

اثر کوه‌های زاگرس بر چرخندهای بارش‌زای ایران

فاطمه ستوده - دانشجوی دکتری آب و هواشناسی سینوپتیک، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی تهران
بهلول علیجانی - استاد گروه آب و هواشناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی تهران
محمد سلیقه* - دانشیار گروه آب و هواشناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی تهران
مه‌ری اکبری - استادیار گروه آب و هواشناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۸/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۵/۲

چکیده

در این پژوهش برای شناخت تأثیر رشته‌کوه زاگرس در تغییرات چرخندهایی که از غرب وارد ایران می‌شوند از رویکرد محیطی به گردشی استفاده شد. بدین منظور، داده‌های سیزده ایستگاه سینوپتیک غرب ایران و داده‌های ساعتی ERA-Interim با تفکیک مکانی $1/25 \times 1/25$ درجه، طی سال‌های ۱۹۸۴-۲۰۱۳ دریافت شد. با این رویکرد، ۲۰۳ روز بارش فراگیر شناسایی شد. با اعمال تکنیک تحلیل عاملی بر روی داده‌های تراز دریای متناظر با این روزها، عامل دوم بیشترین پراش بارش‌های حاصل از چرخند را توجیه می‌کند. روزهای چهاردهم تا هجدهم آوریل ۲۰۰۳، که بیشترین همبستگی را با سایر روزهای این عامل دارد، الگوی نماینده انتخاب شد. در این الگو، چرخند رسیده به کوه‌های زاگرس از زمان شکل‌گیری تا زمان رسیدن بر روی عراق و ادغام با سامانه سودانی، به لحاظ دینامیکی، تقویت می‌شود. به هنگام نزدیک شدن به زاگرس، از تاوایی مثبت و سرعت قائم هوا کاسته می‌شود؛ اما با عبور از زاگرس بر تاوایی مثبت آن افزوده می‌شود. رابطه چرخند تقویت‌شده با منطقه واگرایی ترازهای میانی وردسپهر در همه مراحل مشاهده شد. زاگرس نخست باعث تضعیف و دوقطبی شدن چرخند می‌شود. سپس، با دور شدن از کوهستان، چرخند مجدداً تقویت می‌شود. این چرخندها را چرخند زاگرسی می‌توان نامید.

کلیدواژگان: تاوایی، چرخندهای بادپناهی، زاگرس، سرعت قائم هوا، شار رطوبت.

مقدمه

فعالیت چرخندها در تعیین آب و هوای محلی و شکل‌گیری گردش‌های اتمسفری بزرگ‌مقیاس توسط تبادل عمودی و افقی گرما، رطوبت و تکانه، همراه کنش متقابل با مراکز اتمسفری بزرگ‌مقیاس نقش مهمی دارد (ژیو و همکاران، ۲۰۰۷: ۱۵۲۳). چرخندها عموماً ایجادکننده شرایط آب و هوایی بد و همچنین نماینده سازوکار اولیه حمل رطوبت و گرما به قطب هستند. تغییرات سیستماتیک در موقعیت جغرافیایی یا شدت/ فراوانی فعالیت چرخندها ناهنجاری‌های بارشی درخور توجهی در میان سایر تأثیرات اقلیم منطقه‌ای خواهد داشت (وانگ، ۲۰۰۶: ۳۱۴۵). همچنین، چرخندهای برون‌حاره نقش بزرگی در شرایط آب و هوایی روزانه از طریق الگوهای باد و بارش ایفا می‌کنند (داکار و گری، ۲۰۰۹: ۹۹). توزیع مکانی و زمانی، مسیر و روند چرخندها، و همچنین ویژگی‌های آن‌ها در بسیاری از پژوهش‌ها مطالعه شده است (ماهرس و همکاران، ۲۰۰۱، ۱۰۹؛ ایوردانیدو و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۸۰۷). عوامل متعددی می‌تواند مسیر حرکت و همچنین توزیع چرخندها را تغییر دهد. یکی از عوامل تأثیرگذار در مسیر حرکت و تغییرات ساختاری چرخندها عامل کوهستان است. توزیع مناطق کوهستانی و دریا- خشکی نقش مهمی در پایداری اقلیمی در مقیاس حوضه‌ای و ارتباط آن با الگوهای

جهانی بازی می‌کند (لیونل و همکاران، ۲۰۰۶: ۱). از اواسط قرن نوزدهم مطالعات علمی گسترده‌ای در زمینه آب و هوای کوهستان آغاز شد (باری، ۱۹۹۲). دامنه‌های بادپناه رشته‌کوه‌های اصلی عرض‌های میانه مناطقی مناسب برای چرخندزایی‌اند (پیترسن، ۱۹۵۶؛ ریتان، ۱۹۷۴: ۸۶۱؛ زیسکا و اسمیت، ۱۹۸۰: ۳۸۷)؛ به طوری که بیشترین فراوانی چرخندزایی در رشته‌کوه‌هایی چون راکی و آلپ رخ می‌دهد و شرایط چرخندزایی در دامنه پشت به باد این رشته‌کوه‌ها به دلیل اینکه جریان‌های هوایی اصلی تقریباً موازی رشته‌کوه‌ها می‌وزد کاملاً متفاوت است (هایس و همکاران، ۱۹۸۷: ۴۳۲). در دامنه پشت به باد کوه‌های راکی چرخندزایی در ناحیه‌ای اتفاق می‌افتد که قوی‌ترین حرکات بالاسو در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال مستقیماً در زیر رودباد تروپوسفر بالایی قرار گیرد و حداکثر مکش عمودی را در تروپوسفر پایینی ایجاد کند (نیوتن، ۱۹۵۶: ۵۲۸). یکی از مهم‌ترین اثرهای موانع کوهستانی بر روی چرخندها تغییر جریان‌های درونی چرخندها و ایجاد تغییرات ترمودینامیک به هنگام عبور آن‌ها از روی موانع کوهستانی است.

با پیشرفت‌هایی که طی قرون اخیر در تئوری‌های مطرح‌شده اقلیمی، شیوه ثبت داده‌های هواشناسی، و ابزار و ادوات هواشناسی به وجود آمده، مطالعات جوی نیز پیشرفت چشم‌گیری داشته است. یکی از این پیشرفت‌ها در زمینه شناسایی چرخندها و تأثیر کوهستان بر روی آن‌هاست. از جمله مطالعات اقلیم کوهستان می‌توان به دو پروژه بزرگ^۱ ALPEX و MAP^۲ اشاره کرد که از جمله پروژه‌های بین‌المللی‌اند و در آن‌ها تأثیر کوهستان آلپ در فرایندهای جوی مطالعه شده است. در سال ۱۹۸۲، در پروژه آلپکس، با استفاده از محاسبات عددی، نقش دینامیکی و فیزیکی کوه‌های آلپ در تشکیل چرخندزایی و تغییر چرخندهای لی مطالعه و بررسی شد (تیبالدی و بوزی، ۱۹۸۳: ۲۶۹). در پروژه MAP نیز تأثیر دینامیک کوهستان در شکل‌گیری و توسعه امواج گرانی^۳ ناشی از امواج لی، با شبیه‌سازی دو بُعدی مدل غیر هیدرواستاتیک، مطالعه شد (دویل و دوران، ۲۰۰۲: ۱۸۶).

فریرو و همکاران (۲۰۰۲: ۱)، با استفاده از شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی، چرخندزایی را در دامنه پشت به باد کوه‌های آلپ و با استفاده از پارامترهای اعداد راسبی، برگر، و اکمن^۴ مطالعه کردند. با استفاده از اعداد راسبی و برگر در آزمایش‌های مختلف در شمال غرب رشته‌کوه‌های آلپ و با قراردادن مدلی از این رشته‌کوه در میدان جریان نشان داده شد که شارش‌های کژفشاری و چرخند قوی اولیه در سمت رو به باد کوه چرخند ثانویه ضعیف‌تری در سمت بادپناه کوه ایجاد می‌کند که در مراحل بعدی این چرخند ثانویه بریده می‌شود و به صورت فشارورد درمی‌آید. هوراس و همکاران (۲۰۰۶: ۳۲۷)، با استفاده از مدل MM5، چرخندزایی مدیترانه‌ای را در دامنه بادپناه کوه‌های آلپ، با توجه به نقش کوهستان، سطح شار حرارت محسوس، و ناهنجاری تاوایی پتانسیلی سطح بالا مطالعه کردند. نتایج نشان داد که موانع کوهستانی در مرحله نخست برای تولید چرخندهای کم‌عمق سطح پایین لازم است. تاوایی پتانسیلی سطح بالا در مرحله بعد باعث عمیق‌شدن چرخند می‌شود که اگر اثر تاوایی پتانسیلی سطح بالا در شرایط اولیه مدل حذف شود، چرخند در دامنه بادپناه کوه‌های آلپ شکل نمی‌گیرد. زیتچک و همکاران (۲۰۰۷: ۴۱۳۳) تأثیر رشته‌کوه‌های زاگرس با استفاده از محاسبات عددی بر روی خاورمیانه را مطالعه و بیان کردند که گردش حرارتی^۵ از کوه‌های زاگرس بر اقلیم خاورمیانه تأثیر عمده‌ای دارد، به‌ویژه در اواسط تابستان که گرمایش بر روی کوه‌های زاگرس زیادتر می‌شود. زرین و همکاران (۲۰۱۱: ۹۱) با استفاده از RegCM4 تأثیر توپوگرافی زاگرس را بر روی واچرخندهای ایران مطالعه کردند. نتایج نشان داد که کوه‌های زاگرس تأثیر مهمی در شکل‌گیری و

1. The Alpine Experiment

2. The Mesoscale Alpine Project

3. rotor

4. the Rossby (Ro), Burger (Bu) and Ekman (Ek)

5. the heat driven circulation

نگهداری گردش چرخندی سطح پایین و گردش واچرخندی سطوح میانی در تابستان دارد. سیمپسون و همکاران (۲۰۱۵): (۱۹۷۷) تأثیر کوه‌های خاورمیانه و شمال آفریقا را در اقلیم تابستانه مدیترانه با استفاده از مدل اتمسفر جامع^۱ مطالعه کردند. با مسطح کردن دو منطقه ارتفاعی رشته‌کوه‌های زاگرس و رشته‌کوه‌های اطلس در مدل، حدود ۳۰ درصد از فرونشینی تابستانه تولید می‌شود. تحت تأثیر توپوگرافی زاگرس و کوه‌های اطلس در خاورمیانه و مدیترانه، سه منطقه فرونشینی ایجاد می‌شود که یکی از این مناطق فرونشینی جریان باد در شرق کوه‌های زاگرس است.

