۰۱۸/۰۳/۳۰

حضور این جت در لایه بالایی تروپوسفر (تروپوپاز) به تشدید واگرایی ایجادشده توسط موج بادهای غربی در تراز میانی کمک کرده و با افزایش صعود، همگرایی تراز پایین را تقویت می کند. این فرآیند موجب تقویت کم فشار دینامیکی و افزایش صعود در منطقه شده و نقش مهمی در ایجاد بارش سنگین ایفا می کند (شکل ۷).

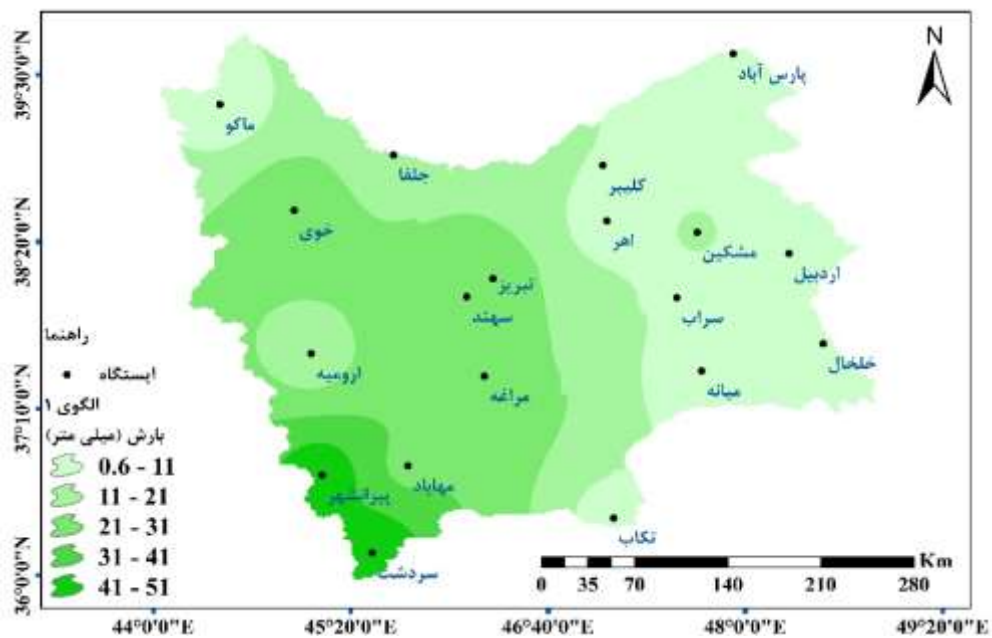
در روز بارش سنگین، هسته جت جبهه قطبی با سرعت ۴۵ متر بر ثانیه در تراز بالای ۴۰۰-۲۰۰ هکتوپاسکال قرار داشت و عرضهای ۳۳ تا ۳۹ درجه شمالی را پوشش می داد؛ منطقه مورد مطالعه تحت سرعت های کمتر این جت قرار گرفت. جت تا تراز ۵۵۰ هکتوپاسکال نیز با سرعت حدود ۳۰ متر بر ثانیه در عرض جغرافیایی ۳۵ درجه شمالی کشیدگی داشت.



شکل ۷- نقشه جت، تاریخ ۲۰۱۸/۳/۳۰

ایستگاه سردشت با مقدار ۵۱ میلی متر ثبت شده است (شکل ۸).

نقشه پهنه‌بندی بارش سنگین روز نماینده تاریخ ۲۰۱۸/۳/۳۰، در این روز بیشینه بارش سنگین در قسمت‌های جنوب غربی منطقه تحقیق مشاهده می‌شود که حداکثر بارش سنگین در



شکل ۸-نقشه پهنه‌بندی بارش سنگین تاریخ ۲۰۱۸/۳/۳۰

## ۳-۲. الگوی نوع دوم (ادغام سیستم سودانی، مدیریتانه‌ای و ایسلندی): تحلیل همدید بارش سنگین تاریخ ۲۰۰۶/۲/۳ (۱۳۸۴/۱۱/۱۴):

در تاریخ ۲۰۰۶/۲/۲ برای ۲۴ ساعت قبل از بارش سنگین، پرفشار سبیری با هسته‌ای حدود ۱۰۲۵ هکتوپاسکال در شمال غرب ایران واقع شده بود که همراه با چرخندگی منفی (آنتی سیکلون) و تقویت ناشی از استیلای شرایط سرد فصل، موجب ایجاد جو پایدار در منطقه شد؛ بنابراین وقوع بارش در شمال غرب ایران انتظار نمی‌رفت و این موضوع با داده‌های ایستگاهی نیز تطابق دارد. همچنین پرفشار حرارتی تاجیکستان با هسته‌ای در حدود ۱۰۳۰ هکتوپاسکال در شرق ایران استقرار داشت. در عرض‌های بالاتر شمالی، کم‌فشار ایسلندی چند هسته‌ای با مقدار مرکزی حدود ۱۰۰۷ هکتوپاسکال حاکم بود و در غرب ایران نیز کم‌فشار مدیریتانه‌ای دو هسته‌ای با مقدار مشابه بر فراز دریای مدیترانه مشاهده می‌شد. علاوه بر این، در جنوب غرب ایران کم‌فشار دینامیکی سودانی با هسته‌ای نزدیک به ۱۰۰۷ هکتوپاسکال مستقر بود. برهم کنش هوای سرد پرفشار سبیری با کم‌فشار ایسلندی بر فراز قزاقستان نیز منجر به تشکیل یک سیستم جبهه‌ای در سطح زمین شد. (شکل ۹-الف).

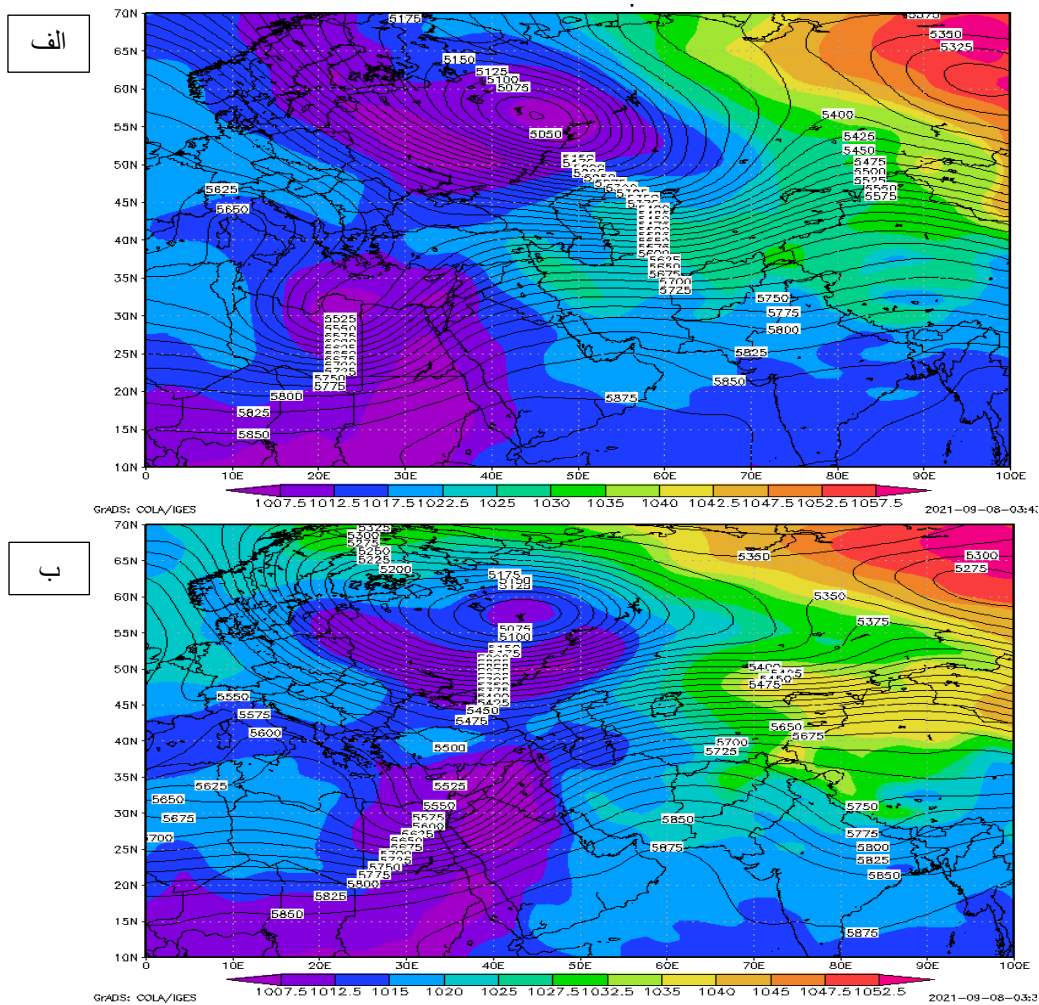
تفسیر نقشه‌های فشار سطح دریا (برحسب هکتوپاسکال) تاریخ ۲۰۰۶/۲/۳ روز اوج بارش سنگین، در این روز، مراکز فشار تحت تأثیر حرکت موجی بادهای غربی و تغییرات در تراز بالا، دچار تغییر شدند: پرفشار تاجیکستان تقویت شده و هسته آن به ۱۰۳۵ هکتوپاسکال رسید، با واگرایی سطح پایین و ایجاد چرخندگی منفی. پرفشار شمال غرب ایران به سمت افغانستان حرکت کرد و فشار کاهش یافت. کم‌فشار مدیریتانه‌ای و کم‌فشار سودانی به سمت شمال غرب ایران کشیده شده و با هم ادغام شدند (هسته مرکزی ۱۰۰۷ هکتوپاسکال) و زبانه‌ای با فشار ۱۰۱۲ هکتوپاسکال شمال غرب ایران را تحت نفوذ قرار داد. این برهم کنش هوای گرم و مرطوب کم‌فشار ادغامی با هوای سرد پرفشار سبیری منجر به تشکیل جبهه زمینی، تشدید فرآیند صعود، افزایش ناپایداری و ایجاد بارش سنگین شد. منابع رطوبتی اصلی

دریای سرخ و دریای مدیترانه بودند. علاوه بر این، کم‌فشار ایسلندی با نزدیک شدن به شمال غرب ایران، اختلاف فشار شدید با پرفشار سبیری ایجاد کرده و باعث وزش باد شدید، جمع‌آوری رطوبت دریای خزر و تقویت بارش شد (شکل ۹-ب).

