

برآورد حداکثر بارش محتمل به روش سینوپتیکی در استان کرمانشاه

فیروز مجرد*، دکترای اقلیم‌شناسی، استادیار گروه جغرافیای دانشگاه رازی کرمانشاه
جعفر معصوم‌پور، دکترای اقلیم‌شناسی، استادیار گروه جغرافیای دانشگاه رازی کرمانشاه

چکیده

برآورد حداکثر بارش محتمل از جمله تحقیقات کاربردی و مهمی است که علاوه بر شناسایی رفتار بارش‌های حدی در آب‌وهواشناسی، در طراحی سازه‌های بزرگ آبی به-خصوص سدها مورد توجه هیدرولوژیست‌هاست. در این پژوهش، به‌منظور برآورد حداکثر بارش محتمل در استان کرمانشاه از روش سینوپتیکی استفاده شده است. به این منظور پس از جمع‌آوری و پردازش اتمار بارش روزانه ۵ ایستگاه استان، تعداد سه توفان انتخاب و با انجام بیشینه‌سازی‌های دمای نقطه شبنم و سرعت باد و محاسبه ضریب رطوبت، مقدار حداکثر بارش محتمل برای منطقه با تداوم‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته در دوره‌های بازگشت ۵۰ و ۱۰۰ ساله برآورد گردید. برای سه تداوم فوق در این دو دوره بازگشت به ترتیب برابر با ۱۶۴ و ۲۴۶ میلی‌متر، ۲۸۷ و ۳۵۷ میلی‌متر و ۳۴۰ و ۴۳۹ میلی‌متر بود. پس از اخذ داده‌های ترازهای مختلف جوی از NCEP/NCAR؛ نقشه‌های فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل، مؤلفه‌های باد مداری و نصف‌النهاری و رطوبت نسبی، ترسیم و به کمک آنها سامانه‌های بارش‌زا در روزهای توفانی از روز شروع توفان تا خاتمه آن تجزیه و تحلیل شدند. بررسی نقشه‌های سینوپتیکی-دینامیکی مشخص کرد که در خلال وقوع توفان‌های شدید، منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر سامانه‌های کم ارتفاع دینامیکی ناشی از سامانه‌های بندالی امگاشکل قرار داشته که سبب بارندگی‌های شدید در استان شده است. این توفان‌ها نتیجه تقویت و تشدید فعالیت مرکز چرخند مدیترانه‌ای و ادغام آن با مرکز چرخند نواحی قطبی از عرض‌های بالا بوده است. همچنین این سامانه‌ها از شرق دریای مدیترانه، دریای سرخ و خلیج فارس تغذیه رطوبتی می‌شده‌اند.

واژگان کلیدی

برآورد، حداکثر بارش محتمل، سینوپتیک، پیشینه‌سازی، دمای نقطه شبنم، استان کرمانشاه

۱- مقدمه

مطالعه در خصوص برآورد حداکثر بارش محتمل^۱ و در نهایت حداکثر سیلاب محتمل^۲، نیاز به ترکیب و تلفیق داده‌های هواشناسی، هیدرولوژیکی و جغرافیایی دارد. جغرافیدانان به دلیل نگرش خاص سیستمی که به مسأله دارند، قادر می‌باشند به‌نحو مطلوب از عهده این تلفیق برآیند. "حداکثر بارش محتمل، به‌لحاظ نظری بیشترین ارتفاع بارش است که با تداوم زمانی معین می‌تواند درگستره توفانی مشخص در یک مکان جغرافیایی خاص و زمان معینی از سال رخ دهد" (WMO, 1986:1). مطالعه حداکثر بارش محتمل برای ارزیابی و برآورد سیلاب محتمل به‌منظور طراحی سازه‌های هیدرولوژیکی از قبیل کانال‌های آبیاری و زهکشی، سیستم‌های جمع‌آوری و دفع فاضلاب شهری، سدها، پل‌ها و تعیین حداکثر مقدار آبی که وارد مخازن سرریز یا سایر تأسیسات می‌شود، ضروری است. از طریق برآورد زمان وقوع و مقدار حداکثر بارش محتمل و شناسایی ابعاد سینوپتیکی توفان‌های به‌وجودآورنده بارش‌های شدید و تحلیل ریسک‌های موجود می‌توان ضمن استفاده بهینه از منابع آب، تا حد زیادی جلوی خسارات وارده را گرفت. با توجه به توضیحات فوق و درک اهمیت مطالعه، هدف اصلی این مقاله، برآورد سینوپتیکی حداکثر بارش محتمل در استان کرمانشاه به‌عنوان استانی نسبتاً پرباران در منطقه زاگرس و تحلیل الگوهای مربوط می‌باشد. مدل سینوپتیکی، بر اساس داده‌های هواشناسی سطح زمین و با توجه به خصوصیات فیزیکی توفان‌ها، پتانسیل حداکثر آب قابل بارش را برای موقعیت زمانی و مکانی خاص ارائه می‌دهد. شرط لازم برای اجرای مدل سینوپتیکی، توجه به حالت‌های حداکثر تقرب هوا و به‌عبارت دیگر، توفان‌های شدید و فراگیر است.

۲- پیشینه تحقیق حداکثر بارش محتمل

در زمینه برآورد حداکثر بارش محتمل در داخل کشور مطالعات چندی صورت گرفته است. صالحی پاک (۱۳۷۸: ۱۷) برای برآورد سینوپتیکی حداکثر بارش محتمل در حوضه آبریز سد ماملو از امار، ۱۵ ایستگاه استفاده و مقادیر آن را با تداوم‌های ۲۴، ۷۲ و ۹۶ ساعته و نیز مقدار مربوط به شدیدترین توفان را برای کل حوضه محاسبه کرد. مشایخی (۱۳۸۰: ۲۳) مقادیر حداکثر بارش محتمل را در منطقه البرز مرکزی با استفاده از اطلاعات ۱۳۹ ایستگاه هواشناسی با دو روش آماری سینوپتیکی به‌دست آورد. خلیلی (۱۳۸۱: ۲۵) در طرح آبخیزداری حوضه طالقان، مقادیر حداکثر بارش محتمل را به‌روش آماری سینوپتیکی برآورد و ارقام حاصل را با هم مقایسه کرد. خلجی و سپاسخواه (۱۳۸۱: ۱-۱۱) پس از محاسبه و مقایسه مقادیر حداکثر بارش ۲۴ ساعته ایران با روش‌های آماری و سینوپتیک به‌این نتیجه رسیدند که برآوردهای آماری سینوپتیک دارای اختلاف می‌باشند. آنان با واسنجی روش بت‌لاهمی^۳ بیان نمودند که این روش نزدیک‌ترین برآوردها را به روش سینوپتیک ارائه می‌دهد. در انتها ضمن توصیه روش سینوپتیک به‌عنوان بهترین روش برآورد، با استفاده از روش بت‌لاهمی اصلاح‌شده کمترین مقدار حداکثر بارش ۲۴ ساعته را برای مناطق مرکزی ایران ۱۱۰ میلی‌متر و بیشترین آن را برای مناطق شمالی و جنوبی ایران ۲۶۰ میلی‌متر برآورد نمودند. حبیبی (۱۳۸۵: ۶۹) سا، ما، نه-

^۱ - Probable Maximum Precipitation (PMP)

^۲ - Probable Maximum Flood (PMF)

