

بررسی سه‌ماهه تأثیر رشته کوه‌های زاگرس بر جریان‌های میان‌مقیاس منطقه شرق زاگرس با استفاده از مدل منطقه‌ای RegCM

ایمان سلطانزاده^{۱*}، فرهنگ احمدی‌گیوی^۲ و پرویز ایران‌نژاد^۲

^۱مریی گروه مراقبت پرواز، دانشکده پرواز، دانشگاه هوایی شهید ستاری و دانشجوی دکتری هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲استادیار گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۱۳۸۶/۱۲/۸۴، پذیرش نهایی: ۸۵/۶/۲۸)

چکیده

در این مقاله، در راستای شناخت نقش رشته کوه‌های زاگرس بر سامانه‌های جوی واقع بر ایران، به بررسی حساسیت مدل RegCM در آشکارسازی این نقش در مقیاس منطقه‌ای و در بازه‌ای سه‌ماهه (از یکم ژانویه ۱۹۹۹ تا پایان مارس ۱۹۹۹) پرداخته شده است. برای این کار، آزمایش‌های متفاوتی صورت گرفته و مدل در وضعیت‌ها، با رشته کوه و بدون آن اجرا شده است. با توجه به مجهول بودن نقش پوشش گیاهی زاگرس و همچنین میزان آشکارسازی این فاکتور منطقه‌ای با مدل، اجرای دیگری با شرایط بدون رشته کوه و جایگزین شدن پوشش گیاهی زاگرس با پوشش غالب در مرکز ایران (یعنی بیابان) صورت گرفته و نتایج این آزمایش‌ها با یکدیگر مقایسه شده است.

با حذف رشته کوه‌های زاگرس، میزان بارش در مناطق مرکزی و شرقی ایران افزایش می‌یابد، ولی میزان بارش در کل محدوده شبیه‌سازی تقریباً ثابت می‌ماند. با توجه به پوشش گیاهی کم‌پشت زاگرس و همچنین بازه آزمایش‌ها، تغییر پوشش گیاهی این رشته کوه تفاوت شاخصی را در نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان نمی‌دهد. برای بررسی بیشتر حساسیت مدل در آشکارسازی نقش مناطق کوهستانی، میدان‌های کمیت‌های تاوایی و هم‌گرایی در سطوح متفاوت هم‌فشاری نیز تهیه و تحلیل شده است. به‌طور کلی همخوانی خوبی در الگوهای تاوایی و هم‌گرایی در رو به باد و پشت به باد رشته کوه‌های زاگرس مشاهده می‌شود که بیانگر موفقیت مدل در نشان دادن نقش این رشته کوه‌ها است. تقریباً همه نتایج، نقش اساسی رشته کوه‌های زاگرس در الگوهای تاوایی و هم‌گرایی در سطوح پایین و همچنین بارش، خصوصاً در نواحی غربی و بعضاً مرکزی ایران را نشان می‌دهند. در مقابل، اثر این رشته کوه‌ها در الگوهای بارش، تاوایی و هم‌گرایی نواحی جنوبی ایران کمتر است.

واژه‌های کلیدی: مدل منطقه‌ای RegCM، رشته کوه‌های زاگرس، پوشش گیاهی زاگرس، بارش، تاوایی و هم‌گرایی

۱ مقدمه

جنوبی خود در مسیر جریان‌های مداری قرار دارد و می‌تواند آنها را تحت تأثیر قرار دهد. بررسی و آشکارسازی اثر این رشته کوه‌ها بر جریان‌های جوی واقع بر مرکز ایران (شرق این رشته کوه‌ها)، موضوع این مقاله است.

توزیع مکانی متغیرهای اقلیمی، از جمله دما و بارش، در بسیاری از مناطق جهان تحت تأثیر واداشتهای منطقه‌ای از قبیل توپوگرافی، منابع آبی و خطوط ساحلی است. آشکارسازی این واداشتهای منطقه‌ای فقط با به‌کارگیری مدل‌های با توان تفکیک بالاتر از مدل‌های بزرگ‌مقیاس (دسته بزرگی از مدل‌های عددی، از جمله

توزیع رشته کوه‌های وسیع، تأثیر عمده‌ای بر گردش عمومی جو و آب و هوای منطقه‌ای و جهانی دارد. با وجود اینکه عوامل متفاوتی در داخل و خارج از سامانه اقلیمی در پدید آمدن مناطق خشک سطح زمین دخالت دارند، ولی نقش کوه‌ها در پدید آمدن این مناطق در عرض‌های میانی تا حدی است که گفته می‌شود رشته کوه‌های بزرگ، پدید آورنده امواج ایستایی هستند که در بالاسوی ناوه این امواج، مناطق خشک شکل می‌گیرند (بروکولی و مانابی، ۱۹۹۲).

رشته کوه‌های زاگرس واقع در غرب فلات ایران، از جمله رشته کوه‌های وسیعی است که با گستره شمالی-

می‌دهد. از آنجا که هدف مطالعه حاضر بررسی اثر زاگرس بر شبیه‌سازی‌های مدل است، به منظور نمایش دقیق‌تر نتایج، این محدوده به شکلی انتخاب شده که مرکز آن با مختصات $34^{\circ}N$ و $48^{\circ}E$ بر ارتفاعات زاگرس واقع شود (شکل ۱). شبیه‌سازی‌ها بر شبکه‌ای با تفکیک افقی $45km \times 45km$ و گام زمانی 135 ثانیه صورت گرفته است. برای شرایط مرزی و آغازین از داده‌های باز تحلیل شده NNRP1 مرکز ملی پیش‌بینی محیطی (ایالات متحده)، (NCEP, National Center for Environment Prediction)، با تفکیک افقی $2/5^{\circ}$ استفاده شده است. در تعیین شرایط مرزی، روش واهلش نمایی (exponential relaxation) (دیویس و تورنر، ۱۹۷۷) به کار رفته است. داده‌های جهانی دمای سطح دریای درون‌یابی بهینه (OISST, Optimal International Sea Surface-) (NOAA, National Oceanic and-) مرکز (Temperature Atmospheric Administration) برای تعیین دمای سطح آب، مورد استفاده قرار گرفته است. سه اجرای مدل RegCM در شرایط یکسان و فقط با تفاوت‌های زیر صورت گرفته است:

اجرای یکم (اجرای مرجع): در این اجرا رشته کوه‌های زاگرس با ویژگی‌های موجود در مدل گنجانده شده است. داده‌های توپوگرافی سازمان نقشه‌برداری ایالات متحده (USGS, United States Geological Survey) با تفکیک افقی 3 دقیقه قوسی و نسخه دوم داده‌های تعیین پوشش سطح خشکی‌های جهانی (GLCC, Global Land-) (Cover Characterization) با تفکیک افقی 3 دقیقه قوسی برای تعیین پوشش گیاهی و نوع خاک به کار برده شده است. داده‌های GLCC با رده‌بندی پوشش سطحی و نوع خاک (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme) (BATS, طرح‌واره سطح جفت شده (coupled) با مدل RegCM) هم‌خوانی مناسبی دارد (شکل ۲). یادآور می‌شود که اجرای مدل با تفکیک افقی مورد استفاده در

مدل‌های گردش عمومی (GCMs)، مدل‌های بزرگ مقیاس هستند. این مدل‌ها با توان تفکیکی از مرتبه $100km$ ، تنها توانایی آشکارسازی بخشی از نقش پیچیده کوهستان‌ها بر اقلیم مناطق مختلف را دارند، یعنی مدل‌های منطقه‌ای، امکان‌پذیر است (جیورجی، ۱۹۹۰). مدل اقلیمی منطقه‌ای (RegCM, regional climate model) از جمله مدل‌های عددی مرکز بین‌المللی مطالعات فیزیک نظری (ICTP) است که در سال‌های اخیر، در حکم ابزار اساسی در مطالعات اقلیم منطقه‌ای، مورد توجه بسیاری از محققین علوم جو قرار گرفته است. ساختار داخلی و جزئیات مدل RegCM را ایران‌نژاد و همکاران (۱۳۸۳) شرح داده‌اند.

به منظور بررسی اثر بلندی‌های زاگرس و همچنین نقش پوشش گیاهی این بلندی‌ها در سامانه‌های جوی ورودی به ایران مرکزی سه آزمون عددی با استفاده از مدل RegCM صورت گرفته است. مقایسه شبیه‌سازی‌های میدان‌های دما، بارش و کمیت‌های دینامیکی حاصل از سه اجرای مدل، برآوردی از اثرات رشته کوه‌های زاگرس بر سامانه‌های جوی وارد شده به منطقه ایران به دست می‌دهد. در بخش‌های زیر شرایط سطحی گوناگون تعیین شده برای این سه اجرا و نتایج حاصل از آنها شرح داده شده است.

