

بررسی تغییرات شاخص‌های دینامیکی همزمان با توفان‌های حوضه آبریز کارون

مه‌ری اکبری^۱

حسین محمدی^۲

علی‌اکبر شمسی‌پور^۳

چکیده

این پژوهش به بررسی ناهنجاری‌های دینامیکی و ترمودینامیکی بزرگ مقیاس بارش‌های سیل‌آسا ناشی از فرآیندهای چرخندزایی در دریای مدیترانه، و استقرار کم‌فشار حرارتی سودانی پرداخته است. پنج نمونه از بارش‌های سیلابی در فاصله زمانی ۱۹۹۸-۲۰۰۸ در حوضه آبریز کارون بزرگ، انتخاب و با استفاده از داده‌های جوی دوباره پردازش شده ۲۵ ساله ژاین (JRA25) و تحلیل‌های آماری از دو روز پیش از رخداد بارش تا خاتمه بارش، مورد بررسی قرار گرفتند. شاخص‌های دینامیک منتخب در این پژوهش عبارتند از تاوایی پتانسیل، همگرایی و واگرایی، سرعت قائم، فرارفت تاوایی مطلق و شاخص‌های ترمودینامیکی شامل نم‌ویژه، شار نم‌ویژه، دمای پتانسیل و دمای پتانسیل معادل هستند. بر اساس نتایج این پژوهش و مقایسه با مقادیر بارش ۶ ساعته ایستگاه‌های باران‌سنج ثابت منطقه، مشاهده گردید که پیش از شروع رخداد بارش، ارتفاع ژئوپتانسیلی در منطقه مورد مطالعه به‌طور محسوسی شروع به کاهش نموده و در هنگام رخداد بیشینه بارش به کمترین مقدار رسیده و با خاتمه بارش رو به افزایش می‌گذارد و بالعکس پارامترهای متناظر با همگرایی و حرکات صعودی، همچون تاوایی پتانسیلی، جریان تلاطمی رطوبت، همگرایی جریان رطوبت و مقدار نم‌ویژه هم‌روندی مشابه با تغییرات مقدار بارش از زمان شروع تا خاتمه دارند. بدیهی است که هیچ‌یک از این

۱- استادیار گروه آب و هواشناسی دانشکده علوم جغرافیایی دانشگاه خوارزمی.
Email:mehryakbary@ut.ac.ir

۲- استادیار گروه جغرافیای طبیعی دانشگاه تهران.

۳- استادیار گروه جغرافیای طبیعی دانشگاه تهران.

شاخص‌ها به تنهایی نمی‌توانند مؤید رخداد یک بارش سیل‌آسا باشند، ولی با بررسی روند تغییرات شاخص‌ها و تغییرات اندازه بارش، به نظر می‌رسد که در میان شاخص‌های منتخب، بین تغییرات بارش با ارتفاع ژئوپتانسیلی، جریان تلاطمی رطوبت و تاوایی نسبی رابطه معناداری وجود دارد که می‌تواند در پیش‌آگاهی رخداد بارش در آینده مورد استفاده قرار بگیرد. به‌منظور اعتبارسنجی اطلاعات به‌دست آمده از رخدادهای مرجع، تعداد دو روز بدون بارش که دست‌کم دو روز قبل و بعد از آن هم، در منطقه بارش وجود نداشته هم مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاصل، مؤید تغییرات قابل ملاحظه شاخص‌های دینامیکی و ترمودینامیکی منتخب در مقایسه با روزهای فاقد بارندگی در منطقه است.

واژگان کلیدی: توفان، دینامیک، ترمودینامیک، کارون، کم‌فشار سودانی.

مقدمه

اقلیم می‌تواند به‌عنوان یک سامانه پویای ترمودینامیکی در نظر گرفته شود که اغلب مانند یک موتور گرمایی انرژی پتانسیل را به انرژی جنبشی تبدیل می‌کند. انتظار می‌رود، سامانه اقلیم از طریق موازنه تبادل‌های ترمودینامیکی با محیط پیرامون، به حالت ماناً نزدیک شود، در حالی که در طبیعت هیچگاه چنین حالتی رخ نمی‌دهد و همواره به‌دلیل نابرابری توزیع انرژی در نقاط مختلف زمین ناهمگن، شارش انرژی از مناطق پرانرژی به مناطق کم‌انرژی وجود دارد. در مواردی، آشوب‌ها و حرکات حدی جو در مناطق تحت تأثیر، منجر به بروز پدیده‌های اقلیمی حدی^۵ می‌شوند.

در همین رابطه، یکی از چالش‌های اقلیمی مهم به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشکی همانند ایران، سیل‌آسا بودن رژیم بارش است. پراکنش و توزیع زمانی رخداد بارش در طول سال، تقریباً فاقد الگوی منظم بوده و در مجموع مقادیر ضریب تغییرات بارش، فراوانی وقوع بارش‌های سیل‌آسا و نسبت بارش بیشینه روزانه به بارش سالانه بالاست. به‌طوری‌که در

4- Steady State

5- Extreme Events

سطح جهان مطالعات متعددی با نگرش‌ها و اهداف مختلف مرتبط با این موضوع انجام شده که اهمیت پژوهشی و کاربردی آن را نشان می‌دهد. مولر و همکاران (۲۰۰۹) با به‌کارگیری شاخص‌های دینامیک و ترمودینامیک جو در دوره ۴۴ ساله (۲۰۰۲-۱۹۵۸) شامل شار نصف‌النهاری رطوبت^۶، شار مداری رطوبت^۷، تاوایی پتانسیلی^۸، ارتفاع ژئوپتانسیلی^۹، سرعت قائم در دستگاه فشاری^{۱۰} و همگرایی رطوبت^{۱۱} به بررسی متغیرهای هواشناسی به‌عنوان شاخص‌های تعیین‌کننده رخداد بارش‌های سنگین در جمهوری چک پرداختند. شاخص شار نصف‌النهاری رطوبت^{۱۲} به‌عنوان یک شاخص مناسب که همزمان گرادیان فشار، شرایط دما و شرایط رطوبت را منعکس می‌نماید، معرفی شد. به‌طوری‌که مقادیر بالا و پائین شار نصف‌النهاری رطوبت به‌ترتیب یک جریان رطوبتی از جنوب و از شمال را نشان می‌دهد. بر پایه نتایج این پژوهش، مقادیر کوچک‌تر شاخص فرینی^{۱۳} بیانگر شرایط حدی‌تر همدید در شاخص‌های منتخب است. به‌طوری‌که مقادیر کمینه شاخص فرینی با اولین روزهای رخداد بارش سنگین در جمهوری چک متناظر است، هر دو مورد سیلاب تابستانه (جولای ۱۹۹۷ و آگوست ۲۰۰۲) با مقادیر بسیار پائین شاخص فرینی نشان داده شده‌اند و از سوی دیگر تمام رخدادهای سیلاب مورد مطالعه، در ۶ درصد پائین مقادیر شاخص فرینی قرار می‌گیرند.

