

## واکاوی همدیدی الگوهای گردش جوی مؤثر بر بارش‌های فرین فروردین ۱۴۰۳ در استان یزد (مقاله پژوهشی)

۱- کمال امیدوار\*، استاد، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.  
komidvar@yazd.ac.ir

۲- هاجر طوفانی کویانی، دانشجوی دکتری، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

۳- حمیده دهقان، دانشجوی دکتری، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

۴- فروغ محمدی راوری، دانشجوی دکتری، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

### چکیده

بارش‌های سنگین و فرین همواره به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات اقلیمی، نقش مؤثری در بروز سیلاب‌های ناگهانی و تحمیل خسارات گسترده به بخش‌های زیرساختی، عمرانی و کشاورزی ایفا می‌کنند. هدف از این پژوهش، تحلیل همدیدی الگوهای گردش جوی مؤثر بر رخداد بارش‌های فرین فروردین ۱۴۰۳ در استان یزد است. به‌منظور بررسی الگوی پراکنش مکانی بارش، از داده‌های بارش ماهواره‌ای CHIRPS استفاده شد. همچنین برای تحلیل شرایط همدیدی حاکم بر این رخداد، نقشه‌های فشار سطح زمین، تراز میانی ۵۰۰ هکتوپاسکال و نقشه‌های وزش رطوبتی، امگا و چرخندگی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال طی دو روز ۶ و ۲۸ فروردین ۱۴۰۳ استان یزد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. به‌منظور بررسی وضعیت ناپایداری جو، شاخص‌های ناپایداری SI، KI، TTI و LI با استفاده از نمودار ترمودینامیک ایستگاه شیراز محاسبه شد که وجود شرایط ناپایدار جو در روزهای رخداد بارش را تأیید می‌کند. در رخداد ۶ فروردین، ناوهای عمیق با راستای جنوب غربی-شمال شرقی از شرق مدیترانه، دریای سرخ و خلیج فارس به سوی مناطق مرکزی ایران گسترش یافت و با تقویت کم فشار سطحی و نفوذ زبانه‌های واجرخندی مدیترانه، انتقال رطوبت از دریاهای جنوبی را تسهیل کرد. رخداد ۲۸ فروردین، ناوهای بسیار عمیق با جهت‌گیری شمال شرقی-جنوب غربی بر مناطق مرکزی ایران مستقر شد که همراه با همگرایی سطحی، کم فشار فعال بر روی خلیج فارس و واگرایی لایه‌های فوقانی ناشی از جت استریم، منجر به تشدید صعود و وقوع بارش‌های شدیدتر شد. در هر روز، مقادیر منفی و معناردار امگا در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال حدود ۰/۲- پاسکال بر ثانیه رسیده و افزایش رطوبت ویژه تا حدود ۸ تا ۱۰ گرم بر کیلوگرم بیانگر صعود قوی هوا و تامین مناسب رطوبت از منابع دریای سرخ، خلیج فارس و دریای عمان بود. شاخص‌های ناپایداری نیز ناپایداری متوسط تا شدید جو و پتانسیل بالای وقوع بارش‌های همرفتی را تأیید کردند. به‌طور کلی، همزمانی شرایط دینامیکی قوی، تزریق مؤثر رطوبت و ناپایداری شدید جو عامل اصلی شکل‌گیری و تشدید بارش‌های فرین ۶ تا ۲۸ فروردین ۱۴۰۳ در استان یزد بوده است. بارش تجمعی دو موج بارشی فروردین نشان می‌دهد موج بارشی اول (۳ تا ۷ فروردین ۱۴۰۳)، بیشینه بارش در ایستگاه ده‌بالا (۸۶ میلی‌متر) و کمینه در اشکذر (۰/۵ میلی‌متر) ثبت شد که بیانگر ناهمگنی شدید مکانی بارش و نقش توپوگرافی در تشدید آن است. در موج دوم (۲۶ تا ۳۰ فروردین) نیز بیشینه بارش مجدداً در ده‌بالا (۶۲/۵ میلی‌متر) و کمینه در اردکان (۳/۳ میلی‌متر) مشاهده شد.

**واژگان کلیدی:** الگوهای گردش جوی، استان یزد، بارش‌های فرین، شاخص‌های ناپایداری، تحلیل همدیدی.

### مقدمه

بارش به‌عنوان یکی از مهم‌ترین متغیرهای هواشناسی، نقش اساسی در تنظیم جریان‌های آب‌های سطحی، تغذیه منابع آب، پایداری اکوسیستم‌ها و تولیدات کشاورزی ایفا می‌کند [۱۶]. برآورد دقیق و قابل

سیلاب همراه آن را در منطقه توهویاندو در شمال شرق آفریقای جنوبی بررسی کردند. نتایج نشان داد بارش‌های بیش از ۲۵ میلی‌متر در روز در جلوی ناوه و بارش‌های بسیار شدید بیش از ۱۰۰ میلی‌متر در ساعت به صورت ناگهانی و همراه با رعد و برق محلی رخ داده‌اند. برهم‌کنش بادهای غالب سطحی و رودباد تراز پایین با توپوگرافی پرشیب، موجب تشدید همگرایی و صعود جریان‌های تراز پایین شده است [۳]. در پژوهشی دیگر، فلاوناس و همکاران (۲۰۲۳) با تمرکز بر سامانه‌های مدیترانه‌ای نشان دادند که در دهه اخیر، چرخندهای مدیترانه‌ای عمیق‌تر شده و سهم بیش‌تری در رخداد بارش‌های فرین کوتاه مدت داشته‌اند. آن‌ها تأکید کردند که همگرایی شار رطوبتی در ترازهای پایین و تقویت ناپایداری جو، مهم‌ترین عامل افزایش بارش‌های شدید بوده است [۱۶]. ژانک و همکاران (۲۰۲۳) با بررسی تغییرات بارش‌های حدی در مقیاس جهانی با استفاده از داده‌های ERA5 و شاخص‌های ETCCDI طی دوره ۱۹۷۹-۲۰۲۱ نشان دادند که فراوانی و شدت بارش‌های فرین در اغلب عرض‌های میانی و مناطق خشک و نیمه‌خشک روند افزایشی معناداری داشته است. نتایج آن‌ها بیانگر نقش افزایش دمای سطح زمین و ظرفیت نگهداشت رطوبت جو در تشدید رخداد‌های حدی بارش است [۲۷]. عساکره و همکاران (۱۳۹۱) در بررسی تغییرات بلندمدت فراوانی بارش‌های فرین نشان دادند که روند کاهشی معنادار تنها برای بارش‌هایی با گستره ۲۰-۳۰ درصد مشاهده شده، درحالی‌که بارش‌های فرین با گستره‌های بزرگ‌تر عمدتاً ایستا بوده‌اند. نتایج آن‌ها همچنین نشان داد ماه‌های مارس، می و اکتبر بیشترین فراوانی رخداد بارش‌های فرین را داشته‌اند [۲]. حسینی و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از داده‌های روزانه فشار تراز دریا و بارش ۲۳۵ ایستگاه همدیدی ایران طی دوره ۱۳۳۹-۱۳۸۳، ارتباط سامانه پرفشار دریای سیاه با بارش ایران را بررسی کردند. نتایج نشان داد بیش از ۵۰ درصد از بارش‌های کشور هم‌زمان با فعالیت این

اعتماد بارش، نقشی کلیدی در بهینه‌سازی مصرف منابع آب و همچنین بهبود پیش‌بینی رخداد‌های نظیر سیل، خشکسالی و سایر مخاطرات اقلیمی ایفا می‌کند [۲۶]. نتایج این‌گونه پژوهش‌ها امکان شناسایی پهنه‌های مستعد خطر، بهبود استانداردهای ایمنی در طراحی و بهره‌برداری از زیرساخت‌ها و افزایش تاب‌آوری جوامع انسانی در برابر مخاطرات اقلیمی را فراهم می‌سازد. رشد سریع و فزاینده مراکز جمعیتی طی دهه‌های اخیر نیز بر اهمیت چنین مطالعاتی افزوده و ضرورت اتخاذ رویکردهای علمی در مدیریت و برنامه‌ریزی مخاطرات ناشی از بارش‌های فرین را دوچندان کرده است. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف تحلیل همدیدی الگوهای گردش جوی مؤثر بر رخداد بارش‌های فرین فروردین ۱۴۰۳ در استان یزد انجام شده است تا گامی در جهت درک بهتر ساز و کارهای دینامیکی این پدیده و بهبود راهبردهای مدیریت مخاطرات اقلیمی در مناطق خشک و نیمه خشک کشور برداشته شود.