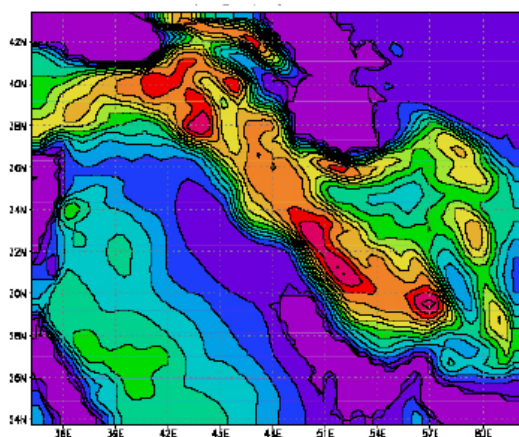
۲ داده‌ها و روش شبیه‌سازی

در مطالعه حاضر، RegCM سه بار برای دوره یکم دسامبر ۱۹۹۸ تا پایان مارس ۱۹۹۹ اجرا شده است، ولی به منظور کاهش اثر شرایط آغازین در شبیه‌سازی‌ها، داده‌های سه ماه ژانویه ۱۹۹۹ تا مارس ۱۹۹۹ مورد تحلیل قرار گرفته است. منطقه مورد مطالعه محدوده عرض جغرافیایی $24^{\circ}N$ (سواحل خلیج فارس) تا $44^{\circ}N$ (شمال دریای خزر) و طول جغرافیایی $34^{\circ}E$ (دریای سرخ و شرق مدیترانه) تا $63^{\circ}E$ (مرزهای شرقی ایران) را پوشش

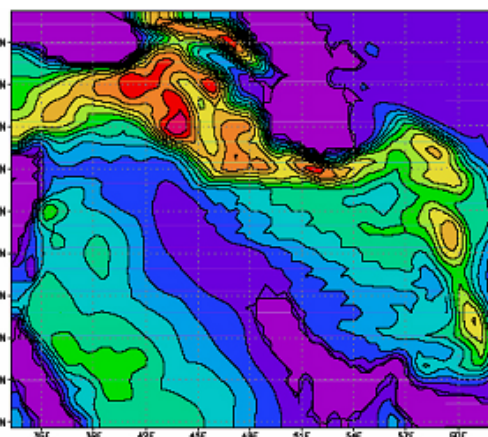
جایگزین آن شده است. پوشش گیاهی بدون تغییر و همانند اجرای یکم در نظر گرفته شده است. مقایسه نتایج اجرای یکم و دوم می‌تواند نقش مستقیم توپوگرافی زاگرس در الگوهای محلی و منطقه‌ای از سامانه‌های جوی ایران را نشان دهد.

این مطالعه، موجب می‌شود که ناهمواری‌های سطح تا حدی تعدیل شود.

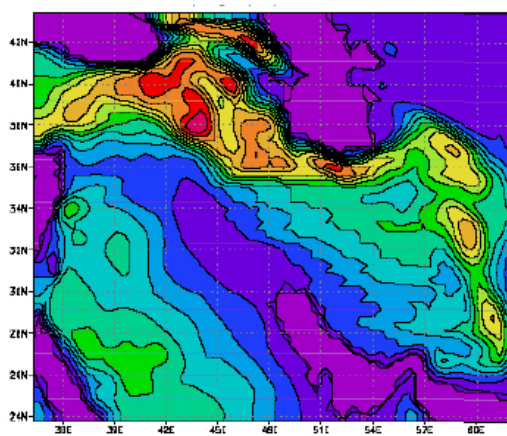
اجرای دوم: این اجرا مشابه اجرای یکم است، با این تفاوت که ارتفاعات زاگرس حذف و ارتفاع نقاط شبکه در منطقه زاگرس با مقادیر حاصل از درونیابی خطی بین ارتفاع‌های نقاط شبکه‌ای غرب و شرق رشته کوه



الف

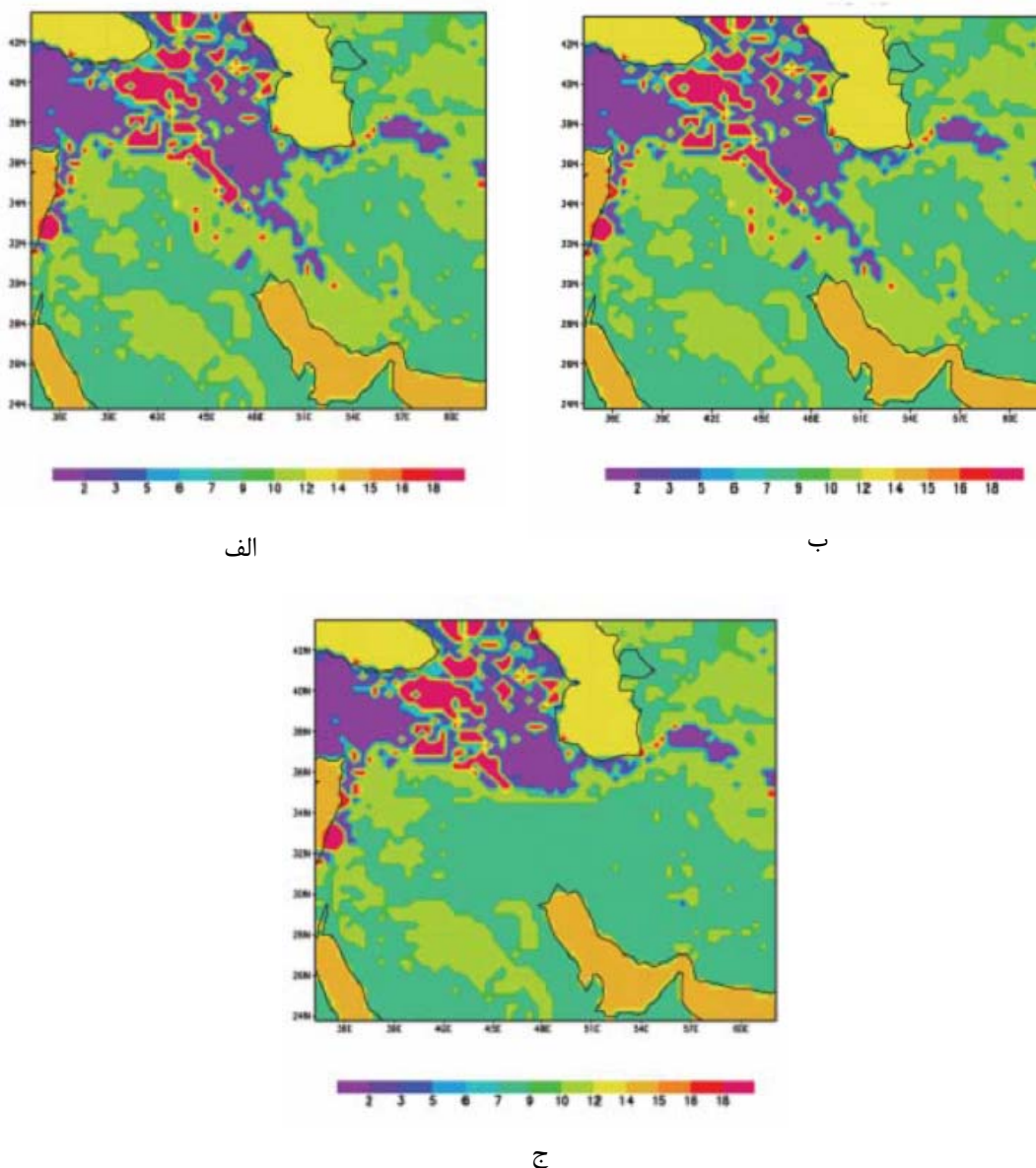


ب



ج

شکل ۱. توپوگرافی به‌کار رفته در سه اجرای مدل: (الف) اجرای یکم، (ب) اجرای دوم و (ج) سوم (برای جزئیات بیشتر به متن مراجعه شود).



شکل ۲. زمین به کار رفته در سه اجرای مدل: (الف) اجرای یکم، (ب) اجرای دوم و (ج) اجرای سوم (برای جزئیات بیشتر به متن مراجعه شود).

منطقه را آشکار می‌سازد، در حالی که مقایسه نتایج اجراهای دوم و سوم صرفاً نشانگر نقش تغییر پوشش گیاهی در اقلیم منطقه است.

در مطالعه حاضر تأکید روی متغیرهای اقلیمی دما و بارش بوده است. همان‌طور که انتظار می‌رود پستی و بلندی‌ها و مناطق مرتفع از قبیل رشته کوه‌های زاگرس می‌تواند در چرخندزایی و واچرخندزایی در سطح زمین

اجرای سوم: از آنجا که پستی و بلندی بر اقلیم و در نتیجه بر پوشش گیاهی اثر می‌گذارد، در اجرای سوم علاوه بر حذف ارتفاعات زاگرس (اجرای دوم)، پوشش گیاهی نقاط شبکه ناحیه زاگرس نیز تغییر داده شده و مشابه پوشش بیابانی مرکزی ایران در نظر گرفته شده است. مقایسه نتایج اجرای یکم و سوم نقش توأم فیزیوگرافیکی و زیستی ناحیه زاگرس بر جریان‌های جوی

حداقل شاخص سطح برگ و نسبت سطح پوشیده شده با گیاه‌اند و همچنین طول زبری آنها در حدود ۵-۶ سانتی‌متر (در حد طول زبری پوشش بیابان، معادل دسته شماره ۸ به کار رفته در طرح‌واره BATS) است. تفاوت عمده این دسته‌ها با دسته بیابانی در تعرق بیشتر این دسته‌ها و در مقابل سپیدی نسبتاً بالاتر دسته بیابانی است. باید تذکر داد که در بازه زمانی به انجام رساندن آزمون‌های عددی این مطالعه یعنی فصل زمستان، به علت برگ‌ریزان بیشتر گیاهان منطقه و کاهش نسبت سطح پوشیده با گیاه، این اختلاف تا حدی تعدیل می‌شود. با توجه به مطالب فوق، به جز در نواحی غربی ایران، تفاوت شاخصی در شبیه‌سازی دمای سطح در اجرای با پوشش گیاهی واقعی زاگرس (اجرای دوم) و اجرای سوم که پوشش گیاهی زاگرس با بیابان جایگزین شده است، انتظار نمی‌رود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی دما نیز این نکته را تأیید می‌کند. اختلاف در شبیه‌سازی دمای اجراهای دوم و سوم را می‌توان در شکل ۳-ج مشاهده کرد. تفاوت موجود در غرب ایران ناشی از حذف تبخیر و تعرق پوشش گیاهی بعد از جایگزین کردن پوشش گیاهی زاگرس با بیابان در اجرای سوم است. به علاوه بی‌هنجاری‌های مثبت ولی جزئی دیگر نیز در مناطق مرکزی و شرقی ایران (شکل ۳-ج) قابل مشاهده است. شکل‌گیری این الگوها را می‌توان به پسخور بارش-دمای سطح نسبت داد که در ادامه این بخش به بررسی آن خواهیم پرداخت. این روند (تفاوت جزئی در دو شبیه‌سازی دوم و سوم) را کم و بیش برای سایر متغیرها نیز می‌توان مشاهده کرد.

