

DOI: <https://doi.org/10.22034/jmas.2026.572410.1265>

مطالعه هیدرواقليم بارش‌های سنگين حوضه بلوچستان جنوبي با تاكيد بر الكوهای جوی

فرحناز تقوی*^۱، علی اصغر بصام تبار^۲^۱دانشیار گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران^۲دانش آموخته کارشناسی ارشد هواشناسی، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۱

چکیده

در این پژوهش، دوره بازگشت سیل‌های فراگیر و شدید در جنوب سیستان و بلوچستان با استفاده از داده‌های بارش روزانه ایستگاه‌های هواشناسی حوضه آبریز بلوچستان جنوبی در دو بخش تحلیل آماری و تحلیل همبستگی مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش تحلیل آماری، نمودارهای چندک-چندک (Q-Q) و احتمال-احتمال (P-P) مقادیر مشاهداتی، هیستوگرام و تابع چگالی احتمال متناظر با بیشینه‌های مشاهداتی و دوره بازگشت بارش‌های تجمیعی ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶ و ۱۲۰ ساعته بررسی شده است. در بخش تحلیل همبستگی، نقشه‌های ترکیبی فشار سطح زمین و بارش، نقشه‌های سطوح بالای جو در ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰، ۵۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال، و کمیت‌های ترمو دینامیکی دما و کمیت‌های دینامیکی (تاوایی نسبی، سرعت قائم و همگرایی) برای مسیر یابی بارش استفاده شد. نتایج تحلیل نمودارهای Q-Q و نمودار احتمال P-P در حوزه آبریز بلوچستان جنوبی بیانگر این است که احتمال رخداد بارش ۳۵ میلی‌متر در یک روز هر ده سال یک‌بار است و هر صد سال احتمال وقوع بارش حدود ۵۰ میلی‌متر در یک روز دور از انتظار نیست. همچنین هر ده سال بارش تجمیعی روزانه بیش از ۴۰ میلی‌متر در ایستگاه چابهار احتمال بالایی دارد. نتایج تحلیل همبستگی در هر دو مورد سیل بیانگر وجود سامانه کم‌فشار و هم‌زمان زبانه کم‌ارتفاع در سطوح بالای جو در ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰، ۵۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال در روی جنوب شرق استان که با مناطق بیشینه بارش همخوانی دارد و گرادیان شدید دمایی و سرعت باد همراه با میدان‌های تاوایی مثبت در منطقه نیز کاملاً مشهود است.

== کلمات کلیدی: دوره بازگشت، احتمال رخداد، بارش سنگین، الگوهای همبستگی، بلوچستان جنوبی.

مقدمه

رخدادهای بارش‌های سنگین سیلابی، هر چند نادر، تأثیر عمیقی بر جوامع محلی، زیرساخت‌ها و محیط زیست دارند. در این مواقع، اندازه و تکرار سیلاب بسته به عوامل متعددی همچون شرایط اقلیمی، طبیعی و جغرافیایی هر منطقه متغیر بوده و سالانه جان و مال بسیاری از مردم را تهدید می‌کند. مطالعات بسیاری در این زمینه در جهان انجام شده است از جمله: مولر^۱ (۲۰۰۹) با استفاده از شاخص‌های دینامیک و ترمودینامیک منتخب در دوره ۴۴ ساله (۱۹۵۸-۲۰۰۲) شامل: شار نصف‌النهاری رطوبت، شار مداری رطوبت، تاوانی پتانسیلی، ارتفاع ژئوپتانسیلی، سرعت قائم در دستگاه فشاری و همگرایی رطوبت به بررسی متغیرهای هواشناختی به عنوان شاخص‌های تعیین‌کننده رخداد بارش‌های سنگین در جمهوری چک پرداخت. در این روش فرین‌های شدید متغیرهای هواشناسی به عنوان پیش‌نشانگر شاخص رویدادهای بارشی فرین مورد بررسی قرار گرفت و شاخص شار نصف‌النهاری رطوبت، به عنوان یک شاخص مناسب که هم‌زمان گرادیان فشار، شرایط دما و شرایط رطوبت را منعکس می‌نماید، معرفی شد. به طوری که مقادیر بالا و پائین این شاخص به ترتیب یک جریان رطوبتی را از جنوب و از شمال نشان می‌دهد. بر اساس نتایج این پژوهش، مقادیر کوچک‌تر پیش‌نشانگر شاخص بیانگر شرایط فرین‌تر همدید در شاخص‌های منتخب است. همچنین نتایج نشان داد که بارش به طور قابل توجهی با شرایط همدیدی در مقیاس بزرگ مرتبط است. کاسپر^۲ و مولر (۲۰۰۹) تغییرات الگوها در مقیاس همدیدی در بارش‌های سنگین در جمهوری چک را با استفاده از شاخص‌های دینامیکی و ترمودینامیکی را با فرض ارتباط بارش‌های سنگین ناشی از سامانه‌های

همدیدی منطقه مدیترانه مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها ارتباط تنگاتنگ میان شرایط هواشناسی در مقیاس همدیدی و وقوع بارش‌های سنگین، گسترده و پایدار در جمهوری چک را تأیید کرده است. آن‌ها چهار نوع الگوی هواشناختی همدیدی مسبب بارش‌شناسایی و تعریف کردند. دو نوع نخست با عبور یک سامانه کم‌فشار (چرخند) جنب حاره‌ای از اروپای مرکزی مرتبط هستند و تفاوت آن‌ها در مسیر حرکت سامانه کم‌فشار نهفته است. نوع سوم با امواج جبهه سرد مشخص می‌شود که به طور مکرر مناطق دچار بارش سنگین را تحت تأثیر قرار می‌دهند. نوع چهارم مشابه نوع سوم است، اما با عبور یک سامانه کم‌فشار موجی جبهه‌ای تکمیل می‌شود. زایشلر^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۴ در مطالعه‌ای چندین رویداد فرین که در تغییرات میان سالانه وجود دارد را بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که درک تأثیرات رویدادهای اقلیمی فرین بر چرخه کربن برای تعیین کمی بازخورد میان چرخه کربن و اقلیم حائز اهمیت است و ارتباط تنگاتنگی با ارزیابی‌های تغییر اقلیم دارد. ماچادو^۴ و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای ارتباط بین شاخص نوسان اطلس شمالی^۵ (NAO) را با رخداد سیلاب‌های تاریخی در اسپانیا بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که در فاز منفی این شاخص رخداد سیلاب افزایش و در فاز مثبت کاهش می‌یابد. تونن^۶ و همکاران (۲۰۱۵) تحلیل بسامد سیلاب‌های تاریخی رودخانه راین را انجام دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که برآورد دقیق دوره بازگشت سیل‌های شدید برای ارزیابی ایمنی در برابر سیل در مناطق سیل‌خیز، نظیر منطقه رودخانه راین در هلند، امری حیاتی است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که چگونه می‌توان از ایستگاه‌های جایگزین پایش دبی در طول رودخانه راین،

^۴Machado^۵ North Atlantic Oscillation^۶ Tonen^۱ Muller^۲ Kasper^۳ Zscheischler

اندازه‌گیری‌های سطح آب و سوابق تاریخی برای افزایش داده‌های موجود استفاده کرد و بر اساس نتایج حاصل از به‌کارگیری توزیع «مقدار فرین تعمیم‌یافته» (GEV^1)، نتیجه‌گیری شد که سیل‌های بزرگ قرن گذشته احتمالاً نسبت به آنچه پیش‌تر بر اساس سری‌های داده‌ای کوتاه‌تر تصور می‌شد، رویدادهایی نادرتر هستند. همچنین دوینوت^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۵ تغییرپذیری مکانی سامان‌مند بارش در پیش‌بینی سیل‌های ناگهانی را بررسی نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که همانند توفان‌هایی که موجب بروز آن‌ها می‌شوند، سیل‌های ناگهانی، پدیده‌هایی با ماهیت بسیار متغیر و غیرخطی در ابعاد زمانی و مکانی هستند؛ از این رو، درک و پیش‌بینی چگونگی شکل‌گیری این سیل‌ها امری پیچیده و دشوار است. آن‌ها بر اساس راهنمای سیل ناگهانی^۳ (FFG) مقدار بارشی که به عنوان آستانه هشدار سیل استفاده می‌شود را تعیین کردند. زایشلر و همکاران در تحقیقی دیگر (۲۰۱۸) خطر رخداد سیل در آینده را بر اساس رویدادهای ترکیبی سیل انجام دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که سیل، آتش‌سوزی‌های جنگلی، موج‌های گرما و خشکسالی اغلب ناشی از ترکیب فرآیندهای فیزیکی متقابل در مقیاس‌های مکانی و زمانی متعدد هستند. ترکیب فرآیندها (محرک‌های اقلیمی و خطرات) که منجر به تأثیر قابل توجهی می‌شوند، به عنوان "رویداد مرکب" شناخته می‌شود. کووان^۴ و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای پیش-بینی بارش‌های فرین، دماهای پایین و بادهای شدید در سیل‌های کویننزلند را انجام دادند. در این مطالعه، شرایط جوی حاکم بر این رویداد و قابلیت پیش‌بینی آن در مقیاس زمانی هفتگی تا زیر فصلی بررسی شده است. نتایج آن‌ها نشان داد که در طول این رویداد، شاخص همرفتی گرمسیری «نوسان مادن-جولیان» (MJO^5) بر فراز غرب

اقیانوس آرام قرار داشت و احتمالاً در وقوع بارش‌های سنگین نقش داشته است. برگوویس^۶ و همکاران (۲۰۱۹a) افزایش مقیاس‌های مکانی طغیان‌های هم‌زمان رودخانه‌ای در اروپا را بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که پیامدهای سیل تحت تأثیر مقیاس مکانی وقوع هم‌زمان سیل در رودخانه‌های مختلف قرار دارد، اما این جنبه از خطر سیل همچنان تا حد زیادی ناشناخته مانده است. آن‌ها با استفاده از داده‌های سالانه سیل مربوط به هزاران رودخانه در اروپا نشان دادند که مقیاس هم‌زمانی سیل یعنی فاصله‌ای که در آن چندین رودخانه تقریباً هم‌زمان طغیان می‌کنند بسیار فراتر از وسعت حوضه‌های آبریز منفرد است و بسته به منطقه، بیش از یک مرتبه بزرگی (ده برابر یا بیشتر) تغییر می‌کند. این داده‌ها همچنین حاکی از آن است که مقیاس‌های هم‌زمانی سیل در بازه زمانی ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۰ حدود ۵۰ درصد افزایش یافته‌اند. مقادیر هم‌زمانی سیل (پس از حذف روند کلی) دارای همبستگی سری زمانی هستند؛ بدین معنا که سال‌های دارای سیل‌های وسیع و گسترده، تمایل دارند پشت سر هم رخ دهند. این یافته‌ها آشکار می‌سازند که خطرات سیل دارای همبستگی‌هایی فراتر از محدوده حوضه‌های آبریز منفردی هستند که معمولاً ارزیابی و مدیریت خطر سیل در آن‌ها صورت می‌گیرد. در پژوهشی دیگر زایشلر و همکاران (۲۰۲۰) مطالعه‌ای مروری از الگوهای نمونه رویدادهای اقلیمی و جوی را مورد بررسی قرار دادند. رویدادهای ترکیبی آب و هوا و اقلیم، ترکیبی از محرک‌ها و یا خطرات اقلیمی متعدد را توصیف می‌کنند که در ایجاد ریسک اجتماعی یا زیست‌محیطی نقش دارند. اگرچه بسیاری از بلاای مرتبط با آب و هوا ناشی از رویدادهای ترکیبی هستند، اما درک، تجزیه و تحلیل، کمی‌سازی و پیش‌بینی چنین

⁴ Cowan⁵ Madden-Julian Oscillation⁶ Berghuijs¹ Generate Extreme Value² Douinot³ Flash Flood Guide

گرفته‌اند. آن‌ها بر اساس شبیه‌سازی‌های جدید مدل‌های اقلیمی چند هزار ساله، نشان دادند که در بخش عمده‌ای از عرض‌های جغرافیایی (یعنی محدوده عرض جغرافیایی ۲۸ تا ۷۸ درجه شمالی)، پیش‌بینی می‌شود که رد پای مکانی مجموع بارش‌های فرین زمستانی در آینده به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. گسترش مکانی سیل‌های اروپا در ۷۰ سال گذشته توسط فانگ^۳ و همکاران (۲۰۲۲) بررسی شد. آن‌ها از شبیه‌سازی‌های مسیریابی یک مدل هیدرولوژیکی پیشرفته مبتنی بر مشاهدات در طول ۷۰ سال گذشته در اروپا برای شناسایی رویدادهای سیل‌های بزرگ استفاده کردند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که به طور متوسط در سراسر اروپا، هم فراوانی و هم وسعت سیل در هفت دهه گذشته افزایش یافته است. گسترش مکانی ۱۱/۳٪ افزایش یافته است که بیشتر مربوط به گسترش سیل‌های ناشی از ذوب برف است. علاوه بر آن بسامد وقوع سیل در مناطق سیل ناشی از ذوب برف، یعنی در شمال اروپا، ۴۰٪ افزایش یافته است. برعکس، رخداد سیل در بخش‌هایی از غرب (مانند آلمان)، جنوب (مانند اسپانیا) و شرق اروپا (مانند اوکراین)، به جز بسیاری از مناطق ساحلی کاهش یافته است. بیواکوا و همکاران در سال ۲۰۲۳ پژوهشی در رویدادهای اقلیمی شامل مولفه‌های اقلیمی و جوی با شبیه‌سازی‌های همدادی انجام دادند، نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که تأثیرات آب و هوایی مرتبط با جامعه معمولاً از رویدادهای مرکب ناشی می‌شوند که ترکیبی نادر از محرک‌های جوی و اقلیمی هستند. در اینجا با تمرکز بر چهار نوع رویداد ناشی از ترکیبات مختلف متغیرهای اقلیمی در فضا و زمان، نشان دادند که تجزیه و تحلیل‌های قوی از رویدادهای مرکب مانند تجزیه و تحلیل فراوانی و عدم قطعیت در شرایط فعلی و آینده، نسبت دادن رویداد به تغییرات اقلیمی و بررسی رویدادهای با احتمال