مطالعات متعددی در مقیاس جهانی به بررسی تغییرات بارش‌های فرین و شاخص‌های حدی اقلیمی پرداخته‌اند. فلاوناس و همکاران (۲۰۱۹) بارش‌های سنگین ناشی از چرخندهای مدیترانه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. آنان با انتخاب ۱۰۰ چرخند از میان ۵۰۰ چرخند شناسایی شده طی دوره ۲۰۰۵-۲۰۱۵، نشان دادند که بیشینه بارش‌ها عمدتاً در نواحی منطبق با همگرایی شار رطوبتی رخ داده و نقش دینامیک چرخندها در تمرکز بارش‌های شدید بسیار تعیین‌کننده است. این یافته‌ها اهمیت تحلیل همدیدی سامانه‌های جوی در رخداد بارش‌های فرین را برجسته می‌کند [۶]. دی مولیشو و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از داده‌های روزانه بارش بیش از ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر طی دوره ۱۹۵۱-۲۰۱۹ و به‌کارگیری آزمون من-کندال، روند بارش‌های سنگین در آلمان را بررسی کردند. نتایج نشان داد در جنوب آلمان روند افزایشی و در نواحی مرکزی روند کاهشی مشاهده می‌شود [۵]. چیکو هکتور و همکاران (۲۰۲۱) ساختار همدیدی یک رخداد بارش فرین و

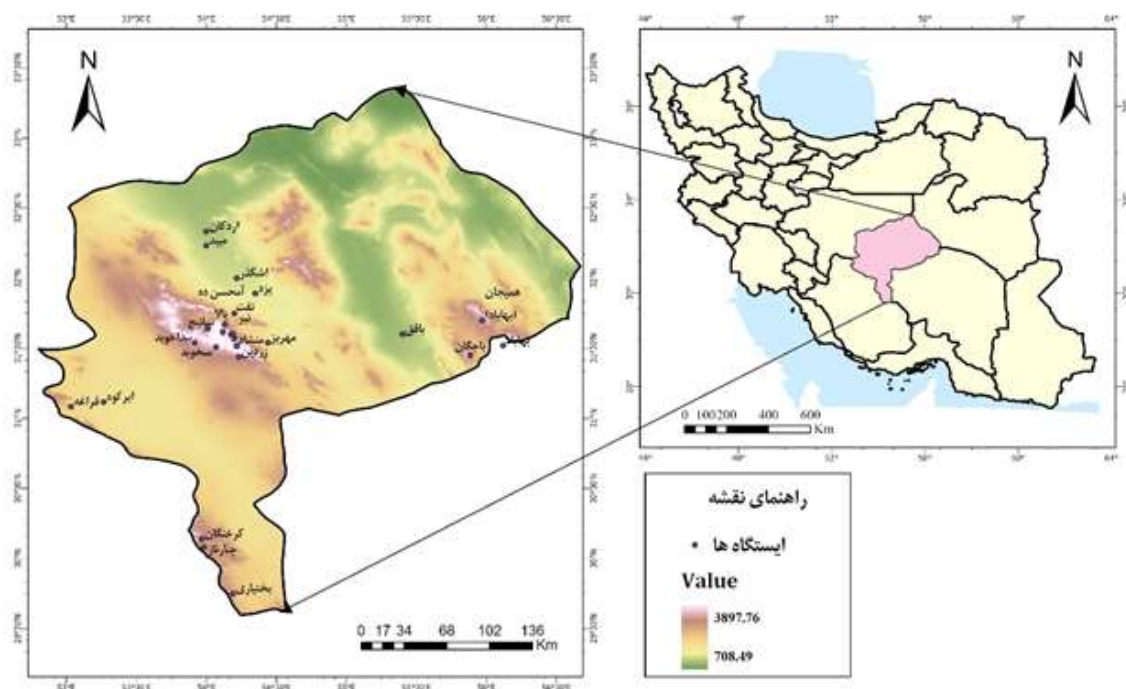
سامانه‌های جوی مؤثر بر رخداد بارش‌های سنگین دو روز ۶ و ۲۸ فروردین ۱۴۰۳ در استان یزد انجام شده است. با توجه به آسیب‌پذیری منطقه در برابر سیلاب‌های ناگهانی و هم‌زمانی آن با گسترش پروژه‌های عمرانی و توسعه‌ای، شناخت و تبیین ویژگی‌های همیدی سامانه‌های مؤثر بر بارش‌های سنگین از آن رو اهمیت دارد که با شناسایی الگوهای تکرارشونده و ساز و کارهای حاکم بر رخدادهای حدی، زمینه ارتقای دقت پیش‌بینی و هشدار زودهنگام، پهنه‌بندی واقع بینانه‌تر خطر، پشتیبانی از تصمیم‌گیری در طراحی و مکان‌یابی طرح‌های عمرانی و در نهایت کاهش خسارات جانی و مالی و تقویت تاب‌آوری منطقه‌ای را فراهم می‌سازد.

#### موقعیت مورد مطالعه

استان یزد با وسعتی در حدود ۷۶۴۶۹ کیلومتر مربع، حدود ۴/۵ درصد از مساحت کل کشور را به خود اختصاص داده است. این استان در ناحیه مرکزی کشور و در محدوده عرض‌های جغرافیایی در ۲۹ درجه و ۴۸ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی و ۵۲ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۳۰ دقیقه طول شرقی واقع شده است. قرارگیری استان یزد در کمربند خشک و نیمه‌خشک ایران مرکزی، موجب شده است که این منطقه از نظر اقلیمی با بارش اندک، تبخیر بالا و نوسانات قابل توجه بارش‌های حدی شناخته شود. به‌منظور تبیین بهتر موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، شکل (۱) موقعیت استان یزد را در مقیاس ملی و منطقه‌ای نشان می‌دهد.

سامانه رخ داده و بیشترین هم‌زمانی فصلی در زمستان مشاهده شده است [۱۲]. خورشید دوست و همکاران (۱۳۹۷) با بررسی تغییرات آتی بارش‌های سنگین سواحل جنوبی دریای خزر تحت شرایط تغییر اقلیم، نشان داد در دوره آینده تعداد روزهای بارش سنگین ۱۰ میلی‌متر کاهش یافته، اما فراوانی روزهای بارش بسیار سنگین (۲۰ میلی‌متر و بیشتر) افزایش خواهد یافت که بیانگر تشدید رخدادهای حدی است [۱۴]. نیک اندیش (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای همیدی-فضایی بر بارش‌های فرین حوضه دشت کاشان، نشان داد هنگام رخداد بارش‌های فرین، سامانه‌های کم‌فشار ادغامی سودانی-عربی در سطح زمین و ناهه‌های عمیق، الگوهای امگا و کم‌ارتفاع‌های بریده در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نقش غالب دارند [۲۰]. مسعودیان (۱۴۰۱) رخداد بارش‌های سنگین بهار ۱۳۹۸ و سیلاب‌های حوضه‌های کرخه و کارون بزرگ را بررسی کرده و نشان داد شدت بارش و موقعیت هسته بارش، مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع سیلاب بوده‌اند [۱۶]. علی‌زاده و همکاران (۱۴۰۳) سامانه بارشی شدید ۵ و ۶ فروردین ۱۴۰۳ در استان خوزستان که موجب بارش‌های همرفتی شدید و سیلاب شهری در اهواز شد، مورد بررسی قرار دادند. تحلیل داده‌های بازتحلیل ERA5 نشان داد شکست موج راسبی و کشانه PV همراه با تأمین رطوبت مناسب و نقش MJO، شرایط ناپایداری و تقویت بارش‌ها را فراهم کرده است [۱].

