

Investigating the Effect of Zagros Mountains Range on Sudanese Rainfall Changes in Western Iran

Mehrdad Kiani ^{1*}, Hasan Lashkari ², Houshang Ghaemi ³

¹ PhD Student of Synoptic Climatology, Earth Sciences Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

² Associate Professor of Climatology, Earth sciences Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

³ Professor of Meteorology, Atmospheric Science & Meteorological Research Center, Tehran, Iran

Abstract

Zagros Mountains range as the most important face of topography in western Iran can affect the activity of precipitation systems in addition to the effect of orography on the occurrence of precipitation. The objective of this paper is to analyze the enhancing effect of the Zagros Mountains on the Sudanese system. For this purpose, three one-day rainfall samples including December 2, 1999, March 30, 2012, and March 20, 2015 were selected and analyzed using factor analysis among one-day Sudanese rainfall systems during the period from 1996 to 2017. The method used was synoptic analysis of atmospheric parameters and rainfall interpolation model in GIS environment. This study demonstrated that the warm air stream and contact of the Sudanese system with the western and southwestern slopes of Zagros reduced the geo-potential height and formatted a positive vorticity field. Positive vorticity blow to the southeast and inland slopes of Zagros caused upward movements on these slopes. At higher levels of atmosphere, cold air blow in adjacent to warm air blow area of lower levels of atmosphere reduced the geo-potential height of the atmosphere and enhanced the upward movement of the atmosphere. Thus, suitable thermodynamic conditions were provided for the growth and reinforcement of convective clouds and heavy rainfall over the topography surface. In this study, it was found that in all the studied rainfall samples, entrance direction of the system and humidity to region has followed from width and length of wave in middle layer of atmosphere. The results showed that the maximum precipitation was observed in the slopes located in direction of Sudanese rainfall system entrance. Also, precipitation changes on steep slopes of Zagros were also greater than other levels.

Key words: Zagros, Sudanese, Precipitation, Direction, Topography.

واکاوی اثر رشته‌کوه‌های زاگرس بر تغییرات بارش‌های سودانی در غرب ایران

مهرداد کیانی^{*}، دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی سینوپتیک، گروه علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

حسن لشکری، دانشیار گروه اقلیم‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

هوشنگ قائمی، استاد هواشناسی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

وصول: ۱۳۹۸/۰۳/۲۵ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۰، صص ۴۰-۱۷

چکیده

رشته‌کوه‌های زاگرس به‌مثابه مهم‌ترین چهره ناهمواری در غرب ایران علاوه بر اثر کوهساری بر وقوع بارش‌ها، بر فعالیت سامانه‌های بارشی نیز تأثیرگذارند. هدف اصلی مقاله حاضر، تحلیل اثر تقویت‌کننده کوه‌های زاگرس بر سامانه سودانی است. برای این منظور با روش تحلیل عاملی از بین بارش‌های یک‌روزه سودانی در طول دوره ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۷، سه نمونه بارش یک‌روزه ۲ دسامبر ۱۹۹۹، ۳۰ مارس ۲۰۱۲ و ۲۰ مارس ۲۰۱۵ انتخاب و بررسی شد. روش مطالعه‌شده، استفاده از تحلیل همبندی عناصر جو و مدل درون‌یابی بارش در محیط GIS بوده است. این مطالعه نشان داد وزش دمایی گرم و برخورد سامانه سودانی به دامنه‌های غربی و جنوب غربی زاگرس سبب کاهش ارتفاع ژئوپتانسیل و شکل‌گیری میدان تاوایی مثبت شده است. وزش تاوایی مثبت به سمت دامنه‌های جنوب شرقی و داخلی زاگرس نیز موجب تقویت حرکات صعودی در این دامنه‌ها شده است. در ترازهای بالاتر جو، وزش دمایی سرد در مجاورت با منطقه وزش دمایی گرم سطوح زیرین به کاهش ارتفاع ژئوپتانسیل تراز میانی جو انجامیده و حرکات صعودی هوا را تقویت کرده و شرایط مناسب ترمودینامیکی برای رشد و تقویت ابرهای همرفتی و بارش شدید بر سطح ناهمواری‌های منطقه فراهم شده است. در این پژوهش مشخص شد در همه نمونه‌ها جهت ورود سامانه و رطوبت به منطقه از دامنه و طول موج ناوه میانی جو پیروی کرده است. نتایج نشان داد بیشینه بارش‌ها در دامنه‌های واقع در مسیر ورود سامانه دیده شده است. همچنین تغییرات بارش بر شیب‌های تند زاگرس بیشتر از سطوح دیگر بوده است.

واژه‌های کلیدی: زاگرس، سودانی، بارش، جهت، ناهمواری.

مقدمه

تغییرات مکانی بارش به‌طور وسیع در مجاورت قلمروهای کوهستانی روی می‌دهد. بارش عموماً در اشکال کوهستانی خود با جریان‌های صعودی هوا تقویت می‌شود. الگوی بارش مناطق کوهستانی پیچیدگی خاص خود را دارد. الگوی بارش در مناطق کوهستانی متأثر از روابط متقابل ناهمواری و گردش جوی با صعود کوهستانی و آثار سایه‌بارانی است (Baker Perry, 2006: 35). مقادیر بارش در عرض‌های میانی کره زمین عموماً با ارتفاع افزایش می‌یابد. این افزایش به آثار کوهساری وابسته است که جریان هوا را به صعود از قلمرو کوهستانی وامی‌دارد (Barry, 1992: 1305; Basist, 1994: 71). رشته‌کوه‌های عمده دنیا از قبیل آند، آلپ، هیمالیا، راکی، اطلس، البرز و زاگرس به‌طور مشخصی بر شرایط جوی میان‌مقیاس و همدیدی تأثیرگذارند. کوهستان‌ها از راه‌های مختلف بر گردش عمومی جو تأثیر می‌گذارند؛ یکی از این راه‌ها، آثار مکانیکی آنهاست؛ زیرا نبود قلمروهای کوهستانی جریان بادهای برخوردکننده با آنها را تغییر می‌دهد؛ راه دیگر اینکه رشته‌کوه به‌مثابه منبعی برای انتقال و افزایش گرما عمل می‌کند و این زمانی است که سطح زمین انرژی را با گرمای محسوس و نهان گسیل می‌کند.

پیشینه پژوهش

رشته‌کوه‌ها بر فعالیت توده‌های هوا و سامانه‌های فشار تأثیر می‌گذارند. در تعدادی از مطالعات علمی انجام‌شده درباره تأثیر و نفوذ کوهستان و ناهمواری بر بارش بحث شده است. این مطالعات روابط متقابل بین متغیرهای بارش، نمادهای ناهمواری از قبیل

ارتفاع، شیب، فاصله از دریا، جهت و متغیر عرض جغرافیایی را با استفاده از مدل رگرسیون گسترش داده‌اند.

یوهانسون و همکاران^۱ (۲۰۰۳) اثر باد و ناهمواری را بر بارش در سوئد با مدل رگرسیون بررسی کردند. انتوالی و همکاران^۲ (۲۰۱۶) در پژوهشی مشخص کردند کاهش در میزان ناهمواری به کاهش در مقادیر بارش منجر می‌شود.

واویز و بويس^۳ (۲۰۰۱) اثر آلپ‌های فرانسه را بر بارش سنگین با مدل رگرسیون آشکارسازی کرده‌اند. آنها در مطالعه خود مشخص کردند متغیر فاصله تا دریا بیش از سایر متغیرها بر وقوع بارش تأثیرگذار بوده است.

در مطالعات دیگر رابطه هرکدام از عوامل ناهمواری با بارش نشان داده شده است. باسیست و همکاران^۴ (۱۹۹۴) در پژوهش خود بیان کردند جهت، مهم‌ترین عامل توپوگرافی در توزیع بارش بوده است.

سوبیانی^۵ (۲۰۰۰) در مطالعه موردی درباره بارش و ناهمواری در شبه‌جزیره عربستان اعتقاد دارد همبستگی بین بارش فصلی و ارتفاع به‌طور کامل برای همه فصل‌های سال در این منطقه واضح نیست.

پژوهشگرانی مانند ولتینگ و همکاران^۶ (۲۰۰۰)، ناینیرولا و همکاران^۷ (۲۰۰۰) و گودال و همکاران^۸

¹ Johansson et al

² Ntwali et al

³ Weisse & Bois

⁴ Bassist et al

⁵ Soubiani

⁶ Wolting

⁷ Ninyerola

⁸ Goodale

سویی زیر نفوذ سامانه‌های آب‌وهوایی منطقه برون‌حاره قرار دارد، بارش در این منطقه به مکانیسم‌های بارش کوهستانی و روابط بین ناهمواری و سامانه‌های بارشی وابسته است. یکی از سامانه‌های عامل وقوع بارش‌ها در غرب ایران، سیستم کم‌فشارهای منطقه سودان و دریای سرخ است. به نقش این الگو در وقوع بارش‌های غرب ایران در بسیاری از منابع داخلی اشاره شده است.

محمدي و همکاران (۱۳۹۱) سامانه‌های سودانی را به‌مثابه کم‌فشارهایی معرفی می‌کنند که در مناطق اطراف دریای سرخ، سودان و اتیوپی تشکیل و پس از تکوین با عبور از مسیر جنوب غرب ایران سبب وقوع بارش‌های شدید در جنوب غرب و غرب ایران می‌شوند.

عساکره و همکاران (۱۳۹۵) بیشترین گسترش این سیستم‌های کم‌فشار را در ماه‌های آبان و آذر می‌دانند. محل تکوین سامانه سودانی، منطقه همگرایی دریای سرخ است.

لشکری (۱۳۷۹) در مطالعه خود به نقش سیستم‌های سینوپتیک دوره سرد سال اشاره کرده که سبب ایجاد جریان‌های جنوب و جنوب شرق در نیمه جنوبی و جریان‌های هوایی شمال و شمال غرب در نیمه شمالی شده است. همین فرایند باعث ایجاد همگرایی جریان‌ها روی دریای سرخ و تکوین مکانیسم منطقه همگرایی دریای سرخ شده است. در ارتباط با فعالیت سیستم کم‌فشار سودانی و دریای سرخ، نقش الگوهای ترازهای بالاتر جو نیز مهم است. موقری و خسروی (۱۳۹۳) در بررسی‌های خود درباره ارتباط کم‌فشار سودانی با بارش کرمانشاه در غرب ایران به این نتیجه رسیدند که با استقرار ناوه

(۱۹۹۸) نیز، از مدل رگرسیون برای بررسی رابطه بارش و عوامل محلی و توپوگرافی استفاده کرده‌اند. در کنار شرایط کوهساری، رشته‌کوه‌ها باعث ایجاد تغییرات دینامیکی جریان هوای صعود کرده به سمت ترازهای فوقانی جو می‌شوند. مک‌گینلیز^۱ (۱۹۸۲) نقش تاوایی افقی هوا را در تقویت چرخند در پشت به باد کوه‌های آلپ مطالعه کرد.

مرکین^۲ (۱۹۷۵) در پژوهش خود به این نتیجه رسید که ناهمواری به تقویت شرایط ناپایداری غیرایستایی در مناطق پشت به باد کمک می‌کند. او اعتقاد دارد جریان باد غربی با شرایط پایداری ایستایی در پشت به باد کوهستان به یک جریان ناپایدار غیرایستایی از هوا تبدیل و به چرخندزایی منجر می‌شود.

در مطالعه‌ای کانون و همکاران^۳ (۲۰۱۷) دریافتند شرایط توپوگرافی هموار گردش چرخندهای منطقه برون‌حاره را تقویت می‌کند و بر بارش کوهستانی تأثیر می‌گذارد.

از سویی موسکاتیلو و همکاران^۴ (۲۰۰۷) در پژوهش خود تعیین کرده‌اند کوههای اطلس به‌مثابه یک منبع ناهمواری در تغییرات چرخندها بر جنوب غربی ایتالیا تأثیرگذارند.

همچنین باتس^۵ (۱۹۹۰) در پژوهش‌های خود نشان داد کوهستان راکی چرخندگی مطلق را برای چرخندهای منطقه افزایش داده است.

از آنجایی که منطقه غرب ایران به سبب وجود توده کوهستانی زاگرس، تنوع ناهمواری دارد و از

¹ Macginley

² Merkiane

³ Cannon et al

⁴ Moscatello et al

⁵ Bates

مدیترانه در ترازهای بالایی جوّ روی ترکیه و عراق و قرارگیری منطقه غرب ایران در قسمت جلوی آن و با همراهی کم‌فشار سودانی در سطح زمین، شرایط برای شروع بارش در غرب ایران فراهم شده است.

لشکری و خلیلیان (۱۳۹۱) در مطالعه خود به وجود ناهای با دامنه بلند در ترازهای میانی و بالایی جوّ اشاره کرده‌اند که سبب فعال‌شدن کم‌فشار سودانی می‌شود. رطوبت سامانه سودانی از راه دریاهای گرم عرض‌های پایین همانند دریای عمان و عرب تأمین می‌شود.