کلابنیتزر و همکاران (۲۰۰۹)، با هدف ارزیابی آماری پیش‌بینی‌های بارش با پارامترهای دینامیک به معرفی شاخص وضعیت پویایی (DSI)^{۱۴} پرداختند. شاخص DSI نظری تغییرات جریان‌های جوی را به‌عنوان مشتقات معادلات بسیط بی‌دررو ایستا^{۱۵} تشریح می‌کند. بر اساس نتایج این پژوهش، در میانگین‌های فصلی DSI همبستگی بالا و آشکاری بین

-
- 6- Meridional flux of moisture
 - 7- Zonal flux of moisture
 - 8- Potential vorticity
 - 9- Geopotential height
 - 10- Vertical velocity in p-system
 - 11- Convergence of moisture
 - 12- Meridional flux of moisture
 - 13- Extremeness
 - 14- Dynamic State Index (DSI)
 - 15- Stationary

پیش‌بینی‌های بارش توسط مدل کاسمو-دیپ 16 وجود دارد. از سوی دیگر، همبستگی بین DSI و بارش مدل‌سازی شده، در مقایسه با بارش مدل‌سازی شده و بارش مشاهده شده به عنوان یک تابع از زمان پیش‌بینی با تفکیک متفاوت هم ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که پس از ۱۲ ساعت همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی شده با شاخص DSI به دو سوم مقدار اولیه می‌رسد. کاسپر^{۱۷} و همکاران (۲۰۰۹)، با استفاده از شاخص‌های دینامیک و ترمودینامیک همچون فرارفت تاوایی مطلق^{۱۸}، همگرایی رطوبت^{۱۹}، سرعت افقی باد^{۲۰}، شار نصف النهاری گرما^{۲۱}، شیو نصف النهاری دما^{۲۲}، فرارفت حرارتی^{۲۳}، سرعت قائم باد در سامانه فشاری^{۲۴}. چرخندزایی ۱۸ تا ۲۱ ژوئیه ۲۰۰۱ را با فرض ارتباط بارش‌های سنگین ناشی از سامانه‌های همدید منطقه مدیترانه با ناهنجاری‌های همدید-دینامیک مورد مطالعه قرار دادند. مطالعه با استفاده از داده‌های بازسازی شده ECMWF^{۲۵} ناهنجاری‌های همدید-دینامیک از طریق تابع توزیع تجمعی در ماه‌های ژوئیه-اوت در دوره آماری ۱۹۵۸-۲۰۰۲ مورد بررسی قرار گرفت. در طول چرخندزایی، ناهنجاری‌های چشمگیری که با فرآیندهای مکمل جفت^{۲۶} شدن قائم بین منطقه جبهه پائینی و چرخندگی بیشینه بالائی توأم هستند، شناخته شده‌اند. چرخندزایی در منطقه مورد مطالعه، بر اساس طبقه‌بندی پیترسون^{۲۷} از نوع B تشخیص داده شد و در تمام طول چرخندزایی مشاهده گردید که ناهنجاری‌ها با فرآیندهایی همراه بودند که مکمل جفت شدن قائم بین منطقه جبهه‌ای پائینی و تاوایی بیشینه بالائی هستند که عموماً شامل ناهنجاری بالائی در فرارفت تاوایی چرخندی در منطقه جبهه‌ای، ناهنجاری عمیق قائم در فرارفت سرد در منطقه جبهه‌ای، ناهنجاری در شیو

16- COSMO-DE

17- Kaspar

18- Advection of absolute vorticity

19- Moisture convergence

20- Horizontal wind speed

21- Meridional heat flux

22- Meridional temperature gradient

23- Thermal advection

24- Vertical wind speed in p-system

25- European Center for Medium-Range Weather Forecast

26- Couple

27- Petterssen

نصف‌النهاری دما در منطقه جبهه‌ای و ناهنجاری بالائی در سرعت افقی باد در پیشانی ناوه بالائی هستند.

در ایران نیز مطالعات مرتبط با بارش‌های سنگین انجام گرفته است که از جمله آن‌ها، لشکری (۱۳۷۵: ۸) به بررسی الگوی همیدی بارش‌های شدید جنوب غرب ایران، (۱۳۸۲) به مطالعه مکانیسم تکوین و توسعه مرکز کم فشار سودان و نقش آن بر روی بارش‌های جنوب و جنوب غرب و (۱۳۹۰) به بررسی همیدی بارش‌های سنگین در جنوب غرب ایران پرداخته است. امیدوار (۱۳۸۳)، به بررسی و تحلیل همدید و ترمودینامیکی رخداد بارش در شیرکوه یزد هدف شناخت مدل‌ها، الگوهای همدید و شرایط ترمودینامیکی بارش‌های منطقه به منظور اجرای طرح‌های افزایش بارش در ارتفاعات شیرکوه پرداخت. مفیدی و زرین (۱۳۸۴) به بررسی همدید تاثیر سامانه‌های کم‌فشار سودانی در وقوع بارش‌های سیل‌زا در ایران به دلیل همزمانی رخداد ۱۸ مورد توفان با تداوم ۲ تا ۵ روزه در ایران با منشأ سودانی، پرداختند. محمدی و تقوی (۱۳۸۶) به بررسی رفتار و پیش‌بینی دوره بازگشت رویدادهای اقلیمی حدی مانند خشکسالی و سیل و تجزیه و تحلیل شاخص‌های حدی در بسته نرم‌افزاری به نام شاخص‌های اقلیمی حدی ECIS پرداختند. محمدی و مسعودیان (۱۳۸۶) به مطالعه ارتباط تیپ‌های همدید هوای ایستگاه سنندج با الگوهای گردشی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال پرداختند. مشکواتی و همکاران (۱۳۸۸: ۴۵) به تعیین ساختار الگوهای جوی و سامانه‌های آب و هوایی موثر بر شرایط آب و هوایی غرب ایران و بررسی مبانی همیدی، دینامیکی و ترمودینامیکی پرداختند و از آنجا که فرآیند چرخندزائی با همگرایی در ترازهای زیرین و نیز فرارفت تاوایی مثبت در ترازهای میانی همراه است، فرارفت تاوایی تراز میانی، فرارفت گرمایی و سرعت قائم در بحث گسترش یافته، توسعه و زوال سامانه‌های جوی عرض‌های میانی، از جمله مهم‌ترین عوامل معرفی شده‌اند. با مروری کوتاه و توجه به مطالعات انجام شده در رابطه با بارش‌های سیلابی در سطح بین‌المللی و داخلی، با توجه به خلع نسبی موجود و اهمیت شناسایی الگوهای جریان‌ها و تلاطم‌های جوی در زمان رخداد بارش‌های سیلابی در منطقه جنوب غرب ایران، در این پژوهش شاخص‌های دینامیک و ترمودینامیک مؤثر در بارش‌های سیلابی منطقه مورد مطالعه قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