تفسیر نقشه‌های ژئوپتانسیل (برحسب ژئوپتانسیل متر) در تاریخ ۲۰۰۶/۲/۲ برای ۲۴ ساعت قبل از بارش سنگین، نشان می‌دهد که در عرض‌های بالای روسیه بلو کینگ کم‌فشار نسبتاً پایداری قرار داشته که نقش مانع فوقانی را ایفا می‌کند. بر روی دریای مدیترانه ناوهای عمیق با هسته مرکزی ۵۵۲۵ ژئوپتانسیل متر روی شمال لیبی مستقر بود و محور آن جنوب غربی-شمال شرقی کشیده شده بود. این فرود دینامیکی باعث ایجاد چرخندهای چند هسته‌ای در شرق و جنوب مدیترانه شد. ناوه مذکور به‌عنوان موج کوتاه در بستر موج بلند عمل می‌کرد و با حرکت موجی در تراز فوقانی جو، سیکلون منطقه برون‌حاره را تقویت می‌کرد. در منطقه تحقیق، بادهای غربی فوقانی حرکت نسبتاً مداری داشتند و به دلیل دوره سرد سال و توپوگرافی کوهستانی، مرکز پرفشار حرارتی با هسته سرد غالب بود.

تفسیر نقشه‌های ژئوپتانسیل (برحسب ژئوپتانسیل متر) تاریخ ۲۰۰۶/۲/۳ روز اوج بارش سنگین، بلو کینگ عرض‌های بالا در روسیه تقریباً ثابت باقی ماند و نقش سیستم مانع فوقانی را حفظ کرد. هسته آن از ۵۰۲۵ به ۵۰۷۵ ژئوپتانسیل متر افزایش یافت که کاهش عمق و شیب فرود و کاهش گسیل هوای سرد را نشان می‌دهد. ناوه عمیق دریای مدیترانه به سمت قبرس حرکت کرده و محور فرود شمالی-جنوبی پیدا کرد و به شمال غرب ایران نزدیک شد. هسته مرکزی سیکلون سطح بالا به شمال عربستان، عراق و سوریه کشیده شد و نیمه شرقی محور ناوه زیر جلوی فرود منطقه مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار داد، ایجاد صعود و مکش رطوبت دریای مدیترانه و دریای سرخ به سمت بازوی بالارو را تقویت کرد. حضور پشته با محور شمال شرقی-جنوب غربی و چرخندگی منفی در شرق ناوه همراه با چرخندگی مثبت فرود فرآیند صعود و همرفت را شدت بخشید و موجب ناپایداری و بارش سنگین

شد. تراکم خطوط ژئوپتانسیل در بازوی بالارو نیز نشان‌دهنده نیروی گرادیان قوی و صعود شدید در منطقه است.



شکل ۹- نقشه ترکیبی، فشار سطح دریا برحسب هکتوپاسکال و ارتفاع ژئوپتانسیل برحسب ژئوپتانسیل متر، الف- تاریخ ۲۰۰۶/۰۲/۰۲ و ب- تاریخ ۲۰۰۶/۰۲/۰۳

است. در تراز میانی جو، اوج فراز محل حداکثر چرخندگی منفی و با دوران ساعت‌گرد باعث نزول توده‌های هوایی می‌شود و در مقابل نقطه حوضیض فرود محل حداکثر چرخندگی مثبت و با دوران پادساعت‌گرد باعث صعود توده‌های هوایی می‌شود. اثر چرخندگی مثبت و منفی بر توده‌های هوایی در نیمه شرقی فرود و فراز دیده می‌شود به طوری که چرخندگی مثبت در جلوی فرود موجب ایجاد کم‌فشار دینامیکی فوقانی و واگرایی و چرخندگی منفی در جلوی فراز موجب ایجاد پرفشار دینامیکی فوقانی و همگرایی

تفسیر نقشه‌های تاوایی (برحسب نیوتن در متر) در تاریخ ۲۰۰۶/۲/۲ برای ۲۴ ساعت قبل از بارش سنگین، نشان می‌دهد که هسته چرخندگی مثبت با مقدار +۶ نیوتن در متر بر روی شمال لیبی مستقر بوده و خطوط هم تاوایی آن به سمت شمال شرقی کشیده شده‌اند، در حالی که هسته چرخندگی منفی با مقدار -۴ نیوتن در متر در شمال غرب این هسته مثبت و روی دریای مدیترانه قرار دارد. تطبیق این نقشه با نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل نشان می‌دهد که هسته چرخندگی مثبت منطبق بر مرکز فرود و هسته چرخندگی منفی منطبق بر مرکز فراز

بخشی از امگای منفی نیز در محدوده چرخندگی منفی قرار دارد که آنجا نیز حرکت‌های صعودی حاکم است و در بخش مرکزی امگای منفی، حداکثر سرعت صعود مربوط به محل چرخندگی مطلق صفر (گشتنگاه موج) است. در غرب امگای منفی در شمال آفریقا (لیبی) هسته مرکزی امگای مثبت با مقدار  $+0/2$  پاسکال بر ثانیه حضور دارد که منطبق بر بازوی پایین‌رو فرود است. در سطح پایین، منطقه‌ای که چرخندگی منفی به سمت چرخندگی مثبت حرکت می‌کند با کاهش مساحت افقی توده‌های هوایی همراه است و همگرایی در سطح بالا ایجاد می‌شود. تحت تأثیر حرکت‌های عمودی توده‌های هوایی، واگرایی در سطح پایین و در نتیجه آنتی‌سیکلون تشکیل می‌شود (شکل ۱۰-الف).

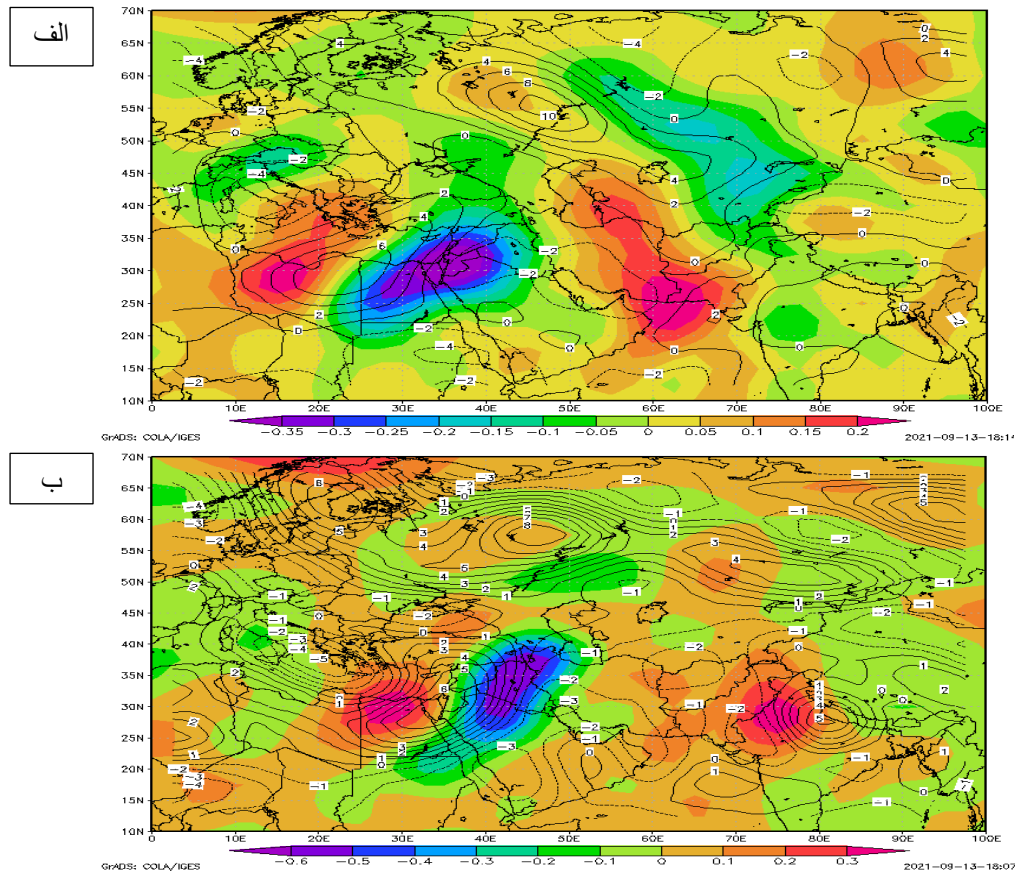
تفسیر نقشه‌های امگا (برحسب پاسکال بر ثانیه) تاریخ ۲۰۰۶/۲/۳ روز اوج بارش سنگین، هسته بیشینه امگای منفی با مقدار  $-0/6$  پاسکال بر ثانیه بر روی شمال غرب ایران مستقر شده و سرعت حرکت عمودی توده‌های هوایی افزایش یافته که نشان‌دهنده تشدید ناپایداری در منطقه است. تقویت این امگای منفی علاوه بر عوامل دینامیکی، ناشی از کوهستانی بودن منطقه و صعود اجباری توده‌های هوایی است. با توجه به نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل، امگای منفی در منطقه بالارو و محدوده صعود توده‌های هوایی قرار دارد و شرایط ناپایداری برای بارش سنگین فراهم است. محدوده امگای منفی منطبق بر محل سیکلون سطح پایین است و از هسته مرکزی امگای منفی (چرخندگی صفر) عبور می‌کند که محل حداکثر صعود و تغییر جهت گشتاور است و با همگرایی شدید در سطح پایین، مکش رطوبتی به منطقه تحقیق گسیل می‌شود که تشکیل ابر و بارش سنگین را امکان‌پذیر می‌سازد. در قسمت جنوب غربی این امگای منفی، هسته امگای مثبت با مقدار  $+0/3$  پاسکال بر ثانیه در شمال آفریقا (مصر) قرار دارد که نشان‌دهنده حرکت نزولی و شرایط فشارورود است و در عقب فرود موج جای گرفته است. این منطقه در سطح پایین واگرایی پایینی دارد و شرایط هوای صاف و آرام را نشان می‌دهد و به دلیل نبود ابر، نوسانات دمایی شب و روز افزایش

می‌شود. بازوی بالارو فرود نیمه شرقی با چرخندگی مثبت قبل از گشتنگاه و چرخندگی منفی بعد از گشتنگاه منجر به صعود توده‌های هوایی و تشکیل سیکلون و همگرایی سطح پایین می‌شود (شکل ۱۰-الف).

