

شبیه‌سازی عددی نقش کوهستان در یک سامانه بارش‌زا روی ایران

محمد مرادی^{۱*}، امیرحسین مشکواتی^۲، مجید آزادی^۳ و عباسعلی علی‌اکبری‌بیدختی^۴

^۱استادیار سازمان هواشناسی کشور، تهران، ایران

^۲استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

^۳استادیار گروه هواشناسی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

^۴استاد گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۱۳۸۵، پذیرش نهایی: ۱۳۸۶)

چکیده

در این تحقیق برای بررسی چگونگی نقش کوهستان روی سامانه‌های بارش‌زا، مدل منطقه محدود MM5 با تفکیک افقی ۵۵/۵ کیلومتر تنظیم شده است و برای سامانه‌ایی کم‌فشار که در دوره زندگی هشت‌روزه خود، در روزهای ۲۳ تا ۳۰ دسامبر ۲۰۰۴ از روی ایران عبور می‌کند، اجرا می‌شود. نتایج حاصل از اجراهای مدل در حالتی که رشته‌کوه زاگرس وجود دارد و سپس حذف شده است و نیز نتیجه حاصل از حذف اثر کوهساری در کل شبکه، بررسی شدند.

بررسی نتایج شبیه‌سازی نشان داد که ارتفاعات زاگرس از طریق افزایش حرکت بالاسو و پایین‌سو سامانه‌ها، روی بسیاری از کمیت‌های ترمودینامیکی و دینامیکی آنها مؤثراند از آن جمله می‌توان به محتوای آب ابر، فرارفت دما و سرعت قائم اشاره کرد. بررسی‌ها نشان داد که اگر شرایط بارش فراهم باشد، در صورت نبود زاگرس، در مناطق کوبری بارش بیشتری ریزش می‌کند. به‌علاوه این رشته‌کوه در نقش مانع جریان‌های مرطوب، سبب افزایش بارش در مناطق غربی خود می‌شود. با حذف زاگرس از مدل، دیده شد که سامانه‌های فشاری در صورت وجود این رشته‌کوه تضعیف می‌شوند. از حذف اثر کوهساری در همه دامنه که بیانگر حذف منطقه همگرایی دریای سرخ است، دیده شد که کم‌فشار واقع در جنوب غرب دریای سرخ به سوی شرق گسترش می‌یابد و پشته فشاری یا هسته پرفشار کوچک روی ارتفاعات واقع در منطقه از بین می‌رود. از این رو ارتفاعات اطراف این دریا در توسعه شمال سوی ناوه فشاری با منشا دریای سرخ نقشی ندارد.

واژه‌های کلیدی: محتوای آب ابر، حرکت قائم، رشته‌کوه زاگرس، مدل منطقه محدود MM5

Numerical simulation of the impact of orography on active synoptic weather systems over Iran

Moradi, M¹., Meshkatee, A. H²., Azadi, M³. and Aliakbari-Bidokhti, A⁴.

¹Assistant professor, Iranian Meteorological Organization, Tehran, Iran

²Assistant professor, Researches and Sciences Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

³Assistant professor, Atmospheric Science and Meteorological Research Center, Tehran, Iran

⁴Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 25 April 2007, Accepted: 15 Jan 2008)

Abstract

Orography plays a substantial role in the formation and evolution of many atmospheric phenomena. Observations indicate that two mountain ranges to the southwest of the Red Sea and west of Iran (Zagross mountain range) play a crucial role in the formation,

evolution and activities of synoptic weather systems over Iran. Observations also, indicate that there are considerable differences between the amount of precipitation over the west and east of the Zagross mountain range.

In this paper, the effects of those two mountain ranges on the formation, evolution and activities of a synoptic system over Iran between 23rd and 30th of December 2004 have been studied. To do this fifth-generation of PSU (Pennsylvania State University) /NCAR (National Center for Atmospheric Research) Meso- and Micro-scale Modeling system (MM5) was used. To provide a clear picture of the development and evolution of the system an area bounded to 10 to 50 degrees north and 20 to 70 degrees east was selected. A rectangle grid by 101 zonal grid points and 81 meridional grid points with a distance of 55.5km between the grid points was implemented for simulation and modeling purposes and the study of dynamical and thermodynamical processes involved in the development and evolution of the system. Betts-Miller, Grell, Blackadar, and MRF schemes were used to model different physical, thermodynamical and dynamical processes.

Model results show that the elimination of the mountain range to the southwest of the Red Sea leads to widen the existing low pressure over the southwest area of the Red Sea towards the east. It also leads to a decrease in the small high pressure cell that is believed to play a substantial role in the formation of the so-called Red Sea trough towards the north of the Red Sea and southeast of the Mediterranean Sea, where many of the weather systems that pass over Iran during the winter form. Therefore, it can be concluded that elimination of that mountain range will destroy part of the mechanism essential for the formation of some weather systems that are important for Iran.

Model results also state that the elimination of Zagross mountain range could lead to the enhancement of precipitation over the central part of the country, east of the range.

Key words: Numerical simulation, Meso-and micro-scale modeling system, Zagross mountain range, Red Sea trough

۱ مقدمه

(۱۹۸۳)؛ آلپرت (۱۹۸۶)؛ کریچاک و همکاران (۱۹۹۷)، a و b)؛ میگلیتا و بوزی (۲۰۰۰) و چن و همکاران (۲۰۰۴)، با حل تحلیلی و شبیه‌سازی عددی معادلات حرکت، باد فروشیب، باد فراشیب و امواج کوهستان را در حالت‌های متفاوت بررسی کرده‌اند. برخی دیگر نیز نحوه برهم‌کنش کوهستان با رژیم بارندگی و چرخندزایی پس کوه را در روی رشته‌کوه‌های پهن و مرتفع بررسی کرده‌اند که از جمله آنها می‌توان به کارهای توسی و فانتینی (۱۹۸۲) و کول (۲۰۰۳) اشاره کرد. توسی و فانتینی نحوه برهم‌کنش شارش با کوهستان در تشکیل اولیه چرخند در بادپناه کوه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد که امتداد کشیدگی کوه نسبت به چرخند اولیه عامل مهمی در تقویت چرخند در بادپناه کوه است. کول

سامانه‌ها همواره تحت تأثیر عوامل مربوط به سطح زیرین خود قرار می‌گیرند. گرمایش غیر یکنواخت در اثر تابش خورشیدی، توزیع غیر یکنواخت خشکی‌ها، اقیانوس‌ها و رشته‌کوه‌ها از جمله عواملی هستند که با تأثیرگذاری روی سامانه‌های جوی، سبب تفاوت اقلیمی در یک عرض جغرافیایی می‌شوند که از این میان تأثیر کوهستان از همه آشکارتر است. توده‌های هوا هنگام عبور شارش هوا از روی کوه ممکن است توقف کنند، یا جهت حرکت آنها تحت تأثیر کوهستان تغییر کند و یا از بالای کوه عبور کنند. از این رو ماهیت آنها در اثر توسعه حرکات بالاسو دستخوش تغییر می‌شود. به همین دلیل نقش کوهستان از دیرباز مورد توجه پژوهشگران هواشناسی قرار داشته است. برخی از این پژوهشگران مانند دوران و کلمپ

پشت به باد کوه کاهش پیدا می‌کند.

از آنجا که برهم‌کنش کوهستان با سامانه‌های جوی در ایران از پیچیدگی‌های قابل ملاحظه‌ای برخوردار است، از این رو برای درک بهتر این برهم‌کنش با به‌کارگیری مدل منطقه محدود MM5، سامانه‌ای بارش‌زا در دوره‌ای هشت روزه، از بیست و سوم تا سی ام دسامبر ۲۰۰۴ شبیه‌سازی می‌شود. در این بررسی با نگاهی کوتاه به چگونگی تنظیم مدل MM5، توصیف همدیدی و سپس نتایج شبیه‌سازی آورده شده است.

۲ پیکربندی مورد استفاده در مدل MM5

در این تحقیق برای بررسی نقش کوهستان روی سامانه‌های عبوری، مدل منطقه محدود MM5 تنظیم می‌شود (برای جزئیات بیشتر در مورد این مدل میان‌مقیاس می‌توان به مستندات آن رجوع کرد). برای این کار ناحیه محدود به عرض جغرافیایی ۱۰ و ۵۰ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۲۰ و ۷۰ درجه شرقی در نظر گرفته شده است. با انتخاب گام شبکه‌ای $d=55/5\text{km}$ ، تعداد نقاط شبکه در راستاهای شرقی- غربی و شمالی- جنوبی به ترتیب 101×81 نقطه به دست می‌آید. نگاشت مورد استفاده در مدل مرکاتور است و کاربری زمین نیز از داده‌های USGS گرفته می‌شود. با مشخص شدن تعداد نقاط شبکه و نیز تنظیم تاریخ ابتدا و انتهای شبیه‌سازی، معرفی داده‌های شرایط اولیه و شرایط مرزی، فاصله زمانی پیش‌بینی و گام زمانی مدل، طرح‌واره‌های فیزیکی مورد استفاده برای پراسنسی فرایندهای فیزیکی، همرفت، لایه مرزی و تابش براساس بررسی‌های قبلی (آزادی و همکاران، ۱۳۸۲) انتخاب می‌شوند به گونه‌ای که برای همرفت ترکیب طرح‌واره‌های Betts-Miller و Grell، برای لایه مرزی طرح‌واره Blackadar و MRF در نظر گرفته شده‌اند. برای بررسی نقش رشته‌کوه زاگرس بر یک سامانه بارش‌زا که در طول دوره زندگی خود ایران را

با به‌کارگیری مدل MM5 رابطه بین بارش کوهساری در بخش بادسوی کوه را با ارتفاع و پهنای کوهستان مورد بررسی قرار می‌دهد و روشن می‌سازد که بیشینه بارش، تابعی از شیب کوه، پهنای آن و سرعت باد است به طوری که برای سرعت باد ضعیف، بارش بیشینه تابعی از شیب کوه است. او همچنین روشن می‌سازد که در بخش باد سوی یک مانع کوهستانی کوتاه و باریک، بارش بیشینه نسبت به یک مانع کوهستانی بلند و پهن بیشتر است و هنگامی که سرعت باد افزایش می‌یابد، بارش در روی کوه‌های پهن و مرتفع نیز بیشتر می‌شود.