در ایران مطالعات محدودی در زمینه اقلیم کوهستان انجام شده است. از باب مثال، تأثیر تشکیل و رفتار چرخندهای لی واقع در کوه‌های آلپ بر آب و هوای ایران در دوره یک‌ساله (۲۰۰۲) مطالعه شد؛ بر اساس نتایج آن مطالعه، چرخندهای لی مربوط به ماه‌های سرد بیشتر آب و هوای ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهند (احمدی گیوی و نجیبی‌فر، ۱۳۸۳). همچنین، تأثیر رشته‌کوه البرز در تقویت سامانه‌های همیدی در نواحی پشت به باد و اثر آن روی کمیت‌های دمای پتانسیل، میدان سرعت قائم، و بارش نیز بررسی شده است که نشان می‌دهد با کاهش ارتفاع ناهمواری‌ها مقادیر دمای پتانسیل و سرعت قائم در پشت به باد کوه و همچنین بارش تجمعی در برخی نقاط کاهش می‌یابد (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۷). مطالعه‌های انجام‌شده در مورد رشته‌کوه‌های زاگرس نیز حاکی از این است که ارتفاعات زاگرس از طریق افزایش حرکت بالاسو و پایین‌سوی سامانه‌ها، روی بسیاری از کمیت‌های ترمودینامیکی و دینامیکی آن‌ها مؤثر است؛ از آن جمله می‌توان به محتوای آب ابر، فرارفت دما، و سرعت قائم اشاره کرد و اگر شرایط بارش فراهم باشد، در صورت نبود زاگرس، در مناطق کویری بارش بیشتری ریزش می‌کرد (مرادی و همکاران، ۱۳۸۷). همچنین، نتیجه مطالعه اثر رشته‌کوه‌های زاگرس در آب و هوای ایران مرکزی برای دوره ۱۹۷۱-۱۹۹۰ با استفاده از نقشه‌های تراز دریا و ۵۰۰ هکتوپاسکال و نقشه‌های ناهنجاری فشار هوا نشان داد که سامانه‌های جبهه‌ای وارده از شمال غرب کشور بدون آنکه دچار تغییرات ساختاری یا کندی عمده‌ای شوند از کوهستان می‌گذرند؛ ولی جبهه‌هایی که از غرب و جنوب غرب به آن نزدیک می‌شوند، به‌ویژه زمانی که منطقه مرکزی زیر نفوذ پشته پُرفشار قرار دارد، توسط زاگرس کند و مخلوط می‌شود (خلج، ۱۳۸۱). بررسی نقش این رشته‌کوه در سامانه‌های جوی عبوری از ایران با استفاده از مدل اقلیمی منطقه‌ای RegCM در یک بازه سه‌ماهه نیز نشان داد که، با حذف رشته‌کوه‌های زاگرس، میزان بارش در مناطق مرکزی و شرقی ایران افزایش می‌یابد؛ ولی میزان بارش در کل محدوده شبیه‌سازی تقریباً ثابت می‌ماند (سلطان‌زاده و همکاران، ۱۳۸۶).

ایران، با واقع شدن در کمربند خشک جهان در جنوب و واقع شدن نواحی شمالی کشور در عرض‌های میانه و همچنین برخورداری از تنوع و پیچیدگی توپوگرافی، دارای اقلیم بسیار متنوع و بالطبع پیچیده‌ای است. با چنین وصفی، رشته‌کوه‌های ایران نقش بسیار بارز و برجسته‌ای در تنوع و پیچیدگی اقلیم محلی و منطقه‌ای ایران زمین بازی می‌کنند. تفاوت‌های مکانی-زمانی بارش‌های ایران، از جمله بارش‌های بهاره مناطق شمال غرب کشور، بارش‌های دامنه غربی رشته‌کوه‌های زاگرس، و بارندگی‌های ناحیه سواحل دریای کاسپین در شمال حصار کوهستانی البرز، خود حاکی از نقش برجسته مناطق کوهستانی در رژیم بارندگی کشور است. همچنین، خشکی بخش وسیعی از مناطق مرکزی ایران به دلیل واقع شدن این مناطق در دامنه بادپناه دیواره‌های عظیم کوهستانی ایران است. سامانه‌های چرخندی یکی از سامانه‌های سینوپتیکی بسیار حائز اهمیت و از جمله سامانه‌های بارش‌زای مهم کشور به‌شمار می‌رود. این سامانه‌های بارش‌زا به هنگام رسیدن به ایران، بسته به مسیر ورود به کشور، به دو کوهستان عظیم زاگرس و البرز برخورد می‌کنند که باعث بروز تغییراتی در ساختار آن‌ها می‌شود. از جمله این تغییرات را می‌توان در روابط تاوایی، واگرایی، و تغییر شارش‌های سامانه‌های چرخندی جست‌وجو کرد. با توجه به ضرورت

مطالعه اقلیم کوهستان در ایران و با عنایت به اینکه در ایران مطالعه جامع و گسترده‌ای در این زمینه انجام نشده، در این پژوهش تلاش شده با به‌کارگیری رویکردهای همدید و ترمودینامیکی این مهم بررسی شود.

داده‌ها و روش‌ها

برای مطالعه تأثیر توپوگرافی زاگرس در چرخندها از سه دسته داده استفاده شد: در دسته اول داده‌های بارش روزانه ۱۳ ایستگاه سینوپتیک غرب کشور طی دوره آماری ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۳ (سی سال) برای مطالعه محیطی بارش‌های ناشی از چرخندها انتخاب شد. دسته دوم داده‌های پایگاه مرکز ملی پیش‌بینی محیطی (NCEP)^۱ و مرکز ملی پژوهش‌های جوی (NCAR)^۲ ایالات متحده با تفکیک مکانی $۲/۵ \times ۲/۵$ درجه قوسی است و دسته سوم داده‌های ERA-Interim از پایگاه داده ECMWF با تفکیک مکانی $۰/۱۲۵ \times ۰/۱۲۵$ در چارچوب مکانی ۱۰ تا ۸۰ درجه شرقی و ۱۰ تا ۶۰ درجه شمالی و به صورت شش‌ساعته (00, 00, 00, 06, 00, 12, 00, 18 UTC) است. علت استفاده از دو پایگاه داده NCEP/NCAR و ECMWF بدین دلیل است که در مرحله اول برای شناسایی چرخندها و اعمال روش تحلیل عاملی، به دلیل کم‌حجم‌بودن، از داده‌های NCEP/NCAR استفاده شد و در مرحله بعد برای مطالعه و بررسی دقیق‌تر از داده‌های پایگاه ECMWF بهره گرفته شد. چارچوب مکانی انتخاب‌شده نیز تقریباً دربرگیرنده همه مناطق آب و هوایی مؤثر در تشکیل و تقویت سامانه‌های چرخندی اثرگذار در اقلیم ایران است. ذکر این نکته لازم است که بررسی نقشه‌ها به صورت شش‌ساعته انجام شد؛ ولی، به دلیل حجم زیاد، فقط به ارائه نقشه ساعت 00,06 UTC بسنده شد.