به منظور محاسبه و بررسی تغییرات مقادیر شاخص‌های دینامیک و ترمودینامیک از داده‌های دوباره پردازش شده JRA25^{۲۸} استفاده شد. داده‌ها برای چهار ساعت متوالی ۰۶، ۰۰، ۰۶ و ۱۲ و ۱۸ و برای ۲۳ تراز ارتفاعی (ترازهای ۱۰۰۰ تا ۰،۴ هکتوپاسکال) با قدرت تفکیک ۱/۲۵ موجود بوده با توجه به درجات طول و عرض جغرافیایی جهان و تعداد سطوح ارتفاعی، داده‌ها به صورت شبکه‌ای به ابعاد ۲۳×۱۴۵×۲۸۸ نقطه‌ای موجود است. با توجه به مطالعات انجام شده شبکه‌ای به مختصات ۱۰-۶۰ درجه شمالی و ۱۰-۶۰ درجه شرقی که در برگیرنده تمامی سامانه‌های جوی موثر بر روی منطقه مورد مطالعه است، در این پژوهش انتخاب گردیده و سطوح ارتفاعی هم به ۸ تراز ۱۰۰۰ تا ۳۰۰ هکتوپاسکال (مرز تروپوپاуз) محدود شده و در نهایت شبکه‌ای به ابعاد ۴۰×۴۰×۸ از داخل شبکه اولیه استخراج گردید.

هر شبکه شامل داده‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی، دمای هوا، نم‌ویژه، مولفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد، افت دمای شبنم ۲۹ و ... است. همانطور که از جدول (۱) مشخص است، از ژانویه ۱۹۷۹ تا حال حاضر دسترسی به داده‌ها امکان‌پذیر است.

جدول (۱) مشخصات داده‌های دوباره پردازش شده مورد استفاده در این پژوهش (JRA25)

نام	سازمان	دوره زمانی	وضوح تصویری	تحلیل اطلاعات
JRA-25	سازمان هواشناسی ژاپن و مؤسسه پژوهش‌های مرکزی صنعت نیروی برق ژاپن	۱۹۷۹-۲۰۱۲	۱/۲۵ درجه	متغیر سه بعدی

به منظور بررسی روزهای توفانی در حوضه آبریز کارون بزرگ شامل رودخانه‌های دز و کارون، از داده‌های بارش حداکثر روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک استان‌های خوزستان، چهارمحال و بختیاری، ایلام، لرستان و یاسوج در روزهای ارائه شده در جدول شماره ۲، استفاده شده است.

28- Japanese 25-years Re-Analysis

29- Dew point depression

جدول (۲) بیشینه بارندگی روزانه ثبت شده در رخداد‌های مرجع بر حسب میلی‌متر در ایستگاه‌های همدید جنوب غرب ایران

ایستگاه سینوپتیک	حداکثر بارش روزانه ثبت شده در منطقه (mm)	تداوم روزهای توفانی در منطقه
کوهرنگ	۱۰۲	۱۶ تا ۱۹ دسامبر ۱۹۸۵
ایلام	۳۸	۲۳ تا ۲۷ مارس ۲۰۰۰
کوهرنگ	۱۷۷	۹ تا ۱۴ مارس ۲۰۰۵
ایلام	۱۶۲	۱ تا ۴ فوریه ۲۰۰۶
کوهرنگ	۳۹	۶ تا ۱۲ آوریل ۲۰۰۸

از آنجا که نوشتن خروجی و خواندن ورودی به صورت فایل دودویی^{۳۰} به‌ویژه در مواقعی که زمان و حجم داده‌ها و نتایج زیاد است، یکی از ضرورت‌های برنامه نویسی محسوب می‌شود، بنابراین در نخستین گام در محیط سیستم عامل لینوکس^{۳۱}، فرمت داده‌های دوباره پردازش شده، از Grib به bin تغییر داده شد. سپس در محیط برنامه نویسی فورترن^{۳۲} به تعریف مولفه‌های دینامیکی تاوایی، تاوایی پتانسیل، همگرایی و واگرایی، سرعت قائم در سیستم ارتفاعی و مولفه‌های ترمودینامیکی نمونه، همگرایی نمونه، دمای پتانسیل، دمای پتانسیل معادل و دمای پتانسیل تر، پرداخته شد و فواصل افقی و قائم هر نقطه شبکه با توجه به قدرت تفکیک مکانی داده‌های مورد استفاده، تعریف شدند. برای بررسی تغییرات زمانی داده‌ها به صورت گرافیکی از نرم‌افزار GrADS در سیستم عامل لینوکس و برای بررسی تغییرات زمانی داده‌ها به صورت آماری، خروجی داده‌ها به صورت پرونده‌های متنی نوشته شد که قابل استفاده در نرم‌افزارهای آماری همچون Spss و Office در محیط ویندوز است. سپس به بررسی نتایج به‌دست آمده به دو صورت گرافیکی و آماری پرداخته شد. به منظور اعتبار سنجی نتایج به‌دست آمده، اندازه شاخص‌های منتخب در روزهای توفانی با روزهای بدون بارش و با جو پایدار که حداقل دو روز قبل و بعد از آن روز هم بارندگی در منطقه ثبت نشده بود، مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

30- Binary file

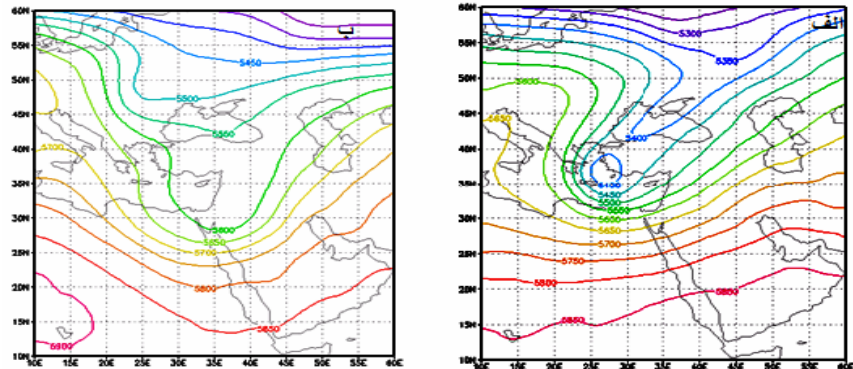
31- Linux

32- FORTRAN 77

یافته‌ها و بحث

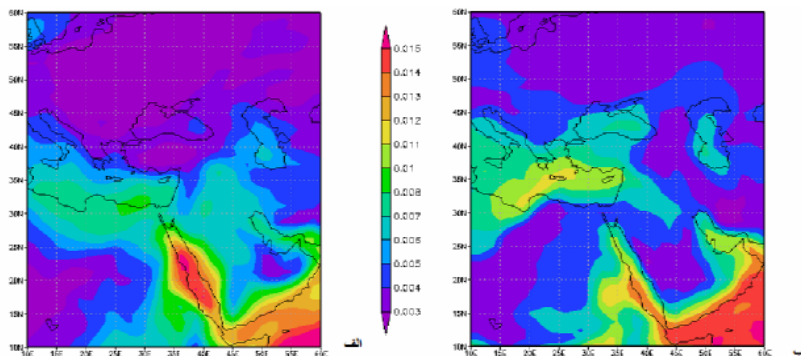
یکی از کم فشارهای حرارتی که در ماه‌های سرد سال روی اتیوپی و سودان شکل می‌گیرد، کم‌فشار سودانی است. در فصل زمستان همزمان با عمیق شدن ناوه تشکیل شده بر روی دریای مدیترانه، و حرکت ناوه به سوی مناطق با فشار کمتر، ناوه کم‌فشار روی سودان در امتداد دریای سرخ، به سمت شمال گسترش می‌یابد و این ناوه فشاری عموماً از این پس ناوه فشاری دریای سرخ خوانده می‌شود (مشکواتی، ۱۳۸۸). تقویت بیشتر ناوه ارتفاع و حرکت شرق سوی آن بسته به اینکه ناوه سطح میانی جو تا چه عرض جغرافیائی گسترش داشته است، مناطق غرب، جنوب‌غرب و جنوب ایران را تحت پوشش قرار می‌دهند و سهم عمده‌ای در بارش‌های این مناطق دارد.