در ایران نیز اثر رشته‌کوه‌های زاگرس و البرز همواره مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است و توجه عمده در این بررسی‌ها بر سامانه‌های جوی در مقیاس همدیدی است. از جمله این پژوهشگران می‌توان به احمدی‌گیوی و همکاران (۱۳۸۴) و علیزاده چوبری (۱۳۸۵) اشاره کرد. احمدی‌گیوی و همکاران با به‌کارگیری مدل اقلیمی منطقه‌ای، نقش رشته‌کوه زاگرس بر سامانه‌های جوی واقع بر ایران را در بازه‌ای سه ماهه بررسی کرده‌اند و روشن ساخته‌اند که با حذف زاگرس، میزان بارش در مناطق مرکزی و شرقی ایران افزایش می‌یابد اما مقدار آن در کل محدوده شبیه‌سازی ثابت می‌ماند. علیزاده چوبری در مطالعه چرخندزایی در منطقه شمال دشت کویر با استفاده از مشاهدات و یک مدل عددی، نقش رشته‌کوه البرز بر چرخندزایی در دشت کویر را بررسی کرده و نشان می‌دهد که چرخندزایی ناشی از رشته‌کوه البرز در منطقه پشت به باد آن چندان بارز نیست اما نقش رشته‌کوه البرز روی عدد فرود و کمیت‌های دمای پتانسیل، میدان سرعت قائم و بارش قابل توجه است. او همچنین نشان می‌دهد که بارش تجمعی ۴۸ ساعته برای یک حالت موردی با کاهش ارتفاع ناهمواری‌ها به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد و مقادیر کمیت‌های دمای پتانسیل و میدان سرعت قائم در

تحت تأثیر قرار می‌دهد، این رشته کوه از حوزه دامنه مدل حذف می‌شود. برای این کار با انتخاب محدوده طول جغرافیایی ۴۵ تا ۵۹ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۷ تا ۳۵ درجه شمالی در حکم محدوده رشته کوه زاگرس، ارتفاع‌های بالای ۱۰ متر واقع در این محدوده تغییر می‌یابند. ارتفاع‌های کمتر از ۱۰ متر بدون تغییر و ارتفاع‌های بیشتر از آن به ۱۰ متر کاهش می‌یابند. در پایان کل اثر کوهساری در سراسر منطقه نیز حذف می‌شود.

۳ توصیف هم‌بندی

در ساعت UTC ۰۰۰۰ روز بیست و سوم دسامبر ۲۰۰۴، در سطح زمین، روی دریای مدیترانه و دریای سیاه مرکز کم‌فشار ۱۰۱۵ هکتوپاسکال و در جنوب دریای سرخ نیز خط هم‌فشار ۱۰۱۰ هکتوپاسکال وجود دارد. بررسی میدان ارتفاع تراز ۸۵۰ و ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال در این منطقه بیانگر وجود ناوه ارتفاع تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، پشته ارتفاع ترازهای ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال، بیشینه دمای تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال و حرکت قائم بالاسوی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در جنوب غرب دریای سرخ است که ویژگی‌های یک کم‌فشار گرمایی در منطقه سودان است. ناوه این کم‌فشار در امتداد دریای سرخ در راستای نصف‌النهاری به سوی شرق دریای مدیترانه امتداد می‌یابد و با کم‌فشار دینامیکی روی دریای مدیترانه ترکیب شده است (شکل ۱-۱a). همچنان که ناوه ارتفاع تراز میانی جو به سوی شرق حرکت کرده است، یاخته‌های کوچک کم‌فشار از ناوه فشاری دریای سرخ جدا شده (شکل ۱-۱b) و در حین حرکت شرق سوی خود گسترده‌تر نیز شده‌اند. هماهنگ با این سازوکار سامانه پرفشار دینامیکی جنوب غرب دریای مدیترانه نیز ابتدا به سوی شرق حرکت کرده و سپس با گسترش یافتن در راستای نصف‌النهاری، به تدریج به سوی دریای سیاه و شمال دریای خزر امتداد

یافته است. این وضعیت در روز بیست و ششم دسامبر ۲۰۰۴ سبب تشکیل یک کم‌فشار بریده با هسته سرد در غرب ایران (شکل ۱-۱c) شده است که در روزهای بعدی تقویت شده است و با حرکت شرق سو و آهسته خود ضمن اینکه بیشتر نقاط ایران را تحت تأثیر قرار داده (شکل ۱-۱d)، سبب ریزش بارش‌های شدید و کاهش دما نیز شده است. این سامانه در روز بیست و هفتم در جنوب شرق رسیده (شکل ۱-۱e) و در روز بیست و نهم دسامبر ۲۰۰۴ از ایران خارج شده است.

۴ بررسی نتایج شبیه‌سازی

برای یک حالت موردی هشت روزه از بیست و سوم تا سی‌ام ماه دسامبر سال ۲۰۰۴، مدل منطقه محدود MM5 تنظیم و با وجود رشته کوه زاگرس و بدون آن و نیز با حذف ارتفاعات از سراسر دامنه مورد بررسی، اجرا شد. در حالت دوم فقط ارتفاعات زاگرس از مدل حذف می‌شود و ارتفاعات دیگر همچنان در مدل وجود دارد. این در حالی است که در حالت سوم همه ارتفاعات دامنه از جمله ارتفاعات اطراف دریای سرخ و مانند آن از مدل حذف می‌شوند. در این بخش نتایج حاصل از اجراهای مدل را بررسی می‌کنیم. شایان ذکر است که برای کاستن از حجم مطالب فقط چند نقشه مهم و کلیدی ارائه می‌شود.

شکل ۲ گرتة فشاری سطح متوسط دریا در ساعت ۰۰۰۰ مورخ ۲۵ دسامبر ۲۰۰۴ را با وجود اثر کوهساری نشان می‌دهد. در این شکل زنجیره‌ای از سلول‌های کم‌فشار از جنوب دریای سرخ، روی عربستان و شرق دریای مدیترانه دیده می‌شود. این گرتة به‌مثابه شرایط اولیه به مدل داده شده است. پیش‌بینی ۴۸ ساعته گرتة فشاری ناشی از خروجی مدل با وجود اثر کوهساری در این دامنه در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل دیده می‌شود که سلول کم‌فشار ۱۰۱۰ هکتوپاسکال در

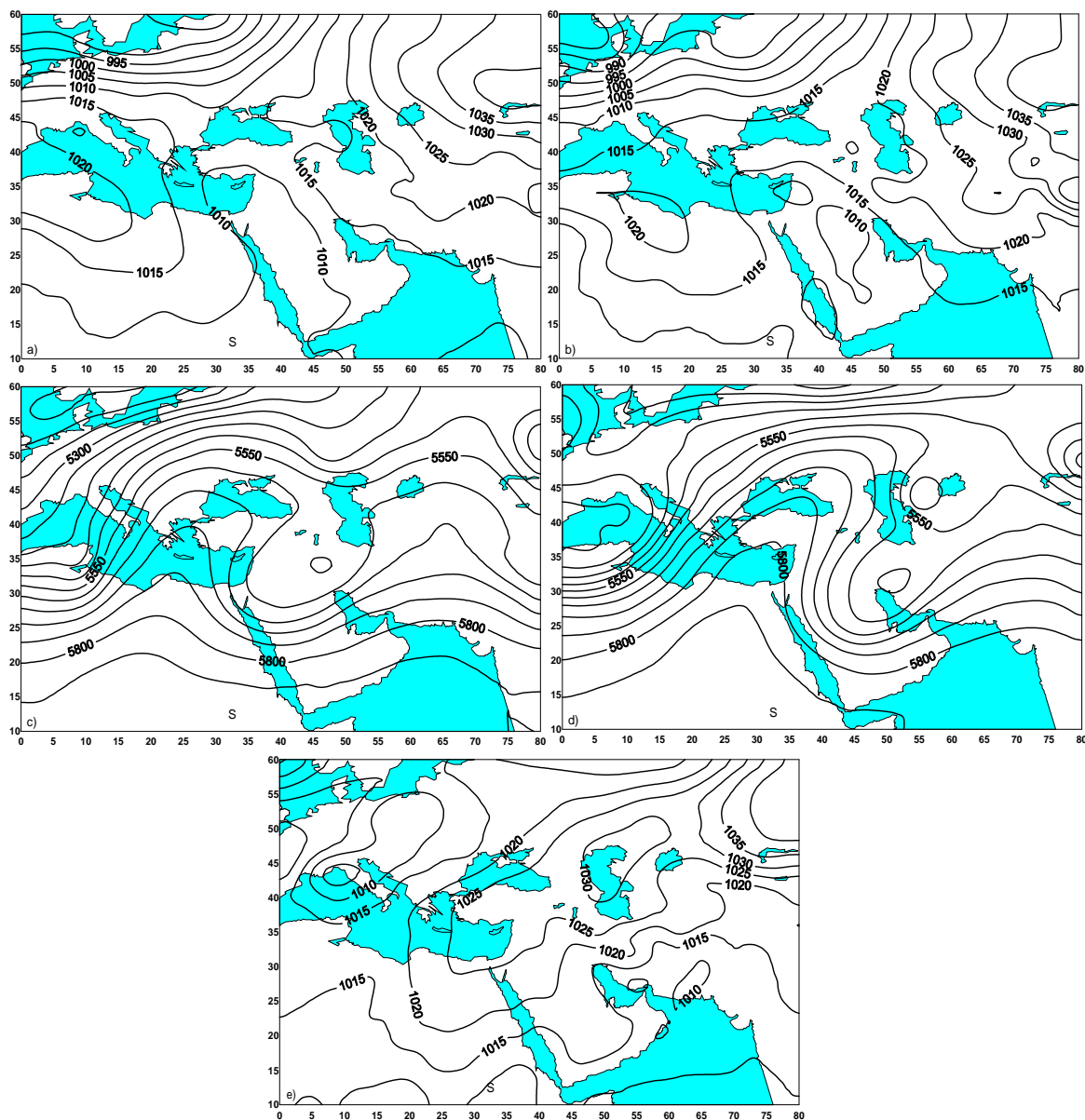
روی جنوب دریای مدیترانه تغییری مشاهده نمی‌شود. با حذف اثر کوهساری از دامنه مدل (شکل ۹) مشاهده می‌شود که دو مرکز پرفشار و کم‌ارتفاع به ترتیب روی شرق دریای مدیترانه و شمال شرق ایران بوجود می‌آید که پربند مرکز کم‌ارتفاع روی ایران به ۲۹۶۰ متر کاهش یافته است.