با وجود مطالعات گسترده انجام شده، بررسی دقیق ساز و کارهای همیدی رخدادهای بارش فرین در مناطق خشک و نیمه‌خشک مرکزی ایران، به‌ویژه استان یزد، همچنان با خلأ پژوهشی مواجه است. از این رو، پژوهش حاضر با هدف تحلیل همیدی



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

#### داده‌ها و روش‌ها

در این پژوهش، به منظور بررسی سازوکارهای جوی مؤثر بر رخداد بارش‌های فرین، ابتدا ویژگی‌های آماری بارش مربوط به دو موج بارشی سنگین ۶ و ۲۸ فروردین ۱۴۰۳ با استفاده از داده‌های روزانه پایگاه اقلیمی NOAA تحلیل شد. این تراز به‌عنوان نمایانگر الگوهای دینامیکی لایه‌های میانی جو، نقش کلیدی در شکل‌گیری سامانه‌های ناپایدار و ناوهای جوی دارد. هم‌زمان با تحلیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، نقشه‌های فشار سطح زمین (SLP) به‌عنوان ساختار سینوپتیکی سطحی مورد بررسی قرار گرفت تا آرایش سامانه‌های کم فشار و پرفشار و نقش آن‌ها در تمرکز و تقویت بارش‌های سنگین مشخص شود. به‌منظور تحلیل حرکت عمودی جو، نقشه‌های توزیع فضایی امگا در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال مورد استفاده قرار گرفت تا نواحی صعود و فرونشینی هوا و مکانیسم‌های دینامیکی مؤثر بر تقویت بارش‌ها شناسایی شود. برای بررسی الگوی تأمین و تزریق رطوبت، مولفه رطوبت ویژه (Shum) در ارتباط با مولفه‌های باد مداری و نصف‌النهاری Uwnd و Vwnd در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال تحلیل شد. این تراز به‌دلیل نزدیکی به

در این پژوهش، به منظور بررسی سازوکارهای جوی مؤثر بر رخداد بارش‌های فرین، ابتدا ویژگی‌های آماری بارش مربوط به دو موج بارشی سنگین ۶ و ۲۸ فروردین ۱۴۰۳ در سطح استان یزد مورد تحلیل قرار گرفت. بدین منظور، از داده‌های بارش روزانه ایستگاه‌های هواشناسی استان یزد استفاده شد تا پراکنش مکانی و شدت بارش این دو رخداد مشخص شود. به‌منظور واکاوی الگوهای هم‌مدیدی منجر به رخداد این بارش‌های فرین، از داده‌های بازکاو شده NCEP/NCAR وابسته به سازمان ملی جو و اقیانوس‌شناسی ایالات متحده آمریکا (NOAA) استفاده شد. متغیرهای مورد استفاده شامل فشار سطح دریا (SLP)، ارتفاع ژئوپتانسیل (HGT)، مولفه‌های باد مداری و نصف‌النهاری Uwnd و Vwnd، رطوبت ویژه (Shum)، امگا (Omega) و چرخندگی نسبی در ترازهای مختلف جوی بود. با توجه به اینکه در این پژوهش ابتدا رخدادهای بارش سنگین شناسایی و انتخاب شده و سپس شرایط جوی منجر به وقوع آن‌ها تحلیل گردیده است، رویکرد تحلیلی مورد استفاده از نوع محیطی به گردشی

و (VC) محاسبه می‌شود. این روش از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$TT=VT+CT \quad \text{رابطه (۳):}$$

$$TT=(T850-T500)+(Td850+Td500)$$

شاخص شولتر (Si)<sup>۴</sup> این شاخص اختلاف بین دمای محیط و بسته هوا را در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال بیان می‌کند. Si از تفاضل بین دمای محیط در تراز ۸۵۰ و دمای بسته هوا در همان تراز حاصل می‌گردد. در این شاخص اگر  $SI < 0$  باشد حالت ناپایداری در جو وجود دارد [۲۲] این روش از رابطه (۴) بدست می‌آید:

$$Si=T850- Tp850 \quad \text{رابطه (۴):}$$

### نتایج و بحث

به منظور ارزیابی وضعیت ناپایداری جو در زمان رخداد بارش‌های فرین، از داده‌های جو بالای ایستگاه شیراز به دلیل نزدیکی مکانی و همگنی اقلیمی با منطقه مورد مطالعه استفاده شد. بررسی نمودارهای ترمودینامیکی (Skew-T Log-P) این ایستگاه در ساعت دیدبانی 00 UTC برای روزهای ۶ و ۲۸ فروردین ۱۴۰۳، بیانگر حاکمیت شرایط ناپایدار قابل توجه در لایه‌های مختلف جو است.

در هر دو روز مورد مطالعه، نزدیکی منحنی‌های نیم‌رخ دما و نقطه شبنم، به‌ویژه در لایه‌های میانی و پایین جو، نشان‌دهنده رطوبت کافی و کاهش پایداری قائم بوده که شرایط مساعدی برای صعود توده‌های هوا و توسعه ابرهای همرفتی فراهم کرده است. این ساختار ترمودینامیکی، وقوع ابرناکی گسترده و بارش‌های شدید را در منطقه توجیه می‌کند (شکل‌های ۲ و ۳).

بررسی کمی شاخص‌های ناپایداری نیز این شرایط را تأیید می‌کند. مقدار شاخص KI در روزهای ۶ و ۲۸ فروردین به ترتیب ۳۲ و ۵۰ محاسبه شد که بیانگر ناپایداری متوسط تا شدید و پتانسیل بالای وقوع بارش‌های همرفتی در منطقه است. افزایش قابل توجه این شاخص در موج بارشی دوم، نشان‌دهنده

سطح زمین و نقش مؤثر آن در انتقال رطوبت، برای شناسایی مسیرهای اصلی شار رطوبتی و منابع تأمین‌کننده رطوبت بارش‌های فرین انتخاب گردید. به‌منظور ارزیابی وضعیت ناپایداری جو، شاخص‌های ناپایداری SI، KI، LI و TT با استفاده از داده‌های جو بالای ایستگاه شیراز محاسبه شد. انتخاب این ایستگاه به دلیل نزدیکی مکانی به منطقه مورد مطالعه و در دسترس بودن داده‌های مناسب در دوره زمانی مورد بررسی صورت گرفته است. در ادامه، تعاریف، روابط محاسباتی و مبانی آماری شاخص‌های ناپایداری مورد استفاده ارائه می‌شود.

KI<sup>۱</sup>: این شاخص برای محاسبه و آشکارسازی ناپایداری و همرفت در سطوح فوقانی جو استفاده می‌شود. در و در رابطه (۱) روش محاسبه این شاخص آورده شده است.

رابطه (۱):

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

در این رابطه T دما، Td دمای نقطه شبنم در ترازهای مختلف جوی است. هر قدر این شاخص از ۲۰ بیشتر باشد، احتمال ناپایداری‌ها نیز زیادتر می‌گردد و اگر این مقدار به ۳۵ برسد، شدت ناپایداری‌ها قابل توجه خواهد بود [۱۰].

شاخص بالاروی (Li)<sup>۲</sup> این شاخص اختلاف بین دمای محیط و بسته هوا را در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بیان می‌کند. در رابطه ۲ روش محاسبه این شاخص آورده شده است.

$$Li=T500-Td500 \quad \text{رابطه (۲):}$$

در این رابطه T دما، Td دمای نقطه شبنم در ترازهای مختلف جوی هستند. اگر میزان این شاخص اگر میزان این شاخص مثبت باشد، توده هوا پایدار و هرچه منفی باشد، توده هوا ناپایدار است [۸].

شاخص TTI<sup>۳</sup>: این شاخص توسط میلر در سال ۱۹۷۲ برای شناخت نواحی که از پتانسیل لازم برای توسعه طوفان‌های تندری برخوردارند، پیشنهاد شد. شاخص TTI از جمع دو شاخص همرفتی دیگر (VT)

<sup>1</sup> K INDEX

<sup>2</sup> Lifted Index

<sup>3</sup> Total-Totals Index

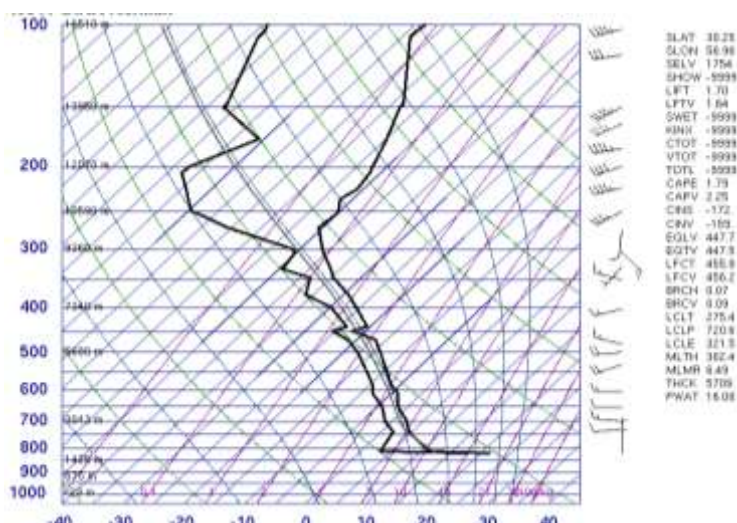
<sup>4</sup> Showalter Index

توجه جو و فراهم بودن شرایط برای وقوع رگبارهای شدید باران است. بررسی شاخص SI نیز مقادیر ۲- و ۲/۹- را برای این دو روز نشان می‌دهد که بیانگر ناپایداری مشروط و استعداد بالای جو برای توسعه همرفت عمیق می‌باشد. مجموعه این شواهد ترمودینامیکی نشان می‌دهد که جو در زمان رخداد بارش‌های فرین فروردین ۱۴۰۳ از نظر حرارتی و رطوبتی در وضعیتی ناپایدار قرار داشته و شرایط لازم برای وقوع بارش‌های شدید و کوتاه‌مدت فراهم بوده است.