مفیدی و زرین (۱۳۸۴) مشخص کردند پشته مستقر در شرق عربستان و دریای عرب در تراز میانی جوّ با ایجاد الگوی گردش و اچرخندی روی دریای عمان و دریای عرب، نقش اصلی را در تغذیه رطوبتی سامانه‌های سودانی دارد؛ بنابراین محتوای رطوبتی سامانه سودانی از راه دریاهای واقع در عرض‌های پایین جغرافیایی تأمین می‌شود.

رشته‌کوه زاگرس به‌مثابه مانعی طبیعی در مسیر ورود این سامانه قرار می‌گیرد و بخش عمده‌ای از رطوبت فرارفت‌شده از سمت منطقه سودان و دریاهای نزدیک آن به شکل بارش در محدوده ناهمواری‌های زاگرس تخلیه می‌شود. از سویی رشته‌کوه زاگرس، مهم‌ترین چهره ناهمواری در غرب ایران و یک عامل مهم تأثیرگذار در شرایط آب‌وهوایی غرب ایران است. در بعضی از منابع آب‌وهواشناسی روابط متقابل بین ناهمواری‌های زاگرس با فعالیت سامانه‌های همدیدی و وقوع بارش بررسی شده است؛ ازجمله زرین و همکاران^۱ (۲۰۱۱) به اهمیت اثر زاگرس بر گردش

منطقه‌ای هوا اشاره کرده‌اند. این اثر به شکل‌گیری گردش چرخندی در جوّ زیرین و در فصل تابستان مربوط است.

علیجانی^۲ (۲۰۰۸) در پژوهش خود تأکید کرده است در دوره سرد سال بیشینه بارش در جهت غربی کوه‌های زاگرس، همبستگی بین بارش و توپوگرافی را نشان داده است.

زایتچیک و همکاران^۳ (۲۰۰۷) در پژوهش خود نشان دادند آلودگی موجود روی زاگرس به کاهش الگوی فرونشینی هوا منجر می‌شود که با گردش هدلی ایجاد شده است.

بارث و اشتینکول^۴ (۲۰۰۴) نقش کوه‌های زاگرس را در شکل‌گیری چرخندی روی عراق نشان دادند که به وقوع بارش در بخش‌هایی از عربستان منجر شده است.

در مطالعه سیمپسون و همکاران^۵ (۲۰۱۵) درباره اقلیم خاورمیانه بیان شده است کوه‌های زاگرس گردش هوا را تا ارتفاعی از تروپوسفر تغییر می‌دهند و نقشی مهم در تعیین اقلیم خاورمیانه دارند. این نقش زاگرس زمانی است که یک سیستم کم‌فشار به‌صورت جریانی شرقی در تابستان و به علت گرمایش تراکمی قاره آسیا به کوه‌های زاگرس برخورد می‌کند.

در مطالعه حاضر چگونگی نفوذ جریان گرم و مرطوب سامانه سودانی و برخورد آن با ناهمواری‌های زاگرس و همچنین چگونگی نفوذ جریان نم و یژه و ناپایداری به نواحی غربی ایران به‌ویژه با بررسی میدان

^۲ Alijani

^۳ Zaitchik et al

^۴ Barth & Shtinchool

^۵ Simpson et al

^۱ Zarrin et al

تاوایی و فرارفت نم ویژه در غرب ایران تحلیل می‌شود.

روش‌شناسی پژوهش

داده‌های استفاده‌شده

داده‌های استفاده‌شده در این مطالعه متشکل از مشاهدات اندازه‌گیری‌شده بارش روزانه ۲۲ ایستگاه سینوپتیک در غرب ایران (شکل ۲) و داده‌های جوّی روزانه پایگاه NCEP/NCAR شامل پارامترهای ارتفاع ژئوپتانسیل (Hgt)، حرکات قائم جوّ (Omega)، دمای هوا (Air)، نم ویژه (Specific Humidity)، ترکیب مؤلفه‌مداری و مؤلفه نصف‌النهاری (Stream) در ترازهای استاندارد ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال جوّ برای شبکه‌ای جغرافیایی با مقیاس ریزنمایی (رزولوشن) ۲/۵ در ۲/۵ درجه در محدوده عرض‌های ۱۰ تا ۵۰ درجه شمالی و طول‌های ۱۰ تا ۷۰ درجه شرقی است که غرب ایران، بخشی از آن را تشکیل می‌دهد.

بارش اندازه‌گیری ایستگاه‌ها شامل داده‌های بارش روزانه در دوره ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۷ میلادی است. این دوره آماری، طولانی‌ترین دوره آماری در غرب ایران است که بیشترین تعداد ایستگاه سینوپتیک در طول آن، آمار بارش ثبت‌شده و کامل داشته است.

روش مطالعه

در این پژوهش از روش تحلیل سینوپتیکی داده‌های جوّی و درونیابی داده‌های بارش در محیط GIS به‌منظور بررسی رخداد بارش یک‌روزه سودانی استفاده شده است. نخست براساس این ملاک که دست‌کم نیمی از ایستگاه‌ها رخداد بارش ثبت‌شده

دارند، بارش یک‌روزه به تعداد ۲۷۴ مورد در طول کل دوره تعیین شد. با آزمون Runtest در نرم‌افزار SPSS مشخص شد داده‌های بارش در سطح معناداری ۰/۹۵، توزیع همگن داشته‌اند. در ادامه میانگین بارش ایستگاه‌ها برای همه بارش‌های یک‌روزه تعیین شد. با نرم‌افزار SPSS و روش دهک‌ها، داده‌های میانگین بارش یک‌روزه در دهک‌های اول تا دهم قرار گرفت. در مجموع تعداد ۲۶ بارش از بارش‌های یک‌روزه با دامنه میانگین بارش ۹ تا ۲۸ میلی‌متر در دهک بالا یا دهم قرار گرفتند که بارش‌های سنگین را شامل می‌شدند؛ علاوه بر اینها، نقشه‌های فشار تراز دریا برای ۲۶ بارش روزانه با داده‌های فشار پایگاه NCCP\NCAR و نرم‌افزار GRADS تهیه و به روش کیفی و مشاهداتی الگویابی سامانه‌های عامل بارش انجام و مشخص شد الگوی بارشی ۱۲ بارش از ۲۶ بارش یک‌روزه از نوع سودانی بوده است. برای تعیین بهترین الگوی مناسب سودانی در محیط نرم‌افزار SPSS، یک ماتریس به ابعاد ۱۲ در ۹۵۷ تشکیل شد. هرکدام از ۱۲ بارش یک‌روزه به‌مثابه یک متغیر در نظر گرفته و ۹۵۷ پیکسل یا داده فشار برای این متغیرها تعریف شد. با استفاده از تحلیل عاملی و چرخش واریماکس مشخص شد سه عامل اصلی ۷۲ درصد واریانس داده‌ها را تبیین کرده‌اند. عامل اول با حدود ۲۶ درصد بیشتر از سایر عوامل در واریانس داده‌ها نقش داشته است (جدول ۱).

هرکدام از تاریخ‌های بارش یک‌روزه به‌مثابه یک متغیر در عامل اول، یک وزن یا اثر عاملی داشته است. متغیرها یا بارش‌های ۲ دسامبر ۱۹۹۹ میلادی با میانگین بارش ۱۵ میلی‌متر و وزن عاملی ۰/۹۰۶، ۳۰ مارس ۲۰۱۲ با میانگین بارش ۹/۳ میلی‌متر و وزن

عاملی ۰/۸۴۵ و ۲۰ مارس ۲۰۱۵ با میانگین بارش ۱۷/۶۱ میلی‌متر و وزن عاملی ۰/۷۴۲، به ترتیب بیشترین وزن یا همبستگی را با عامل اول داشته‌اند (جدول ۲). این عوامل براساس داده‌های فشار مشخص شده و درحقیقت عامل اول، پرتکرارترین مقادیر فشار را در شرایط وقوع بارش‌های سودانی داشته است؛ بارش‌های نام‌برده بیشترین همبستگی را با این عامل داشته و به‌مثابه نمونه‌هایی از سامانه‌های

بارشی سودانی در این پژوهش تحلیل شده‌اند. در این مطالعه چرخش عوامل به‌منظور افزایش بار عاملی عوامل کم‌اثرتر و این موضوع اعمال شده است که متغیرها در هر عامل بیشترین وزن یا بار عاملی را داشته باشند. وزن یا بار عاملی عبارت است از همبستگی بین متغیرها با عوامل که رقمی بین +۱ و -۱ را نشان می‌دهد.

جدول ۱. میزان واریانس تبیین‌شده با عوامل در بارش‌های یک‌روزه سودانی

عوامل	بار عاملی	پراش	پراش تجمعی	بار عاملی با چرخش	پراش با چرخش	پراش تجمعی با چرخش
عامل اول	۳/۸۱۲	۳۱/۷۶۵	۳۱/۷۶۵	۳/۱۰۲	۲۵/۸۴۷	۲۵/۸۴۷
عامل دوم	۳/۰۶۴	۲۵/۵۳۰	۵۷/۲۹۵	۲/۸۱۳	۲۳/۴۴۱	۴۹/۲۸۸
عامل سوم	۱/۸۰۰	۱۴/۹۹۹	۷۲/۲۹۴	۲/۷۶۱	۲۳/۰۰۷	۷۲/۲۹۴

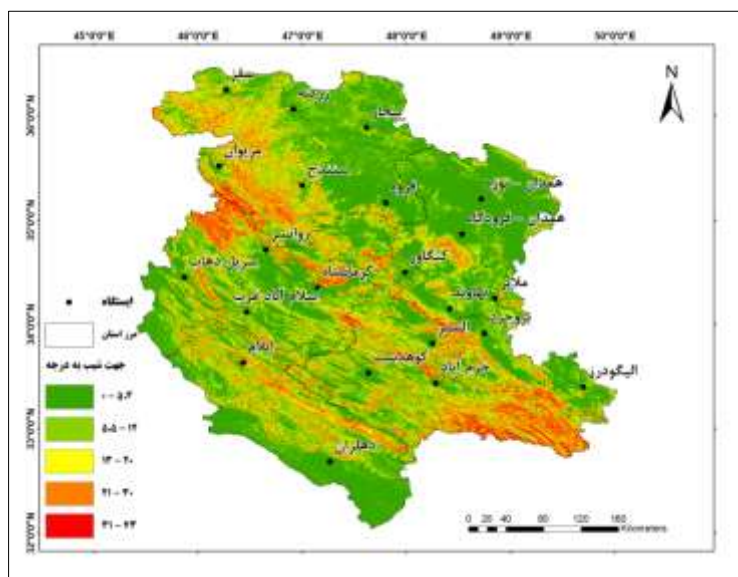
جدول ۲. میزان اثر عاملی یا وزن هر متغیر در عامل اول در حالت چرخشی

متغیر (بارش یک‌روزه)	وزن یا اثر عاملی	میانگین بارش (mm)	متغیر (بارش یک‌روزه)	وزن یا اثر عاملی	میانگین بارش (mm)
اول (۲۱ فوریه ۱۹۹۶)	-۰/۰۴۸	۱۳/۲۱	هفتم (۱ نوامبر ۲۰۰۸)	۰/۵۹۵	۹/۴۴
دوم (۲ دسامبر ۱۹۹۹)	۰/۹۰۶	۱۵/۰۱	هشتم (۳۰ نوامبر ۲۰۰۸)	-۰/۰۷۳	۲۲/۱۳
سوم (۸ نوامبر ۱۹۹۹)	-۰/۱۱۹	۲۸/۶	نهم (۳۰ مارس ۲۰۱۲)	۰/۸۴۵	۹/۳
چهارم (۱۸ فوریه ۲۰۰۱)	۰/۶۵۳	۱۰/۶۴	دهم (۱۸ ژانویه ۲۰۱۴)	-۰/۱۰۵	۹/۵۶
پنجم (۳۱ مارس ۲۰۰۴)	-۰/۱۶۵	۲۱/۱۷	یازدهم (۷ مارس ۱۹۹۷)	۰/۳۱۹	۱۲/۰۸
ششم (۱ می ۲۰۰۴)	۰/۲۷۳	۱۰/۸۰	دوازدهم (۲۰ مارس ۲۰۱۵)	۰/۷۴۲	۱۷/۶۱

پس از تعیین سامانه‌های سودانی مطالعه‌شده، از نقشه‌های ترکیبی فرارفت رطوبت و ارتفاع ژئوپتانسیل، وزش دمایی و تندی باد و تاوایی و تندی باد و نقشه‌های حرکات قائم (امگا) برای بررسی اثر دینامیکی زاگرس روی فعالیت این سامانه استفاده شده است. در این مطالعه با استفاده از تحلیل درونیابی کریجینگ در محیط GIS، نقشه توزیع بارش روز مدنظر تهیه شد؛ همچنین نقشه‌های ترکیبی توزیع نم ویژه و امگا در

ترازهای ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال، نقشه ترکیبی شیب منطقه و منحنی‌های هم‌بارش ترسیم شد. با توجه به اینکه ایستگاه‌های مطالعه‌شده در جهات شیب مختلف رشته‌کوه‌های زاگرس قرار دارند (شکل ۱)، برای مطالعه نقش جهت کوه‌های زاگرس بر تغییرات بارش، ۸ جهت اصلی و فرعی در نظر گرفته شد. ایستگاه‌هایی که در یک جهت مشابه نسبت به زاگرس قرار داشتند، در یک گروه یا جهت قرار

گرفتند و میانگین بارش این ایستگاه‌ها به مثابه بارش آن جهت شیب زاگرس تعیین شد. به این ترتیب نمودار توزیع بارش در جهات مختلف رشته‌کوه زاگرس ترسیم شد.