با توجه به معادله گرایش فشار به صورت زیر (هولتون، ۱۹۹۲):

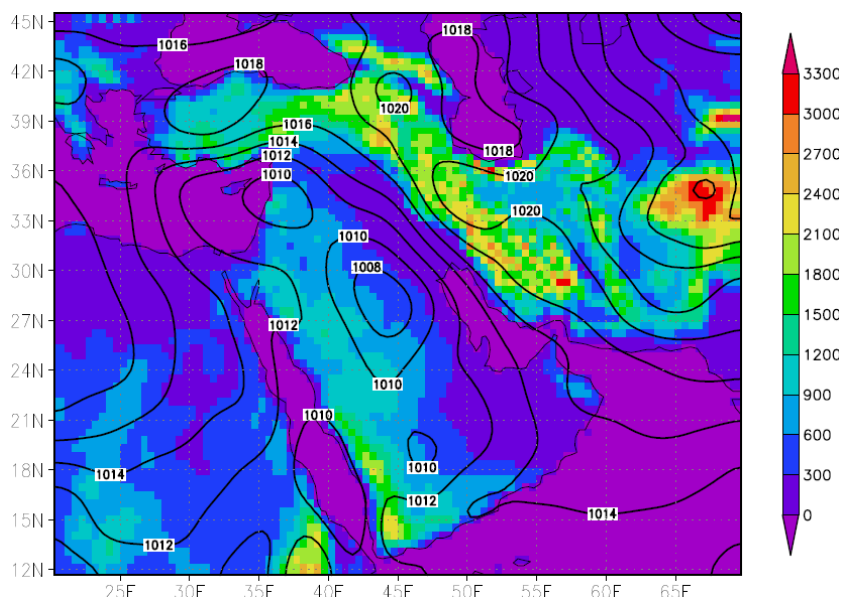
$$\frac{\partial P_s}{\partial t} = - \int_0^{P_s} \nabla \cdot \vec{V} dP \quad (1)$$

که در آن P_s فشار سطح زمین و \vec{V} بردار باد افقی است، دیده می‌شود که در حرکت بالاسو ناشی از اثر کوهستان، در لایه‌های متفاوت جو در سمت رو به باد کوه، همگرایی به‌وجود می‌آید. از این رو جمله $\nabla \cdot \vec{V}$ در لایه‌های متفاوت منفی، و در نتیجه $\frac{\partial P_s}{\partial t}$ مثبت می‌شود. بنابراین در بخش غربی ارتفاعات زاگرس، فشار افزایش می‌یابد. پس سامانه‌های کم‌فشار در صورت برخورد با رشته‌کوه زاگرس در بخش غربی آن تضعیف می‌شوند. همچنین در بخش شرقی زاگرس، به سبب وجود حرکت پایین‌سو، واگرایی در ترازهای متفاوت فشاری تولید می‌شود. بنابراین جمله $\nabla \cdot \vec{V}$ در بخش شرقی زاگرس مثبت و $\frac{\partial P_s}{\partial t}$ در آن بخش منفی می‌شود، و در نتیجه فشار کاهش می‌یابد. از این رو کم‌فشارها در برخورد با زاگرس در بخش شرقی آن تقویت می‌شوند. این شرایط برای سامانه‌های پرفشار به گونه‌ای است که آنها در بخش غربی زاگرس تقویت و در بخش شرقی تضعیف می‌شوند. با حذف زاگرس از مدل، در بخش غربی به سبب حذف حرکت بالاسو، فشار افزایش نخواهد یافت. به علاوه به سبب حذف حرکت پایین‌سو در بخش شرقی نیز فشار کاهش نخواهد داشت.

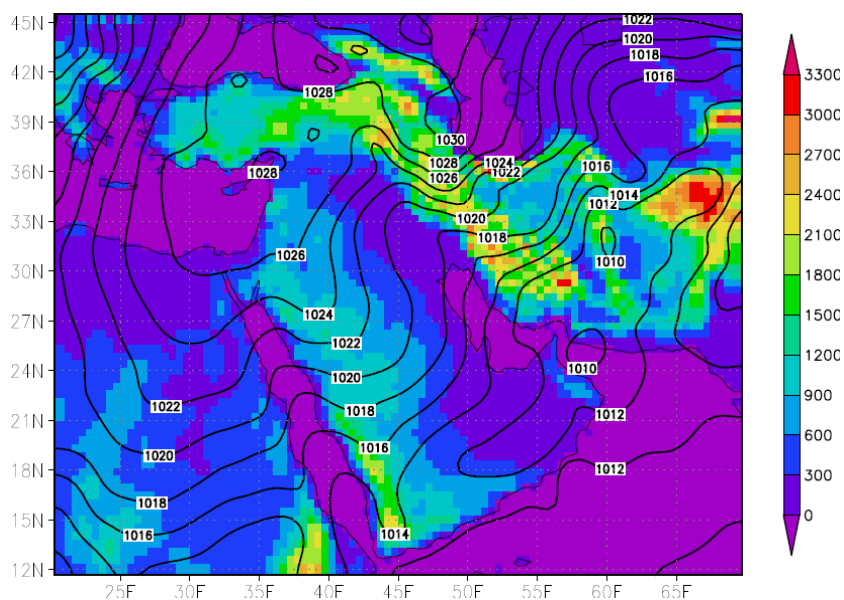
شرق تنگه هرمز جای دارد که ناوه آن در راستای ضلع غربی زاگرس به سوی شمال غرب ایران امتداد می‌یابد. همچنین پشته فشاری ناشی از پرفشار غرب دریای خزر نیز در راستای ضلع شرقی رشته‌کوه زاگرس به سوی جنوب ایران امتداد یافته است. به‌علاوه دو پشته فشاری نیز روی ارتفاعات جنوبی اطراف دریای سرخ دیده می‌شود. هنگام حذف کردن ارتفاعات زاگرس از مدل (شکل ۴)، دیده می‌شود که هر دو ناوه و پشته فشاری اطراف رشته‌کوه زاگرس تضعیف می‌شوند و انحنای هر دو کاهش می‌یابد. این در حالی است که در ارتفاعات اطراف دریای سرخ، دو پشته فشاری تغییری نشان نمی‌دهند. با حذف کل ارتفاعات در دامنه مدل (شکل ۵)، مشاهده می‌شود که کم‌فشار ۱۰۰۶ هکتوپاسکال در شرق ایران و پرفشار ۱۰۳۴ هکتوپاسکال در جنوب دریای سیاه تقویت شده‌اند و به صورت یکنواختی مناطق یادشده را پوشش داده‌اند. به‌علاوه در جنوب دریای سرخ، دو مرکز پرفشار نیز از بین رفته‌اند. شکل ۶ گرتی ارتفاع تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال در ساعت ۰۰۰۰ مورخ بیست و پنجم دسامبر سال ۲۰۰۴ را با اثر کوهساری نشان می‌دهد. در این شکل دیده می‌شود که ناوه ارتفاع شمال دریای سیاه تا مرکز دریای سرخ گسترده شده است. به‌علاوه پشته ارتفاع نیز در روی ارتفاعات زاگرس وجود دارد. این گرتی به‌متابۀ شرایط اولیه به مدل داده شده است. پیش‌بینی ۴۸ ساعته گرتی ارتفاع این تراز که در شکل ۷ آورده شده است، نشان می‌دهد که پشته ارتفاع از شمال افریقا به سوی شرق دریای مدیترانه و سپس شمال دریای سیاه امتداد یافته است. یک مرکز کم‌ارتفاع نیز با پربند ۳۰۰۰ متری روی دریاچه اورال قرار می‌گیرد که ناوه آن به سوی مرکز دریای سرخ کشیده می‌شود. هنگامی که زاگرس از مدل حذف می‌شود، پربند ۳۰۰۰ متری به غرب خلیج فارس امتداد می‌یابد (شکل ۸). این در حالی است که در پشته ارتفاع



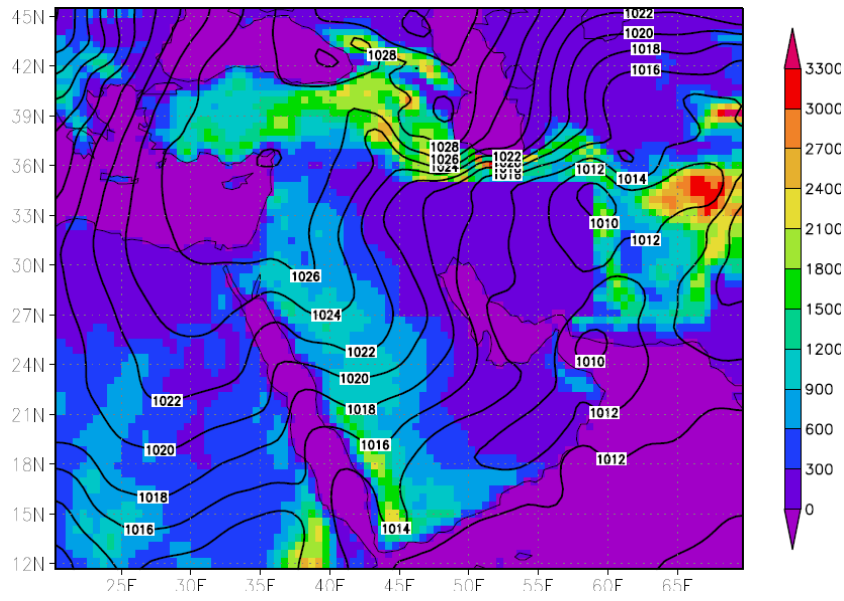
شکل ۱. (a) گرته فشاری سطح زمین (هکتوپاسکال) در ساعت UTC ۱۲۰۰ روز بیست و چهارم دسامبر ۲۰۰۴، (b) گرته فشاری سطح زمین (هکتوپاسکال) در ساعت UTC ۰۰۰۰ روز بیست و پنجم دسامبر ۲۰۰۴، (c) گرته ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (متر) در ساعت UTC ۰۰۰۰ روز بیست و ششم دسامبر ۲۰۰۴، (d) گرته ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (متر) در ساعت UTC ۱۲۰۰ روز بیست و هفتم دسامبر ۲۰۰۴ و (e) گرته فشاری سطح زمین (هکتوپاسکال) در ساعت UTC ۱۲۰۰ روز بیست و هفتم دسامبر ۲۰۰۴. اعداد روی محورهای طول و عرض جغرافیایی برحسب درجه را نشان می‌دهد. فاصله هم‌فشارها ۵ هکتوپاسکال و فاصله پربندهای ارتفاع ۵۰ متر است.