تفسیر نقشه‌های تاوایی (برحسب نیوتن در متر) تاریخ ۲۰۰۶/۲/۳ روز اوج بارش سنگین، هسته چرخندگی مثبت با تاوایی  $+6$  نیوتن در متر به سمت شرق و روی دریای مدیترانه واردن حرکت کرده و خطوط هم تاوایی آن شمال غرب ایران را پوشش می‌دهد. مرکز فرود منطبق بر هسته تاوایی مثبت است و شرایط ناپایداری در بازوی بالارو فرود رخ داده است. تطبیق با نقشه امگا نشان می‌دهد که حداکثر امگای منفی در منطقه تحقیق قرار دارد و رابطه معکوس بین تاوایی و امگا برقرار است، به طوری که بعد از گشتنگاه علیرغم غالب بودن چرخندگی منفی، امگا منفی به دلیل صعود توده‌های هوایی ادامه دارد و منطقه گذار مشاهده می‌شود. در این روز بیشینه صعود زیر مرکز واگرایی فوقانی و وزش افقی چرخندگی مثبت رخ داده و سیکلون سطح پایین در زیر گشتنگاه موج تشکیل شده است، به عبارتی عبور از حداکثر چرخندگی مثبت به حداکثر چرخندگی منفی باعث کاهش چرخندگی و افزایش مساحت افقی توده‌های هوایی شده و واگرایی بالایی شرایط همگرایی و صعود شدید سطح پایین را فراهم کرده است (شکل ۱۰-ب).

تفسیر نقشه‌های امگا (برحسب پاسکال بر ثانیه) در تاریخ ۲۰۰۶/۲/۲ برای ۲۴ ساعت قبل از بارش سنگین، نشان می‌دهد که هسته مرکزی امگای منفی با مقدار  $-0/35$  پاسکال بر ثانیه بر روی اردن قرار گرفته و خطوط هم امگا به سمت شمال غرب ایران کشیده شده‌اند. تطبیق این نقشه با نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل نشان می‌دهد که امگای منفی در بازوی بالارو فرود قرار دارد و همان‌طور که امگای منفی سرعت حرکت عمودی توده‌های هوایی را صعودی نشان می‌دهد، علت علامت منفی آن به دلیل کاهش سرعت صعود ناشی از نیروی گرانش است. شرایط ناپایداری در حال حرکت به سمت منطقه تحقیق است و بدون توجه به نقشه چرخندگی می‌توان نزدیکی امگای منفی به چرخندگی مثبت را مشاهده کرد.

می‌یابد و وارونگی دمایی در نزدیکی سطح زمین محتمل است (شکل ۱۰-ب).



شکل ۱۰- نقشه ترکیبی، تاوایی برحسب نیوتن در متر و امگا برحسب پاسکال بر ثانیه،

الف- تاریخ ۲۰۰۶/۰۲/۰۲ و ب- تاریخ ۲۰۰۶/۰۲/۰۳

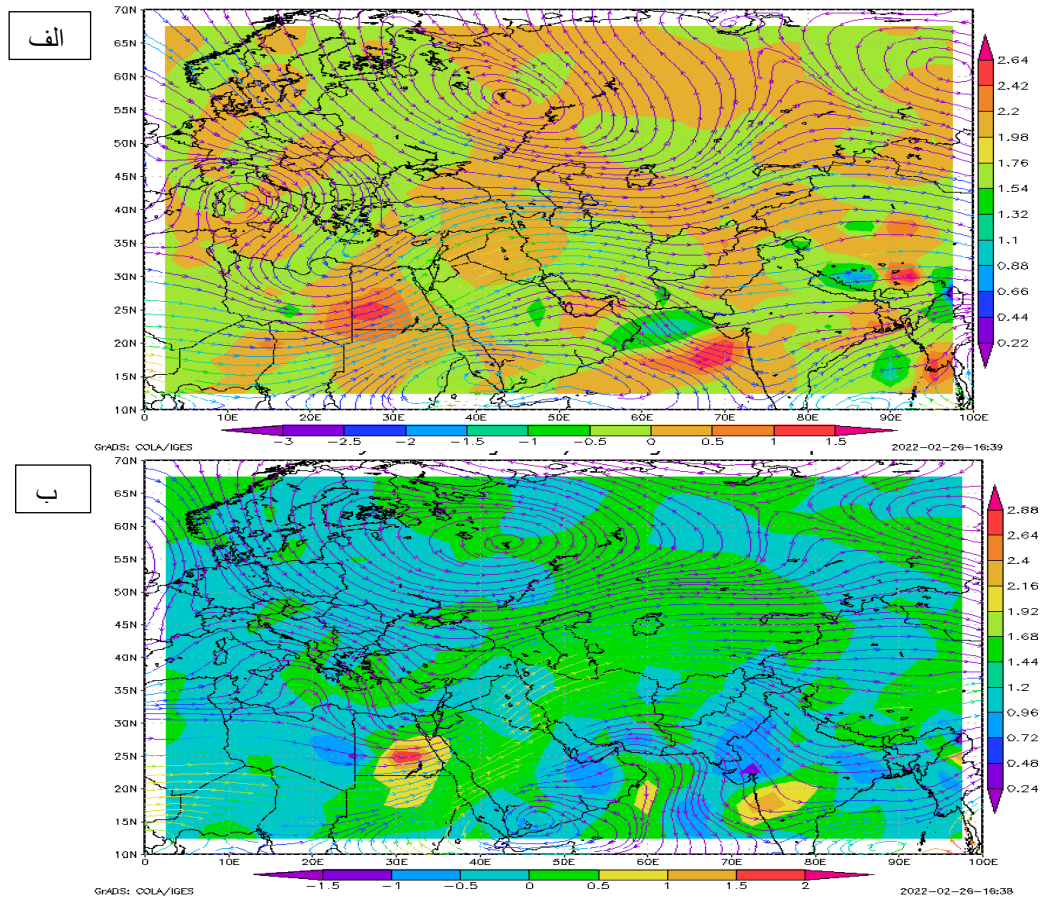
افزایش، تقویت منابع رطوبتی است که علاوه بر دریای مدیترانه، با گذر از دریای سرخ بر رطوبت ویژه افزوده‌اند و حرکت بادهای غربی از مداری به نصف‌النهاری تبدیل شده است (شکل ۱۱-الف و ب).

تفسیر نقشه‌های همگرایی و واگرایی رطوبتی در تاریخ ۲۰۰۶/۲/۲ نشان می‌دهد بیشینه همگرایی رطوبتی در شمال آفریقا بر روی مصر مستقر است و میزان رطوبت ویژه ۱ گرم بر کیلوگرم است که بادهای غربی با گذر از این منطقه رطوبت را جذب کرده و به شمال غرب ایران منتقل کرده‌اند. در روز اوج بارش، ۲۰۰۶/۲/۳، بیشینه همگرایی نیز در مصر واقع شده و میزان رطوبت مکش شده به ۱/۵ گرم بر کیلوگرم رسیده است. نزدیکی منطقه همگرایی حداکثر و قرارگیری

تفسیر نقشه‌های وزش رطوبتی در تاریخ ۲۰۰۶/۲/۲ نشان می‌دهد که فرارفت مداری بادهای غربی در شمال غرب ایران مشهود است و تنها منبع تأمین رطوبت منطقه دریای مدیترانه است. میزان رطوبت گسیل شده در تراز میانی جو به شمال غرب ایران ۱/۳۲ گرم بر کیلوگرم است و بیشینه فرارفت رطوبتی در کل محدوده مورد ارزیابی در شمال غرب عربستان با مقدار ۲/۲ گرم بر کیلوگرم مشاهده می‌شود که تحت تأثیر عبور بادهای غربی از دریای مدیترانه و تقویت در دریای سرخ به عربستان منتقل شده است. در روز اوج بارش، ۲۰۰۶/۲/۳، میزان رطوبت ویژه گسیل شده توسط بادهای غربی در منطقه تحقیق تقریباً ۲ گرم بر کیلوگرم است که نسبت به روز گذشته افزایش قابل توجهی دارد. علت این

رطوبت‌زدایی به خود جذب و در منطقه بارش سنگین شمال غرب ایران تخلیه می‌کند و میزان رطوبت لازم برای بارش شدید مهیا می‌شود (شکل ۱۱-الف و ب).