رویدادهایی هنوز در مراحل ابتدایی خود است. در این بررسی، آن‌ها یک گونه‌شناسی از رویدادهای ترکیبی ارائه دادند و رویکردهای تحلیلی و مدل‌سازی را برای کمک به بررسی آن‌ها پیشنهاد دادند و انواع بسیار متنوع رویدادهای ترکیبی را بر اساس چهار موضوع پیش شرط، چند متغیره، ترکیب زمانی و ترکیب مکانی، سازماندهی کردند. گوزدیکووا^۱ و مولر (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای شارهای رطوبتی که سبب بارش‌های فرین در اروپای مرکزی شده است، را بررسی کردند. در تحقیقات بیواکوا^۲ و همکاران (۲۰۲۰a,b)، ۴۱۰ رویداد سیل را تحت سناریوهای تغییر اقلیم را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که سیل مرکب، از طوفان‌هایی ناشی می‌شود که باعث جزر و مد شدید هواشناسی هم‌زمان (یعنی برهم‌نهی موج توفان هواشناسی (چرخند) و امواج دریا) باشد و سبب بارندگی شدید می‌شوند. این سیل می‌تواند مناطق ساحلی کم‌ارتفاع و پرجمعیت را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. آن‌ها با ترکیب خروجی مدل‌های اقلیمی و اقیانوسی، احتمال هم‌زمانی شرایط هواشناسی که باعث سیل مرکب می‌شوند را تجزیه و تحلیل کردند و نشان دادند که تحت سناریوی انتشار بالای گازهای گلخانه‌ای، احتمال هم‌زمانی تا سال ۲۱۰۰ در سطح جهان بیش از ۲۵ درصد در مقایسه با زمان حال افزایش می‌یابد. در تحقیقی دیگر بیواکوا و همکاران در سال ۲۰۲۱ یکی از مهم‌ترین پیامدهای گرمایش جهانی را تشدید بارش‌های فرین (بسیار شدید) معرفی کردند. هنگامی که زمستان‌های بسیار پربارش به طور هم‌زمان در چندین نقطه از یک منطقه رخ می‌دهند، اثرات تجمعی آن‌ها می‌تواند بسیار شدید باشد؛ چرا که منابع موجود برای مقابله با خسارات هم‌زمان، محدود است. با وجود پیامدهای ناشی از این رویدادهای فرین گسترده، مطالعات تغییر اقلیم معمولاً وسعت مکانی آن‌ها را نادیده

³ Fang¹ Gvoždíková² Bevacqua

کم اما تأثیر زیاد نیاز به داده‌هایی با حجم نمونه بسیار بزرگ دارد. ترودوسکی^۱ و همکاران (۲۰۲۳) سهم بارش‌های سنگین منجر به سیلاب‌های شدید در غرب اروپا در طول دوره ۱۲ تا ۱۵ ژوئیه ۲۰۲۱، منجر به سیل شدید، به ویژه در غرب آلمان و در امتداد رودخانه مایز و برخی از شاخه‌های آن در بلژیک و هلند شد، را مورد بررسی قرار دادند. در این سیلاب‌ها بیش از ۲۰۰ نفر کشته شدند. هرمانس^۲ و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی تغییرات در عوامل تشکیل دهنده سیلاب‌های بزرگ که توفان شدید همراه با بارندگی شدید و هم‌زمان سبب تخلیه رودخانه می‌شود را در منطقه اروپا بررسی کردند. ایشان در این مطالعه از پیش‌بینی‌های مدل جفت شده اقلیمی فاز ۶ (CMIP6^۳) و بر اساس داده‌های بازیابی تاریخی مرکز پیش‌بینی جوی اروپایی نسخه ۵ در بازه ۱۹۷۹-۲۰۱۰ و میانگین همادی مدل CMIP6 بر اساس دو سناریو خوش بینانه SSP2-4.5 و سناریو بد بینانه SSP5-8.5 استفاده کردند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که در سواحل شمال غربی اروپا، شانس رخداد سیل افزایش خواهد یافت، در حالی که در اروپای جنوب غربی، شانس رخداد سیل کاهش خواهد یافت. به طور متوسط، تغییرات به اندازه ۳۶٪ تا ۴۹٪ خواهد بود. بسته به اینکه آیا غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو به میزان متوسط یا زیاد افزایش می‌یابد. در سال‌های اخیر رخداد سیل‌های مخرب در کشور ما نیز باعث بروز خسارت‌های جانی و مالی فراوان شده است. مطالعات زیادی درباره وقوع سیل‌ها در ایران انجام شده است، که در اینجا به برخی اشاره شده است. در پژوهشی معروفی و همکاران (۱۳۹۶) مدل‌سازی پیش-یابی بارش ماهانه در حوضه آبریز بلوچستان جنوبی را انجام دادند. نتایج مربوط به درصد نسی خطای پیش‌یابی نشان داد که پیش‌یابی بارش با شبکه‌های عصبی بهتر از

مدل‌های تصادفی در گستره بلوچستان جنوبی انجام می‌شود که با نتایج دیگر محققان همخوانی دارد. علاوه بر این پژوهش‌های متعددی برای شبیه‌سازی شدت و زمان وقوع سیلاب‌ها انجام شده است، برای مثال تقوی و فضل کاظمی (۱۳۹۶) با استفاده از مدل لاپلاس نامتقارن، شبیه‌سازی بارش-رواناب را برای حوضه آبریز مرزی غرب (ایلام) انجام دادند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان داد که مدل لاپلاس نامتقارن با دقت خوب و تنها ۲۵ درصد کمبود برآورد، توانسته است دبی پیک را شبیه‌سازی نماید. همچنین شکل هیدروگراف به‌درستی شبیه‌سازی شده است. در پژوهشی دیگر تقوی و خالدی (۱۳۹۹)، شبیه‌سازی سیلاب مشاهداتی رودخانه سروو واقع در زیرحوضه آبریز جهرم با استفاده از مدل هیدروگراف واحد لاپلاس نامتقارن بر اساس شاخص ناش-ساتکلیف را انجام دادند. برای مدل‌سازی از داده‌های بارش ایستگاهی و داده‌های بارش ماهواره‌ای پرسین (PERSIANNCCS^۴)، به عنوان ورودی مدل، در ایستگاه هیدرومتری سروو استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مدل عملکرد بسیار خوبی در شبیه‌سازی رویداد سیل داشته است که البته مدل در حالت استفاده از داده‌های بارش ایستگاهی نسبت به داده‌های بارش ماهواره‌ای پرسین، عملکرد بهتری داشته است. زرین و داداشی رودباری (۱۴۰۰) پژوهشی با هدف درستی سنجی و بررسی احتمال دوره‌های بازگشت بارش با استفاده از داده‌های پایگاه داده بارش همادی-وزنی چند منبعی انجام دادند. آن‌ها از توزیع فرین تعمیم یافته برای ارائه درکی مناسب از الگوهای فضایی دوره بازگشت و احتمال رخداد بارش ۱ میلی‌متر و بیش‌تر در ایران استفاده کردند. نتایج بررسی آن‌ها بیانگر دوره بازگشت بارش سالانه و احتمال رخداد بارش‌های برابر

⁴ Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks

¹ Tradowsky

² Hermans

³ Coupled Model Intercomparison Project

سيل ۱۳۹۸، پژوهشکده سوانح طبیعی). منطقه مورد بررسی در این مطالعه، بخشی از حوضه آبریز بلوچستان جنوبی به وسعت ۲۱۹۹۵ کیلومتر مربع واقع در جنوب استان سیستان و بلوچستان در محدوده‌ای با طول جغرافیایی ۶۳-۵۹ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۶-۲۵ درجه شمالی است. در شکل ۱ موقعیت استان سیستان و بلوچستان در کشور و حوضه آبریز بلوچستان جنوبی نشان داده شده است.

داده‌ها

در این مطالعه فعالیت بارشی سامانه‌های جوی در دسامبر ۲۰۲۰ و آوریل ۲۰۲۴ مطابق با دو سیلاب بزرگ که در استان سیستان و بلوچستان، از شدت بیشتری برخوردار بود مورد بررسی قرار گرفت. از این رو مقدار بارش شش ساعته ثبت شده در آن ایستگاه‌ها از سازمان هواشناسی کشور گرفته شد. در این مطالعه از داده‌های ایستگاه چابهار با داشتن طولانی‌ترین داده ایستگاهی ۶۰ ساله و داده‌های بارشی تجمیعی ۱۵ ایستگاه برگزیده باران‌سنجی سازمان هواشناسی کشور شامل کنارک، کهپر، زرآباد، باهو کلات، بریس، سور کمپ، هومان بالا، شارک، عورکی، پل ریمدان، کمیل سلیمان، نگور، بانشت، طبس و پلان در حوضه بلوچستان جنوبی در بازه ۱۹۶۵-۲۰۲۴ استفاده شده است. تحلیل مقدار بارش روزانه از مجموع بارش ثبت شده در ساعت‌های ۰۶۰۰، ۱۲۰۰، ۱۸۰۰ و ۰۰۰ گرینویچ روز بعد استفاده گردید. همچنین از آمار بارش روزانه و ماهانه ایستگاه‌های باران‌سنجی برای یک دوره آماری ۶۰ ساله استفاده شد. پس از تعیین داده‌های لازم، در مرحله‌ی بعد جهت دستیابی به هدف مطالعه مراحل زیر به ترتیب صورت گرفت:

۱- استخراج بارش‌های بالای ۵ میلی‌متر در گزارش روزانه. بدین ترتیب ابتدا ماه‌های اکتبر، نوامبر، دسامبر، ژانویه، به عنوان ماه‌های مطلوب تعیین، سپس از طریق

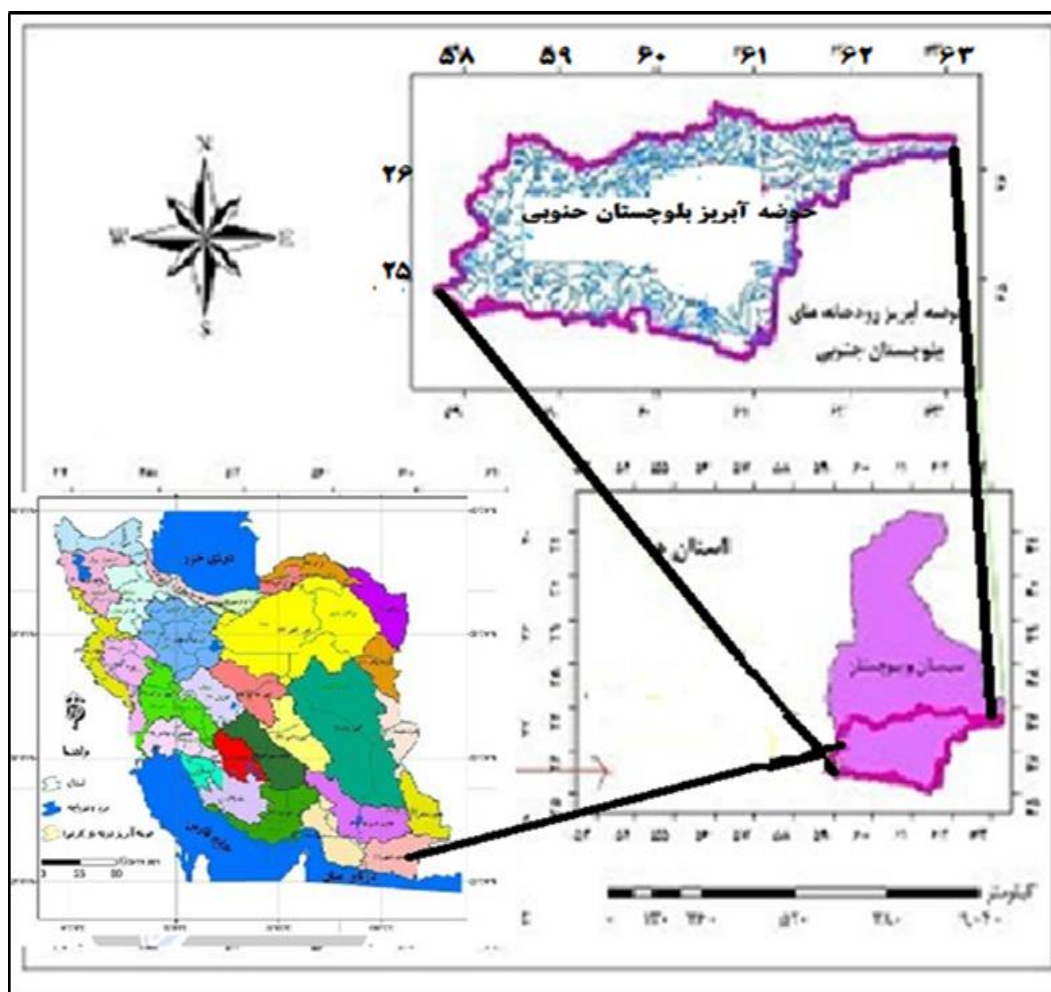
و بیش از ۱ میلی‌متر در ایران براساس روش GEV، بارش سالانه ایران دارای دوره‌های بازگشت، ۱، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ ساله است. بیشینه شدت بارش در دوره‌های بازگشت اشاره شده در سواحل جنوبی کشور، زاگرس مرتفع و سواحل خزری دیده می‌شود. خسروی و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهشی با روش تصمیم‌گیری چندمعیاره در پهنه‌بندی مناطق مستعد خطر سیلاب با شاخص‌های سنجش از دور در حوضه آبریز رودخانه کهپر (بلوچستان جنوبی) را بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که روش همپوشانی فازی باتوجه به منطق حاکم بر آن، قدرت تمایز بهتری از مناطق مستعد وقوع سیلاب دارد و می‌تواند به ریز پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب کمک نماید. هدف اصلی این مطالعه، بررسی هیدرواقليم بارش‌های سنگين با تاکيد بر تحلیل همدیدی الگوهای جوی در دو بخش تحلیل آماری براساس روش نمودارهای چندک-چندک (Q-Q) و احتمال-احتمال (P-P) و آشکارسازی نحوه شکل‌گیری بارش‌های سیل‌آسا بر اساس تحلیل همدیدی میدان‌های دینامیکی-همدیدی در حوضه آبریز بلوچستان جنوبی است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

رویدادهای بارندگی شدید در جنوب شرقی ایران با افزایش ناگهانی و قابل توجه بارش مشخص می‌گردد که اغلب از میانگین بارندگی در منطقه چندین برابر بیشتر می‌شود و سبب سیلاب‌های مخرب در منطقه می‌شود. این منطقه رژیم بارندگی منحصر به فردی در کشور دارد. بررسی بارندگی فصلی ایستگاه‌های برگزیده در استان نشان می‌دهد که دامنه تغییرات بارندگی ماهانه به مراتب بیشتر از بارندگی سالانه است. معمولاً ریزش بارندگی به صورت باران ریز و معمولی تحت نفوذ بادهای موسمی اقیانوس هند درفصول پاییز و بهاراست و بعضی مواقع تا اواسط تیرماه هم ادامه می‌یابد (گزارش

- ۳- تعیین دوره‌های بازگشت سیلاب‌ها بر اساس داده‌های باران‌سنجی ایستگاه چابهار و میانگین تجمعی ۱۵ ایستگاه برگزیده سازمان هواشناسی کشور.
- ۲- انتخاب یک روز قبل و یک روز بعد از روز رویداد بارشی.
- مرتب کردن داده‌ها در محیط اکسل بارش‌های بالای ۵ میلی‌متر استخراج شد.