^۳ - Bethlahmy

هایبندالی تشکیل شده در اقیانوس اطلس، به ویژه منطقه دریای مدیترانه را که منجر به چرخندزایی در شرق مدیترانه شده و پیامدهای شان ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بررسی کرد. وی در تحقیق دیگر خود (۱۳۸۶: ۱۰۹) نقش سامانه‌هایبندالی را در چرخندزایی بر روی شرق دریای مدیترانه و اثری که بر سیل غرب ایران در مارس ۲۰۰۰ داشت، بررسی نمود و به این نتیجه رسید که ناوه جناح شرقی سامانه بندالی اقیانوس اطلس، عامل اصلی جاری شدن سیل در مناطق غرب ایران بوده است. فتاحی و قائمی (۱۳۸۶: ۱) مقادیر حداکثر بارش محتمل را در ایستگاه‌های جنوب غرب ایران با روش‌های آماری و نیز روش‌های سینوپتیکی مبتنی بر فاکتور بیشینه‌سازی باد و رطوبت، برآورد و با هم مقایسه کردند. نتایج کار آنان نشان داد که حداکثر بارش محتمل حاصل از روش اول هرشفیلد، مقادیر بالاتری را نسبت به روش همگرایی دارد؛ در حالی که روش دوم هرشفیلد با حذف مقادیر خارج از مرز، به مقادیر حاصل از روش همگرایی نزدیک است. ذوالفقاری و همکاران (۱۳۸۷: ۳۸۸) حداکثر بارش محتمل را در حوضه آبخیز اراک (کویر میقان) با استفاده از داده‌های ۳۰ ساله ایستگاه، مطالعه و با انتخاب شش توفان، مقادیر حداکثر بارش محتمل را از طریق بیشینه‌سازی دمای نقطه شبنم و باد با تداوم‌های زمانی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته به ترتیب ۸۸، ۱۶۲ و ۱۷۴ میلی‌متر برآورد نمودند. سلطانی و همکاران (۱۳۸۷: ۱) با استفاده از روش آماری هرشفیلد، حداکثر بارش محتمل ۲۴ ساعته ایستگاه‌های تهران-شمال، دوشان‌تپه، ژئوفیزیک و مهرآباد را به ترتیب ۲۱۶، ۱۶۲، ۲۱۰ و ۱۹۲ میلی‌متر محاسبه کردند. صدقی و علیزاده (۱۳۸۷: ۶) در حوضه آبریز کارون، نقش مقدار و تداوم PMP و تغییر شماره منحنی (CN) را بر روی هیدروگراف حداکثر سیل محتمل مطالعه نمودند و به این نتیجه رسیدند که الگوی توزیع زمانی و همچنین تغییر مقادیر CN بر روی هیدروگراف سیل تأثیر بسزایی دارد. فتاحی و ادراکی (۱۳۸۹: ۱) حداکثر بارش محتمل را در حوضه رودخانه بختیاری به روش سینوپتیکی - همگرایی مطالعه و مقادیر آن را برای سه توفان شدید و فراگیر منجر به سیل‌های عمده برآورد کردند. عزیززی و حنفی (۱۳۸۹: ۶۴) مقادیر حداکثر بارش محتمل را در حوضه آبریز آجی‌چای (تلخه‌رود) به روش سینوپتیکی از طریق بیشینه‌سازی دمای نقطه شبنم و باد با تداوم‌های یک تا سه‌روزه در دوره‌های بازگشت ۵۰ و ۱۰۰ سال، بین ۶۸ تا ۱۲۹ میلی‌متر برآورد کردند. عزیززی و همکاران (۱۳۹۱: ۱۰۹) در بررسی نقش الگوهای بندالی در ایجاد بارش‌های شمال شرق ایران، رخدادهای بارشی با شدت‌های متوسط و زیاد را در یک بازه ۱۱ ساله بررسی و بر نقش انکار نکردنی الگوهای بندالی اطلس و غرب اروپا در ایجاد بیش از ۶۵ درصد از رخدادهای بارش‌های متوسط و شدید منطقه تأکید کردند. عباسی و قائمی (۱۳۹۲: ۱۴۵) مقادیر حداکثر بارش محتمل را در حوضه آبریز رودخانه کرج با استفاده از آمار، ۵ ایستگاه سینوپتیک به روش سینوپتیکی با تداوم‌های ۲۴ و ۴۸ ساعته به ترتیب ۱۴۱ و ۲۵۵ میلی‌متر برآورد کردند.

سابقه مطالعه حداکثر بارش محتمل در خارج از کشور به مدت‌ها قبل باز می‌گردد. به نحوی که از نیمه دهه ۱۹۳۰ استفاده از علم هواشناسی برای محاسبه مقادیر بارش به منظور طراحی‌های هیدرولوژی مورد توجه قرار گرفت. برخی از مطالعات خارجی به این شرح هستند. Rakhecha et al. (1995: 67) در حوضه رودخانه سوبارناخا در شرق هندوستان حداکثر بارش محتمل را با تداوم یک، دو و سه‌روزه به ترتیب ۵۳، ۷۸ و ۹۸ میلی‌متر محاسبه کردند. Collier and Hardaker (1996: 277) در انگلستان با استفاده از مدل توفان سیستم‌های همرفتی، مقادیر حداکثر بارش محتمل را برآورد کردند. Svensson and Rakhecha (1998: 79) در حوضه

رودخانه هونگرو در شرق چین حداکثر بارش محتمل را به‌روش سینوپتیکی برای دوره‌های یک، دو و سه‌روزه به‌ترتیب ۴۶۰، ۶۹۰ و ۸۷۰ میلی‌متر محاسبه کردند. Campos and Francisco (1998: 45) حداکثر بارش محتمل را در سن لوئیس پوتوسی^۱ مکزیک برآورد نمودند. مدل آنان برای بارش‌های با تداوم کم‌تر از ۱۱ ساعت ارقام خوبی را برآورد کرد. اما، برای تداوم‌های بیشتر از آن، برآوردها بسیار بالا بود. آنان این احتمال را مطرح کردند که ممکن است بارش‌های با تداوم زمانی طولانی‌تر با سیستم‌های همرفتی متوسط مقیاس همراهی شده باشد. Rakhecha and Clark (1999: 343) بر مبنای پیشینه‌سازی محلی و روش انتقال توفان، حداکثر بارش محتمل را به‌روش سینوپتیکی برای هند مطالعه کردند که نتایج حاصله در مناطق مختلف، از ۷۰ تا ۱۷۰ سانتی‌متر برای یک‌روز تغییر می‌کرد. همچنین برآوردهای مربوط به روش آماری هرشفیلد به‌میزان قابل‌توجهی بیشتر بود. Rakhecha and Clark (2000: 19) در مطالعه‌ای در مناطق مختلف هند حداکثر بارش محتمل را به‌روش سینوپتیکی با تداوم‌های دو و سه‌روزه تعیین کردند که نتایج حاصل از ۱۰۰ تا ۲۹۰ سانتی‌متر برای تداوم دوروزه و ۱۲۰ تا ۳۷۰ سانتی‌متر برای تداوم سه‌روزه تغییر می‌کرد. Daglass and Barouse (2003: 1012) با استفاده از شیوه‌های تحلیل چندبخشی، به برآورد حداکثر بارش محتمل در شرق ایالات متحده پرداخته و سپس تفاوت‌های زمانی و مکانی را ارزیابی نمودند. (Ohara et al (2011: 351) با استفاده از مدل MM5^۲ و با داده‌های اخذشده از NCAR مقدار حداکثر بارش محتمل ۷۲ ساعته را برای یک توفان منجر به سیلاب در یکی از حوضه‌های آبریز ایالت کالیفرنیا ایالات متحده در حدود ۵۵۰ میلی‌متر برآورد کردند. Tingsanchali and Tanmanee (2012: 1198) در حوضه آبریز رودخانه مائه‌سروای^۳ تایلند با استفاده از دو روش آماری و پیشینه‌سازی توفان، مقادیر حداکثر بارش محتمل را با تداوم‌های یک، دو و سه‌روزه به‌منظور برآورد حداکثر سیلاب محتمل جهت کاربرد در سداحداث شده بر روی همان رودخانه محاسبه کردند و در نهایت روش پیشینه‌سازی توفان را برای برآورد مناسب‌تر تشخیص دادند. با جمع‌بندی مطالعات فوق‌معلوم می‌شود که در سالیان اخیر استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو و روش‌های سینوپتیک مبتنی بر پیشینه‌سازی باد و دمای نقطه شبنم و انتقال توفان، در برآورد حداکثر بارش محتمل با تداوم‌های چندساعته تا چند روزه برای مقاصد کاربردی توسعه قابل‌توجهی پیدا کرده است و برتری خاصی بر سایر روش‌ها دارد.

۳- مواد و روش‌ها

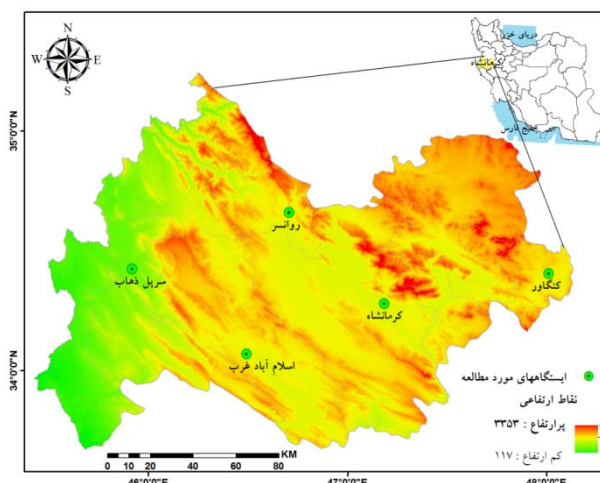
۳-۱- منطقه مورد مطالعه

استان کرمانشاه با مساحت ۲۴۹۹۸ کیلومتر مربع در غرب کشور بین عرض‌های جغرافیایی ۳۶' ۳۳° تا ۱۵' ۳۵° شمالی و طول‌های جغرافیایی ۲۴' ۴۵° تا ۳۰' ۴۸° شرقی قرار گرفته است. این استان از شمال به استان کردستان، از جنوب به استان‌های لرستان و ایلام، از شرق به استان همدان و از غرب به کشور عراق محدود می‌شود. موقعیت استان کرمانشاه در کشور و نیز موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد استفاده در شکل ۱ و مشخصات آماری ۵ ایستگاه مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است.