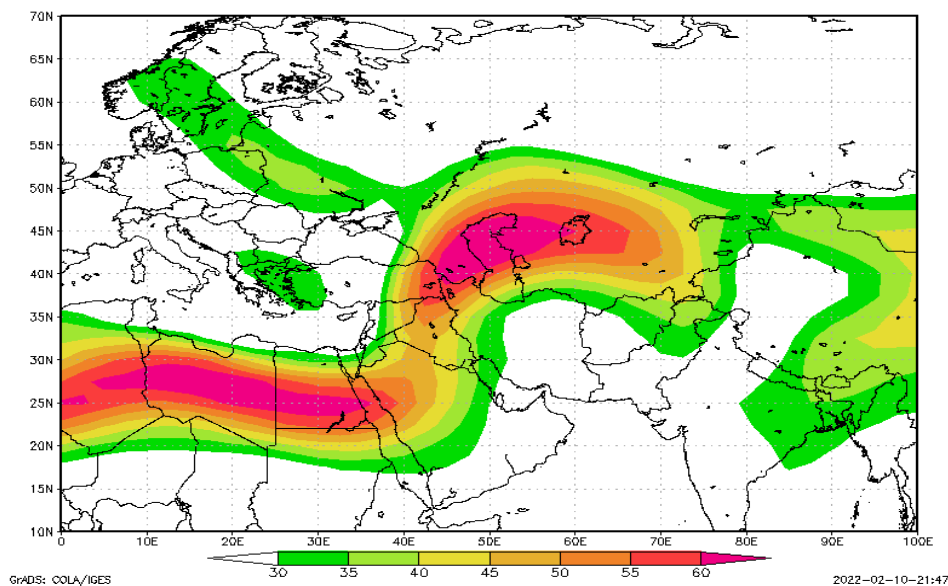
در جنوب شرقی مرکز فرود باعث کاهش مساحت افقی توده‌های هوایی و مکش بالای رطوبت ویژه می‌شود و نسبت به روز گذشته تقویت یافته است. باد رطوبت را با فرآیند



شکل ۱۱-نقشه ترکیبی، وزش رطوبتی بر حسب گرم بر کیلوگرم در متر بر ثانیه، نقشه همگرایی رطوبتی بر حسب گرم بر کیلوگرم، الف- تاریخ ۲۰۰۶/۰۲/۰۲ و ب- تاریخ ۲۰۰۶/۰۲/۰۳

سیکلون سطح پایین و بارش سنگین را فراهم می‌کند. جت در تراز پایین تر ۴۵۰ هکتوپاسکالی نیز با سرعت حدود ۳۰ متر بر ثانیه و کشیدگی تا عرض ۴۰ درجه شمالی حضور دارد که حرکت باروکلینیک در سطح پایین و جریان صعود اجباری توده‌های هوایی را تقویت می‌کند. در نتیجه، ترکیب واگرایی فوقانی و تقویت جریان صعودی سطح پایین، شرایط ناپایدار و بارش سنگین در شمال غرب ایران را ایجاد کرده است.

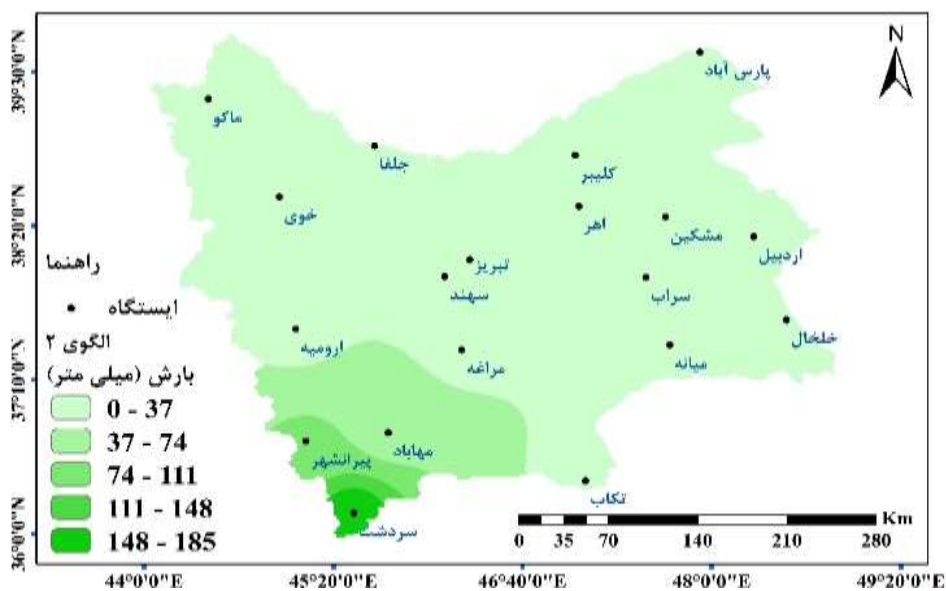
تفسیر نقشه جت بارش سنگین تاریخ ۲۰۰۶/۰۲/۰۳، هسته جت جبهه قطبی در تراز ۲۵۰ هکتوپاسکالی با سرعت ۶۵ متر بر ثانیه در عرض جغرافیایی حدود ۴۲ درجه شمالی قرار دارد. هرچند هسته اصلی جت شمال تراز شمال غرب ایران واقع شده است، اما لبه جنوبی آن بر روی شمال غرب کشور تأثیر مستقیم دارد و باعث ایجاد واگرایی فوقانی شدید می‌شود. این واگرایی در تراز فوقانی، همراه با تقویت صعود در سطح پایین و افزایش همگرایی بادهای، شرایط لازم برای تشدید



شکل ۱۲- نقشه جت، تاریخ ۲۰۰۶/۰۲/۰۳

سنگین در ایستگاه سردشت با مقدار ۱۸۵ میلی‌متر ثبت شده است (شکل ۱۳).

نقشه پهنه‌بندی بارش سنگین روز نماینده تاریخ ۲۰۰۶/۰۲/۰۳، در این روز بیشینه بارش سنگین در قسمت‌های جنوب غربی منطقه تحقیق مشاهده می‌شود که حداکثر بارش



شکل ۱۳- نقشه پهنه‌بندی بارش سنگین تاریخ ۲۰۰۶/۰۲/۰۳

تفسیر نقشه‌های فشار سطح دریا (برحسب هکتوپاسکال) در تاریخ ۲۰۱۴/۱۰/۱۹، برای ۲۴ ساعت قبل از بارش سنگین، نشان می‌دهد که در سطح پایین مراکز فشار به شرح زیر

۳-۳. الگوی نوع سوم (سردچال سوریه): تحلیل همدید بارش سنگین تاریخ ۲۰۱۴/۱۰/۲۰ (۱۳۹۳/۷/۲۸):

همگرایی و افزایش مکش رطوبتی و نهایتاً تشدید بارش می‌شود. علاوه بر این، بر اثر برخورد توده‌های سرد پرفشار اروپا با توده‌های گرم کم‌فشار سودانی در شمال غرب ایران، جبهه زمینی تشکیل شده و شرایط کژفشاری و اختلاف فشار ناشی از این دو مرکز، باعث هدایت رطوبت دریای خزر به منطقه و تقویت بارش می‌شود (شکل ۱۴ ب).

تفسیر نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیل (برحسب ژئوپتانسیل متر) در تاریخ ۲۰۱۴/۱۰/۱۹ برای ۲۴ ساعت قبل از بارش سنگین، نشان می‌دهد که یک سیستم فرود بسیار عمیق با ارتفاع ۵۲۷۵ ژئوپتانسیل متر به صورت یک پربند بسته بر روی روسیه در طول جغرافیایی ۵۵ درجه شرقی و عرض ۶۰ درجه شمالی مستقر است و به عنوان بلو کینگ کم‌فشار بریده عمل می‌کند. این سیستم باعث تقویت حرکت‌های نصف‌النهاری بادهای غربی و افزایش عمق آن‌ها شده است. محور سردچال شمال شرقی-جنوب غربی است و محدوده کنتورهای فرود از ۵۲۷۵ تا ۵۸۵۰ ژئوپتانسیل متر کشیده شده است. بادهای ارتفاع میانی ایران به صورت مداری (غربی-شرقی) وزش دارند که نشان‌دهنده چرخندگی مطلق صفر است؛ یعنی برآیند چرخندگی نسبی و زمین یکدیگر را خنثی کرده‌اند و نیروهای وارده بر توده‌های هوایی صفر است، بنابراین توده‌های هوایی با سرعت ثابت به حرکت خود ادامه می‌دهند. در آفریقا یک سیستم بسته فراز مانع مستقر است که حضور آن در شکل ۱۴-الف قابل مشاهده است.