شکل ۱. جهت شیب ناهمواری‌های زاگرس در غرب ایران

جدول ۳. میانگین بارش نمونه‌های بارش سودانی ایستگاه‌های واقع در جهت‌های شیب کوه‌های زاگرس

جهت جغرافیایی	ایستگاه	میانگین بارش		
		۲۰ دسامبر ۱۹۹۹	۳۰ مارس ۲۰۱۲	۲۰ مارس ۲۰۱۵
شمال (N)	زربینه اوباتو	۳/۱	۶	۳
شمال شرقی (NE)	بیجار، سنندج	۴/۱۵	۱۴/۲۵	۹/۷۰
شرق (E)	قروه، همدان - نوژه، الیگودرز	۸/۳۳	۱۵/۷۳	۱۴/۷۶
جنوب شرقی (SE)	همدان - فرودگاه، کنگاور، نهاوند، ملایر، بروجرد	۲۱/۸۴	۸/۶۰	۲۴/۰۶
جنوب (S)	کرمانشاه، خرم‌آباد، الشتر، کوهدشت	۳۰/۲۵	۷/۶۵	۲۱/۶۲
جنوب غربی (SW)	دهلران	۲۴	۰	۲۹
غرب (W)	مریوان، روانسر، سرپل، اسلام‌آباد غرب، ایلام	۷/۴	۷/۹۲	۱۵
شمال غربی (NW)	سقز	۲/۷	۱۱	۱۰

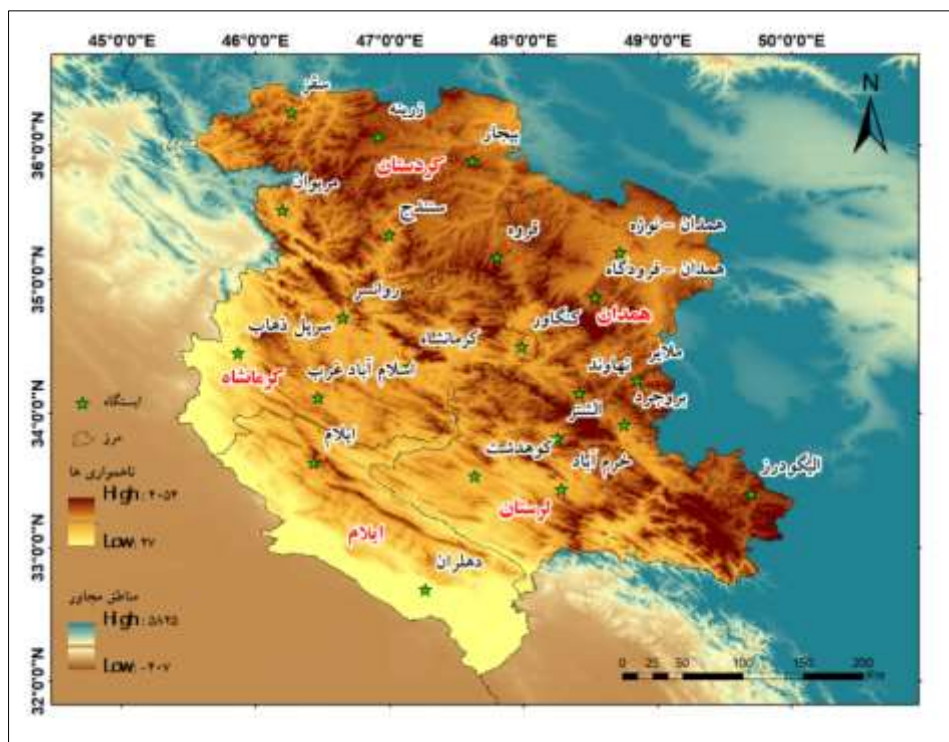
منطقه پژوهش

منطقه مطالعه‌شده برای این پژوهش، محدوده رشته‌کوه‌های زاگرس در غرب ایران شامل تمام نواحی استان‌های همدان، کردستان، کرمانشاه، ایلام و لرستان است. این منطقه، محدوده ویژه‌ای برای مطالعه روابط بین بارش و برجستگی‌های طبیعی به علت

ویژگی‌های آب‌وهوایی و ناهمواری‌های آن است که بارش فصلی دوره سرد سال و بارش کوهستانی دارد و ارتفاع ناحیه از سطح دریا در بخش‌هایی از آن (بخش شرقی) به بیش از ۴۰۰۰ متر نیز می‌رسد. روند عمومی ناهمواری‌های زاگرس و رشته‌کوه‌های آن، امتداد شمال غربی به جنوب شرقی دارد.

یافت می‌شود؛ جایی که ارتفاع رشته‌کوه‌های بزرگ به بیش از ۳۰۰۰ متر می‌رسد (شکل ۲).

بزرگ‌ترین و پیوسته‌ترین ارتفاعات در محدوده زاگرس شکسته در استان‌های همدان، کردستان و شرق لرستان



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی و وضعیت ناهمواری‌های زاگرس در غرب ایران

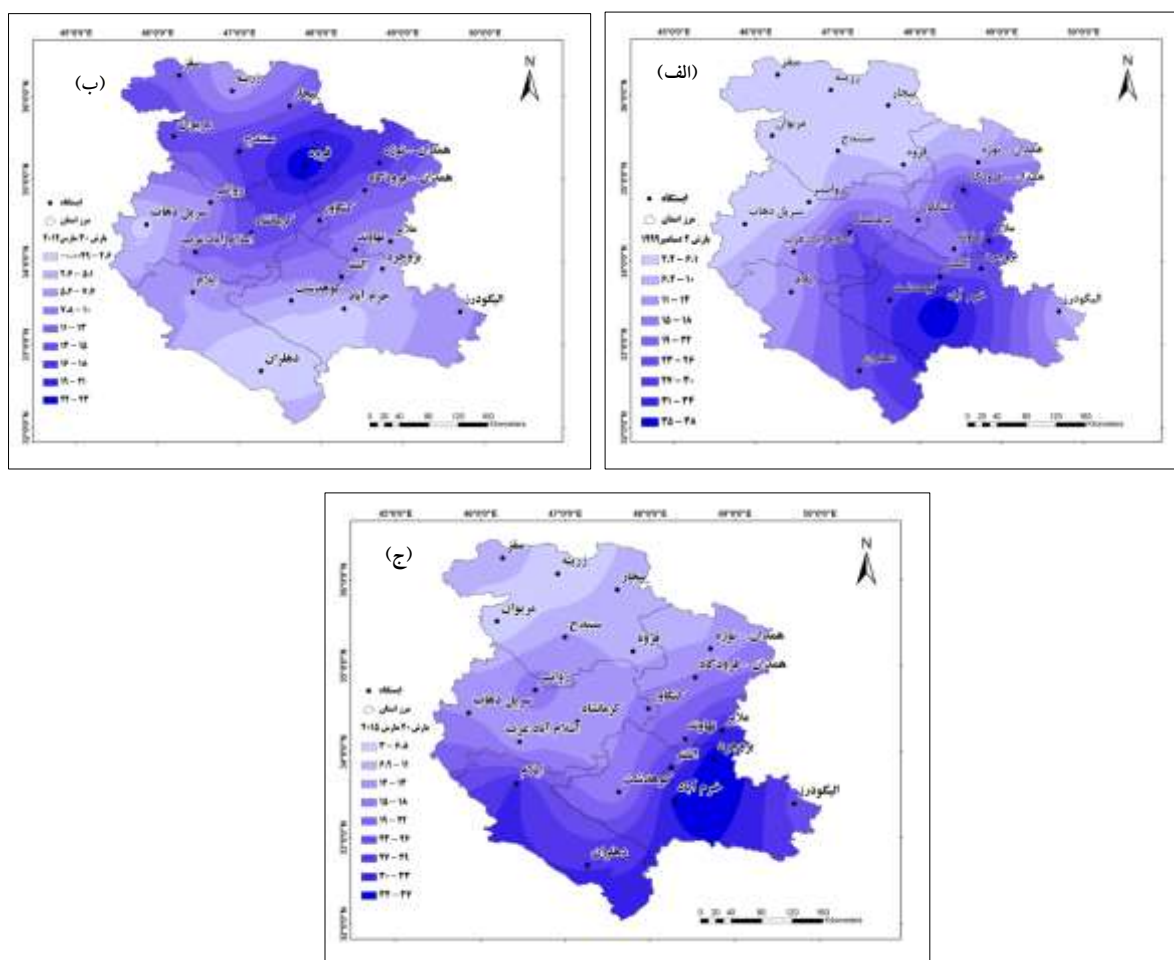
بارش‌ها، در بخش دامنه‌های شمال شرقی زاگرس قرار دارد. بخش‌های جنوبی و جنوب غربی بارش کمتری داشته‌اند.

شکل (۳-ج) توزیع بارش ۳۰ مارس ۲۰۱۵ را بر سطح نواحی غربی ایران نشان می‌دهد. همان‌طور که روی شکل دیده می‌شود، بخش‌های جنوب شرقی و جنوبی از بیشینه بارش‌ها برخوردار بوده‌اند. هسته اصلی بارش‌ها روی منطقه بروجرد و نواحی پیرامون آن شامل خرم‌آباد، الشتر و نهاوند قرار دارد. در مجموع در هر سه نمونه بارش‌های سودانی، کمینه بارش‌ها در بخش شمالی دیده می‌شود.

یافته‌های پژوهش

توزیع بارش بر سطح منطقه

تحلیل درونیابی کریجینگ برای نمونه بارش سودانی ۲ دسامبر ۱۹۹۹ میلادی (شکل ۳-الف) نشان می‌دهد بیشینه بارش‌های روزانه در استان‌های غربی ایران در بخش جنوب شرقی روی داده و به سمت شمال غربی از شدت بارش‌ها کاسته شده است. هسته اصلی این بارش‌ها، منطقه خرم‌آباد و کوه‌دشت در سمت دامنه‌های جنوبی زاگرس بوده است. در نمونه دوم یعنی بارش ۳۰ مارس ۲۰۱۲ (شکل ۳-ب)، بیشینه بارش‌ها در بخش شمال شرقی، شرقی و مرکزی منطقه دیده می‌شود. قروه، هسته اصلی بیشینه



شکل ۳. توزیع درونیابی کریجینگ بارش‌های سودانی در غرب ایران؛ نمونه‌های بارشی ۲ دسامبر ۱۹۹۹، ۳۰ مارس ۲۰۱۲ و ۲۰ مارس ۲۰۱۵ میلادی

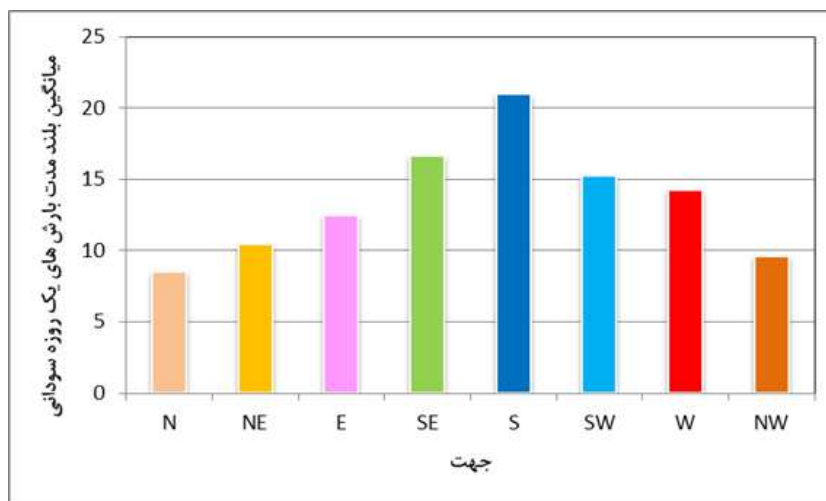
توزیع فراوانی بارش در جهات مختلف کوهستان زاگرس

فراوانی میانگین بلندمدت بارش‌های یک‌روزه سودانی (۱۹۹۶-۲۰۱۷) نشان می‌دهد تجمع بیشینه بارش‌ها در جهت جنوبی و سپس جهات جنوب شرقی و جنوب غربی زاگرس روی داده است (شکل ۴). (شکل ۵)، توزیع فراوانی بارش را در جهات مختلف رشته‌کوه‌های زاگرس براساس موقعیت جغرافیایی ایستگاه و به‌ویژه محل قرارگیری آنها در دامنه‌های مختلف ناهمواری‌های زاگرس نشان می‌دهد.