شکل ۱. موقعیت استان سیستان و بلوچستان در کشور و حوضه آبریز بلوچستان جنوبی

روش نمودارهای چندک-چندک (Q-Q)

در حالت کلی اگر فراوانی تجمعی را به n قسمت مساوی تقسیم نماییم، به هر کدام از این مقادیر، جزء یا Quantile گویند. برای مقایسه دو توزیع می‌توان از رسم و بررسی نمودار اجزاء آن‌ها در مقابل یکدیگر استفاده نمود که در اصطلاح به آن نمودار Q-Q گویند.

برای رسم یک نمودار Q-Q، ابتدا n مشاهده موجود به ترتیب صعودی مرتب می‌شوند، به طوری که:

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n \quad (2)$$

این مقادیر روی یک محور نمودار آورده می‌شوند و روی محور دیگر مقدار زیر آورده می‌شود:

$$F^{-1} \left(\frac{(i - r_{adj})}{(n + n_{adj})} \right) \quad (3)$$

که در آن i مرتبه متناظر با مشاهدات، r_{adj} و n_{adj} فاکتورهای قراردادی (که باید کمتر یا مساوی $0/5$ باشند) بوده و F^{-1} نشانگر عکس انتگرال احتمال برای توزیع تئوری مورد نظر می‌باشد. تشخیص یک برازش قابل قبول از توزیع تئوری به مقادیر مشاهداتی از روی این نمودار مشخص می‌شود، به طوری که اگر نقاط ترسیم شده روی یک خط راست بیفتد، آنگاه توزیع مورد نظر قابل قبول خواهد بود. توجه شود که فاکتورهای r_{adj} و n_{adj} تضمین می‌کند که مقدار احتمال برای عکس انتگرال احتمال فوق، بین صفر و یک قرار گیرد.

روش نمودارهای احتمال-احتمال (P-P)

نمودارهای احتمال-احتمال یا به عبارت ساده‌تر نمودارهای P-P، عبارتند از نمودارهایی که در آن‌ها تابع توزیع تجمعی مقادیر مشاهده شده، در مقابل تابع توزیع تجمعی یک توزیع تئوری رسم می‌گردد. همانند روش ترسیم نمودارهای Q-Q، مقادیر مشاهده شده ابتدا به

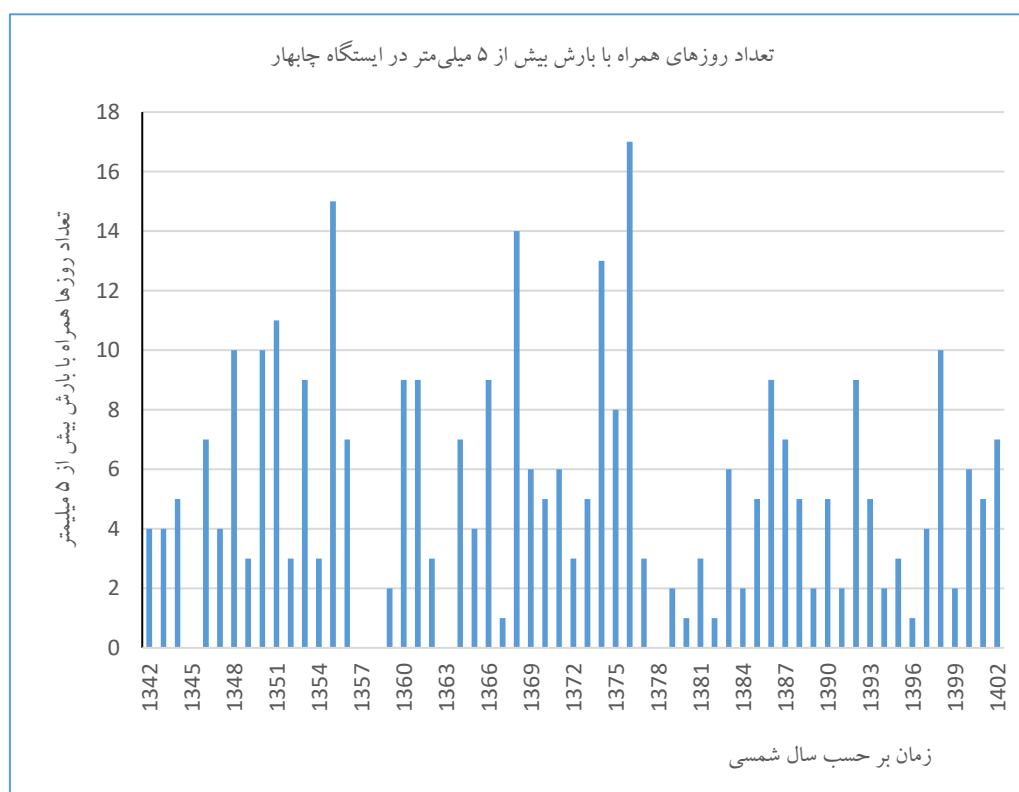
تغییرات زیاد، تصادفی بودن و عدم قطعیت، از مشخصه‌های بارش در کشور ما و از جمله استان سیستان و بلوچستان است و برای توصیف و تحلیل داده‌های بارش از روش‌های آماری و احتمالات و مدل‌های فرضی هیدرولوژی استفاده می‌شود. از مهم‌ترین فرضیات برای تحلیل بسامد مقادیر بارش، استفاده از فرضیات اولیه آمار و احتمال است. دوره بازگشت را بر اساس تحلیل بسامد آن و با استفاده از توزیع ویبول می‌توان تعیین کرد. دوره بازگشت برابر با تعداد سال‌هایی است که بین دو واقعه مشابه به طور متوسط وجود دارد و مقدار آن با عکس احتمال برابر است. روش آن به این ترتیب است که ابتدا تعداد رخداد سیل، به ترتیب از کوچک تا بزرگ مرتب می‌گردد و به هر یک مرتبه‌ای از یک تا n داده می‌شود. اگر مرتبه هر رخداد را m در نظر بگیریم، احتمال متناظر هر رخداد بر اساس توزیع ویبول با رابطه (۱) برابر است.

$$P = m/n + 1 \quad (1)$$

مهم‌ترین شرطی که می‌بایست درباره سری زمانی مورد توجه قرار گیرد، شرط همگنی داده‌ها و نیز معرف بودن نمونه آماری سیلاب‌ها است. برآورد سیلاب با دوره‌های بازگشت مختلف در ایستگاه‌های آب‌سنجی منتخب، با استفاده از روش تحلیل بسامد دبی‌های حداکثر یک‌روزه صورت پذیرفته است. سایر روش‌های برآورد سیلاب با دوره‌های بازگشت مختلف نیز در نتیجه‌گیری‌های نهایی استفاده شده‌اند. با استفاده از تحلیل فراوانی (بسامد) بارندگی، منحنی‌های شدت مدت فراوانی (IDF) بر اساس توزیع نوع اول مقدار فرین یا توزیع گامبل انجام می‌شود. در نهایت پس از برازش توزیع‌های آماری به داده‌ها، باید کفایت توزیع‌های برازش داده شده، محرز شود که روش‌های ترسیمی Q-Q و P-P از جمله آن‌ها می‌باشند (کارآموز و عراقی نژاد، ۱۳۸۴).

ترتیب صعودی مرتب می‌شوند. سپس به ازای i امین مشاهده، $\frac{i}{n}$ (یعنی تابع توزیع تجمعی مشاهداتی) روی یک محور آورده می‌شود و در مقابل آن روی محور دیگر $F(X(i))$ آورده می‌شود که در واقع $F(X(i))$ عبارتست از تابع توزیع تجمعی یک توزیع نظری متناظر با مقدار مشاهده شده $X(i)$. اگر توزیع نظری مورد بررسی، مقادیر مشاهداتی را به خوبی تقریب بزند، آنگاه همه نقاط در نمودار P-P باید روی یک خط با زاویه 45° قرار بگیرد. تحلیل مقادیر فرین بارش و دوره‌های بازگشت در ایستگاه چابهار

در این بخش ابتدا از داده‌های ایستگاه چابهار با داشتن طولانی‌ترین داده ایستگاهی ۶۰ ساله از سال ۱۳۴۲ تا ۱۴۰۲ تحلیل مقادیر فرین بارش از طریق برازش توابع احتمال انجام شد. در شکل ۲ نمودار تعداد روزهای بارش بیش از ۵ میلی‌متر در ایستگاه چابهار از سال ۱۳۴۲ تا سال ۱۴۰۲ را نشان می‌دهد. محور عمودی تعداد روزها همراه با بارش بالای ۵ میلی‌متر و محور افقی زمان بر حسب سال شمسی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود در این بازه زمانی بالاترین تعداد روزهای بارش بیش از ۵ میلی‌متر ۱۷ روز و در سال ۱۳۷۶ بوده است و در سال‌های ۱۳۴۵، ۱۳۷۸، ۱۳۶۳ و ۱۳۵۷ بارش بیش از ۵ میلی‌متر رخ نداده است.



شکل ۲. نمودار تعداد روزهای بارش بیش از ۵ میلی‌متر در ایستگاه چابهار از سال ۱۳۴۲ تا سال ۱۴۰۲

بازگشت بر حسب سال و رتبه بارش تجمعی در میان کل داده‌های روزانه (۲۰۹۱۵ روز) در دوره ۶۰ ساله نشان داده شده است. همان‌گونه که از جدول ۱ مشخص است تقریباً هر ۱۲ سال بارش تجمعی ۲۴ ساعته حدود ۳۱/۸۱

در جدول ۱ نتایج دوره بازگشت بارش‌های سیل آسا در چابهار در این بازه شامل بارش تجمعی ۲۴ ساعته، ۴۸ ساعته، ۷۲ ساعته، ۹۶ ساعته و ۱۲۰ ساعته بر حسب میلی‌متر، آهنگ بارش بر حسب میلی‌متر بر ساعت، دوره

میلی‌متر در روز رخ داده است و هر ۱۷/۹ سال بارش ۴۸ ساعته به میزان ۴۷/۸۵ میلی‌متر اتفاق افتاده است.

جدول ۱. نتایج دوره بازگشت بارش‌های سیل آسا در چابهار از سال ۱۳۴۲ تا پایان ۱۰ اسفند ۱۴۰۲

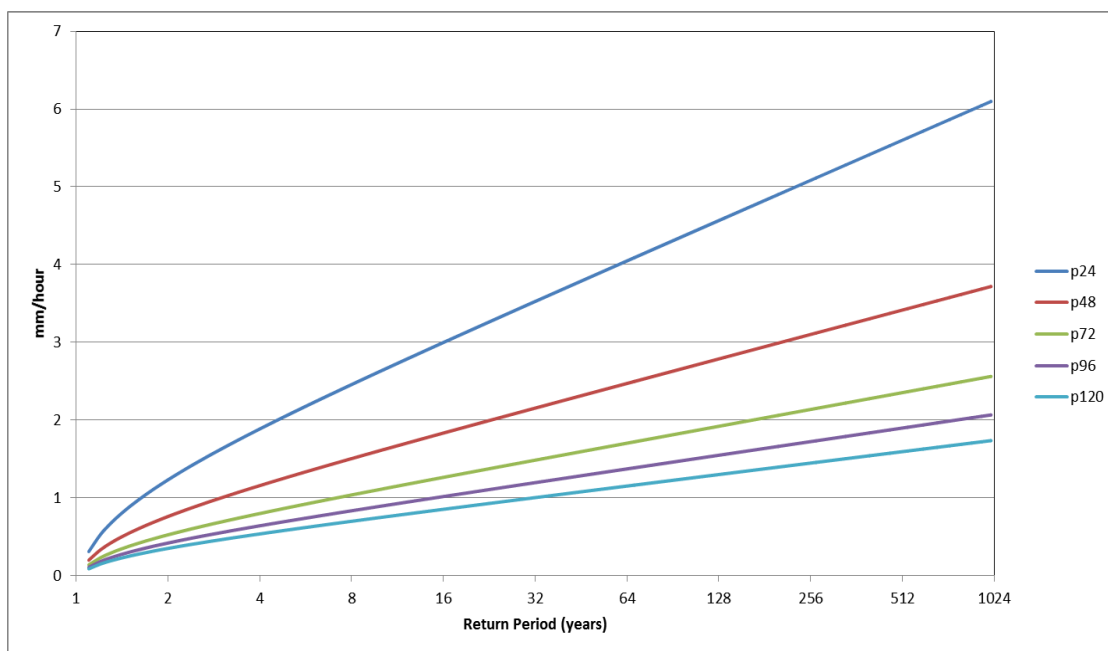
بازه زمانی از اول فروردین سال ۱۳۴۲ تا روز ۱۰ اسفند ۱۴۰۲					
یک روزه	دو روزه	سه روزه	چهار روزه	پنج روزه	بارش تجمیعی (میلی‌متر)
81/31	47/85	14/51	42/74	18/93	بارش تجمیعی (میلی‌متر)
1/33	1/00	0/71	0/78	0/78	آهنگ بارش (میلی‌متر بر ساعت)
12/1	17/9	24/2	74/9	191/1	دوره بازگشت از سال
5	5	8	3	1	رتبه بارش تجمیعی در ۲۰۹۱۵ روز مشابه

از ۵ میلی‌متر بیشترین تعداد را دارد. دوره بازگشت بارش ۲۴ ساعته (p24) منحنی آبی تیره که در آن در یک ساعت ۵ میلی‌متر بارندگی باشد، روند صعودی محسوسی دارد.