از بررسی نقشه‌های ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال توفان‌های منتخب، مشخص گردید که در روزهای پیش از رخداد بارش در منطقه مورد مطالعه، یک ناوه عمیق در قسمت‌های شرقی دریای مدیترانه شکل گرفته و در اکثر موارد محور آن از شمال‌غرب آفریقا می‌گذرد. در ساعات بعد این ناوه همزمان به سمت شرق و عرض‌های پایین‌تر جابجا شده و هنگام شروع بارش، محور آن بر روی دریای سرخ قرار گرفته و در ساعات بعدی لحظه به لحظه به غرب و جنوب‌غرب ایران نزدیک‌تر شده و پس از رخداد بارش‌های سنگین فراگیر در غرب و به‌ویژه جنوب‌غرب ایران و تخلیه محتوای رطوبتی، به سمت شرق جابجا شده و به تدریج از شرق و جنوب شرق ایران خارج شده است. نقشه‌های ۱ الف و ب، موقعیت این ناوه را بر روی دریای سرخ در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد.



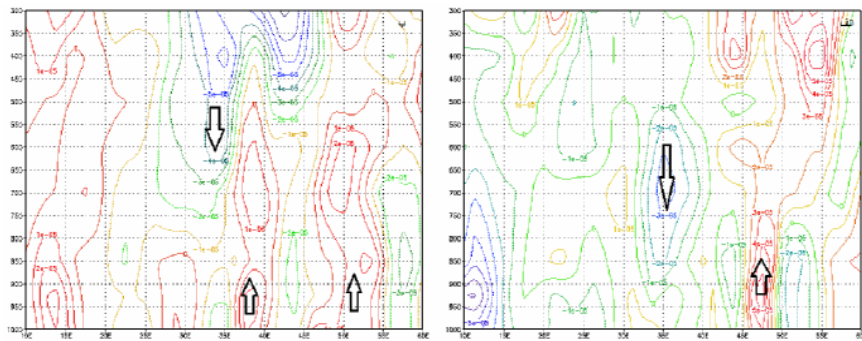
شکل (۱) (الف) نقشه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ساعت ۱۸ UTC روز ۲۲ مارس ۲۰۰۰ (ب) نقشه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ساعت ۰۰ UTC روز ۱۱ آوریل ۲۰۰۷

به منظور بررسی منابع رطوبتی تأمین‌کننده محتوای رطوبتی توفان‌ها، به بررسی نقشه‌های سطح زمین و سطوح ۱۰۰۰، ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال نم‌ویژه پیش از رخداد بارش و هنگام رخداد بارش پرداخته شد. در بررسی نقشه‌ها مشخص گردید که در تمام موارد مورد مطالعه، بیشینه نم‌ویژه به ترتیب بر روی دریای سرخ، سودان، خلیج عدن و دریای عرب مستقر بوده است. بر این مبنا می‌توان نتیجه گرفت که دریای سرخ عامل اصلی تأمین‌کننده رطوبت بارش‌های سیل آسای جنوب غرب ایران در توفان‌های مورد مطالعه بوده است (شکل ۲، الف و ب):



شکل (۲) مقادیر نم‌ویژه تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (الف) ساعت ۰۰ UTC روز ۴ فوریه ۱۹۹۵ (ب) ساعت ۰۶ UTC روز ۵ دسامبر ۲۰۰۷

از آنجا که همگرایی در پایین و حرکات بالاسوی هوای مرطوب با تشکیل ابر و رخداد بارش همراه است و واگرایی در بالا و حرکات پائین سوی هوا موجب زوال ابر و پایداری هوا می‌گردد، بنابراین تشخیص حرکت‌های بالاسو و پایین‌سو و شدت آن‌ها در مطالعه توسعه، گسترش و زوال سامانه‌های مختلف جوی در مناطق جغرافیایی مختلف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در بررسی نیمرخ قائم (از تراز ۱۰۰۰ تا ۳۰۰ هکتوپاسکالی) نقشه‌های همگرایی و واگرایی در عرض‌های ۳۰ و ۳۲ درجه شمالی در شکل ۳، مشاهده گردید که در روزهای پیش از رخداد بارش در جنوب‌غرب ایران، در طول‌های جغرافیایی ۲۰ تا ۳۰ درجه شرقی همگرایی شدیدی ($6 \times 10^{-5} S^{-1}$) وجود دارد که با گذر زمان و حرکت ناوه به شرق، این همگرایی جریان هوا که عموماً تا ارتفاعات بالایی جو هم ادامه دارد، به سمت شرق جابجا شده و در منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌گردد. متقابلاً در غرب منطقه مورد مطالعه، واگرایی شدیدی ($-5 \times 10^{-5} S^{-1}$) مشاهده می‌شود که سبب فشرده‌تر شدن و همگرایی بیشتر هوا در منطقه هنگام رخداد بارش در بیشتر ایستگاه‌های سینوپتیک غرب و جنوب‌غرب ایران شده است. جهت فلش‌ها حرکت‌های بالاسو و پایین‌سو را در پروفیلی قائم از منطقه نمایش می‌دهد.



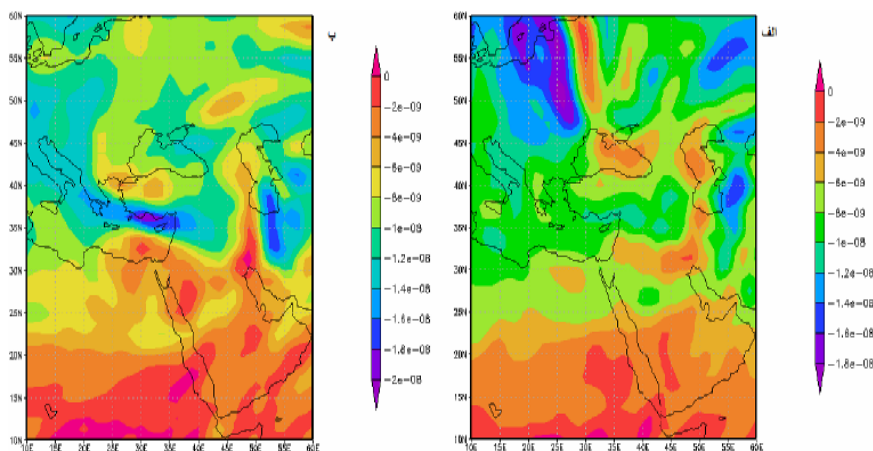
شکل (۳) همگرایی و واگرایی در عرض جغرافیایی ۳۲ درجه شمالی