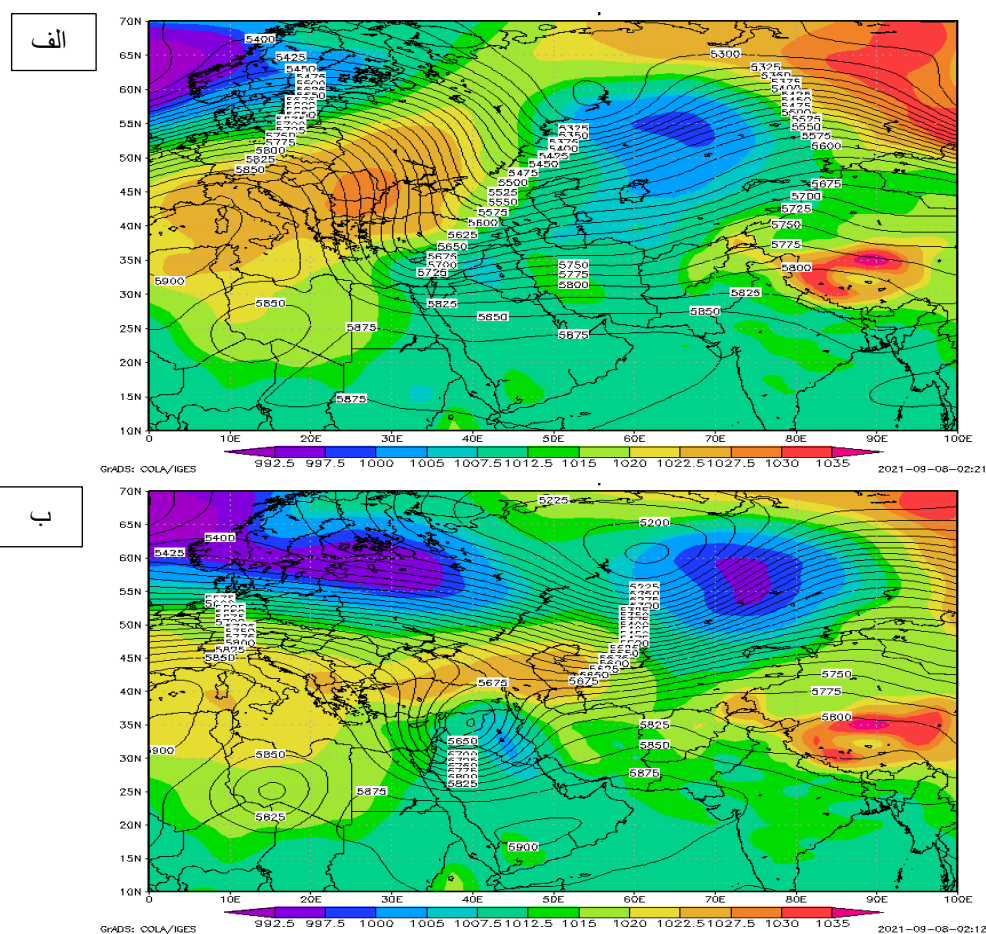
تفسیر نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیل (برحسب ژئوپتانسیل متر) تاریخ ۲۰۱۴/۱۰/۲۰ روز اوج بارش سنگین، فرود عمیق دیروز به دو فرود مجزا تقسیم شد. فرود نخست در عرض‌های بالا با هسته مرکزی ۵۱۷۵ ژئوپتانسیل متر همان فرود دیروز است که به دلیل بلو کینگ و گسیل توده‌های هوای سرد، عمیق‌تر شده و همچنان به صورت بلو کینگ کم‌فشار بریده باقی مانده است. افزایش تعداد پربندها از یک به چهار، عمق فرود را تأیید می‌کند و تراکم خطوط هم‌ارتفاع نشان‌دهنده تشدید نیروی گرادیان و صعود در بازوی بالارو است. فرود دوم با هسته مرکزی ۵۶۲۵ ژئوپتانسیل متر بر روی سوریه قرار دارد، محور آن شمال شرقی-جنوب غربی است و دارای دو

بوده‌اند: مرکز کم‌فشار ایسلندی در عرض‌های بالا به صورت چرخند قدرتمند با هسته ۹۹۲/۵ هکتوپاسکال قرار دارد. کم‌فشار شمالی دریای خزر با هسته مرکزی ۱۰۰۰ هکتوپاسکال روی قزاقستان و منشأ ایسلندی، به صورت چرخند قوی فعال است. کم‌فشار هسته سرد دیگری در غرب ایران با منشأ سودانی و خط هم‌فشار بسته ۱۰۰۷/۵ هکتوپاسکال و یک کم‌فشار دینامیکی با هسته مرکزی ۱۰۱۲/۵ هکتوپاسکال بر غرب ایران تأثیرگذار است. مراکز پرفشار شامل پرفشار اروپایی با هسته مرکزی ۱۰۳۰ هکتوپاسکال به صورت واچرخند قوی در شمال غرب ایران و پرفشار سیبری با هسته مرکزی ۱۰۳۵ هکتوپاسکال در شمال شرق ایران و چین می‌باشد. برهم‌کنش پرفشار اروپایی با کم‌فشار مستقر روی عراق، موجب تشکیل جبهه زمینی بر روی یونان در مدیترانه شده است (شکل ۱۴ الف).

تفسیر نقشه‌های فشار سطح دریا (برحسب هکتوپاسکال) تاریخ ۲۰۱۴/۱۰/۲۰ روز اوج بارش سنگین، کم‌فشار ایسلندی به سمت عرض‌های پایین و ایران نزدیک می‌شود. کم‌فشار شمالی دریای خزر تغییری چندانی نکرده اما به دلیل بلو کینگ فوقانی و تشدید بادهای سرد، هسته مرکزی آن به ۹۹۷/۵ هکتوپاسکال تقویت شده است. پرفشار اروپا به سمت شرق حرکت کرده و در شمال دریای خزر با هسته مرکزی ۱۰۲۲ هکتوپاسکال مستقر شده و نسبت به روز قبل تضعیف یافته است. پرفشار سیبری بدون تغییر باقی مانده است. کم‌فشار سودانی با حرکت پادساعت‌گرد از جنوب غربی عراق به مرکز عراق رسیده و هسته مرکزی آن به ۱۰۰۵ هکتوپاسکال کاهش یافته که نشان‌دهنده تقویت کم‌فشار است و شمال غرب، جنوب غرب و غرب ایران را تحت تأثیر قرار داده است. حرکت این کم‌فشار، توده‌های هوای گرم و مرطوب عرض‌های پایین را به منطقه تحقیق منتقل کرده و با ایجاد ناپایداری و تقویت صعود، شرایط بارش سنگین مهیا می‌گردد. رطوبت مورد نیاز از طریق زبانه‌های کم‌فشار سودانی از منابع دریای سرخ، دریای مدیترانه، دریای عمان و خلیج فارس تأمین می‌شود. حضور هم‌زمان مراکز فشار قوی و متعدد در اطراف ایران، موجب افزایش شیو فشار، تقویت

می‌شود. صعود در بازوی بالارو باعث واگرایی و انبساط هوا می‌شود و با کاهش چرخندگی در نزدیکی فراز، همگرایی سطح پایین تقویت شده و تشکیل چرخند تحتانی موجب تقویت باروکلینیک می‌شود. رطوبت مورد نیاز از دریای سیاه و سپس دریای مدیترانه به شمال غرب ایران منتقل شده و صعود فوقانی را تقویت می‌کند. حضور بلوکلینک موجب انسداد جوی و ماندگاری سیستم در منطقه شده و شرایط بارش سنگین را مهیا می‌کند (شکل ۱۴-ب).

پرنند بسته می‌باشد. این فرود باعث دوشاخه شدن بادهای غربی و کاهش حرکت آن‌ها در منطقه می‌شود و حرکت چرخندگی مثبت، فرافت هوای گرم و مرطوب را به سمت منطقه تحقیق هدایت می‌کند. منطقه تحقیق بین کنتورهای ۵۶۷۵ تا ۵۷۲۵ ژئوپتانسیل متر قرار گرفته و با قرارگیری در نیمه شرقی فرود، ناپایداری از طریق حرکت‌های عمودی توده‌های هوایی به سطح پایین منتقل شده و شرایط صعود مهیا می‌شود. در قسمت غربی فرود، نزول شدید هوای سرد موجب عمیق‌تر شدن هسته سرد و تقویت چرخندگی مثبت



شکل ۱۴- نقشه ترکیبی، فشار سطح دریا برحسب هکتوپاسکال و ارتفاع ژئوپتانسیل برحسب ژئوپتانسیل متر، الف- تاریخ ۲۰۱۴/۱۰/۱۹ و ب- تاریخ ۲۰۱۴/۱۰/۲۰

دوران پادساعت‌گرد در حال گسترش خطوط خود به سمت شرق هستند. این شرایط نشان‌دهنده نزدیک شدن ناپایداری به منطقه شمال غرب ایران است که در قسمت شرقی این چرخندگی مثبت واقع شده و حداکثر چرخندگی مثبت فوقانی در مرکز فرود نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل قرار دارد؛ به

تفسیر نقشه‌های تاوایی (برحسب نیوتن در متر) در تاریخ ۲۰۱۴/۱۰/۱۹ برای ۲۴ ساعت قبل از بارش سنگین، نشان می‌دهد که هسته مرکزی چرخندگی مثبت با مقدار +۶ نیوتن در متر بر روی دریای مدیترانه و ترکیه مستقر است. حلقه‌های هم‌تاوایی با قدر نسبت ۱ به صورت هم‌مرکز قرار دارند و با