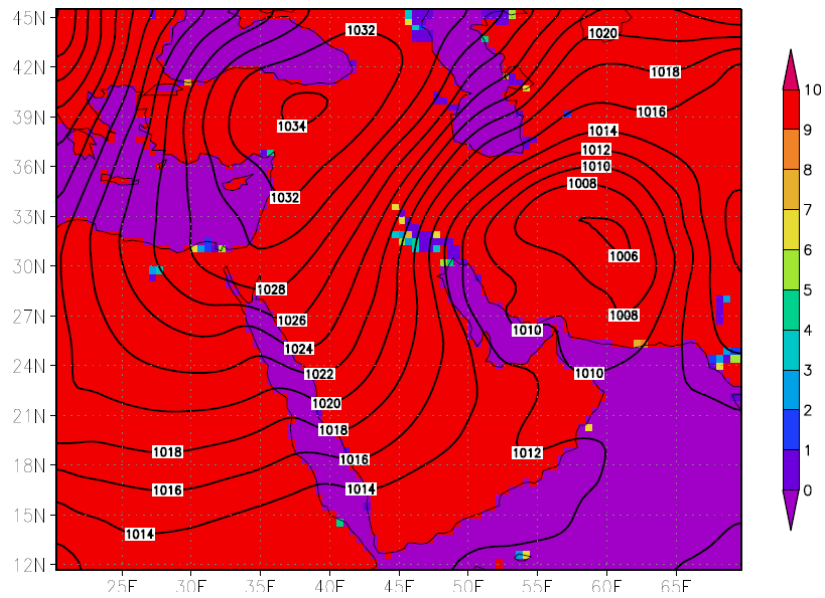
شکل ۲. گرتة فشاری سطح متوسط دریا برحسب هکتو پاسکال در ساعت ۰۰۰۰ UTC بیست و پنجم دسامبر سال ۲۰۰۴. فاصله هم‌فشارها ۲ هکتوپاسکال و اعداد روی محورهای مختصات طول و عرض جغرافیایی برحسب درجه است.



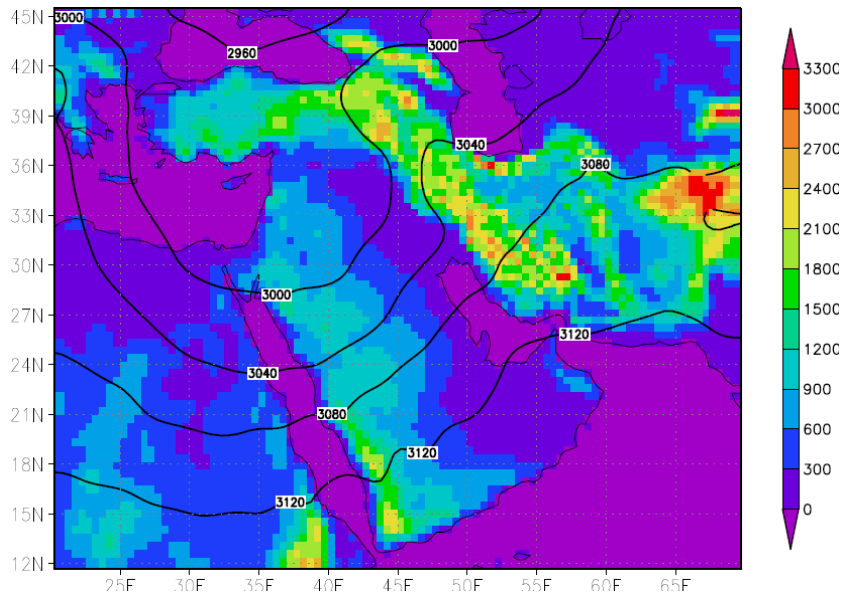
شکل ۳. پیش‌بینی ۴۸ ساعته گرتة فشاری سطح متوسط دریا برحسب هکتو پاسکال برای ساعت ۰۰۰۰ UTC بیست و هفتم دسامبر سال ۲۰۰۴. فاصله هم‌فشارها ۲ هکتوپاسکال و اعداد روی محورهای مختصات طول و عرض جغرافیایی برحسب درجه است.



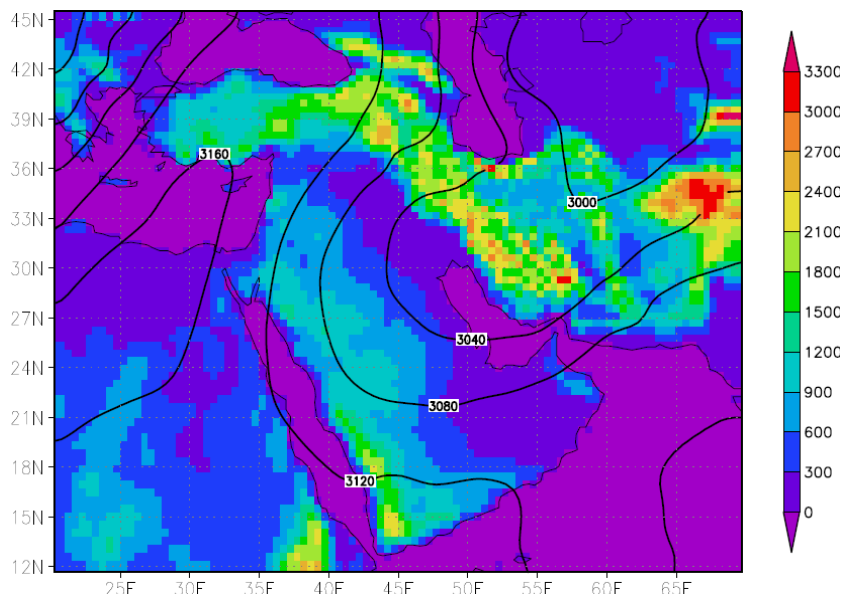
شکل ۴. مانند شکل ۳ ولی بدون زاگرس.



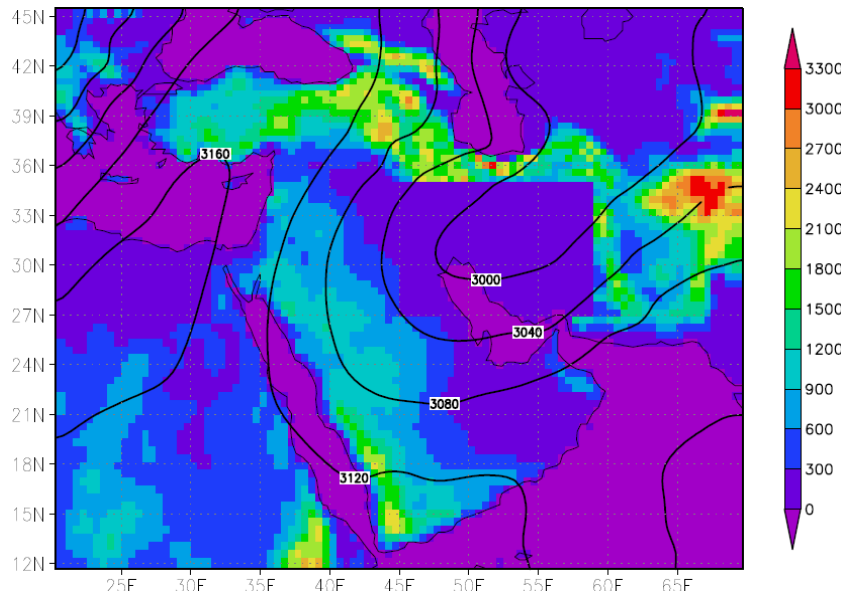
شکل ۵. مانند شکل ۳ ولی بدون اثر کوهساری.



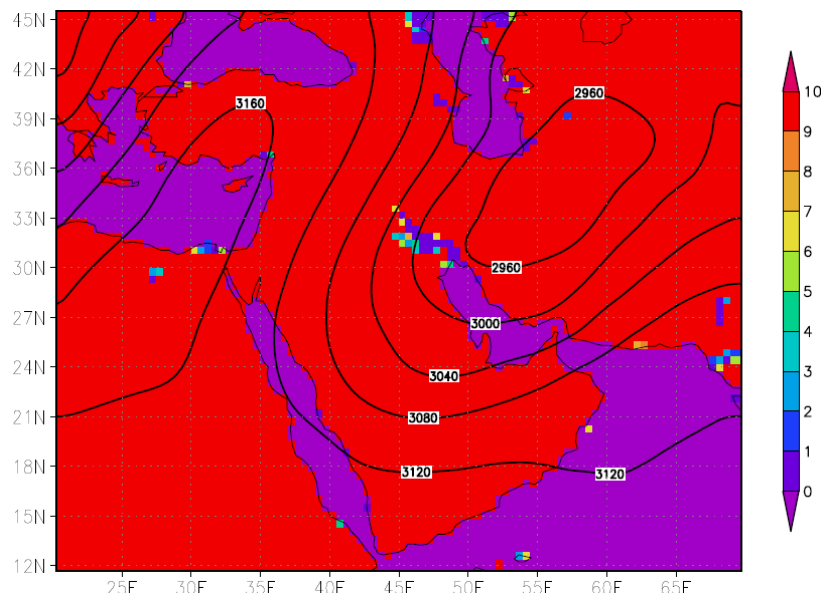
شکل ۶. گرته ارتفاع تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال برحسب متر برای ساعت UTC ۰۰۰۰ بیست و پنجم دسامبر سال ۲۰۰۴. فاصله پربندهای ارتفاع ۴۰ متر و اعداد روی محورهای مختصات طول و عرض جغرافیایی برحسب درجه است.



شکل ۷. پیش‌بینی ۴۸ ساعته گرته ارتفاع تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال برحسب متر برای ساعت UTC ۰۰۰۰ بیست و هفتم دسامبر سال ۲۰۰۴. فاصله پربندهای ارتفاع ۴۰ متر و اعداد روی محورهای مختصات طول و عرض جغرافیایی برحسب درجه است.



شکل ۸. مانند شکل ۷ ولی بدون زاگرس.



شکل ۹. مانند شکل ۷ ولی بدون اثر کوهساری.

