

## تحلیل همدید- ترمودینامیک مخاطره سیلاب‌های لحظه‌ای ناشی از بارش‌های رگباری مناطق کوهستانی (حوضه قره‌سو)



مصطفی کرمپور\*

استادیار اقلیم‌شناسی دانشگاه لرستان، لرستان، ایران

زهرا زارعی چقابلکی (zareiz.az@fh.lu.ac.ir)

دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی دانشگاه لرستان، لرستان، ایران

اکرم میرهاشمی (M.akram@yahoo.com)

دانش‌آموخته جغرافیای طبیعی، لرستان، ایران

محمد رستمی فتح‌آبادی (mohammadrostami875@gmail.com)

دانش‌آموخته جغرافیای طبیعی، لرستان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۷/۱۰ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۸/۳)

### چکیده

حوضه قره سو یکی از زیرحوضه‌های رودخانه کرخه است که در استان کرمانشاه در غرب ایران قرار دارد. به‌رغم سیل خیز نبودن حوضه از لحاظ فیزیوگرافی، سیلاب‌های شدیدی در این حوضه رخ داده است. مهم‌ترین هدف این پژوهش، دستیابی به دیدی کلی از شرایط همدید - ترمودینامیک مؤثر بر بارش‌های موجد دبی‌های حدی است. بر این اساس از دو پایگاه داده شامل: الف) داده‌های دبی و بارش روزانه اندازه‌گیری شده در سطح حوضه با پوشش زمانی ۱۳۸۹-۱۳۵۱، و ب) دمای هوا، فشار هوا، ارتفاع ژئوپتانسیل، سرعت باد مداری و باد نصف‌النهاری، نم و یخ و نم نسبی ترازهای ۱۰۰، ۸۵۰، ۷۰۰، ۵۰۰، ۴۰۰، ۳۰۰، ۲۵۰، ۱۵۰ و ۱۰۰ هکتوپاسکال نگاشته شده در مرکز NCEP/NCAR به‌صورت پایش‌های شش‌ساعته استفاده شد. در ادامه، با کاربرد روش توزیع احتمالاتی حد‌نهایی تیپ یک با دوره بازگشت ده‌هزار ساله آستانه دبی ۲۴۷/۰۲ متر مکعب بر ثانیه در روز به‌عنوان معیار تشخیص دبی‌های استثنایی شناسایی شد که در نهایت پنج سیلاب برای تبیین استخراج شد که از میان آنها به تحلیل یک نمونه پرداخته شد. نتایج نشان داد که در طی این روزهای بارشی، سامانه‌های بندالی همچون سامانه رگس، امگا، کم ارتفاع بریده و پشته پرفشار در ترازهای میانی جو بر منطقه خاورمیانه - مدیترانه حاکم اند که این الگوها خود گویای برهم خوردن حالت بهنجار جو هستند. همچنین بررسی شاخص‌ها و نمودارهای ترمودینامیک حاکی از نبود هم‌نهشت بیشینه شاخص‌ها و بیشینه ناپایداری‌های شرطی با بیشینه بارش‌هاست. بنابراین آگاهی از شرایط همدیدی سامانه‌هایی که به سیلاب منجر می‌شوند می‌تواند در اخطار سیل قبل از وقوع بحران حائز اهمیت باشد.

**واژه‌های کلیدی:** تحلیل ترمودینامیک، تحلیل همدید، حوضه قره‌سو، سامانه بندال، سامانه سودانی، شاخص‌های ناپایداری.

## مقدمه

سیل معمولی ترین خسارت محیطی است. هر ساله سیلابها بیش از ۲۰۰۰ نفر را از بین می‌برند و بر ۷۵ میلیون نفر از جمعیت مردم جهان تأثیر می‌گذارند [۱۲]. سیل به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بلایای طبیعی در کشور ما مطرح است و آنچه از این بلای طبیعی فاجعه می‌سازد ناآگاهی برای مقابله با عواقب آن و پیشگیری از تأثیر سوء وقایع طبیعی بر ارکان تندرستی - اقتصادی و محیطی است [۲۶]. نکته نگران‌کننده در این زمینه، روند افزایشی تلفات و خسارات سیلاب در جهان در دهه‌های اخیر است. تلفات جانی تندسیلابها که در حوضه‌های کوچک به‌وقوع می‌پیوندند، اغلب بیشتر از تلفات جانی سیلاب‌های رودخانه‌های بزرگ است. این امر ممکن است ناشی از واکنش سریع‌تر حوضه‌های کوچک به بارش، به‌ویژه بارش‌های شدید باشد. در دهه‌های اخیر با توجه به تغییر اقلیمی که در اثر فعالیت‌های غیرمتعارف انسانی به‌وجود آمده، پدیده‌های حدی سیر صعودی داشته‌اند که یکی از مهم‌ترین آنها، بارش و دبی است. در این زمینه، شناسایی بارش‌های حداکثری و پیرو آن شناسایی دبی‌های حداکثر منتج از آن در هر منطقه لازم است. محققان زیادی در داخل و خارج ایران در این زمینه مطالعاتی انجام داده‌اند، از جمله ویلانوا و همکاران [۲۵] برای بررسی حداکثر واکنش سیلاب به بارش همرفتی کوتاه‌مدت، توفان رخ داده در تاریخ ۲ ژوئن ۲۰۰۸ را که سبب ایجاد سیل در حوضه رودخانه استارزل<sup>۱</sup> در جنوب غرب آلمان شد، بررسی کردند. آنان در نهایت آشکار کردند که حرکت توفان اثر زیادی بر افزایش اوج سیلاب تا ۱۳ درصد داشته است. کاوالکانتی [۱۵] الگوهای هم‌دید بزرگ مقیاس مرتبط با بارش‌های سنگین آمریکای جنوبی را طی دهه اول قرن بیست و یکم بررسی کرد. یافته‌های وی نشان داد که کمربند همگرایی حاره‌ای و اغتشاشات شرقی مهم‌ترین سامانه‌هایی‌اند که بر روی منطقه شمال شرق به بارش‌های سنگین منجر می‌شوند. سن چن و همکاران [۱۶] به بررسی تأثیرات ناهمواری‌ها بر رخداد بارش‌های سنگین در جنوب غرب تایوان، در طول فصل گرم پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که صعود توده هوای مرطوب از کوهستان، علت بارش‌های سنگین در این منطقه است. گاریگ [۱۴] در مطالعه‌ای با استفاده از مدل MMS به شبیه‌سازی بارش همرفتی ناشی از جزیره گرما بر روی آتلانتا پرداخت. خروجی‌های مدل وی نشان داد که رابطه‌ای قوی بین جزیره گرمای شهر، همگرایی و سرعت فرازش وجود دارد. سبزی‌پرور و همکاران [۲۴] با بررسی بیست بارش شدید منجر به سیلاب در حوضه آبریز رودخانه دالکی به این نتیجه رسیدند که سیلاب‌های شدید در پی تقویت مرکز کم‌فشار حرارتی سودان و همزمان با آن تغذیه رطوبت از اقیانوس هند و دریای مدیترانه