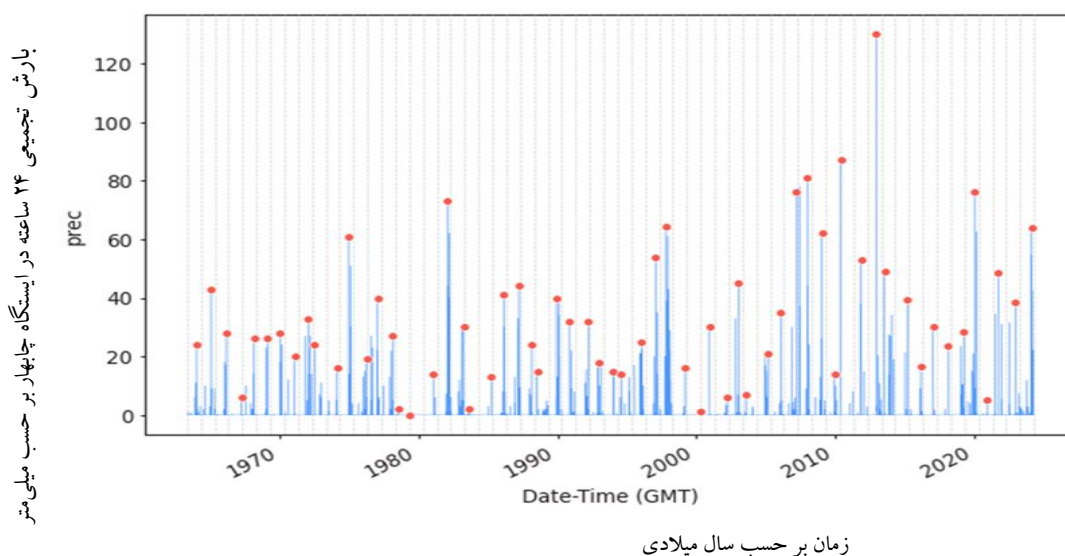
در شکل ۴ مقادیر مشاهداتی و پیشینه‌های بارش تجمیعی ۲۴ ساعته (دایره‌های قرمز) در بازه ۱۹۶۵ تا ۲۰۲۴ ایستگاه چابهار نشان داده شده است. محور افقی زمان بر حسب سال میلادی در بازه ۱۹۶۵-۲۰۲۴ و محور عمودی مقدار بارش بر حسب میلی‌متر است. همان‌گونه که از شکل ۴ پیداست، بالاترین پیشینه بارش ۲۴ ساعته با مقدار ۱۲۰ میلی‌متر در سال ۲۰۱۶ رخ داده است.

درک صحیحی از بسامد و دوره بازگشت رویدادها با شدت مختلف، امری اجتناب‌ناپذیر می‌نماید به این منظور نمودار بسامد چگالی شدت (IDF^1) در دوره‌های بازگشت و بارش تجمیعی ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶ و ۱۲۰ ساعته در ایستگاه چابهار در شکل ۳ نشان داده شده است. محور افقی دوره بازگشت بر حسب سال و محور عمودی مقدار بارش در یک ساعت بر حسب میلی‌متر را نشان می‌دهد. در این شکل نمودار بسامد چگالی شدت بارش ۲۴ ساعته با رنگ آبی تیره، بارش ۴۸ ساعته با رنگ قرمز، بارش ۷۲ ساعته با رنگ سبز، بارش ۹۶ ساعته با رنگ بنفش و بارش ۱۲۰ ساعته با رنگ آبی آسمانی در دوره‌های بازگشت متفاوت مشخص شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود دوره‌های بازگشت بارش تجمیعی ۲۴ ساعته بیش

¹ Intensity Density Frequency



شکل ۳. نمودار بسامد چگالی شدت (IDF) در دوره های بازگشت بر حسب سال و بارش تجمیعی بر حسب میلی متر در ساعت. ۲۴ ساعته (رنگ آبی تیره)، ۴۸ ساعته (رنگ قرمز)، ۷۲ ساعته (رنگ سبز)، ۹۶ ساعته (رنگ بنفش) و ۱۲۰ ساعته (رنگ آبی) در ایستگاه چابهار



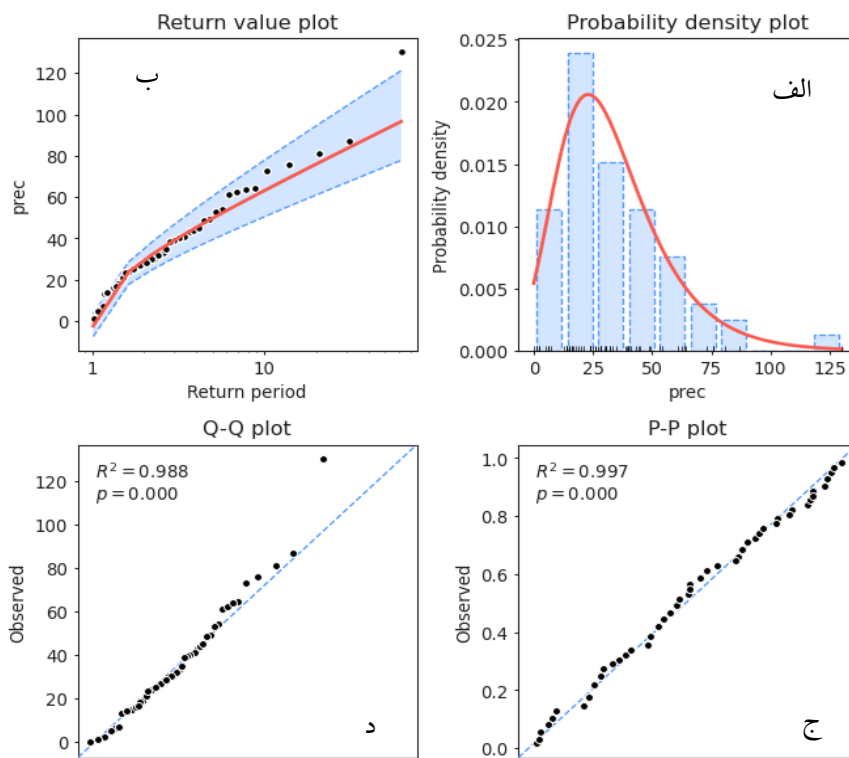
شکل ۴. مقادیر مشاهداتی و بیشینه های بارش تجمیعی ۲۴ ساعته (دایره های قرمز) در بازه ۱۹۶۵ تا ۲۰۲۴ در ایستگاه چابهار

مقدار بارش ۲۴ ساعته بر حسب میلی متر است، و در شکل ۵ ج نمودار احتمال-احتمال P-P که در آن محور افقی، احتمال داده های نظری در مقابل احتمال داده های مشاهداتی در محور عمودی و در شکل ۵ د نمودار

در شکل ۵ الف تابع چگالی احتمال که محور افقی بارش نظری و محور عمودی چگالی احتمال، و در شکل ۵ ب دوره بازگشت بارش تجمیعی ۲۴ ساعته که در آن محور افقی دوره بازگشت بر حسب سال و محور عمودی

ایستگاه چابهار دور از انتظار نیست. طبیعی است نتایج با توجه به ماهیت همرفتی بارش منطقه شکل دیگری دارد. شدیدترین بارش ۲۴ ساعته چابهار در ۲۷ و ۲۸ آذر ۱۳۹۱ با دوره بازگشت بالای ۴۰۰ سال است. نتایج تحلیل داده‌های بارش فرین ۲۴ ساعته به دو شیوه داده‌های روزانه و شبیه‌سازی بارش تجمیعی ۵ روزه نشانگر این است که با دوره بازگشت صد ساله، احتمال رویداد بارش ۲۴ ساعته با شدت بیش از ۱۰۰ میلی‌متر در ایستگاه چابهار دور از انتظار نیست.

چندک-چندک (Q-Q) که در آن محور افقی بارش نظری و محور عمودی بارش مشاهداتی که در واقع همبستگی بین داده‌های نظری و مشاهداتی را در ایستگاه چابهار نشان داده شده است. در نمودار تطابقی مقادیر بارش که هر دو به عنوان آزمون بصری نیکویی برازش تابع احتمال برازش یافته آورده شده‌اند به گونه‌ای که خط $y=x$ به عنوان برازش تابع روی احتمال گسسته تجربی مشاهداتی به شمار می‌رود، نشان داده شده است. با توجه به شکل هر ده سال احتمال بارش بیش از ۴۰ میلی‌متر در



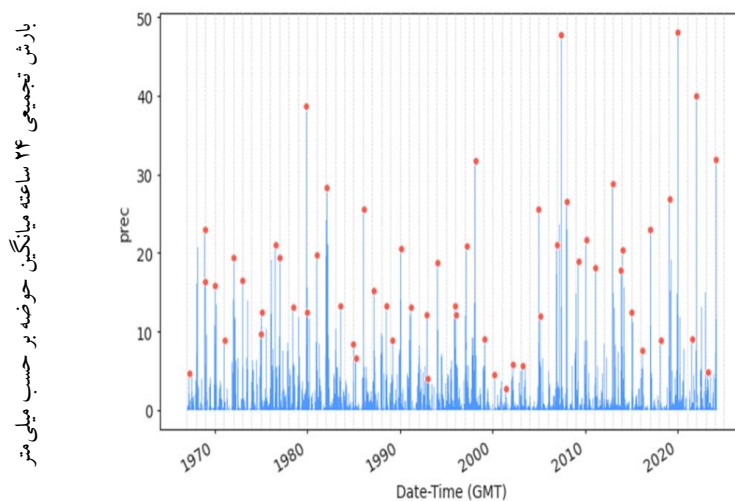
شکل ۵. الف) نمودار چگالی احتمال ب) دوره بازگشت بارش تجمیعی ۲۴ ساعته، ج) نمودار احتمال-احتمال، د) نمودار چندک-چندک در ایستگاه چابهار.

می‌شود. در شکل ۶ مقادیر مشاهداتی و بیشینه‌های بارش تجمیعی ۲۴ ساعته (دایره‌های قرمز) در این حوضه نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل ۶ پیداست بیشینه بارش

در ادامه تحلیل آماری بر اساس داده‌های بارشی تجمیعی ۱۶ ایستگاه باران‌سنجی سازمان هواشناسی کشور در حوزه بلوچستان جنوبی در بازه ۱۹۶۵-۲۰۲۴ ارایه

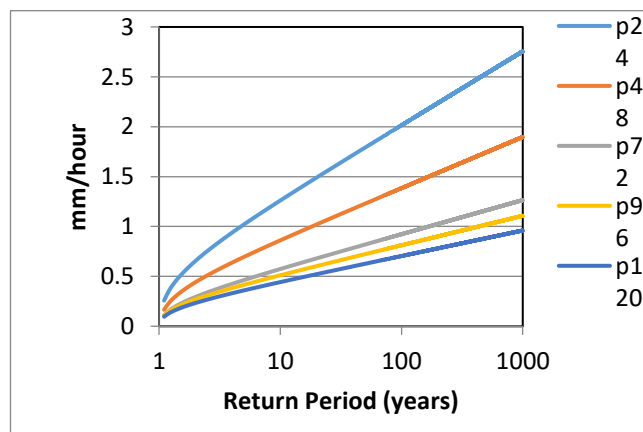
۹۶ ساعته (رنگ بنفش) و بارش ۱۲۰ ساعته (رنگ آبی) در حوضه در بازه ۱۹۶۵-۲۰۲۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۷ تقریباً هر ده سال احتمال بارش بیش از ۳۵ میلی متر در ۲۴ ساعت وجود دارد.