^۱-San Luis Potosi

^۲- fifth generation mesoscale model

^۳- Mae Sruai



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد استفاده در استان کرمانشاه (ترسیم از نگارندگان)

جدول ۱ - مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در استان کرمانشاه

ردیف	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	نوع ایستگاه
۱	کرمانشاه	۴۷° ۹'	۳۴° ۲۱'	۱۳۱۸/۶	سینوپتیک
۲	اسلام آباد غرب	۴۶° ۳۹'	۳۴° ۴۳'	۱۳۴۹	سینوپتیک
۳	کنگاور	۴۵° ۵۲'	۳۴° ۲۷'	۱۴۶۸	سینوپتیک
۴	روانسر	۴۶° ۳۹'	۳۴° ۴۳'	۱۳۸۰	سینوپتیک
۵	سرپل ذهاب	۴۵° ۵۲'	۳۴° ۲۷'	۵۴۵	سینوپتیک

۳-۲- گردآوری داده‌ها و استخراج اطلاعات توفان‌های منتخب

برای برآورد سینوپتیکی حداکثر بارش محتمل در استان کرمانشاه، ابتدا آمار روزانه، ماهانه و سالانه بارش ایستگاه‌های منتخب استان در یک بازه زمانی ۳۰ ساله (۱۹۷۰-۲۰۰۹) از اداره کل هواشناسی استان کرمانشاه اخذ گردید. در ادامه، به دلیل حجم زیاد داده‌ها (۸ دیده‌بانی در طی شبانه‌روز)، با استفاده از نرم‌افزار spss کدهای مربوط به ثبت توفان (بارش همراه با تگرگ) طی دوره مورد مطالعه از سایر کدهای هواشناسی جدا شد و مورد پردازش قرار گرفت. پس از پردازش‌های مورد نظر، تعداد سه توفان به‌عنوان شدیدترین توفان‌ها استخراج و اطلاعات نقطه‌ای این توفان‌ها با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS به صورت نمودارهای ستونی توأم با اعداد بارش-های سیلابی ایستگاه‌ها، بر روی نقشه منطقه منتقل گردید.

۳-۳- بیشینه‌سازی حداکثر دمای نقطه شبنم

برای برآورد حداکثر بارش محتمل یک توفان، بیشینه‌سازی دمای نقطه شبنم و حداکثر سرعت باد اهمیت زیادی دارد (عزیزی و حنفی، ۱۳۸۹: ۶۰). چرا که، از عوامل مهم بروز ناپایداری و ریزش بارش‌های شدید به حساب می‌آیند. در این روش برآورد، که به روش همگرایی موسوم است، مقدار حداکثر بارش محتمل بر اساس بیشینه‌سازی دمای نقطه شبنم و سرعت باد انجام می‌شود. بدین ترتیب که بر مبنای انتخاب حداکثر توفان روی داده در یک منطقه و با لحاظ کردن ضرایب ناشی از آب قابل بارش، ارتفاع حداکثر بارش محتمل، قابل محاسبه است (ذوالفقاری و همکاران، ۱۳۸۷: ۳۸۶). مقادیر حداکثر بخار آب جوی مورد استفاده برای بیشینه-

سازی توفان، معمولاً از روی حداکثر تداوم ۱۲ ساعته دمای نقطه شب‌نم در سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال برآورد می‌شود (WMO, 1986: 12). بر این پایه در پژوهش حاضر، حداکثر تداوم ۱۲ ساعته دمای نقطه شب‌نم توفان و میانگین فشار "QFE" از طریق داده‌های خام با فواصل زمانی سه‌ساعته از دو روز قبل از شروع توفان تا ۲۴ ساعت پس از اتمام آن برآورد گردید. سپس در روی نمودار 'Skew.T، محل برخورد دمای نقطه شب‌نم و متوسط فشار توفان، مشخص و در همین نقطه، نسبت اختلاط محاسبه گردید. در مرحله بعد، نقطه مورد نظربه موازات خط آدیاباتیک اشباع تا سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال ادامه می‌یابد. نقطه حاصل در حقیقت بیشینه دمای نقطه شب‌نم برای توفان می‌باشد. نسبت اختلاط را در این سطح نیز برآورد می‌کنیم. شایان ذکر است این کار برای توفان‌های منتخب در دوره‌های بازگشت ۵۰ و ۱۰۰ ساله با استفاده از توزیع مناسب آماری صورت گرفت.

۳-۴- بیشینه‌سازی حداکثر سرعت باد

با استفاده از داده‌های اولیه با فواصل زمانی سه‌ساعته، برای هر کدام از توفان‌های منتخب، حداکثر تداوم ۱۲ ساعته سرعت باد برای هر یک از ایستگاه‌ها از دو روز قبل از شروع توفان تا ۲۴ ساعت پس از اتمام آن محاسبه شد (عزیزی و حنفی، ۱۳۸۹: ۶۰). سازمان هواشناسی جهانی (WMO, 1986: 202) توصیه می‌کند به دلیل آن که افزایش سرعت باد الزاماً، به افزایش بارندگی منتهی نمی‌شود، بهتر است قبل از اعمال بیشینه‌سازی سرعت باد بر روی مقادیر بارندگی، مطالعاتی برای اعتبارسنجی رابطه افزایش سرعت باد و افزایش بارندگی به‌انجام برسد.

۳-۵- محاسبه ضریب رطوبت

برای محاسبه ضریب رطوبت با استفاده از رابطه بدین ترتیب عمل شد که نسبت اختلاط حاصل در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال برای دوره‌های بازگشت ۵۰ و ۱۰۰ سال بر نسبت اختلاط در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال هر توفان در هر ایستگاه تقسیم شد تا ضریب رطوبت توفان مورد نظر به‌دست آید.

نسبت اختلاط دوره‌های بازگشت در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال

$$\text{رابطه (۱)} = \frac{\text{نسبت اختلاط توفان در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال}}{\text{ضریب رطوبت}}$$

نسبت اختلاط توفان در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال

۳-۶- تخمین حداکثر بارش محتمل به‌روش سینوپتیکی

در آخرین مرحله، همان‌طور که در بالا گفته شد، پس از اعمال ضرایب بیشینه‌سازی رطوبت و سرعت باد در مقدار متوسط بارش هر توفان در دوره‌های بازگشت ۵۰ و ۱۰۰ ساله، مقدار حداکثر بارش محتمل برای هر توفان و از آن جا مقدار حداکثر بارش محتمل برای استان کرمانشاه محاسبه گردید. در نهایت نقشه‌های سینوپتیکی-دینامیکی هوا، مربوط به سامانه‌های بارش زا، شامل نقشه‌های میدان‌های فشار، ارتفاع ژئوپتانسیل، مؤلفه‌های باد مداری و نصف‌النهاری و همچنین رطوبت نسبی، که با استفاده از نرم‌افزار گردس

^۱- Skew Temperature Diagram or Skew-T Log-P diagram

این نمودار، تصویری از دما، نقطه شب‌نم، فشار و باد جو را در یک نقطه معین از سطح زمین تا حداکثر ارتفاع ۱۶ کیلومتری از سطح دریا ارائه می‌دهد و ابزاری اساسی برای پیش‌بینی توفان‌های شدید و وضعیت هوای روزانه به‌شمار می‌آید. در مورد این نمودار و نحوه استفاده از آن در اغلب منابع جدید اقلیمی توضیحاتی ارائه شده است که به‌عنوان نمونه می‌توانید به این آدرس اینترنتی مراجعه نمایید:

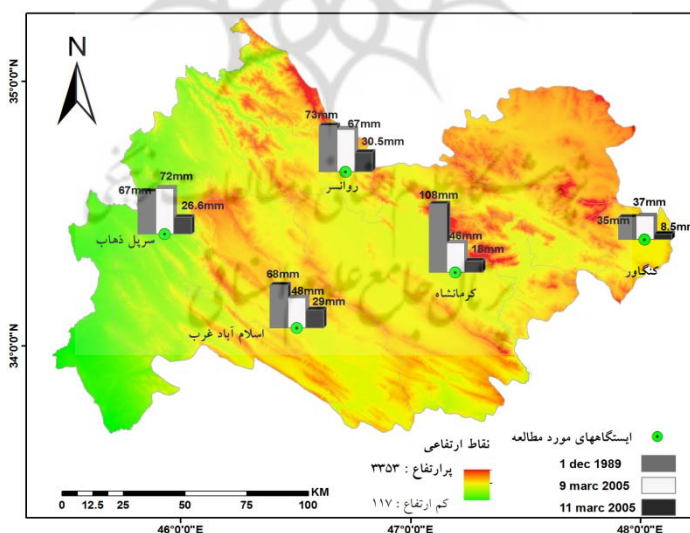
http://www.esrl.noaa.gov/gsd/outreach/education/samii/SAMII_Activity4.html

تهیه شده بودند، در ترازهای مختلف جو در خلال روزهای توفانی از روز شروع فعالیت سیستم تا خاتمه آن تجزیه و تحلیل شدند. داده‌های ترازهای مختلف جوی از مرکز ملی پیش‌بینی محیطی^۱ و مرکز ملی مطالعات جوی^۲ سازمان هواشناسی آمریکا اخذ گردید. مراحل کار در بیشینه‌سازی‌ها و محاسبه ضرایب در روش سینوپتیک و نیز سایر روش‌های برآورد حداکثر بارش محتمل به‌طور کامل در ویرایش دوم گزارش شماره ۳۳۲ سازمان هواشناسی جهانی (WMO, 1986: 269p.) تحت عنوان "راهنمای برآورد حداکثر بارش محتمل، هیدرولوژی عملی" و نیز ویرایش سوم همان گزارش (WMO, 2009: 259p.) توضیح داده شده است.

۴- یافته‌های تحقیق

۴-۱- توزیع مکانی بارش توفان‌های منتخب و برآورد حداکثر بارش محتمل به‌روش سینوپتیک

پس از بررسی دقیق آمار روزانه بارش ایستگاه‌های استان (از بدو تأسیس تاکنون)، تعداد سه توفان به‌عنوان شدیدترین توفان‌ها استخراج و اطلاعات نقطه‌ای سیلاب‌های ایستگاه‌ها با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS به‌صورت نمودار هایستونی توأم با اعداد بارش‌های سیلابی، بر روی نقشه منطقه منتقل گردید (شکل ۲). همان‌طور که از مقدار بارش‌ها در نقشه ارتفاعی منطقه مشخص است، به‌نظر نمی‌رسد میزان بارش حاصل از توفان‌های رگباری در منطقه از ارتفاع تبعیت کند. چرا که، بررسی رابطه بین ارتفاع با میزان بارش ایستگاه‌ها توسط ضرایب تعیین (R²) معادلات رگرسیونی، از مقدار بسیار پایین این ضرایب حکایت داشت. از این‌رو شاید قرارگیری منطقه در مسیر سیکلون‌های غربی به‌ویژه در فصل سرد سال (فصل وقوع سه توفان منتخب)، عامل مهم‌تری در میزان دریافت بارش‌های سنگین در ایستگاه‌های منتخب استان باشد. چرا که، قصر شیرین با ارتفاع کم از بارش قابل توجهی برخوردار است. اما، کنگاور علی‌رغم دارا بودن ارتفاع بیشتر، بارش‌های بسیار کم‌تری دارد.



شکل ۲- میزان بارش رخ داده در هر توفان برای ایستگاه‌های منتخب استان کرمانشاه (ترسیم از نگارندگان)

بر مبنای مطالب گفته شده، مقادیر بیشینه‌سازی شده حداکثر سرعت باد مربوط به توفان تاریخ ۱۳۶۸/۰۹/۱۰ شمسی (معادل با ۱۹۸۹/۱۲/۰۱ میلادی) به‌عنوان نمونه در جدول ۲ آورده شده است.

^۱- National Centers for Environmental Prediction, (NCEP)

^۲- National Center for Atmospheric Research, (NCAR)

جدول ۲- بیشینه‌سازی سرعت باد برای توفان تاریخ ۱۳۶۸/۰۹/۱۰ شمسی (معادل با ۱۹۸۹/۱۲/۰۱)

ایستگاه	حداکثر ۱۲ ساعته سرعت باد توفان	سرعت باد بیشینه- سازی شده در دوره بازگشت ۵۰ سال	سرعت باد بیشینه سازی شده در دوره بازگشت ۱۰۰ سال	ضریب حداکثر ۱۲ ساعته سرعت باد در دوره بازگشت ۵۰ سال	ضریب حداکثر ۱۲ ساعته سرعت باد در دوره بازگشت ۱۰۰ سال
کرمانشاه	۸	۱۲/۴	۱۵/۷	۱/۵۵	۱/۹۶
اسلام آباد	۱۹	۲۵/۱	۲۷/۱	۱/۳۲	۱/۴۲
کنگاور	۱۶	۱۹/۳	۲۳/۸	۱/۲۰	۱/۴۸
روانسر	۷	۱۱/۴	۱۴/۲	۱/۶۲	۲/۰۲
سرارود	۱۴	۱۸/۷	۲۰/۷	۱/۳۳	۱/۴۷
سرپل ذهاب	۱۷	۲۳/۵	۲۶/۷	۱/۳۸	۱/۵۷
میانگین				۱/۵۲	۱/۷۴

به عنوان نمونه، نتایج بیشینه‌سازی دمای نقطه شبنم و نسبت اختلاط و مقادیر ضرایب رطوبت برآورد شده با رابطه ۱ در جدول ۳ ذکر شده است.

جدول ۳- بیشینه‌سازی دمای نقطه شبنم و نسبت اختلاط در سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال

برای توفان تاریخ ۱۳۶۸/۰۹/۱۰ شمسی (معادل با ۱۹۸۹/۱۲/۰۱ میلادی)

ایستگاه- های سینوپتیکی	نقطه شبنم توفان	حداکثر تداوم ۱۲ ساعته	نسبت اختلاط		نقطه شبنم در دوره	ساعته ۵۰ ساله به سطح	نسبت اختلاط		ضریب رطوبت	نقطه شبنم در	۱۲ ساعته ۱۰۰ ساله به	نسبت اختلاط		ضریب رطوبت
			در سطح زمین	هکتوپاسکال			در سطح زمین	هکتوپاسکال				در سطح زمین	هکتوپاسکال	
کرمانشاه	۵/۲	۷/۲	۵/۱	۸/۴	۱۲	۸/۴	۷/۵	۱۲	۸/۲	۸/۶	۱/۵	۷/۸	۱/۵	۱/۸۲
اسلام	۴/۸	۹/۸	۵/۳	۸/۶	۱۶	۸/۳	۸/۶	۱۳	۱/۹۵	۸/۶	۱/۸	۸/۹	۱/۶	۱/۲۲
کنگاور	۸/۶	۱۲	۷/۹	۱۳	۱۶	۱۶	۹/۲	۱۲	۱/۲۲	۱/۹	۱/۹	۹/۳	۱/۵	۱/۲۰
روانسر	۳/۵	۶/۳	۴/۹	۷/۵	۷/۶	۶/۳	۶/۳	۹/۳	۱/۹۲	۶/۸	۸/۹	۷/۵	۹/۶	۱/۶۲
سرارود	۵/۳	۸/۲	۵/۵	۸/۶	۱۶	۷/۶	۷/۵	۸/۱	۱/۴۲	۷/۸	۱/۹	۷/۹	۸/۵	۱/۳۸
سرپل- ذهاب	۵/۳	۸/۱	۴/۵	۶/۶	۱۲	۸/۳	۶/۲	۹/۳	۱/۱۲	۸/۵	۱/۶	۷/۶	۸/۶	۱/۱۲
میانگین									۱/۲۵					۱/۶۵

در آخرین مرحله، همان‌طور که قبلاً نیز توضیح داده شد، پس از اعمال ضرایب بیشینه‌سازی رطوبت و سرعت باد در مقدار متوسط بارش هر توفان در دوره‌های بازگشت ۵۰ و ۱۰۰ ساله، مقدار حداکثر بارش محتمل برای هر توفان و از آن جا مقدار حداکثر بارش محتمل برای استان کرمانشاه در دو دوره بازگشت یادشده به دست آمد (جدول ۴).

