

کاربست مدل پیش‌بینی عددی ARPS بر شبیه‌سازی توفان برف بهمن ۱۳۸۳ در تهران

مجید مزرعه‌فراهانی^{۱*}، مصطفی احمدنیا^۲ و امید علیزاده^۳

^۱استادیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۲دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۳کارشناس ارشد، سازمان هواشناسی کشور، تهران، ایران

(دریافت: ۸۶/۱۱/۱، پذیرش نهایی: ۸۷/۴/۳)

چکیده

طی روزهای ۶ تا ۱۲ فوریه ۲۰۰۵ (مطابق ۱۷-۲۳ بهمن ۱۳۸۳) تهران شاهد بارش سنگین برف و دیگر انواع بارش بود. نوع بارش و شدت و تناوب این واقعه هواشناختی (توفان) آن را از بارش‌های معمول دیگر در این موقع از سال متمایز می‌سازد. بدین جهت بررسی این توفان از دیدگاه‌های دینامیکی و سینوپتیکی حائز اهمیت است. در تحقیق حاضر با استفاده از مدل میان‌مقیاس عددی پیش‌بینی هوا (Advanced Regional Prediction System) ARPS توفان اتفاق افتاده را از جنبه‌های ذکر شده مورد بررسی و تحلیل قرار داده‌ایم. بدین منظور مدل ARPS را برای روزهای ۶ تا ۱۲ فوریه با سه تفکیک افقی ۳۰، ۱۰ و ۴ کیلومتر برای منطقه‌ای که تهران را در بر می‌گیرد اجرا کردیم. با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های صورت گرفته، مدل به خوبی قادر به پیش‌بینی کیفی و نسبتاً قابل قبول کمی توفان فوق است. از دیدگاه سینوپتیکی الگوهای فشاری سطح زمین با تقریب قابل قبول و الگوهای ژئوپتانسیلی ترازهای بالا حاصل از شبیه‌سازی به خوبی با موارد واقعی مطابقت می‌کنند. متغیرهای هواشناختی از جمله باد، دما، و بارش شبیه‌سازی شده از نظر کیفی و روند تحولات زمانی- مکانی با واقعیت همخوانی نسبتاً قابل قبولی دارند و از نظر کمی، متغیر بارش در مواردی در مناطق و در زمان‌های خاصی از میزان واقعی بیشتر و در مواردی کمتر از میزان واقعی است. تفاوت مقادیر به‌دست آمده بارش در مناطق کوهستانی با مقادیر واقعی، بر خلاف انتظار، نتایج دیگر مدل‌های عددی کمتر از مناطق هموار است و از نظر علامت مخالف موارد صورت گرفته با مدل‌های پیش‌بینی عددی دیگر مانند MM5 هستند. اختلاف‌های موجود با توجه به شرایط اجرای مدل از جمله داده‌های اولیه و شرایط مرزی قابل قبول است. بخشی از تفاوت نیز ناشی از نوع توده هوا و محل شکل‌گیری توده هوا است که تأثیر مستقیمی بر نوع بارش و مقدار آب تبدیل به برف شده را دارد. نکته اخیر ناشی از کمبود یا خطای خردمقیاس ابر مورد استفاده و موارد انتخابی موجود در مدل است. الگوهای ترمودینامیکی و جو بالای (Skew-T) پیش‌بینی شده با دقت بسیار خوبی از مقادیر واقعی پیروی می‌کنند. در بحث ناپایداری، نشانه‌های متفاوت ناپایداری (Stability Index) محاسبه شده با استفاده از میدان‌های پیش‌بینی شده مدل با مقادیر محاسبه شده میدان‌های واقعی مقایسه شده‌اند و نتایج در اکثر موارد همخوان است و در برخی موارد تفاوت اندک ولی قابل قبولی دارد.

واژه‌های کلیدی: توفان برف، شبیه‌سازی عددی، پیش‌بینی عددی، ARPS، تهران

Simulation of snow storm of 6-12 February 2005 in Tehran with Advance Regional Prediction System (ARPS)

Mazraeh Farahani, M¹., Ahmadnia, M². and Alizadeh, O³.

¹Assistant professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

²M.Sc student of Meteorology, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

³Research Assistant, Iranian Meteorological Organization, Tehran, Iran

(Received: 21 Jan 2007, Accepted: 23 Jun 2008)

Abstract

During February of 2005 the north of Iran witnessed the development and activity of a variety of severe meteorological systems accompanied with unusual heavy precipitation, mostly snow and hail. The rate and amount of snow in the northern coastal region was so heavy that it made a new record for that region with a report of more than 3m of snow in Rasht, a city located in that area. Also the damage it caused in the area was great, with heavy human and economic losses. In this region with a dominant subtropical and sub-Saharan climate such an event is very rare and the yearly average of precipitation is much less than the global average, therefore, occurrence of such systems should be treated as a very motivating case for meteorologist and atmospheric researchers. The rate of precipitation is not the only factor that makes it a particular case but also the duration (more than 2 weeks) and type of precipitation (frequent snow accompanied with hailstorms) was unusual. The domain of activity of these systems is also a challenge, covering one third of the north of Iran and the east of Turkey and the west of Afghanistan, a domain in the Middle East where the prediction of atmospheric events is highly risky because of its topological existence factors influencing weather and precipitation. This system was activating in the area from Feb. 5-12 and because of its intense precipitation was chosen as the case to be simulated.