(ب) ساعت ۱۸ UTC روز ۱۱ ژانویه ۲۰۰۸

(الف) ساعت ۰۶ UTC روز ۹ آوریل ۲۰۰۷

در بررسی نقشه‌های تاوایی پتانسیلی مشاهده گردید که در منطقه مورد مطالعه با نزدیک شدن محور ناوه مقدار تاوایی نسبی شروع به افزایش کرده و روز رخداد بارش به بیشینه مقدار خود رسیده و پس از رخداد بارش سیر نزولی را پیموده و کاهش یافته است و پس از

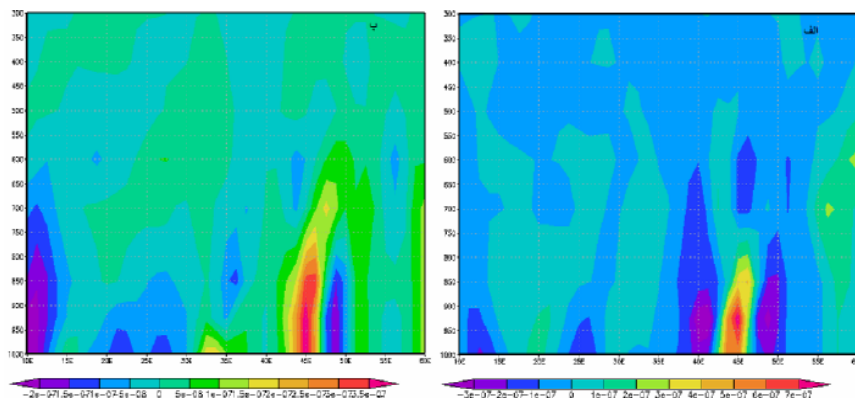
عبور محور ناوه از منطقه و ایجاد شرایط پایداری به کمترین مقدار تنزل کرده است. همانطور که از شکل ۴ آشکار است، در هنگام رخداد بارش، مقدار تاوایی پتانسیلی در مرکز منطقه مورد مطالعه به بالاترین مقدار خود ($4,5 \times 10^{-5}$) رسیده است.



شکل (۴) تاوایی پتانسیلی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

(الف) ساعت ۶ UTC روز ۲۵ مارس ۲۰۰۰ (ب) ساعت ۱۸ UTC روز ۲۹ مارس ۱۹۹۸

هسته اولیه این سامانه بارانزا بر روی دریای مدیترانه شکل گرفته و با جابجایی به شرق و عرض‌های پایین‌تر از روی دریای سرخ عبور کرده و از این منبع رطوبتی تغذیه نموده و به جنوب‌غرب ایران رسیده است. به منظور بررسی تأثیر متقابل اثر محتوای رطوبتی این سامانه و جریان‌های باد، اقدام به محاسبه شاخص ترکیبی همگرایی جریان رطوبتی گردید که برابند دو شاخص اندازه همگرایی و اندازه نم‌ویژه است. همانطور که از شکل ۵ مشخص است، در منطقه مورد مطالعه افزایش مقدار نم‌ویژه و جریان‌های همگرا به صورت منسجم حدوداً تا تراز ۸۰۰ هکتوپاسکالی جو عمل نموده و دو عامل اساسی رخداد بارش یعنی رطوبت و عامل صعود را فراهم نموده و باعث رخداد بارش‌های فراگیر در جنوب‌غرب ایران شده‌اند. از اشکال زیر همگرایی و واگرایی جریان رطوبت را در طول‌های جغرافیایی مجاور هم به خوبی قابل مشاهده است.



شکل (۵) مقطع قائم همگرایی جریان رطوبت در عرض جغرافیایی ۳۲ درجه شمالی

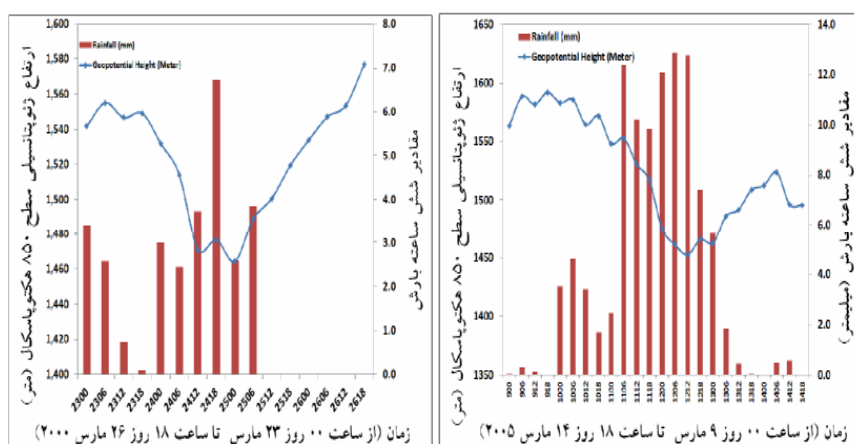
(ب) ساعت ۱۲ UTC روز ۸ آوریل ۲۰۰۷

(الف) ساعت ۰۰ UTC روز ۵ فوریه ۱۹۹۵

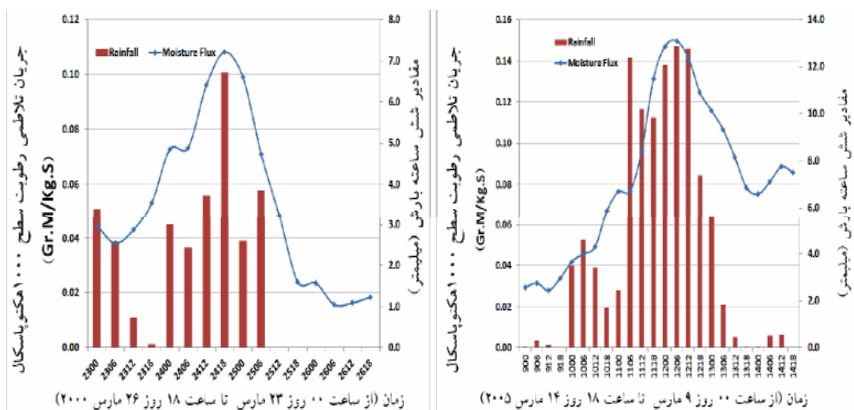
به منظور بررسی تغییرات زمانی مؤلفه‌های دینامیک و ترمودینامیک در بازه زمانی دو روز پیش از شروع رخداد بارش تا خاتمه بارش در منطقه مورد مطالعه، به بررسی روند تغییرات بارش و اندازه شاخص‌های منتخب دینامیکی و ترمودینامیکی پرداخته شده است. بدین منظور مقادیر میانگین شاخص‌های منتخب در منطقه مورد مطالعه (۳۰ تا ۳۵ درجه عرض شمالی و ۴۵ تا ۵۰ درجه طول شرقی) محاسبه و با مقادیر میانگین بارش‌های شش ساعته ثبت شده در ایستگاه‌های باران‌سنج ثبات سازمان هواشناسی کشور در منطقه (اهواز، الیگودرز، بستان، دهلران، دزفول، ایلام، ایذه، خرم‌آباد، کوهرنگ، کوه‌دشت، مسجد سلیمان، پل دختر، صوفی‌آباد، شهرکرد و شوشتر) مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است.