تجمیعی حدود ۵۰ میلی متر در سال ۲۰۰۸ و ۲۰۲۰ رخ داده است. در شکل ۷ نمودار بسامد چگالی شدت در دوره‌های بازگشت و بارش تجمیعی ۲۴ ساعته (رنگ آبی تیره)، بارش ۴۸ ساعته (رنگ قرمز)، بارش ۷۲ ساعته (رنگ سبز)، بارش



زمان بر حسب سال میلادی

شکل ۶. مقادیر مشاهداتی و بیشینه‌های بارش میانگین تجمیعی ۲۴ ساعته و (دایره‌های قرمز) در حوضه بلوچستان جنوبی در بازه ۱۹۶۵-۲۰۲۴



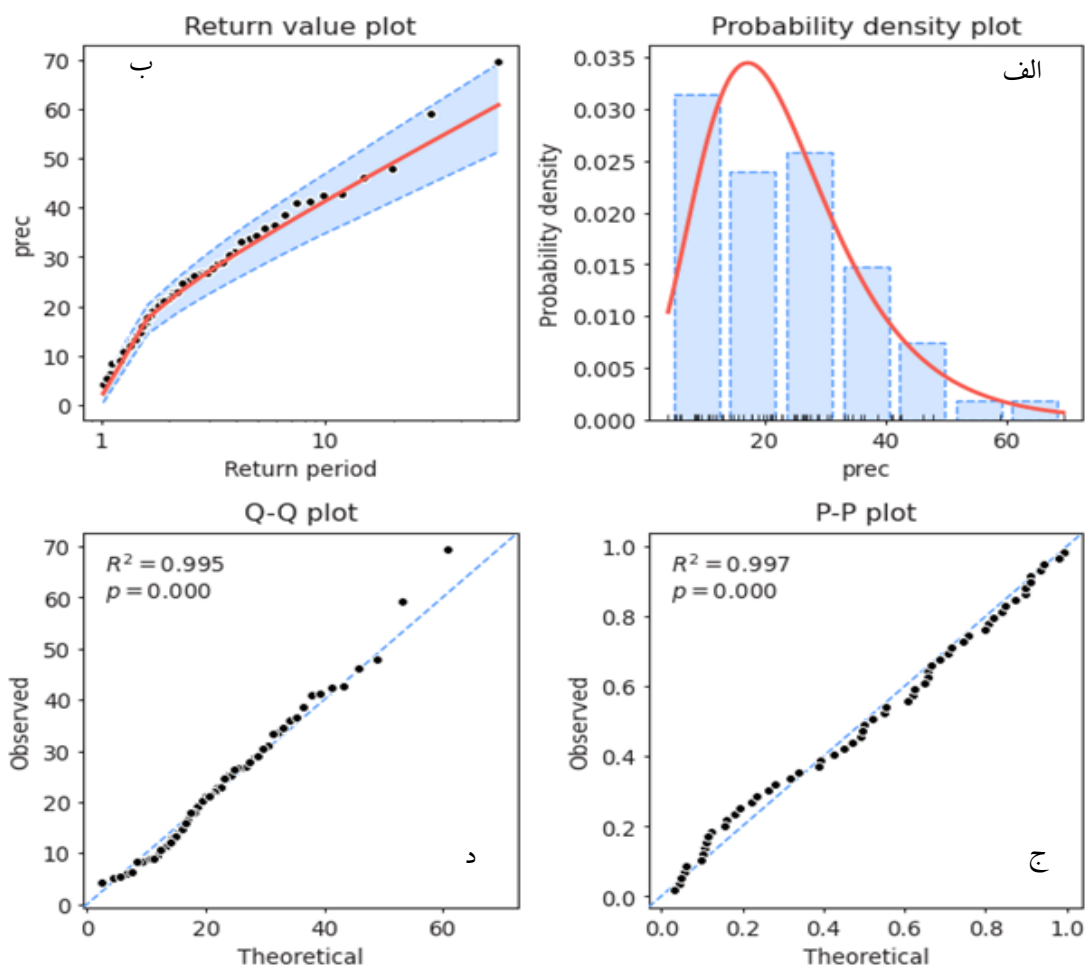
شکل ۷. نمودار بسامد چگالی شدت (IDF) در دوره‌های بازگشت بر حسب سال و بارش تجمیعی بر حسب میلی متر در ساعت، ۲۴ ساعته (رنگ آبی تیره)، ۴۸ ساعته (رنگ قرمز)، ۷۲ ساعته (رنگ سبز)، ۹۶ ساعته (رنگ بنفش) و ۱۲۰ ساعته (رنگ آبی) در حوضه آبریز بلوچستان جنوبی در بازه ۱۹۶۵-۲۰۲۴.

ب دوره بازگشت بارش تجمیعی ۲۴ ساعته که در آن محور افقی دوره بازگشت بر حسب سال و محور عمودی

در شکل ۸ الف، تابع چگالی احتمال که محور افقی بارش نظری و محور عمودی چگالی احتمال، در شکل ۸

است. با توجه به شکل ۸ الف هر ده سال احتمال بارش ۲۴ ساعته بیش از ۳۵ میلی‌متر دور از انتظار نیست. در شکل (۸ الف) قله تابع چگالی احتمال تقریباً در ۲۰ میلی‌متر در یک روز را نشان می‌دهد و در شکل ۸ (د) نمودار Q-Q ضریب همبستگی R^2 برابر ۰/۹۹۵ بین داده‌های نظری و مشاهداتی بارش ۲۴ ساعته وجود دارد و ضریب همبستگی (R^2) چگالی احتمال نیز برابر با ۰/۹۹۷ در نمودار p-p شکل ۸ دیده می‌شود.

مقدار بارش ۲۴ ساعته بر حسب میلی‌متر است، در شکل ۸ ج نمودار احتمال-احتمال (P-P) که در آن محور افقی، احتمال داده‌های نظری در مقابل احتمال داده‌های مشاهداتی در محور عمودی و در شکل ۸د، نمودار چندک-چندک Q-Q که در آن محور افقی بارش نظری و محور عمودی بارش مشاهداتی که در واقع همبستگی بین داده‌های نظری و مشاهداتی است در حوزه بلوچستان جنوبی در بازه ۱۹۶۵-۲۰۲۴ نشان داده شده



شکل ۸. الف) نمودار چگالی احتمال، ب) دوره بازگشت بارش تجمعی ۲۴ ساعته، ج) نمودار احتمال-احتمال و د) نمودار

چندک-چندک در حوزه بلوچستان جنوبی در بازه ۱۹۶۵-۲۰۲۴

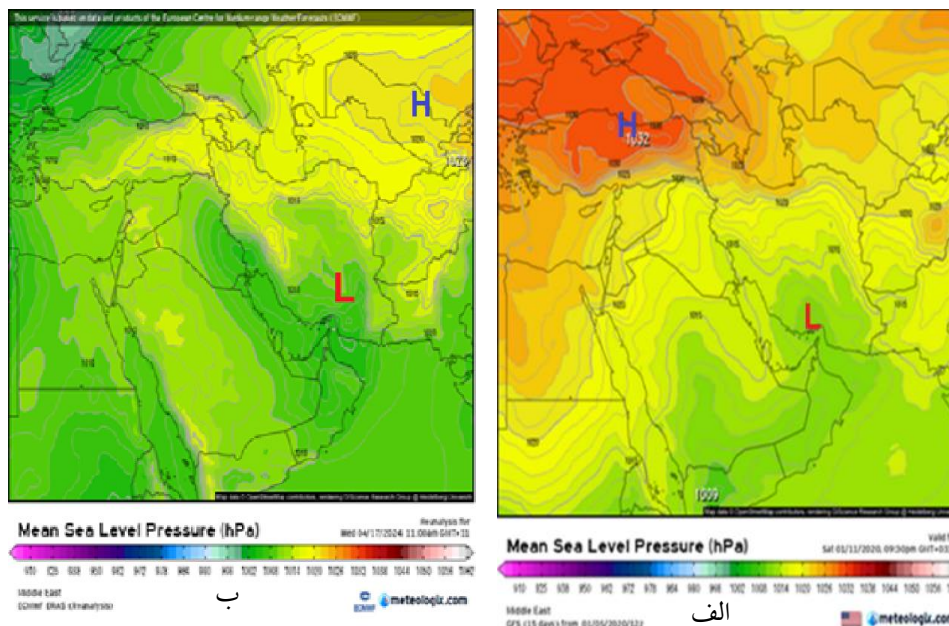
فروردین ۱۴۰۳ سیلاب‌های شدیدی با خسارت‌های فراوان در جنوب شرق کشور رخ داده است. بیشترین

تحلیل همدیدی سیلاب‌ها در حوضه بلوچستان جنوبی در دی ماه ۱۳۹۸، دی ماه ۱۴۰۰، اسفند ۱۴۰۲ و

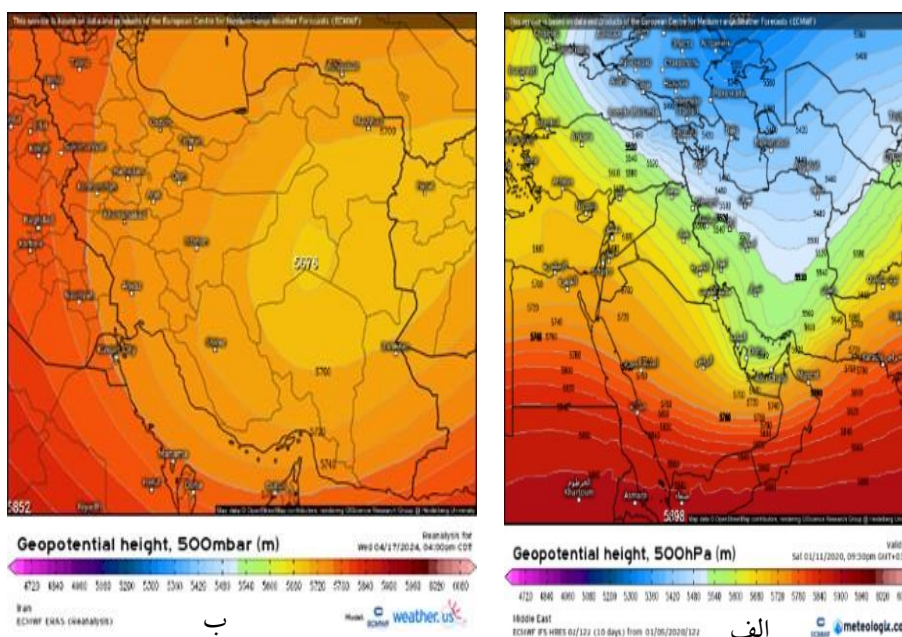
خسارت در شهرستان‌های نیک‌شهر، قصرقند، دشتیاری، چابهار، کنارک، خاش، سیب و سوران، فوج، ایرانشهر، میرجاوه، دلگان، سراوان، زاهدان، نیمروز، سرباز و مهرستان بوده است. بسیاری از ایستگاه‌های سنجش بارش واقع در مناطق سیل‌زده، بارش یک‌ساله خود را در یک یا چند روز دریافت کردند. در این بخش به بررسی و مقایسه شرایط همدیدی در سیلاب‌های ۱۳۹۸ و ۱۴۰۳ که بیشترین خسارت را داشتند، پرداخته می‌شود. برای نیل به این هدف ابتدا کلیه نقشه‌های سطح زمین شامل مراکز کم فشار (L) و پرفشار (H) و سطوح بالای جو در ترازهای ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال، نقشه‌های بارش ۲۴ ساعته، نقشه‌های فرارفت تاوایی و نقشه ترکیبی دمای پتانسیل هم‌ارز (θ) در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال و نقشه جریان جتی در شبکه‌ای در محدوده جغرافیایی منطقه تهیه شد. در اینجا ابتدا مورد دی ماه ۱۳۹۸ بررسی می‌گردد. این سیلاب در استان سیستان و بلوچستان از روز ۲۰ دی ماه ۱۳۹۸ آغاز شد و آبگرفتگی ناشی از این سیلاب تا ۲۴ دی‌ماه ادامه داشت. این سامانه بارشی از اواسط روز چهارشنبه ۱۸ دی ۱۳۹۸، از منتهی الیه شرق دریای مدیترانه حرکت کرده و با حرکت به سمت شرق خود، از سمت غرب کشور وارد شده و مناطق واقع در شمال‌غرب، غرب، جنوب‌غرب و استان‌های واقع در دامنه‌های البرز جنوبی را تحت تأثیر قرار داده است. سپس با تقویت جریانات جنوبی، از اواخر وقت روز پنجشنبه مورخ ۱۹ دی ماه ۹۸، بر شدت و میزان بارش‌ها در استان‌های جنوبی به تدریج افزوده شده است و دو روز بعد منطقه جنوب استان سیستان و بلوچستان را در بر گرفت. شرایط همدیدی سیلاب ۱۴۰۳ نیز مشابه سیلاب

۱۳۹۸ است. در این سیلاب عبور سامانه مدیترانه‌ای با ورود سامانه سودانی از جنوب‌غرب همراه بود و ترکیب این دو سامانه سبب شدیدترین ناپایداری‌ها و رخداد بارش‌های بی‌سابقه در منطقه گردید. نقشه‌های فشار سطح زمین، مرکز کم فشار و نقشه‌های سطوح بالای جو در ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰، ۵۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال، زبانه کم ارتفاع (ناوه) کاملاً بیانگر وجود سامانه‌ای دینامیکی در منطقه را نشان می‌دهد. جریان هوای گرم و مرطوب از جنوب و هوای سرد از عرض‌های بالا پیش‌بینی بارش‌های شدید در منطقه را نشان داد. تاوایی شدید در نقشه‌های ۵۰۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال بیشتر در روی منطقه جنوب استان متمرکز شده است. مقایسه الگوهای همدیدی فشار در سطح زمین در هر دو مورد هسته مرکز کم‌فشار (L) در جنوب استان با مقدار حدودی ۱۰۰۰ هکتوپاسکال وجود دارد همان‌گونه که در شکل ۹ دیده می‌شود ولی در مورد سیل ۱۳۹۸ مرکز پرفشار از شمال‌غرب همراه با سامانه‌های مدیترانه‌ای وارد کشور شده است و در نهایت منطقه جنوب استان را تحت تأثیر قرار داده است (شکل ۹ الف) اما در مورد سیل ۱۴۰۳ مرکز پرفشار در شمال‌شرق واز زبانه‌های پرفشار سبیری است (شکل ۹ ب).