روش کار در این مطالعه شامل دو بخش است: در بخش نخست، برای شناسایی سامانه‌های چرخندی با استفاده از رویکرد محیطی به‌گرددی، نخست بارش‌های بیشتر از یک میلی‌متر با تداوم بیش از ۵ روز، که در بیش از ۳۰ درصد از ایستگاه‌ها رخ داده است، به عنوان بارش‌های حاصل از چرخندها انتخاب شد. با این رویه ۲۰۳ روز بارش فراگیر چرخندی در غرب کشور در طی دوره مورد مطالعه شناسایی شد. برای کاهش حجم تعداد روزهای انتخاب‌شده و بررسی دقیق‌تر، از تکنیک تحلیل عاملی دوران‌یافته^۳ (واریماکس)^۴ به روش درست‌نمایی بیشینه^۵ استفاده شد. با اعمال تکنیک تحلیل عاملی بر روی فشار تراز دریا (روزهای منتخب)، ۱۹ عامل اول، با $۹۳/۳۱$ درصد واریانس، بارش‌های فراگیر را توجیه می‌کند. در مرحله بعد، پس از تولید نقشه‌های تراز دریا و ارتفاع ژئوپتانسیل ۱۰۰۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکال، حضور چرخندها در روزهای انتخاب‌شده بررسی و محرز شد. همچنین، نقشه‌های بارشی همه عامل‌ها نیز ترسیم شد. پس از ترسیم نقشه‌های ترازهای مختلف برای هر ۱۹ عامل استخراج‌شده و بررسی آن‌ها، عامل دوم با $۱۴/۱$ درصد بیشترین پراش روزهای بارشی را توجیه کرد. بارش روز ۱۴ آوریل ۲۰۰۳ در غرب کشور نماینده عامل دوم است که بیشترین همبستگی را با سایر روزهای این گروه دارد. بخش دوم از روش کار شامل بررسی همدیدی و دینامیکی چرخند یادشده است که با محاسبه کمیت‌های تاوایی نسبی و سرعت قائم هوا در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال و جریان نم ویژه تراز ۸۵۰ و همچنین ترسیم نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیل در ترازهای دریا، ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال انجام شد.

یافته‌های تحقیق

در سال ۲۰۰۳ دوره بارشی پنج روزه‌ای از ۱۴ تا ۱۸ آوریل برای بخش‌های وسیعی از ایران رخ داده است. در این دوره

1. National Centers of Environmental Prediction
2. National Center for Atmospheric Research
3. Rotated Factor Analysis
4. Varimax
5. Maximum Likelihood

بارشی، بیشترین مقدار بارندگی در غرب و شمال و شمال‌غرب ایران اتفاق افتاده است. بارندگی از روز ۱۴ آوریل ۲۰۰۳ آغاز و در روز ۱۶ آوریل به اوج خود رسیده است. در روز ۱۶ آوریل بیش از ۳۰ درصد از پهنه ایران بارش فراوانی داشته است. در روز هفدهم از شدت بارش‌ها کاسته شده و تمرکز بارش روی شمال کشور است. روز هجدهم، فقط بخش‌های شمال‌شرق کشور و بخشی از مناطق مرکزی بیش از ۵ میلی‌متر بارش را تجربه کرده‌اند. شواهد بارشی در طی ۵ روز و الگوی استخراج‌شده حاکی از شرایط بارش چرخندی است که در ادامه چگونگی شکل‌گیری و شرایط ترمودینامیکی این چرخند به‌دقت بررسی و مطالعه می‌شود. برای بررسی دقیق و چگونگی شکل‌گیری این چرخند، نقشه‌های ترازهای مختلف جو از روز ۱۲ آوریل مطالعه شد.

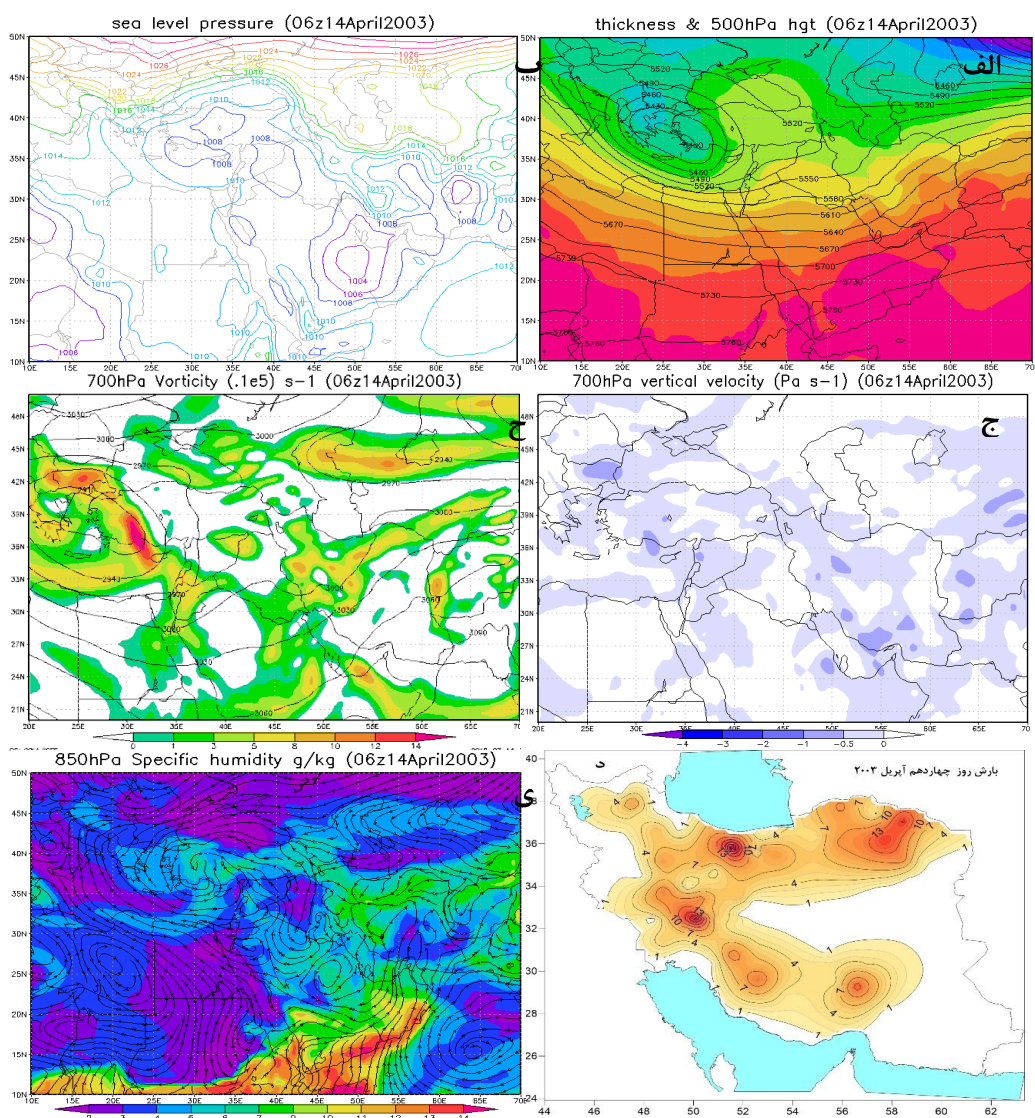
بررسی توزیع فشار تراز دریا از روز دوازده آوریل ۲۰۰۳، شکل‌گیری یک سامانه کم‌فشاری با فشار مرکزی ۱۰۱۲ هکتوپاسکال را بر روی غرب دریای مدیترانه و یونان نشان می‌دهد. همچنین، سامانه کم‌فشار سودانی تا روی دریای سرخ و عربستان نیز گسترش یافته است. شرایط مشابه در تراز ۸۵۰ نیز مشاهده می‌شود. در تراز میانی وردسپهر (۵۰۰ هکتوپاسکال)، ناوه نسبتاً کم‌عمقی در غرب مدیترانه در امتداد شمال‌غربی کم‌فشار تراز دریا دیده می‌شود. بررسی ساعت‌های بعدی نشان می‌دهد که چرخند یادشده به سمت شرق حرکت می‌کند و تا روز سیزدهم آوریل به شمال‌شرق مدیترانه می‌رسد و تقویت می‌شود. در نهایت، این سامانه با سامانه سودانی روی عراق ادغام شده است. در تراز میانی وردسپهر نیز در شمال‌غرب محل استقرار چرخند تراز دریا، کم‌ارتفاع بسته شده (پربند ۵۴۵۰ ژئوپتانسیل متر)، قوی‌تر شده است، و تا ساعت ۰۰،۱۸ تقویت شده و ارتفاع مرکزی آن به ۵۳۸۰ ژئوپتانسیل متر می‌رسد. بررسی‌ها حاکی از این است که چرخند یادشده چرخندی دینامیکی از نوع هسته سرد است که از سطح زمین تا تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال گسترش یافته است.

شرایط همدید روز ۱۴ آوریل ۲۰۰۳

شرایط سینوپتیکی فشار تراز دریا تا ساعت 00,06 UTC روز ۱۴ آوریل سال ۲۰۰۳ حرکت شرق‌سوی سامانه کم‌فشار روی دریای مدیترانه را نشان می‌دهد. تا این زمان، مرکز این سامانه با فشار مرکزی ۱۰۰۷ هکتوپاسکال بر روی شمال‌شرق دریای مدیترانه و ترکیه مستقر شده و در حال ادغام با سامانه سودانی است. بر روی ارتفاعات زاگرس مرکز پُرفشاری مستقر است. کم‌فشار سودانی با عبور از روی دریای سرخ و عربستان وارد خلیج فارس می‌شود. بخش‌های جنوبی کشور تحت تأثیر زبانه‌های کم‌فشار سودانی قرار دارد و سلول کم‌فشاری با مرکز ۱۰۰۷ هکتوپاسکال در بخش‌های مرکزی ایران مشاهده می‌شود. زبانه‌ای از پُرفشار شمال روسیه تا روی دریای کاسپین گسترش یافته که بخش‌های شمالی کشور را تحت تأثیر قرار داده است. تقابل زبانه این پُرفشار با کم‌فشار روی عراق شیو فشاری را در بخش‌های غربی کوه‌های زاگرس، شمال و شمال‌غرب کشور ایجاد کرده است (شکل ۱).