نتایج متوسط‌گیری شده فصلی بارش ماهانه برای هر سه شبیه‌سازی در شکل ۴ آورده شده است. در اولین اجرا، مقادیر بیشینه بارش را می‌توان روی دامنه‌های غربی ارتفاعاتی چون رشته کوه‌های آرارت و زاگرس و همچنین دامنه‌های شمالی ارتفاعات البرز مشاهده کرد. این بارش‌ها را می‌توان به جریان‌های غالب غربی و شمال

نقش اساسی داشته باشد. برای مطالعه این اثر، نقشه‌های کمیت‌های دینامیکی تاوایی و هم‌گرایی در نواحی مختلف زاگرس (رو به باد، پشت به باد و بالای کوه) تهیه و تحلیل شده است. در بررسی‌ها، اجرای یکم درحکم اجرای مرجع در نظر گرفته شده و نتایج دو اجرای دیگر با آن مقایسه شده است.

۳ بررسی نتایج

۱-۳ دمای سطح و بارش

شکل ۳ تفاوت دو به دو شبیه‌سازی‌های دمای منطقه برای اجراهای متفاوت را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های ۳-الف و ۳-ب، مقادیر منفی بی‌هنجاری دمایی حاصل تفاضل نتایج اجراهای دوم و سوم از اجرای یکم (یعنی اجراهای بدون توپوگرافی زاگرس از اجرای یکم که با توپوگرافی زاگرس بوده است)، در غرب ایران مشاهده می‌شود. این بی‌هنجاری‌های منفی در اثر حذف آهنگ افت دما کوه (نتایج شبیه‌سازی دما، این مقدار را برای ارتفاعات زاگرس در حدود ۶/۶-۶ کلوین بر کیلومتر برآورد می‌کند که با مقدار متوسط جهانی (۶/۵ کلوین بر کیلومتر) محاسبه شده کیتو (۲۰۰۱) همخوانی دارد) در اجراهای دوم و سوم شکل گرفته است. بی‌هنجاری‌های مثبت دمایی نیز در مرکز و شرق ایران وجود دارد که بعداً به بررسی آن خواهیم پرداخت.

پوشش گیاهی زاگرس (براساس داده‌های پوشش گیاهی GLCC با دقت ۳ دقیقه قوسی) عمدتاً از نوع مزارع پراکنده در دامنه رشته کوه (حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد)، معادل دسته شماره ۱۰ و علفزارهای کوتاه (در حدود ۲۰ درصد)، معادل دسته شماره ۲ به کار رفته در طرح‌واره BATS و بقیه درختان سوزنی برگ و پهن برگ به صورت کاملاً پراکنده و محدود است. با مراجعه به جدول پوشش سطح-پوشش گیاهی BATS می‌توان دید که دسته‌های دارای پوشش غالب در این منطقه، در فصول سرد دارای

غربی این محدوده و وجود منابع رطوبت مناسب، همچون دریا‌های سیاه، مدیترانه و خزر در سمت رو به باد کوه‌های یاد شده نسبت داد. به همین دلیل الگوهای بارش متوسط در ارتفاعات و دامنه‌های زاگرس تقریباً از الگوی توپوگرافی تبعیت می‌کنند و نسبتاً منظم‌اند. در مقابل، مناطق مرکزی و شرقی ایران دارای مقادیر حداقل بارش، در حد بارش‌های روزانه کمتر از نیم تا دو میلی متر در این فصل‌اند (شکل ۴-الف).

در اجراهای دوم و سوم (شکل‌های ۴-ب و ۴-ج) دیگر شاهد بیشینه بارش روی مناطق غربی ایران نیستیم. این نتایج به نوعی نقش توپوگرافی در صعود اجباری توده‌های هوا و در نتیجه افزایش بارش در مناطق غربی ایران را نشان می‌دهد. نکته دیگر پراکندگی الگوی بارش در نتایج اجراهای دوم و سوم و همچنین افزایش نسبی بارش در مناطق شرق و مرکز ایران است. این افزایش بارش در مناطق یاد شده و کاهش آن در مناطق غربی ایران به‌طور روشن‌تر در شکل ۵ به چشم می‌خورد. این شکل نمایشگر میدان‌های تفاضلی اجراهای دوم و سوم از اجرای یکم (شکل‌های ۵-الف و ۵-ب) و همچنین اجرای سوم از دوم (شکل ۵-ج) است. شکل‌های ۴ و ۵ افزایش چشم‌گیر بارش در ارتفاعات جنوب شرقی ایران در اجراهای دوم و سوم را نشان می‌دهد. در اجراهای بدون توپوگرافی زاگرس، جریان‌های جوی پس از عبور از مناطق غربی ایران بدون اینکه رطوبت قابل توجهی از دست دهند، با ارتفاع‌های جنوب شرقی ایران برخورد می‌کنند و در اثر صعود و رسیدن به اشیاع، شروع به بارش می‌کنند. به بیانی دیگر، ارتفاع‌های نسبتاً بلند جنوب شرقی ایران نقش جایگزین ارتفاع‌های حذف شده زاگرس را بازی می‌کنند و کاستی بارش‌های مناطق غربی ایران تا حد زیادی با بارش‌هایی که در اثر این ارتفاع‌ها در محدوده مورد بررسی ایجاد می‌شود، جبران شده است.

مطالعات آماری، اختلاف بارش اجراهای دوم و سوم

را بسیار ناچیز نشان می‌دهد. برای مقایسه نتایج میانگین‌های میدانی بارش در شبیه‌سازی‌های متفاوت از نمودارهای مقایسه‌ای در شکل ۶ استفاده کرده‌ایم. به منظور بررسی کمی نتایج، ناحیه مستطیلی شکل محدود به $27/5^{\circ}N$ تا $36/5^{\circ}N$ و $52/5^{\circ}E$ تا $62^{\circ}E$ در شرق رشته کوه زاگرس در نظر گرفته‌ایم. در نمودارهای شکل ۶ روی هر محور مقادیر میانگین میدانی بارش یک یا دو شبیه‌سازی با نتایج شبیه‌سازی دیگر مقایسه شده است. بدیهی است در صورتی که نتایج شبیه‌سازی‌ها یکسان باشند، خط پرازش داده شده بر داده‌ها منطبق با خط ۱:۱ (خط ۴۵ درجه) خواهد بود. نمودار مقایسه‌ای اجراهای دوم و سوم نسبت به اجرای یکم که روی کل محدوده مورد مطالعه است، تقریباً بر خط ۴۵ درجه منطبق‌اند (شکل ۶-الف). شکل ۷-ب انحراف نسبی یا کسر اختلاف میانگین نصف‌النهاری نتایج اجراهای دوم و سوم از نتایج اجرای یکم نسبت به اجرای یکم برحسب درصد را نشان می‌دهد. انحراف منفی بارش در قسمت میانی محور افقی و انحراف مثبت بارش در نواحی شرقی محور قرار دارد. طول‌های جغرافیایی میانی محور، مطابق با محل قرار گرفتن رشته کوه‌های زاگرس است. به منظور نمایش روشن‌تر این نکته، میانگین ارتفاع طول‌های جغرافیایی در برگزیده رشته کوه زاگرس قبل و بعد از برداشتن رشته کوه در شکل ۷-الف ارائه شده است.

شکل‌های ۶-ب و ۶-ج نمایشگر انحراف مثبت بارش در ناحیه مستطیل شکل است. به‌طور متوسط در اجرای دوم شاهد افزایش ۱۴٪ و در اجرای سوم شاهد افزایش ۱۰/۶٪ بارش نسبت به اجرای مرجع هستیم. زمانی که رشته کوه زاگرس در اجراهای دوم و سوم حذف می‌شود، جریان‌های مرطوب‌تر به مرکز ایران راه می‌یابند و این جریان‌ها، بارش بیشتر در مرکز و شرق ایران را به دنبال دارند. افزایش بارش، موجب افزایش تبخیر سطحی و کاهش دمای سطح (شکل‌های ۳-الف و ۳-ب)

هر چند که حذف و یا وارد شدن عواملی چون تعرق گیاهی در نتیجه تغییر پوشش گیاهی رشته کوه‌های زاگرس در حکم یک واقعیت فیزیکی در شبیه‌سازی‌ها ایفای نقش می‌کند، ولی برای آشکارسازی آن به دوره‌های شبیه‌سازی طولانی‌تری که شامل فصل رشد باشد نیاز است. در کنار عوامل فیزیکی فوق، نباید از نقش تعیین‌کننده منابع متفاوت خطا در طرح‌واره‌های مرتبط با بارش غافل شد. هر چند که در اینجا امکان تفکیک نقش هر کدام از این عوامل (عوامل فیزیکی و خطا) وجود ندارد، تأثیر منابع متفاوت خطا در مدل نیز می‌تواند از جمله دلایل اصلی تغییر نتایج بارش در اجراهای دوم و سوم باشد. اگرچه این تأثیر در کل محدوده شبیه‌سازی ظاهر می‌شود، ولی به نظر می‌رسد که نواحی تفاضلی پراکنده بارش در این دو اجرا و در سمت رو به باد رشته کوه‌های زاگرس (شکل ۵-ج)، غالباً به دلیل این دسته از عوامل است. این تأثیر را در اختلاف انحرافات بارش اجراهای دوم و سوم بین $36^{\circ}E$ تا $45^{\circ}E$ محور افقی شکل ۷-ب نیز می‌توان مشاهده کرد. اختلاف بارش مشاهده شده در نتایج اجراهای دوم و سوم و در نواحی مرکزی و شرقی ایران و همچنین سمت رو به باد رشته کوه‌های زاگرس به هر علتی که باشد (در اثر فرایندهای فیزیکی و یا ظاهر شدن منابع متفاوت خطا)، به دلیل پس‌خور بارش-دمای سطح، می‌تواند موجب شکل‌گیری الگوهای بی‌هنجاری دمایی در این نواحی شود (شکل ۳-ج).