Our purpose in carrying out this study is to explore through sensitivity experiments, the possible success of the applied numerical forecasting model. The results of these experiments are of interest for what they reveal both the specific storm and the predictability of precipitation within storms. Predictability of large scale meteorological parameters, especially the precipitation, is limited to within 2 weeks, but for mesoscale (where precipitation is one of the most interesting and most challenging parameter for a model) prediction, it is not clear how long and how successful it will be. These questions might be asked from 2 points of view, first the previous research and simulations of systems in this area (the Middle East) and second, the ability and quality of the numerical model for simulation of such systems. In this study the Advance Regional Prediction System (ARPS) model is run with horizontal resolution of 4, 10 and 30km in three phases for 6-12th Feb. 2005 and the results have been analyzed. In 30km horizontal resolution running at the surface level and 500 hPa levels have been compared with observation. Generally, in sea surface maps, the pressure simulated by the model is less than the actual one. But there is a reasonable similarity between the 2 map patterns. The simulated geopotential height in 500hPa level is in agreement with observations. For the 10km simulation, the isoprecipitation maps of the northern half of Iran have been analyzed. Generally, the precipitation patterns reveal maximum amount of precipitation on the coasts of the Caspian Sea regions in agreement with actual precipitation data. For the Tehran region the isoprecipitation pattern shows the oscillating precipitation similar to the actual precipitation data. For obtaining more accurate results and better simulation, 4km

horizontal resolution has been tried and quantitatively the precipitation values have been compared in some stations in the Tehran area. This comparison revealed that the precipitation values in most cases are more than the actual ones. In addition the comparison of thermodynamical graphs in Tehran, Mehrabad airport indicates the relative success of the model in simulating vertical profile of the atmosphere.

Key words: Storm simulation, ARPS, Severe weather, Precipitation, Tehran

۱ مقدمه

را بررسی کرد. شبیه‌سازی توفان‌ها سابقه طولانی در علم هواشناسی دارد و به دهه ۱۹۶۰ باز می‌گردد که اولین بار کاساهارا (کاساهارا، ۱۹۶۱) با یک مدل عددی محور-مقارن، یک توفان حاره‌ای را شبیه‌سازی کرد. از دهه ۱۹۷۰ به بعد با ارتقای رایانه‌های جدید و افزایش قدرت پردازش و محاسبات، پیدایش مدل‌های پیچیده‌تر، مبتنی بر واقعیت بیشتر و با دقت فضایی-زمانی بیشتر، برای شبیه‌سازی و بررسی توفان‌ها بکار برده شد و ناشناخته‌های بیشتری از فرایند رشد و تکامل توفان‌ها آشکار شد. در این میان مدل آنتس (۱۹۷۲) به دلیل نخستین استفاده از مدل سه‌بعدی محور-نامقارن و همچنین شبیه‌سازی توفان با جونز (۱۹۷۷) و اولین استفاده از شبکه‌های تو در تو قابل توجه‌اند. تا مدت‌ها همه شبیه‌سازی‌های صورت گرفته فقط از نقطه نظرات معین و محدودی به موضوع می‌پرداختند و هر کدام از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته دارای نواقصی نظیر شرایط اولیه غیر واقعی، فاصله شبکه‌ای بزرگ، نادیده گرفتن برهم‌کنش پدیده‌های بزرگ و میان‌مقیاس با یکدیگر و نظایر آن بودند که باعث ناکارایی و بی‌دقتی و بالطبع بی‌اطمینانی به نتایج پیش‌بینی با مدل‌های عددی شد. در سال ۱۹۹۷ لیو و همکارانش (لیو و همکاران، ۱۹۹۷) تحت سرپرستی جان دالین اولین شبیه‌سازی کامل با استفاده از داده‌های واقعی که اثرات و برهم‌کنش‌های بین‌مقیاسی و فرایندهای فیزیکی-دینامیکی پیچیده جوی در آن منظور شده بود را با استفاده از مدل MM5 در مورد توفان اندرو (Andrew)

از بین بلایای طبیعی، توفان همواره مورد توجه بشر بوده است. ویژگی‌ها و اثرات این رخداد طبیعی به صورت تابعی از شرایط زمانی و مکانی محل وقوع آن است و به شدت متغیر است. براساس تحقیقات صورت گرفته، در مناطقی از کره زمین، تعداد وقوع و شدت این پدیده در طی سال بسیار بیشتر از دیگر نقاط کره زمین است. منطقه امریکای مرکزی و جنوب شرق آسیا دو منطقه‌ای هستند که بیشترین تعداد وقوع توفان در طی یک سال در آنها اتفاق می‌افتد. بدین لحاظ وقوع توفان در مناطقی که معمولاً به ندرت شاهد این پدیده‌اند، از اهمیت ویژه و دوچندان برخوردار است.

بررسی‌های گذشته حاکی از آن بود که شرایط سینوپتیکی محل وقوع و دمای سطح دریا، SST، دو عامل اصلی رشد و تکامل توفان‌ها است (امانوئل، ۱۹۸۸) ولی اکنون مشخص شده است که رشد و تکامل و مسیر حرکت توفان‌ها می‌تواند به شدت تحت تأثیر دینامیک و ترمودینامیک توفان، زمان تشکیل و توزیع فضایی ابرها، و توزیع زمانی-مکانی و شدت بارش در توفان در کنار برهم‌کنش توفان با شرایط بزرگ‌مقیاس پیرامونی قرار گیرد (هولند و مریل، ۱۹۸۴). بنابراین، بررسی توفان‌ها می‌بایست از زوایای متفاوتی صورت گیرد. در مبحث شبیه‌سازی توفان نیز به دلیل گفته شده، شبیه‌سازی می‌بایست در مقیاس‌های متفاوت صورت گیرد بدین معنی که هم بتوان اثرات محیط اطراف (بزرگ مقیاس) و هم اثرات محلی و تغییرات درون توفان (میان و خردمقیاس)

مدل به تفصیل در مقاله شوء و همکارانش (۱۹۹۵، ۲۰۰۰، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۳) آورده و توضیح داده شده است. با وجود این، نکات اساسی که در این تحقیق در مورد خصوصیات مدل با اهمیت، تأثیر گذار و توجیه کننده برخی از رفتارهای مدل در شبیه سازی های صورت گرفته است را به اختصار در ادامه ذکر می کنیم.