تشدید شرایط همرفتی و نقش آن در وقوع بارش‌های سنگین‌تر می‌باشد. مقادیر شاخص TT (Total Totals Index) نیز در روز ۶ فروردین برابر با ۴۵ و در روز ۲۸ فروردین به حدود ۶۵ رسید که حاکی از احتمال بالای شکل‌گیری همرفت قوی و پراکنش طوفان‌های شدید در منطقه است. این افزایش چشمگیر TT در موج دوم بارشی، به‌خوبی با شدت بیشتر بارش‌ها انطباق دارد. همچنین، مقدار شاخص LI در روزهای ۶ و ۲۸ فروردین به‌ترتیب ۱/۸- و ۲/۸- به‌دست آمد که نشان دهنده ناپایداری قابل

جدول ۱- محدوده شاخص‌های دینامیکی مورد استفاده (Sioutas et.al , 2003)

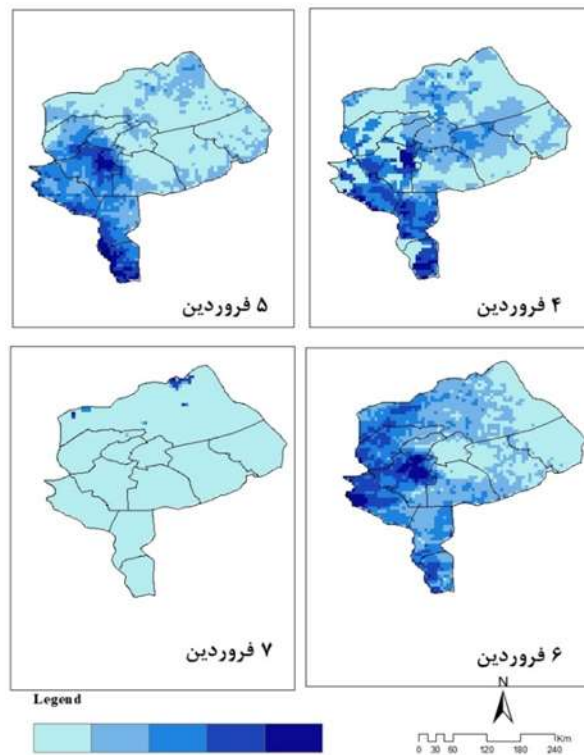
میزان ناپایداری و همرفت					شاخص
Li < -7	-6 > Li > -7	-3 > Li > -5	0 > Li > -2	Li > 0	
ناپایداری فوق‌العاده شدید	ناپایداری شدید	ناپایدار	ناپایداری ضعیف	پایدار	Li
Si < -11	-8 > Si > -10	-5 > Si > -7	-1 > Si > -4	Si > 0	
ناپایداری فوق‌العاده شدید	ناپایداری شدید	ناپایداری نسبتاً زیاد	ناپایداری مشروط	پایدار	Si
-	Ki > 40	39 > Ki > 26	15 > Ki > 25	Ki < 15	
-	پتانسیل بالا برای همرفت	پتانسیل متوسط برای همرفت	پتانسیل اندک برای همرفت	عدم احتمال همرفت	Ki
TT > 56	53 < TT < 56	51 < TT < 52	44 < TT < 50	TT < 44	
پراکنش طوفان‌های شدید	طوفان‌های شدید	طوفان شدید منفرد	احتمال رخداد همرفت	عدم احتمال همرفت	TTi



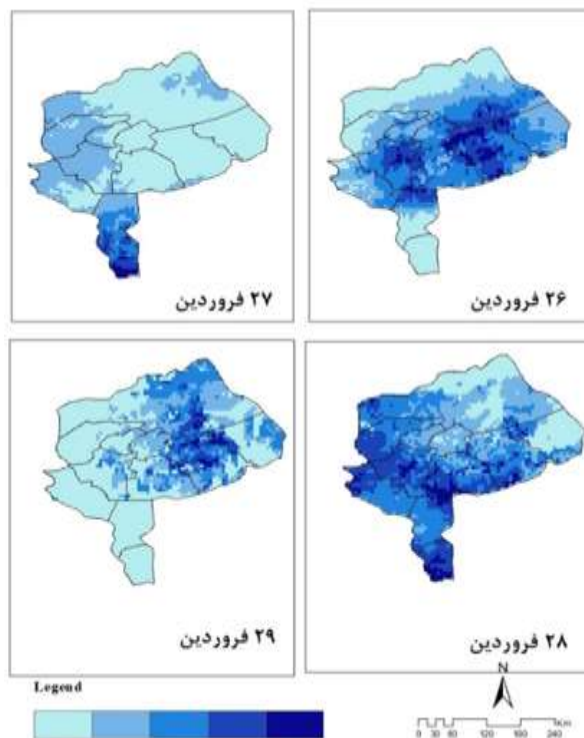
شکل ۲- نمودار ترمودینامیکی (اسکیوتی) جو بالای شیراز در روز ۶ فروردین







شکل ۵- تصاویر بارش روزهای ۴ تا ۷ فروردین ۱۴۰۳



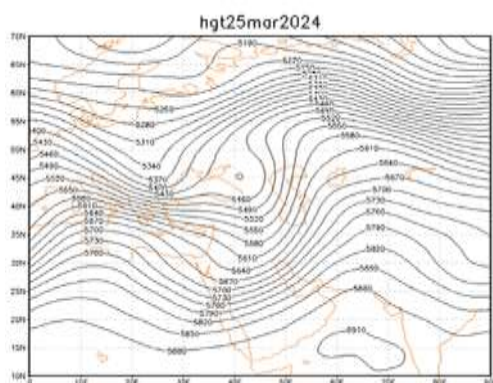
شکل ۶- تصاویر بارش روزهای ۲۶ تا ۲۹ فروردین ۱۴۰۳

نشان‌دهنده فراهم شدن زمینه‌های دینامیکی و ترمودینامیکی مناسب برای صعود توده‌های هوای مرطوب و شکل‌گیری ابرزایی گسترده است (شکل ۷- الف). در روز ۶ فروردین که به‌عنوان روز اوج بارش در

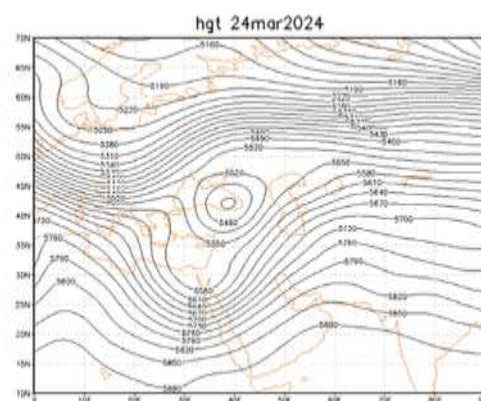
در امتداد محور این ناوه، نواحی دریای سرخ، خلیج فارس و شرق مدیترانه قرار دارند که هم‌زمان با بیشینه وزش رطوبتی و مقادیر منفی امگا (نشانگر صعود هوا) قرار می‌گیرند. این وضعیت سینوپتیکی

مرطوب فراهم آورد که منجر به بارش‌های سنگین در این روز شد (شکل ۷-ج). هم‌زمان، یک سامانه پرفشار سطحی با هسته حدود ۱۰۱۷/۵ هکتوپاسکال در غرب دریای مدیترانه مستقر بود. در روز ۶ فروردین، نفوذ زبانه‌های واچرخندی (anticyclonic ridge) این پرفشار به سمت شرق تا نواحی دریای سرخ گسترش یافت. این گسترش سبب تقویت چرخند موجود بر روی خلیج فارس و مناطق داخلی ایران شد و در نتیجه، تزریق رطوبت از دریاهای گرم جنوبی به سمت ناحیه کم‌فشار (کم‌فشار سودانی) تقویت گردید. این سازوکار، نقش مهمی در تأمین رطوبت مورد نیاز برای بارش‌های سنگین را ایفا کرده است (شکل ۷-د).