برخورد با ارتفاعات نیز دستخوش تغییر می‌شوند. این تغییر در اثر وجود حرکات بالاسو و پایین سوی ناشی از اثر کوهستان، در بخش‌های غربی و شرقی پدید می‌آید. به طوری که کم‌ارتفاع در بخش غربی، به سبب افزایش حرکت چرخندی، تقویت و در بخش شرقی، به سبب کاهش حرکت چرخندی، تضعیف می‌شود و پراارتفاع در بخش غربی تضعیف و در بخش شرقی تقویت می‌شود.

شکل ۱۰ پیش‌بینی بارش ۲۴ ساعته مدل را در روز بیست و ششم دسامبر ۲۰۰۴ نشان می‌دهد. در این شکل دیده می‌شود که هسته بارش بیشینه ۵ سانتی‌متری در جنوب غرب زاگرس قرار دارد و هم‌مقدارهای این کمیت، ضلع غربی زاگرس را در بر گرفته‌اند. هنگامی که زاگرس از مدل حذف می‌شود (شکل ۱۱)، مشاهده می‌شود که دو هسته ۲ سانتی‌متری در روی ایران بوجود می‌آید.

به کمک رابطه‌ای تجربی دو پارامتری برحسب حرکت قائم و آب بارش شو می‌توان توانایی بارش را به صورت رابطه زیر ارزیابی کرد (کارلسون، ۱۹۹۱):

$$R = -0.3\omega_{700} \times P_w \quad (3)$$

ω_{700} مؤلفه قائم باد تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال در دستگاه P ، R مقدار بارش و P_w آب بارش شو است که از رابطه زیر به دست می‌آید (بوکولاری و همکاران، ۲۰۰۱):

$$P_\omega = -\frac{1}{g} \int_0^P q dp \quad (4)$$

که در آن q نم ویژه و g_m شتاب گرانی است. رابطه (۳) زمانی برقرار است که سرعت قائم بالاسو و میانگین نم نسبی لایه ۵۰۰-۱۰۰۰ بیشتر از ۷۰ درصد باشد (کارلسون، ۱۹۹۱). دیده می‌شود که سامانه مورد بررسی در هنگام برخورد با بخش غربی زاگرس، به سبب افزایش حرکت بالاسو ناشی از اثر کوه و نیز همگرایی جریان‌های مرطوب در روی ارتفاعات غربی، پتانسیل بارش آن بخش افزایش

چنین به نظر می‌رسد که سامانه‌های فشاری در برخورد با ارتفاعات، دستخوش تغییر می‌شوند. این تغییر در اثر وجود حرکات بالاسو و پایین سو ناشی از اثر کوهستان، در بخش‌های غربی و شرقی پدید می‌آید. به طوری که کم‌فشارها در بخش غربی، به سبب افزایش فشار، تضعیف و در بخش شرقی، به سبب کاهش فشار، تقویت می‌شوند. به همین ترتیب، پرفشارها در بخش غربی تقویت و در بخش شرقی تضعیف می‌شوند.

با توجه به معادله تاوایی شبه زمین گرد به صورت زیر (هولتون، ۱۹۹۲):

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\bar{V} \cdot \nabla (\zeta + f) + f_0 \frac{\partial \omega}{\partial p} \quad (2)$$

که در آن f_0 تاوایی سیاره‌ای، ζ تاوایی نسبی و ω مؤلفه قائم باد در دستگاه P است، دیده می‌شود که سامانه‌های تراز زیرین هنگام رسیدن به زاگرس تغییر می‌کنند؛ به گونه‌ای که در بخش غربی به سبب وجود حرکت بالاسو ناشی از اثر کوه، چون $\frac{\partial \omega}{\partial p}$ مثبت است،

از این رو $\frac{\partial \zeta}{\partial t}$ نیز مثبت می‌شود. در نتیجه کم‌ارتفاع‌ها هنگام برخورد با ضلع غربی زاگرس به سبب افزایش حرکت چرخندی تقویت می‌شوند. در بخش شرقی، حرکت پایین سو سبب منفی شدن $\frac{\partial \omega}{\partial p}$ و در نتیجه منفی

شدن $\frac{\partial \zeta}{\partial t}$ می‌شود. بنابراین در بخش شرقی، حرکت چرخندی کاهش می‌یابد. این شرایط برای پراارتفاع به گونه‌ای است که آنها در بخش غربی تضعیف و در بخش شرقی تقویت می‌شوند. با حذف زاگرس از مدل، در بخش غربی به سبب حذف حرکت بالاسو، ارتفاع کاهش نخواهد یافت و در بخش شرقی به سبب حذف حرکت پایین سو، ارتفاع و فشار افزایش نخواهد داشت.

چنین بر می‌آید که سامانه در تراز زیرین و در

که در آن $\sigma = -R_d T_0 P^{-1} \frac{d \ln \theta}{dP}$ و R_d ثابت ویژه گازها برای هوای خشک است، روشن می‌شود که در بخش غربی زاگرس، به سبب افزایش حرکت بالاسو، امگا منفی، و در نتیجه، در غیاب تغییرات محلی دما $-\vec{V}_g \cdot \nabla T > 0$ ، در بخش شرقی نیز به دلیل وجود حرکت پایین‌سو، امگا مثبت می‌شود. در نتیجه $-\vec{V}_g \cdot \nabla T < 0$ و مشاهده می‌شود که فرارفت دما در بخش غربی و شرقی زاگرس به ترتیب مثبت و منفی است. با حذف زاگرس از مدل که نتیجه آن حذف حرکت بالاسو در بخش غربی و پایین‌سو در بخش شرقی است، در ترازهای زیرین و میانی، فرارفت دمای مثبت بخش غربی و فرارفت دمای منفی بخش شرقی حذف می‌شود. از این رو فرارفت دما در منطقه مورد بررسی یکنواخت می‌شود.

یکی دیگر از کمیت‌هایی که تغییر قابل توجهی نشان می‌دهد، محتوای آب ابر است. برای بررسی این کمیت، دو نقطه، یکی قبل از زاگرس و یکی بعد از آن در روی کویر انتخاب می‌شود. نقطه اول دارای مختصات طول و عرض جغرافیایی به ترتیب $51/25$ درجه شرقی و $28/75$ درجه شمالی است و نقطه دوم دارای مختصات طول و عرض جغرافیایی به ترتیب $58/5$ درجه شرقی و $30/5$ درجه شمالی است. شکل ۱۷ نیم‌رخ قائم این کمیت را در نقطه قبل از زاگرس نشان می‌دهد که در آن اثر زاگرس وجود دارد. مشاهده می‌شود که هسته بیشینه 90 واحدی در تراز 800 هکتوپاسکال در محدوده زمانی ساعت 1200 تا ساعت 1800 قرار دارد و پشته آن به سوی زمان‌های بعدی امتداد یافته است. در همین نقطه که زاگرس حذف می‌شود (شکل ۱۸) دیده می‌شود که این هسته بیشینه به 50 واحد کاهش می‌یابد و پشته آن در زمان‌های بعدی به صورت هسته بیشینه مجزایی تغییر می‌کند.

در نقطه بعد از زاگرس، با وجود زاگرس (شکل ۱۹)

می‌یابد. به همین ترتیب در بخش شرقی به سبب اثر فرونشینی و کاهش رطوبت لایه، پتانسیل بارش آن بخش کاهش می‌یابد. بنابراین با حذف زاگرس از مدل، مقدار بارش در منطقه به صورت یکنواخت تغییر می‌کند. به علاوه بارش همرفتی نیز در اثر حذف زاگرس کاهش می‌یابد.

به نظر می‌رسد که حذف زاگرس از مدل، موجب کاهش پتانسیل بارش در بخش غربی زاگرس و یکنواختی بارش در منطقه می‌شود و نیز موجب کاهش بارش همرفتی ناشی از اثر کوهستان را به دنبال دارد.

شکل ۱۲ پیش‌بینی حرکت قائم بالاسوی تراز 700 هکتوپاسکال را برای ساعت 0000 مورخ 26 دسامبر 2004 نشان می‌دهد. دیده می‌شود که هسته بیشینه این کمیت در جنوب غرب زاگرس قرار دارد و هم‌مقدارهای این کمیت، منطقه یادشده را در بر گرفته‌اند. با حذف زاگرس از دامنه مدل (شکل ۱۳) این هسته بیشینه به سوی شرق ایران جابه‌جا می‌شود و محور آن نیز تغییر می‌کند.

شکل ۱۴ پیش‌بینی 24 ساعته فرارفت دما در تراز 500 هکتوپاسکال با باد این تراز را در ساعت 0000 مورخ 26 دسامبر 2004 نشان می‌دهد. دیده می‌شود که در ضلع غربی زاگرس و نیز ضلع شرقی دریای سرخ دو هسته بیشینه این کمیت وجود دارد که در راستای زاگرس و نیز دریای سرخ، امتداد یافته‌اند. با حذف زاگرس (شکل ۱۵) دیده می‌شود که هسته بیشینه این کمیت به مناطق شرقی جابه‌جا می‌شود ولی هسته بیشینه اطراف دریای سرخ همچنان بدون تغییر باقی می‌ماند. هنگامی که اثر کوهساری از دامنه مدل حذف می‌شود (شکل ۱۶)، این دو هسته بیشینه نیز از بین می‌روند.

از بررسی معادله انرژی ترمودینامیکی شبه زمین‌گرد بی‌دررو به صورت زیر (هولتون، ۱۹۹۲):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\vec{V}_g \cdot \nabla T + \sigma \frac{P}{R_d} \omega \quad (5)$$

۵ نتیجه‌گیری

در این بند نتایج کلی شبه‌سازی، جمع‌بندی و ارائه می‌شود:

- سامانه‌های فشاری در برخورد با ارتفاعات دستخوش تغییر می‌شوند. این تغییر در اثر وجود حرکات بالاسو و پایین‌سو ناشی از اثر کوهستان، در بخش‌های غربی و شرقی به وجود می‌آید. به طوری که کم‌فشارها در بخش غربی، به سبب افزایش فشار، تضعیف و در بخش شرقی، به سبب کاهش فشار، تقویت می‌شوند. به همین ترتیب پرفشارها در بخش غربی تقویت و در بخش شرقی تضعیف می‌شوند.

- امواج تراز زیرین در برخورد با ارتفاعات دستخوش تغییر می‌شوند. این تغییر در اثر وجود حرکت‌های بالاسو و پایین‌سو ناشی از اثر کوهستان، در بخش‌های غربی و شرقی پدید می‌آید. به طوری که کم‌ارتفاع در بخش غربی، به سبب افزایش حرکت چرخندی، تقویت و در بخش شرقی، به سبب کاهش حرکت چرخندی، تضعیف می‌شود، به همین ترتیب پراارتفاع در بخش غربی تضعیف و در بخش شرقی تقویت می‌شود.