مدل دارای قابلیت استفاده از داده های عوارض زمین با دقت تفکیک ۳۰ ثانیه، استفاده از دستگاه دکارتی ۱، ۲ و سه بعدی، دستگاه مختصات قائم عمومی سیگما با قابلیت تغییر فاصله در راستای قائم بین ترازها و استفاده از شبکه C آراکاو با فواصل مساوی در راستای x ، y ، استفاده از طرح واره تفاضل متناهی با دقت مرتبه ۲ و ۴ برای جملات فرارفت و مرتبه ۲ برای دیگر جملات، استفاده از طرح واره زمانی لیب فراگ برای حل معادلات، استفاده از مدل خاک دو لایه ای، دستگاه داده گواری به روش وردشی پیش رو برای استفاده از داده های راداری، قابلیت انتقال خودکار دامنه و مسیریابی توفان، قابلیت حل تودرتو (nesting) دینامیکی شبکه، به کار بردن طرح واره پارامتره سازی ابرهای کومه ای Kuo و کاین و فریچ (Kain-Fritsch). پارامتره سازی خرد فیزیک ابر با استفاده از طرح واره کسلر با توانایی پارامتره سازی باران گرم و سه نوع بارش یخی است.

همچنین مهم ترین متغیرهای پیشیابی و محاسباتی مدل عبارت اند از: مؤلفه های دکارتی باد، مقادیر تلاطمی دما، مقادیر تلاطمی فشار، نسبت اختلاط، انرژی جنبشی تلاطمی برای مقیاس زیر شبکه ای، آب قابل بارش ابرها، میزان آب باران، آب ابر، آب باران، یخ ابر، برف، تگرگ، بودجه انرژی و رطوبت سطح.

همه برنامه های مدل به زبان فرترن ۷۷ و ۹۰ نوشته است به جز زیر برنامه name list که به زبان C است. شرایط اولیه مدل از سه راه قابل وارد کردن است: الف- در راستای افقی همگن و با آغازگری با داده های

که توفانی با تلفات فراوان و خسارت های هنگفت همراه بود، عملی ساختند، به دنبال آن مجموعه شبیه سازی های متفاوت در خصوص این توفان به انجام رساند و نتایج با اهمیتی به دست آوردند. این اقدام لیو و انگیزه های او عامل اصلی شبیه سازی توفان برف زمستان ۲۰۰۵ با مدل های عددی ما شد. مدل عددی انتخابی برای این شبیه سازی، سامانه مدل پیش بینی عددی ARPS است.

در ادامه این مقاله در بخش دوم، شرح مختصری از مدل ARPS می آید، در بخش سوم به آزمایش ها، شرایط و پارامترهای انتخابی مدل در شبیه سازی های صورت گرفته و چگونگی اجرای آنها می پردازیم. نتایج شبیه سازی های صورت گرفته و بحث پیرامون آنها همراه با الگوهای به دست آمده در بخش چهارم مقاله ارائه می شود. در انتها، و در بخش پنجم، به نتایج نهایی و بحث پایانی می پردازیم.

۲ مدل ARPS

سنگ بنای مدل در دانشگاه ردینگ انگلستان را مینگ شوء (Ming Xue) هنگام تحصیل ریخت. تاریخچه ایجاد مدل به ۱۹۹۰ باز می گردد که در این سال، اولین نسخه آن معرفی شد. در این نسخه، مدل بر اساس جو خشک و تراکم پذیر روابط دینامیکی را انتگرال می گرفت. این نسخه خیلی زود با معرفی نسخه دو که مدلی کاملاً سه بعدی و با مختصات تغییر یافته است جایگزین شد. سپس نسخه ۲/۵ و در ۱۹۹۲ نسخه سه آن که نسخه عمومی و قابل دسترس جامعه علمی بود معرفی شد. نسخه شماره چهار مدل نسبت به نسخه قبلی آن تغییرات چشمگیری دارد و بسیار بهبود یافته است. هم اکنون نسخه پنج مدل در اختیار کاربران است که نسبت به نسخه چهار تغییرات ویژه ای دارد و بسیاری از عیب های برنامه ای مدل و طرح واره های مورد استفاده آن بهبود و گسترش یافته است. مجموعه معادلات و روابط مورد استفاده در این

مراحل بعدی مدل با استفاده از خروجی خود در مرحله قبل و به صورت ۱۲ ساعته به اجرا درآمد تا زنجیره حل تودرتو تکمیل شود.

داده‌های مربوط به ناهمواری‌های سطح زمین که مورد استفاده قرار گرفتند با تفکیک فضایی ۳۰ ثانیه برای کل کره است که از پایگاه CAPS پیاده‌سازی و با برنامه پیش‌پردازشی مربوطه در هر مرحله آماده شد و مورد استفاده قرار گرفت. به دلیل نقش عمده ناهمواری‌های سطح زمین در نتایج شبیه‌سازی از جمله روی میزان بارش (کانجیالوسی و همکاران، ۲۰۰۵) آشکارسازی ناهمواری‌های سطح زمین برای به حداقل رسانیدن خطای هموارسازی با مدل حین درون‌یابی ارتفاعات به نقاط شبکه، سعی شد تا مرکز شبکه در هر مرحله از اجرا در مکانی قرار گیرد که ماکزیموم ارتفاعات پوشش داده شده (در شبیه‌سازی‌های ما قله دماوند با ارتفاع ۴۰۷۶) با شبکه روی نقاط شبکه یا در نزدیکی آن قرار گیرند. نتایج به دست آمده برای هر مرحله بعد از خواندن داده‌های ناهمواری‌ها در شکل‌های ۱ تا ۳ نشان داده شده‌اند. این شکل‌ها علاوه بر نمایش ناهمواری‌ها، منطقه تحت پوشش را نیز نمایش می‌دهد. پس از اجرای مدل در هر مرحله، خروجی مدل مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت که در ادامه به بحث در مورد نتایج خروجی‌ها می‌پردازیم.