در بررسی روند تغییرات زمانی شاخص‌ها مشخص گردید که پیش از شروع بارندگی ارتفاع ژئوپتانسیلی به‌طور محسوسی رو به کاهش می‌گذارد و در هنگام رخداد بیشینه بارش به کمترین مقدار خود رسیده و با نزدیک شدن به زمان خاتمه بارندگی، مجدداً ارتفاع ژئوپتانسیلی افزایش می‌یابد و به حالت عادی باز می‌گردد. در حالی‌که همانطور که انتظار می‌رود شاخص‌های جریان تلاطمی رطوبت (برآیند مقدار نم ویژه و بزرگی اندازه باد)، تاوایی پتانسیلی و نم‌ویژه روند مشابهی با روند تغییرات مقدار بارندگی در منطقه مورد مطالعه دارند و از ۲ روز پیش از شروع بارش، شروع به افزایش نموده و بالاترین مقدار این شاخص‌ها

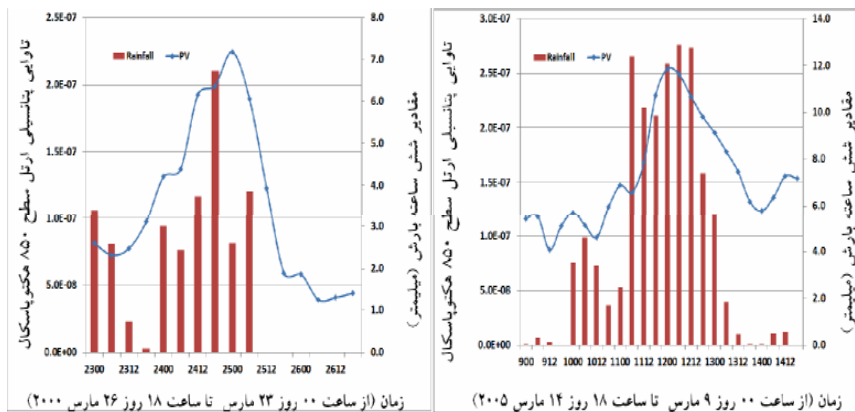
همزمان با بیشینه بارش بوده و با کاهش و نهایتاً خاتمه بارندگی رو به کاهش می‌گذارند. اشکال ۶ تا ۸ روند تغییرات مذکور را در دو مورد بارش سیل‌آسا (مارس ۲۰۰۰ و ۲۰۰۵) ارائه می‌نماید.



شکل (۶) تغییرات مقادیر ارتفاع ژئوپتانسیلی و بارش در جنوب غرب ایران



شکل (۷) تغییرات مقادیر جریان تلاطمی رطوبت و بارش در جنوب غرب ایران



شکل (۸) تغییرات مقادیر تاوایی پتانسیلی و بارش در جنوب غرب ایران

به‌منظور اعتبارسنجی شاخص‌های محاسبه شده در پنج توفان مورد مطالعه، به مقایسه مقادیر این شاخص‌ها با دو روز با وضعیت جوی پایدار و بدون بارندگی پرداخته شد. بدین منظور با استفاده از اطلاعات ایستگاه‌های باران‌سنج ثابت و همچنین بررسی مقادیر سرعت باد ثبت شده در منطقه، دو روز بدون بارش که حداقل دو روز قبل از آن هم در منطقه بارش ثبت نشده است، انتخاب و مورد بررسی قرار گرفت (۲ دسامبر ۱۹۹۶ و ۴ آوریل ۲۰۰۰). سپس مقادیر بیشینه، متوسط و کمینه شاخص‌های منتخب در روزهای توفانی مورد مطالعه و روزهای بدون بارندگی مورد مقایسه قرار گرفت. همانطور که از جدول شماره ۳، مشخص است؛ تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین روزهای توفانی و روزهای با جو آرام، از نظر اندازه شاخص‌های دینامیکی و ترمودینامیکی منتخب وجود دارد.

برای مثال می‌توان به کاهش محسوس ارتفاع ژئوپتانسیلی در روزهای توفانی اشاره نمود به‌طوری‌که اختلاف کمینه ارتفاع ژئوپتانسیلی در روزهای توفانی و روزهای بدون بارش، در سطوح ۱۰۰۰ تا ۳۰۰ هکتوپاسکالی، به‌ترتیب بین ۵۰ تا ۳۵۰ متر می‌رسد.

جدول (۳) مقایسه شاخص‌های منتخب در روزهای توفانی و روزهای بدون بارندگی

روزهای بدون بارش					روزهای توفانی					پارامتر	سطح (هکتوپاسکال)
ارتفاع ژئوپتانسیل	تاوایی پتانسیل	نم‌ویژه	همگرایی جریان رطوبت	همگرایی	ارتفاع ژئوپتانسیل	تاوایی پتانسیل	نم‌ویژه	همگرایی جریان رطوبت	همگرایی		
۱۷۴	3×10^{-7}	۰.۰۱۳	2×10^{-7}	2×10^{-5}	۲۴۶	9×10^{-6}	۰.۰۱۸	7×10^{-7}	5×10^{-5}	بیشینه	۱۰۰۰
۱۴۲	2×10^{-7}	۰.۰۰۹	-5×10^{-8}	-6×10^{-6}	۱۳۵	6×10^{-7}	۰.۰۱۳	-6×10^{-8}	-5×10^{-6}	میانگین	
۹۰	1×10^{-7}	۰.۰۰۶	-3×10^{-7}	-3×10^{-6}	۴۰	7×10^{-8}	۰.۰۰۷	-1×10^{-6}	-9×10^{-5}	کمینه	
۱۵۴۹	3×10^{-8}	۰.۰۱۰	2×10^{-7}	4×10^{-5}	۱۵۹۲	5×10^{-7}	۰.۰۱۳	5×10^{-7}	5×10^{-5}	بیشینه	۸۵۰
۱۵۰۲	2×10^{-8}	۰.۰۰۶	6×10^{-9}	-2×10^{-7}	۱۵۱۹	6×10^{-8}	۰.۰۰۹	-2×10^{-8}	-4×10^{-6}	میانگین	
۱۴۶۱	2×10^{-8}	۰.۰۰۱	-2×10^{-7}	-3×10^{-5}	۱۴۲۹	3×10^{-9}	۰.۰۰۱	-8×10^{-7}	-8×10^{-5}	کمینه	
۵۸۶۸	1×10^{-8}	۰.۰۰۴	3×10^{-7}	5×10^{-5}	۵۸۹۶	2×10^{-7}	۰.۰۰۴	5×10^{-7}	7×10^{-5}	بیشینه	۵۰۰
۵۷۵۲	8×10^{-9}	۰.۰۰۱	6×10^{-9}	-7×10^{-6}	۵۸۲۱	4×10^{-8}	۰.۰۰۲	2×10^{-8}	3×10^{-6}	میانگین	
۵۶۳۱	4×10^{-9}	۰.۰۰۰	-8×10^{-8}	-4×10^{-5}	۵۶۱۲	2×10^{-9}	۰.۰۰۰	-3×10^{-7}	-6×10^{-5}	کمینه	
۹۶۶۴	1×10^{-8}	۰.۰۰۰	3×10^{-8}	4×10^{-5}	۹۶۸۷	3×10^{-7}	۰.۰۰۱	-8×10^{-8}	1×10^{-4}	بیشینه	۳۰۰
۹۴۷۴	7×10^{-9}	۰.۰۰۰	-4×10^{-9}	-2×10^{-5}	۸۳۳۲	4×10^{-8}	۰.۰۰۱	1×10^{-8}	7×10^{-6}	میانگین	
۹۲۵۵	1×10^{-9}	۰.۰۰۰	-3×10^{-8}	-7×10^{-5}	۵۷۴۶	2×10^{-10}	۰.۰۰۰	-3×10^{-7}	-1×10^{-4}	کمینه	