۳-۲ تاوایی و هم‌گرایی

برای بررسی اثر کوهستان در جریان‌های جوی، یک جریان غربی یکنواخت و بی‌دررو در نظر می‌گیریم که با مانعی کوهستانی برخورد می‌کند. این جریان هوا واقع در ستونی است که بین دو سطح هم‌دمای پتانسیلی قرار دارد. با صرف‌نظر کردن از اصطکاک سطح و به علت یکنواخت بودن (بدون چینش افقی) جریان، تاوایی نسبی

می‌شود. می‌توان انتظار داشت که کاهش دمای سطح، کاهش شار گرمای محسوس در این نواحی را به دنبال داشته باشد. از سوی دیگر افزایش بارش، افزایش ابرناکی و در نتیجه کاهش انرژی خورشیدی دریافتی توسط سطح را به دنبال دارد. این پس‌خور مثبت موجب افزایش هر چه بیشتر بارش و همچنین سردتر شدن سطح می‌شود. به عبارت دیگر، در اجرای مرجع، وجود کوهستان، به علت کاهش تبخیر سطحی موجب ایجاد مناطقی با دمای سطحی بالاتر نسبت به اجراهای دوم و سوم می‌شود. این نتیجه به‌خوبی با کارهای بروکولی و مانابی (۱۹۹۲) در توجیه ایجاد مناطق خشک عرض‌های میانی همخوانی دارد.

حذف پوشش گیاهی زاگرس، کاهش حدود $3/5\%$ بارش در ناحیه مستطیلی شکل را که در شرق رشته کوه‌های زاگرس در نظر گرفته شد به دنبال داشته است. از جمله دلایل این تغییر می‌تواند وارد نشدن تعرق گیاهی به چرخه رطوبت در این محدوده، پس از جایگزین کردن پوشش گیاهی غرب ایران با پوشش بیابانی باشد. عامل دیگر می‌تواند به افزایش سبیدی سطح مربوط باشد. به بیان دیگر، به نظر می‌رسد تأثیر دو جانبه‌ای که پوشش گیاهی در چرخه رطوبت و انرژی می‌گذارد، منجر به تغییر پیچیده و نامنظم آهنگ بارش در کل محدوده می‌شود. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که حذف پوشش گیاهی و یا حتی رشته کوه‌های زاگرس، موجب تأثیر چشم‌گیری در میزان رطوبت ویژه جو نمی‌شود (شکل ارائه نشده است). بنابراین با توجه به طبیعت کم‌باران ناحیه مورد مطالعه در شرق رشته کوه‌های زاگرس (شکل ۴) و همچنین درصد ناچیز تغییر بارش در اثر تغییر پوشش گیاهی زاگرس در این ناحیه، به نظر می‌رسد که تغییر پوشش گیاهی بیش از آن که در تغییر میزان رطوبت جو نقش داشته باشد، در نقش محرک بارش در این محدوده عمل کرده است.

بررسی‌اند، وارد جزئیات نمی‌شویم و فقط به بررسی کیفی توانایی مدل RegCM در نشان دادن الگوهای کلی تاوایی و هم‌گرایی می‌پردازیم. در مطالعات این بخش از میانگین‌های زمانی استفاده شده است که خود تا اندازه‌ای بر پیچیدگی‌ها می‌افزاید.

مقایسه الگوهای میدان‌های تاوایی و هم‌گرایی در سطح ۷۰۰ هکتوپاسکال در شکل‌های ۸-الف و ۹-الف با الگوی ارتفاعی زاگرس (شکل ۳-الف)، مطابقت نسبی نتایج مدل با مطالعات نظری را که در ابتدای این بخش ارائه شد، نشان می‌دهد. نواحی تاوایی مثبت پیش از کوه (با در نظر گرفتن جهت غالب جریان‌ها به صورت غربی و شمال غربی) را می‌توان بین 31°N تا 33°N و همچنین حوالی عرض 30°N ، به صورت پراکنده، مشاهده کرد. در دامنه رشته کوه، علامت تاوایی تغییر می‌کند و تقریباً شاهد تاوایی منفی در همه طول رشته کوه‌های زاگرس هستیم که تا بلندترین نقاط این رشته کوه‌ها ادامه می‌یابد. از سوی دیگر، نواحی تاوایی منفی در جنوب تا جنوب شرقی ایران به شکل نوار پهنی امتداد دارد. در دامنه شرقی رشته کوه‌های زاگرس، مراکز و نواحی مثبت تاوایی شکل گرفته است که کل دامنه این بخش از رشته کوه را از شمال غربی تا جنوب شرقی در بر می‌گیرد. در مرکز ایران نکته خاصی به جز نواحی پراکنده عمدتاً با تاوایی مثبت مشاهده نمی‌شود. این الگو برای میدان‌های هم‌گرایی نیز تقریباً به طور یکسان تکرار شده است (شکل ۹-الف).

با حذف رشته کوه در اجرای‌های دوم و سوم، نواحی مثبت و منفی تاوایی و هم‌گرایی غرب ایران کاملاً به هم خورده (شکل‌های ۸-ب و ۸-ج، ۹-ب و ۹-ج) و در مقابل، نواحی مثبت و منفی مناطق شرقی و بعضاً مرکزی به‌طور کاملاً واضح تقویت شده‌اند. این تغییر الگو را به صورت روشن‌تری می‌توان در میدان‌های تفاضلی اجراهای دوم و سوم از اجرای اول در شکل ۱۰ برای

جریان پیش از برخورد با کوه صفر است. با نزدیک شدن جریان به کوه و در دامنه آن، به علت افزایش فاصله بین دو سطح هم‌دمای پتانسیلی یا ضخامت ستون هوا، تاوایی نسبی افزایش می‌یابد و مقدار آن مثبت می‌شود. این افزایش تاوایی، با توجه به پایستاری تاوایی پتانسیلی ($\frac{\zeta+f}{\delta z} = \text{const}$) در جریان‌های بی‌دررو و بدون اصطکاک قابل توجیه است. در ادامه حرکت و صعود از مانع، به علت کم شدن فاصله بین سطوح هم‌دمای پتانسیلی، علامت تاوایی به گونه‌ای تغییر می‌کند که در نزدیکی قله، تاوایی کاملاً منفی می‌شود. ولی مجدداً در شیب پایین‌سوی کوه، علامت تاوایی جریان به سمت مثبت تغییر می‌یابد. پس از عبور از مانع، جریان به‌طور نوسانی دارای تاوایی مثبت و منفی است و در نهایت میرا می‌شود (هولتن، ۲۰۰۴).

طبق معادله گرایش تاوایی، هم‌گرایی و واگرایی را می‌توان به ترتیب با تاوایی مثبت و منفی همراه دانست؛ یعنی در هر سطح فشاری تاوایی مثبت (منفی) باشد، باید شاهد هم‌گرایی (واگرایی) باشیم و به‌عکس. با توجه به نقش توپوگرافی در ایجاد مراکز تاوایی مثبت و منفی و همچنین هم‌گرایی و واگرایی در سطوح زیرین و میانی جو، بررسی میدان‌های تاوایی و هم‌گرایی نیز می‌تواند در درک کیفی قابلیت‌های مدل در آشکارسازی اثر توپوگرافی مفید باشد. البته در جو واقعی به علت حضور گرمایش دررو، اصطکاک سطح، پیچیدگی شکل توپوگرافی، یکنواخت و ثابت نبودن جهت جریان‌ها، انتظار ایجاد الگوی منظم و ایدئالی را که در بالا به آن اشاره شد، نمی‌توان داشت. علاوه بر همه موارد فوق که به پیچیده کردن الگوی تاوایی و هم‌گرایی می‌انجامد، نباید از تأثیر بسیار مهم ناهه سطوح زیرین بر عوامل سطوح زیرین و برهم‌کنش بین آنها غافل بود. با توجه به اینکه هر کدام از این موارد به تنهایی موضوع مفصلی برای

غربی رشته کوه‌ها (شکل ۱۲)، مطابق با الگوهای تاوایی و هم‌گرایی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال، در سمت رو به باد و روی کوه، الگوی واگرایی و در پشت به باد کوه، الگوی هم‌گرایی را شاهد هستیم. این امر همان‌گونه که ذکر شد، فقط به دلیل اثر کوه در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال است؛ چرا که با توجه به شکل‌های ۱۲-ب و ۱۲-ج با حذف کوه، الگوی هم‌گرایی-واگرایی غرب ایران در این تراز به‌طور چشم‌گیری ضعیف می‌شود.