رادیوگمانه ب- استفاده از توابع تحلیلی ج- داده‌های سه‌بعدی و افقی غیرهمگن (داده‌های واقعی). شرایط مرزی در مدل از شش راه قابل اعمال است: الف- تناوبی ب- سخت ج- شیو صفر د- موج- تابشی ه- واداشته خارجی و- شرط تعیین شده کاربر و در مورد شرایط مرزی قله و کف جو چهار نوع امکان وجود دارد الف- مرز سخت ب- شیو صفر ج- دوره‌ای یا تناوبی د- تابشی در قله جو. برای پارامتره‌سازی لایه سطحی از روش bulk aerodynamic استفاده می‌شود.

۳ مشخصات شبیه‌سازی‌های صورت گرفته با مدل

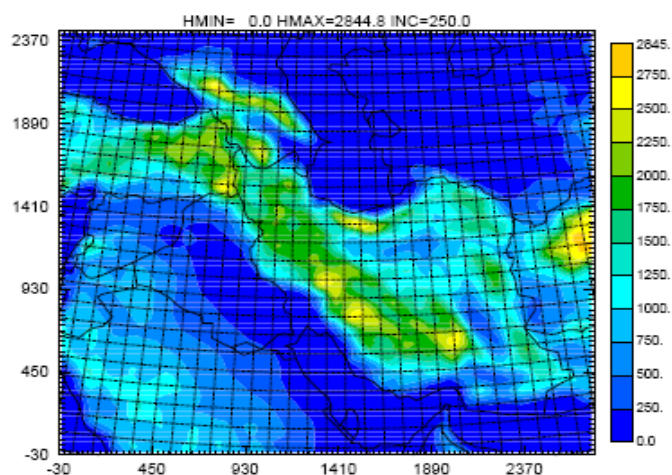
در این بررسی مدل منطقه‌ای ARPS به صورت حل در شبکه تودرتو و در سه مرحله اجرا شد. جزئیات مربوط به شبکه‌های انتخاب شده در هر مرحله در جدول ۱ آمده است.

شکل‌های ۱- الف، ۱- ب و ۱- ج به ترتیب منطقه جغرافیایی پوشش داده شده با شبکه مدل برای مراحل اجرایی اول تا سوم را نشان می‌دهند.

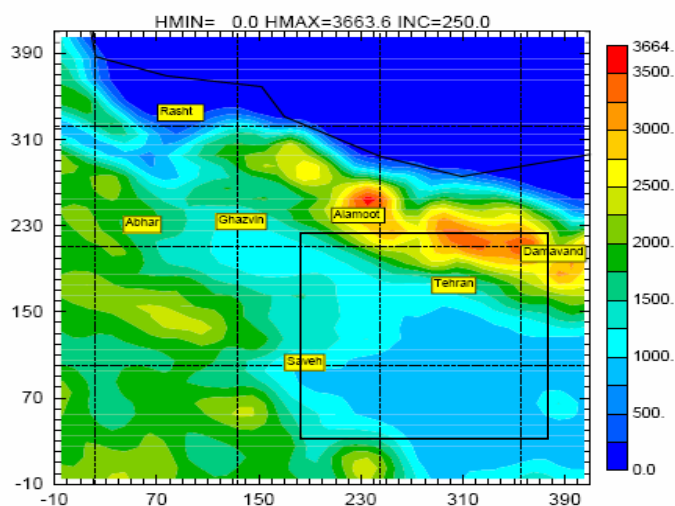
در مرحله اول اجرای مدل، داده‌های آنالیز GFS مربوط به رویداد مورد نظر تهیه شد و با برنامه پیش‌پردازشی موجود در سامانه مدل برای خواندن به مدل آماده شد. مدل به صورت روزانه (پیش‌بینی ۲۴ ساعته) اجرا و داده‌های خروجی آن به صورت ساعتی تهیه شد. در

جدول ۱. مشخصات مربوط به مراحل اجرای مدل.

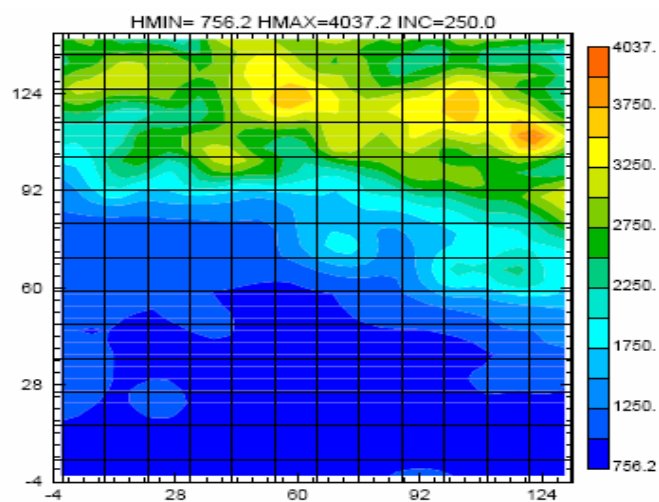
مرحله اجرا	تعداد نقاط nx, ny, nz	فواصل شبکه (km) dx, dy, dz	مرکز شبکه lat, lon	مدت زمان لازم برای اجرای مدل
مرحله اول	۹۳, ۸۳, ۲۷	۳۰, ۳۰, ۰/۷	۳۵/۰, ۵۰/۰	۱۳/۸ ساعت برای هر روز
مرحله دوم	۴۳, ۴۳, ۳۵	۱۰, ۱۰, ۰/۵	۳۵/۹, ۵۰/۶	۲/۹۵ ساعت برای هر ۱۲ ساعت
مرحله سوم	۳۵, ۳۸, ۳۵	۴, ۴, ۰/۵	۳۵/۶, ۵۱/۵۹	۱/۵۹ ساعت برای هر ۱۲ ساعت



شکل ۱- الف. منطقه و ناهمواری‌های سطح زمین در اجرای اول (dx=30 km).



شکل ۱- ب. منطقه و ناهمواری‌های سطح زمین در اجرای دوم (dx=10 km).



شکل ۱- ج. منطقه و ناهمواری‌های سطح زمین در اجرای سوم (dx=4 km).