جدول ۴- برآورد حداکثر بارش محتمل به‌روش سینوپتیک در استان کرمانشاه در دوره‌های بازگشت ۵۰ و ۱۰۰ ساله

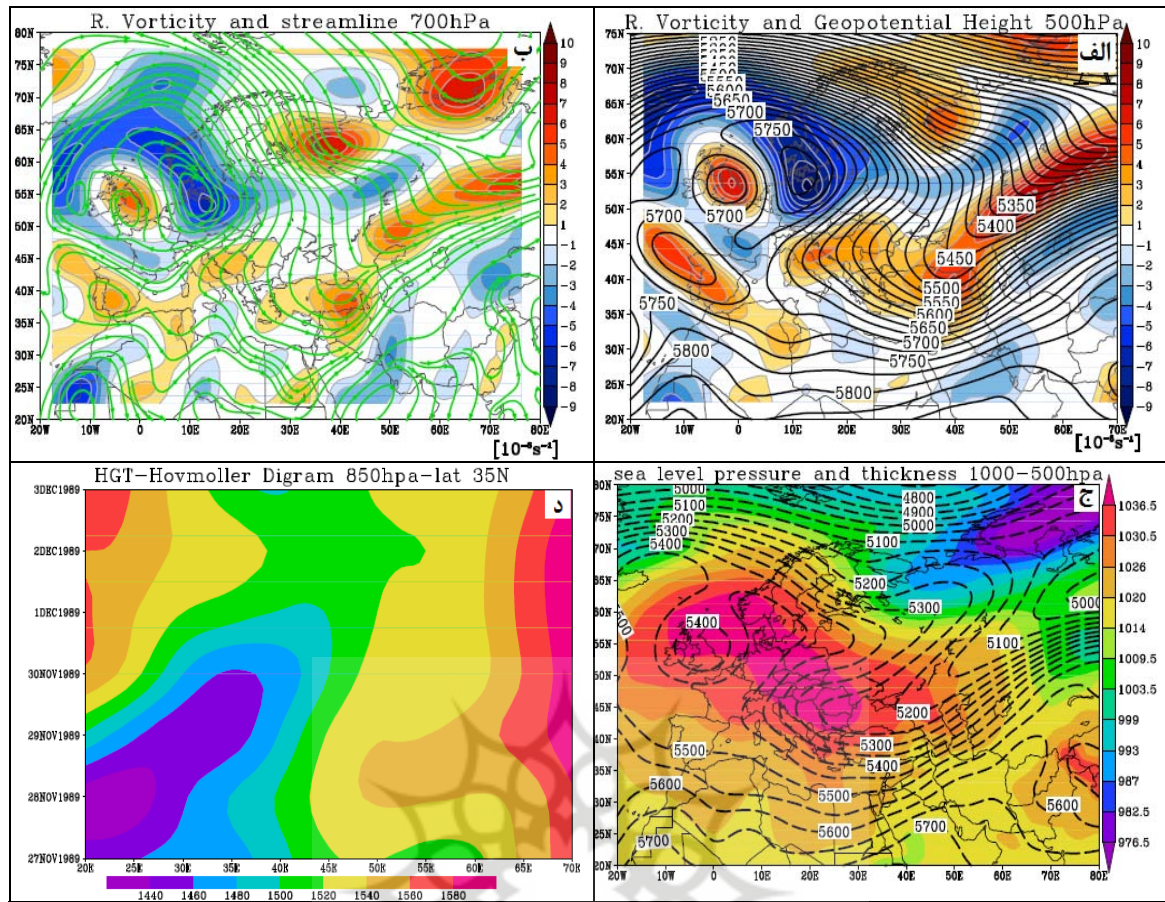
تاریخ توفان	میزان بارندگی در سطح تجمعی به میلی‌متر	ضریب توفان	PMP ۵۰ ساله	PMP ۱۰۰ ساله
۱۹۷۰/۰۴/۲۸-۲۹-۳۰	۱۰۵	۲/۷۳	۲۸۷	۳۵۷
۱۹۸۹/۱۲/۱-۲	۹۷/۶	۱/۶۸	۱۶۴	۲۴۶
۲۰۰۵/۰۳/۰۹-۱۰-۱۱	۱۲۵/۵	۲/۸۲	۳۴۰	۴۳۹

۴-۲- تحلیل سینوپتیکی - دینامیکی نقشه‌های هوا

در این بخش برای بررسی و تحلیل سامانه‌های بارش‌زا با استفاده از نقشه‌های فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل، مؤلفه‌های باد مداری و نصف‌النهاری، رطوبت نسبی و دمای سطوح مختلف جو، توفان رخ داده در تاریخ‌های ۱۱-۱۰/۰۹/۱۳۶۸ شمسی (معادل باتاریخ‌های ۲-۱۲/۱۹۸۹ میلادی) از روز شروع تا پایان توفان به‌عنوان نمونه مورد بررسی قرار می‌گیرد. این کار با استفاده از نقشه‌های سطوح دریا، ۸۵۰، ۷۰۰، ۵۰۰ و ۲۰۰ هکتوپاسکال روزهای توفان انجام می‌شود.

۴-۲-۱- تحلیل نقشه‌های ۱ دسامبر ۱۹۸۹ (روز آغاز بارش)

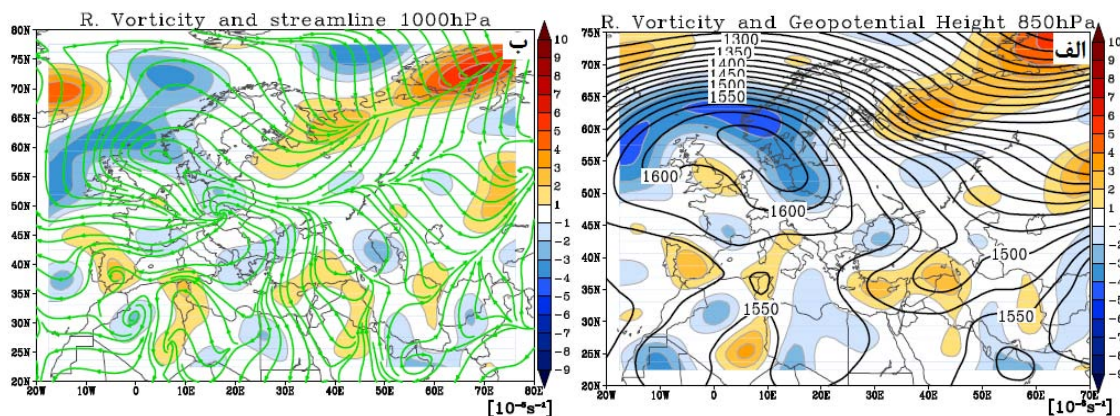
در پی فراهم شدن شرایط مناسب برای تشکیل سامانه بندالی امگا شکل بر روی شمال اروپا، کم‌ارتفاع شرقی و نسبتاً بزرگی که بر جانب شرقی دریای مدیترانه در اثر شکل‌گیری این سامانه تشکیل شده بود، با حرکت شرق‌سوی خود به نیمه غربی کشور رسیده و شرایط مناسبی را برای مناطق پیش روی خود جهت صعود دینامیکی هوا و ریزش‌های مناسب جوی به‌وجود آورده است (شکل ۳-الف)؛ به‌طوری‌که در ۱ دسامبر، بارش در منطقه مورد مطالعه آغاز شده است. جهت خطوط جریان‌های باد مداری و نصف‌النهاری هماهنگی بسیار زیادی با منحنی‌های تاوایی دارند؛ به‌طوری‌که مقدار تاوایی نسبی در شمال منطقه مورد مطالعه در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال به بیش از ۵-۶×۱۰ متر بر ثانیه رسیده است (شکل ۳-ب). وضعیت فشار سطح دریا بر روی نیمه غربی کشور به‌گونه‌ای است که با توجه به دمای سطح زمین، شرایط مناسبی برای صعود دینامیکی کم‌فشارها ایجاد شده است. فشار مذکور بین ۱۰۱۰-۱۰۱۵ هکتوپاسکال می‌باشد. خطوط منحنی‌های ضخامت جو بین ۵۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال بر روی منطقه مذکور منبسط و از هم باز شده‌اند که نشان‌دهنده دمای مناسب منطقه و شرایط مساعدتر برای صعود دینامیکی است (شکل ۳-ج). بررسی وضعیت ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، نشان‌دهنده شکل‌گیری یک سامانه بندالی امگا شکل بر روی شمال اروپاست که مرکز پارتفاع آن بر روی شرق اطلس، و قسمت کم‌ارتفاع شرقی آن، منطقه مورد مطالعه و کشورهای همجوار ایران را تحت تأثیر قرار داده است. یال شرقی این سامانه با فعالیت مناسب در نیمه غربی کشور شرایط مساعدی را برای ریزش‌های جوی ایجاد کرده است؛ به‌طوری‌که مقدار تاوایی آن در مرزهای غربی کشور در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به بیش از ۵-۶×۱۰ متر بر ثانیه رسیده است (شکل ۳-الف). با بررسی نمودار هاومولر ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در روزهای اول و دوم دسامبر به‌خوبی می‌توان مشاهده کرد که در طی روزهای توفانی و بارندگی‌های شدید در استان کرمانشاه، کم‌ارتفاعی با کم‌تر از ۱۴۸۰ ژئوپتانسیل‌متر بر روی طول‌های ۴۰-۳۵ درجه شرقی گسترش یافته که منطقه مورد مطالعه دقیقاً در جلوی این سامانه یعنی در طول‌های ۴۵-۴۸ درجه شرقی قرار گرفته است (شکل ۳-د).