---

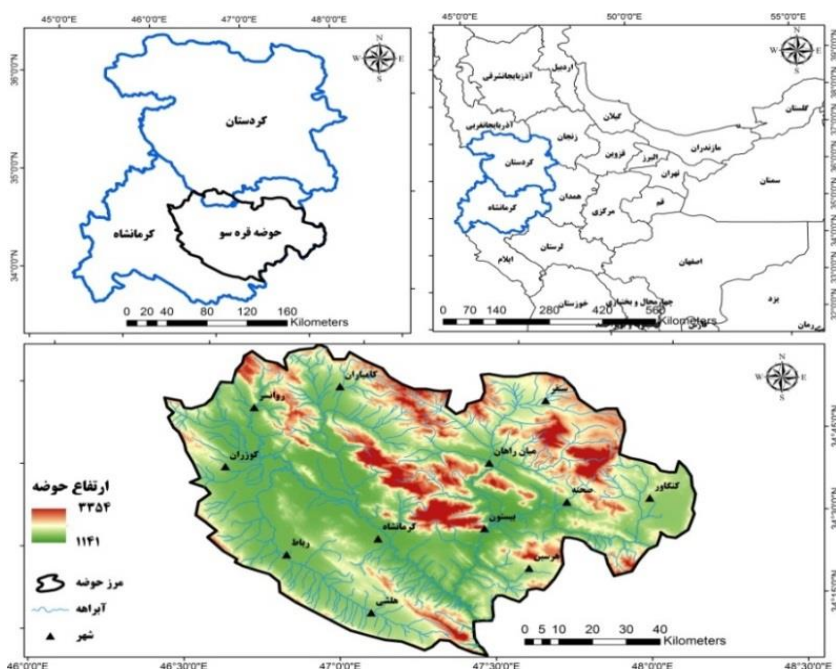
1. Starzel

رخ می‌دهد. سیبرت و همکاران [۲۲] برای بارش‌های سنگین روزانه در استرالیا، هفت الگوی سینوپتیک معرفی کردند. آنان معتقدند نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند اطلاعات زیادی در مورد اقلیم‌شناسی همدید بارش‌های سنگین اتریش به‌دست دهد. لیو لپینگ [۱۹] سامانه بارش‌های سنگین رخ داده بر روی رودخانه یانگ‌تسه در طی فصل مایو را با استفاده از سامانه راداری دوپلر-دوگانه و تصاویر ماهواره‌ای مطالعه کرد. نتایج مشاهدات وی نشان داد که بارش‌های شمال شرق و شمال غرب با طول ۱۰۰ کیلومتر شامل تعدادی از سلول‌های همرفتی  $\beta$  متوسط با ابعاد ۲۰ تا ۵۰ کیلومتر بوده است. رحیمی [۱۰] در پژوهشی به بررسی تأثیر رگبارهای منفرد بر مدیریت بحران سیل در حوضه فارسان پرداخت. در نهایت با توجه به مقادیر شدت بارش و دبی، راهکارهای اعمال مدیریت بحران مانند عملیات بیولوژیک در ارتفاعات، احداث سد مخزنی، ساحل‌سازی رودخانه برای جلوگیری و کاهش خسارات ناشی از سیلاب به اقتصاد کشاورزی حوضه را پیشنهاد کرد. خوشحال و علیزاده [۴] با رویکرد ترمودینامیکی و همدیدی بارش موجد سیلاب تاریخ ۱۳۸۸/۶/۲۴ شهر درگز را مطالعه کردند. آنها با کاربرد شاخص‌های ناپایداری دریافتند که این رگبار در اثر ناپایداری شدید همرفتی در ناحیه مورد نظر ایجاد شده است. همچنین کشیده شدن تاوه قطبی تا شمال شرق کشور، سبب جابه‌جایی پرفشار آروز بر روی ایران شده که شرایط برای صعود کم‌فشار حرارتی گنگ مهیا شده و در مدت کوتاهی موجب ریزش رگبار شدیدی شده است. احمدی و همکاران [۲] به مطالعه نارسایی الگوهای سینوپتیک بارش سنگین مولد سیلاب مخرب در شهرستان جیرفت پرداختند نتایج نشان داد که وجود کم‌فشار چندهسته‌ای با محور شمالی-جنوبی بر روی ایران مرکزی، کشیده شدن فرود بسیار عمیق با محور شمال شرق-جنوب غرب بر روی روسیه، ترکیه، عراق، عربستان و دریای سرخ و قرار گرفتن منطقه تحقیق در زیر منطقه واگرایی بالایی، استقرار هسته منفی پیچانه در همه سطوح جوی روی جیرفت، بالاسو بودن هوا در همه سطوح موجب صعود هوا و ناپایداری شده و مقادیر تاوایی گویای جریان واگرایی و صعودی هوا برای همه سطوح جو است. دارند [۷] به مطالعه واکاوی بسامد رخداد رودبادهای هنگام بارش‌های سیل‌آسای استان کردستان پرداخت. نتایج مطالعه وی نشان داد که به‌هنگام بارش‌های سنگین استان در فصل مرطوب، رودبادهای تا تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال کشیده شده‌اند. هسته بیشینه فراوانی رخداد رودباد بر روی شمال و شمال شرق عربستان قرار دارد. در تمام دیدبانی‌ها، استان کردستان در قطاع چپ خروجی رودباد قرار دارد. براساس تحقیق خوش‌اخلاق و همکاران [۵]، قرارگیری منطقه پژوهش در خروجی جت باد جنب حاره‌ای، تأثیر مهمی در تقویت و عمیق کردن کم‌فشار مدیترانه-سودانی و حرکت شرق‌سوی آن داشته است. دارند [۸]، به تحلیل همدید بارش‌های سیل‌آسای استان کردستان پرداخت و دریافت که بیشترین شار همگرایی رطوبت برای بارش‌های سیل‌آسای فصل

مرطوب در ترازهای زیرین جو (۱۰۰۰، ۹۲۵ و ۸۵۰) اتفاق افتاده است و در ترازهای بالای جو (۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰)، میزان شار همگرایی کمتر است. هدف اساسی این مطالعه، شناخت همدید-ترمودینامیک سیلاب‌های لحظه‌ای مناطق کوهستانی (حوضه قره‌سو) است که نتایج آن به شناسایی سامانه‌های سیل‌آسا و مخرب در این مناطق کمک می‌کند.

### موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز قره‌سو

منطقه مطالعاتی این تحقیق، زیرحوضه قره‌سو، یکی از بزرگ‌ترین حوضه‌های غرب کشور و از زیرحوضه‌های حوضه کرخه است که در شمال غرب آن قرار گرفته است. مساحت این حوضه ۵۳۵۴ کیلومتر مربع است. حوضه آبریز قره‌سو مطابق شکل ۱ در محدوده جغرافیایی طول‌های شرقی ۴۶°۲۲' تا ۴۷°۰۱' و عرض‌های شمالی ۳۴°۰۲' تا ۳۴°۵۷' قرار گرفته است. رودخانه قره‌سو از شاخه‌های مهم و اولیه رودخانه سیمره است و جریان آب قسمت‌هایی از استان‌های کرمانشاه و کردستان را جمع‌آوری و به رودخانه سیمره هدایت می‌کند.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه تحقیق

## روش تحقیق

نخست آمار بلندمدت بارش و دبی ایستگاه‌های دبی‌سنجی و باران‌سنجی پل کهنه و قورباغستان و آمار بارش و دمای ایستگاه همدید کرمانشاه، از سازمان هواشناسی و شرکت آب منطقه استان کرمانشاه در طی دوره زمانی ۱۳۸۹ - ۱۳۵۱ اخذ شد. سپس برای آگاهی از وضعیت قائم جو، از داده‌های ایستگاه رادیو گمانه کرمانشاه که معرف وضعیت دینامیکی - ترمودینامیکی حاکم بر جو حوضه قره‌سوست و از پایگاه اینترنتی دانشگاه وایومینگ<sup>۱</sup> در دسترس‌اند، استفاده شد. به‌منظور تحلیل و ترسیم نمودارهای مربوط از نرم‌افزار RAOB استفاده شد. در پایان، برای شناسایی سامانه‌های مؤثر در وضعیت‌های هواشناختی حوضه، از داده‌های ارتفاع ژئوپتانسیل (برحسب متر)، سرعت باد مداری و نصف‌النهاری (برحسب متر بر ثانیه) نم ویژه (برحسب گرم بر کیلوگرم) دمای هوا (برحسب کلون) مرکز ملی محیطی و اقیانوس‌شناسی ایالات متحده آمریکا استفاده شد که با تفکیک ۲/۵ در ۲/۵ درجه قوس مکانی با پوشش زمانی شش‌ساعته در نشانی اینترنتی [www.cdc.noaa.gov](http://www.cdc.noaa.gov) در دسترس‌اند. همچنین برای ترسیم نقشه‌های این داده‌ها از نرم‌افزار GRADS بهره گرفته شد.

بعد از مشخص شدن سیلاب‌های استثنایی و تعیین روزهای بارشی تأمین‌کننده حجم آب آنها، نمودارهای ترمودینامیکی این روزهای بارشی توسط نرم‌افزار RAOB ترسیم و تحلیل شد. در نهایت برای تحلیل همدید و شناسایی سامانه‌های همدید ایجادکننده این بارش‌های سیلابی، الگوی فشار روزهای بارشی از زمان شروع تا پایان بارش، در مقیاس مکانی با طول ۳۰ درجه غربی تا ۱۰۰ درجه شرقی و عرض ۱۰ درجه شمالی تا ۸۰ درجه شمالی تحلیل شد. برای شناسایی منابع رطوبتی این بارش‌ها، با استفاده از معادله همگرایی شار رطوبتی<sup>۲</sup> ارائه‌شده توسط بناکوس و شولز، همگرایی رطوبت در همان محدوده تحقیق محاسبه شد. آنها معادله همگرایی شار رطوبتی را براساس اصل پیوستگی بخار آب در دستگاه مختصات فشار به‌شرح زیر محاسبه کردند:

$$\frac{dq}{dt} = S$$

که

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + \omega \frac{\partial}{\partial p}$$

و  $u$ ،  $v$  و  $\omega$  مؤلفه‌های سه‌بعدی استاندارد باد در دستگاه مختصات فشار، و  $q$  رطوبت ویژه

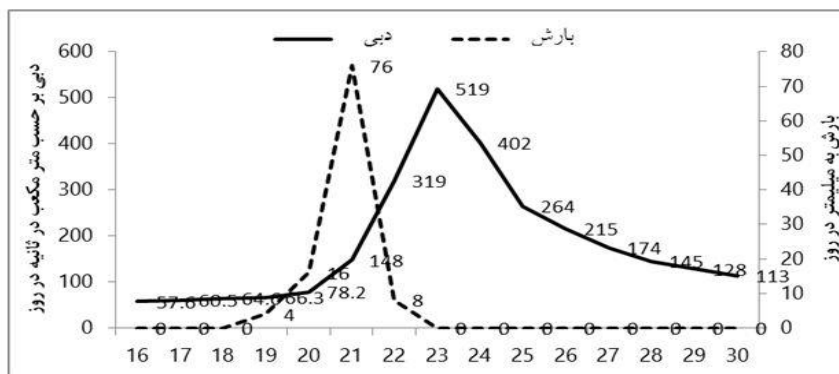
1. [weather.uwyo.edu/upperair](http://weather.uwyo.edu/upperair)
2. Moisture flux convergence (MFC)

است. S مبین ذخیره بخار آب است که برابر با اختلاف بین منابع و اتلاف بخار آب همگام با حرکت بسته هواست. به طور معمول در اینجا S از E-C اتخاذ می‌شود که E(C) عبارت است از آهنگ تبخیر (تراکم) به درون بسته هوا.

### یافته‌ها

در این بخش پس از اعمال روش آماری توزیع احتمالاتی گامبل با دوره بازگشت دهه‌زاساله بر روی داده‌های دبی ایستگاه قورباغستان، آستانه دبی ۲۴۷/۰۲ متر مکعب بر ثانیه در روز به‌عنوان معیار تشخیص سیلاب‌های استثنای حوضه قره‌سو تعیین شد. در این خصوص پنج دبی شامل سیلاب‌های اسفند ۱۳۸۳، آذر ۱۳۷۳، اسفند ۱۳۶۶، اسفند ۱۳۵۲ و فروردین ۱۳۵۳ و در نهایت سیلاب‌های اسفند ۱۳۷۶ و فروردین ۱۳۷۷ که میزان آنها برابر یا فراتر از آستانه حاصل بود به‌عنوان سیلاب‌های استثنای حوضه قره‌سو شناسایی شد و سپس برای آگاهی از نیمرخ قائم جو و شناسایی سامانه‌های مؤثر در رخداد بارش‌های ایجادکننده این سیلاب و چگونگی شار رطوبت تلاش شد با استفاده از نمودارهای ترمودینامیک و نقشه‌های همدید این مجموعه اهداف مشخص شوند. در ادامه به بررسی سیلاب اسفند ۱۳۸۳ پرداخته شد.