که شارش‌های ناپایداری به صورت امواج کوتاه به شمال غرب ایران گسیل می‌کند.

در نقشه تراز دریا مربوط به ساعت UTC ۱۲۰۰ روز ۷ فوریه ۲۰۰۵ (شکل ۵-الف) نیمه شمالی ایران تحت تأثیر سامانه پرفشار است. مرکز کم‌فشار واقع در مرزهای غربی ایران از بین رفته است، اما سامانه کم‌فشاری از جنوب شرق تا غرب ایران کشیده شده است. در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال همان روز (شکل ۵-ب) مرکز کم ارتفاع واقع در شمال دریای خزر با مرکز کم ارتفاع شرق ترکیه تلفیق شده و ناوه ناشی از این کم ارتفاع جدید از شمال شرق ترکیه تا شمال غرب ایران امتداد یافته است.

در نقشه تراز دریا مربوط به ساعت UTC ۱۲۰۰ روز ۸ فوریه سال ۲۰۰۵ (شکل ۶-الف) مجدداً کم‌فشار دینامیکی به مرکز ۱۰۱۰ هکتوپاسکال روی شمال عراق شکل گرفته است نیمه شمالی ایران همچنان تحت تأثیر سامانه پرفشار است. در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال همان روز (شکل ۶-ب) ناوه عمیقی که مرکز آن روی شرق دریای سیاه واقع شده تا غرب ایران امتداد یافته است. در شرق دریای خزر و شمال شرق ایران پشته ارتفاع حاکم است.

در نقشه تراز دریا مربوط به ساعت UTC ۱۲۰۰ روز ۹ فوریه سال ۲۰۰۵ (شکل ۷-الف) الگوی کلی نسبت به ۲۴ ساعت گذشته تغییر چندانی نداشته و فقط کم‌فشار دینامیکی واقع در شمال عراق تضعیف شده و مرکز آن به ۱۰۱۵ هکتوپاسکال رسیده است. در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال همان روز (شکل ۷-ب) مرکز کم ارتفاع در شمال عراق قرار گرفته و نسبت به ۲۴ ساعت گذشته تضعیف شده است.

در نقشه تراز دریا مربوط به ساعت UTC ۱۲۰۰ روز ۱۰ فوریه ۲۰۰۵ (شکل ۸-الف) مرکز کم‌فشار کاملاً از بین رفته و سامانه پرفشار ضمن تقویت همه مناطق ایران را

۳-۱ اجرای مرحله اول مدل و تحلیل همدیدی سامانه مورد نظر: در اولین مرحله اجرا، مدل برای منطقه‌ای شامل ایران و نواحی اطراف آن تهیه شد تا تحلیل و ترسیمی نسبتاً کلی از شرایط سینوپتیکی یا بزرگ‌مقیاس سامانه فعال در منطقه که منجر به توفان مد نظر ما شد به دست آید و نیز داده‌های مورد نیاز برای مراحل دیگر فراهم شود. هدف از اجرای این مرحله در واقع بررسی نقش متغیرهای محیط اطراف بر چگونگی تشکیل و رشد توفان مورد بررسی است. بعد از اجرای مرحله اول مدل، نقشه‌های مربوط به فشار تراز دریا و ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال پیش‌بینی شده با مدل به مثابه دو نشانگر مناسب در تحلیل‌های بزرگ‌مقیاس مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

در نقشه تراز دریا مربوط به ساعت UTC ۱۲۰۰ روز ۶ فوریه ۲۰۰۵ (شکل ۴-الف) سامانه کم‌فشار دینامیکی به مرکز ۱۰۱۰ هکتوپاسکال در حال نفوذ به مرزهای غربی ایران است. در ناحیه شمال دریای خزر، سامانه پرفشاری به منطقه نفوذ کرده، به طوری که زبانه ۱۰۲۰ هکتوپاسکال از جنوب دریای خزر گذشته است. همان‌طور که در شکل پیداست، گرادیان فشاری در نواحی شمال غربی ایران و غرب دریای خزر قابل توجه است و به دلیل وجود این گرادیان شدید فشاری که خود تأمین‌کننده فعالیت‌های متعاقب جوی می‌شود، انتظار ناپایداری‌های شدیدتر در این مناطق می‌رود (ندجلیکا و وزنا، ۱۹۹۷). نواحی جنوب شرق ایران تحت تأثیر سامانه کم‌فشار قرار گرفته به طوری که زبانه ۱۰۱۰ هکتوپاسکال از مرزهای جنوب شرقی ایران تا شرق دریای عمان امتداد یافته است. در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال همان روز (شکل ۴-ب) کم ارتفاعی به مرکز ۵۳۴ دکامتر و با گرادیان ارتفاع ژئوپتانسیلی قابل ملاحظه‌ای در شمال دریای خزر مستقر است، از طرفی کم ارتفاع دیگری به مرکز ۵۴۰ دکامتر در شرق کشور ترکیه وجود دارد

قابل قبولی بین دو الگو مشاهده می‌شود. در الگوهای پیش‌بینی شده با مدل، سامانه کم‌فشار به مرکز ۱۰۱۵ هکتوپاسکال روی عراق حضور دارد در صورتی‌که در الگوهای واقعی با وجود حاکمیت سامانه کم‌فشار در این ناحیه، مرکز بسته ۱۰۱۵ هکتوپاسکال مشاهده نمی‌شود. در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال همان روز الگوی پیش‌بینی (شکل ۷-ب) کاملاً مشابه با نقشه واقعی (شکل ۱۱-ب) است.

در نقشه واقعی تراز دریا مربوط به ساعت UTC ۱۲۰۰ روز ۱۰ فوریه ۲۰۰۵ (شکل ۱۱-ج) زبانه کم‌فشار ۱۰۱۰ هکتوپاسکالی در جنوب شرق ایران مشاهده می‌شود که در پیش‌بینی مدل زبانه ۱۰۱۵ هکتوپاسکال از این ناحیه عبور کرده است. در نواحی مرکزی ایران نیز گرادیان فشار تشدید شده است. در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال همان روز الگوی پیش‌بینی کاملاً مشابه نقشه واقعی (شکل ۱۱-د) است.