نتیجه‌گیری

در بررسی توفان‌های منتخب، مشاهده گردید که پس از شکل‌گیری ناوه بر روی دریای مدیترانه، این ناوه در جهت شیب‌گردان و به سوی دریای سرخ و سودان حرکت نموده و پس از استقرار محور ناوه بر روی دریای سرخ، رطوبت لازم برای توفان‌های مورد مطالعه تأمین شده و جنوب‌غرب ایران که در شاخه فرازش ناوه قرار گرفته است، بارش‌های فراگیر قابل ملاحظه‌ای دریافت نموده است.

پس از بررسی تغییرات مقادیر و روند تغییرات شاخص‌های دینامیک و ترمودینامیک منتخب در رخداد‌های مرجع، مشاهده گردید که منبع اصلی تأمین‌کننده رطوبت رخداد‌های مورد مطالعه دریای سرخ بوده و با حرکت شرق سوی این سامانه دینامیکی سودانی، و با دور شدن از منبع رطوبتی، مقادیر بارش کاهش می‌یابد. مشاهده گردید که در تکوین، توسعه و زوال این سامانه و در فرآیند بارش، تغییرات محسوس در اندازه شاخص‌هایی همچون ارتفاع

ژئوپتانسیلی، رطوبت ویژه، جریان تلاطمی رطوبت، فرارفت تاوایی، تاوایی پتانسیلی و همگرایی جریان رطوبت رخ می‌دهد.

همانطور که پیش‌تر نیز اشاره شد، مولر و همکاران (۲۰۰۹) شاخص‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی، تاوایی پتانسیلی، شار جریان رطوبت، همگرایی رطوبت و سرعت قائم را به عنوان متغیرهای هواشناسی مناسب به‌منظور پیش‌بینی رخداد بارش‌های سنگین در جمهوری چک پیشنهاد کردند که بر اساس نتایج پژوهش حاضر نیز مشاهده گردید که در همه توفان‌های مورد مطالعه، مقدار متوسط نم‌ویژه سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکالی هیچگاه کمتر از ۱۱ (گرم بر کیلوگرم) نبوده است و میانگین ارتفاع ژئوپتانسیلی سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال در مقایسه با روزهای بدون بارش، دست‌کم ۴۰ متر افت داشته است. همچنین با بررسی جریان تلاطمی رطوبت که به‌طور همزمان مقدار رطوبت در دسترس و بزرگی اندازه باد را منعکس می‌کند، مشاهده گردید که بزرگی این شاخص در هنگام توفان‌های مورد مطالعه به ۲ تا ۳ برابر حالت پایداری جوی (بدون بارش) رسیده و از این‌رو شاخص مناسبی برای پیش‌بینی و پیش‌یابی رخداد بارش‌های سیل‌آسا در منطقه، محسوب می‌گردد. از سوی دیگر بررسی تغییرات فرارفت تاوایی نسبی در منطقه در ارتباط با تکوین، توسعه و زوال سامانه‌های مورد مطالعه، و انطباق زمانی تغییرات این شاخص با روند تغییرات شدت بارش نیز استفاده از این شاخص را در مطالعات پیش‌آگاهی رخداد بارش‌های سیل‌آسا ضروری می‌سازد.

منابع

- ۱- احمدی گیوی، فرهنگ؛ محب‌الحجه، علیرضا؛ قرایلو، مریم (۱۳۸۵)، «مطالعه دینامیک سامانه‌های چرخندی روی ایران از دیدگاه تاوایی پتانسیلی - مطالعه موردی آذر ۸۲»، *مجله فیزیک زمین و فضا*، جلد ۳۲، شماره ۱، صص ۱-۱۳.
- ۲- اردکانی حسین؛ زمانیان محمدتقی، هاشمی؛ دوین، مهری (۱۳۸۷)، «مطالعه هم‌مدیدی و دینامیکی بیشترین بارش بر روی منطقه خراسان»، *مجله فیزیک زمین و فضا*، دوره ۳۴، شماره ۲، صص ۱۰۷-۱۲۳.
- ۳- امیدوار، کمال (۱۳۸۹)، «*اقلیم‌شناسی دینامیک*»، انتشارات دانشگاه یزد، چاپ اول.
- ۴- امیدوار، کمال (۱۳۸۶)، «بررسی و تحلیل شرایط سینوپتیکی و ترمودینامیکی رخداد بارش در منطقه شیرکوه»، *مجله پژوهش‌های جغرافیایی*، شماره ۵۹، بهار ۱۳۸۶، صص ۸۱-۹۸.
- ۵- پرندخوازانی، اکرم؛ لشکری، حسن (۱۳۹۰)، «بررسی سینوپتیکی بارش‌های سنگین در جنوب ایران (مطالعه موردی بارش ۳۱ دسامبر ۱۹۸۴ لغایت ۴ ژانویه ۱۹۸۵ حوضه آبریز رودخانه دالکی)»، *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، سال ۲۲، شماره پیاپی ۴۱، شماره ۱، بهار ۱۳۹۰، صص ۱۲۳-۱۳۷.
- ۶- تقوی، فرحناز؛ محمدی، حسین (۱۳۸۶)، «بررسی دوره بازگشت رویدادهای اقلیمی حدی به منظور شناخت پیامدهای زیست محیطی»، *محیط‌شناسی*، پاییز ۱۳۸۶، دوره ۳۳، شماره ۴۳، صص ۱۱-۲۰.
- ۷- جوانمرد، سهیلا (۱۳۸۶)، «*تحلیل دینامیکی و سینوپتیکی تغییر اقلیم*»، طرح تحقیقاتی پژوهشگاه هواشناسی.
- ۸- سازمان هواشناسی کشور (۱۳۸۴)، «*طرح پیش‌بینی بارش‌های سیل‌آسا در تهران*».
- ۹- عزیزی قاسم؛ اکبری ازیرانی، طیبه؛ داودی، محمود و اکبری، مهری (۱۳۸۸)، «تحلیل هم‌مدیدی سرمای شدید دی ماه ۱۳۸۶»، *فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، شماره ۷۰، زمستان ۸۸، صص ۱-۲۰.