در نمونه بارشی ۲ دسامبر ۱۹۹۹ (شکل ۵- الف)، فراوانی بارش‌ها برای محدوده بین جهات جغرافیایی ۱۳۵ تا ۲۲۵ درجه محاسبه شده است؛ به بیان دیگر رخداد بیشینه بارش‌ها در دامنه‌های رو به باد جنوب شرقی، جنوب و جنوب غربی زاگرس شکل گرفته است. این پراکنش جغرافیایی از بارش‌ها ممکن است به جهت ورود سامانه سودانی و مسیر فرارفت نم و ویژه آن به منطقه مرتبط باشد که در ادامه پژوهش بررسی می‌شود. در نمونه بارشی ۳۰ مارس ۲۰۱۲ (شکل ۵- ب)، فراوانی بارش‌ها بیشتر بین جهات جغرافیایی

(شکل ۵-ج) همانند نمونه اول، فراوانی بارش‌ها در محدوده بین جهات جغرافیایی ۱۳۵ تا ۲۲۵ درجه روی داده است.

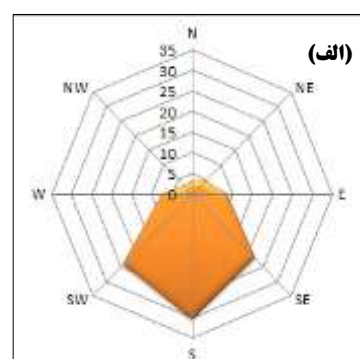
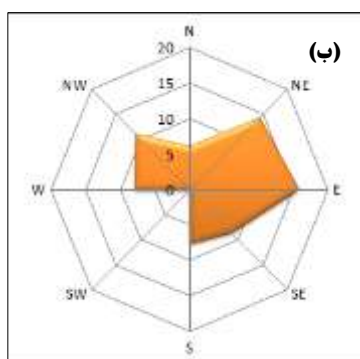
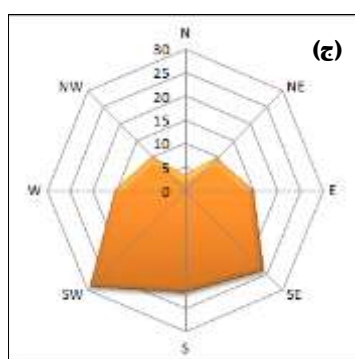
۴۵ درجه تا ۱۳۵ درجه دیده شده است؛ جایی که بیشتر شیب‌های رو به شرق و شمال شرقی زاگرس را شامل می‌شود. در بارش ۲۰ مارس ۲۰۱۵



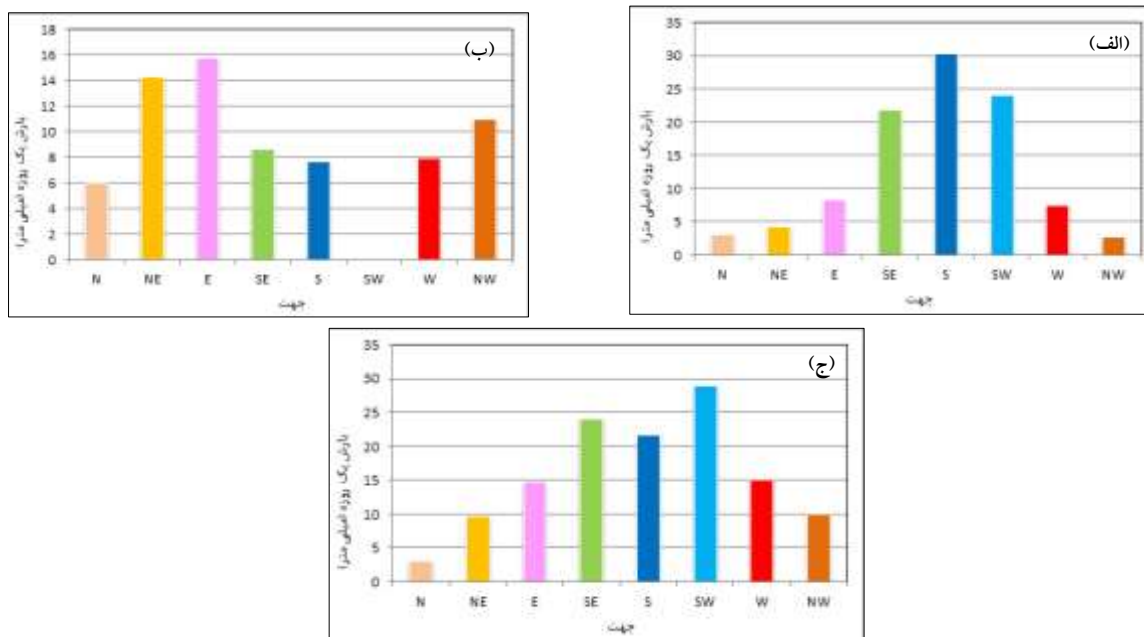
شکل ۴. نمودار فراوانی میانگین بلند مدت بارش‌های یک‌روزه سودانی ایستگاه‌های غرب ایران (۱۹۹۶-۲۰۱۷) در جهات مختلف زاگرس

است. کمینه فراوانی بارش‌ها هم مربوط به جهت شمالی بوده است.

برمبنای شکل (۶)، به‌طور میانگین در هر سه نمونه، فراوانی چشمگیری از بارش‌های سودانی در دامنه‌های جنوبی و جنوب شرقی زاگرس دیده شده



شکل ۵. نمودار توزیع فراوانی الگوهای بارش ۲ دسامبر ۱۹۹۹، ۳۰ مارس ۲۰۱۲ و ۲۰ مارس ۲۰۱۵ میلادی در جهات هشتگانه جغرافیایی غرب ایران براساس موقعیت ایستگاه‌ها نسبت به دامنه‌های زاگرس



شکل ۶. نمودار فراوانی میانگین مقدار بارش ایستگاه‌های غرب ایران در جهات مختلف جغرافیایی؛ نمونه‌های بارشی ۲ دسامبر ۱۹۹۹ (الف)، ۳۰ مارس ۲۰۱۲ (ب) و ۲۰ مارس ۲۰۱۵ (ج)

تحلیل دینامیکی

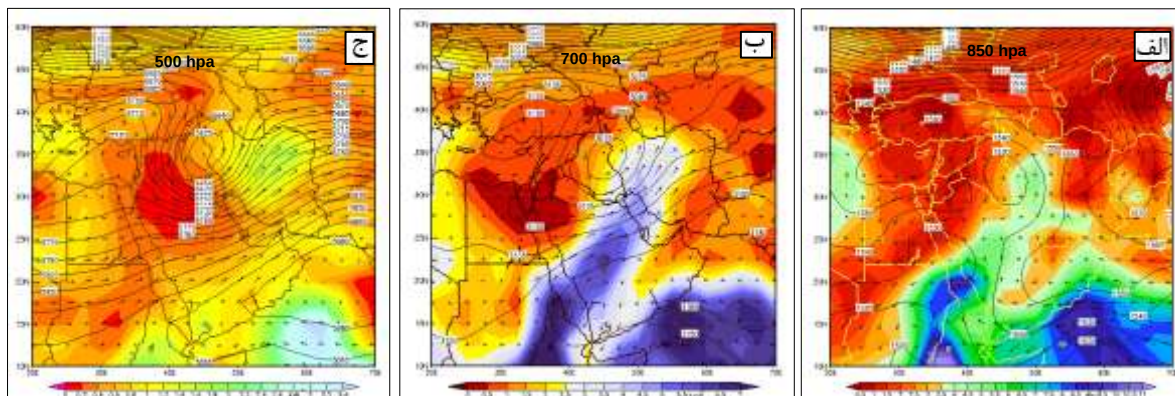
الگوی فرارفت نم ویژه و ارتفاع ژئوپتانسیل

نقشه ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل و فرارفت رطوبت برای بارش ۲ دسامبر ۱۹۹۹ میلادی (شکل ۷)، شکل‌گیری یک مرکز کم‌فشار را بر غرب رشته‌کوه‌های زاگرس نشان داده است. از سویی فرارفت جریان نم ویژه از سمت سودان به سمت نواحی غربی ایران انجام شده است. نقشه‌های ترکیبی ترازهای ۷۰۰ (شکل ۷-ب) و ۵۰۰ (شکل ۷-ج) هکتوپاسکال جو، استقرار ناوه بادهای غربی را بر منطقه مطالعه‌شده نشان داده است. این آرایش از استقرار الگوها در ترازهای مختلف جو بیان‌کننده وجود شرایط ناپایداری در روز وقوع بارش در نواحی غربی ایران بوده است. در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۷-ب)، فرارفت جریان نم ویژه از سمت سودان و منطقه دریای سرخ به سمت شمال و غرب

ایران رخ داده است. بر این اساس در این تراز، منطقه غرب ایران زیر نفوذ یک جریان مرطوب جنوبی قرار گرفته است. در این تراز، حرکت جریان رطوبت از سمت دریای عرب در جنوب شبه‌جزیره عربستان آغاز شده است. این جریان نخست مسیر شرق به غرب داشته که پس از رسیدن به موقعیت دریای سرخ و منطقه سودان به دلیل استقرار مرکز کم‌فشار در این منطقه، جریان رطوبت حالت همگرایی پیدا کرده است. نقشه ترکیبی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نشان داده است روی جنوب عربستان و دریای عرب، یک جریان واچرخندی گسترده شکل گرفته که چرخش پیکان‌های هوا در اطراف این مرکز در جهت موافق حرکت عقربه‌های ساعت بوده است؛ بنابراین جریان رطوبت از سمت دریای عرب به طرف غرب در جهت حرکت ساعت‌گرد این پرفشار تا منطقه دریای سرخ و سودان کشیده شده است. روی نقشه‌های

شمال شرقی - جنوب شرقی داشته است. حرکت چرخندی مخالف حرکت عقربه‌های ساعت در امتداد این ناوه باعث انتقال جریان رطوبت از سمت دریای سرخ به طرف نواحی غربی ایران شده است (شکل ۷-ب و ج).

۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال، بیشترین مقادیر نم ویژه روی دریای سرخ دیده شده است؛ همچنین در ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال، ناوه عمیق مدیترانه از سمت نواحی غربی ایران تا منطقه دریای سرخ و سودان کشیده شده است. محور آن امتداد



شکل ۷. نقشه‌های ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل و فرارفت نم ویژه در ترازهای ۸۵۰ (الف)، ۷۰۰ (ب) و ۵۰۰ (ج) هکتوپاسکال نمونه بارشی ۲ دسامبر ۱۹۹۹

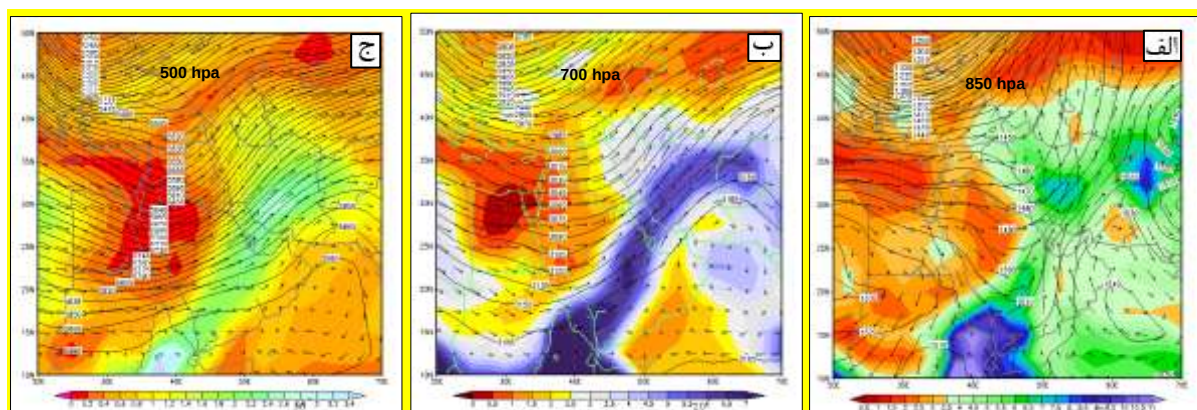
در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۸-ج) مشاهده می‌شود مقدار نم ویژه نسبت به نمونه اول در این تراز افزایش داشته است. هم طول و هم دامنه موج بادهای غربی روی ایران گسترش جالب توجهی داشته و همین به گسترش جریان نم ویژه سامانه سودانی در ترازهای زیرین جو کمک کرده است. امتداد شمال غربی - جنوب غربی ناوه سبب شده است ایستگاه‌های دامنه غربی زاگرس بیشتر متأثر از جریان واگرایی لایه میانی جو قرار گیرند و بارش اندکی داشته باشند. در این نمونه از بارش‌ها، هسته مرکزی ناوه فاصله زیادی با نواحی غربی ایران داشته و از این جهت با نمونه اول متفاوت است.