۲-۳ اجرای مرحله دوم، شبکه با تفکیک افقی ۱۰ کیلومتر: در بخش قبل نقشه‌های سطح هم‌تراز دریا و تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در اجرای مدل با تفکیک افقی ۳۰ کیلومتری تحلیل شد تا نسبت به شرایط همدیدی سامانه‌ای که از ۶ تا ۱۲ فوریه ۲۰۰۵ کشور ایران را تحت تأثیر قرار داده و موجب بارش برف سنگین، به‌ویژه در نیمه شمالی ایران شده است، شناخت کلی حاصل شود. برای به‌دست آوردن نتایج بهتر، در این بخش فعالیت سامانه شبیه‌سازی شده با مدل با تفکیک افقی ۱۰ کیلومتر مورد بررسی قرار می‌گیرد (در شکل‌های مربوط به این بخش، نقطه TEH مربوط به ایستگاه مهرآباد و نقطه RSH مربوط به ایستگاه رشت است). به دلیل اهمیت بارش و اثرات تخریبی و اجتماعی آن در تحلیل نتایج بیشتر به مسئله بارش و موفقیت مدل در شبیه‌سازی این مؤلفه هواشناختی می‌پردازیم.

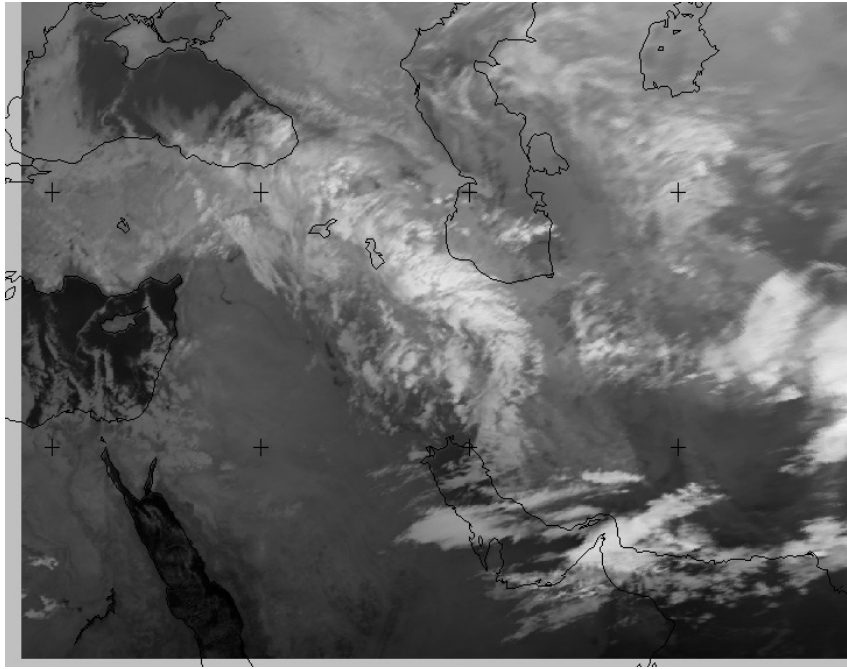
تحت تأثیر قرار داده است. در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال همان روز (شکل ۸-ب) کم ارتفاع به مرکز ۵۴۲ دکامتر روی رشته کوه البرز مرکزی قرار گرفته و ناوه ناشی از آن به سمت شرق و شمال شرق ایران کشیده شده است.

در نقشه تراز دریا مربوط به ساعت UTC ۱۲۰۰ روز ۱۱ فوریه ۲۰۰۵ (شکل ۹-الف) همچنان همه مناطق ایران تحت تأثیر سامانه پرفشار است، اما گرادیان فشار تضعیف شده است. در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال همان روز (شکل ۹-ب) به جز نوار باریکی از مناطق شمال ایران که متأثر از عبور امواج ناپایدار کم‌دامنه است در بقیه نقاط پربندهای ارتفاع به حالت مداری در آمده است.

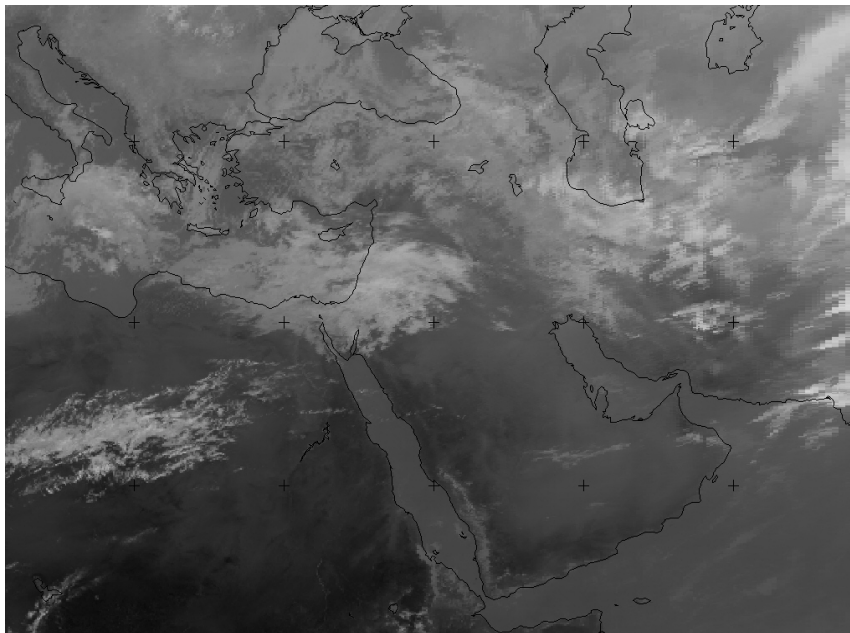
در نقشه تراز دریا مربوط به ساعت UTC ۱۲۰۰ روز ۱۲ فوریه ۲۰۰۵ (شکل ۱۰-الف) الگوی نقشه نسبت به ۲۴ ساعت گذشته تغییر محسوسی نداشته است. در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال همان روز (شکل ۱۰-ب) سامانه کم‌ارتفاع به عرض‌های بالاتر انتقال یافته و پربندهای ارتفاع روی ایران به حالت مداری در آمده است. با توجه به این الگوها و همچنین تصاویر ماهواره‌ای این دو روز که در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند، انتظار می‌رود در روزهای ۹ و ۱۰ فوریه، جوی ناپایدار در روی منطقه استقرار یافته و رخ دادن پدیده‌های هواشناختی (شدید) در این دو روز دور از انتظار نیست.