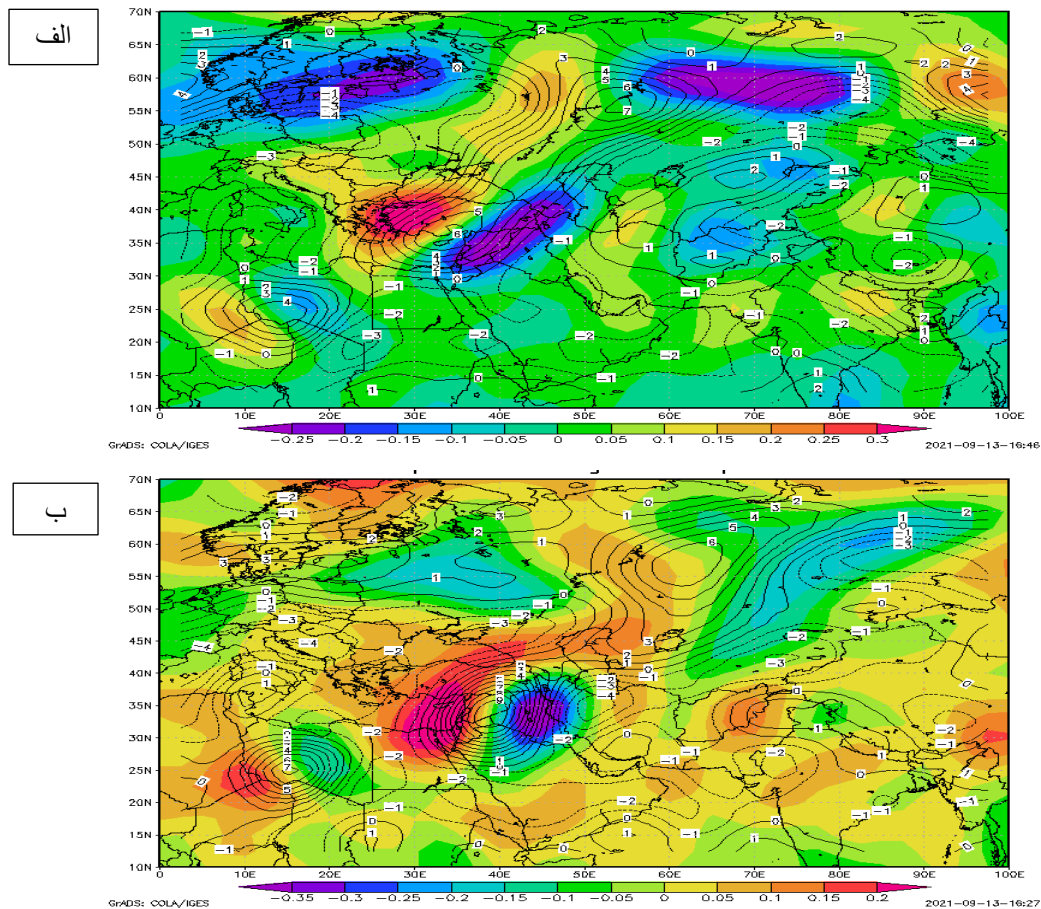
سرعت حرکت صعودی توده‌های هوایی کاهش می‌یابد که عامل کاهش شتاب و علامت منفی امگا در منطقه است. هسته امگای منفی در نیمه شرقی چرخندگی مثبت، محل واگرایی بالایی توده‌های هوایی قرار دارد و بیشینه آن در شرق و جنوب شرق چرخندگی مثبت مشهود است. با حرکت به سمت شمال شرق چرخندگی مثبت، با وجود صعودی بودن جریان، شدت امگای منفی کاهش می‌یابد و تحت تأثیر نزدیکی به حداکثر چرخندگی منفی (اوج فراز) کمتر می‌شود. در بخش غربی هسته منفی امگا، بیشینه امگای مثبت در شمال غرب و غرب فرود مستقر است که بر روی غرب ترکیه با مقدار  $+0/3$  پاسکال بر ثانیه واقع شده و نشان‌دهنده حرکت‌های نزولی شدید است. در تراز پایین، زیر این منطقه، آنتی‌سیکلون شکل گرفته که با نقشه میانگین سطح دریا قابل مشاهده است (شکل ۱۵-الف).

تفسیر نقشه‌های امگا (برحسب پاسکال بر ثانیه) تاریخ ۲۰۱۴/۱۰/۲۰ روز اوج بارش سنگین، هسته امگای منفی با بیشینه  $-0/35$  پاسکال بر ثانیه به شمال غرب ایران رسیده و نسبت به دیروز تقویت شده است. این وضعیت نشان‌دهنده کژفشاری شدید در منطقه تحقیق است که ناشی از بلوکینگ و تشدید صعود مکانیکی در مناطق کوهستانی و همرفت دامنه‌ای در فصل پاییز می‌باشد. این منطقه دقیقاً در بازوی بالارو فرود در نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل قرار دارد و امگای منفی در نقشه ترکیبی نیز قابل مشاهده است. شدت صعود معادل گشتنگاه موج است که منجر به ایجاد شرایط بارش سنگین می‌شود. در زیر این منطقه، در تراز سطح دریا، کم‌فشار دینامیکی سطح زمین (چرخند) مستقر است؛ یعنی تمام سیستم‌های لازم برای بارش سنگین باهم حضور دارند (سیکلون قوی و جبهه در سطح پایین، فرود عمیق و بلوکینگ در سطح بالا). در غرب هسته امگای منفی، هسته امگای مثبت بر روی دریای مدیترانه با مقدار  $+0/2$  پاسکال بر ثانیه قرار دارد که بیشینه امگای مثبت در محدوده بررسی است و در بازوی چپ فرود (منطقه پایین‌رو) قرار گرفته است. نسبت به دیروز کاهش یافته زیرا دریای مدیترانه در پاییز به دلیل ظرفیت گرمایی ویژه بالا هنوز حرارت دارد و کم‌فشار

عبارت دیگر، فرود مدیترانه‌ای تحت تأثیر اختلاف دمایی شدید سطح زمین و تقویت بادهای غربی ایجاد شده و سیکلون‌ها را به سمت ایران هدایت می‌کند (شکل ۱۵-الف). تفسیر نقشه‌های تاوایی (برحسب نیوتن در متر) تاریخ ۲۰۱۴/۱۰/۲۰ روز اوج بارش سنگین، هسته مرکزی چرخندگی مثبت با مقدار  $+9$  نیوتن در متر نسبت به دیروز به ایران نزدیک شده و در طول جغرافیایی  $40$  درجه شرقی و عرض جغرافیایی  $35$  درجه شمالی مستقر است. افزایش قدرت چرخندگی ناشی از بلوکینگ باعث تقویت سیستم و تشدید حرکت‌های پادساعت‌گرد در نیمه شرقی بازوی بالارو فرود و در نتیجه حرکت‌های صعودی در این بخش می‌شود. شمال غرب ایران در زیر این بازوی بالارو قرار گرفته و کژفشاری به‌طور چشمگیری تقویت می‌شود. پیش از گشتنگاه، صعود توده‌های هوایی تحت تأثیر چرخندگی مثبت شدت یافته و به نقطه گشت نزدیک می‌شود؛ در این نقطه تعادل بین چرخندگی مثبت و منفی باعث شکل‌گیری بیشینه صعود می‌شود. پس از نقطه گشت، عامل صعود چرخندگی منفی است که به تدریج از شدت آن کاسته می‌شود و چرخندگی مثبت در حال تضعیف است. در شرق هسته چرخندگی مثبت، هسته چرخندگی منفی با مقدار  $-4$  نیوتن در متر بر جنوب دریای خزر مستقر است که نشان‌دهنده فراز و شرایط نزولی است. این وضعیت با نقشه ترکیبی چرخندگی و امگا مطابقت دارد و در محدوده شمال غرب ایران، جلوی محور فرود منطبق بر حداکثر امگای منفی است که نشان‌دهنده سرعت حرکت عمودی صعودی توده‌های هوایی و مهیا بودن شرایط برای بارش سنگین است (شکل ۱۵-ب).

تفسیر نقشه‌های امگا (برحسب پاسکال بر ثانیه) در تاریخ ۲۰۱۴/۱۰/۱۹ برای ۲۴ ساعت قبل از بارش سنگین، نشان می‌دهد که هسته امگای منفی بیشینه با مقدار  $-25$  پاسکال بر ثانیه بر روی سوریه قرار گرفته و خطوط هم‌ارزش آن به سمت شمال غرب ایران کشیده شده‌اند و شرایط باروکلینیک را به منطقه تحقیق منتقل می‌کنند. در حرکت عمودی صعودی، با افزایش ارتفاع و افزایش نیروی گرانش زمین،

حرارتی باعث تضعیف آنتی‌سیکلون می‌شود، بنابراین واگرایی سطح پایین نمی‌تواند نزول توده‌ها را تقویت کند و سرعت قائم نزول نسبت به دیروز کاهش می‌یابد (شکل ۱۵-ب).



شکل ۱۵- نقشه ترکیبی، تاوایی برحسب نیوتن در متر و امگا برحسب پاسکال بر ثانیه،

الف- تاریخ ۲۰۱۴/۱۰/۱۹ و ب- تاریخ ۲۰۱۴/۱۰/۲۰

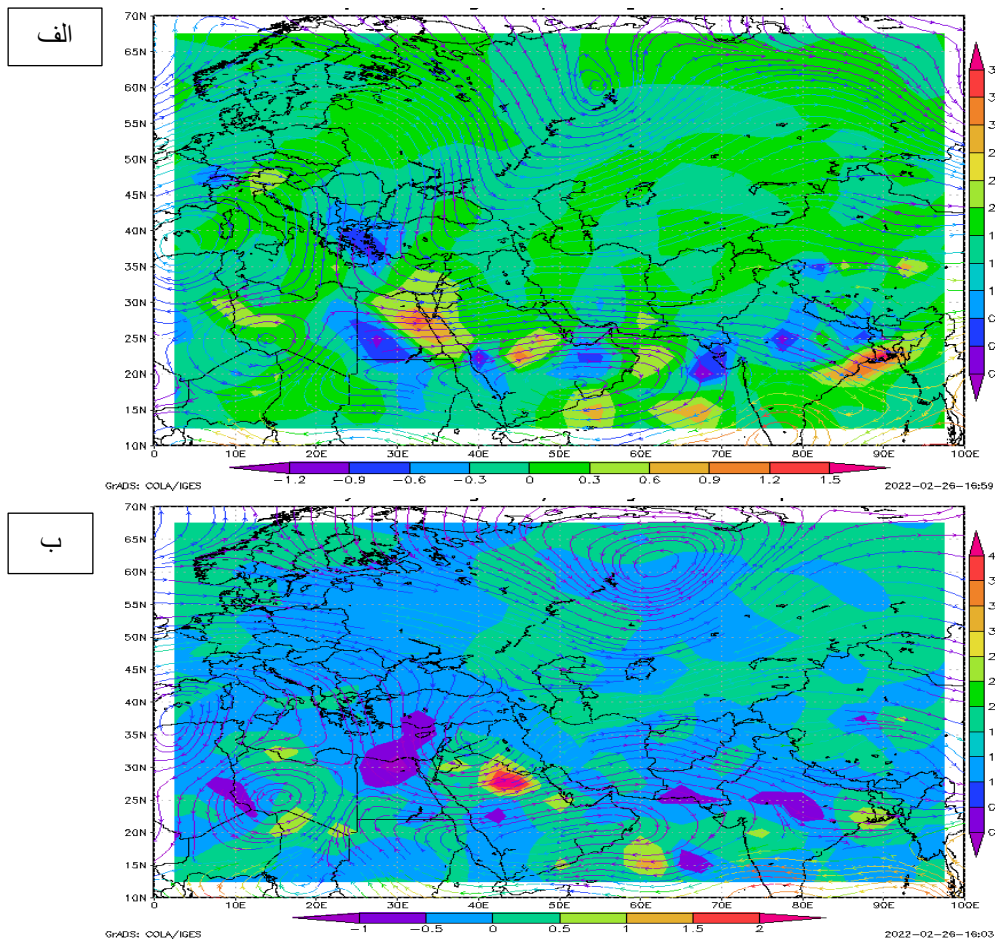
بدون کاهش قابل توجه به منطقه برسد و تخلیه رطوبتی حداقل باشد (شکل ۱۶-الف). در روز اوج بارش سنگین، ۲۰۱۴/۱۰/۲۰، مسیر رطوبتی مشابه بوده و ابتدا از دریای سیاه، سپس دریای مدیترانه و نهایتاً وارد شمال غرب ایران شده است. میزان رطوبت ویژه گسیل شده در تراز میانی جو در این روز به  $2/04$  گرم بر کیلوگرم رسیده که نسبت به روز قبل افزایش یافته است. این افزایش به دلیل وجود بلوکینگ و سکون نسبی سیستم است که مسیر رطوبتی را تثبیت کرده و تزریق رطوبت به منطقه را تسهیل می‌کند و نقش مهمی در بارش سنگین دارد (شکل ۱۶-ب).