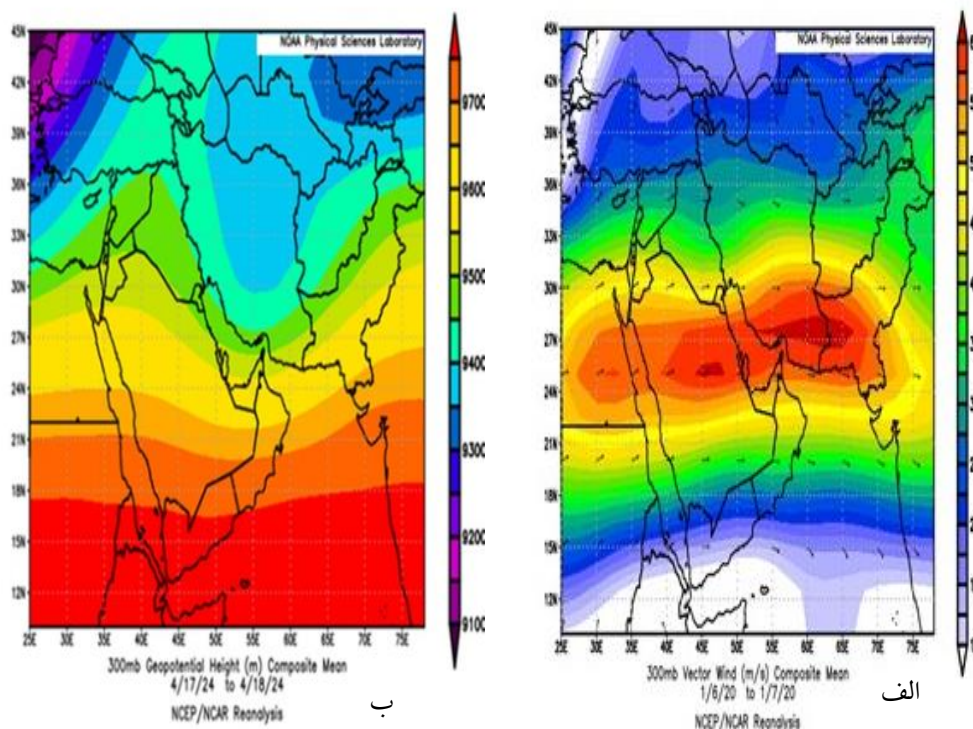
موقعیت ناهه کم ارتفاع با زبانه هوای سرد در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نیز در هر دو مورد مقدار ۵۷۰۰ متر را در غرب منطقه نشان می‌دهد (شکل‌های ۱۰ الف و ۱۰ ب). با مقایسه الگوی همدیدی جریان جتی در سیل دی ماه ۱۳۹۸، (شکل ۱۱ الف) و الگوی همدیدی جریان جتی در سیل فروردین ۱۴۰۳ (شکل ۱۱ ب)، دیده می‌شود در هر دو سیل موقعیت جریان جتی جنب حاره در روی جنوب استان مستقر است.



شکل ۹. الگوی همدیدی فشار سطح زمین در منطقه الف) سیل دی ماه ۱۳۹۸ (ژانویه ۲۰۲۰) و ب) سیل فروردین ۱۴۰۳ (آوریل ۲۰۲۴).



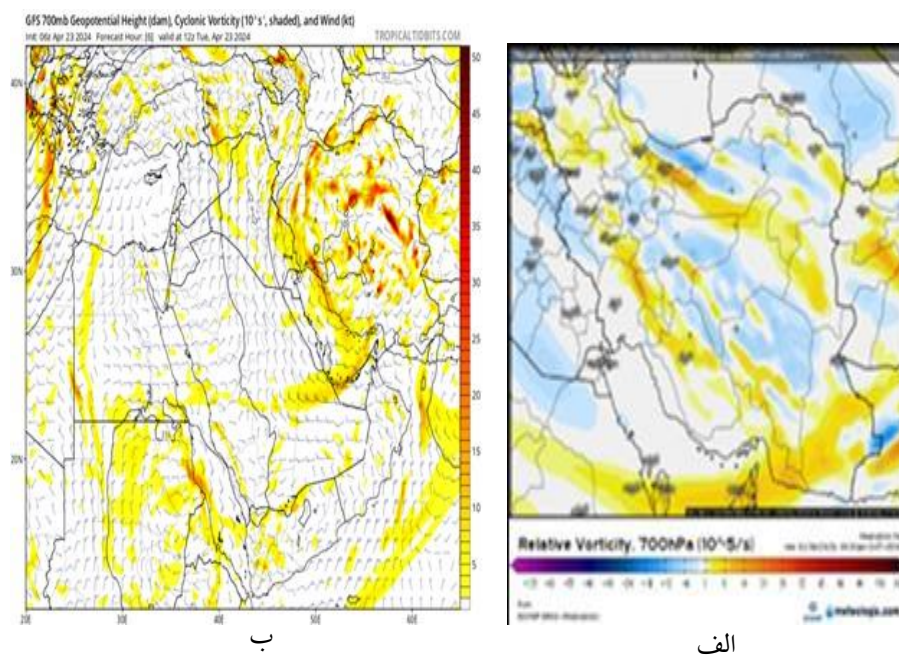
شکل ۱۰. الف) الگوی همدیدی ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در سیل دی ماه ۱۳۹۸ (ژانویه ۲۰۲۰) و ب) سیل فروردین ۱۴۰۳ (آوریل ۲۰۲۴).



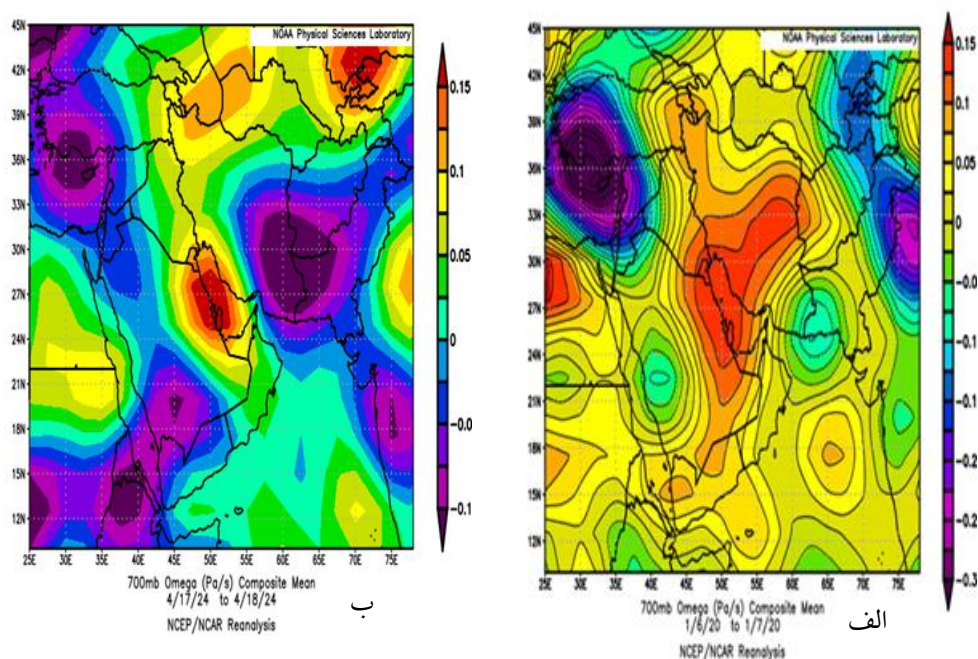
شکل ۱۱. الف) الگوی همدیدی رودباد (جت استریم) در سیل دی ماه ۱۳۹۸ (ژانویه ۲۰۲۰) و (ب) سیل فروردین ۱۴۰۳ (آوریل ۲۰۲۴).

همان گونه که در شکل ۱۲ دیده می شود، الگوی همدیدی تاوایی در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال مرکز تاوایی مثبت را نشان داده که با مناطق بیشینه بارش همخوانی دارد. الگوی همدیدی تاوایی نسبی در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال در سیل ۱۳۹۸ جریانات چرخندی بسیار قوی همراه با تاوایی نسبی در محدوده ثانیه / (20×10^{-5}) (شکل ۱۲ الف) و مقادیر تاوایی نسبی چرخندی قوی نیز در محدوده ثانیه / (20×10^{-5}) در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال و بردار باد در سیل فروردین ۱۴۰۳ (شکل ۱۲ ب) را نشان می دهد. الگوی همدیدی ناوه و بی هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۱۴) بیانگر

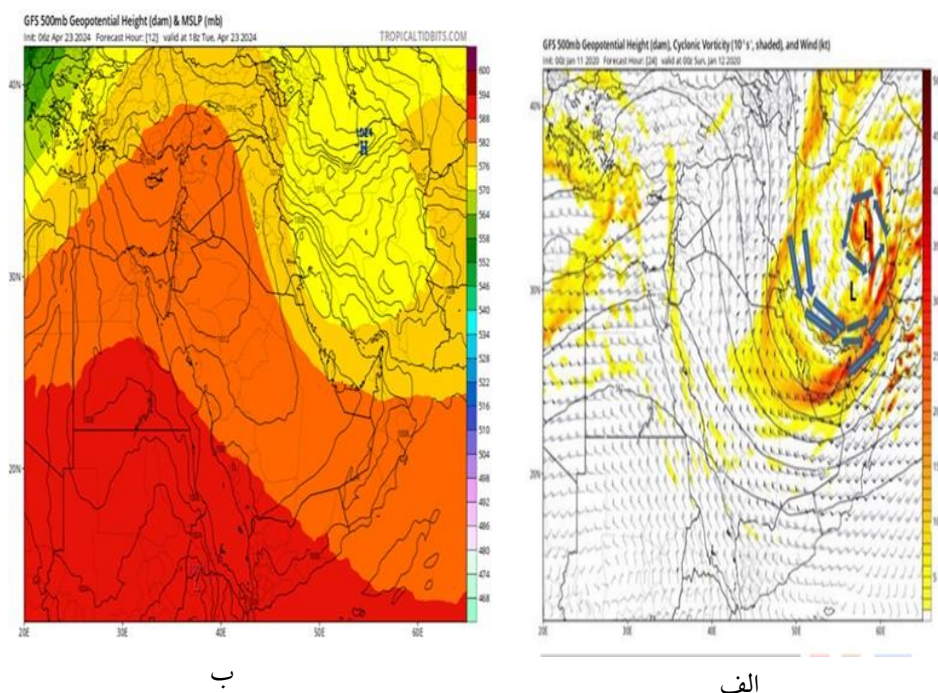
ناوه بسیار قوی در روی منطقه در ترازهای بالای جو است. با مقایسه الگوی میانگین روزانه سرعت قائم در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال براساس داده های بازتحلیل ۴۰ ساله مرکز ملی پیش بینی محیطی و تحقیقات جوی (NCEP/NCAR) در سیل دی ۱۳۹۸، بیشترین مقادیر سرعت قائم (امگا) با مرکز ۰/۱۵ پاسکال بر ثانیه یا حرکات نزولی (شکل ۱۳ الف) ولی در سیل فروردین ۱۴۰۳، بیشترین مقادیر سرعت قائم (امگا) با مرکز ۰/۳- پاسکال بر ثانیه یا حرکات صعودی (شکل ۱۳ ب) روی جنوب استان است.



شکل ۱۲. الف) الگوی همبستگی نسبی در سیل دی ماه ۱۳۹۸ و ب) الگوی همبستگی نسبی همراه با بردار باد در سیل فروردین ۱۴۰۳.



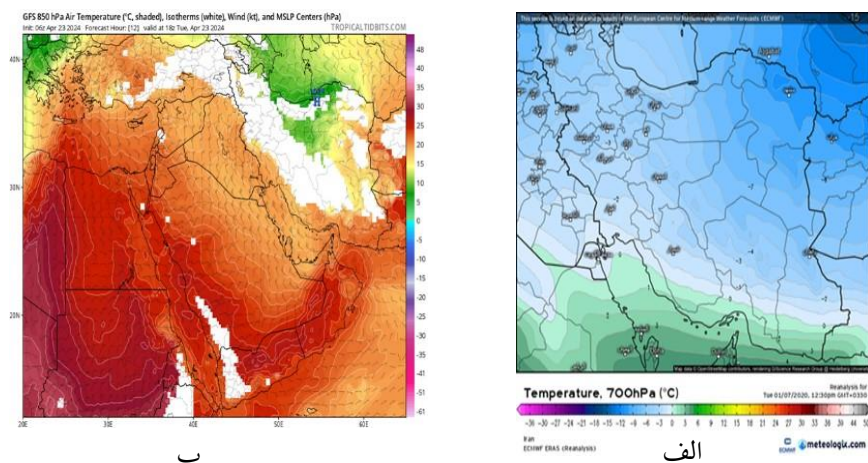
شکل ۱۳. الف) الگوی میانگین روزانه سرعت قائم در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال بر اساس داده‌های بازتحلیل ۴۰ ساله مرکز ملی پیش‌بینی محیطی و تحقیقات جوی (NCEP/NCAR) در سیل دی ۱۳۹۸ ب) در سیل فروردین ۱۴۰۳.



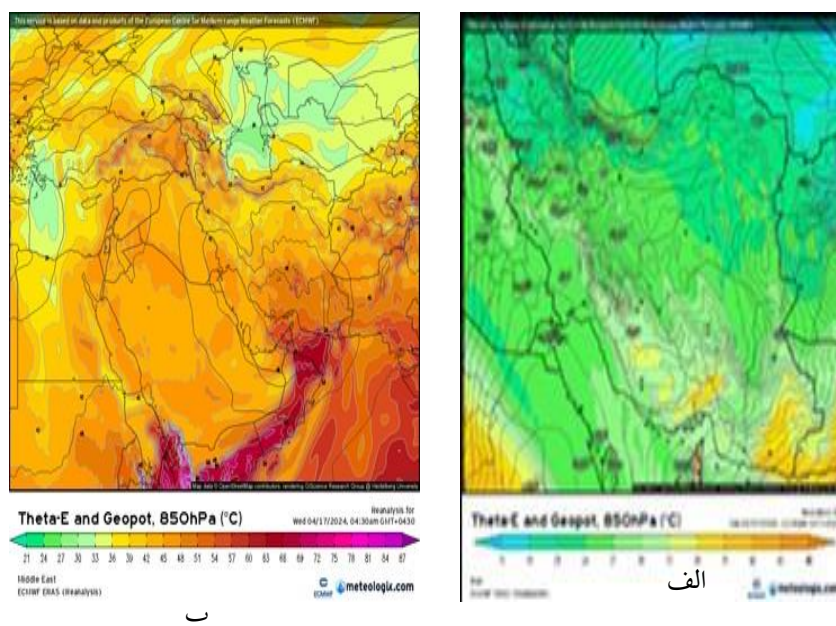
شکل ۱۴. الف) الگوی همدیدی ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتو پاسکال به همراه تاوایی نسبی و بردار باد در سیل ۱۳۹۸ و ب) الگوی همدیدی ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتو پاسکال به همراه نقشه سطح زمین در سیل ۱۴۰۳.