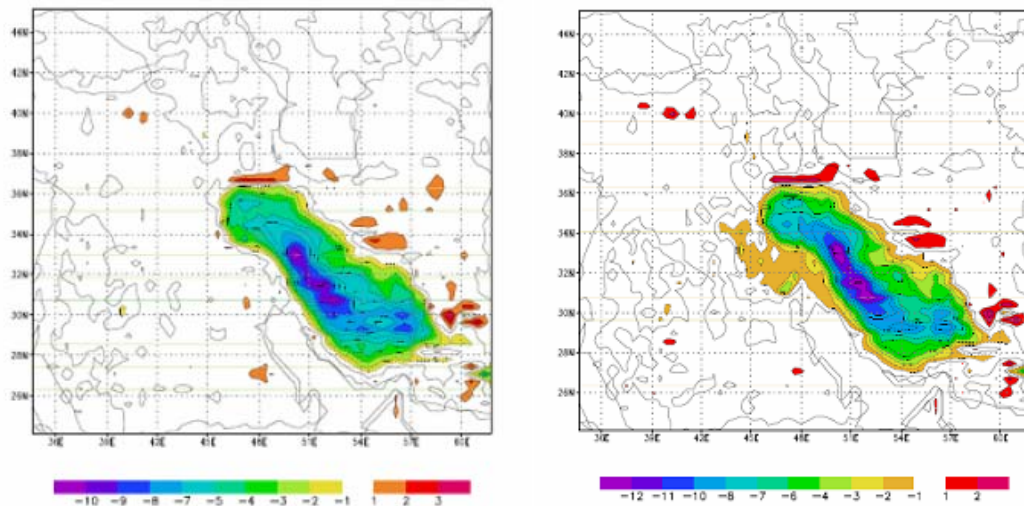
۴ نتیجه‌گیری

با بررسی نتایج شبیه‌سازی‌های صورت گرفته و مقایسه آنها با نتایج اجرای مرجع و نکات حاصل از مطالعات نظری، به نظر می‌رسد که مدل RegCM در نشان دادن نقش رشته کوه‌های زاگرس در جریان‌های جوی واقع روی ایران و کمیت‌های فیزیکی و دینامیکی مربوطه، موفق عمل می‌کند.

زمانی که رشته کوه زاگرس حذف می‌شود، انتظار می‌رود که با ورود جریان‌های مرطوب‌تر به مرکز ایران، بارش بیشتر در مرکز و شرق ایران را شاهد باشیم. افزایش بارش در نواحی یاد شده را می‌توان در الگوهای تفاضلی بارش مشاهده کرد. افزایش بارش، افزایش تبخیر سطحی و در نتیجه کاهش دمای سطح در این نواحی را به همراه دارد. این موضوع در نتایج شبیه‌سازی‌ها و در الگوهای تفاضلی دما مشهود است. از سوی دیگر، افزایش بارش، افزایش ابرناکی و در نتیجه کاهش انرژی خورشیدی دریافتی از راه سطح را به دنبال دارد. انتظار می‌رود که این پسخور مثبت، موجب افزایش هرچه بیشتر بارش و همچنین سردتر شدن سطح شود. به عبارت دیگر، در اجرای مرجع، وجود کوهستان می‌تواند به علت کاهش تبخیر سطحی، نسبت به اجراهای بدون بلندی‌های زاگرس، موجب ایجاد مناطقی با دمای سطحی بالاتر شود.

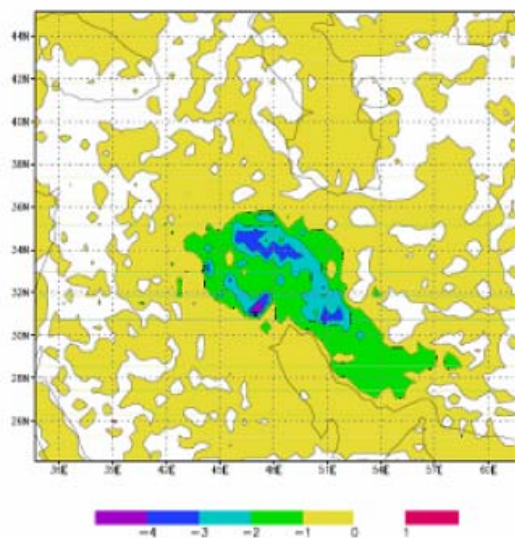
تاوایی و در شکل ۱۱ برای هم‌گرایی مشاهده کرد. علت این تغییر را می‌توان به اثر حذف رشته کوه‌های زاگرس به مثابه مانعی در مقابل جریان‌های جوی و در نتیجه افزایش سرعت جریان‌ها در نواحی مرکزی و شرقی ایران مربوط دانست. تقریباً هر دو شکل ۱۰ و ۱۱ نقش اساسی رشته کوه‌های زاگرس در الگوهای هم‌گرایی-واگرایی و همچنین تاوایی در سطوح زیرین، خصوصاً در نواحی غربی و بعضاً مرکزی ایران را نشان می‌دهند. در مقابل، اثر این رشته کوه‌ها در الگوهای تاوایی و هم‌گرایی-واگرایی نوار جنوبی ایران کمتر است، چرا که با حذف آنها الگوی این کمیت‌ها تغییر چندانی ندارد. حداقل تغییرات را می‌توان در غرب، یعنی سمت بادسوی این رشته کوه‌ها مشاهده کرد. تفاوت ناچیز میدان تفاضلی میانگین‌های فصلی هم‌گرایی و تاوایی اجراهای دوم و سوم را می‌توان در شکل‌های ۱۰-ج و ۱۱-ج مشاهده کرد. برش قائم تاوایی و همگرایی برای دو عرض $29/5^{\circ}N$ و $33^{\circ}N$ نشان می‌دهد که اثر این رشته کوه‌ها نه تنها در سطوح زیرین جو، بلکه تا سطوح ۲۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال نیز امتداد می‌یابد (شکل‌ها ارائه نشده است).

تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در شرایط استاندارد، در حکم تراز ناواگرا شناخته می‌شود. یکی از این شرایط قرار گرفتن سطح زمین در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال است. به عبارتی دیگر، در صورتی که سطح زمین دارای پستی و بلندی باشد، اثر این ناهمواری‌ها را باید بتوان در الگوهای هم‌گرایی-واگرایی مربوط به تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال مشاهده کرد. شکل ۱۲ الگوهای میانگین فصلی هم‌گرایی-واگرایی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای اجراهای متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از معادله گرایش تاوایی و نمایش نسبتاً موفق الگوهای تاوایی با مدل انتظار می‌رود، الگوهای هم‌گرایی-واگرایی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نیز قابل قبول به نظر می‌رسد. در دامنه



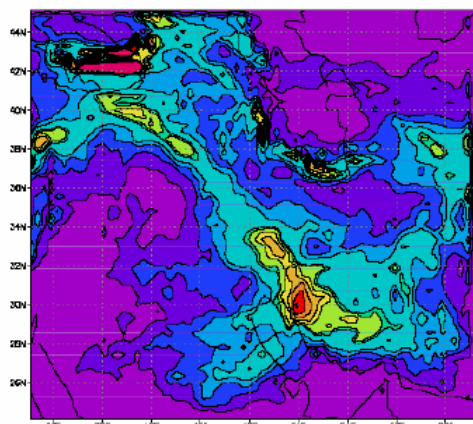
الف

ب

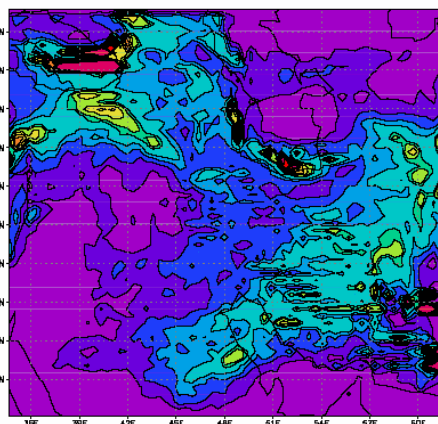


ج

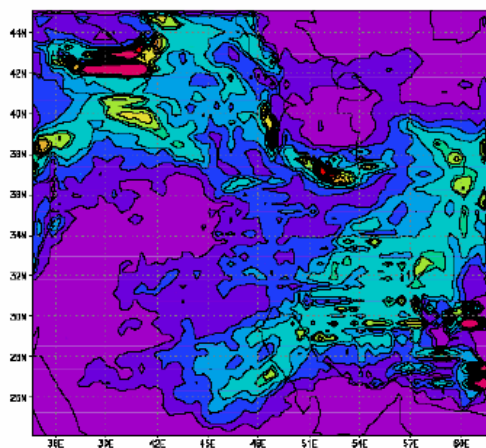
شکل ۳. میدان تفاضلی میانگین‌های فصلی دما: (الف) میدان تفاضلی اجرای دوم از یکم، (ب) میدان تفاضلی اجرای سوم از یکم و (ج) میدان تفاضلی اجرای سوم از دوم.