سیل اسفند ۱۳۸۳ با بیشینه میانگین روزانه ۵۱۹ متر مکعب بر ثانیه، یکی از شدیدترین سیلاب‌های رخ داده در حوضه قره‌سو در ۵۰ سال اخیر است. بارش‌های حوضه از هجدهم اسفند شروع شد و تا بیست‌ودوم اسفند ادامه داشت. مقایسه بیشینه دبی با بیشینه بارش نشان‌دهنده تأخیری دوازده روز در بیشینه دبی نسبت به بیشینه بارش است (شکل ۲) که نشان می‌دهد زمان تمرکز حوضه دست‌کم بیش از ۴ روز است.



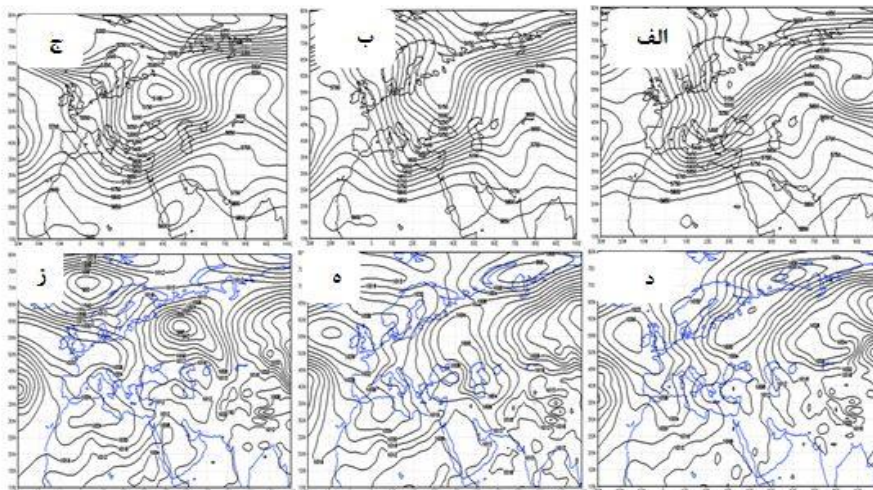
شکل ۲. آبنمود سیلاب اسفند ۱۳۸۳

نقشه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال روز هجدهم اسفند (شکل ۳ الف)، نشان می‌دهد که در این روز یک سامانه بلوکینگ از نوع رکس بر روی اقیانوس اطلس تشکیل شد که پشته متعاقب پرارتفاع آن تا عرض‌های قطبی امتداد یافت که موجب ورود هوای گرم به عرض‌های قطبی شد؛ زبانه آن به سمت عرض‌های جنوبی در جهت شمال شرقی - جنوب غربی با عبور از اروپای مرکزی و دریای مدیترانه تا شمال آفریقا امتداد یافت. از طرفی پشته‌ای از پرارتفاع جنب‌حاره‌ای بر روی شبه‌جزیره عربستان با جهت شمال شرقی تا سواحل جنوب شرقی خزر کشیده شد. غرب ایران در کناره پیش‌باد این پرارتفاع قرار دارد. با توجه به شیب فشاری بسیار ضعیف قادر نیست ناپایداری شدیدی در نواحی غربی ایران به‌وجود آورد. بررسی نقشه تراز سطح دریا (شکل ۳ د) حاکی از آن است که منطقه خاورمیانه - مدیترانه و ایران تحت تأثیر سامانه‌های فشاری همچون پرفشار جنب‌حاره‌ای بر روی اقیانوس اطلس، کم‌فشار قطبی روی شمال روسیه و چندین سلول پرفشار روی آسیای مرکزی و مغولستان بود. از این‌رو الگوی غالب سطح دریا بر روی ایران در این روز پرفشار بود.

در روز نوزدهم اسفند، در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۳ ب) سامانه رکس با تغییر اندکی نسبت به روز پیش، همچنان روی اقیانوس اطلس تداوم داشت. از سوی پیشروی همزمان پشته آن به سمت شرق و پیشروی پشته جنب‌حاره‌ای قرار گرفته در امتداد شبه‌قاره هند - دریاچه بالخاش به سمت غرب، سبب فشرده شدن ناوه قطبی و شمالی - جنوبی شدن امتداد آن تا جنوب دریای سیاه شد. سپس به علت جابه‌جایی شرق سو و قوی‌تر شدن پشته جنب‌حاره‌ای شرق کم‌ارتفاع سامانه رکس، دچار یک جایگشت شرق سو نسبت به روز قبل، از دریای سیاه تا شمال آفریقا شد. ریزش هوای سرد توسط بخش پشت‌باد پشته جنب‌حاره‌ای و پیش‌باد ناوه قطبی بر روی مدیترانه و همگرایی بادهای گرم جنوب غربی و بادهای سرد شمال شرقی بر روی مدیترانه شرقی و بخش‌های غربی ایران سبب افزایش گرادیان فشار و ناپایداری شدید در این مناطق شد. از طرفی بررسی شار رطوبت در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۴ الف) نشان می‌دهد که بیشتر رطوبت غرب ایران به‌خصوص حوضه قره‌سو توسط بادهای غربی از دریایی مدیترانه وارد می‌شود. در تراز سطح دریا (شکل ۳ ه) زبانه‌های پرفشار از ایران خارج شدند و در مرز شرقی ایران قرار گرفتند. ایران و به‌خصوص غرب کشور، در این روز تحت تأثیر زبانه‌هایی از کم‌فشار تشکیل شده بر روی دریای خزر از شمال، کم‌فشار سودانی از جنوب و زبانه پرفشار جنب‌حاره‌ای از غرب قرار گرفت. آرایش این مراکز، منطقه‌ای تا حدی شبیه یک گردنه هم‌فشار در بخش‌های غربی ایران و شرق مدیترانه به‌وجود آورد. در بیستم اسفند (شکل ۳ ج) سامانه رکس از بین رفت و از گسترش شمال سوی پرارتفاع جنب‌حاره‌ای کاسته شد، اما این پشته با