در نمونه سوم بارش‌ها یعنی بارش ۲۰ مارس ۲۰۱۲، در ترازهای ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال

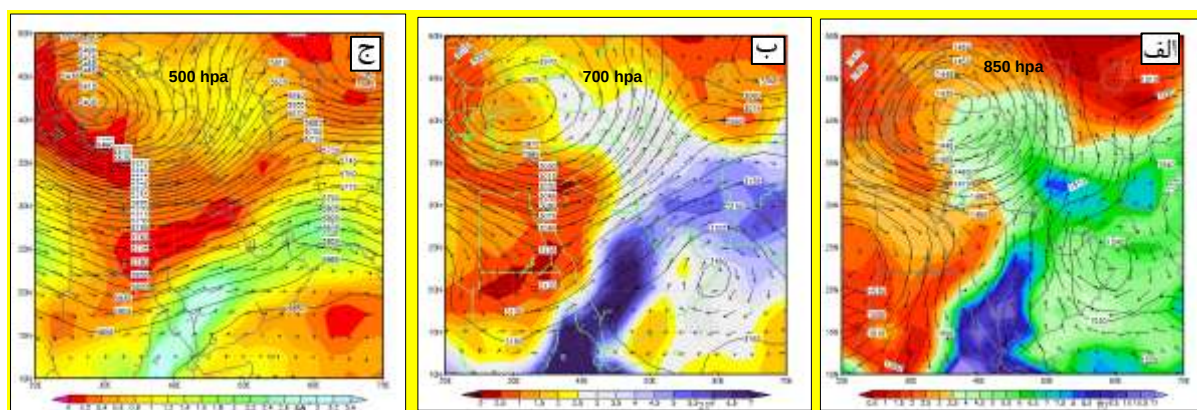
در نمونه دوم یعنی بارش ۳۰ مارس ۲۰۱۲، در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (شکل ۸-الف)، جریان رطوبت سامانه سودانی به سمت نواحی شمال غربی ایران تغییر مسیر داده و مساحت بیشتری از غرب و شمال غربی ایران زیر نفوذ ناپایداری و رطوبت قرار گرفته است. رخداد بیشینه بارش‌ها در ایستگاه‌های شمال شرقی زاگرس به دلیل همین تغییر مسیر فرارفت رطوبت به سمت شمال غربی ایران بوده است. الگوی حرکت سامانه و فرارفت رطوبت از سمت دریاها گرم عرض‌های پایین مشابه نمونه اول است. در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۸-ب) بیشینه فرارفت نم ویژه به سمت شمال شرقی ایران گسترش یافته است؛ زیرا موقعیت واچرخند عربستان به سمت شرق جابه‌جا شده است.

طول موج بادهای غربی مساحت زیادی از ایران زیر نفوذ جریان رطوبت سطوح زیرین جو بوده است.

(شکل ۹- الف و ب)، همانند نمونه دوم بارش‌ها، مکانیسم فرارفت رطوبت همانند نمونه‌های اول و دوم است؛ اما همانند نمونه دوم به دلیل گستردگی دامنه و



شکل ۸. نقشه‌های ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل و فرارفت نم ویژه در ترازهای ۸۵۰ (الف)، ۷۰۰ (ب) و ۵۰۰ (ج) هکتوپاسکال نمونه بارشی ۳۰ مارس ۲۰۱۲



شکل ۹. نقشه‌های ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل و فرارفت نم ویژه در ترازهای ۸۵۰ (الف)، ۷۰۰ (ب) و ۵۰۰ (ج) هکتوپاسکال نمونه بارشی ۲۰ مارس ۲۰۱۵

صورت گرفته است. در هر سه نمونه بارشی، جهت ورود سامانه به‌ویژه فرارفت نم ویژه از شکل، امتداد و گسترش طولی و عرضی ناوه تراز میانی جو پیروی کرده است.

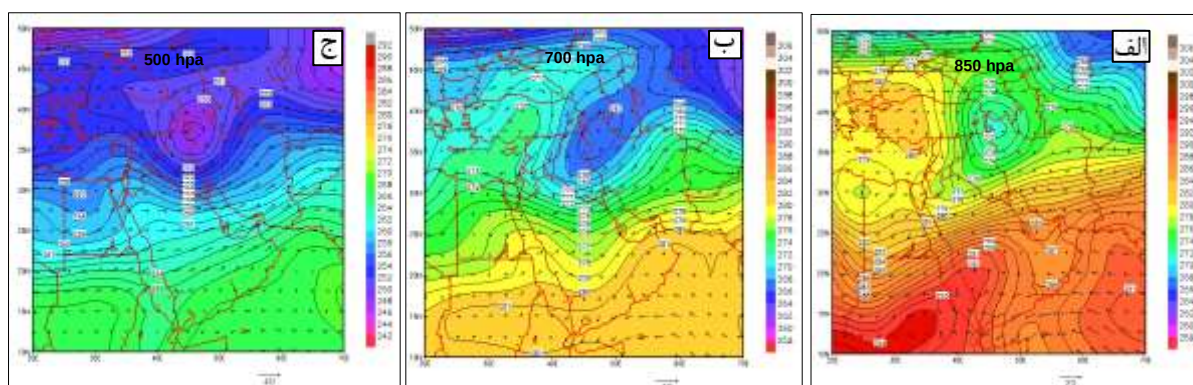
همانند نمونه اول در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۹- ج)، هسته مرکزی ناوه در نزدیکی مرزهای غربی ایران قرار داشته است. غرب ایران در بخش شرقی و جنوب شرقی محور ناوه قرار داشته و به دلیل گسترش عرضی هسته مرکزی ناوه، فرارفت جریان نم ویژه سطوح زیرین به منطقه از سمت جنوب به شمال

الگوی جریان هوا و وزش دمایی

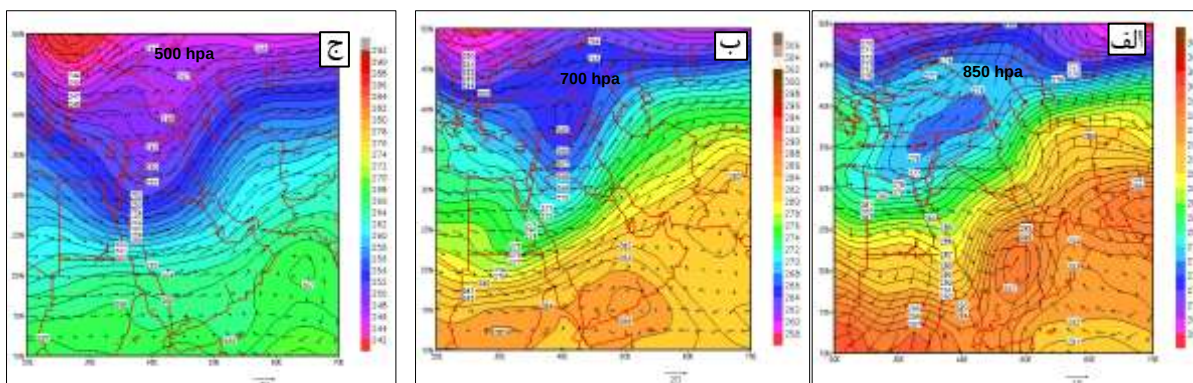
با بررسی نقشه‌های ترکیبی جریان هوا و وزش دما مشخص می‌شود سامانه سودانی در ترازهای زیرین جو ماهیت دمایی گرم داشته است. در هر سه نمونه، وزش دمایی گرم به سمت نواحی غربی ایران مشاهده می‌شود. در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال برای بارش ۲ دسامبر ۱۹۹۹ (شکل ۱۰)، مقدار دما روی منطقه تشکیل سامانه کم‌فشار سودانی نسبت به نمونه بارشی ۳۰ مارس ۲۰۱۲ (شکل ۱۱) و نمونه بارشی ۲۰ مارس ۲۰۱۲ (شکل ۱۲) افزایش بیشتری را نشان داده است. در این نمونه‌ها در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال وزش هوای

گرم از سمت عرض‌های پایینی به‌ویژه از سمت دریای عرب و منطقه سودان به سمت دامنه‌های جنوبی زاگرس در غرب ایران کشیده شده است. از سویی ریزش هوای سرد از سمت شمال در ترازهای بالاتر بر بیشتر بخش‌های شمالی منطقه پژوهش تأثیر گذاشته و بخش‌های جنوبی زیر نفوذ جریان گرم و مرطوب سودانی بوده است.

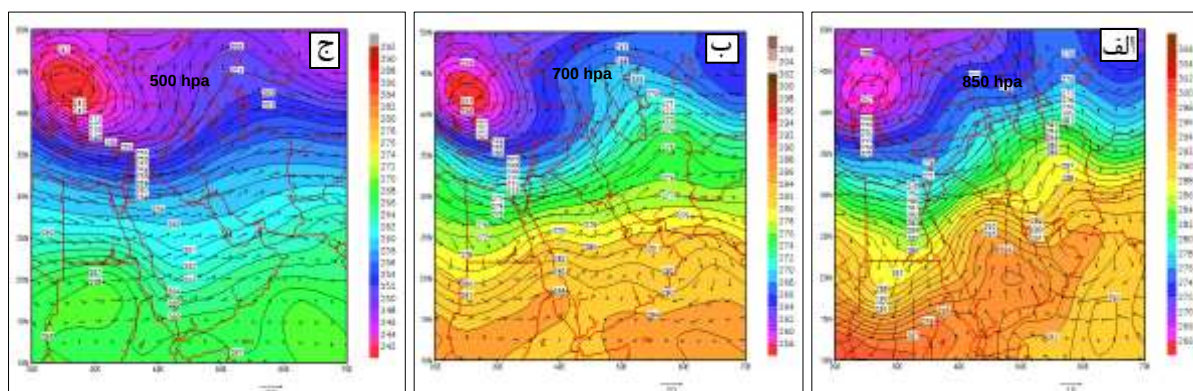
در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال وزش جریان گرم سودانی به منطقه تضعیف شده که نشان می‌دهد فعالیت این سامانه بیشتر متوجه تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال جو است.



شکل ۱۰. نقشه‌های ترکیبی وزش دمایی و جریان باد در ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال؛ بارش ۲ دسامبر ۱۹۹۹



شکل ۱۱. نقشه‌های ترکیبی وزش دمایی و جریان باد در ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال؛ بارش ۳۰ مارس ۲۰۱۲



شکل ۱۲. نقشه‌های ترکیبی وزش دمایی و جریان باد در ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال؛ بارش ۲۰ مارس ۲۰۱۵

الگوی میدان تاوایی

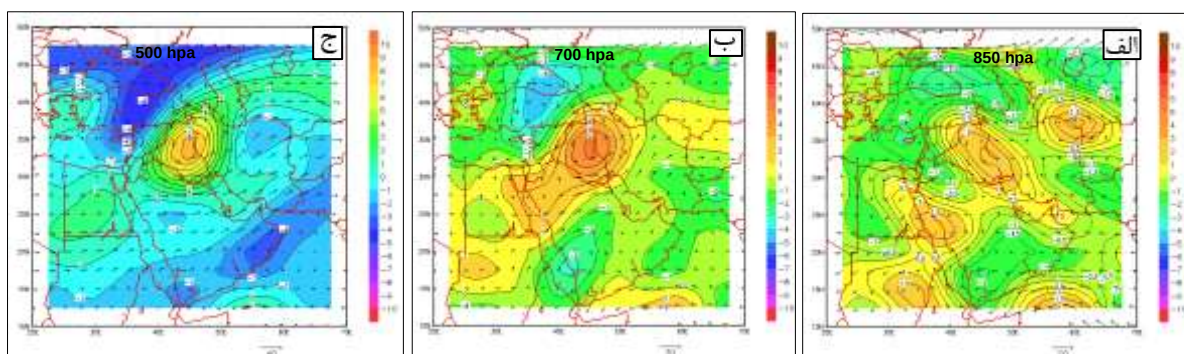
تاوایی، یکی از متغیرهای کلیدی در صعود هواست. همان‌طور که مشاهده شد در زمان رخداد بارش‌های مطالعه‌شده سودانی، وزش دمایی گرم در سطوح زیرین از سمت منطقه دریای سرخ و سودان به سمت غرب ایران روی داد. بر این اساس وزش دمایی گرم در جهت عمودی موجب افت ارتفاع ژئوپتانسیل در دامنه‌های غربی زاگرس در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال شده است. همچنین مشخص شد با افزایش ارتفاع در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، دمای هوا کاهش یافته و وزش دمایی گرم تضعیف شده است و همین موجب افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل در سطوح میانی جو و منفی شدن تاوایی می‌شود؛ اما در مجاورت وزش دمایی گرم سطوح زیرین و نامتقارن با آن، وزش دمایی سرد از سمت شمال غربی ایران به سمت جنوب غربی مشاهده شد که سبب افت ارتفاع ژئوپتانسیل به سمت سطح زمین و در نتیجه افت ارتفاع تراز میانی جو می‌شود؛ بنابراین در تراز میانی روی جریان سرد سطحی، مقادیر تاوایی مثبت و روی جریان گرم سطحی، تاوایی منفی شکل می‌گیرد؛ از این رو حرکات صعودی در تراز میانی جو به سبب وجود

میدان تاوایی مثبت در مجاورت میدان تاوایی منفی تقویت می‌شود؛ زیرا وجود مقادیر منفی تاوایی در تراز میانی روی میدان تاوایی مثبت سطوح زیرین و کم‌فشار سطحی سبب ایجاد واگرایی فوقانی و مکش هوا از سطوح زیرین می‌شود. همین جریان واگرا در مجاورت میدان تاوایی مثبت سطوح میانی قرار دارد و سبب تقویت این میدان و افزایش حرکات شدید عمودی می‌شود؛ بنابراین همان‌طور که در نقشه‌های وزش دمایی مشخص شد، نامتقارنی میدان وزش دما، نقش مهمی در دینامیک چرخندزایی در دامنه‌های رو به باد کوه‌های زاگرس دارد.