- بررسی میدان سرعت قائم بالاسو نشان می‌دهد در حالتی که اثر زاگرس در مدل وجود دارد، حرکت بالاسوی القا شده با ارتفاعات غربی زاگرس، به حرکت بالاسوی سامانه بارش را اضافه می‌شود از این رو با حذف این اثر، به سبب حذف حرکت روبه‌بالای القا شده، میزان حرکت بالاسو کاهش می‌یابد. همچنین در بخش شرقی زاگرس حرکت پایین‌سو تولید می‌شود که با حذف کوهستان، این اثر نیز در بخش شرقی کاهش می‌یابد.

- پتانسیل بارش سامانه‌ها در هنگام برخورد با بخش غربی زاگرس، به سبب افزایش حرکت بالاسوی ناشی از اثر کوه و نیز همگرایی جریان‌های مرطوب روی ارتفاعات غربی، افزایش می‌یابد. به همین ترتیب در بخش شرقی، به سبب اثر فرونشینی و کاهش رطوبت لایه، پتانسیل

مشاهده می‌شود که هسته بیشینه ۱۴۰ واحدی در ساعت ۱۸۰۰ روز بیست و ششم دسامبر در نزدیکی سطح زمین قرار گرفته است. با حذف زاگرس از مدل (شکل ۲۰) دیده می‌شود که در تراز ۸۰۰ هکتوپاسکال در ساعت ۰۶۰۰ روز بیست و ششم دسامبر هسته بیشینه ۱۴۰ واحدی به وجود می‌آید. بررسی این کمیت نشان می‌دهد که در صورتی که شرایط بارش فراهم بود، بدون اثر زاگرس در مناطق کویری بارش‌های مناسبی رخ می‌داد.

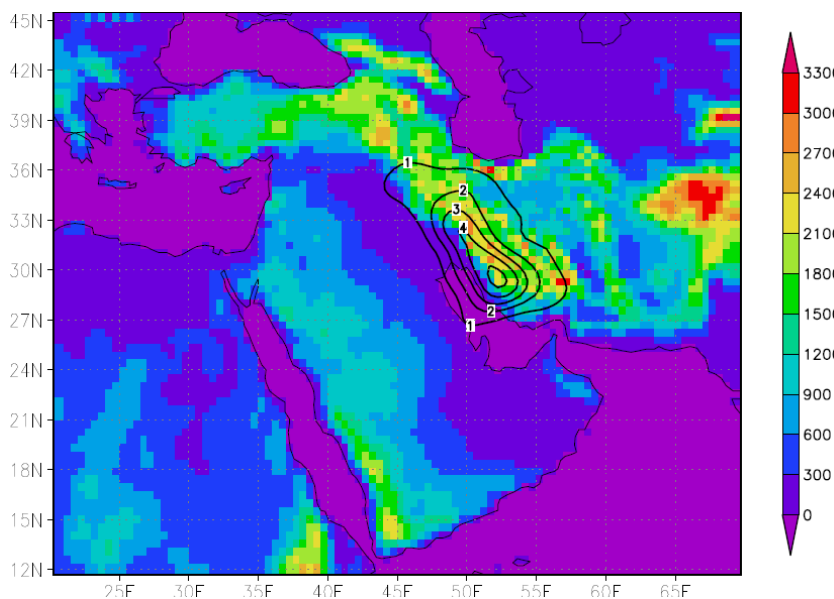
بررسی نتایج شبه‌سازی این حالت موردی نشان داد که زاگرس سبب می‌شود تا سامانه‌های فشاری در بخش‌های غربی و شرقی آن دستخوش تغییرات متفاوتی شوند. به علاوه این رشته‌کوه از طریق افزایش حرکت بالاسو و پایین‌سو سامانه‌ها، روی بسیاری از کمیت‌های ترمودینامیکی و دینامیکی آنها موثر است. به نحوی که اگر شرایط بارش فراهم باشد، در صورت نبود زاگرس در مناطق کویری، بارش بیشتری رخ خواهد داد. به علاوه این رشته‌کوه به عنوان مانع جریان‌های مرطوب، سبب افزایش بارش در مناطق غربی خود می‌شود.

از حذف اثر کوهساری در سراسر دامنه که بیانگر حذف منطقه همگرایی دریای سرخ است، دیده می‌شود که کم‌فشار واقع در جنوب غرب دریای سرخ کمی گسترده‌تر می‌شود و پشته فشاری یا هسته پرفشار کوچک روی ارتفاعات واقع در جنوب غرب دریای سرخ از بین می‌رود. در طول دوره بیستم تا بیست و پنجم دسامبر ۲۰۰۴ که روی ارتفاعات جنوب غرب دریای سرخ هسته کوچک پرفشار وجود دارد، بعد از گذشت ۶ ساعت از شبه‌سازی تا پایان مدت آن این پشته فشاری از بین می‌رود و کم‌فشار روی جنوب غرب دریای سرخ، به تدریج به سوی شرق گسترش می‌یابد. از این رو می‌توان گفت که در این حالت موردی، ارتفاعات واقع در جنوب دریای سرخ، نقشی در تشکیل کم‌فشار روی سودان و گسترش شمال‌سوی ناوه آن ندارند.

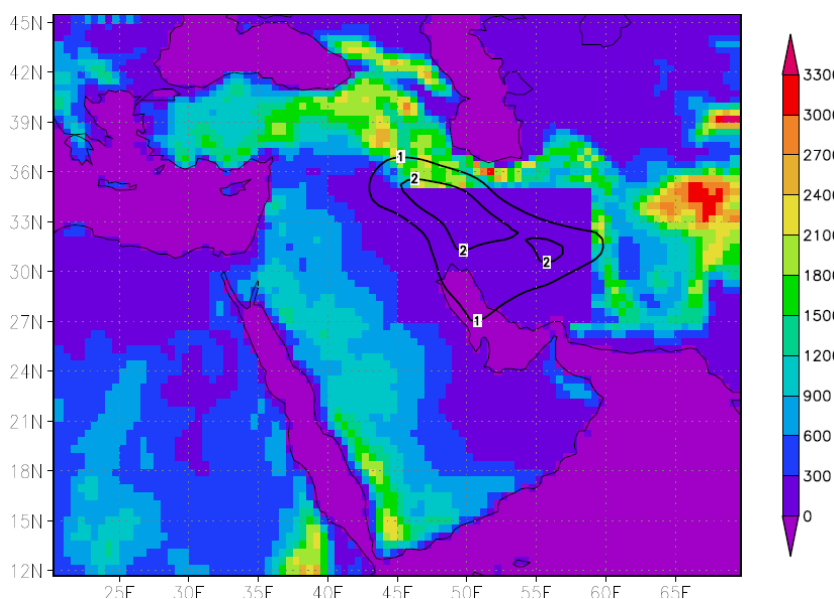
بالاسو در بخش غربی و پایین سو در بخش شرقی است، در ترازهای زیرین و میانی، فرارفت دمای مثبت بخش غربی و فرارفت دمای منفی بخش شرقی حذف می‌شود. از این رو فرارفت دما در منطقه یکنواخت می‌شود.

بارش کاهش می‌یابد. بنابراین با حذف زاگرس از مدل، مقدار بارش در منطقه به صورت یکنواخت تغییر می‌کند. به علاوه بارش همرفتی نیز در اثر حذف زاگرس کاهش می‌یابد.

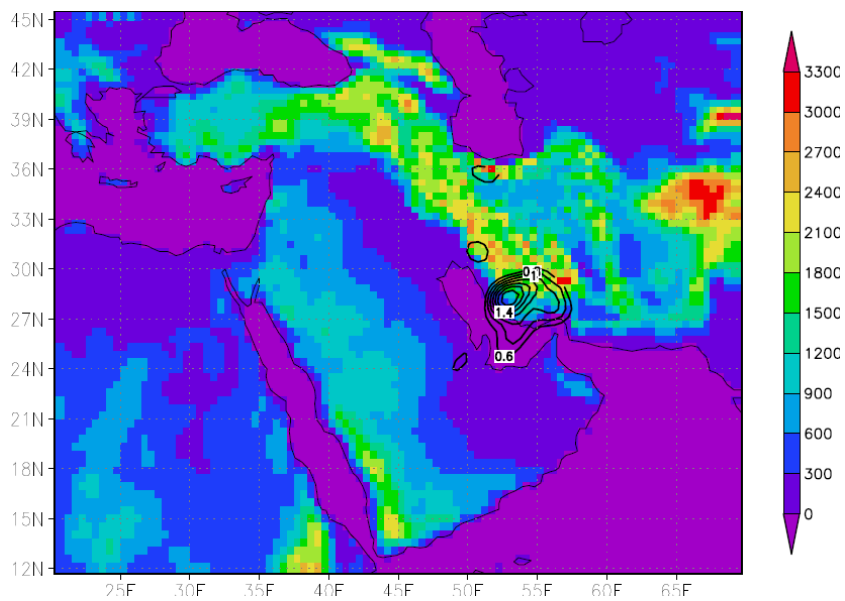
- با حذف زاگرس از مدل که نتیجه آن حذف حرکت



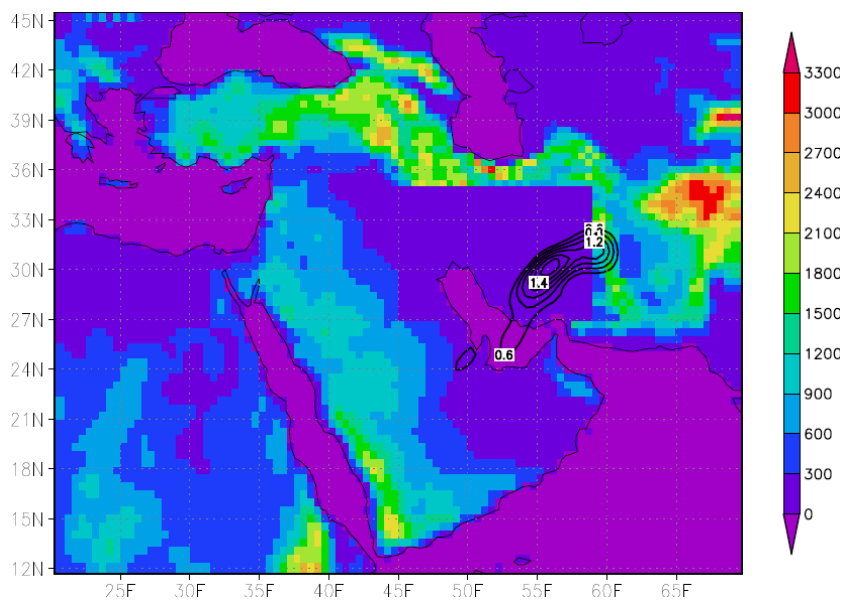
شکل ۱۰. پیش‌بینی ۲۴ ساعته بارش برحسب سانتی‌متر برای ساعت UTC ۰۰۰۰ بیست و ششم دسامبر سال ۲۰۰۴. فاصله پربندهای ارتفاع یک سانتی‌متر و اعداد روی محورهای مختصات طول و عرض جغرافیایی برحسب درجه است.