در سیل ۱۳۹۸ (شکل ۱۵ الف) و الگوی همدیدی دما در تراز ۸۵۰ هکتو پاسکال همراه با مراکز فشار در سطح زمین در سیل ۱۴۰۳ (شکل ۱۵ ب)، الگوی همدیدی دمای پتانسیلی هم ارز در تراز ۸۵۰ هکتو پاسکال در سیل ۱۳۹۸ (شکل ۱۶ الف) و الگوی همدیدی دمای پتانسیلی هم ارز در تراز ۸۵۰ هکتو پاسکال در سیل ۱۴۰۳ (شکل ۱۶ ب) بیانگر منطقه جبهه‌ای بسیار قوی و گرادیان دمایی حدود ۲۰ درجه در روی منطقه در هر دو سیل کاملاً مشهود است.

الگوی همدیدی دما در تراز ۷۰۰ هکتو پاسکال نیز بیانگر ناوه بسیار قوی در نقاط مرکزی ایران می‌باشد و فرارفت هوای سرد در بالا و فرارفت هوای گرم در بخش جنوبی منطقه کاملاً بارز است و در نقشه دمای پتانسیلی هم ارز نیز نفوذ جریانات گرم از جنوب و توده هوای سرد از شمال شرق کاملاً واضح است و خط جبهه بسیار قوی در روی استان‌های جنوبی و به ویژه منطقه بلوچستان جنوبی ایجاد کرده است (شکل‌های ۱۵ و ۱۶). بر اساس شکل ۱۵ الگوی همدیدی دما در تراز ۷۰۰ هکتو پاسکال



شکل ۱۵. الف) الگوی همیدی دما در تراز ۷۰۰ هکتو پاسکال در سیل ۱۳۹۸ و ب) الگوی همیدی دما تراز ۸۵۰ هکتو پاسکال همراه با مراکز فشار در سطح زمین در سیل ۱۴۰۳.



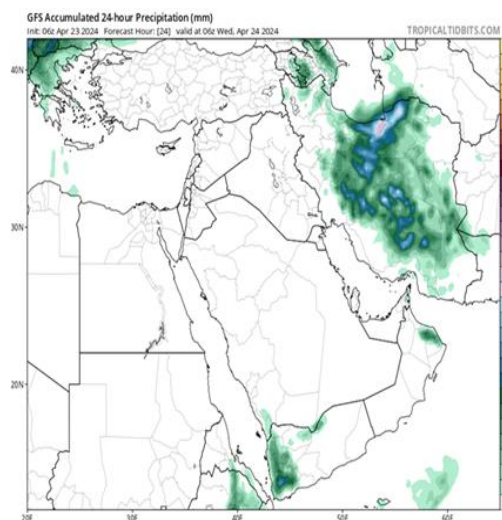
شکل ۱۶. الف) الگوی همیدی دما ی پتانسیلی هم ارز در تراز ۸۵۰ هکتو پاسکال در سیل ۱۳۹۸ و ب) در سیل ۱۴۰۳.

ستون آب بارش شو در سیل ۱۳۹۸ (شکل ۱۸ الف) و الگوی همیدی آهنگ بارش یک ساعته در سیل ۱۴۰۳ (شکل ۱۸ ب) نیز با الگوی همیدی جریانات صعودی و نزولی منطبق است در هر دو مورد بیانگر رطوبت شدید که با موقعیت کم فشار و تاوایی چرخندی قوی در جنوب

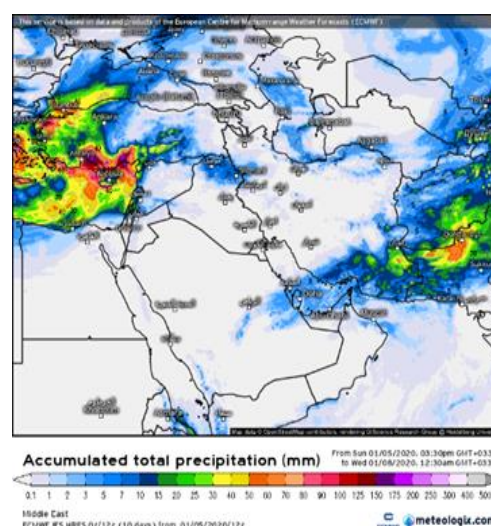
با مقایسه الگوی همیدی آهنگ بارش تجمعی ۲۴ ساعته در سیل ۱۳۹۸ (شکل ۱۷ الف) و الگوی همیدی بارش تجمعی ۲۴ ساعته در سیل ۱۴۰۳ (شکل ۱۷ ب) مشخص است، که بارش‌ها با الگوی همیدی جریانات صعودی و نزولی منطبق است. و همچنین الگوی همیدی

۳۰ میلی‌متر در یک ساعت در سیل ۱۴۰۳ در منطقه وجود دارد.

استان منطبق است و مقادیر ستون آب بارش شو در سیل ۱۳۹۸ حدود ۳۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد. بارش بیش از ۱۰۰ میلی‌متر در ۲۴ ساعت در سیل ۱۳۹۸ و بارش بیش از

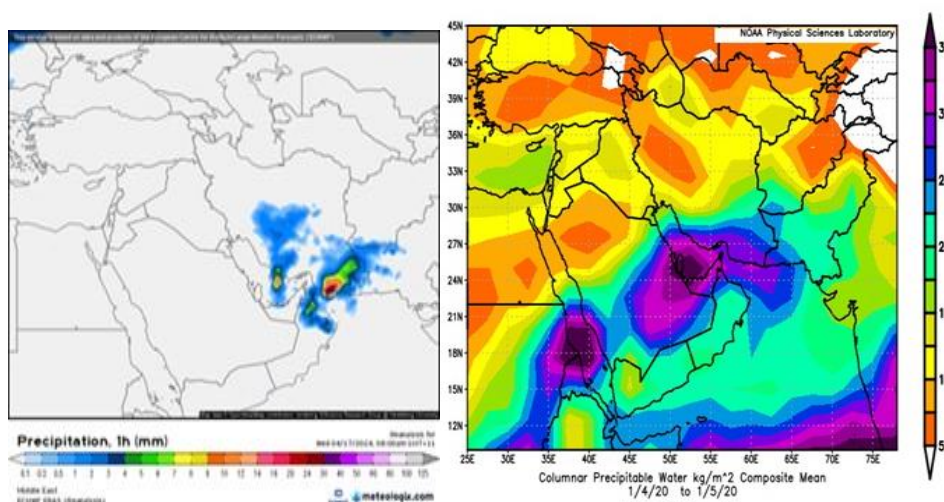


ب



الف

شکل ۱۷. الف) الگوی همیدی پیش‌بینی بارش تجمعی ۲۴ ساعته در سیل ۱۳۹۸ و ب) الگوی همیدی بارش تجمعی ۲۴ ساعته پیش‌بینی در سیل ۱۴۰۳.



ب

الف

شکل ۱۸. الف) الگوی همیدی میانگین یک روزه ستون آب بارش شو از مرکز NCEP/NCAR در سیل دی ماه ۱۳۹۸ و ب) الگوی همیدی پیش‌بینی بارش یک ساعته از مرکز ECMWF در سیل فروردین ۱۴۰۳.

بحث و تفسیر نتایج

در این مطالعه دوره بازگشت و احتمال رخداد بارش‌های فرین و شدید در حوضه آبریز بلوچستان جنوبی بر اساس داده‌های ۱۶ ایستگاه باران‌سنجی سازمان هواشناسی شامل دو ایستگاه شاخص چابهار و کنارک در دو بخش تحلیل آماری و تحلیل همدیدی مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش تحلیل آماری بر اساس نتایج داده‌های ۶۰ ساله ایستگاه چابهار، نمودارهای چندک - چندک Q-Q و نمودار احتمال P-P، مقادیر مشاهداتی، هیستوگرام و تابع چگالی احتمال متناظر با بیشینه‌های مشاهداتی نشان می‌دهند که دوره بازگشت بارش‌های تجمیعی ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶ و ۱۲۰ ساعته متناظر با دوره‌های بازگشت رویدادهای مشابه، در سال‌های متوالی، کوتاه شده است به طوری که احتمال وقوع بارش بیش از ۵۰ میلی‌متر هر ۱۰ سال است. نتایج تحلیل داده‌های بارش فرین ۲۴ ساعته به دو شیوه داده‌های روزانه و شبیه‌سازی بارش تجمیعی ۵ روزه نیز نشانگر این است که با دوره بازگشت صد ساله، احتمال رویداد بارش ۲۴ ساعته با شدت بیش از ۱۰۰ میلی‌متر در ایستگاه چابهار دور از انتظار نیست. نتایج تحلیل نمودارهای Q-Q و نمودار احتمال P-P در حوزه آبریز بلوچستان جنوبی بیانگر این است که احتمال رخداد بارش ۳۵ میلی‌متر در یک روز هر ده سال یک‌بار است و هر صد سال احتمال وقوع بارش حدود ۵۰ میلی‌متر در یک روز دور از انتظار نیست. نتایج تحلیل همدیدی در هر دو مورد سیل ۱۳۹۸ و سیل ۱۴۰۳ بیانگر وجود سامانه کم‌فشار و هم‌زمان زبانه کم‌ارتفاع در سطوح بالای جو در ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰، ۵۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال در روی جنوب استان است. گرادیان شدید دمایی و سرعت باد همراه با میدان‌های تاوایی در منطقه نیز کاملاً مشهود است. در هر دو مورد

سامانه بارشی از منتهی الیه شرقی دریای مدیترانه حرکت کرده و با حرکت به سمت شرق خود، از سمت غرب کشور وارد شده و مناطق واقع در شمال‌غرب، غرب، جنوب‌غرب، و استان‌های واقع در دامنه‌های البرز جنوبی را تحت تأثیر قرار داده است. سپس با تقویت جریانات جنوبی، بر شدت و میزان بارش‌ها در استان‌های جنوبی به تدریج افزوده شده است. اما در سیل ۱۴۰۳، عبور سامانه مدیترانه‌ای همراه با ورود سامانه سودانی از جنوب‌غرب را نشان می‌داد و همین ترکیب این دو سامانه سبب شدیدترین ناپایداری‌ها و رخداد بارش‌های بی‌سابقه در منطقه گردید. نقشه سطح زمین در هر دو مورد وجود مرکز کم‌فشار (L) را نشان داده که با مناطق بیشینه بارش همخوانی دارد. مقایسه الگوهای همدیدی فشار در سطح زمین در هر دو مورد هسته مرکز کم‌فشار (L) در روی جنوب استان با مقدار حدودی ۱۰۰۰ هکتوپاسکال وجود دارد ولی در مورد سیل ۱۳۹۸ مرکز پرفشار از شمال‌غرب همراه با سامانه‌های مدیترانه‌ای وارد کشور شده است و در نهایت منطقه جنوب استان را تحت تأثیر قرار داده است، اما در مورد سیل ۱۴۰۳ مرکز پرفشار در شمال‌شرق واز زبانه‌های پرفشار سیبری است. موقعیت ناوه کم‌ارتفاع با زبانه هوای سرد در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نیز در هر دو مورد مقدار ۵۷۰۰ متر را در غرب منطقه نشان می‌دهد. مقایسه الگوی همدیدی تاوایی در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال با مرکز تاوایی مثبت که با مناطق بیشینه بارش همخوانی دارد در هر دو مورد کاملاً مشهود است. الگوی همدیدی تاوایی نسبی (چرخندگی) در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال در هر دو سیل جریانات چرخندی بسیار قوی همراه با تاوایی نسبی در محدوده $20 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ را نشان می‌دهد. مقادیر تاوایی نسبی چرخندی قوی نیز در محدوده $15 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال حاکی از وجود چرخند بسیار

قوی در منطقه است. الگوی نقشه بی‌هنجاری سرعت باد تراز بالای جو، نمایانگر واگرایی شدید در تراز بالا بوده که منجر به همگرایی تراز پایین و تقویت و تشدید ناپایداری‌ها در این مناطق شده است و هم‌زمان میزان تاوایی (چرخندگی) در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و فرات تاوایی نیز به شدت افزایش یافته است. مقایسه الگوی همدیدی دمای پتانسیلی هم ارز در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در هردو سیل بیانگر منطقه جبهه‌ای بسیار قوی و گرادیان دمایی شدید در روی منطقه می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

سیل به عنوان یک واقعه اجتناب ناپذیر پذیرفته شده است، اما بسامد و بزرگی آن، ناشی از عوامل متعددی است که بسته به شرایط اقلیمی، طبیعی و جغرافیایی هر منطقه تغییر می‌کند. بارش‌های فوق سنگین که منجر به رخداد سیلاب‌های بزرگ در منطقه بلوچستان جنوبی شده است، در شرایط همدیدی ویژه‌ای رخ می‌دهند. در این تحقیق ۲ مورد از سیل‌های فراگیر و شدید در حوضه آبریز بلوچستان جنوبی بر اساس داده‌های ۱۶ ایستگاه باران‌سنجی سازمان هواشناسی شامل دو ایستگاه شاخص چابهار و کنارک مورد بررسی قرار گرفته است. به طور کلی نتایج تحلیل نمودارهای Q-Q و نمودار احتمال P-P در حوضه آبریز بلوچستان جنوبی بیانگر این است که احتمال رخداد بارش ۳۵ میلی‌متر در یک روز هر ده سال یک‌بار است و هر صد سال احتمال وقوع بارش حدود ۵۰ میلی‌متر در یک روز دور از انتظار نیست. نتایج تحلیل همدیدی در هر سه مورد بیانگر وجود سامانه کم فشار و هم‌زمان زبانه کم ارتفاع در سطوح بالای جو در ترازهای ۵۰۰ و ۳۰۰ و ۷۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال در روی جنوب استان است. گرادیان شدید دمایی و سرعت باد همراه با میدان‌های تاوایی قوی در منطقه نیز کاملاً مشهود است. ریزش سنگین باران و رگبار، وقوع تندباد