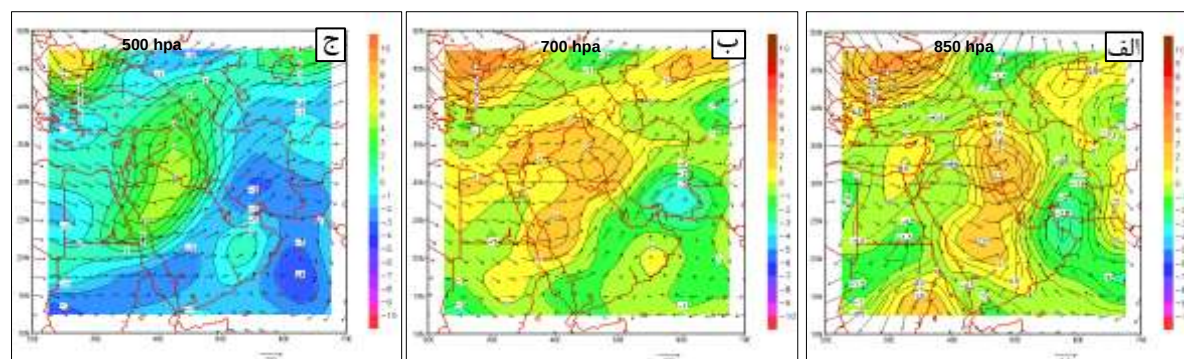
همان‌طور که در شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) دیده می‌شود، در ترازهای ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال موقعیت میدان تاوایی مثبت نسبت به سطوح زیرین اندکی به سمت شمال جابه‌جا شده است و از جنوب غربی زاگرس به غرب زاگرس و منطبق بر جریان وزش دمایی سرد سطوح زیرین قرار گرفته است. ارتفاع زیاد زاگرس سبب کاهش دما و افت ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال جو و در نتیجه تقویت تاوایی مثبت و چرخند زیرین شده است و در نهایت به تقویت سامانه کم‌فشار گرم و

در نمونه بارش ۳۰ مارس ۲۰۱۲ (شکل ۱۳)، وزش تاوایی مثبت از سمت جنوب و جنوب شرق زاگرس در نهایت همگرایی و صعود هوا را در بخش شمال شرقی زاگرس به همراه داشته است. به این دلیل در این نمونه، بیشینه بارش سودانی در بخش‌های شمال شرقی زاگرس مشاهده شده است.

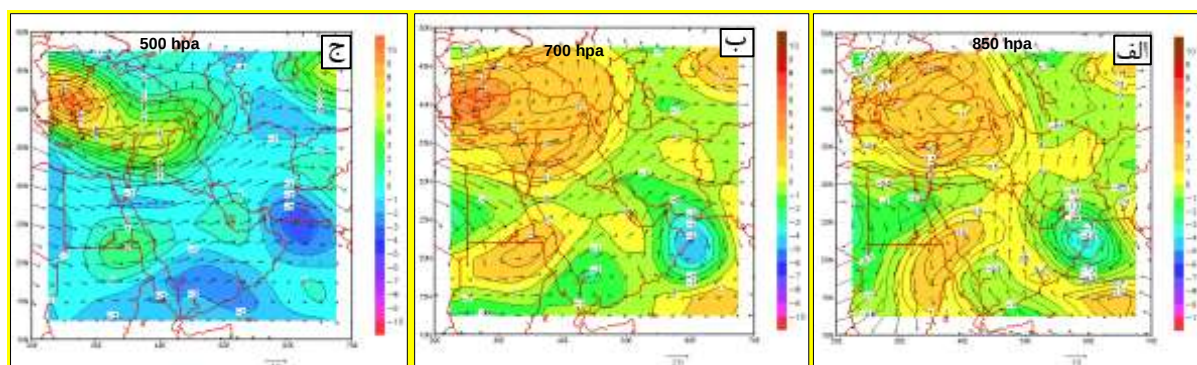
مرطوب سودانی در تراز میانی جو می‌انجامد. در مجموع در هر سه نمونه بارش سودانی، وزش تاوایی مثبت از سمت غرب و جنوب غرب زاگرس به سمت دامنه‌های جنوبی و جنوب شرقی سبب افزایش شدت حرکات عمودی و رشد ابرهای همرفتی و کومولوس در منطقه و رخداد شدت بارش‌ها در این دامنه‌ها شده است.



شکل ۱۳. نقشه‌های ترکیبی تاوایی و جریان باد در ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال؛ بارش ۲ دسامبر ۱۹۹۹



شکل ۱۴. نقشه‌های ترکیبی تاوایی و جریان باد در ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال؛ بارش ۳۰ مارس ۲۰۱۲



شکل ۱۵. نقشه‌های ترکیبی تاوایی و جریان باد در ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال؛ بارش ۲۰ مارس ۲۰۱۲

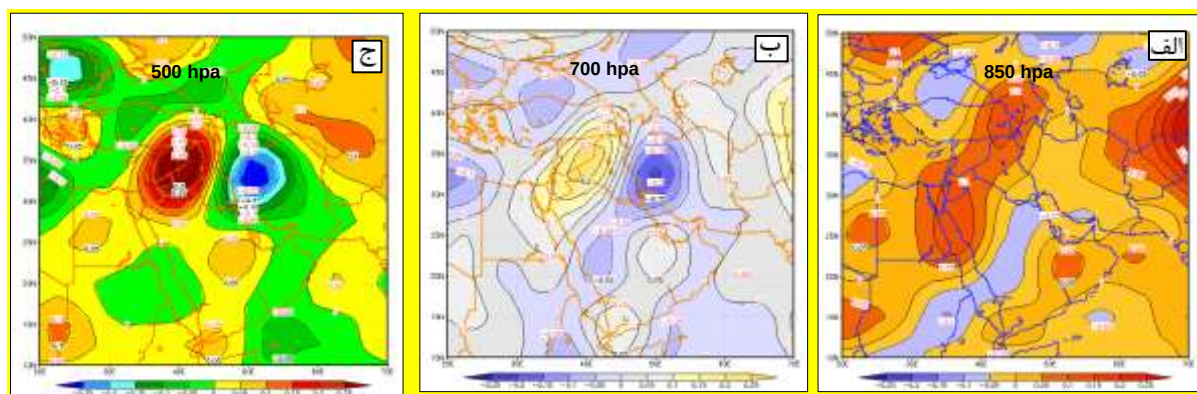
الگوی حرکات بالاسوی جو (امگا)

وزش تاوایی مثبت به شکل‌گیری حرکات صعودی در سمت پشت باد یک ناوه منجر می‌شود. هرگاه وزش هوای گرم در یک نقطه به مقدار بیشینه خود برسد، صعود هوا روی می‌دهد؛ در حالی که بیشینه هوای سرد موجب نزول هوا می‌شود. یکی از پارامترهای اصلی جو که مقدار آن نشان‌دهنده نوع حرکات عمودی است، امگا نام دارد. مقادیر منفی پارامتر امگا نشان‌دهنده حرکات صعودی و همگرایی و مقادیر مثبت آن حاکی از حرکات نزولی و واگرایی است.

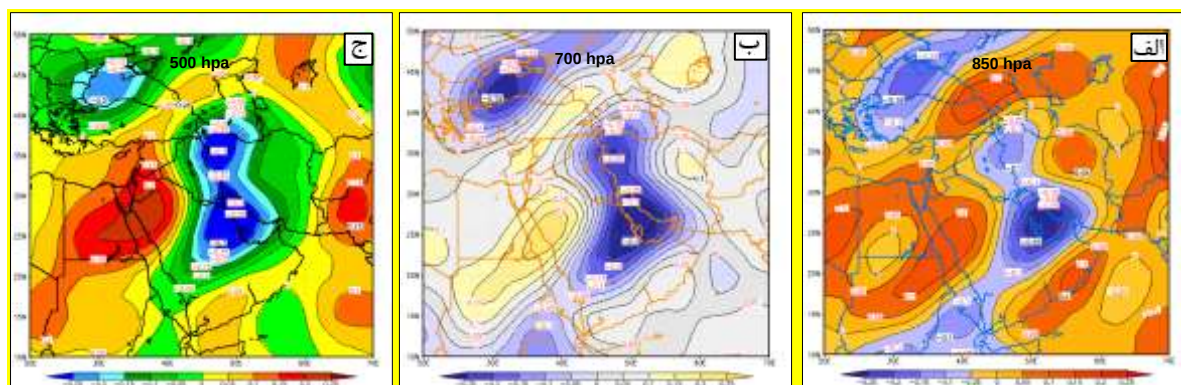
همان‌طور که در بررسی نقشه‌های تاوایی بیان شد، در سطوح زیرین جو وزش تاوایی مثبت در جنوب غربی زاگرس و در سطوح میانی در غرب زاگرس سبب وقوع حرکات صعودی به سمت دامنه‌های جنوب، جنوب شرقی و داخلی زاگرس می‌شود. بررسی نقشه‌های امگا برای سامانه بارشی ۲ دسامبر ۱۹۹۹ (شکل ۱۶) نشان می‌دهد در ترازهای مختلف بر اثر وزش تاوایی مثبت، هسته‌هایی از امگای منفی در بخش‌های شرقی و مرکزی زاگرس تشکیل شده است؛ در حالی که در غرب زاگرس مقادیر مثبت امگا شرایط نزول هوا و واگرایی را نشان می‌دهد؛ زیرا

همان‌طور که اشاره شد در این نمونه بارشی ناوه گسترش عرضی کمتری داشته و فقط بخش‌های جنوب شرقی و مرکزی زاگرس زیر منطقه پشت باد ناوه قرار داشته‌اند و شدت حرکات صعودی در این قسمت‌ها روی داده است.

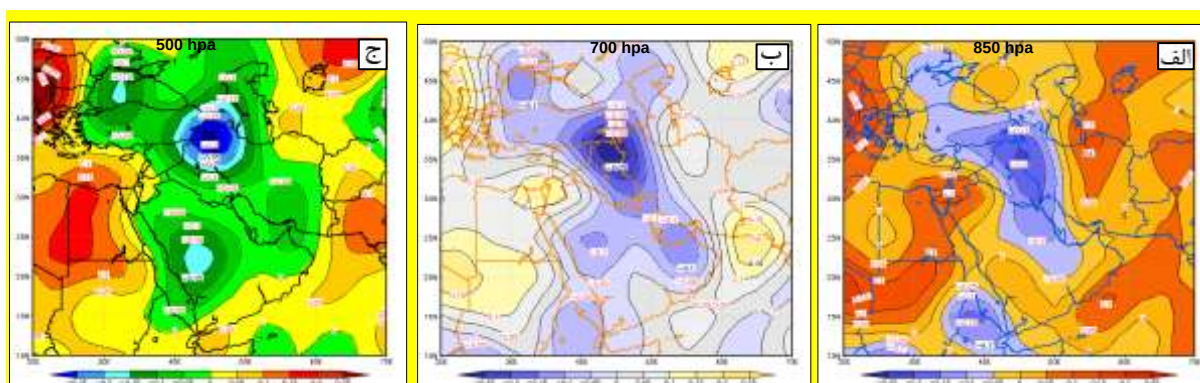
در نمونه‌های بارشی ۳۰ مارس ۲۰۱۲ (شکل ۱۷) و ۲۰ مارس ۲۰۱۵ (شکل ۱۸) به دلیل گسترش عرضی چشمگیر ناوه ترازهای میانی جو و افزایش طول و دامنه موج بادهای غربی، بیشتر مساحت منطقه در بخش جنوب شرقی محور ناوه یعنی منطقه وزش تاوایی مثبت و وقوع حرکات صعودی قرار داشته است. به این دلیل مقادیر منفی امگا بر شکل‌های (۱۷) و (۱۸) در ترازهای مختلف روی نواحی غربی ایران مشاهده می‌شود؛ زیرا وزش تاوایی مثبت به سمت منطقه پشت باد ناوه است. بیشترین رقم امگای منفی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال مشاهده می‌شود و نشان می‌دهد در این تراز سرعت حرکات بالاسو شدیدتر از سطوح پایینی بوده است؛ به‌طوری که مقادیر امگا برای این تراز در نمونه بارشی اول (شکل ۱۶)، نمونه بارشی دوم (شکل ۱۷) و در نمونه بارشی سوم (شکل ۱۸) به ترتیب به $-۰/۲۵$ ، $-۰/۳$ و $-۰/۳$ پاسکال بر ثانیه رسیده است.