- ۱۰- علیجانی، بهلول، «شناسایی تیپ‌های هوایی باران‌آور تهران براساس محاسبه چرخندگی»، (۱۳۸۱)، *مجله تحقیقات جغرافیایی*، شماره ۳۶ و ۶۴، زمستان ۱۳۸۰، صص ۱۱۴-۱۳۲.
- ۱۱- فتاحی، ابراهیم (۱۳۸۳)، «طبقه‌بندی همدیدی فضائی توده‌های هوا با تأکید بر دوره‌های خشک در حوضه‌های جنوب‌غربی ایران»، رساله دکتری جغرافیای طبیعی، دانشگاه تربیت معلم.
- ۱۲- فتاحی، ابراهیم، حجازی‌زاده، زهرا (۱۳۸۵)، «تحلیل زمانی، مکانی توده‌های هوا و کاربرد آن در پایش دوره‌های خشک و مرطوب در حوضه‌های جنوب‌غربی ایران»، *فصلنامه تحقیقات جغرافیایی*، شماره ۸۱، تابستان ۸۵، صص ۹۹-۱۱۹.
- ۱۳- قسامی، طاهره؛ بیدختی، علی‌اکبر؛ صداقت کردار؛ عبدالله، صحرائیان، فاطمه (۱۳۸۹)، «بررسی تغییرات قائم دمای پتانسیل در چند دوره بحرانی آلودگی هوای تهران»، *مجله علوم و تکنولوژی محیط زیست*، دوره یازدهم، شماره سه، پاییز ۸۹، صص ۱۳-۲۳.
- ۱۴- لشکری، حسن (۱۳۷۵)، «الگوی سینوپتیکی بارش‌های شدید در جنوب‌غرب ایران»، رساله دکتری جغرافیای طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس.
- ۱۵- لشکری، حسن (۱۳۸۲)، «مکانیسم تکوین و توسعه مرکز کم‌فشار سودان و نقش آن بر روی بارش‌های جنوب و جنوب غرب ایران»، *فصلنامه پژوهش‌های جغرافیایی*، ۴۶، صص ۱-۱۸.
- ۱۶- محمدی، بختیار؛ مسعودیان، سیدابوالفضل (۱۳۸۶)، «ارتباط تیپ‌های همدید هوای ایستگاه سندرچ با الگوهای گردشی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال»، *مجله جغرافیا و توسعه*، سال پنجم، شماره پیاپی ۹، بهار و تابستان ۱۳۸۶، صص ۳۹-۵۶.
- ۱۷- محمدی، حسین؛ تقوی، فرحناز (۱۳۸۶)، «روند شاخص‌های حدی دما و بارش در تهران»، *مجله پژوهش‌های جغرافیایی*، دوره ۳۷، شماره ۱، صص ۱۵۱-۱۷۲.
- ۱۸- مرادی، محمد (۱۳۸۸)، «هواشناسی دینامیکی پیشرفته»، انتشارات رجاء تهران، ۲۵۶ صفحه.
- ۱۹- مشکواتی، امیرحسین؛ مرادی، محمد؛ مبارک حسن، الهام؛ غفاریان، پروین (۱۳۸۸)، «تعیین ساختار الگوهای جوی و سامانه‌های آب و هوایی موثر بر شرایط آب و هوایی غرب ایران»، *پژوهشکده هواشناسی، سازمان هواشناسی کشور*.

- ۲۰- مشکواتی، امیرحسین؛ مرادی، محمد (۱۳۸۳)، «بررسی ناوه فشاری دریای سرخ از دیدگاه دینامیکی، *مجله نیوار*، شماره‌های ۵۲ و ۵۳، صص ۷۴-۵۳.
- ۲۱- مفیدی، عباس (۱۳۸۳)، «اقلیم‌شناسی سینوپتیکی بارش‌های سیل‌زا با منشأ منطقه دریای سرخ در خاورمیانه»، *فصلنامه تحقیقات جغرافیایی*، سال نوزدهم، شماره ۴ (پیاپی ۷۵)، زمستان ۱۳۸۳، صص ۷۱-۹۳.
- ۲۲- مفیدی، عباس؛ زرین، آذر (۱۳۸۴)، «بررسی سینوپتیکی تأثیر سامانه‌های کم‌فشار سودانی در وقوع بارش‌های سیل‌زا در ایران»، *فصلنامه تحقیقات جغرافیایی*، تابستان ۱۳۸۴، شماره ۷۷، صص ۱۱۳-۱۳۶.
- ۲۳- نصیری، بهروز (۱۳۷۸)، «تحلیل الگوی سینوپتیکی و دینامیکی بارش‌ها در حوضه‌های کرخه و دز»، رساله دکتری جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تربیت مدرس.
- 24- Claußnitzer, A, et al, (2009), "Analysis of Quantitative Precipitation Forecasts Using Dynamic State Index", *Atmospheric Research* 94 (2009), 694-703.
- 25- Claußnitzer, A, et al, (2008), "Scale-dependent Analyses of Precipitation Forecasts and Cloud Properties Using the Dynamic State Index", *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 17, No. 6, 813-825.
- 26- Müller, M, et al, (2009), "Extremeness of Meteorological Variables as an Indicator of Extreme Precipitation Events", *Atmospheric Research*, 92 (2009), 308-317.
- 27- Kaspar, M, et al, (2009), "Cyclogenesis in the Mediterranean Basin: a Diagnosis Using Synoptic-dynamic Anomalies", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9 (2009), 957-965.
- 28- Kaspar, M, et al, (2010), "Variants of Synoptic-scale Patterns Inducing Heavy Rains in the Czech Republic", *Physics and Chemistry of the Earth* 35 (2010), 477-483.
- 29- Müller, M, et al, (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.

- 30- R.R. Rogers, M.K. Yau, (1989), "A Short Course in Cloud Physics, Third Edition", International Series in Physical Philosophy, Butterworth Heinemann Publications, 285 Pages.
- 31- Tsuboki, Kazuhisa, Ogura, Yoshimitsu, (1999), "A Potential Vorticity Analysis of Thunderstorm-Related Cold Lows", ***Tenki Journal (Japan)***, Vol. 46, No.7, 453-459.
- 32- Vigaud, N. et al, (2008), "Moisture Transport between the South Atlantic Ocean and Southern Africa: Relationship with Summer Rainfall and Associated Dynamics", ***Clim Dyn*** (2009) 32, 113-123.
- 33- Weber, T, et al, (2007), "Storm Tracks and Cyclone Development Using the Theoretical Concept of the Dynamic State Index (DSI)", ***Tellus***, (2008), 60A, 1-10.