در ترازهای ۵۰۰ هکتوپاسکالی، ناوه مدیترانه، که هسته آن در جنوب اروپا و شمال دریای مدیترانه استقرار یافته، مشاهده می‌شود. قسمت جلوی این ناوه با حرکت چرخندی و واگرایی ترازهای میانی وردسپهر بر روی ایران قرار گرفته است. پربندها در جلوی ناوه، علاوه بر ایجاد واگرایی، شرایط تشکیل امواج کوتاه را نشان می‌دهد که دلالت بر تشدید شرایط صعودی در لایه‌های زیرین دارد. دامنه این ناوه در جنوب به قسمت‌های جنوبی دریای سرخ رسیده است. عمیق‌شدن ناوه مدیترانه شرایط را برای تقویت کم‌فشار سودانی و انتقال رطوبت دریاهای جنوب به منطقه فراهم کرده است. استقرار مرکز پُرفشار سیبری در شمال و شمال‌شرق ایران باعث گسترش زبانه‌ای از آن به سمت جنوب ایران شده است. با گسترش هوای سرد در سطوح میانی به سمت جنوب، ناپایداری جوی در نواحی غربی ایران افزایش یافته است. نقشه تاوایی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال شرایط چرخندی

مثبت را در همه قسمت‌های غرب زاگرس، شمال‌غرب، و جنوب‌غرب نشان می‌دهد. درحالی‌که در شرق زاگرس از شدت چرخندگی مثبت کاسته شده است. افزایش چرخندگی مثبت در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال در غرب زاگرس بیانگر نقش واگرایی و تاوایی مثبت درون ناوه مدیترانه است که به این سطح منتقل شده است. هسته‌های چرخندگی مثبت یا هسته‌های امواج کوتاه در بستر امواج بلند بادهای غربی کاملاً مشخص است. این موج‌های کوتاه بادهای غربی در جلوی ناوه مدیترانه، جایی که همواره شرایط چرخندگی مثبت و واگرایی بالایی وجود دارد، فراهم شده است. نقشه سرعت قائم هوا با هسته‌های بسته منفی در غرب و مرکز زاگرس مراتب فوق‌الذکر را تأیید می‌کند؛ به طوری‌که سه هسته سرعت قائم هوای منفی در غرب، مرکز، و جنوب رشته‌کوه‌های زاگرس ایجاد شده است؛ درحالی‌که در ناحیه داخلی ایران و شرق آن اثری از شرایط صعودی هوا وجود ندارد. همچنین، هسته‌های بیشینه رطوبت در نقشه نم ویژه تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال مشاهده می‌شود. در این تراز انتقال رطوبت هم از دریای مدیترانه و هم از جانب جنوب‌غرب کاملاً مشهود است.



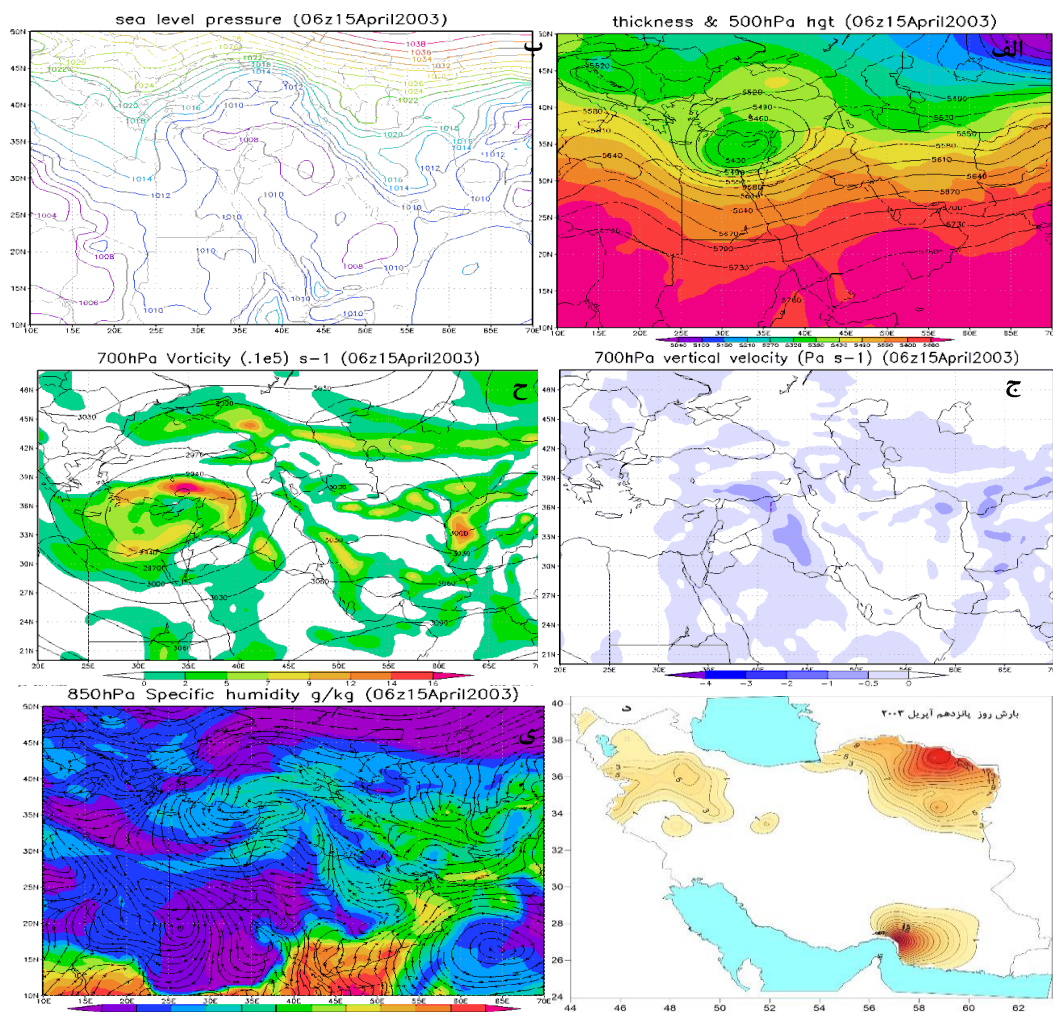
شکل ۱. الف) ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و ضخامت جو؛ ب) توزیع فشار تراز دریا؛ ج) نقشه ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل و تاوایی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال؛ د) سرعت قائم هوای تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال؛ ی) نم ویژه تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در ساعت 00:06 UTC روز ۱۴ آوریل ۲۰۰۳

شرایط همدید روز ۱۵ آپریل ۲۰۰۳

شکل ۲- ب تغییرات فشار تراز دریا را در ساعت 00,06 UTC روز پانزدهم آپریل ۲۰۰۳ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نسبت به ۲۴ ساعت گذشته، سامانه کم‌فشار مدیترانه، ضمن ادغام با سامانه سودانی، تقویت شده (فشار مرکزی ۱۰۰۶ هکتوپاسکال) و با محور شمال‌غرب- جنوب‌شرقی بر روی جنوب‌غرب عراق مستقر شده است. دو سامانه پُرفشار مستقر بر روی شمال روسیه نیز نسبت به ساعت‌های گذشته قوی‌تر شده که تقابل آن با سامانه کم‌فشار روی عراق، شیو فشاری بین این دو سامانه را تشدید کرده که فشردگی خطوط فشاری بین این دو سامانه در شمال‌غرب ایران و در دامنه غربی زاگرس مبین آن است. همچنین، سامانه کم‌فشار مرکز ایران حرکت شرق‌سو داشته است و در این زمان از مرزهای ایران عبور کرده و زبانه آن در مرزهای شمال‌شرقی کشور دیده می‌شود. زبانه پُرفشار سیبری با عبور از روی دریای کاسپین با امتداد شمالی- جنوبی تا بخش‌های مرکزی کشور پیش رفته است. بر روی نقشه تراز میانی و رددسپهر، طی ۲۴ ساعت گذشته، مرکز کم‌ارتفاع به سمت شرق حرکت کرده و نزدیک قبرس رسیده است. تا این ساعت پربندها روی ایران به صورت تقریباً مداری درآمده است. تا ساعت 00,18 UTC، که مرکز کم‌ارتفاع به غرب سوریه می‌رسد، بخش‌های شمال‌غرب کشور زیر جلوی محور ناوه قرار می‌گیرد. نقشه ضخامت جو ریزش هوای سرد را به مرکز کم‌ارتفاع روی مدیترانه و همچنین بر روی دریای کاسپین و بخش‌های شمالی کشور و نیز فرارفت هوای گرم را از روی عربستان به سمت جنوب و بخش‌های مرکزی تا جنوب کوه‌های البرز نشان می‌دهد. نقشه تلاویی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد که هسته بیشینه چرخندگی مثبت در دامنه‌های غربی زاگرس ضعیف‌تر از روز قبل شده و در دامنه شرقی زاگرس نیز چرخندگی منفی حاکم است. همچنین، هسته‌های چرخندگی مثبت در مناطق دامنه جنوبی البرز تا شمال‌شرق کشور مشاهده می‌شود. نقشه پراکنش میدان سرعت قائم هوا کاهش میدان سرعت قائم هوا را در دامنه غربی زاگرس نشان می‌دهد. هسته بیشینه سرعت قائم هوا در شمال شرق کشور مشاهده می‌شود. نقشه توزیع نم ویژه واگرایی رطوبت از روی دریای عرب و جذب رطوبت توسط سامانه سودانی را نشان می‌دهد. زبانه نم ویژه از سامانه سودانی با امتداد جنوب‌غربی- شمال شرقی با عبور از روی عربستان و دریای عمان وارد بخش‌های جنوب‌شرقی ایران می‌شود. هسته‌های بیشینه رطوبت در نقشه نم ویژه تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در شمال شرق و جنوب شرقی ایران مشاهده می‌شود.