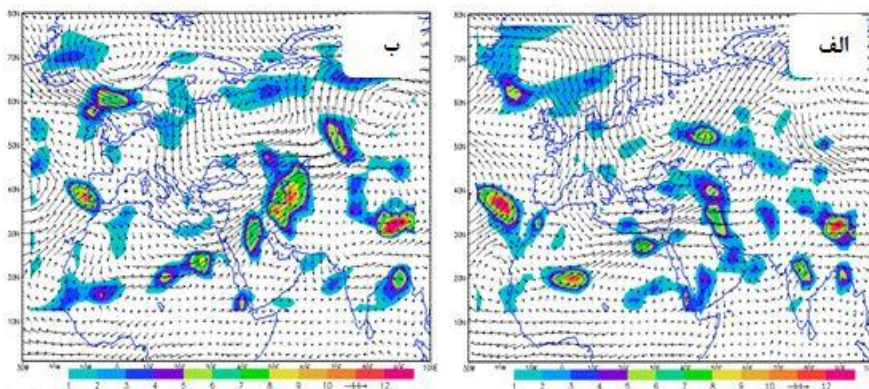
پیشروی به سمت شرق در امتداد اسکاندیناوی با پشتتۀ دریاچۀ بالخاش که در این هنگام به سمت غرب پیشروی کرد، ادغام شد. در این حالت تاوۀ قطبی ضمن عقب‌نشینی به سمت شمال، ارتباطش با بخش جنوبی ناوه قطع شد و یک کم‌فشار بریده روی اروپای شرقی در شمال دریای سیاه تشکیل شد که ناوۀ متعاقب آن در امتداد شبه‌جزیرۀ بالکان تا شمال دریاچۀ چاد امتداد یافت. از طرفی پشتتۀ جنب‌حاره‌ای قرار گرفته روی عربستان به سمت شرق جابه‌جا شده و امتداد محور آن از ایران خارج شد. از این‌رو شمال دریای سرخ، مدیترانۀ شرقی و مرکزی و نیمۀ غربی ایران تحت تأثیر وزش تاوایی مثبت ناشی از ناوۀ کم‌فشار بریده و بخش پیش‌باد پشتتۀ عربستان قرار گرفت.

سامانه‌های تراز سطح دریا (شکل ۳ ز) نیز دچار تغییراتی همسو با تراز بالا شدند، به طوری که مرکز کم‌فشار حاره‌ای روی سودان در غرب دریای سرخ قرار گرفت و ناوۀ سطح بالای مستقر در شرق مدیترانه سبب تشدید فعالیت آن شد، چنانکه این سامانه‌ها در تراز دریا در امتداد با ناوۀ تراز بالا در جهت شمال و شمال شرق حرکت کردند و ضمن ادغام با کم‌فشارهای تشکیل شده در شرق مدیترانه وارد نواحی جنوب غربی و غرب ایران شدند. بررسی نقشۀ تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۴ ب) نشان می‌دهد که بیشتر رطوبت این بارش‌ها از مدیترانۀ مرکزی و شمال دریای سرخ توسط بادهای جنوب غربی وارد حوضۀ قره‌سو شد.



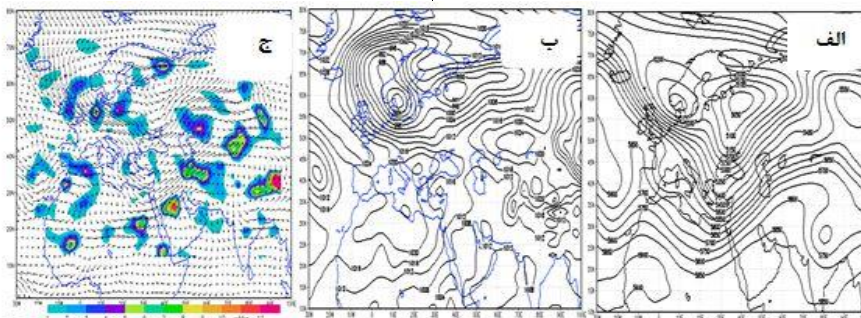
شکل ۳. نقشۀ ارتفاع ژئوپتانسیل و ارتفاع تراز دریا در روزهای هجدهم، نوزدهم و بیستم اسفند ۱۳۸۳ به ترتیب از راست به چپ





شکل ۴. نقشه شار رطوبتی روزهای نوزدهم و بیستم اسفند ۱۳۸۲ به ترتیب از راست به چپ

روز بیست و یکم اسفند (شکل ۵ الف)، یک کم‌فشار بریده در جنوب اسکانندیناوی تشکیل و از طرف شرق با کم‌ارتفاع بریده اروپای شرقی مرتبط شد. ناوه کم‌ارتفاع بریده با جهت شمالی - جنوبی در امتداد مدیترانه شرقی قرار گرفت. بنابراین ریزش هوای سرد توسط ناوه کم‌ارتفاع بریده بر روی مدیترانه شرقی و دریای سرخ که در این هنگام دارای گرمایش نسبی بودند، گرادیان دمایی بسیار شدیدی ایجاد کرد و در نتیجه، منطقه جبهه‌زایی که در روزهای قبل در مدیترانه مرکزی شکل گرفته بود، ضمن تشدید فعالیت به مدیترانه شرقی منتقل شد. همچنین در تراز سطح دریا (شکل ۵ ب)، کم‌فشارهای سودانی و کم‌فشارهای مدیترانه شرقی از این اندرکنش‌های تراز بالا متأثر شدند و با حداکثر فعالیت به سمت شرق و شمال شرق حرکت کردند و غرب ایران را تحت فعالیت ناپایداری‌های شدیدی قرار دادند. با افزایش گرادیان دمایی، سرعت باد در کلیه ترازها افزایش یافت. تشدید سرعت باد در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال نیز سبب ورود رطوبت بیشتری از دریای سرخ و مدیترانه به حوضه قره‌سو شد (شکل ۵ ج). در روز بیست و دوم اسفند کم‌ارتفاع‌های آسیای شرقی و اسکانندیناوی ادغام شدند و یک کم‌ارتفاع با محور شرقی - غربی از غرب اروپا تا غرب اوراسیا تشکیل دادند. از طرفی ارتباط بین کم‌ارتفاع و ناوه متعاقب آن قطع شد و پشته جنب‌حاره‌ای نیز ضمن تضعیف بسیار شدید به شمال دریای خزر انتقال یافت.



شکل ۵. نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، فشار تراز دریا و شار رطوبتی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال بیست و یکم اسفند ۱۳۸۳