شکل ۱۶. نقشه پارامتر امگا در ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال؛ بارش ۲ دسامبر ۱۹۹۹ میلادی



شکل ۱۷. نقشه پارامتر امگا در ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال؛ بارش ۲ دسامبر ۱۹۹۹ میلادی



شکل ۱۸. نقشه پارامتر امگا در ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال؛ بارش ۲۰ مارس ۲۰۱۵

منطقه از نقشه ترکیبی دو پارامتر نم و ویژه و امگا برای موقعیت جغرافیایی ۳۲ تا ۳۶ درجه عرض شمالی و ۴۵ تا ۵۱ درجه طول شرقی استفاده شده است. این مختصات، محدوده پنج استان غربی ایران و بخش‌هایی از مناطق مجاور را تشکیل می‌دهد.

با بررسی نقشه‌های ترکیبی نم و ویژه و امگا روی منطقه برای سه نمونه بارشی مشاهده می‌شود که مقدار نم و ویژه علاوه بر تغییرات عمودی، تغییرات افقی نیز دارد. مقدار نم و ویژه در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال بیش از تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال بوده است. همچنین بخش‌های نزدیک به مسیر ورود سامانه، مقدار نم و ویژه بیشتری داشته‌اند. جهت و مسیر ورود رطوبت و ناپایداری به منطقه، نقش مهمی در توزیع بارش‌ها داشته است؛ به‌طوری که در نمونه بارشی اول (شکل ۱۹)، مسیر

با افزایش حرکات صعودی هوا و آزاد شدن گرمای نهان و تراکم رطوبت، ابرهای کومه‌ای شکل لایه زیرین جو به دلیل غلبه جریان‌های بالاسوی شدید به تدریج رشد کرده و ابرهای همرفتی ضخیم‌تر و شرایط مناسبی برای ایجاد بارش‌های همرفتی و شدید فراهم شده است. به این ترتیب نقش دامنه‌های رو به باد به‌ویژه جنوب و جنوب شرقی در تشدید جریان‌های همرفتی محلی و تغییر مقدار و شدت بارش‌ها در این منطقه کاملاً توجیه‌پذیر است. در نتیجه بارش‌ها تفاوت‌های محلی شدیدی دارند.

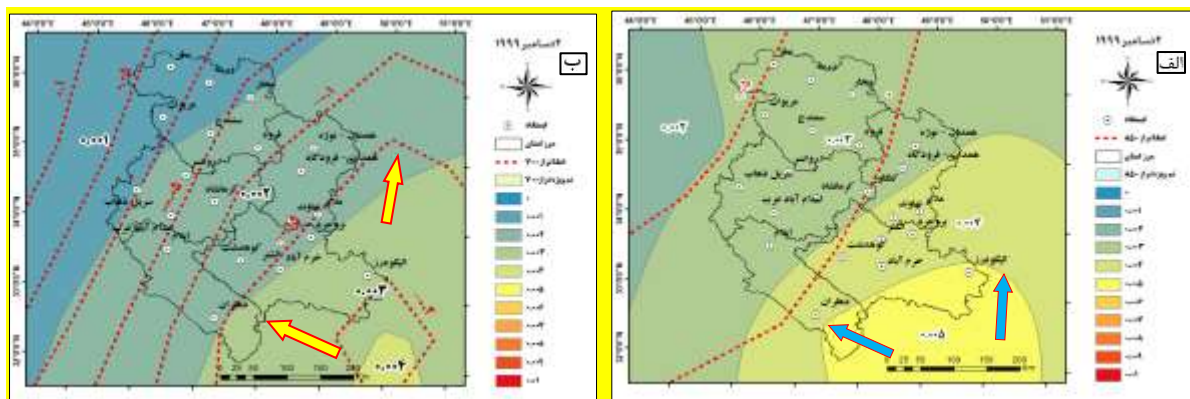
توزیع فرارفت نم و ویژه و ناپایداری روی منطقه

به‌منظور مشخص کردن جزئیات بیشتری از نحوه ورود سامانه سودانی و جریان رطوبت و ناپایداری به

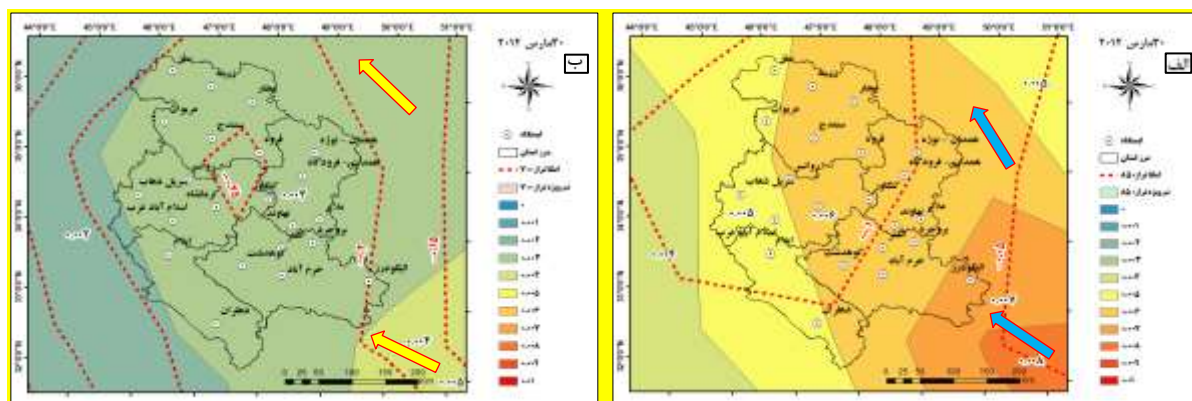
جنوب شرقی برابر با $0/2$ - پاسکال بر ثانیه، برای نمونه بارشی ۳۰ مارس ۲۰۱۵ (شکل ۲۰) در بخش مرکزی برابر با $0/25$ پاسکال بر ثانیه و برای نمونه بارشی ۲۰ مارس ۲۰۱۲ (شکل ۲۱) در بخش غربی برابر با $0/25$ - پاسکال بر ثانیه بوده است. به این ترتیب ناپایداری‌ها در مسیر ورود سامانه سودانی برای هرکدام از نمونه‌ها در منطقه شکل گرفته است. دامنه‌های رشته‌کوه زاگرس که در مسیر و هم‌جهت با سامانه بوده‌اند، بر شدت حرکات صعودی هوا افزوده‌اند؛ در حالی که دامنه‌های دور از مسیر دسترس سامانه همانند بخش‌های شمالی استان کردستان، نقشی در تقویت سامانه سودانی نداشته‌اند.

ورود سامانه از سمت جنوب و جنوب شرقی به طرف دامنه‌های جنوب شرقی و مرکزی، در نمونه بارشی دوم (شکل ۲۰) از سمت شرق و جنوب شرقی و در نمونه بارشی سوم (شکل ۲۱) از سمت جنوب و جنوب شرقی روی داده است. بیشینه مقادیر نم ویژه در همه نمونه‌ها در بخش جنوب شرقی زاگرس مشاهده شده است که برای بارش ۲ دسامبر ۱۹۹۹ برابر با ۵ گرم در هزار، برای بارش ۳۰ مارس ۲۰۱۲ برابر با ۸ گرم در هزار و برای بارش ۲۰ مارس ۲۰۱۵ نیز برابر با ۹ گرم در هزار در تراز ۸۰ هکتوپاسکال مشاهده می‌شود.

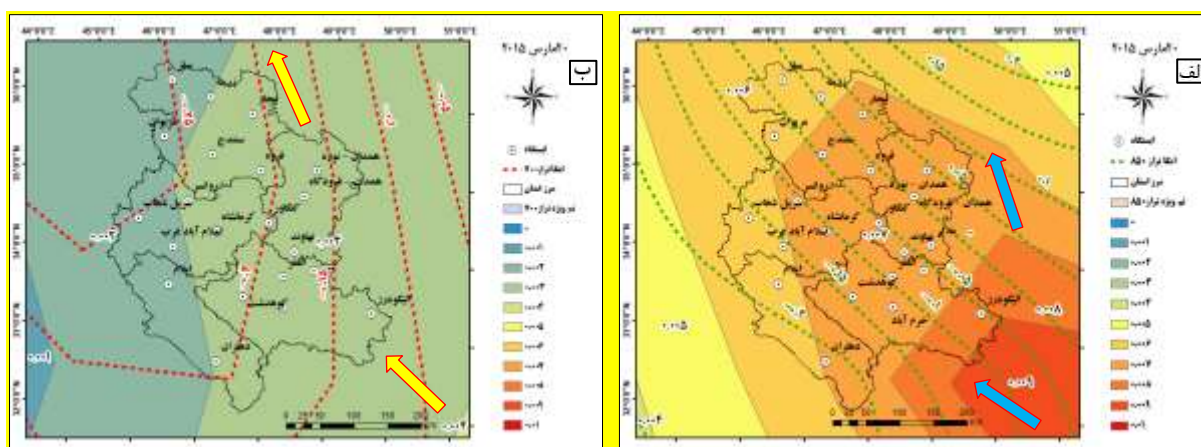
بیشینه حرکات بالاسو براساس مقادیر امگا برای نمونه بارشی ۲ دسامبر ۱۹۹۹ (شکل ۱۹) در بخش



شکل ۱۹. مسیر ورود ناپایداری براساس مقادیر نم ویژه (گرم در هزار) و امگا (پاسکال بر ثانیه): بارش ۲ دسامبر ۱۹۹۹



شکل ۲۰. مسیر ورود ناپایداری براساس مقادیر نم ویژه (گرم در هزار) و امگا (پاسکال بر ثانیه): بارش ۳۰ مارس ۲۰۱۵



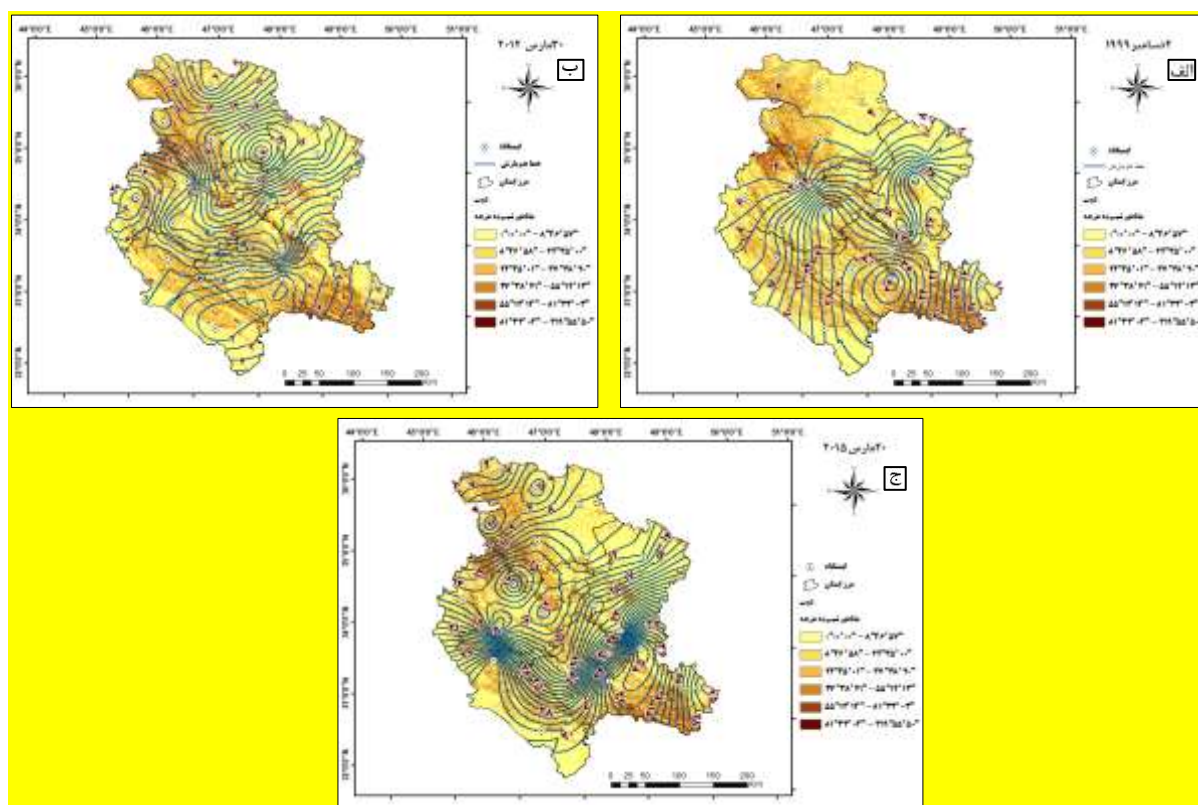
شکل ۲۱. مسیر ورود ناپایداری براساس مقادیر نم ویژه (گرم در هزار) و امگا (پاسکال بر ثانیه): بارش ۲۰ مارس ۲۰۱۲

بارش با افزایش شیب منطقه رابطه مستقیمی را نشان می‌دهد. در هر دوی این سامانه‌ها، جهت ورود سامانه بارشی از سمت جنوب و جنوب شرقی منطقه روی داده و سامانه توانسته است به درون منطقه و مناطق پرشیب و کوهستانی داخلی غرب ایران نفوذ کند.