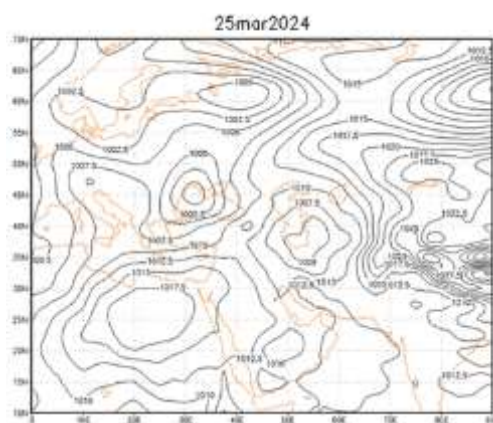
استان یزد ثبت شده است، ناوه مذکور به سمت مناطق مرکزی ایران منتقل می‌شود. این جابجایی موجب تقویت فرآیند صعود و توسعه شرایط کژفشار (cyclonic vorticity) در لایه میانی جو می‌گردد. تقویت کژفشار میانی همراه با افزایش ناپایداری و همگرایی در لایه‌های پایین‌تر، شرایط مناسبی برای افزایش شدت بارش فراهم می‌کند (شکل ۷-ب). در سطح زمین، نقشه‌های فشار سطح دریا نشان می‌دهند که در روز ۵ فروردین یک مرکز کم‌فشار سطحی با مقدار حدود ۱۰۰۵ هکتوپاسکال در شمال دریای سرخ مستقر بوده است. این کم‌فشار در روز ۶ فروردین به سمت مناطق مرکزی ایران منتقل شده و در نتیجه، زمینه‌ای مناسب برای تجمع و صعود هوای



(ب)

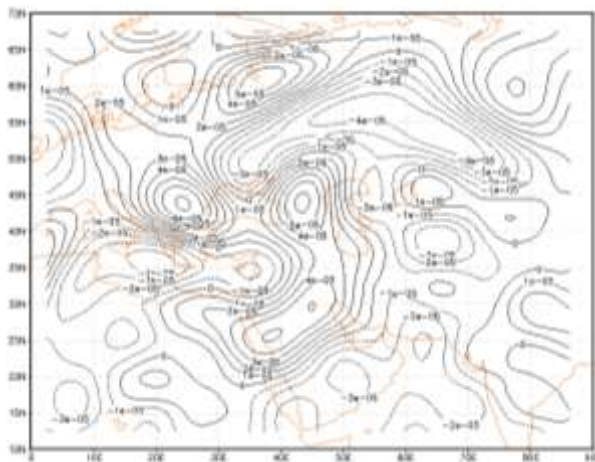


(الف)

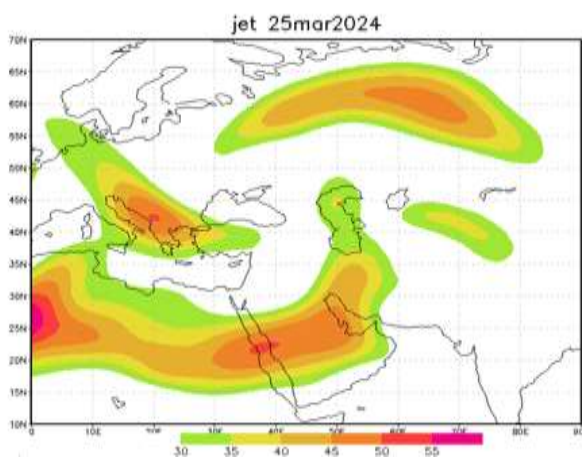




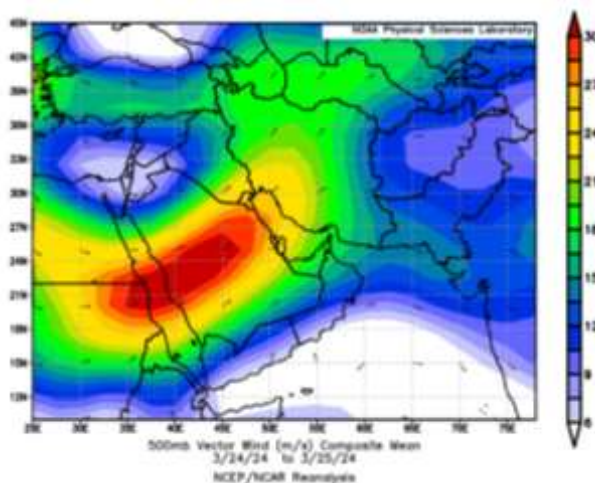
از دریای سرخ و خلیج فارس به سمت منطقه مورد مطالعه امتداد یافته است که نشان‌دهنده تأمین رطوبت لازم برای بارش‌های شدید در روز ۶ فروردین ۱۴۰۳ است (شکل ۱۲).



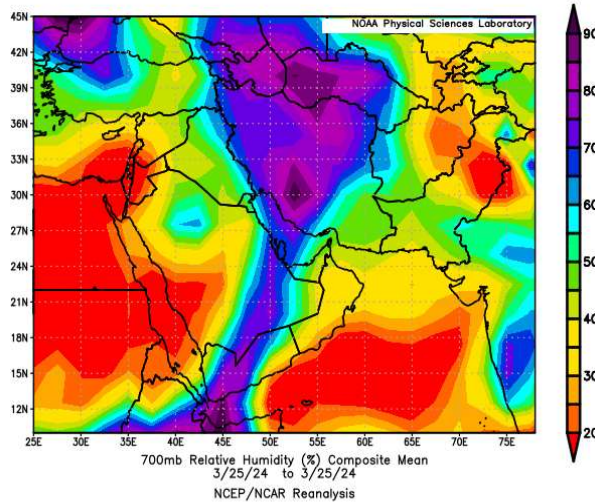
شکل ۹- نقشه چرخندگی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال روز ۵ فروردین



شکل ۱۰- نقشه رودباد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال روز ۵ فروردین



شکل ۱۱- نقشه سرعت باد تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

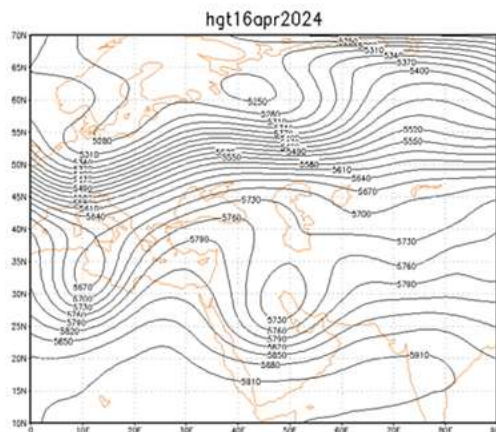


شکل ۱۲ - نقشه رطوبت نسبی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال

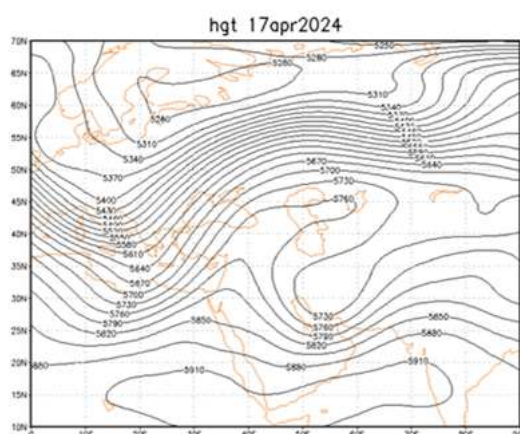
خلیج فارس است. این کم‌فشار در روز ۲۸ فروردین به سمت مناطق داخلی ایران حرکت کرده و با افزایش همگرایی سطحی و تقویت جریان‌های مرطوب، شرایط مناسبی برای وقوع بارش‌های سنگین فراهم کرد (شکل ۱۵). همچنین در روز ۲۷ فروردین یک سامانه پرفشار با مرکزیت حدود ۱۰۲۲ هکتوپاسکال بر شرق دریای سیاه مستقر بود. در روز ۲۸ فروردین، زبانه‌های جنوبی این پرفشار با گسترش به سمت جنوب سو، منطقه دریای سرخ را نیز تحت پوشش قرار داد. این روند موجب تقویت چرخندی مستقر بر روی خلیج فارس و تسهیل انتقال رطوبت از دریاهای گرم جنوبی به داخل کشور شد، که در نهایت به شکل‌گیری و تشدید بارش‌های فرین در مناطق مرکزی ایران انجامید (شکل ۱۶).