با توجه به وضعیت و موقعیت شرایط سینوپتیکی حاکم بر منطقه و اهمیت روزهای ۹ و ۱۰ از این دیدگاه، برای صحت‌سنجی نقشه‌های پیش‌یابی شده توسط مدل ARPS، نقشه‌های واقعی برای روزهای ۹ و ۱۰ فوریه ۲۰۰۵ مورد بررسی و مقایسه قرار می‌دهیم.

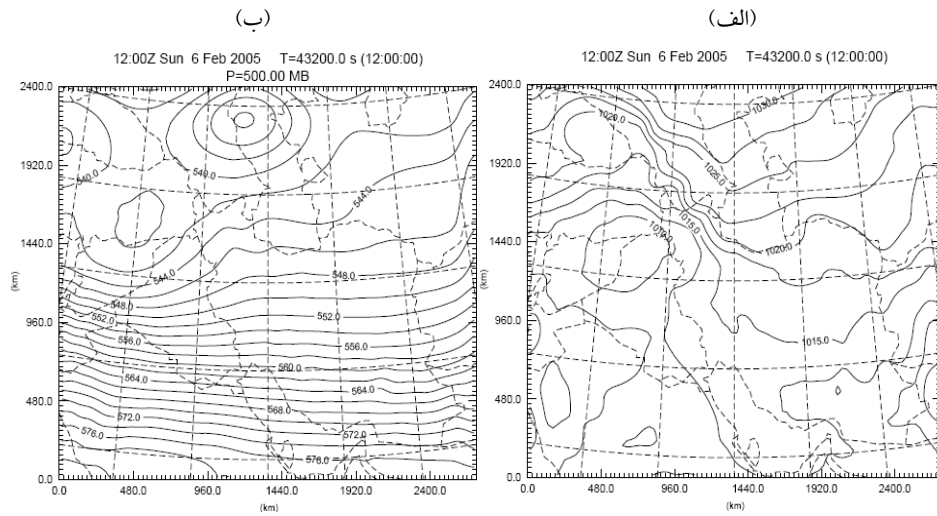
با توجه به نقشه تراز دریای واقعی مربوط به ساعت UTC ۱۲۰۰ روز ۹ فوریه ۲۰۰۵ (شکل ۱۱-الف)، الگوی کلی سامانه‌های جوی حاضر در منطقه نسبت به نقشه پیش‌یابی مدل (شکل ۷-الف) هماهنگی نسبتاً



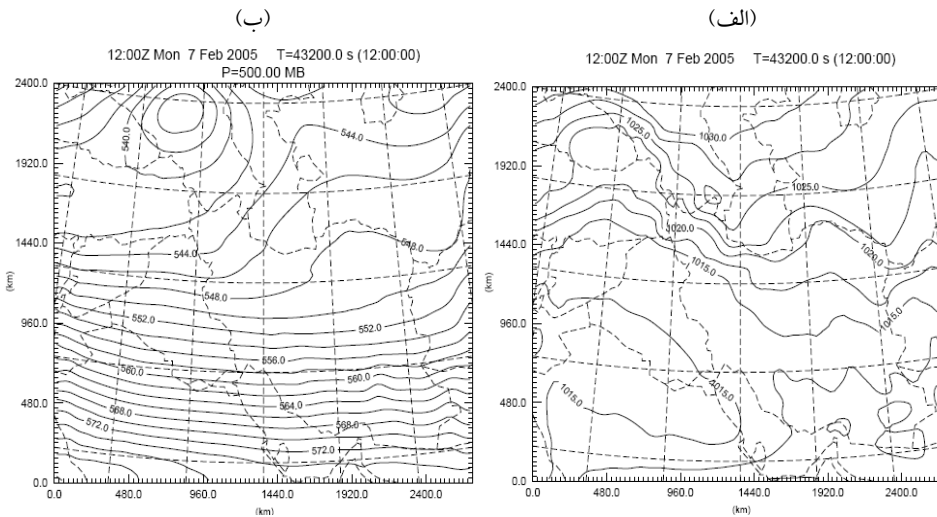
شکل ۲. تصویر ماهواره‌ای روز ۹ فوریه ساعت ۱۲.



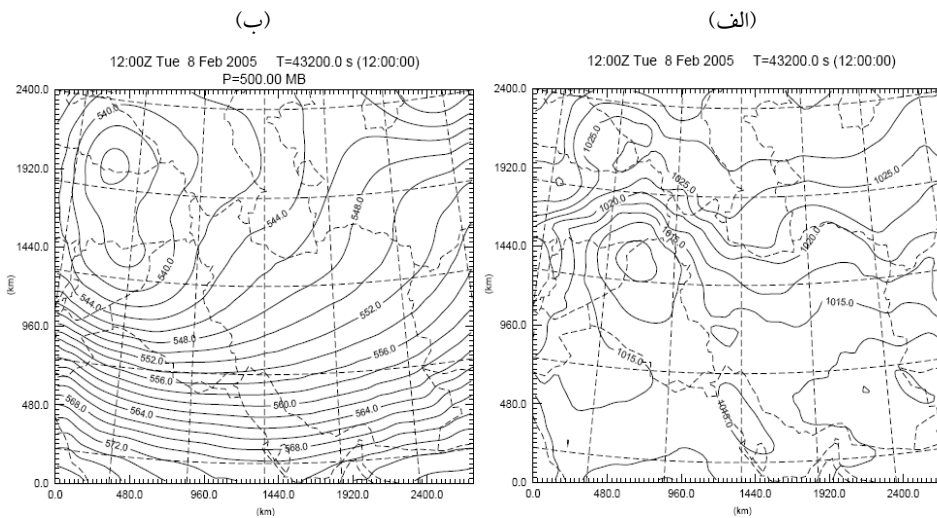
شکل ۳. تصویر ماهواره‌ای روز ۱۰ فوریه ساعت ۱۲.