شوالتر [۲۳]، شاخصی به نام خودش شاخص شوالتر<sup>۱</sup>، گالوی<sup>۲</sup> [۱۷] شاخص صعود، (LI)<sup>۳</sup> جرج [۱۸] شاخص K، میلر [۲۰] شاخص خطر هوای مخرب SWEAT<sup>۴</sup> و شاخص مجموع مجموعه‌ها TT<sup>۵</sup>، و میلر و مانکریف<sup>۶</sup> [۲۱] شاخص جامع و بسیار بارز انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی (CAPE)<sup>۷</sup> را معرفی کردند که نشان‌دهنده میزان احتمال فعالیت توفان تندی است. این شاخص‌ها برای پیش‌بینی همرفت یا پیش‌بینی مقدار بارش، متناسب با محل مورد بررسی تغییر می‌کنند. در ادامه، به معرفی برخی از این شاخص‌ها می‌پردازیم. در شاخص K از سه تراز مشخص ۷۰۰، ۸۵۰ و ۵۰۰ میلی‌بار برای محاسبه آن استفاده می‌شود. این شاخص امکان توفان تندی را بر پایه آهنگ کاهش دما و محتوای رطوبتی جو پایین و گسترش قائم لایه مرطوب اندازه‌گیری می‌کند. مقادیر بیشتر از ۲۵ درجه سلسیوس برای K نشان‌دهنده رگبار و مقادیر بیشتر از ۳۰ درجه سلسیوس، نشان‌دهنده توفان تندی است. مقادیر مثبت و بزرگ K نشان‌دهنده آهنگ کاهش دما با ارتفاع بین ترازهای ۸۵۰ تا ۵۰۰ میلی‌بار و میزان رطوبت در ۸۵۰ میلی‌بار و نشان‌دهنده احتمال رخداد توفان تندی است. مقادیر با علامت منفی نشان‌دهنده خشکی هوا در تراز ۷۰۰ میلی‌باری است. اگر مقدار  $K < 15$  باشد. پتانسیل بسیار کم و احتمال رعدوبرق خیلی کم است؛ اگر مقدار K بین ۱۵ تا ۲۵ باشد. پتانسیل همرفتی در حد کم است و احتمال رعدوبرق وجود دارد و اگر بین ۲۶ تا ۳۹ باشد،

1. Showalter Index (SI)
2. Galway
3. Lifted Index(LI)
4. Severe Weather Treat Index(SWEAT)
5. Total Total Index (TT)
6. Miller, and Moncrieff
7. Convective Available Potential Energy (CAPE)

پتانسیل همرفتی در حد متوسط است و احتمال رعدوبرق وجود دارد. مقدار K بیش از ۴۰، بیانگر پتانسیل همرفتی زیاد و احتمال رعدوبرق نزدیک به ۱۰۰ درصد است.

شاخص انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی (CAPE) حداکثر انرژی جنبشی ممکن بسته هوای ناپایدار را صرف‌نظر از اثر بخار آب و آب چگالیده‌شده در شنوری نشان می‌دهد. بسته بدون مخلوط شدن با محیط بالا می‌رود و فوراً با فشار محلی محیط سرازگار می‌شود. این شاخص یکی از شاخص‌های عمده برای پیش‌بینی‌های یک یا دوروزه ناپایداری و فقط نشان‌دهنده ناپایداری است. مقادیر زیاد CAPE گویای اختلاف بیشتر بین دمای محیط و دمای بسته هوای بالارونده است. وقتی مقدار CAPE در گستره ۲۰۰۰ تا ۳۵۰۰ ژول بر کیلوگرم باشد، احتمالاً مناسب‌ترین زمان برای رویداد توفان تندی است. اگر مقدار CAPE بین ۱ تا ۱۵۰۰ باشد ناپایداری متوسط، و اگر بین ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ باشد ناپایداری زیاد است. اگر مقدار CAPE بزرگ‌تر از ۲۵۰۰ باشد ناپایداری خیلی زیاد است.

شاخص صعود (LIFTED INDEX) مهم‌ترین شاخص تجربی در بالاروی و صعود محسوب می‌شود. اگر مقدار آن مساوی ۴- تا صفر باشد ناپایداری کم است، اگر از ۷- تا ۴- باشد ناپایداری زیاد است و اگر مساوی ۸- یا کمتر باشد ناپایداری خیلی زیاد است جدول ۱ این مقادیر شاخص‌های فیزیکی را برای منطقه تحقیق نشان می‌دهد.

بررسی دما و نم نسبی و فشار ایستگاه حاکی از آن است که در این روزهای بارشی، حوضه قره‌سو تحت تأثیر یک سامانه کم‌فشار توفانی همراه با جبهه بوده است، به‌طوری که از هفدهم تا بیست‌ویکم اسفند، دما، نم‌نسبی و فشار به ترتیب روند کاهشی، افزایشی و کاهشی داشتند؛ دما از ۱۴ درجه سلسیوس به ۷ درجه سلسیوس، نم نسبی از ۴۴ درصد به ۹۵ درصد و فشار از ۸۶۸ هکتوپاسکال به ۸۶۵ هکتوپاسکال رسید. در روز بیست‌ودوم دما به ۱۷/۸ درجه سلسیوس، فشار به ۸۶۸ و نم نسبی به ۲۰ درصد رسید که نشان‌دهنده عبور سامانه از حوضه قره‌سو است.

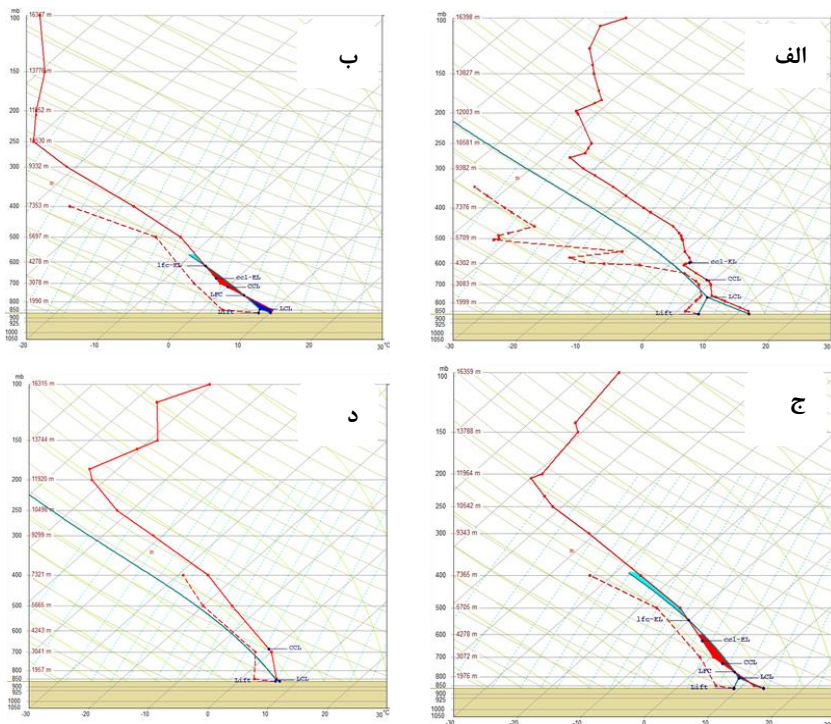
ملاحظه شاخص‌ها (جدول ۱) و نمودارهای ترمودینامیک مبین آن است که در روز هفدهم ناپایداری شدیدی از سطح زمین تا تراز ۷۶۳ هکتوپاسکالی وجود داشت، به‌طوری که افت آهنگ محیطی برابر به ۱۱/۸ درجه سلسیوس در هر ۱۰۰۰ متر رسید؛ اما از این تراز به بعد افت آهنگ محیطی کاهش یافت و به مقدار بی‌درروی اشباع نزدیک شد. از طرفی روند قائم دمای پتانسیل معادل بیانگر نبود ناپایداری پتانسیل بر جو حوضه است. در روز ۱۸ (شکل ۶ الف) نیز نمودار بی‌درروی خشک خارج‌شده از ایستگاه نشان‌دهنده پایداری خشک است؛ اما از تراز ۸۵۰ تا تراز ۷۵۸ هکتوپاسکال چندان شدید نبود و می‌توان گفت جو تقریباً در حالت پایداری خنثی بود؛ از این تراز به بعد جو دارای پایداری مطلق بود. از این‌رو ایجاد بارش در این