### موج بارشی ۲۸ فروردین ۱۴۰۳

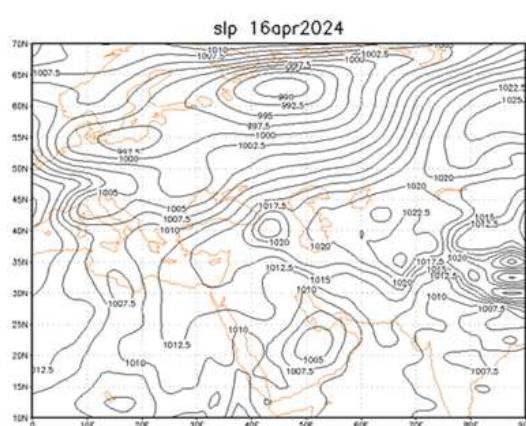
در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، نقشه‌های سینوپتیکی روز ۲۷ فروردین (شکل ۱۳) نشان می‌دهند که بخش‌های غربی و مرکزی ایران در جلوی یک ناوه بسیار عمیق قرار داشته‌اند. این وضعیت نمایانگر استقرار و تقویت یک سیستم سیکلونی قوی در منطقه بوده است. در روز ۲۸ فروردین، ناوه عمیق با جهت‌گیری شمال‌شرقی-جنوب‌غربی و هسته مرکزی حدود ۵۷۳۰ ژئوپتانسیل‌متر در مناطق مرکزی ایران مستقر شد، که این ساختار سینوپتیکی، موجب تشدید صعود هوا و افزایش همگرایی جریان‌های مرطوب شده و در نتیجه بارش‌های شدید در این نواحی را به دنبال داشت (شکل ۱۴). در نقشه فشار سطح دریا، روز ۲۷ فروردین نشان‌دهنده استقرار یک مرکز کم‌فشار با مقدار حدود ۱۰۰۵ هکتوپاسکال بر روی دریای



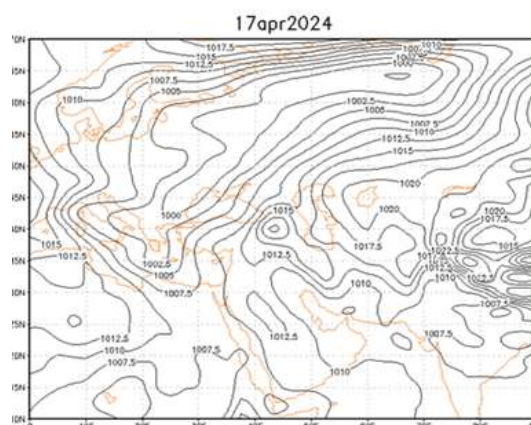
شکل ۱۳ - نقشه سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال روز ۲۷ فروردین



شکل ۱۴- نقشه سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال روز ۲۸ فروردین



شکل ۱۵- نقشه سطح زمین روز ۲۷ فروردین



شکل ۱۶- نقشه سطح زمین روز ۲۸ فروردین

صعودی و ناپایداری جو و فراهم بودن زمینه برای شکل‌گیری بارش‌های سنگین است (شکل ۱۷). در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، الگوی وزش رطوبتی نشان‌دهنده استقرار یک سیکلون بر روی دریای سرخ است که با گردش حول هسته خود، رطوبت دریای سرخ را ابتدا به خلیج فارس منتقل کرده و سپس از

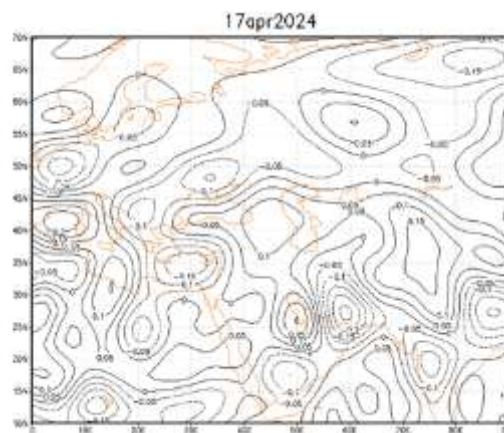
نقشه امگا در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال برای روز ۲۸ فروردین نشان می‌دهد که بیشینه مقدار امگا منفی در حدود  $-0/25$  پاسکال بر ثانیه در راستای شمال‌غربی-جنوب‌شرقی در نواحی مرکزی ایران قرار گرفته است. در سراسر منطقه مورد مطالعه، مقادیر امگا منفی بوده و این وضعیت نشان‌دهنده شرایط

فوقانی موجب تقویت جریان‌های صعودی شده و با ناحیه واگرایی شرق ناوه هم‌راستا بوده است؛ بنابراین زمینه مناسبی برای ناپایداری و تشدید بارش فراهم شده است (شکل ۲۰). همچنین نقشه سرعت باد در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای روزهای ۲۷ تا ۲۸ فروردین نشان‌دهنده استقرار رودباد با هسته مرکزی حدود ۲۷ متربرثانیه بر روی دریای خلیج‌فارس است که با انتقال رطوبت به سمت ایران، به تقویت جریان‌های مرطوب سطحی و بارش‌های سنگین کمک کرده است (شکل ۲۱).

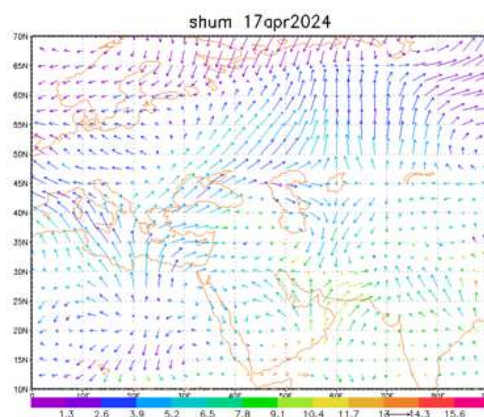
نقشه رطوبت نسبی در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال نیز مسیر و منبع رطوبت را به‌خوبی نشان می‌دهد. در این بازه زمانی، زبانه رطوبتی با مقدار رطوبت نسبی ۶۰ تا ۹۰ درصد از دریاهای پیرامونی، به‌ویژه خلیج‌فارس، وارد منطقه شده و تأمین‌کننده رطوبت لازم برای بارش‌های فرین بوده است (شکل ۲۲).

طریق جریان‌های جنوبی-شمالی، رطوبت را به مناطق جنوب‌غرب و مرکزی ایران تزریق کرده است. میزان رطوبت ویژه در مناطق مرکزی به حدود ۱۰ گرم بر کیلوگرم رسیده است که بیانگر تأمین مناسب رطوبت برای بارش‌های سنگین است (شکل ۱۸).