شکل ۳- (الف) وضعیت ارتفاع ژئوپتانسیل و تاوایی نسبی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال؛ (ب) وضعیت جریان‌های باد و تاوایی نسبی در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال؛ (ج) فشار سطح دریا و همچنین ضخامت ۵۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال؛ وضعیت ارتفاع ژئوپتانسیل و تاوایی نسبی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال؛ و (د) نمودار هاومولر ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در عرض ۳۵ درجه شمالی در روزهای ۲۷ نوامبر تا ۳ دسامبر ۱۹۸۹. تاوایی نسبی بر حسب ۱-۵S-۱؛ و ارتفاع ژئوپتانسیل بر حسب متر می‌باشد. نقشه‌های (الف)، (ب) و (ج) مربوط به ۱ دسامبر ۱۹۸۹ می‌باشند.

در بررسی وضعیت ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال مشاهده شد که مرکز پراارتفاع بر روی شمال اروپا شکل گرفته و موقعیت زبانه‌های کم‌ارتفاع سبب شده است تا منطقه مورد مطالعه در قسمت شرقی آنها قرار گیرد و شرایط مساعدی برای آغاز ریزش‌های جوی در نیمه غربی کشور به‌خصوص استان کرمانشاه فراهم شود (شکل ۴-الف).

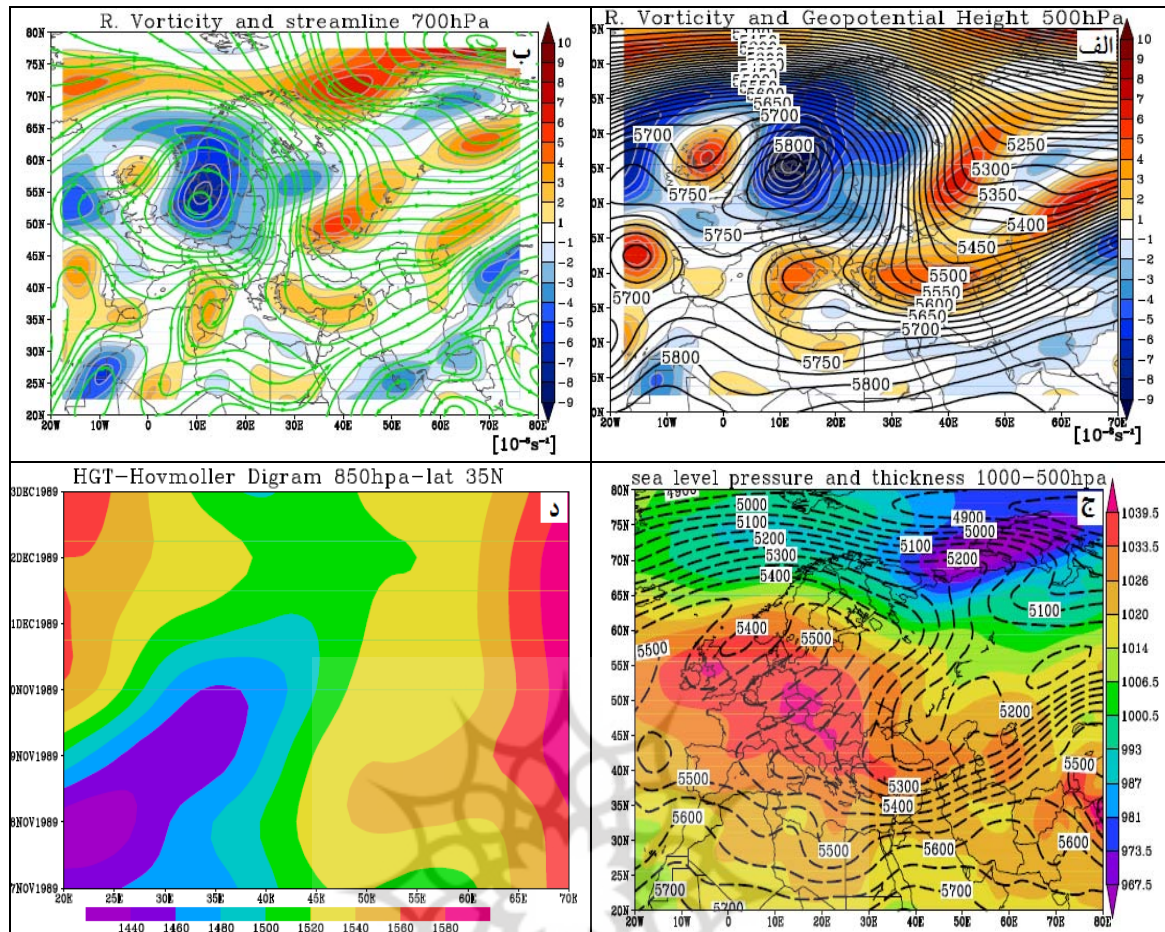
شکل ۴- ب مقادیر متوسط تاوایی را برای روز ۱ دسامبر ۱۹۸۹ در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، مرکز کم‌ارتفاعی که در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال شکل گرفته و با حرکت شرق‌سوی خود، در حوالی طول جغرافیایی 46° شرقی واقع شده است، وضعیت دینامیکی مناسبی را برای صعود و ایجاد بارش فراهم کرده است. حداکثر تاوایی مثبت در منطقه مورد مطالعه به میزان 5×10^4 بر ثانیه در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال مشاهده می‌شود.



شکل ۴- الف) وضعیت متوسط ارتفاع ژئوپتانسیل، تاوایی نسبی و الگوی گردش مؤلفه‌های باد نصف‌النهاری و مداری در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال. ب) شرایط رطوبت نسبی، درجه حرارت و میدان‌های باد تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال؛ و ج) مقطع قائم تاوایی نسبی در امتداد عرض 34° شمالی. تاوایی نسبی بر حسب ۱-۵S-۱۰ و ارتفاع بر حسب ژئوپتانسیل متر، درجه حرارت بر حسب درجه سلسیوس، رطوبت نسبی بر حسب درصد و میدان‌های باد بر حسب کیلومتر در ساعت می‌باشد. همه نقشه‌های فوق مربوط به ۱ دسامبر ۱۹۸۹ می‌باشند.

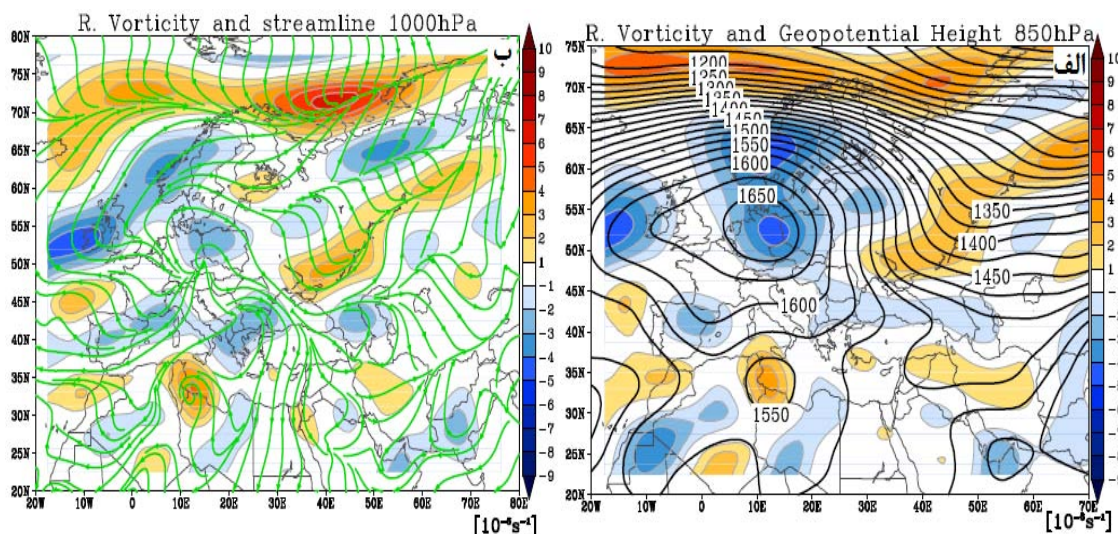
۴-۲-۲- تحلیل نقشه‌های ۲ دسامبر (دومین روز بارش)