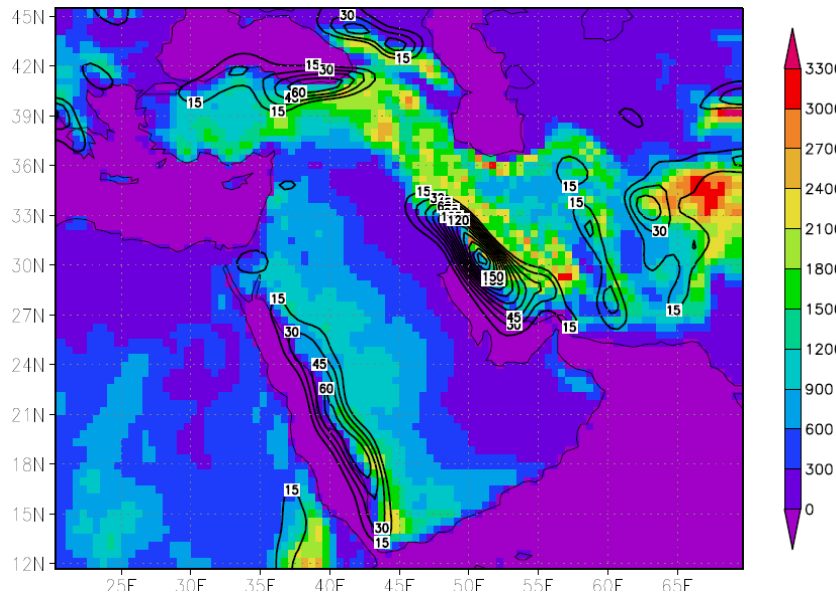
شکل ۱۱. مانند شکل ۱۰ ولی بدون زاگرس.



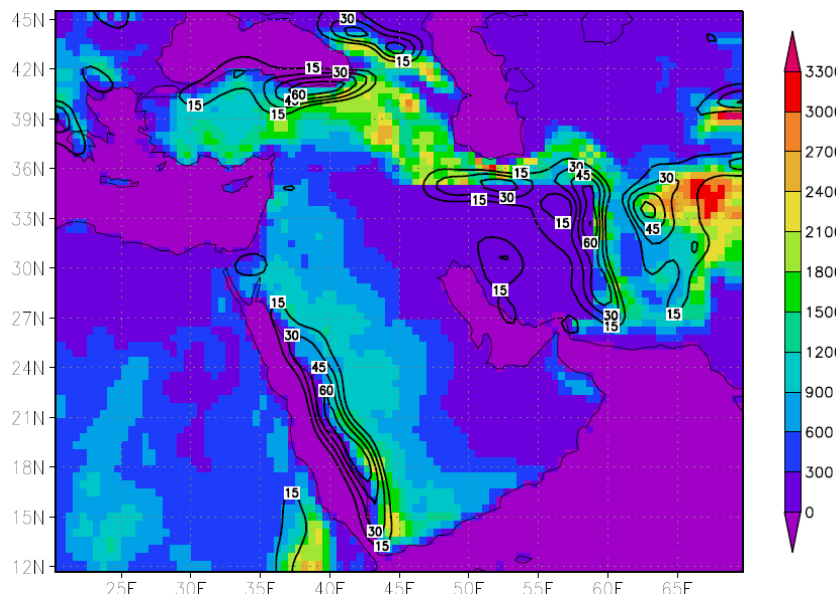
شکل ۱۲. میدان سرعت قائم بالاسوی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال برحسب 10^{-1} ms^{-1} برای ساعت ۰۰۰۰ UTC بیست و ششم دسامبر سال ۲۰۰۴. فاصله هم‌مقدارهای سرعت قائم ۰/۲ واحد است. اعداد روی محورهای مختصات طول و عرض جغرافیایی برحسب درجه است.



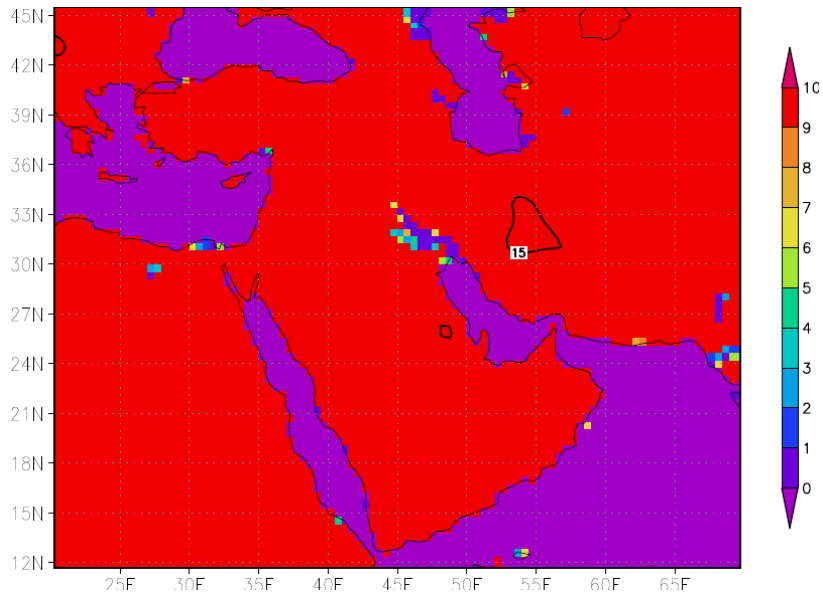
شکل ۱۳. مانند شکل ۱۲ ولی بدون زاگرس.



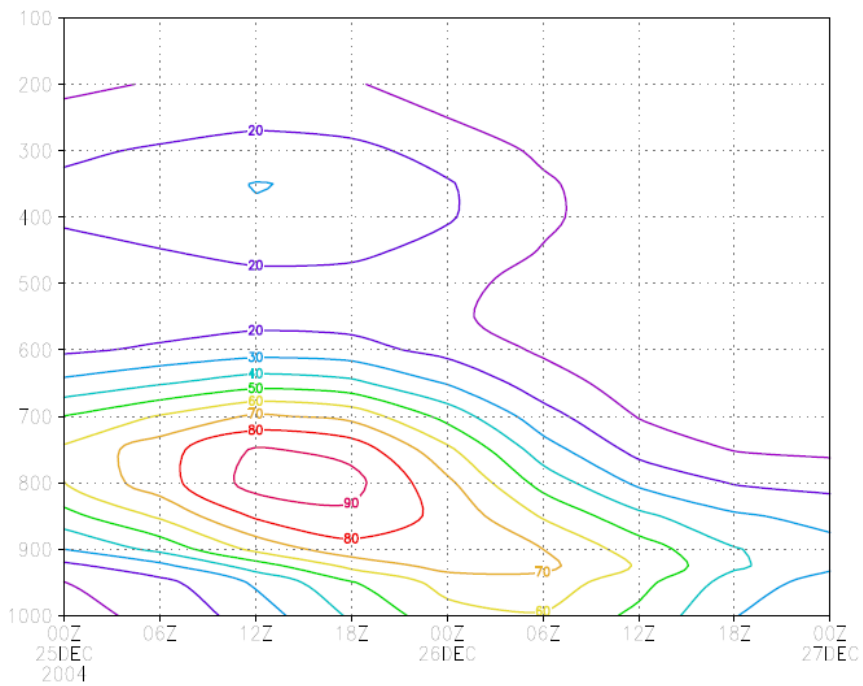
شکل ۱۴. میدان فرارفت دمای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برحسب $10^{-3} Ks^{-1}$ برای ساعت UTC ۰۰۰۰ بیست و ششم دسامبر سال ۲۰۰۴. فاصله هم مقادیرهای فرارفت دما ۱۵ واحد است. اعداد روی محورهای مختصات طول و عرض جغرافیایی برحسب درجه است.



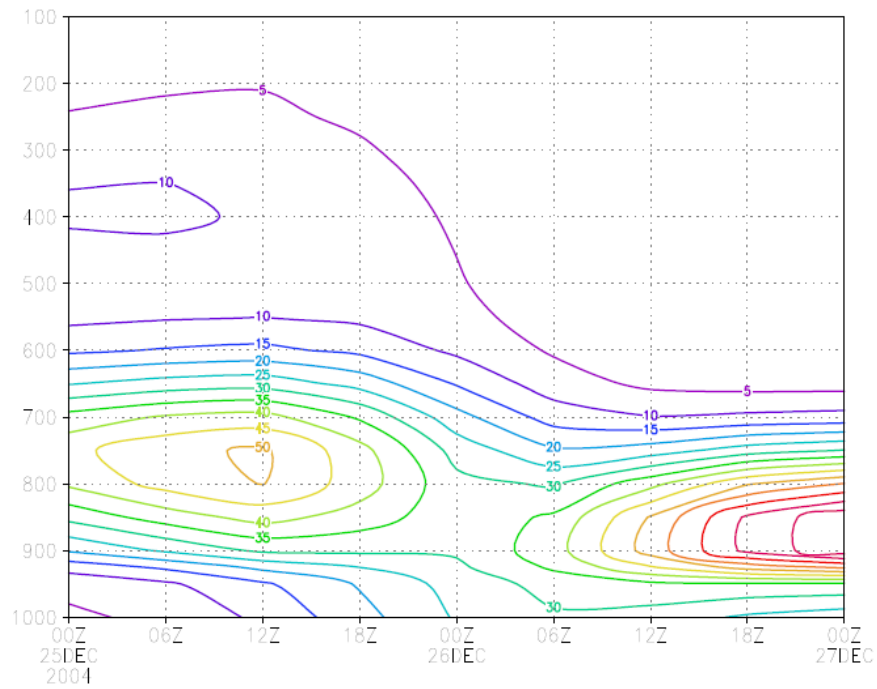
شکل ۱۵. مانند شکل ۱۴ ولی بدون زاگرس.