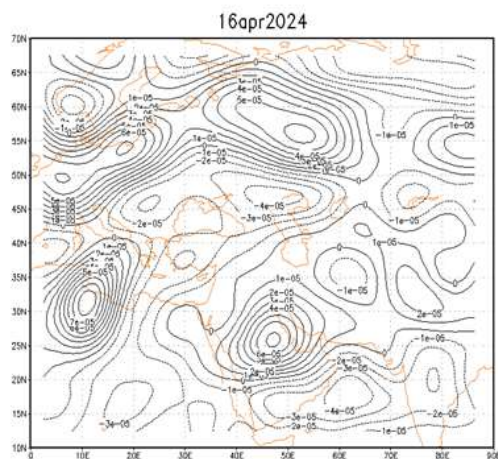
مطابق نقشه چرخندگی (vorticity) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، منطقه مورد مطالعه در ناحیه‌ای از چرخندگی مثبت حداکثری قرار دارد که نشان‌دهنده تشدید سیکلونیک و فراهم بودن شرایط دینامیکی برای صعود هوا است (شکل ۱۹). بنابراین با توجه به همگرایی سطحی و تقویت جریان‌های صعودی، هوا در سطح زمین به سمت بالا رانده شده و بارش سنگین در منطقه رخ داده است. نقشه جریان رودباد (jet stream) در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال در روز ۲۸ فروردین، وجود یک رودباد با سرعت ۴۰ تا ۵۰ متر بر ثانیه را از دریای سرخ تا شرق ایران نشان می‌دهد. قرارگیری این رودباد در موقعیت واگرایی در جو



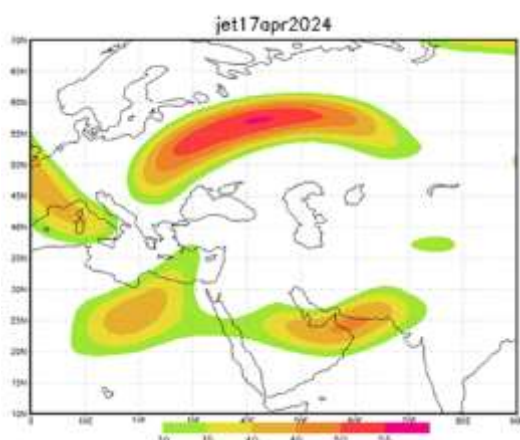
شکل ۱۷- نقشه امگا تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال روز ۲۸ فروردین



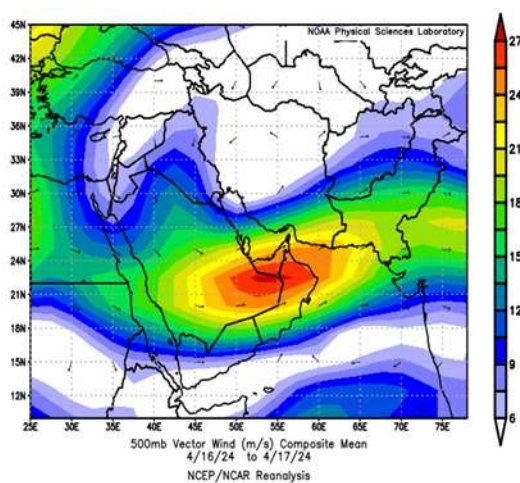
شکل ۱۸- نقشه وزش رطوبتی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال روز ۲۸ فروردین



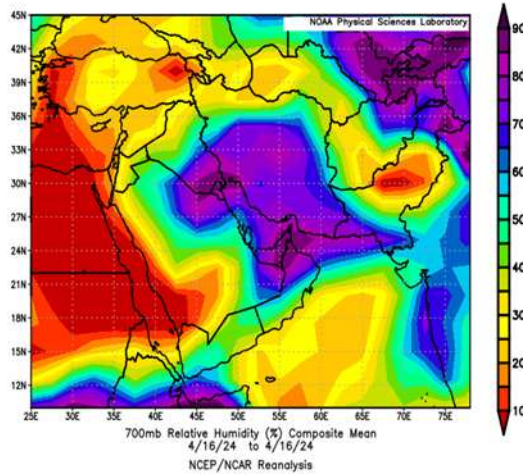
شکل ۱۹- نقشه چرخندگی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال روز ۲۸ فروردین



شکل ۲۰- نقشه رودباد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال روز ۲۸ فروردین



شکل ۲۱- نقشه سرعت باد تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال



شکل ۲۲- نقشه رطوبت نسبی تراز ۷۰۰هکتوپاسکال

### نتیجه گیری

منطقه شد و نقش مهمی در تأمین رطوبت لازم برای بارش‌های سنگین ایفا کرد. در روز ۲۸ فروردین، ناوه بسیار عمیق با جهت‌گیری شمال‌شرقی-جنوب‌غربی در مناطق مرکزی ایران مستقر شد و با ایجاد شرایط صعودی و همگرایی سطحی، بارش‌های شدید را در این نواحی پدید آورد. کم فشار سطحی مستقر بر روی خلیج فارس نیز به سمت داخل کشور حرکت کرده و همراه با انتقال رطوبت از دریای سرخ و خلیج فارس، زمینه لازم برای وقوع بارش‌های سنگین را فراهم کرد. نقشه‌های امگا و چرخندگی نشان دادند که منطقه مورد مطالعه در شرایط ناپایداری و تشدید صعود قرار داشته و جت استریم فوقانی با موقعیت واگرایانه، تقویت جریان‌های صعودی را تسهیل کرده است. مطالعه حاضر از نظر الگوی سینوپتیکی با نتایج پژوهش‌های قبلی همخوانی دارد. به‌عنوان نمونه، لشکری و اسفندیاری (۱۴۰۰) نشان دادند که بارش‌های سنگین غرب و جنوب غرب ایران بیشترین تأثیر پذیری را از الگوی ترکیبی کم فشار سودان و مدیترانه دارند. گندمکار (۱۴۰۱) در بررسی دو موج بارشی فروردین ۱۳۹۸ استان لرستان، نقش ناوه عمیق و تعامل سیستم‌های سیکلونی (شرق مدیترانه) و آنتی‌سیکلونی (خلیج عدن) را در تزریق رطوبت و ایجاد بارش سنگین تأیید کردند. دریاباری (۱۴۰۱) نیز با بررسی رخداد ۱۲ فروردین ۱۳۹۸، نقش ناوه شرق مدیترانه و منابع رطوبتی دریای سرخ، مدیترانه و خلیج فارس را در ایجاد بارش‌های سنگین نشان

در این پژوهش دو رخداد بارش سنگین در روزهای ۶ و ۲۸ فروردین ۱۴۰۳ در استان یزد مورد تحلیل سینوپتیکی قرار گرفت. نتایج تحلیل آماری نشان داد که این دو موج بارشی در قالب بارش‌های فرین رخ داده و دارای شدت و گستره قابل توجهی بوده‌اند. بررسی شرایط همیدی نشان داد که در هر دو رخداد، استقرار ناوه‌های عمیق در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نقش کلیدی در ایجاد شرایط صعودی و تشدید بارش داشته است. در روز ۶ فروردین، ناوه عمیق با جهت‌گیری جنوب‌غربی-شمال‌شرقی از منطقه دریای سرخ، خلیج فارس و شرق مدیترانه به سمت مناطق مرکزی ایران حرکت کرده و موجب تقویت صعود هوا و ایجاد الگوی کم فشار سطحی در مناطق مرکزی شد. همزمان، نفوذ زبانه‌های واچرخندی مدیترانه و تقویت چرخند مستقر بر خلیج فارس، انتقال رطوبت از دریاهای گرم جنوبی را به داخل کشور تسهیل کرد. نقشه امگا در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نیز وجود هسته صعودی و امگا منفی گسترده را در غرب و مرکز ایران نشان داد که نشانگر ناپایداری شدید و فراهم بودن شرایط صعودی برای بارش‌های سنگین بود. همچنین، شاخص‌های ناپایداری جو (بر پایه داده‌های جو بالای شیراز) نشان دهنده ناپایداری قابل توجه و امکان وقوع بارش‌های سنگین و همرفتی بود. در این رخداد، زبانه رطوبتی با رطوبت نسبی ۶۰-۹۰ درصد از خلیج فارس وارد

بلندمدت و به کارگیری ترکیبی داده‌های بازتحلیل، ایستگاهی، ماهواره‌ای، الگوهای غالب هم‌دیدگی بارش‌های سنگین استان یزد با دقت بالاتری استخراج و شناسایی شود. افزون براین، استفاده از مدل‌های عددی با قدرت تفکیک مکانی بالا می‌تواند به جداسازی نقش فرآیندهای هم‌دیدگی و عوامل محلی کمک کرده و فهم روشن‌تری از ساز و کار شکل‌گیری سیلاب‌های ناگهانی در منطقه ارائه دهد.