در این روز بیشترین مقدار بارش ثبت شده در ایستگاه کنگاور ۱۷ میلی‌متر و کم‌ترین آن در ایستگاه سرپل‌ذهاب ۲ میلی‌متر ثبت شده است. بررسی نقشه‌های تاوایی و ارتفاع ژئوپتانسیل متری در این روز نشان می‌دهد که با کشیده شدن زبانه‌های مرکز کم ارتفاع شکل گرفته بر روی شرق مدیترانه در روز قبل (۱ دسامبر) به سمت بالا، از میزان تاوایی نیز کاسته شده است؛ به طوری که میزان تاوایی در شمال منطقه به $5-10 \times 10^{-6}$ رسیده است. در نتیجه کشیده شدن زبانه یال شرقی سامانه بندالی امگا شکل و کاهش تاوایی مثبت در منطقه، از میزان صعود دینامیکی هوا نسبت به روز قبل و در نتیجه از شدت بارش‌ها کاسته شده و میزان بارندگی کم تری در منطقه ثبت شده است (شکل ۵-الف). با بررسی نمودار هاومولر ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در روزهای ۲۷ نوامبر تا ۳ دسامبر ۱۹۸۹ به خوبی می‌توان مشاهده کرد که در طی روزهای توفانی و بارندگی‌های شدید در استان کرمانشاه، کم‌ارتفاعی با کم‌تر از 1480 ژئوپتانسیل متر بر روی طول‌های $35-40$ درجه شرقی گسترش یافته است. ولی، در روز بعد، بر میزان ارتفاع ژئوپتانسیل متر افزوده شده است؛ به طوری که میزان ارتفاع ژئوپتانسیل متر بر روی طول‌های $35-40$ درجه شرقی به 1520 متر رسیده که منطقه مورد مطالعه به طور دقیق در جلوی این سامانه یعنی در طول‌های $45-48$ درجه شرقی قرار گرفته است (شکل ۵-د). همچنین بررسی همزمان میزان فشار سطح دریا نشان داد که در این روز میزان فشار سطحی نسبت به روز قبل افزایش یافته است. در این روز زبانه‌های پرفشار 1020 تا 1026 هکتوپاسکالی، سطح زمین استان کرمانشاه را تحت تأثیر قرار داده است که نسبت به روز قبل 10 هکتوپاسکال افزایش فشار مشاهده می‌شود. در نتیجه این افزایش فشار در منطقه، عامل صعود سطحی نیز کاهش یافته است (شکل ۵-ج). نقشه استریم-لاین و تاوایی نسبی سطح 700 هکتوپاسکال نیز بیان‌گر کاهش میزان تاوایی در نزدیکی منطقه مورد مطالعه است. همچنین بادها با جهت شمال‌غربی- جنوب‌شرقی و جنوب‌غربی- شمال‌شرقی به منطقه مورد مطالعه وارد شده است که این نشان‌دهنده تأمین رطوبت این بارش از منابعی چون دریای سرخ و دریای مدیترانه است (شکل ۵-ب).



شکل ۵- (الف) وضعیت ارتفاع ژئوپتانسیل و تاوایی نسبی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال؛ (ب) وضعیت جریان‌های باد و تاوایی نسبی در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال؛ (ج) فشار سطح دریا و همچنین ضخامت ۵۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال؛ وضعیت ارتفاع ژئوپتانسیل و تاوایی نسبی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال؛ و (د) نمودار هاومولر ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در عرض ۳۵ درجه شمالی در روزهای ۲۷ نوامبر تا ۳ دسامبر ۱۹۸۹. تاوایی نسبی بر حسب ۱-۵۵-۱۰ و ارتفاع ژئوپتانسیل بر حسب متر می‌باشد. نقشه‌های (الف)، (ب) و (ج) مربوط به ۲ دسامبر ۱۹۸۹ می‌باشند.

در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال مشاهده شد که زبانه‌های شرقی مرکز کم‌ارتفاع سامانه امگا شکل، منطقه مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار داده است که هرچند نسبت به روز قبل به سمت شمال جابه جا شده است؛ ولی، شرایط لازم برای صعود هوا و ریزش‌های جوی را فراهم کرده است. با این وجود به دلیل فاصله گرفتن از منطقه مورد مطالعه و از طرف دیگر افزایش میزان ارتفاع ژئوپتانسیل متر در هسته پراترفاع، سبب کاهش شدت صعود و به تبع آن کاهش چشم‌گیر شدت بارندگی‌ها شده است؛ به طوری که در ایستگاه کرمانشاه نسبت به روز قبل، ۱۰۵ میلی‌متر کاهش بارندگی ثبت شده است. بررسی وضعیت تاوایی نسبی نیز بیان‌گر کاهش آن نسبت به روز قبل است؛ به طوری که در این روز حداکثر تاوایی مثبت بر روی استان کرمانشاه به حد ۵-۱۰×۲ رسیده است (شکل ۶-الف). بررسی خطوط منحنی‌های جریان باد مشخص کرد که در این روز همچنان از سمت شمال غرب و غرب، رطوبت به منطقه تزریق می‌شده است. در روز ۲ دسامبر میانگین درجه حرارت در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال بر روی استان کرمانشاه بین ۲۰-۲۵ درجه سلسیوس بوده است (شکل ۶-ب).



شکل ۶- (الف) وضعیت متوسط ارتفاع ژئوپتانسیل، تاوایی نسبی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال. (ب) استریم لاین و میدان های باد تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال؛ تاوایی نسبی برحسب ۱-۵S-۱۰ و ارتفاع ژئوپتانسیل برحسب متر می باشد. همه نقشه های فوق مربوط به ۲ دسامبر ۱۹۸۹ می باشند.

۵- خلاصه و نتیجه گیری

در این پژوهش برای برآورد حداکثر بارش محتمل به روش سینوپتیکی در استان کرمانشاه تعداد ۳ توفان انتخاب و پس از برآورد مقادیر بارش محتمل، الگوهای سینوپتیکی مربوطه از روز شروع تا خاتمه آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. با توجه به نقشه توفان های منتخب (شکل ۲) و همچنین نتایج محاسبات رگرسیونی به نظر می رسد که میزان بارش های رگباری در منطقه، قبل از آن که از ارتفاع تبعیت کند، از قرارگیری منطقه در مسیر سیکلون های غربی به ویژه در فصل سرد سال (فصل وقوع سه توفان منتخب) متأثر می شود. با استفاده از بیشینه سازی های سرعت باد (جدول ۲) و حداکثر دمای نقطه شبنم (جدول ۳) بر مبنای توزیع آماری مناسب، مقادیر حداکثر بارش محتمل در دوره های بازگشت ۵۰ و ۱۰۰ سال بر حسب مورد از ۱۶۴ تا ۴۳۹ میلی متر برآورد گردید (جدول ۴). این ارقام، در مقایسه با مقادیر برآورد شده توسط عزیزی و حنفی (۱۳۸۹: ۶۴) در حوضه آبریز آجی چای واقع در شمال غرب کشور (۶۸ تا ۱۲۹ میلی متر) و ذوالفقاری و همکاران (۱۳۸۷: ۳۸۷) در کویر میقان اراک واقع در استان مرکزی (۸۸ تا ۱۷۴ میلی متر) بسیار زیاد به نظر می رسد. شاید این امر بی ارتباط با نحوه تغذیه رطوبتی توفان های منطقه غرب کشور از منابع آبی مجاور و عبور بیشتر سیکلون ها از این منطقه نباشد. البته این خود نیازمند تحقیقات بیشتری است.