الف

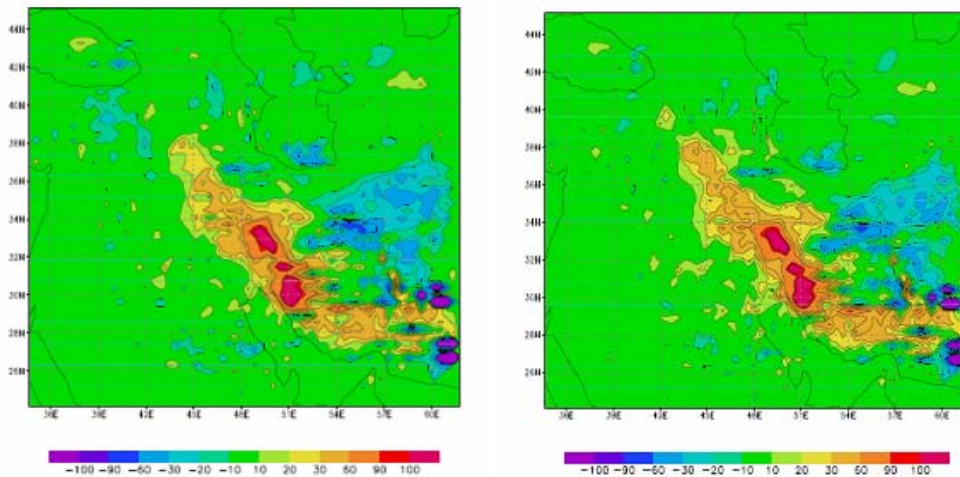


ب



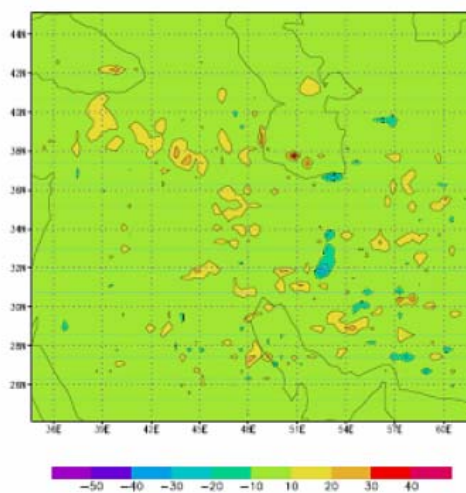
ج

شکل ۴. میانگین‌های فصلی بارش تجمعی ماهانه: (الف) اجرای یکم، (ب) اجرای دوم و (ج) اجرای سوم.



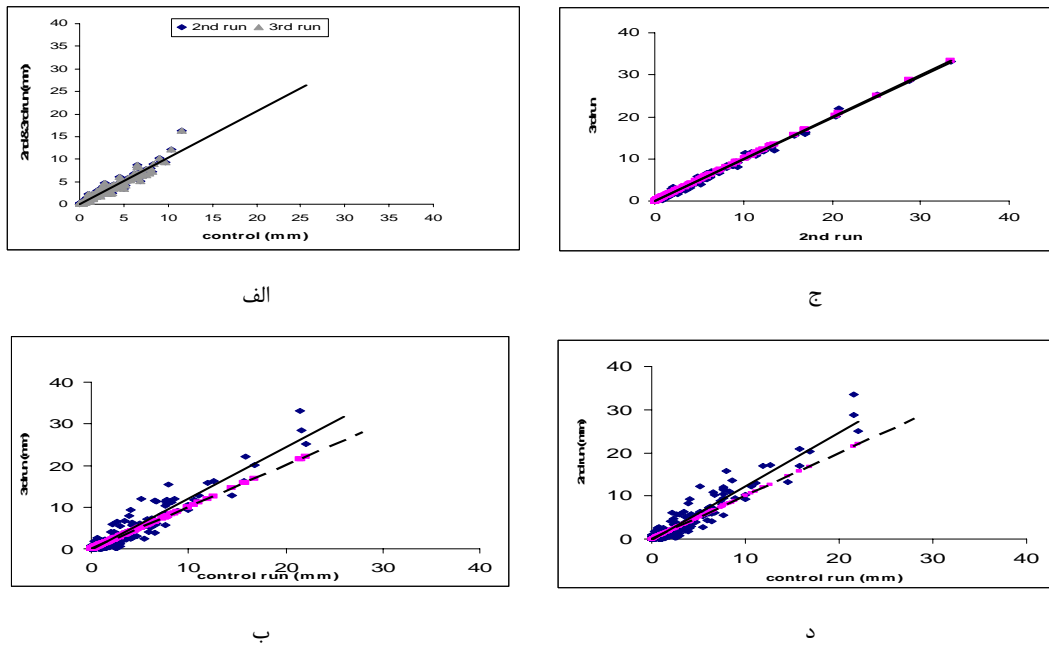
الف

ب

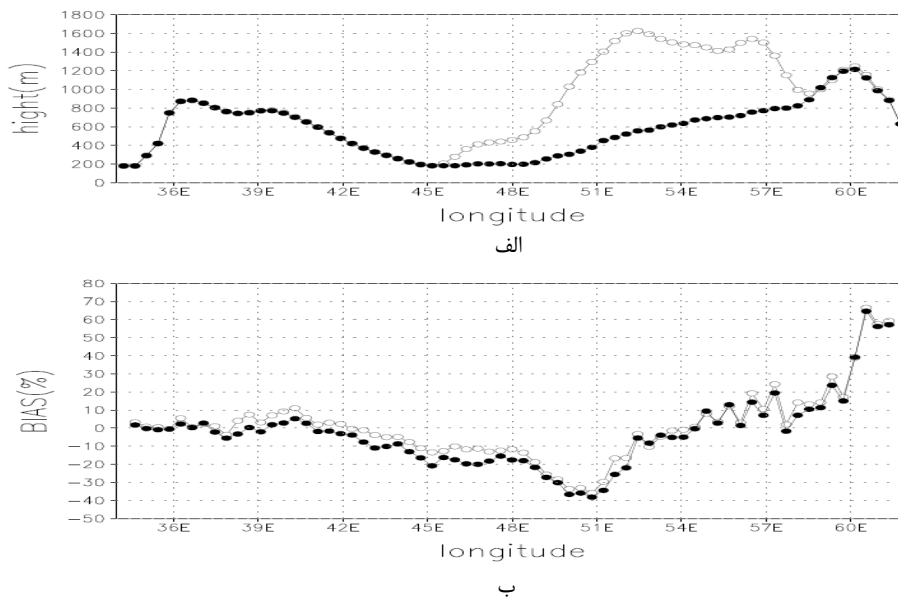


ج

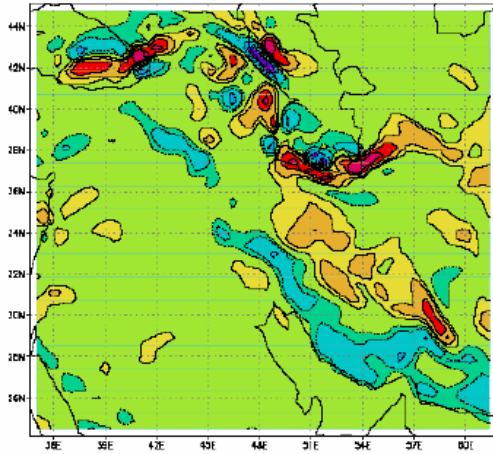
شکل ۵. میدان تفاضلی میانگین‌های فصلی بارش تجمعی ماهانه: (الف) میدان تفاضلی اجرای دوم از یکم، (ب) میدان تفاضلی اجرای سوم از یکم و (ج) میدان تفاضلی اجرای سوم از دوم.



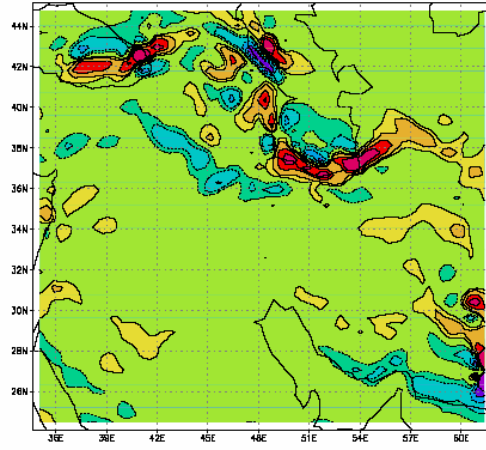
شکل ۶. مقایسه میانگین‌های میدانی بارندگی نسبت به خط ۴۵ درجه (خط‌چین): (الف) مقایسه اجراهای دوم و سوم با اجرای مرجع در کل محدوده مورد مطالعه، (ب) مقایسه اجرای دوم با اجرای مرجع، (ج) مقایسه اجرای سوم با اجرای مرجع و (د) مقایسه اجرای سوم با اجرای دوم. در شکل‌های (ب)، (ج) و (د) محدوده بررسی، محدوده مستطیلی شکل واقع در مرکز و شرق ایران است (برای جزئیات بیشتر به متن مراجعه شود).



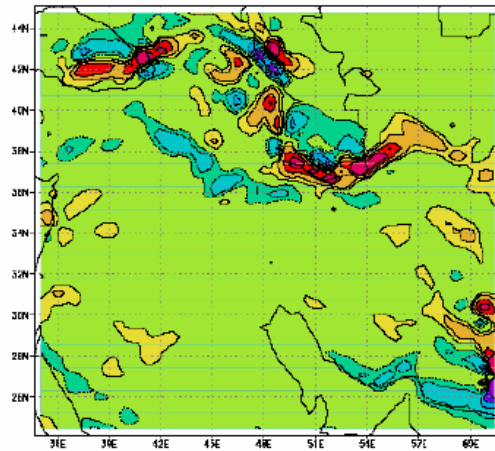
شکل ۷. (الف) برش قائم میانگین نصف‌النهاری توپوگرافی زاگرس قبل (نقاط توخالی) و بعد (نقاط توپر) از برداشتن رشته کوه، (ب) بایاس اجرای دوم (نقاط توخالی) و اجرای سوم (نقاط توپر) نسبت به اجرای اول.