داده است. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که رخداد‌های ۶ و ۲۸ فروردین ۱۴۰۳ در استان یزد نیز از الگوی عمومی رخداد‌های حدی ایران تبعیت کرده و حاصل هم‌زمانی دینامیک تراز میانی-بالایی (ناوه عمیق، واگرایی و تقویت صعود) با تغذیه رطوبتی از منابع دریایی جنوبی و جنوب‌غربی بوده‌اند. در پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود با تحلیل تعداد بیشتری از رخداد‌های بارش فرین در یک بازه آماری

## References

- [1]. Alizadeh, Z., Sabzevari, M & Hessam, S. M. (2024). Synoptic-dynamic analysis of the extreme precipitation event of 5-6 April 2024 in Khuzestan Province and comparison with global weather forecast model outputs . Proceedings of the 21st Iranian Geophysics Conference ,Iran [In Farsi].
- [2]. Asakereh, H. (2012). Changes in the frequency distribution of extreme precipitation in Zanzan City. *Geography and Environmental Planning*, (1), 51-66[In Farsi].
- [3]. Chikoore, H., Bopape, M. J. M., Ndarana, T., Muofhe, T. P., Gijben, M., Munyai, R. B., ... & Maisha, R. (2021). Synoptic structure of a sub-daily extreme precipitation and flood event in Thohoyandou, north-eastern South Africa. *Weather and Climate Extremes*, 33, 100327.
- [4]. Daryabari, J., Nouri Ara, R., Alijani, B., & Borna, R. (2022). Synoptic analysis of the April 2019 torrential rainfall in Iran (Case study: Lorestan Province). *Journal of Climatological Research*, 13(52), 21-36.
- [5]. Deumlich, D., & Gericke, A. (2020). Frequency trend analysis of heavy rainfall days for Germany. *Water*, 12(7), 1950. <https://doi.org/10.3390/w12071950>.
- [6]. Flaounas, E., Fita, L., Lagouvardos, K., & Kotroni, V. (2019). Heavy rainfall in Mediterranean cyclones. Part II: Water budget, precipitation efficiency and remote water sources. *Climate Dynamics*, 53(5), 2539-2555. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4349-7>
- [7]. Flaounas, E., Gray, S. L., & Wernli, H. (2023). Mediterranean cyclones and their contribution to extreme precipitation. *Weather and Climate Dynamics*, 4, 15-34. <https://doi.org/10.5194/wcd-4-15-2023>
- [8]. Galway, J. G. (1956). The lifted index as a predictor of latent instability. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 37, 528-529.
- [9]. Gandomkar, A., Beiravand, E., Abbasi, A., & Khodaghali, M. (2022). Statistical-synoptic analysis of heavy rainfall leading to flooding in April 2019 in the Dorud-Borujerd watershed. *Scientific-Research Journal of Natural Environmental Hazards*, 11(32), 169-188.
- [10]. George, J. J. (1960). *Weather forecasting for aeronautics*. Academic Press.
- [11]. Hosseini, M., & Masavian, A. (2015). An investigation of the simultaneity of Black Sea high-pressure system events and daily precipitation over Iran. *Geographical Research Quarterly*, 30(1), 1-16. [In Farsi]
- [12]. Khorshid Doost, A. M., Behrouz Sari, S., Ghermez Cheshmeh, B., & Jafarzadeh, F. (2018). Projection of heavy precipitation over the southern Caspian Sea coasts under climate change conditions during 2010-2029. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 12(42), 121-122. [In Farsi].

- [13]. Lashkari, H., & Esfandiari, N. (2021). Synoptic and thermodynamic patterns of atmospheric rivers leading to heavy precipitation during the cold season in Iran. *Natural Environmental Hazards*, 10(29), 125–144. <https://doi.org/10.22111/jneh.2020.33830>. 1652 [In Farsi].
- [14]. Lucas, E. W. M., de Souza, F. D. A. S., dos Santos Silva, F. D., da Rocha Júnior, R. L., Pinto, D. D. C., & da Silva, V. D. P. R. (2021). Trends in climate extreme indices assessed in the Xingu River Basin, Brazilian Amazon. *Weather and Climate Extremes*, 33, 100306. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100306>
- [15]. Masoudian, S. A. (2022). Climatological–meteorological analysis of flood-producing precipitation during spring 2019 in western Iran. *Natural Environmental Hazards*, 12(37), 101–116. <https://doi.org/10.22111/jneh.2022.43039>. 1914 [In Farsi].
- [16]. Nikandish, N. (2021). Synoptic investigation and spatial analysis of extreme precipitation in the Kashan Plain Basin. *Journal of Meteorology and Atmospheric Sciences*, 4(4), 339–355. <https://doi.org/10.22034/jmas.2023.361652.1187> [In Farsi].
- [17]. Showalter, A. K. (1953). A stability index for thunderstorm forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 34(6), 250-252.
- [18]. Sioutas, M. V., Flocas, H. A., & Simmonds, I. (2003). Climatology of severe thunderstorms in the Mediterranean. *Theoretical and Applied Climatology*, 75(1–2), 3–14. <https://doi.org/10.1007/s00704-002-0716-3>
- [19]. Tapiador, F. J. Turk, F. J. Petersen, W. Hou, A. Y., García-Ortega, E. Machado, L. A. and De Castro, M. (2012). Global precipitation measurement: Methods, datasets and applications. *Atmospheric Research*, 104, 70-97. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.10.021>
- [20]. Zhang, W., Alexander, L. V., & Dunn, R. J. H. (2023). Global changes in precipitation extremes under a warming climate. *Journal of Climate*, 36(5), 1743–1762. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0321.1>

## Synoptic analysis of atmospheric circulation patterns affecting the precipitation of Farvardin 2024 in Yazd Province (Research Paper)

1- Kamal Omidvar\*, Professor, Department of Geography, Faculty of Humanities and Social Sciences, Yazd University, Yazd, Iran.

komidvar@yazd.ac.ir

2- Hajar Toofani Kopani, PhD Student, Department of Geography, Faculty of Humanities and Social Sciences, Yazd University, Yazd, Iran.

3- Hamideh Dehghan, PhD Student, Department of Geography, Faculty of Humanities and Social Sciences, Yazd University, Yazd, Iran.

4- Forough Mohammadi Ravari, PhD Student, Department of Geography, Faculty of Humanities and Social Sciences, Yazd University, Yazd, Iran.

Received: 24 Mar. 2026

Accepted: 20 Jun. 2026

### Abstract

Heavy and torrential rainfall, as one of the most important climatic hazards, always plays an effective role in the occurrence of flash floods and inflicting extensive damage to the infrastructure, construction and agricultural sectors. The aim of this research is to synoptically analyze the atmospheric circulation patterns affecting the torrential rainfall event of Farvardin 2024 in Yazd province. In order to examine the spatial distribution pattern of precipitation, CHIRPS satellite precipitation data was used. Also, to analyze the synoptic conditions governing this event, maps of the land surface pressure, the middle level of 500 hectopascals and maps of moisture, omega and circulation at the level of 850 hectopascals were analyzed during two days of Farvardin 6 and 28, 1403. In order to investigate the state of atmospheric instability, the instability indices SI, KI, TTI and LI were calculated using the thermodynamic diagram of the Shiraz station, which confirms the existence of unstable atmospheric conditions on the days of precipitation. The results of the synoptic analysis showed that the establishment of a truncated low on both days of the study led to the formation of a deep trough with a southwest-northeast extension, such that the Red Sea, the Persian Gulf and the eastern Mediterranean were located along the axis of the trough, and conditions were provided for air ascent and the penetration of low-pressure systems into the central regions of the country. On these two days, the omega index reached a significant and extreme value of about -0.2 Pascal/second at the level of 850 hectopascals, which indicates strong air ascent. In terms of moisture supply, the results showed that the main moisture sources at the level of 850 hectopascals included the Red Sea, the Persian Gulf, and the Sea of Oman, and the specific humidity in the region reached about 8 to 10 grams per kilogram of dry air. The simultaneous movement of the constant-speed wind blades with a southwest-northeast direction and the maximum relative humidity cores located over the Red Sea and the Persian Gulf played an important role in injecting moisture and intensifying the phrenic precipitation in Yazd province. In general, the combination of strong dynamic conditions, adequate moisture supply, and severe atmospheric instability was the main factor in the occurrence of the phrenic precipitation in Farvardin 2024 in the study area.

**Keywords:** Atmospheric circulation patterns, Yazd province, torrential rainfall, instability indices, synoptic analysis.