لحظه‌ای، کاهش ۱۰ درجه‌ای دمای هوا و یخبندان شبانه از مهمترین پدیده‌هایی بودند که در طی رخداد این سیلاب‌ها و به ویژه درسیل ۱۴۰۳، استان سیستان و بلوچستان را درگیر کرد. شدت این بارش‌ها در شهرستان‌های نیک‌شهر، فنوج، کنارک، چابهار، دلگان و به طور کلی نواحی مرکزی و جنوب استان بود. با وجود دو سد بزرگ پیشین و زبردان در منطقه، به دلیل سرریز شدن آن‌ها در منطقه دشتیاری و باهوکلالت روستاها در محاصره سیل قرار گرفت آمار ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی استان سیستان و بلوچستان، نشان می‌دهد که این استان در سیل ۱۴۰۳ در مقایسه با ۵۰ سال اخیر بارش‌های بی‌سابقه‌ای را دریافت نموده است. بر اساس آمار این ایستگاه‌ها، میزان بارش دریافتی در سیل فروردین ۱۴۰۳ بیش از ۱۰۰ میلی‌متر گزارش شده که معادل بارش‌های یک سال زراعی استان در بلندمدت است به گزارش سازمان هواشناسی، درسیل هکتوپاسکال در روی جنوب استان است. گرادیان شدید دمایی و سرعت باد همراه با میدان‌های تاوایی قوی در منطقه نیز کاملاً مشهود است. ریزش سنگین باران و رگبار، وقوع تندباد لحظه‌ای، کاهش ۱۰ درجه‌ای دمای هوا و یخبندان شبانه از مهمترین پدیده‌هایی بودند که در طی رخداد این سیلاب‌ها و به ویژه درسیل ۱۴۰۳، استان سیستان و بلوچستان را درگیر کرد. شدت این بارش‌ها در شهرستان‌های نیک‌شهر، فنوج، کنارک، چابهار، دلگان و به طور کلی نواحی مرکزی و جنوب استان بود. با وجود دو سد بزرگ پیشین و زبردان در منطقه، به دلیل سرریز شدن آن‌ها در منطقه دشتیاری و باهوکلالت روستاها در محاصره سیل قرار گرفت آمار ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی استان سیستان و بلوچستان، نشان می‌دهد که این استان در سیل ۱۴۰۳ در مقایسه با ۵۰ سال اخیر بارش‌های بی‌سابقه‌ای را دریافت نموده است. بر اساس آمار این ایستگاه‌ها، میزان بارش دریافتی در سیل فروردین ۱۴۰۳ بیش از ۱۰۰

نتایج تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره در پهنه‌بندی مناطق مستعد خطر سیلاب با شاخص‌های سنجش از دور در حوضه آبریز رودخانه کهیر (بلوچستان جنوبی)، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۲۱-۴۰.

زرین، آذروداداشی رودباری، عباسعلی. (۱۴۰۰). بررسی دوره بازگشت و احتمال رخداد بارش در ایران بر اساس پایگاه داده بارش همادی- وزنی چند منبعی (MSWEP). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۰ (۴)، ۲۲۷-۲۰۹.

کارآموز، م.، و عراقی نژاد، ش. (۱۳۸۴). هیدرولوژی پیشرفته، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران). گزارش سیلاب فروردین‌ماه ۱۴۰۳ استان سیستان و بلوچستان ۱۴۰۳، پژوهشکده سوانح طبیعی اردیبهشت ۱۴۰۳.

معروفی، ص.، نوروزر، و گلکار، ف. (۱۳۹۶). مدل‌سازی پیش‌یابی بارش ماهانه در حوضه آبریز بلوچستان جنوبی، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال سی و دوم، شماره اول، بهار ۱۳۹۶، شماره پیاپی ۱۲۴.

Berghuijs, W. R., Allen, S. T., Harrigan, S., & Kirchner, J. W. (2019a). Growing spatial scales of synchronous river flooding in Europe, *Geophysical Research Letters*, 46, 1423-1428.

Bevacqua, E., Shepherd, T. G., Watson, P. A., Sparrow, S., Wallom, D., & Mitchell, D. (2021). Larger spatial footprint of wintertime total precipitation extremes in a warmer climate, *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091 990, 415.

Bevacqua, E., Suarez-Gutierrez, L., Jézéquel, A., Lehner, F., Vrac, M., Yiou, P., & Zscheischler, J. (2023). Advancing research on compound weather and climate events via large ensemble model simulations, *Nature Communications*, 14, 2145.

Bevacqua, E., Voudoukas, M. I., Zappa, G., Hodges, K., Shepherd, T. G., Maraun, D., Mentaschi, L., & Feyen, L. (2020a). More meteorological 410 events that drive compound coastal flooding are projected under climate change, *Communications Earth & Environment*, 1, 47, 2020a.

Bevacqua, E., Zappa, G., & Shepherd, T. G. (2020b). Shorter cyclone clusters modulate changes in European wintertime precipitation extremes, *Environmental Research Letters*, 15, 124 005.

Cowan T., Wheeler, M. C., Alves O., Narsey, S., de Burgh-Day, Griffiths, C. M., Jarvis, C., Cobon, D. H., & Hawcroft, M. K., (2019). Forecasting the extreme rainfall, low temperatures, and strong winds associated with the northern Queensland floods of February 2019. *Weather and Climate Extremes*,

میلی‌متر گزارش شده که معادل بارش‌های یک سال زراعی استان در بلندمدت است به گزارش سازمان هواشناسی، در سیل فروردین ۱۴۰۳ در ایستگاه هواشناسی دریایی چابهار نیز برای نخستین بار در نیم‌قرن اخیر، ۱۶۴ میلی‌متر باران در مدت ۲۴ ساعت باریده است و بارش‌های سامانه اخیر سبب ثبت حداقل ۱۰ رکورد جدید بارشی در اقلیم مناطق جنوب کشور شده است (گزارش سیل فروردین ۱۴۰۳، استان سیستان و بلوچستان، ۱۴۰۳). با تجزیه و تحلیل داده‌های آب و هوای تاریخی، الگوهای همدیدی و شرایط جوی، محققان می‌توانند محرک‌های کلیدی که در این رویدادها نقش دارند، را شناسایی کنند. این دانش نه تنها درک ما از فرآیندهای آب و هوایی در منطقه را افزایش می‌دهد، بلکه به توسعه استراتژی‌های سازگاری و کاهش مؤثر در مواجهه با آب و هوای در حال تغییر کمک می‌کند. مطالعاتی که در زمینه بارش‌های فوق سنگین در ایران و جهان انجام گرفته، معیارها و آستانه‌های مختلفی را برای بارش‌های فوق سنگین در مناطق مختلف ارائه نموده‌اند، پیش‌بینی شدت و زمان وقوع این پدیده می‌تواند اطلاعات مناسبی برای استفاده در سامانه‌های هشدار سیل فراهم کند و تا حد زیادی از وقوع خسارت‌های جانی و مالی بیشتر پیش‌گیری نماید.

منابع

تقوی، ف.، و فضل‌کاظمی، ا. (۱۳۹۶). شبیه‌سازی سیلاب در حوضه آبریز مرزی غرب-ایلام مطالعه موردی ۷ و ۸ آبان ۱۳۹۴ رودخانه گدارخوش، دومین کنفرانس ملی هیدرولوژی ایران، دانشگاه شهرکرد، ۲۰-۲۱.

تقوی، ف.، و خالدی، ح. (۱۳۹۹). شبیه‌سازی رویداد سیل در زیر حوضه آبریز جهرم با استفاده از مدل هیدروگراف واحد لاپلاس نامتقارن، مجموعه مقالات نوزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۴۳-۴۰.

خسروی، ع.، هاشمی منفرد، آ و نظری پور، ح. (۱۴۰۱). مقایسه

Müller, M., Kašpar, M., Řezáčová, D., & Sokol, Z. (2009). Extremeness of meteorological variables as an indicator of extreme precipitation events, *Atmospheric Research*, 92 (2009), 308-317.

Toonen, W.H.J. (2015). Flood frequency analysis and discussion of non-stationarity of the Lower Rhine flooding regime (AD 1350–2011), Using discharge data, water level measurements, and historical records, *Journal of Hydrology* 528 (2015) 490–502.

Tradowsky, J. S., Philip, S. Y., Kreienkamp, F., et al. (2023). Attribution of the heavy rainfall events leading to severe flooding in Western Europe during July 2021, *Climatic Change*, 176, 90.

<https://doi.org/10.1007/s10584-023-03502-7>

Zscheischler, J., Mahecha, M. D., Von Buttlar, J., Harmeling, S., Jung, M., Rammig, A., Randerson, J. T., Schölkopf, B., Seneviratne, S. I., & Tomelleri, E. (2014) A few extreme events dominate global interannual variability in gross primary production, *Environmental Research Letters*, 9, 035 001, 2014.

Zscheischler, J., Martius, O., Westra, S., Bevacqua, E., Raymond, C., Horton, R. M., van den Hurk, B., AghaKouchak, A., Jézéquel, A., & Mahecha, M. D. (2020). A typology of compound weather and climate events, *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 333–347, 2020.

Zscheischler, J., Westra, S., Van Den Hurk, B. J., Seneviratne, S. I., Ward, P. J., Pitman, A., AghaKouchak, A., Bresch, D. N., Leonard, M., & Wahl, T. (2018).Future climate risk from compound events, *Nature Climate Change*, 8, 469–477, 2018.

26, 100232.

<https://doi.org/10.1016/j.wace.2019.100232>.

Douinot, A., Roux, H., Garambois, P. A., Kévin, L., Labat, D., Denis, D. (2015). Accounting for rainfall systematic spatial variability in flash flood forecasting, *Journal of Hydrology*, 09/2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.024>.

Fang, B., Bevacqua, E., Rakovec, O., & Zscheischler J., (2022). An increase in the spatial extent of European floods over the last 70 ears, *EGUsphere*, <https://doi.org/10.5194/egusphere>.

Gvoždíková, B., & Müller, M. (2021).Moisture fluxes conducive to central European extreme precipitation events, *Atmospheric Research*, 248 (2021) 105182.

Hermans, T. H. J., Busecke, J. J. M., Wahl, T., Malagón-Santos, V., Tadesse, M. G., Jane, R. A., & van de Wal, R. S. W. (2024). Projecting changes in the drivers of compound flooding in Europe using CMIP6 models. *Earth's Future*, 12, e2023EF004188.

<https://doi.org/10.1029/2023EF004188>

Kaspar, M., & Muller, M. (2010). Variants of synoptic-scale patterns inducing heavy rains in the Czech Republic, *Physics and chemistry of the earth* 35 (2010), 477-483.

Machado, M. J., Botero, B. A., López, J., Francés, F., Díez-Herrero, A., & Benito, G. (2015). Flood frequency analysis of historical flood data under stationary and non-stationary modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 2561–2576.

Muller, M.,(2009). Heavy rains and extreme rainfall-runoff events in Central Europe from 1951 to 2002, *Natural Hazards and earth system sciences* 9 (2009), 441-450.

Hydroclimatic study of heavy rainfall in the southern Baluchistan basin with emphasis on atmospheric patterns

Farahnaz Taghavi^{1*}, Ali Asghar Basamtabar²

^{1*} Associate Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran

² Master of Science in Meteorology

*Corresponding Author Email: ftaghavi@ut.ac.ir

Received: 27 January 2026, Accepted: 12 August 2026

ABSTRACT

In recent years, destructive floods in South Baluchistan have caused many human and financial losses. The extremely heavy rainfall that have led to major floods in South Baluchistan occur under certain conditions. In this research, two case studies of widespread and severe floods in the southern region of Sistan and Baluchistan province in Dec 2020, and Apr 2024 have been investigated based on the data of provincial stations and Chabahar and Kanarak stations. The statistics recorded in the meteorological stations of Sistan and Baluchistan province show that Sistan and Baluchistan province has had unprecedented rainfall compared to the last 60 years. The statistical results of 24-hour heavy rainfall, based on the latest information received from 16 rain gauge stations, the amount of rainfall received in the province is reported to be more than 100 mm, which is equivalent to the rainfall of one agricultural year this year. Long-term in the statistical analysis section of the Q-Q charts, the observed values, histogram and probability density function related to the observed maximum show that the cumulative rainfall return period of 24, 48, 72, 96 and 120 hours are related to similar return periods. Events in consecutive years are short. The plot of P-P probability or theoretical probability versus the probability values obtained from the fitted probability cumulative function corresponding to each annual maximum observed cumulative rainfall also has an increasing trend. Based on these statistical results, in Chabahar station, the probability of rainfall is more than 40 mm in every 12 years, and the analysis results of Q-Q diagrams and P-P probability diagram in the catchment area of South Baluchistan also show that the probability of daily rainfall is 35 mm every ten years. And every hundred years the probability of rainfall about 50 mm in one day is not far from expected. The results of synoptic analysis in all cases indicate the existence of a low pressure system and a long trough in the upper levels of the atmosphere at the levels of 500, 300, 700 and 850 Hectopascal in the south of the province. The extreme gradient of temperature and wind speed along with vorticity fields are also clearly evident in this region. Heavy rainfall and torrential rain, momentary gusts, 10-degree drop in air temperature and night frost were among the most important phenomena that caught Sistan and Baluchistan province during floods.

Keywords: Return Period, Probability of occurrence, Heavy rainfall, Synoptic patterns, South Baluchistan

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Taghavi, F., and Basamtabar, A.A. (2026). Hydroclimatic study of heavy rainfall in the southern Baluchistan basin with emphasis on atmospheric patterns. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science.*, 9(1): 44- 70.

Doi: <https://doi.org/10.22034/jmas.2026.572410.1265>

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the JMAS Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