تفسیر نقشه‌های وزش رطوبتی (برحسب گرم بر کیلوگرم در متر بر ثانیه) در تاریخ ۲۰۱۴/۱۰/۱۹ برای ۲۴ ساعت قبل از بارش سنگین نشان می‌دهد که فرارفت رطوبتی بادهای غربی از ابتدا دریای سیاه آغاز شده و سپس با عبور از دریای مدیترانه تقویت شده و به سمت شمال غرب ایران هدایت می‌شود. میزان رطوبت ویژه گسیل شده در تراز میانی جو در این روز در شمال غرب ایران برابر با  $1/8$  گرم بر کیلوگرم است که نسبت به سایر نقاط کشور بیشینه است. علت این بیشینه بودن، عبور جریان باد از منابع آبی گسترده و نزدیکی این منابع به منطقه تحقیق است که باعث می‌شود رطوبت

مساحت افقی توده‌های هوایی در نزدیکی مرکز فرود شکل می‌گیرد (شکل ۱۶-الف).

در روز اوج بارش، ۲۰۱۴/۱۰/۲۰، بیشینه همگرایی رطوبتی به شمال غرب عربستان منتقل شده و مقدار آن به ۲ گرم بر کیلوگرم رسیده است که نسبت به روز گذشته افزایش یافته است. بادهای غربی پس از گذر از این منطقه، رطوبت را مکش کرده و به سمت شمال غرب ایران هدایت می‌کنند و در آنجا تخلیه می‌شود (فرآیند رطوبت‌زایی) که تأمین رطوبت لازم برای بارش سنگین را ممکن می‌سازد (شکل ۱۶-ب).

تفسیر نقشه‌های همگرایی و واگرایی رطوبتی (برحسب گرم بر کیلوگرم) در تاریخ ۲۰۱۴/۱۰/۱۹ نشان می‌دهد که بیشینه همگرایی رطوبتی در منطقه مصر با مقدار ۱/۵ گرم بر کیلوگرم مستقر است. بادهای غربی عبوری از این منطقه، وارد شمال غرب ایران نمی‌شوند و به صورت مسیر مداری از محدوده خلیج فارس عبور می‌کنند. بیشینه واگرایی رطوبتی با مقدار ۰/۶- گرم بر کیلوگرم بر روی اروپا قرار دارد و بادهای غربی عبوری از این منطقه نیز به شمال غرب ایران نمی‌رسند و به صورت مداری از غرب کشور عبور می‌کنند. منطقه واگرایی رطوبتی تحت تأثیر چرخندگی منفی یا افزایش



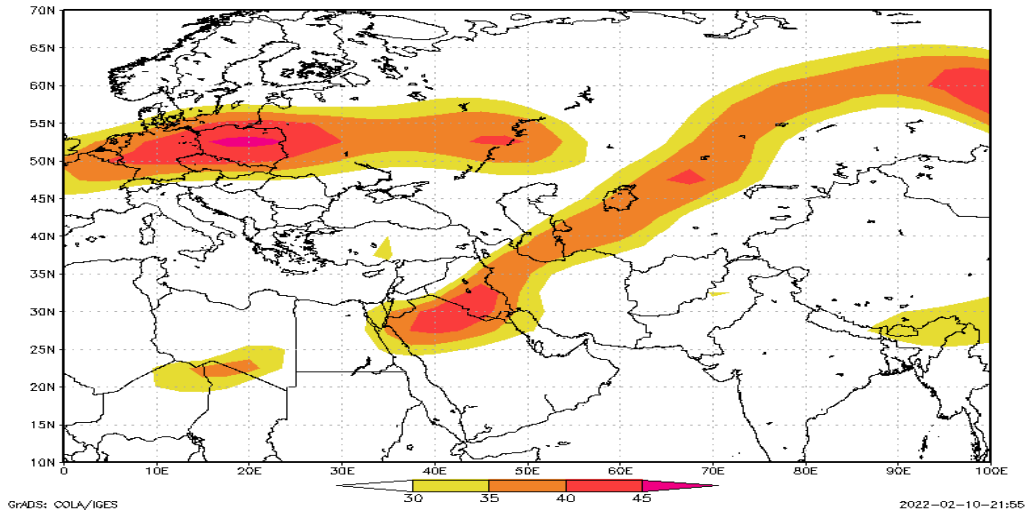
شکل ۱۶-نقشه ترکیبی، وزش رطوبتی برحسب گرم بر کیلوگرم در متربرثانیه، نقشه همگرایی رطوبتی برحسب گرم بر کیلوگرم، الف- تاریخ ۲۰۱۴/۱۰/۱۹ و ب- تاریخ ۲۰۱۴/۱۰/۲۰

جت با سرعت ۳۰ متر بر ثانیه در عرض حدود ۳۸ درجه شمالی مشاهده می‌شود که بخش‌هایی از منطقه تحقیق را پوشش داده و با ایجاد اغتشاش و تشدید صعود توده‌های هوایی، نقش مهمی در تقویت بارش دارد. در عرض‌های

تفسیر نقشه جت بارش سنگین تاریخ ۲۰۱۴/۱۰/۲۰ نشان می‌دهد که هسته جت جنب حاره با سرعت ۴۰ متر بر ثانیه در عرض‌های ۲۹ تا ۳۶ درجه شمالی و در تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال قرار دارد. در سرعت‌های پایین‌تر و در نواحی پیرامونی هسته،

می شود که با توجه به موقعیت آن، باعث افزایش همگرایی فوقانی و تقویت جریان های صعودی در منطقه تحقیق شده و شرایط بارش سنگین را مهیا می کند (شکل ۱۷).

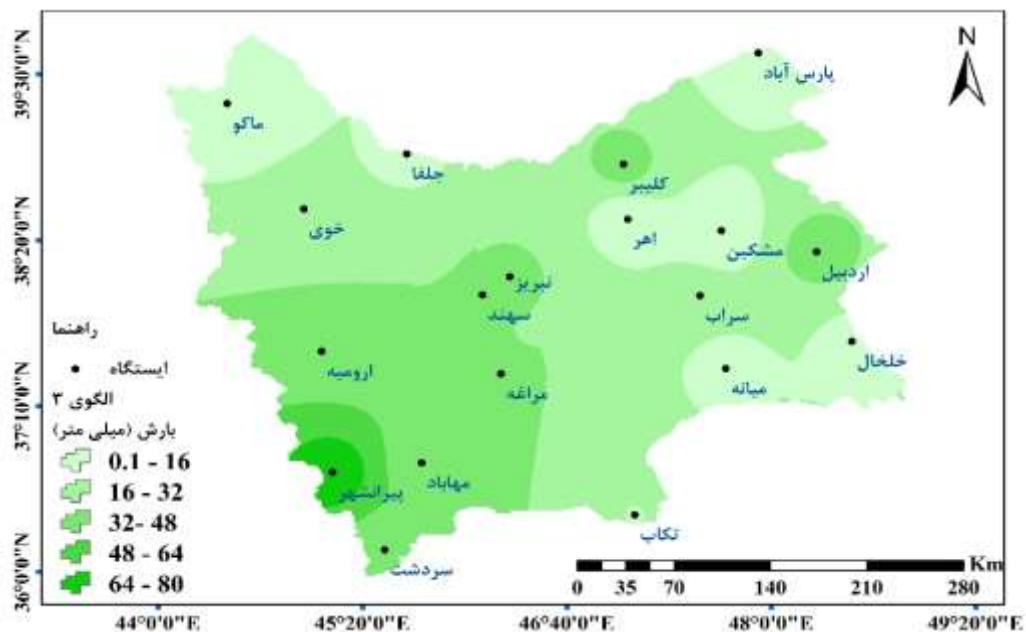
بالا تر، حدود ۵۰ درجه شمالی، هسته جت جبهه قطبی مستقر است. کشیدگی جت در این روز تا تراز ۳۵۰ هکتوپاسکال در عرض ۳۵ درجه شمالی با سرعت ۳۰ متر بر ثانیه مشاهده



شکل ۱۷- نقشه جت، تاریخ ۲۰۱۴/۱۰/۲۰

سنگین در ایستگاه پیرانشهر با مقدار ۸۰ میلی متر ثبت شده است (شکل ۱۸).