شرایط همدید روز ۱۶ آپریل ۲۰۰۳

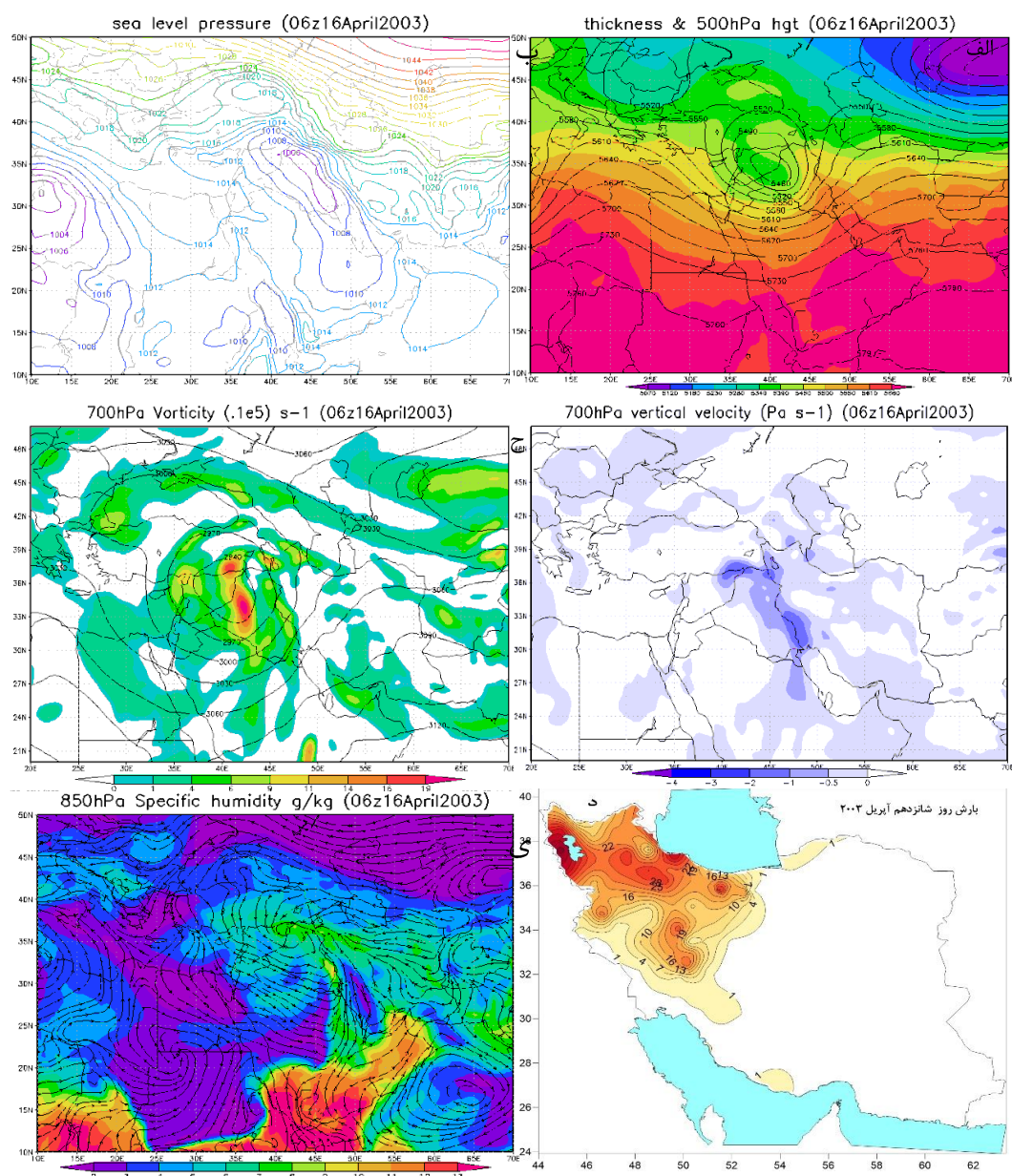
اوج بارش‌های شمال‌غرب ایران روز شانزدهم آپریل است که در ساعت 00,06 UTC مرکز سامانه کم‌فشار نسبت به روز گذشته قوی‌تر (۱۰۰۲ هکتوپاسکال) شده و با حرکت شرق‌سو بر روی جنوب‌شرق عراق و نزدیک مرزهای ایران مستقر شده است. این سامانه با امتداد شمال‌غرب- جنوب‌شرقی گسترش زیادی یافته و از عربستان تا ترکیه را دربر گرفته است. کُرفشاری شدیدی در بخش‌های شمال‌غرب تا جنوب‌غرب ایران ایجاد شده است. همچنین، هسته پُرفشار مستقر بر روسیه بسیار قوی‌تر شده و فشار مرکزی آن به ۱۰۵۰ هکتوپاسکال رسیده است. در طی بیست‌وچهار ساعت گذشته، حرکت شرق‌سوی این سامانه چرخندی در برخورد با کوه‌های زاگرس باعث حرکت بطئی و کُند چرخند شده است. در ارتفاعات زاگرس هسته‌های پراکنده پُرفشار دیده می‌شود. تا ساعت 00,12 UTC زبانه‌ای از این سامانه با عبور از روی کوهستان زاگرس، وارد بخش‌های جنوبی ایران شده و سبب شکل‌گیری کم‌فشار مرکزی ایران می‌شود. بدین ترتیب، سامانه چرخندی دو قطبی شده و هسته اصلی آن همچنان با حرکت بطئی در دامنه غربی کوه‌های زاگرس باقی مانده است. در تراز میانی



شکل ۲. الف) ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و ضخامت جو؛ ب) توزیع فشار تراز دریا؛ ح) نقشه ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل و تاوایی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال؛ ج) سرعت قائم هوای تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال؛ ی) نم ویژه تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در ساعت 00:06 UTC؛ د) بارش در روز ۱۵ آوریل ۲۰۰۳

وردسپهر مرکز کم‌ارتفاع طی ۲۴ ساعت گذشته به سمت شرق حرکت کرده و بر روی عراق مستقر شده است. این سامانه کم‌ارتفاع قوی‌تر شده و محور ناوه یادشده عمیق‌تر شده و تا روی دریای سرخ کشیده شده است. بخش‌های شمال‌غرب و غرب کشور در زیر منطقه واگرایی بالایی ناوه واقع شده است که در نتیجه با ایجاد ناپایداری شدید دینامیکی باعث صعود هوا در لایه‌های زیرین وردسپهر می‌شود. نقشه ضخامت جو گویای ریزش هوای سرد عرض‌های بالا به نیمه غربی ناوه مدیترانه‌ای و فرارفت هوای گرم عرض‌های پایین در نیمه شرقی آن است. در روی دریای عرب و مرکز پرفشار جنب‌حاره‌ای عربستان با پربند ۵۷۹۰ ژئوپتانسیل متر بسته شده که راستای شرقی-غربی داشته و تا غرب آفریقا را نیز فراگرفته است (شکل ۳). تاوایی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۳-ح) افزایش تاوایی مثبت را در بخش‌های شمال‌غرب نسبت به روز قبل نشان می‌دهد؛ به طوری که در ساعات اولیه هسته‌های بیشینه تاوایی مثبت در این بخش‌ها به حدود $15 \times 10^{-5} s^{-1}$ می‌رسد. هسته‌های تاوایی در بخش‌های جنوبی و دامنه پشت به باد زاگرس نیز دیده می‌شود. تا ساعت ۰۰:۱۸ UTC، که مرکز چرخند به سمت شرق حرکت می‌کند، با استقرار مرکز کم‌ارتفاع بر روی عراق، حداکثر تاوایی مثبت به حدود $18 \times 10^{-5} s^{-1}$ می‌رسد. گرادیان فشار در دامنه‌های غربی زاگرس افزایش می‌یابد و با ورود زبانه این سامانه به داخل

کشور و تشکیل یک مرکز ثانویه در مناطق مرکزی ایران افزایش تاوایی مثبت در مرکز ثانویه مستقر بر روی کرمان و یزد نیز دیده می‌شود. نقشه سرعت قائم هوا نیز افزایش حرکات صعودی را نسبت به روز گذشته در بخش‌های غربی کشور تأیید می‌کند. همچنین، مقادیر مثبت سرعت قائم هوا در مناطق ارتفاعی زاگرس مبین حاکمیت فرونشینی هوا در لایه‌های زیرین و ردسپهر و تأیید ایجاد شرایط مانع برای عبور مستقیم چرخند از روی ارتفاعات است. همان‌طور که در نقشه میدان نم ویژه مشاهده می‌شود، مسیر جریان نم ویژه حاکی از رسیدن رطوبت دریای مدیترانه و دریای سیاه در گردش چرخندی به شمال غرب کشور است. همچنین، بیشینه رطوبت از سامانه سودانی روی خلیج فارس، دریای عمان، و عربستان دیده می‌شود.