الف

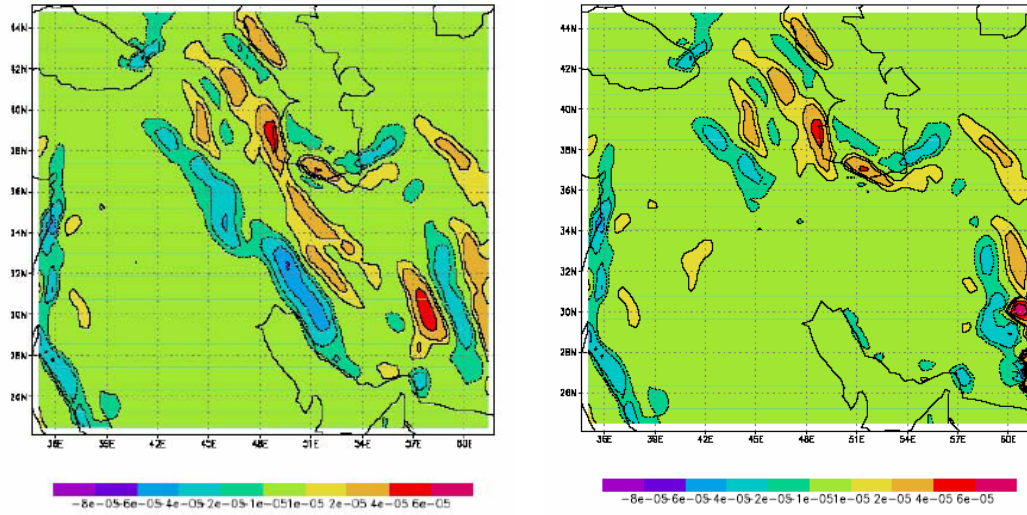


ب



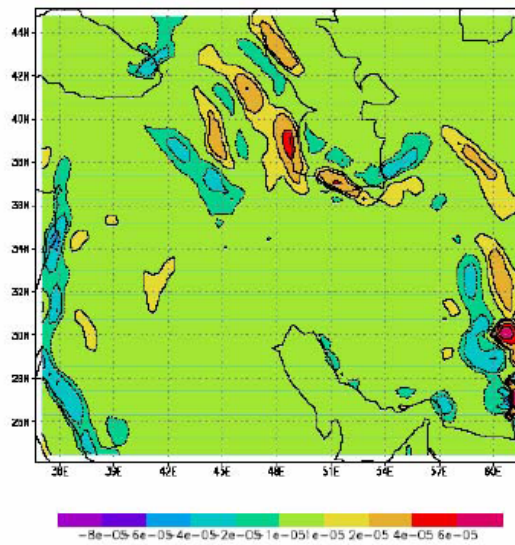
ج

شکل ۸. میانگین‌های فصلی تاوایی در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال برای (الف) اجرای یکم، (ب) اجرای دوم و (ج) اجرای سوم.



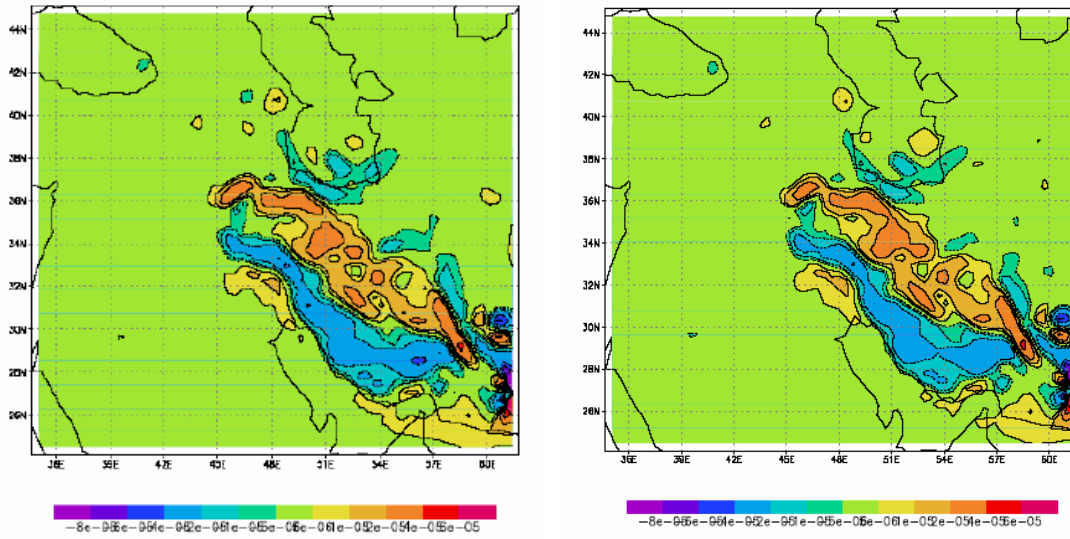
الف

ب



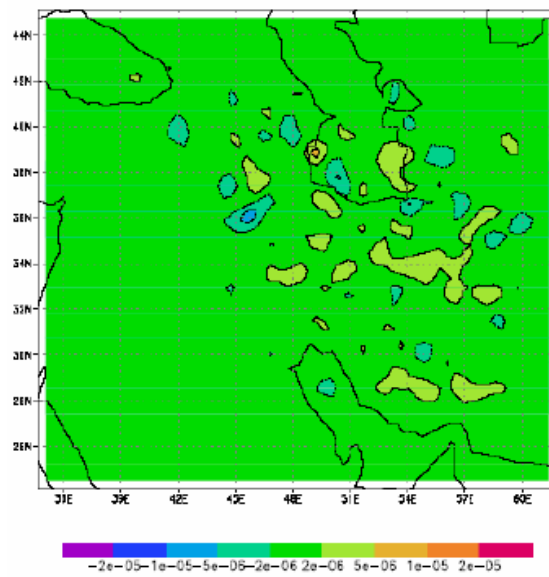
ج

شکل ۹. میانگین‌های فصلی همگرایی در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال برای (الف) اجرای یکم، (ب) اجرای دوم و (ج) اجرای سوم.



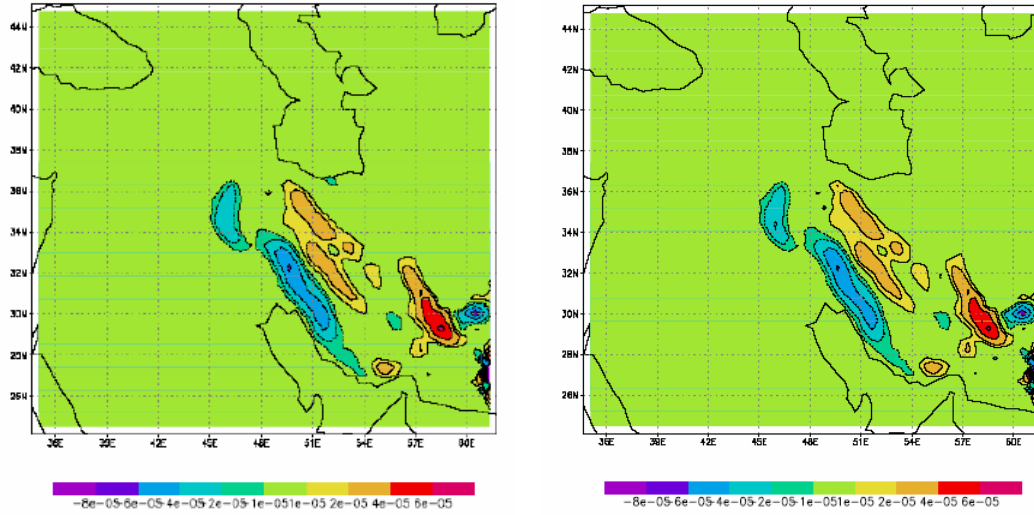
الف

ب



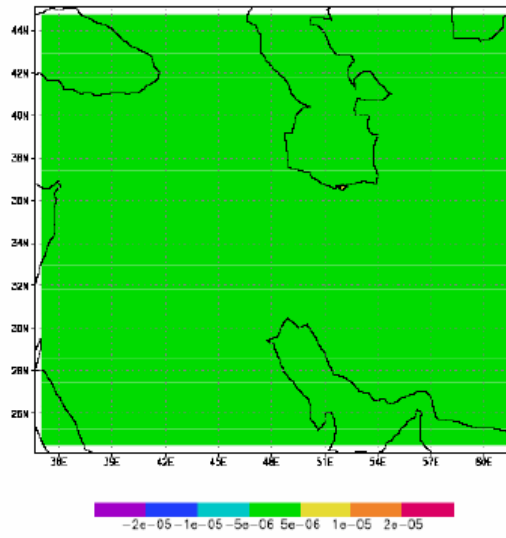
ج

شکل ۱۰. میدان تفاضلی میانگین‌های فصلی ناوایی در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال: (الف) میدان تفاضلی اجرای دوم از یکم، (ب) میدان تفاضلی اجرای سوم از یکم و (ج) میدان تفاضلی اجرای سوم از دوم.