دامنه‌های شمالی زاگرس همانند استان کردستان به‌ویژه برای دو نمونه بارشی ۲ دسامبر ۱۹۹۹ و ۳۰ مارس ۲۰۱۲، نقش دامنه پشت به باد را داشته و بارش‌ها در این منطقه کاهش یافته است؛ زیرا با تخلیه رطوبتی سامانه در بخش جنوبی و مرکزی زاگرس، سامانه در این دامنه‌ها تضعیف شده و تغییرات بارش با توجه به شیب کوهستان بسیار ناچیز است.

رابطه بین بارش و شیب ناهمواری‌های زاگرس

بررسی نقشه ترکیبی شیب و منحنی‌های هم‌بارش برای بارش ۲ دسامبر ۱۹۹۹ (شکل ۲۲- الف) مشخص کرده تغییرات بارش در بخش‌های کوهستانی و پرشیب زاگرس به‌ویژه جنوب شرقی آن بیش از بخش‌های کم‌شیب منطقه است. در دامنه‌های پرشیب جنوبی زاگرس همانند خرم‌آباد و کرمانشاه و دامنه‌های جنوب شرقی همانند بروجرد، همدان و نهاوند بر شدت بارش افزوده شده است؛ در حالی که برای نمونه بارشی ۳۰ مارس ۲۰۱۲ (شکل ۲۲- ب) به دلیل نفوذ سامانه از سمت شرق، شدت بارش‌ها در شیب‌های کمتر از ۳۷ درجه مشاهده می‌شود. در نمونه بارشی ۲۰ مارس ۲۰۱۵ (شکل ۲۲- ج) نیز همانند نمونه بارشی ۲ دسامبر ۱۹۹۹ روی شیب‌های تند بر شدت بارش‌ها افزوده شده است و تغییرات



شکل ۲۲. نقشه ترکیبی شیب ناهمواری‌های زاگرس و منحنی‌های هم‌بارش؛ بارش ۲ دسامبر ۱۹۹۹ (الف)، بارش ۳۰ مارس ۲۰۱۲ (ب) و بارش ۲۰ مارس ۲۰۱۵ (ج)

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، داده‌های بارش مشاهده‌شده از سطح ۲۲ ایستگاه نواحی غربی ایران و داده‌های پارامترهای جوّی پایگاه NCEP/NCAR مربوط به ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال برای بررسی سامانه‌های بارشی یک‌روزه سودانی به کار رفت. سه نمونه از بارش‌ها تحلیل شد که به‌طور فراگیر در تمامی ایستگاه‌های غرب ایران روی داده بود.

بررسی‌ها نشان داد استقرار ناوه مدیترانه روی نواحی غربی ایران و عمیق‌شدن آن تا منطقه سودان و دریای سرخ موجب شکل‌گیری جریان چرخندی و فرارفت رطوبت از سمت دریاهای عرب و سرخ به طرف غرب ایران به شکل یک جریان مرطوب جنوبی

شده است. این جریان مرطوب در ترازهای زیرین جوّ با وزش دمایی گرم از سمت عرض‌های جنوبی همراه شده است. مسیر ورود سامانه و فرارفت نم ویژه به منطقه از گسترش عرضی و طولی ناوه یعنی دامنه و طول موج ناوه تراز میانی جوّ پیروی کرده است.

فرایند وزش دمایی گرم و برخورد سامانه سودانی به دامنه‌های جنوبی و جنوب غربی زاگرس باعث آزادشدن گرمای نهان و حرکات صعودی شده است. این وضعیت موجب تقویت چرخندزایی و وزش تاوایی مثبت تراز زیرین جوّ به سمت دامنه‌های جنوب شرقی و داخلی زاگرس شده است. با صعود هوا به ترازهای بالاتر جوّ و کاهش دمایی توده هوا به‌تدریج جریان واگرایی فوقانی روی منطقه وزش

وقتی سامانه از شرق و شمال شرق به منطقه نفوذ کرده، فراوانی بارش‌ها در شیب‌های کمتر از ۳۷ درجه بیشتر بوده است.

منابع

عساکره، حسین، قائمی، هوشنگ، رضایی، شیما، (۱۳۹۵). **بررسی مکانیسم گسترش و شدت کم‌فشار دریای سرخ**، فصلنامه آمایش جغرافیایی فضا، سال ۶، شماره ۲۱، ۷۷-۸۹.

لشکری، حسن، خلیلیان، ویدا، (۱۳۹۱). **تحلیل سینوپتیکی پهنه بارش سامانه ادغامی سودانی‌مدیترانه‌ای روی ایران**، فصلنامه پژوهش اطلاعات جغرافیایی، دوره ۲۱، شماره ۸۴، ۲۱-۳۶.

لشکری، حسن، (۱۳۷۹). **مکانیسم تکوین منطقه همگرایی دریای سرخ**، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، دوره ۱۵، شماره ۵۸، ۱۶۷-۱۸۴.

محمدی، حسین، فتاحی، ابراهیم، شمسی‌پور، علی‌اکبر، اکبری، مهری، (۱۳۹۱). **تحلیل دینامیکی سامانه‌های سودانی و رخداد بارش‌های سنگین در جنوب غرب ایران**، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال ۱۲، شماره ۲۴، ۷-۲۴.

مفیدی، عباس، زرین، آذر، (۱۳۸۴). **بررسی سینوپتیکی تأثیر سامانه‌های کم‌فشار سودانی بر وقوع بارش‌های سیل‌زا در ایران**، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، دوره ۲۰، شماره ۷۷، ۱۱۳-۱۳۶.

موقری، علیرضا، خسروی، محمود، (۱۳۹۳). **بررسی رابطه کم‌فشار سودانی و بارش دهم اردیبهشت**

دمای گرم سطوح زیرین شکل می‌گیرد. این واگرایی سبب تخلیه هوای سطوح زیرین و تقویت چرخندزایی ترازهای زیرین جو می‌شود. وزش دمایی سرد در تراز میانی جو در حالت نامتقارن با وزش دمایی گرم سطوح زیرین موجب کاهش ارتفاع ژئوپتانسیل با کمک جریان واگرایی فوقانی مجاور می‌شود و به این ترتیب میدان تاوایی مثبت تراز میانی جو شکل می‌گیرد و به تقویت حرکات چرخندزایی و صعودی می‌انجامد. وزش تاوایی مثبت موجب شکل‌گیری حرکات بالاسو و صعودی در پشت باد یک ناوه می‌شود؛ به این دلیل در بخش‌های جنوبی، شرقی و مرکزی زاگرس بر شدت حرکات صعودی هوا افزوده می‌شود. با افزایش حرکات صعودی و آزاد شدن گرمای نهان و تراکم رطوبت، ابرهای کومه‌ای و همرفتی رشد می‌کند، ضخیم‌تر و شرایط برای رخداد بارش شدید فراهم می‌شود.

جهت و مسیر ورود سامانه سودانی و جهات جغرافیایی زاگرس که رو به محل ورود سامانه و وزش تاوایی مثبت بوده‌اند، نقش مهمی در تغییرات بارش سودانی بر عهده داشته‌اند. شدت افزایش بارش‌ها رابطه مستقیمی با جهت و مسیر ورود سامانه و فرارفت نم ویژه به منطقه داشته است؛ به این دلیل بخش‌های جنوب شرقی و جنوبی و بخش‌هایی از دامنه‌های داخلی زاگرس که در مسیر ورود سامانه مرطوب سودانی قرار داشته‌اند، بارش بیشتری را دریافت کرده‌اند. فراوانی بارش‌ها در شیب‌های رو به شمال و بخش‌های شمالی کردستان به شدت کاهش یافته است. زمانی که سامانه از جنوب و جنوب شرق به منطقه نفوذ کرده است، شدت بارش‌ها و تغییرات مکانی آن بر شیب‌های تند زاگرس افزایش می‌یابد؛ اما

- Johansson, B., Chen, D., (2003). **The influence of wind and topography on precipitation distribution in Sweden: statistical analysis and modeling**, international journal of climatology, Vol 23, Pp 1523-1535.
- Merkiane, L., (1975). **Steady, finite – amplitude baroclinic flow over long topography in a rotating, Stratified atmosphere**, J. Atmos, sci, Vol 32, Pp 1881-1893.
- McGinley, J., (1982). **A diagnosis of Alpine lee cyclogenesis**, Mon. Wea. Rev, Vol 110, Pp 1271-1287.
- Moscattello, A., Miglietta, M.M., Rotunno, R., (2007). **Observational analysis of a Mediterranean over south –eastern Italy**, Pp 1-4.
- Ninyerola, M., Pons, X., Roure, J.M., (2000). **A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques**, Int. J. Climatol, Vol 14, No 20, Pp 1823–1841.
- Ntwali, D., Ogwang, B.A., Ongoma, V., (2016). **The impacts of topography on spatial and temporal rainfall distribution over Rwanda based on WRF model**, atmospheric and climate sciences, Vol 6, Pp 145-157.
- Simpson, I.R., Seager, R., Shaw, T.A., Ting, M., (2015). **Mediterranean climate and the importance of Middle East topography**, Journal of climate, Vol 28, Pp 1977-1996.
- Spreen, W.C., (1947). **A determination of the effect of topography upon precipitation**, Trans. Am. Geophys. Union, Vol 28, Pp 285–290.
- Subyani, A.M., (2000). **Topographic and seasonal influences on precipitation variability south-west Saudi Arabia**, JKAU: earth science, Vol 11, Pp 89-102.
- Weisse, A.K., Bois, P., (2001). **Topographic effects on statistical characteristics of heavy rainfall and mapping in the French Alps**, J. Appl. Meteorol, Vol 4, No 40, Pp 720–740.
- ۱۳۸۳ در استان کرمانشاه، مجله مخاطرات محیط طبیعی، سال ۳، شماره ۴، ۸۰–۶۱.
- Alijani, B., (2008), **effect of Zagros mountains on the spatial distribution of precipitation**, Journal of mountain science (JMS), IMHE, Vol 3, Pp 218-231.
- Barry, R.G., (1992). **Mountain Climatology and Past and Potential Future Climatic Changes in Mountain Regions**, Mt. Res. Dev, Vol 12, Pp 71–86.
- Baker Perry, L., Konrad, Ch.E., (2006). **Relationships between new flow snowfall and topography in the southern Appalachians**, USA climate research, Vol 32, Pp 35-47.
- Barth, H.J., Steinkohl, F., (2004). **Origion of winter precipitation in the central coastal low lands of Saudi Arabia**, Journal of arid environments, Vol 57, Pp 101-115.
- Basist, A., Bell, G.D., Meentemeyer, V., (1994). **Statistical Relationships between Topography and Precipitation Patterns**, J. Clim, Vol 9, Pp 1305–1315.
- Bates, G.T., (1990). **A case study of the effects of topography on cyclone development in the western United stated**, weather review, Vol 118, Pp 1808-1825.
- Basist, A., Bell, G.D., Meentemeyer, V., (1994). **Statistical relationships between topography and precipitation patterns**, J. Clim, Vol 9, No 7, Pp 1305–1315.
- Cannon, F., Carvalho, L.M.V., Jones, Ch., Norris, J., Bookhagen, B., Kiladis, G.N., (2017). **Effects of topography smoothing on the simulation of winter precipitation in high mountain Asia**, Journal of geographical research: atmospheres, Vol 2-4, No 48, Pp 1456-1474.
- Goodale, C.L., Alber, J.D., Ollinger, S.V., (1998). **Mapping monthly precipitation, temperature and solar radiation for Ireland with polynomial regression and digital elevation model**, Clim. Res, Vol 10, Pp 35–49.

source: the Zagros plateau of Iran,
Journal of climate, Vol 20, Pp 4133-4146.

Zarrin, A., Ghaemi, H., Azadi, M., Mofidi, A.,
Mirzaee, E., (2011). **The effect of the
Zagros mountains on the formation and
maintenance of the Iran anticyclone
using Reg CM4,** meteorolaAtmoshys, Vol
112, Pp 91-100.

Wotling, G., Bouvier, Ch., Danloux, J., Fritsch,
J.M., (2000). **Regionalization of extreme
precipitation distribution using the
principal components of the
topographical environment,** J. Hydrol,
Vol 233, Pp 86–101.

Zaitchik. B.F., Evans. J.P., Smith. R.B., (2007).
Regional impact of an elevated heat