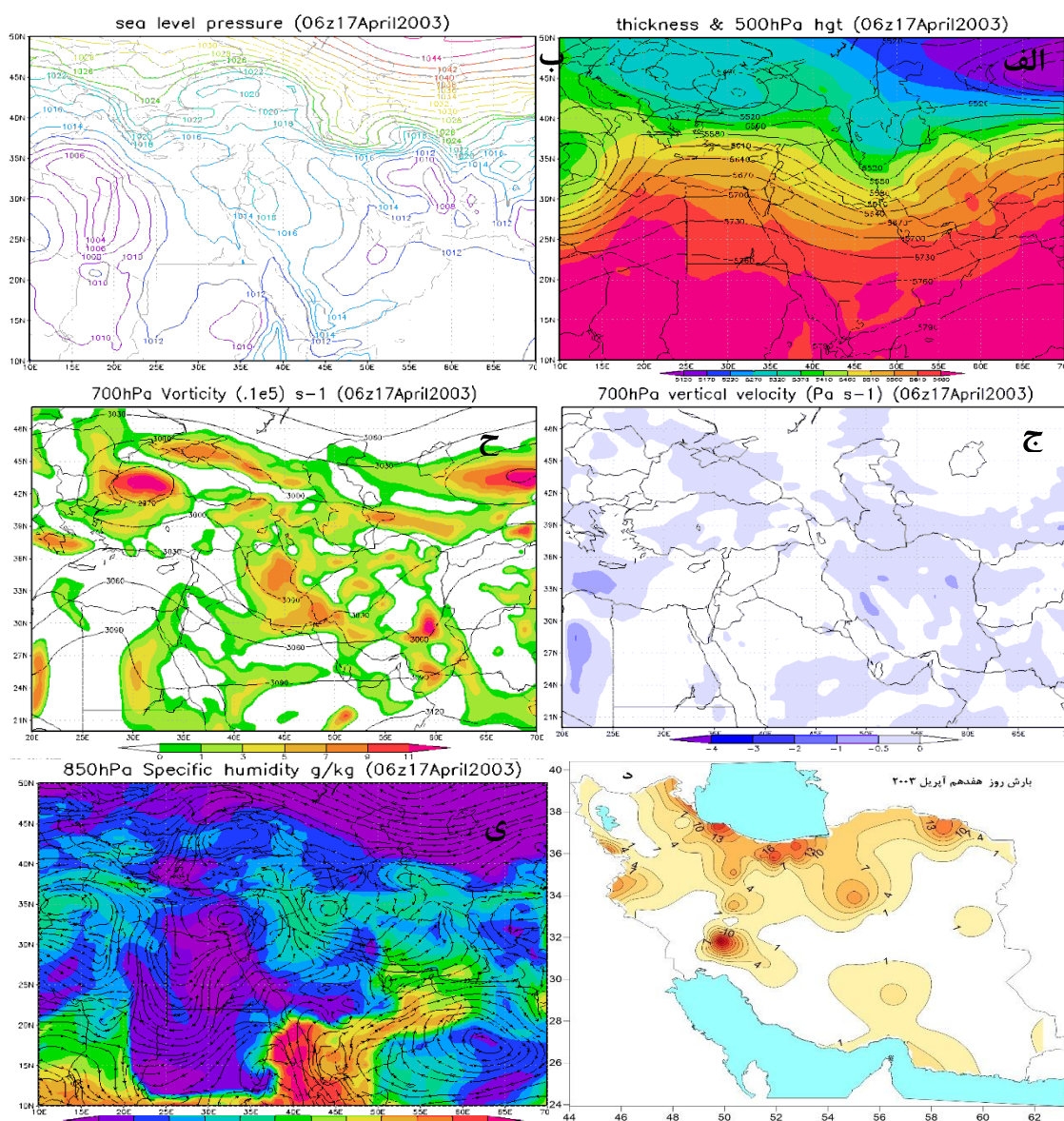
شکل ۳. الف) ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و ضخامت جو؛ ب) توزیع فشار تراز دریا؛ ج) نقشه ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل و تاوایی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال؛ ج) سرعت قائم هوای تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال؛ د) نم ویژه تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در ساعت 00:06 UTC؛ د) بارش در روز ۱۶ آوریل ۲۰۰۳

شرایط همدید روز ۱۷ آوریل ۲۰۰۳

شکل ۵، ۲۴ شرایط سینوپتیکی فشار تراز دریا را در ساعت 00,06 UTC روز هفدهم آوریل ۲۰۰۳، در الگوی اول نشان می‌دهد. کم‌فشار مرکز ایران نسبت به روز گذشته تقویت شده و همچنین فشار مرکزی سامانه پُرفشار سبیری به ۱۰۴۸ هکتوپاسکال رسیده و زبانه آن بر روی دریای کاسپین و شمال غرب ایران گسترش یافته است. به دلیل تقابل زبانه پُرفشار سبیری و کم‌فشار بخش‌های داخلی، کُرفشاری در بخش‌های شمالی و شرقی کشور شدید می‌شود و شرایط ناپایداری و صعود هوا را ایجاد می‌کند. تا ساعت ۰۰,۱۸ سامانه چرخندی شرق کوه‌های زاگرس با حرکت به سوی مرزهای شرقی کشور تقویت می‌شود و فشار مرکزی آن به ۱۰۰۲ هکتوپاسکال می‌رسد. این امر نشان‌دهنده تأثیر ناهمواری‌ها به صورت مانعی در برابر سیستم‌های کم‌فشار است، که در شرق آن‌ها افزایش چرخندگی مثبت اتفاق می‌افتد. شرایط تقویت چرخندها در دامنه بادپناه نوارهای بلند کوهستانی (با ارتفاع حداقل بیش از ۲۵۰۰ متر) نیز به‌وجود می‌آید و چرخندهایی را به‌وجود می‌آورد که آن‌ها را چرخندهای «بادپناهی» نامیده‌اند. هرگاه جریان هوایی در جهت عمود بر نوار کوهستانی در تمام ضخامت و ردسپهر بوزد، جریان هوا در طبقات پایین جو در دامنه بادپناه بر روی دامنه به طرف پایین می‌خزد. هوا، ضمن این نزول، به طریق بی‌درو گرم می‌شود و در جهت عمود گسترش می‌یابد؛ به‌طوری‌که در پایین کوه مرکز کم‌فشار به‌وجود می‌آید. این مرکز کم‌فشار، که چرخش چرخندی دارد، آغاز تشکیل یک چرخه چرخند دینامیکی است. تشکیل این‌گونه چرخندها هنگامی شدت می‌یابد که منطقه واگرایی سطح بالایی مربوط به یک موج کوتاه یا منطقه واگرایی هسته رودباد یا ناوه عرض‌های میانی بر روی چرخند سطح زمین قرار بگیرد. رابطه چرخند تقویت‌شده با منطقه واگرایی ترازهای میانی وردسپهر از ویژگی‌های این الگو است. در فرایند چرخندزایی یا تقویت چرخندهای بادپناهی، ورود هوای سرد در پشت یک جبهه سرد ضعیف‌شده از روی نوار کوهستانی روند تشکیل و رشد چرخند را شدیدتر می‌کند؛ این نکته، برای نمونه، در منطقه چرخندزایی کلرادو و منطقه خلیج ژنوا، واقع در دریای مدیترانه، مطالعه شده است (علیجان‌ی ۱۳۷۱). در این تراز ریزش هوای سرد عرض‌های بالایی باعث تقویت جبهه سرد چرخند و نهایتاً تقویت آن در شرق زاگرس شده است. در ایران، چرخندهای بادپناهی زاگرس با کسب رطوبت از دریای عمان و خلیج فارس نیز تقویت می‌شود. در تراز میانی وردسپهر مرکز چرخند با حرکت شرق سو در ۲۴ ساعت گذشته از روی غرب عراق به شمال غرب ایران رسیده که با ارتفاع مرکزی ۵۳۰۵ ژئوپانسیل متر نسبت به روز قبل تقویت و محور ناوه آن با امتداد شمالی-جنوبی تا روی عربستان گسترده شده است. بخش‌های وسیعی از ایران و چرخند بادپناهی زاگرسی در زیر جلوی محور ناوه قرار گرفته است. در ساعت‌های بعدی مرکز این کم‌فشار به سمت دریای کاسپین حرکت کرده و تا ساعت ۰۰,۱۸ UTC محور ناوه با جهت شمالی - جنوبی از روی دریای خزر تا جنوب ایران کشیده شده است و در این ساعت نیمه غربی ایران در پشت ناوه و بخش‌های شرقی در جلوی ناوه قرار می‌گیرند. بنابراین، در ساعت‌های اولیه، یعنی تا ساعت ۰۰,۱۲ UTC، شرایط برای بارش در بخش‌های غربی و شمالی کشور مهیا است و نقشه بارش روز ۱۷ نیز حاکی از بارش حداکثر تا ۳۴ میلی‌متر در این بخش‌هاست. بیشینه بارش‌های این روز نیز در بخش‌های دامنه‌های غربی زاگرس و بخش شمالی ایران دیده می‌شود.