نقشه پهنه بندی بارش سنگین روز نماینده تاریخ ۲۰۱۴/۱۰/۲۰، در این روز بیشینه بارش سنگین در قسمت های جنوب غربی منطقه تحقیق مشاهده می شود که حداکثر بارش



شکل ۱۸- نقشه پهنه بندی بارش سنگین تاریخ ۲۰۰۶/۱۰/۲۰۳

و فرامنطقه‌ای در شکل‌گیری رخداد‌های سنگین است. نتایج تحقیق حاضر از لحاظ حضور سیکلون و جبهه زمینی در سطح زمین در زمان تشکیل بارش‌های سنگین با نتایج مطالعات مصطفایی و همکاران (۱۳۹۴)؛ صادقی و همکاران (۱۴۰۲) همسو است، یافته‌های این مطالعه با نتایج تحقیقات صورت گرفته توسط علیجانی و همکاران (۱۳۸۹)؛ سلیمانی و صلاحی (۱۴۰۱) از لحاظ استقرار کم‌ارتفاع عمیق و بن‌دال در تراز میانی جو در موقع رخداد بارش سنگین مطابقت دارد همچنین یافته‌های مطالعه حاضر از بابت تشکیل امگای منفی با مقادیر  $0/4-$  تا  $0/5-$  پاسکال بر تانیه که استیلای صعود شدید مستقر در منطقه را نشان می‌دهد با نتایج پژوهش بنی نعیمه و همکاران (۱۴۰۲) مطابقت دارد.

#### پی‌نوشت

##### ۱- گشتگاه موج (Wave Center / Vortex Center):

نقطه‌ای در میدان فشار یا ارتفاع ژئوپتانسیل که مرکز گردش یا چرخش سامانه جوی را نشان می‌دهد.

##### ۲- موج کوتاه در بستر موج بلند (Shortwave in Longwave Trough):

اختلال کوچک (موج کوتاه) که روی یک ساختار گسترده‌تر جو (موج بلند) سوار است و باعث تشدید بارش یا تغییر مسیر جریان می‌شود.

#### منابع

1. Alizani, B., Khosravi, M., & Esmaeilnejad, M. (1389). Synoptic analysis of heavy rain of January 6, 2008, in southeast Iran. *Climatological Research*, 1(3-4), 3-14. <https://sid.ir/paper/213093/fa>
2. Bani Na'eimeh, S., Lashkari, H., Ghorbanian, J., & Morshedi, J. (1402). Analysis of the concurrence of heavy rains and its effect on peak discharge of Dez River (Flood of 1993 and 2005). *Modeling and Management of Water and Soil*, 3(3), 37-55. doi: 10.22098/mmws.2022.11216.1107. (In Persian)
3. Beiranvand, A., Gandomkar, A., Abbasi, A., & Khoda Gholi, M. (1401). Statistical-

آنچه مسلم است بارش‌های سنگین یکی از مخاطرات جوی شمال غرب ایران است. علت اصلی پیدایش این پدیده سیستم‌های دینامیکی فعال در منطقه است و از لحاظ زمانی سهم فصل سرد سال در وقوع این رخداد بیشتر است. با توجه به پیامدهای رخداد مذکور که منجر به افزایش تصادفات جاده‌ای، آسیب به تجهیزات توزیع برق مناطق و موجد سیل است الگویابی و پیش‌بینی آن امری اجتناب‌ناپذیر است و در صورت مهار آب حاصل از بارش سنگین می‌توان در بخش کشاورزی و... در مصرف آب نیز صرفه‌جویی کرد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

با تحلیل آماری و همدیدی بارش‌های سنگین فصل سرد شمال غرب ایران در دوره ۲۰ ساله و با استفاده از داده‌های ۱۹ ایستگاه منتخب، ۱۶ رخداد بارش سنگین بر اساس شدت و فراگیری رخداد شناسایی شد. بر اساس تحلیل خوشه‌ای و میانگین‌گیری روزهایی که الگوی همدیدی مشابه داشتند، سه الگوی اصلی مشخص گردید:

الگوی اول: سامانه‌های کم‌فشار دینامیکی ادغامی سودانی و مدیترانه‌ای عامل ناپایداری بوده و دریای مدیترانه منبع اصلی تأمین رطوبت بارش سنگین است؛ همگرایی رطوبت عمدتاً بر روی کشور عربستان رخ داده است.

الگوی دوم: سامانه‌های کم‌فشار دینامیکی ترکیبی سودانی، مدیترانه‌ای و ایسلندی صعود توده‌های هوایی را مهیا کرده و منابع رطوبتی دریای سرخ و دریای مدیترانه بارش سنگین را تأمین کرده‌اند؛ همگرایی رطوبت روی کشور مصر تمرکز یافته است.

الگوی سوم: سیستم دینامیکی کم‌فشار سودانی عامل کثرفشاری بوده و رطوبت مورد نیاز از دریا‌های سیاه و مدیترانه تأمین شده است؛ همگرایی رطوبت روی عربستان مستقر بوده است.

با در نظر گرفتن گستردگی پوشش هم‌زمان ایستگاه‌های همدیدی در روزهای رخداد، الگوی دوم به‌عنوان الگوی غالب بارش سنگین فصل سرد شمال غرب ایران شناسایی شد. نتایج مطالعه نشان‌دهنده دینامیکی بودن بارش‌ها و نقش اساسی ترکیب سامانه‌های کم‌فشار و منابع رطوبتی منطقه‌ای

- 10.30467/nivar.2024.428907.1275.(In Persian)
10. Li, J., Zhao, Y., Chen, D., Zhao, P., Zhang, C., & Wang, Y. (2024). The quantitative role of moisture and vertical motion in shaping summer heavy rainfall over North China under two distinct large-scale weather patterns. *Journal of Climate*, 37(8), 2655–2672. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0850.1>
  11. Mazidi, A., & Mohammadi Ravari, F. (1403). Detection of heavy rainfall event in Ordibehesht 1403 using Sentinel-1 satellite imagery (Case study: Razavi Khorasan Province). *Nivar*, 49(128–129), 80–98. doi: 10.30467/nivar.2024.482006.1310.(In Persian)
  12. Mostafaei, H., Alizani, B., & Salighe, M. (1394). Synoptic analysis of heavy and widespread rains in Iran. *Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 2(4), 65–76. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jsaeh.2.4.65>.(In Persian)
  13. Safavi, S. M., Moslemi, H., Rezaei, M., & Darvishi, R. (1401). The impact of climate change on heavy rainfall and extreme temperatures (Case study: Bijar, Khalkhal, Zanjan, Ghorveh, and Miyaneh Stations). *Nivar*, 46(118–119), 14–26. doi: 10.30467/nivar.2022.216592.1148. (In Persian)
  14. Sadeghi, A., Pajouh, F., & Rezaei, M. (1402). Identification and analysis of sea level pressure patterns of heavy and widespread autumn rains in the western half of Iran. *Geography (Iranian Geographical Society Quarterly)*, 21(76), 211–237. <https://dor.isc.ac/dor/http://dor.net/dor/20.1001.1.27833739.1402.21.76.10.1>.(In Persian)
  15. Soleimani, S., & Salehi, B. (1401). Synoptic analysis of flooding rains in Northern Iran (Case study: Heavy and widespread rain of October 4 to 7, 2018). *Climatological Research*, 51, 15–31. [https://clima.irimo.ir/article\\\_149606.html?lang=fa](https://clima.irimo.ir/article\_149606.html?lang=fa).(In Persian)
  - synoptic analysis of heavy rains leading to Farvardin 1398 flood in Borujerd watershed. *Natural Environmental Hazards*, 11(32), 169–188. doi: 10.22111/jneh.2022.38564.1806. (In Persian)
  4. Ghassabi, Z., Fattahi, E., & Habibi, M. (2022). Daily atmospheric circulation patterns and their influence on dry/wet events in Iran. *Atmosphere*, 13(1), 81. <https://doi.org/10.3390/atmos13010081>
  5. Ghayour, H., Halabian, A., Saberi, B., & Hasanali Pour Jazii, F. (1391). Investigating the relationship between heavy rainfall and upper atmosphere circulation patterns (Case study: South Khorasan Province). *Natural Environmental Hazards*, 1(2), 11–27. doi: 10.22111/jneh.2013.2453.(In Persian)
  6. Halabian, A., & Hosseinalipour Jazii, F. (1394). Synoptic analysis of climate hazards in southwest Iran: Case study of heavy flood-inducing rains in Azar 1391. *Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 8(2), 31–46. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jsaeh.2.4.31>.(In Persian)
  7. Hu, P., Chen, W., Li, Z., Chen, S. H., Wang, L., & Liu, Y. (2022). Close linkage of the South China Sea summer monsoon onset and extreme rainfall in May over Southeast Asia: Role of the synoptic-scale systems. *Journal of Climate*, 35(13), 4347–4362. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0740.1>
  8. Ibebuchi, C. C. (2022). Patterns of atmospheric circulation in Western Europe linked to heavy rainfall in Germany: Preliminary analysis into the 2021 heavy rainfall episode. *Theoretical and Applied Climatology*, 148(1), 269–283. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-03945-5>
  9. Javanshiry, Z., Asadi Oskouei, A., & Abbasi, F. (1403). Investigation of changes in Iranian rainfall indices in two climatic normals: 1981–2010 and 1991–2020. *Nivar*, 48(124–125), 66–83. doi:

Spanish Mediterranean? Analysis of episodes in the Alicante Province (1981–2020). *Atmosphere*, 13(9), Article 1410. <https://doi.org/10.3390/atmos13091410>

16. Sánchez-Almodóvar, E., Martín-Vide, J., Olcina-Cantos, J., & Lemus-Canovas, M. (2022). Are atmospheric situations now more favorable for heavy rainfall in the