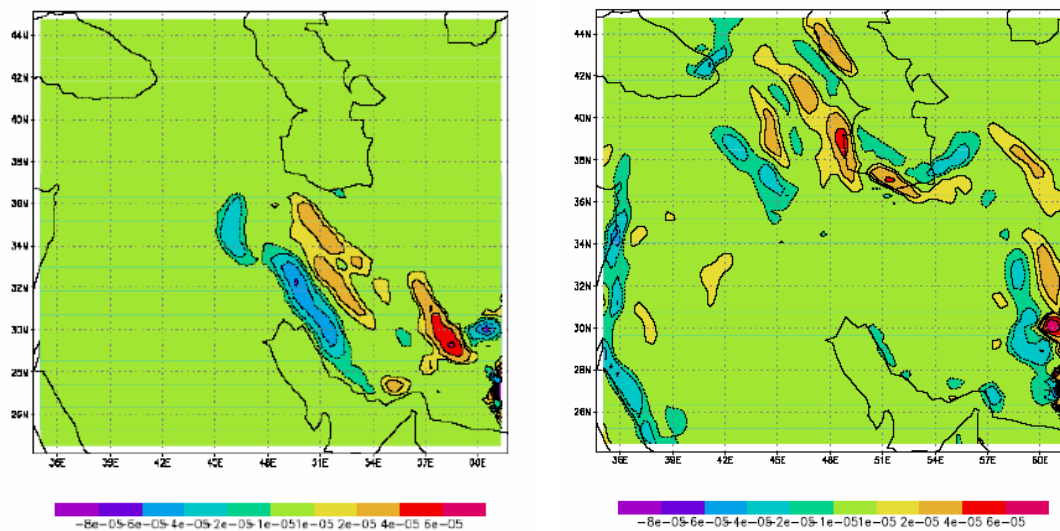
الف

ب



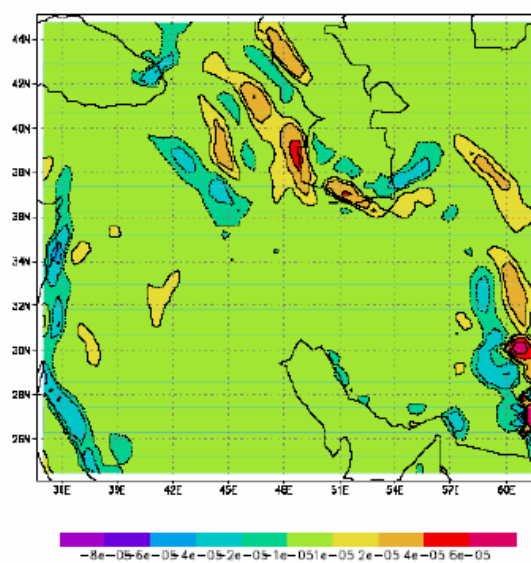
ج

شکل ۱۱. میدان تفاضلی میانگین‌های فصلی هم‌گرایی در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال: (الف) میدان تفاضلی اجرای دوم از یکم، (ب) میدان تفاضلی اجرای سوم از یکم و (ج) میدان تفاضلی اجرای سوم از دوم.



الف

ب



ج

شکل ۱۲. مشابه شکل ۹ ولی برای سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال.

پوشش بیابان، معادل دسته شماره ۸ به کار رفته در طرح‌واره (BATS) است. تفاوت عمده این دسته‌ها با دسته بیابانی، از یک سو امکان تعرق بیشتر این دسته‌ها و از سوی دیگر سپیدی نسبتاً بالاتر دسته بیابانی است. البته در فصول سرد، با توجه به کم‌شدن نسبت سطح پوشیده با گیاه، این اختلاف تا حدی تعدیل می‌شود. با توجه به مطالب فوق و همچنین در نظر گرفتن نمایه قائم تغییرات میانگین ماهانه و میدانی رطوبت ویژه، به جز شبیه‌سازی دمای نواحی غربی ایران، تفاوت شاخصی در شبیه‌سازی دمای سطح و بارش در اجرای دوم (با پوشش گیاهی واقعی زاگرس) و اجرای سوم (که پوشش گیاهی زاگرس با بیابان جایگزین شده است)، انتظار نمی‌رود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی دما و بارش نیز درستی این موضوع را نشان می‌دهد. تفاوت مشاهده شده در میدان دما در غرب ایران ناشی از افزایش سپیدی سطح بعد از جایگزین کردن پوشش گیاهی زاگرس با بیابان در اجرای سوم است. همان‌گونه که ذکر شد، تعرق گیاهی، سپیدی سطح و سایر عوامل تأثیرگذار بر دسته‌های گیاهی، مستقیماً در چرخه رطوبت و انرژی نقش ایفا می‌کنند. از سوی دیگر، این عوامل وابستگی شدیدی به نسبت سطح پوشیده با گیاه و شاخص سطح برگ دارند. با توجه به اینکه نسبت سطح پوشیده با گیاه و شاخص سطح برگ نیز خود متغیرهای وابسته به دما هستند، بنابراین انتظار می‌رود در شبیه‌سازی‌هایی که در فصول گرم‌تر و یا با دوره‌های زمانی طولانی‌تر از این شبیه‌سازی‌ها (که در یک دوره سه ماهه و سرد صورت گرفته) به انجام می‌رسد، نقش تغییر پوشش گیاهی در کمیت‌های اقلیمی چون دمای سطح و بارش، مشهودتر باشد.

الگوهای تاوایی و هم‌گرایی - واگرایی در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال و هم‌گرایی - واگرایی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (با در نظر گرفتن توپوگرافی سطح) نشان‌دهنده آشکارسازی موفق مدل از اثر رشته کوه در

در اجزای بدون توپوگرافی زاگرس، جریان‌های جوی پس از عبور از مناطق غربی ایران، بدون اینکه رطوبت قابل توجهی از دست دهند، با ارتفاع‌های جنوب شرقی ایران برخورد می‌کنند و در اثر صعود به اشباع می‌رسند و شروع به بارش می‌کنند. به بیانی دیگر، ارتفاع‌های نسبتاً بلند جنوب شرقی ایران نقش جایگزین ارتفاع‌های حذف شده زاگرس را بازی می‌کنند و کاهش بارش‌های مناطق غربی ایران تا حد زیادی با بارش‌هایی که در اثر این ارتفاع‌ها در محدوده مورد بررسی ایجاد می‌شوند، جبران می‌شود. مطالعات آماری، اختلاف بارش اجزای دوم و سوم را بسیار ناچیز نشان می‌دهد.

تقریباً همه نتایج، نقش اساسی رشته کوه‌های زاگرس در بارش، الگوهای هم‌گرایی - واگرایی و تاوایی در سطوح زیرین و ردسپهر، خصوصاً در نواحی غربی و بعضاً مرکزی ایران را نشان می‌دهند. از سوی دیگر، به نظر می‌رسد که اثر این رشته کوه‌ها در الگوهای کمیت‌های فوق در نوار جنوبی ایران کمتر است، چرا که با حذف رشته کوه‌ها تغییر چندانی در این الگوها ایجاد نمی‌شود. نبود تغییر محسوس در بارش منطقه جنوب ایران، پس از حذف رشته کوه‌های زاگرس، می‌تواند به منشأ رطوبت این منطقه مربوط باشد. احمدی گیوی و دستمالچی تبریزی (۱۳۸۲) روشن ساختند که عمده منشأ رطوبت جنوب ایران، دریای سرخ، شمال آفریقا و غرب اقیانوس هند است. حداقل تغییرات در کمیت‌های یاد شده را می‌توان در غرب رشته کوه‌های زاگرس مشاهده کرد که این امر نیز به جهت جریان‌ها بستگی دارد.

پوشش گیاهی زاگرس عمدتاً از دسته‌های شماره ۲ و ۱۰ به کار رفته در طرح‌واره BATS است. با مراجعه به جدول پوشش گیاهی - جنس خاک BATS می‌توان دید که این دسته‌ها در فصول سرد دارای حداقل شاخص سطح برگ و نسبت سطح پوشیده شده با گیاه‌اند و همچنین طول زبری آنها در حدود ۶-۵ سانتی‌متر (در حد طول زبری

کاربری اراضی اقلیم منطقه ایران با استفاده از مدل اقلیمی منطقه‌ای: ۱- معرفی اجمالی ساختار داخلی مدل RegCM. مجموعه مقالات همایش پیش‌بینی عددی وضع هوا، ۳۰ آذر ۱۳۸۳.

Broccoli, A. J., and Manabe, S., 1992, The effects of orography on midlatitude Northern Hemisphere dry climates. *J. Climate*, **5(11)**, 1181-1201.

Davies, H., and Turner, R., 1977, Updating prediction models by dynamical relaxation: An examination of the technique. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **103**, 225-245.

Giorgi, F., 1990, On the simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *J. Climate*, **3**, 941-963.

Holton, J. R., 2004, *An Introduction to Dynamic Meteorology*. 4th Ed., Academic Press, 550.

Kitoh, A., 2001, Effect of orography on land and ocean surface temperature. In: *Present and Future of Modeling Global Environmental Change: Toward Integrated Modeling*, T. Matsuno and H. Kida (eds), TERRAPUB, 427-431.

جریان‌های جوی است. همان‌طور که از دیدگاه نظری انتظار می‌رود، بین الگوهای تاوایی و هم‌گرایی-واگرایی در سطوح متفاوت فشاری، همخوانی خوبی وجود دارد. برای نمونه در سطح ۷۰۰ هکتوپاسکال، در دامنه غربی رشته کوه (سمت رو به باد) و روی کوه، الگوهای تاوایی منفی و واگرایی و در پشت به باد کوه، الگوهای تاوایی مثبت و هم‌گرایی مشاهده می‌شود و یا با حذف اثر کوه، الگوی هم‌گرایی-واگرایی غرب ایران در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال نیز به طور کامل از بین می‌رود.

منابع

احمدی گیوی، ف و دستمالچی تبریزی، ش.، ۱۳۸۲، مطالعه ترمودینامیکی و ردسپهر در منطقه خاورمیانه برای دوره ۱۹۹۰-۱۹۸۱. یازدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۱۰-۱۲ آذر ۱۳۸۲.

ایران‌نژاد، پ.، پازوکی، ر.، احمدی گیوی، ف و سلطانزاده، ا.، ۱۳۸۳، بررسی تأثیر کوهستان‌ها و