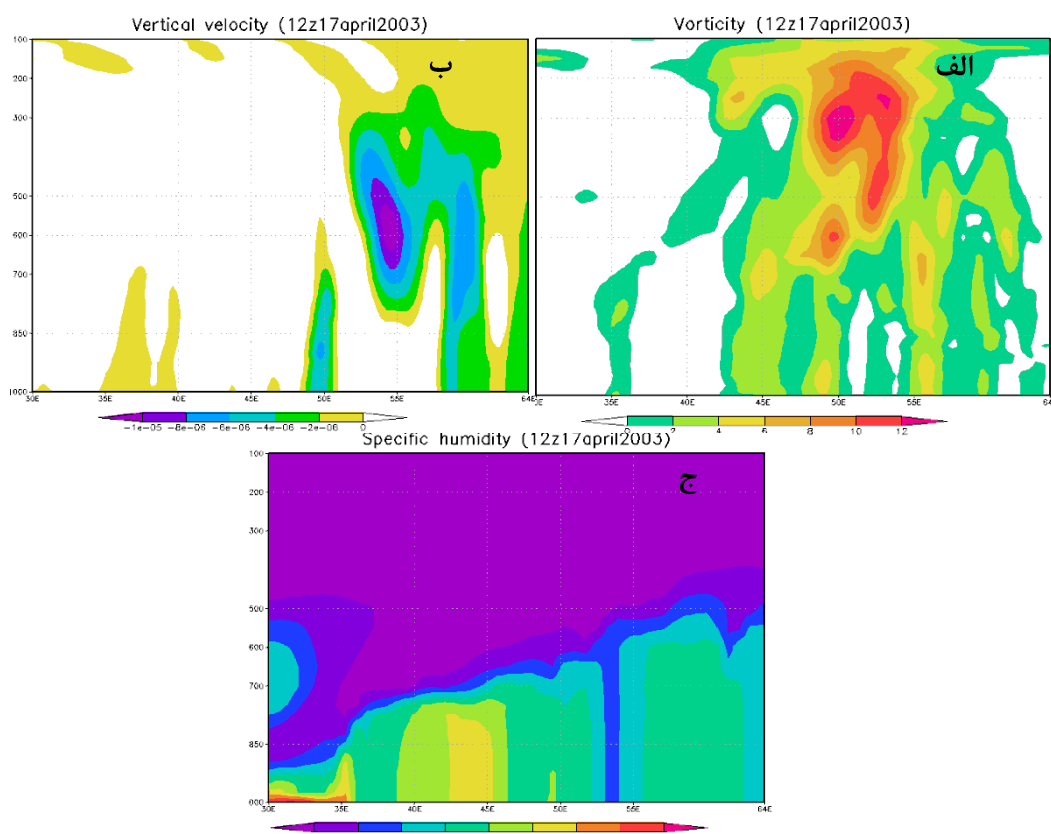
هسته بیشینه تاوایی مثبت در مرکز چرخند ثانویه در جنوب شرق ایران به بیش از $11 \times 10^{-5} s^{-1}$ می‌رسد که نسبت به روز گذشته تقویت شده است. نگاهی دقیق به نقشه تاوایی و پربندهای تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال ایجاد موج کوتاه در مرکز چرخند ثانویه جنوب شرق را نشان می‌دهد که بیانگر شرایط برای صعود و ایجاد شرایط ناپایداری در ترازهای زیرین وردسپهر در محل این چرخند ثانوی است. همچنین، هسته‌های متعدد تاوایی مثبت در غرب و شرق زاگرس، شمال غرب تا شمال شرق و جنوب شرق کشور مشاهده می‌شود که افزایش تاوایی مثبت را نسبت به روز قبل نشان می‌دهند (شکل ۴-ح). نقشه سرعت قائم هوا نیز با وجود مقادیر منفی در پهنه‌های وسیعی از مناطق مرکزی، غرب، و شمال غرب تا شمال شرقی و

جنوب‌شرق حاکمیت واگرایی هوا در این تراز و ایجاد شرایط صعود ستون هوای ترازهای زیرین را نشان می‌دهد. میدان نم ویژه همچون روزهای گذشته حاکی از فرارفت رطوبت هم از جنوب به سمت ایران و هم از طریق سامانه چرخندی از دریای مدیترانه و دریای سیاه است. جریان رطوبتی از روی خلیج فارس به جنوب و مناطق داخلی ایران فرارفت شده است. مقدار نم ویژه در غرب زاگرس و امتداد البرز تا حدود ۶ گرم بر کیلوگرم می‌رسد؛ درحالی‌که در بخش‌های داخلی کشور کمترین میزان نم ویژه نفوذ می‌کند. با وجود اینکه بیشینه نم ویژه از سامانه سودانی به سمت جنوب کشور فرارفت می‌شود، ارتفاعات جنوب کشور مانع نفوذ رطوبت به بخش‌های مرکزی ایران می‌شود.



شکل ۴. الف) ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و ضخامت جو؛ ب) توزیع فشار تراز دریا؛ ح) نقشه ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل و تاوایی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال؛ ج) سرعت قائم هوای تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال؛ د) نم ویژه تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در ساعت 00,06 UTC؛ د) بارش در روز ۱۷ آوریل ۲۰۰۳

شکل ۵ برخی ویژگی‌های ترمودینامیکی و ردسپهر را در روز هفدهم آپریل نشان می‌دهد. شکل ۵- ب توزیع امگای ارتفاعی حاکی از امگای منفی در شرق کوه‌های زاگرس و شرایط صعود هوا تا تراز ۲۰۰ هکتوپاسکالی را نشان می‌دهد. این ویژگی نشان‌دهنده اثر کوه‌های زاگرس در افزایش چرخندگی و تقویت چرخند بادپناهی در حوضه شرقی زاگرس است. شکل ۵- الف توزیع تاوایی نیز حاکی از چرخندگی مثبت در دامنه شرقی زاگرس و مهیایی شرایط صعود تا تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال است. شکل ۵- ج تراز ورود رطوبت را نشان می‌دهد. در این روز، بیشترین رطوبت در ترازهای زیرین و ردسپهر از ۱۰۰۰ تا تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال منتقل می‌شود. همچنین، این نمودار حاکی از تخلیه رطوبت در دامنه غربی زاگرس است؛ به طوری که حداقل رطوبت به دامنه‌های شرقی وارد می‌شود.



شکل ۵. الف) توزیع امگای ارتفاعی؛ ب) توزیع تاوایی ارتفاعی؛ ج) تراز ورود رطوبت در عرض ۳۲ درجه شمالی

نتیجه‌گیری

موانع کوهستانی از عوامل برهم‌زننده چهره یک‌دست اقلیم محلی و گاهی مانند کوه‌های راکی به صورت سیاره‌ای تأثیرگذار است. پهنه ایران زمین، به سبب ارتفاعات در شمال، غرب، و سایر مناطق، به لحاظ ژئومورفولوژیکی و اقلیمی، چهره ناهمگونی دارد. یکی از بارزترین تأثیر ناهمواری‌ها در اقلیم، تغییر ساختار سامانه‌های عبوری از این موانع است. کوهستان زاگرس یکی از رشته‌کوه‌های اصلی ایران است که با جهت شمال‌غرب- جنوب‌شرق و با حداکثر ارتفاع حدود ۴۴۰۰ متر (زردکوه) تأثیر بسزایی در سامانه‌های مهاجر به کشور دارد. برای مطالعه تأثیر زاگرس در مسیر سامانه‌های چرخندی، روزهای چهاردهم تا هفدهم آپریل ۲۰۰۳ به عنوان نماینده چرخندهای بررسی شده انتخاب شد. نتایج این مطالعه شکل‌گیری چرخندی در روز دوازدهم آپریل بر روی شمال‌غرب اروپا و حرکت آن به سمت دریای مدیترانه را نشان می‌دهد. چرخند یادشده از زمان شکل‌گیری تا زمان رسیدن بر روی عراق و ادغام با سامانه سودانی تقویت می‌شود.

به هنگام نزدیک شدن به زاگرس، از تاوایی مثبت و سرعت قائم هوا در آن کاسته می‌شود و شیو تغییرات فشار در دامنه پشت به باد و رو به باد زاگرس زیاد می‌شود. همچنین، تاوایی و واگرایی در دو بخش کاملاً متفاوت می‌شود. رابطه چرخند تقویت شده با منطقه واگرایی ترازهای میانی وردسپهر در همه مراحل مشاهده شد. ناهمواری‌های زاگرس، مانند دیوار، نخست باعث تضعیف و دوقطبی شدن چرخند رسیده به ایران می‌شود؛ اما با عبور چرخندها از روی آن در قسمت بادپناهی شرایط ترمودینامیکی هوای نزول کرده باعث تقویت مجدد آن می‌شود؛ به طوری که به هنگام برخورد با ناهمواری یک هسته ضعیف در دامنه رو به باد زاگرس باقی می‌ماند و هسته دیگری با عبور از کوهستان در مناطق مرکزی کشور شکل می‌گیرد. این سامانه کم‌فشار ثانویه تشکیل شده در بخش‌های مرکزی، در ساعت‌های بعد تقویت می‌شود. در نهایت، این چرخند تقویت شده به صورت کامل از ایران خارج می‌شود. این چرخندها را چرخندهای ثانویه زاگرسی می‌توان نامید. ناحیه مرکزی ایران، به سبب محصور بودن در بین کوهستان‌ها و دوری از منابع رطوبتی، بخار آب لازم برای بارندگی را از توده‌های هوایی مرطوبی که به این بخش می‌رسد دریافت می‌کند. بنابراین، میزان بارش‌های تولید شده توسط چرخندهای ثانوی زاگرسی در این ناحیه به میزان رطوبتی بستگی دارد که این توده‌های هوا پس از عبور از زاگرس و تخلیه در دامنه غربی آن به این بخش‌ها می‌رسانند. در این مطالعه نیز الگوی مورد بررسی بیشتر رطوبت خود را در دامنه غربی زاگرس تخلیه کرده و رطوبت بسیار کمی را به این بخش‌ها فرارفت داده است. به همین دلیل، میزان بارش تولید شده در این ناحیه، با وجود شرایط صعود، بسیار کم بوده است.