روز تنها با دخالت عامل دینامیکی و صعود همدیدی ممکن بوده است. در روز نوزدهم (شکل ۶ ب) شرایط قائم جو دچار تغییر به نسبت شدیدی شد، به طوری که سطح پایه ابر فرارفتی نسبت به روز قبل ۸۰۰ متر پایین تر آمد و دمای همرفتی با ۴ درجه کاهش به ۱۵/۴ درجه سلسیوس رسید؛ ناپایداری پتانسیلی از سطح ایستگاه تا تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال شکل گرفت، یعنی در صورت صعود جمعی لایه مذکور ناپایداری شدیدی تشکیل شد؛ با این حال ناپایداری خشک همچنان وجود نداشت و از طرفی ناپایداری اشباع بر جو حاکم شد.

جدول ۱. میزان شاخص‌های فیزیکی سیلاب اسفند ۱۳۸۳

CAPE	LI	MJI	BI	SWEAT	TTI	KI	شاخص
							زمان
۲	۱/۶	۲۶	۳/۴	۶۳	۴۲/۸	۱۹/۷	۱۳۸۳/۱۲/۱۷
۰	۶/۸	۲۵	۲/۷	۸۸/۸	۳۸/۶	۲۳/۸	۱۳۸۳/۱۲/۱۸
۴۰	۳	۲۶	۳/۸	۱۲۶	۴۱/۶	۲۳/۶	۱۳۸۳/۱۲/۱۹
۹۰	۰/۹	۲۹	۲/۵	۱۸۴/۶	۴۴/۶	۲۹	۱۳۸۳/۱۲/۲۰
۰	۶	۲۴	۳	۱۳۵/۶	۳۸/۵	۲۰/۷	۱۳۸۳/۱۲/۲۱

در روز بیستم اسفند همچنان که از شاخص‌ها پیداست وضعیت جو با دیگر روزهای بارشی متفاوت بود، به طوری که به نظر می‌رسد این روز یک فاصله گذار از یک توده هوای به نسبت شدید به توده هوای بسیار شدید بود. اما نکته شایان توجه، تأثیر ناپایداری گرمایی در این روز است که وزن بیشتری را نسبت به روزهای دیگر در تعیین بارش به خود اختصاص داد. در این روز ناپایداری خشک تنها در لایه ۱۵۹ متر اولیه از سطح زمین وجود نداشت. ناپایداری پتانسیل نیز به شدت کمتر نسبت به روز قبل از سطح زمین تا تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال وجود داشت؛ ولی ناپایداری مشروط نسبت به روز قبل شدیدتر شد. از این رو در اینجا تأثیر عامل دینامیکی در توزیع بارش در سطح حوضه بیشتر می‌شود (شکل ۶ ج). روز بیست و یکم اسفند دما در حدود ۷ درجه سلسیوس افت کرد. نم نسبی و فشار نیز به ترتیب افزایش و کاهش یافت. ناپایداری خشک، اشباع و مشروط به کلی از بین رفت و ناپایداری پتانسیل به ۱۰۰ متر اولیه جو معطوف شد. از طرفی میزان شاخص‌ها نسبت به روز قبل کاهش زیادی یافتند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که همرفت حرارتی تأثیری در ایجاد این بارش‌ها نداشته است، بلکه عامل همدیدی سبب رخداد این بارش‌ها شده است. به طور کلی، مقادیر متغیرها و روند نمودار ترمودینامیک (شکل ۶ د) حاکی از این است که در این روز حوضه قره‌سو تحت تأثیر یک توده هوای سرد و بسیار مرطوب بوده است.



شکل ۶. نمودارهای اسکیتوی رزوهای هجدهم، نوزدهم، بیستم و بیست‌ویکم اسفند ۱۳۸۳

### نتیجه‌گیری

این پژوهش ضمن تأیید بسیاری از نظرهای محققان قبلی آشکار کرد که تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال شرایط بهینه رخداد بارش‌های منجر به سیلاب‌های استثنایی را فراهم کرده است، به طوری که در این روزهای بارشی، الگوی جریان‌های مداری از بین رفت و الگوی نصف‌النهاری همراه با سامانه‌های بلوکینگ جایگزین آن شد که این رخداد به سبب تغییرات مراکز فشار جنب‌حاره و قطبی به وجود آمد. در این زمینه مشاهده شد که در اکثر روزهای بارشی، پراترفاع جنب‌حاره‌ای به سمت عرض‌های بالا کشیده شد و متعاقباً زبان‌های از ناوه قطبی به سمت عرض‌های پایین کشیده شد که این وضعیت سبب افزایش گرادیان مداری دما و فشار و کاهش گرادیان نصف‌النهاری متغیرهای مذکور شد. از این رو الگوی جریان باد بیشتر از الگوی نصف‌النهاری تبعیت می‌کرد. از طرفی بیشتر این روزهای بارشی همراه با تشکیل سامانه‌های بلوکینگ از نوع رکس یا امگا یا کم‌ارتفاع بریده در محدوده مدیترانه - خاورمیانه می‌شوند،

به طوری که سامانه‌های بندال با شکل‌گیری در مناطق مذکور و حرکت به سمت شرق و قرارگیری در نیمه شرقی مدیترانه، هم سبب تقویت سامانه‌های دریای سرخ و حرکت آنها به سمت شمال شرق و هم تقویت و تشکیل سامانه‌های چرخندزایی در شرق مدیترانه و هدایت آنها به سمت شرق و سپس غرب ایران می‌شوند. در بیشتر مواقع، دو سامانه چرخندی مدیترانه و دریای سرخ در مسیر حرکت خود در کشور عراق ادغام می‌شوند و ضمن تشدید فعالیت به طرف غرب ایران حرکت می‌کنند و موجب بارش سیل آسا در حوضه قره‌سو می‌شوند. گاهی نیز مشاهده شده است که مراکز چرخندزایی مدیترانه و سودانی، به‌طور جداگانه بارش‌های سیل آسای حوضه قره‌سو را به‌وجود می‌آورند. مطالعه و شناسایی سامانه‌های ایجادکننده سیلاب‌های مخرب اهمیت زیادی در آگاهی‌بخشی، آمادگی و پیشگیری قبل از وقوع این‌گونه بحران‌های طبیعی دارد. آگاهی از شرایط اقلیمی سطح زمین و سطوح بالای جو به‌عنوان سامانه معتبر اخطار سیل در مدیریت ریسک این‌گونه مخاطرات اقلیمی اهمیت دارد. توجه به مخاطرات ناشی از وقوع سیل در منطقه تحقیق، حتی در دوره‌هایی با بازگشت کوتاه‌مدت تلفات انسانی و خسارت‌های اقتصادی زیادی در پی خواهد داشت که در این زمینه باید مدیران سیاست‌های لازم را اتخاذ کنند.