تحلیل نقشه های ترکیبی توفان های منتخب نشان داد که منطقه، تحت تأثیر سامانه کم ارتفاع دینامیکی ناشی از سامانه بندالی امگا شکل قرار داشته که سبب بارندگی های شدید در استان کرمانشاه شده است. این مسأله با یافته های عزیزی و همکاران (۱۳۹۱: ۱۰۹) و حبیبی (۱۳۸۶: ۱۰۹) در زمینه نقش سامانه های بندالی در شکل گیری بارش های شدید در شمال شرق و غرب ایران مطابقت دارد. سامانه مذکور، متشکل از یک سامانه پر ارتفاع بر فراز اروپا و دو سامانه کم ارتفاع در طرفین آن می باشد که یال شرقی آن منطقه مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار داده است. بررسی نقشه های میدان های باد مداری و نصف النهاری سطوح مختلف جو به ویژه ۸۵۰ هکتوپاسکال نشان داد که دریای سرخ، خلیج فارس و شرق دریای مدیترانه رطوبت لازم را برای این سامانه های بارش را تأمین می کرده اند. وضعیت تاوایی در ترازهای مختلف هکتوپاسکالی نیز حاکی از شرایط

بسیار مناسب برای صعود دینامیکی جو و تشکیل ابر بوده است؛ به‌طوری‌که در طی روزهای توفانی، مقدار ابرناکی بین ۷۰ تا ۱۰۰ درصد متغیر بوده و هماهنگی کاملی با نواحی حرکت مثبت تاوایی (صعود هوا) داشته است. همچنین بررسی نمودار هاومولر آب قابل‌بارش در عرض ۳۴ درجه شمالی در روزهای ۲۷ نوامبر تا ۳ دسامبر ۱۹۸۹ نشان داد که محتوای آب قابل‌بارش زیادی بین طول‌های ۴۰-۴۵ درجه شرقی وجود داشته که باعث ریزش‌های جوی بسیار مناسبی در نیمه غربی کشور به‌ویژه استان کرمانشاه شده است. در نتیجه شکل‌گیری سامانه بندالی و تشدید جریانات نصف‌النهاری بادهای غربی، یال شرقی آن قوی‌تر شده و با قرارگیری بر روی منطقه مورد مطالعه (تشدید تاوایی مثبت و منطقه صعود هوا)، شرایط لازم را برای شکل‌گیری توفان فراهم آورده است. همچنین بررسی نقشه‌های استریم‌لاین تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال بیان‌گر ورود جریانات هوا با جهت شمال‌غربی - جنوب‌شرقی و جنوب‌غربی - شمال‌شرقی است که با توجه به حرکت آنها از روی منابع رطوبتی اطراف همچون دریای سرخ و دریای مدیترانه، باعث شکل‌گیری بارش‌های سنگین در منطقه شده است. به‌نظر می‌رسد که در مطالعات آتی برای محاسبه آب قابل‌بارش و برآورد حداکثر بارش محتمل، بهره‌گیری از مدل‌های جهانی و منطقه‌ای گردش عمومی جو، تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های راداری در روشن شدن ابعاد دقیق مسأله کمک شایان توجهی نماید.



۶- منابع

- ۱- حبیبی، فریده، (۱۳۸۵)، تحلیل هم‌دید و دینامیکی سامانه‌های بندالی، روش تشخیص سامانه‌ها، نه بندالی و تأثیر آن روی منطقه ایران، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۲(۳): ۶۹-۸۹.
- ۲- حبیبی، فریده، (۱۳۸۶)، نقش سامانه‌های بندالی در چرخندزایی روی شرق دریای مدیترانه و بررسی نقش آن در سیل روی منطقه غرب ایران در مارس ۲۰۰۰، پژوهش‌های جغرافیایی، ۶۲: ۱۰۹-۱۲۷.
- ۳- خلجی پیربلوطی، مهدی و علیرضا سپاسخواه، (۱۳۸۱)، رسم منحنی‌های حداکثر بارش محتمل ۲۴ ساعته با روش‌های مختلف آماری و مقایسه آن با روش سینوپتیکی برای ایران، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۶(۱): ۱-۱۱.
- ۴- خلیلی، علی، (۱۳۸۱)، برآورد حداکثر بارش محتمل آماری در سطح زمانی استاندارد در گستره ایران و پهنه‌بندی کشور از دیدگاه قانونمندی‌های آن، معاونت پژوهشی و آموزشی وزارت راه و ترابری سازمان هواشناسی کشور.
- ۵- ذوالفقاری، مرتضی، محمدناصر هاشمی و مازیار مجدی، (۱۳۸۷)، برآورد حداکثر بارش محتمل حوزه آبخیز کویر میقان (اراک) با استفاده از روش همگرا، سیزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران.
- ۶- سلطانی، محسن، علی حنفی و اسلام یاری، (۱۳۸۷)، برآورد حداکثر بارش محتمل به روش آماری هرفیلد در شهر تهران، مجموعه مقالات سومین همایش مقابله با سوانح طبیعی، دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
- ۷- صالحی پاک، تهمینه، (۱۳۷۸)، برآورد حداکثر بارش محتمل حوضه سد ماملو به روش سینوپتیکی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد جغرافیای طبیعی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه تربیت معلم تهران، ص ۱۷.
- ۸- صدقی، حسین و بابک علیزاده، (۱۳۸۷)، آنالیز حساسیت برای حداکثر سیل محتمل، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران.
- ۹- عباسی، افسانه و هوشنگ قائمی، (۱۳۹۲)، برآورد حداکثر بارش محتمل به روش سینوپتیکی در حوضه آبریز رودخانه کرج، جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۱۷(۴۳): ۱۴۵-۱۶۸.
- ۱۰- عزیزی، قاسم و علی حنفی، (۱۳۸۹)، برآورد حداکثر بارش محتمل آبی‌چای به روش سینوپتیکی، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۲: ۵۵-۷۱.
- ۱۱- عزیزی، قاسم، سید امید نبوی و مرتضی میری، (۱۳۹۱)، داده‌کاوی گردش‌های جوی برای بررسی نقش الگوهای بندالی در ایجاد بارش‌های شمال شرق ایران، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۴(۳): ۱۰۹-۱۲۶.
- ۱۲- فتاحی، ابراهیم و مریم ادراکی، (۱۳۸۹)، برآورد حداکثر بارش محتمل بر اساس روش سینوپتیکی-همگرایی در حوضه رودخانه بختیاری، همایش کاربرد جغرافیای طبیعی در برنامه‌ریزی محیطی.
- ۱۳- فتاحی، ابراهیم و هوشنگ قائمی، (۱۳۸۶)، ارزیابی روش‌های برآورد حداکثر بارش محتمل در ایستگاه‌های منتخب جنوب غرب ایران، دومین همایش مقابله با سوانح طبیعی.
- ۱۴- مشایخی، شهرام، (۱۳۸۰)، برآورد حداکثر بارش محتمل به روش فیزیکی و آماری مقایسه این دو روش برای منطقه البرز مرکزی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.

- 15- Campos, A., and Francisco, D., (1998), *Statistical Estimate of PMP in San Luis Potosi, Mexico*, *Ingenieria Hidraulica en Mexico*, 13: 45-66.
- 16- Collier, C. G., and Hardaker, P. J., (1996), *Estimating Probable Maximum Precipitation Using a Storm Model Approach*, *Journal of Hydrology*, 183(3-4): 277-306.
- 17- Douglas, E. M., and Barros, A. P., (2003), *Probable Maximum Precipitation Estimation Using Multifractals: Application in the Eastern United States*, *Journal of Hydrometeorology*, 4(6): 1012-1024.
- 18- Ohara, N., Kavvas, M., Kure, S., Chen, Z., Jang, S., and Tan, E., (2011), *Physically Based Estimation of Maximum Precipitation over American River Watershed, California*, *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(4): 351-361.
- 19- Rakhecha, P. R., and Clark, C., (1999), *Revised Estimates of One-day Probable Maximum Precipitation (PMP) for India*, *Meteorological Applications*, 6(4): 343-350.
- 20- Rakhecha, P. R., and Clark, C., (2000), *Point and Areal PMP Estimates for Durations of Two and Three Days in India*, *Meteorological Applications*, 7(1): 19-26.
- 21- Rakhecha, P. R., Mandal, B. N., Kulkarni, A. K., and Deshpande, N. R., (1995), *Estimation of Probable Maximum Precipitation for Catchments in Eastern India by a Generalized Method*, *Theoretical and Applied Climatology*, 51(1-2): 67-74.
- 22- Svensson, C., and Rakhecha, P. R., (1998), *Estimation of Probable Maximum Precipitation for Dams in the Hongru River Catchment, China*, *Theoretical and Applied Climatology*, 59: 79-91.
- 23- Tingsanchali, T., and Tanmanee, S., (2012), *Assessment of Hydrological Safety of Mae Sruai Dam, Thailand*, *Procedia Engineering*, 32: 1198-1204.
- 24- World Meteorological Organization (WMO), (1986), *Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation, Second Edition, Operational Hydrology, Report No. 1, WMO No. 332, Geneva, 269 p.*
- 25- World Meteorological Organization (WMO), (2009), *Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation, WMO No. 1045, Geneva, 259 p.*