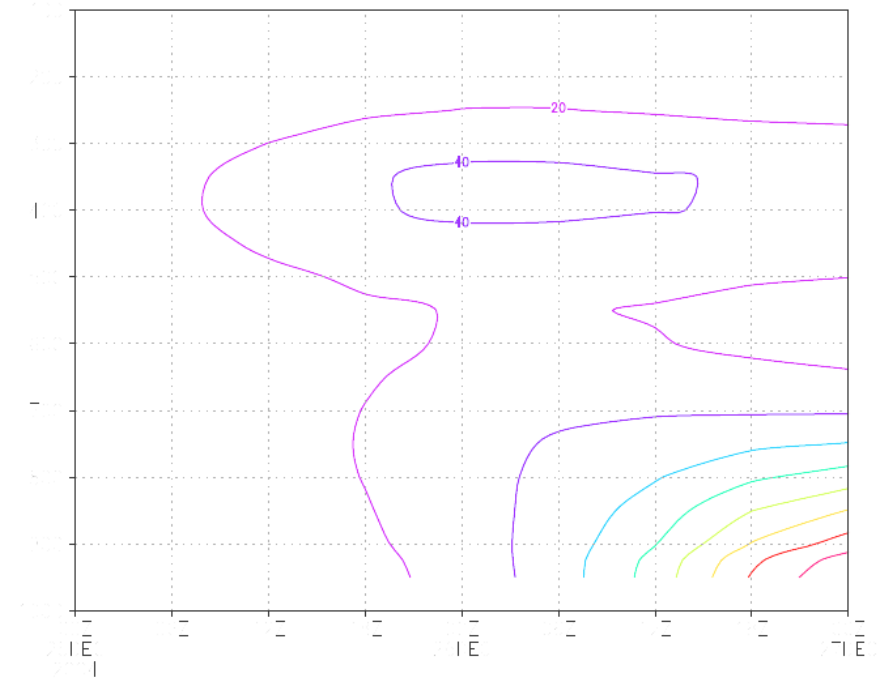
شکل ۱۶. مانند شکل ۱۴ ولی بدون اثر کوهساری.



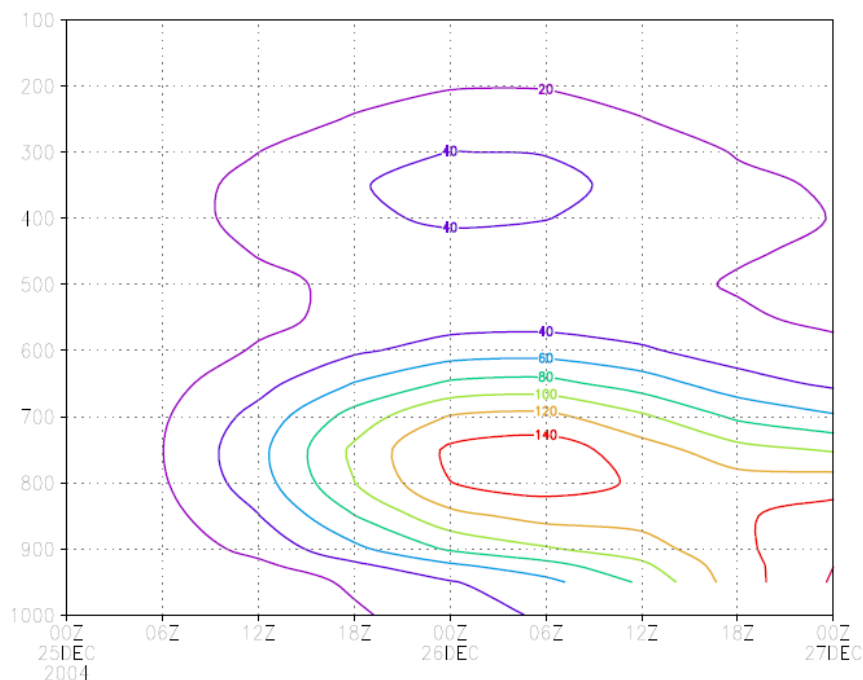
شکل ۱۷. نیم‌رخ قائم محتوای آب ابر برحسب 10^{-1}kgkg^{-1} ، برای نقطه قبل از زاگرس در روزهای بیست و پنجم تا بیست و هفتم دسامبر سال ۲۰۰۴. فاصله هم‌مقدارها فرارفت دما ۱۰ واحد است. محور طول‌ها زمان به فاصله ۶ ساعت از ساعت ۰۰:۰۰ روز ۲۵ دسامبر تا ساعت ۰۰:۰۰ روز ۲۷ دسامبر را نشان می‌دهد و محور عرض‌ها ترازهای فشاری از ۱۰۰۰ تا ۱۰۰ هکتوپاسکال را به فاصله ۱۰۰ هکتوپاسکال مشخص می‌کند.



شکل ۱۸. مانند شکل ۱۷ ولی بدون اثر زاگرس.



شکل ۱۹. نیم‌رخ قائم محتوای آب ابر برحسب 10^{-1}kgkg^{-1} ، برای نقطه بعد از زاگرس در روزهای بیست و پنجم تا بیست و هفتم دسامبر سال ۲۰۰۴. فاصله هم‌مقدارها فرازرفت دما ۱۰ واحد است. محور طول‌ها زمان به فاصله ۶ ساعت از ساعت ۰۰:۰۰ روز ۲۵ دسامبر تا ساعت ۰۰:۰۰ روز ۲۷ دسامبر را نشان می‌دهد و محور عرض‌ها ترازهای فشاری از ۱۰۰۰ تا ۱۰۰ هکتوپاسکال را به فاصله ۱۰۰ هکتوپاسکال مشخص می‌کند.



شکل ۲۰. مانند شکل ۱۹ ولی بدون اثر زاگرس.

تشکر و قدردانی

این پژوهش در قالب بخشی از پایان‌نامه دوره دکتری هواشناسی صورت گرفته و از حمایت مالی سازمان هواشناسی کشور برخوردار بوده است. بدین وسیله از مسئولین محترم سازمان هواشناسی کشور برای تأمین اعتبار، امکانات رایانه‌ای و حمایت‌های لازم تشکر می‌شود.

منابع

آزادی، م.، رضازاده، پ.، میرزائی، ا.، و وکیلی، غ.، ۱۳۸۲، پیش‌بینی عددی سیستم‌های زمستانی روی ایران: مطالعه مقایسه‌ای پارامترهای فیزیکی. هشتمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها شهریور ۱۳۸۲، دانشگاه تبریز.

– رشته‌کوه زاگرس موجب کاهش قابل توجه کمیت محتوای آب ابر می‌شود، به طوری که بخشی از محتوای آب ابر با دیواره زاگرس گرفته می‌شود. بنابراین در صورت فراهم بودن شرایط بارش، مقدار بارش در مناطق کویری پشت زاگرس، هنگامی که این ارتفاعات نباشند خیلی بیشتر از مقدار معمول آن خواهد بود.

– از حذف اثر کوهساری در سراسر دامنه که بیانگر حذف منطقه همگرایی دریای سرخ است، دیده می‌شود که کم‌فشار واقع در جنوب غرب دریای سرخ به سوی شرق گسترش می‌یابد و پشته فشاری یا هسته پرفشار کوچک روی ارتفاعات واقع در منطقه از بین می‌رود. از این رو ارتفاعات اطراف این دریا در توسعه شمال‌سوی ناوه فشاری با منشا دریای سرخ نقشی ندارد.

- Miglietta, M. M., and Buzzi, A., 2000, Anumerical study of moist stratified flows over isolated topography. November 2000. m.miglietta@isiata.le.cnr.ir.
- Tosi, E., and Fantini, M., 1982, Numerical experiments on orographic cyclogenesis: Relationship between the development of the lee cyclone and the basic flow characteristics. *Mon. Weather. Rev.*, **111**, 799-814.
- احمدی گیوی، ف.، سلطانزاده، ا.، ایران‌نژاد، پ.، و پازوکی، ر.، ۱۳۸۳، بررسی تأثیر کوهستان و کاربری اراضی اقلیم منطقه ایران با استفاده از مدل اقلیمی منطقه‌ای. ۲- بررسی تأثیر طرح‌واره زیر شبکه Bats در مدل منطقه‌ای RegCM. همایش پیش‌بینی عددی وضع هوا ۳۰ آذر ۱۳۸۳.
- علیزاده چوبیری، ا.، ۱۳۸۵، مطالعه چرخندزایی در منطقه شمال دشت کویر با استفاده از مشاهدات و مدلی عددی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- Alpert, P., 1986, Mesoscale indexing of the distribution of orographic precipitation over high mountains. *J. Appl. Meteorol.*, **25**, 532-545.
- Boccolari, M., Fazlagic, S., Pugnaghi, S., and Santangelo, R., 2001, Radio sounde vertical profile validation data specification document. Barcelona 16 march 2001, Spain.
- Byers, H, R., 1974, General meteorology. McGraw Hill, USA.
- Carlson, T. N. 1991, Mid-Latitude weather system. University Press, Cambridge, USA.
- Chen, C. C., Durran, D. R., and Hakim, G. J., 2004, Mountain wave momentum flux in an evolving synoptic scale flow, Submitted to *J. Atmos. Sci.*, Sept., **24**, 2004.
- Cole, B. A., 2003, Sensitivity of orographic precipitation to changing ambient conditions and terrain geometries: An idealized modeling precipitation. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 588-606.
- Holton, J. R., 1992, An introduction to dynamic Meteorology, Academic Press Inc., San Diego, USA.
- Durran, D. R., and Klemp, J. B., 1983, A compressible model for the simulation of moist mountain waves, *J. Atmos. Sci.*, **111**, 2341-4032.
- Krichak, S. O., Alpert, P., and Krishnamurti, T., 1997a, Interaction of topography and tropospheric flow-a possible generator for the red sea trough. *Mete. Atmos. Phy.*, **63**, 149-158.
- Krichak, S. O., Alpert, P., and Krishnamurti, T., 1997b, Red sea trough/cyclone development-numerical investigation. *Mete. Atmos. Phys.*, **63**, 159-169.