## منابع

- [۱]. امین جان، سمیه (۱۳۹۳)، تحلیل همدیدی سامانه‌های سیل‌زا در حوضه قره‌سو، دانشگاه محقق اردبیلی - دانشکده ادبیات و علوم انسانی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد.
- [۲]. احمدی، محمود؛ قویدل رحیمی، یوسف؛ حاتمی زرنه، داریوش؛ رضایی، محمد (۱۳۸۹)، نارسایی الگوهای سینوپتیک بارش سنگین مولد سیلاب مخرب در شهرستان جیرفت، جغرافیا سال دوازدهم، شماره ۴۱.
- [۳]. پروین، نادر (۱۳۸۹)، بررسی ارتباط بین تغییرات سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال و سیل در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال بیست و پنجم، شماره ۲ (پیاپی ۹۷).
- [۴]. خوشحال، جواد؛ علیزاده، تیمور (۱۳۸۹)، بررسی همدیدی و ترمودینامیکی رگبار موجد سیلاب ۸۸/۶/۲۴ استان خراسان رضوی، فصلنامه مدرس.
- [۵]. خوش‌اخلاق، فرامرزی؛ صفایی راد، رضا؛ سلمانی، داوود (۱۳۹۳)، واکاوی همدید سیل رخ داده ماه آبان ۱۳۹۰ در شهرستان‌های بهبهان و لیکک، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۶، شماره ۴: ۵۲۴-۵۰۹.

- [۶]. خوش اخلاق، فرامرزی؛ نبوی، سید امید؛ عباسی، اسماعیل (۱۳۹۱)، تحلیل سامانه‌های همدید بارش‌های شدید دوره سرد سال در استان‌های خراسان رضوی و شمالی نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی، سال شانزدهم، شماره ۴۰.
- [۷]. دارند، محمد (۱۳۹۴)، تحلیل همدید بارش‌های سیل‌آسای کردستان، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال پانزدهم، شماره ۳۷: ۷۰-۴۷.
- [۸]. دارند، محمد (۱۳۹۴)، واکاوی بسامد رخداد رودبادها هنگام بارش‌های سیل‌آسای استان کردستان، جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۱۳: ۱۱۳-۹۵.
- [۹]. رحیمی، داریوش؛ میرهاشمی، حمید؛ رحیمی، یونس (۱۳۹۲)، تحلیل ترمودینامیک و سینوپتیکی سیلاب‌های لحظه‌ای مناطق کوهستانی حوضه بهشت‌آباد، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال ۲۸، شماره ۳، شماره پیاپی ۱۱۰.
- [۱۰]. رحیمی، داریوش (۱۳۸۸)، تأثیر رگبارهای منفرد بر مدیریت بحران سیلاب در حوضه فارس، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره ۳۵، پاییز ۱۳۸۸: ۱۰۰-۸۵.
- [۱۱]. عزیزی، قاسم؛ صمدی، زهرا (۱۳۸۶)، تحلیل الگوی سینوپتیکی سیل ۲۸ مهرماه ۱۳۸۲ استان‌های گیلان و مازندران، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۶۰: ۷۴-۶۱.
- [۱۲]. محمدی، بختیار؛ مسعودیان، ابوالفضل (۱۳۸۹)، تحلیل همدید بارش‌های سنگین ایران (مطالعه موردی: آبان‌ماه ۱۳۷۳)، جغرافیا و توسعه، شماره ۱۹: ۷۰-۴۷.
- [۱۳]. نجف‌پور، بهرام (۱۳۹۲)، شناسایی الگوهای گردشی ایجادکننده سیلاب در جنوب غرب ایران مورد: حوضه مند، جغرافیا و توسعه، شماره ۳۱: ۹۲-۷۷.
- [14]. Craig, K.J (2002).MM5 Simulations of Urban induced Convective precipitation over Atlanta, GA, Master Thesis,San Jose State University.
- [15]. Cavalcanti, I.F.A. (2012). Large scale and synoptic features associated with extreme precipitation over South America: A review and case studies for the first decade of the 21st century, Atmospheric Research, 27-40
- [16]. Chen Chen, C., Y. Lang Lin & N. Ning Hsu (2011), Orographic effects on localized heavy rainfall events over southwestern Taiwan on 27 and 28 June 2008 during the post-Mei-Yu period. Atmospheric Research, No.101, pp. 595-610;
- [17]. Galway, J. G., 1956. The lifted index as a predictor of latent instability. Bulletin of the American Meteorological Society 37, 528-529.
- [18]. J.J. George (1960). Weather Forecasting for Aeronautics. New York: Academic Press. p. 673.
- [19]. Liping, L., R. Zheng and Q. Danyu.(2005) Case studies on mesoscale structures of heavy rainfall system in the Yangtze river generated by Meiyu front. Science in China Ser. D Earth Sciences. Vol.48. 1303-1311.

- 
- [20]. Miller, R. C. 1972. Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central. Tech. Rept. 200(R). Headquarters, Air Weather Service, USAF, . 190 pp.
- [21]. Moncrieff, M.W. M.J. Miller, 1976. The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. Royal Meteorological Society 102: 373-394.
- [22]. Seibert. P, A. Frank, and H. Formayer (2007), Synoptic and regional patterns of heavy precipitation in Austria. Theor. Appl. Climatol. 87, 139–153
- [23]. Showalter, A. K., 1953. A stability index for thunderstorm forecasting. Bulletin of the American Meteorological Society 34: 250-252.
- [24]. Sabziparvar, A.A., Parandeh, A., Lashkari, H. and Yazdanpanah H. (2010), Mid-Level Synoptic Analysis of Flood- Generating Systems in South-West of Iran (Case Study: Dalaki Watershed River Basin), Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 10, pp. 2269-2279.
- [25]. Villanueva, R.V., Borga, M., Zoccatelli, D., Marchi, L., Gaume, E., Ehret, U. (2012) Extreme flood response to short-duration convective rainfall in South-West Germany, Hydrol. Earth Syst. Sci., 16, 1543–1559.
- [26]. [www.khorasan.ir](http://www.khorasan.ir).