در مطالعاتی که در ایران در زمینه اقلیم کوهستان انجام شده بیشتر به نقش رشته‌کوه‌های زاگرس در ایجاد تغییر ساختاری چرخندها توجه شده است (مرادی و همکاران، ۱۳۸۷؛ خلج، ۱۳۸۱؛ سلطان‌زاده و همکاران، ۱۳۸۶). بر اساس نتایج این تحقیق، تأثیر زاگرس در تغییرات ساختاری چرخندها تأیید می‌شود. در این پژوهش به عبور چرخند اولیه از زاگرس و تشکیل چرخند ثانویه زاگرسی نیز پرداخته شده است. نتایج مشابه در مطالعه اوهاندری و بوزارت (۱۹۹۶: ۱۳۵۳) بر روی جبهه‌های سرد و چرخندهای عبوری از روی کوه‌های آپالاش غرب مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد بیشتر چرخندها بعد از عبور از کوهستان‌های آپالاش دوباره توسعه می‌یابند.

منابع

- احمدی گیوی، ف. و نجیبی فر، ی. (۱۳۸۳). مطالعه چرخندزایی در پشت به باد کوه‌های آلپ و اثر آن بر آب و هوای خاورمیانه برای دوره یک‌ساله، *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۳۰(۲): ۱۹-۱.
- خلج، ع. (۱۳۸۱). تحلیلی بر تأثیر رشته‌کوه زاگرس روی سیستم‌های سینوپتیکی مؤثر بر اقلیم ایران مرکزی، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.
- سلطان‌زاده، ا.؛ احمدی گیوی، ف. و ایران‌نژاد، پ. (۱۳۸۶). بررسی سه‌ماهه تأثیر رشته‌کوه‌های زاگرس بر جریان‌های میان‌مقیاس منطقه شرق زاگرس با استفاده از مدل منطقه‌ای RegCM. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۳۳(۱): ۳۱-۵۰.
- علیزاده، ا.؛ آزادی، م. و علی‌اکبری بیدختی، ع. (۱۳۸۷). بررسی رشته‌کوه البرز در تقویت سامانه‌های هم‌دید، *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۳۴(۱): ۲۴-۹.
- مرادی، م.؛ مشکواتی، ا.ح.؛ آزادی، م. و علی‌اکبری بیدختی، ع. (۱۳۸۷). شبیه‌سازی عددی نقش کوهستان در یک سامانه بارش‌زا روی ایران، *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۳۴(۱): ۲۵-۴۴.
- Ahmadi Givi, F. and Najibifar, Y. (2004). The study of Cyclones on lee of the Alps mountains and its effect on the Middle East climate for the one-year period, *The Journal of the Earth and Space Physics*, 30(2):1- 19.
- Alizadeh, A.; Azady, M. and Aliakbary Bidokhrt, A. (2008). Survey Alborz mountain range in strengthening synoptic systems, *The Journal of the Earth and Space Physics*, 34(1): 9-24.
- Alizadeh, T.; Azizi, Gh.; Moheflhojah, A. and Khoshakhlagh, F. (2017). Identification of the spatial-temporal variations of the intense cyclonic in the Mediterranean, with a numerical algorithm, *The Journal of the Earth and Space Physics*, 42(2): 405- 417.
- Barry, R.G. (1992). *Mountain Weather and Climate*, Third Edition, Cambridge University Press.
- Dacare, F. and Gray, S.L. (2009). The Spatial Distribution and Evolution Characteristics of North Atlantic Cyclones, *Monthly Weather Review*, 137:99-115.
- Doyle, J.D. and Durran, R.D. (2002). The dynamics of mountain-wave induced rotors, *J. Atmos. Sci.*, 59: 186-201.
- Ferrero, E.; Longhetto, A.; Briatore, L.; Chabert d'Hieres, G.; Didelle, H.; Giraud, C. and Gleizon, P. (2002). A laboratory simulation of mesoscale flow interaction with the Alps, *Dynamics of Atmosphere and Oceans*, 35: 1-25.
- Hayes, J.L.; Williams, R.T. and Rennick, M.A. (1987). Lee cyclogenesis. Part I, Analytic studies, *J. Atmos. Sci.*, 44, 432-442.
- Horvath, K.; Fita, L.; Romero, R.; Ivancan-Picek, B. and Stiperski, I. (2006). Cyclogenesis in the lee of the Atlas Mountains: a factor separation numerical study, *Advances in Geosciences*, 7: 327-331.
- Iordanidou, V.; Koutroulis, A.G. and Tsanis, I.K. (2015). Mediterranean cyclone characteristics related to precipitation occurrence in Crete, Greece, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15: 1807-1819.
- Khalaj, A. (2002). An Analysis on the Impact of Zagros Mountain Range on Synoptic Systems Affecting Central Iran Climate, P.H.D thesis, Tarbiyat Modares University.
- Lionello, P.; Malanotte-Rizzoli, P.; Boscolo, R.; Alpert, P.; Artale, V.; Li, L.; Luterbacher, J.; May, W.; Trigo, R.; Tsimplis, M.; Ulbrich, U.; and Xoplaki, E. (2006). *The Mediterranean climate: An overview of the main characteristics and issues*, *Developments in Earth and Environmental Sciences*, 4, 1-26.

- Maheras, P.; Flocas, H.A.; Patrikas, I. and Anagnostopoulou, CHR (2001). A 40 Year Objective Climatology of Surface Cyclones in the Mediterranean Region: Spatial and Temporal Distribution, *Int. J. Climatol.*, 21: 109-130.
- Morady, M.; Meshkati, A.H.; Azadi, M.; Aliakbary Bidokhti, A. (2008). *Numerical simulation of the impact of orography on active synoptic weather systems over Iran*, Journal of Earth and Space Physics, 34(1): 25-44.
- Newton, C.W. (1956). Mechanisms of Circulation Change During a Lee Cyclogenesis, *Journal of Meteorology*, 13: 528- 539.
- O'Handley, C. and Bosart, L. (1996). The Impact of the Appalachian Mountains on Cyclonic Weather System. Part I: A Climatology, *Monthly Weather Review*, 124: 1353-1373.
- Petterssen, S. (1956). *Weather Analysis and Forecasting*, Vol. 1, Motion and motion systems, Mc Graw-Hill, New York, 428 pp.
- Reitan, C. (1974). Frequencies of cyclones and cyclogenesis for North America, 1951-1970: *Mon. Wea. Rev.*, 102: 861-868.
- Simpson, R, Isla, Seager, Richard, Shaw, A, Thffany and Ting, Mingfang (2015), Mediterranean Summer Climate and the Importance of Middle East Topography, *Journal of Climate*, 28, 1977-1996.
- Soltanzadeh, A.; AhmadyGivy, F.; Irannezhad, P. (2007). Three Months Investigation of the Effect of the Zagros Range on Mesoscale Streams of the Eastern Zagros Region Using the RegCM Regional Model, *Journal of Earth and Space Physics*, 33(1): 31-50.
- Tibaldi, S. and Buzzi, A. (1983). Effect of orography on Mediterranean lee cyclogenesis and its relationship to European blocking, *Tellus*, 35A: 269-286.
- Wang, Xiaolan L.; Feng, Y.; Compo, G.P.; Swail, V.R.; Zwiers, F.W.; Allan R.J. and Sardeshmukh, P.D. (2013). Trends and low frequency variability of extra-tropical cyclone activity in the ensemble of twentieth century reanalysis, *Clim Dyn*, 40: 2775-2800.
- Wang, L.X.; Swail, V. R. and Zwiers, F.W. (2006). Climatology and Changes of Extratropical Cyclone Activity: Comparison of ERA-40 with NCEP–NCAR Reanalysis for 1958–2001, *Journal of Climate*, 19: 3145-3166.
- Zaitchik, B.F.; Evans, J.P. and Smith, R.B. (2007). Regional impact of an elevated heat source: The Zagros Plateau of Iran, *J. Climate*, 20: 4133-4146, doi:10.1175/JCLI4248.1.
- Zarrin, A.; Ghaemi, H.; Azadi, M.; Mofidi, A. and Mirzaei, E. (2011). The effect of the Zagros Mountains on the formation and maintenance of the Iran anticyclone using RegCM4, *Meteor. Atmos. Phys.*, 112: 91-100.
- Zhu, X.; Sun, J.; Liu, Z.; Liu, Q.; Martin, J. (2007). A Synoptic Analysis of the Interannual Variability of Winter Cyclone Activity in the Aleutian Low Region, *Journal of Climate*, 20: 1523–1538.
- Ziska, K.M. and Smith, P.J. (1980). The climatology of cyclones and anticyclones over North America and surrounding ocean environs for January and July, 1950-1977, *Mon. Wea. Rev.*, 108: 387-401.