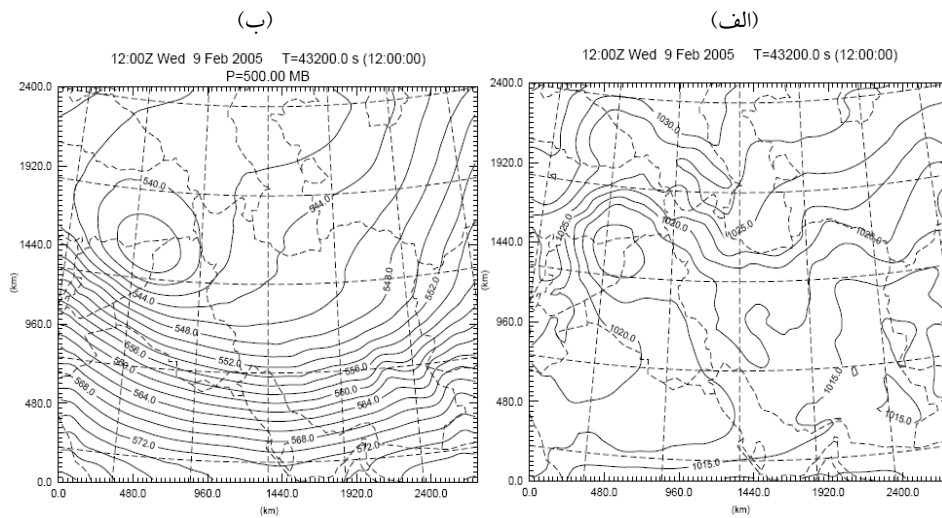
شکل ۴. (الف) فشار سطح زمین و (ب) ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ میلی‌بار ساعت ۱۲:۰۰ روز ۶ فوریه (پیش‌بینی ۱۲ ساعته).



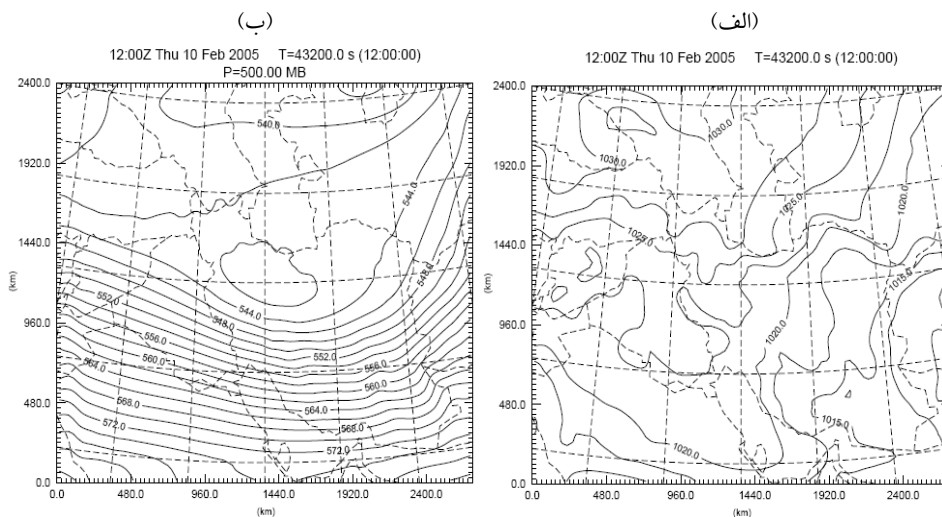
شکل ۵. شرایط مشابه شکل ۴ برای روز ۷ فوریه.



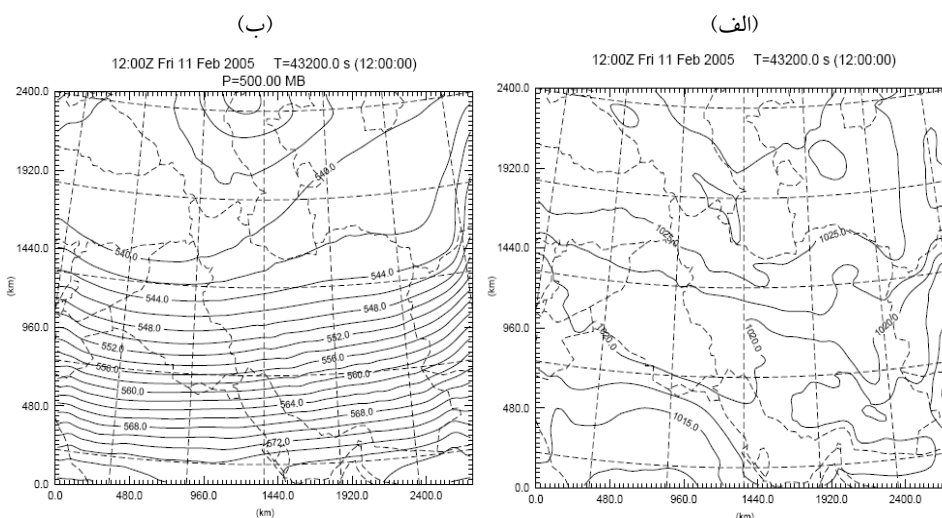
شکل ۶-الف. شرایط مشابه شکل ۴ برای روز ۸ فوریه.



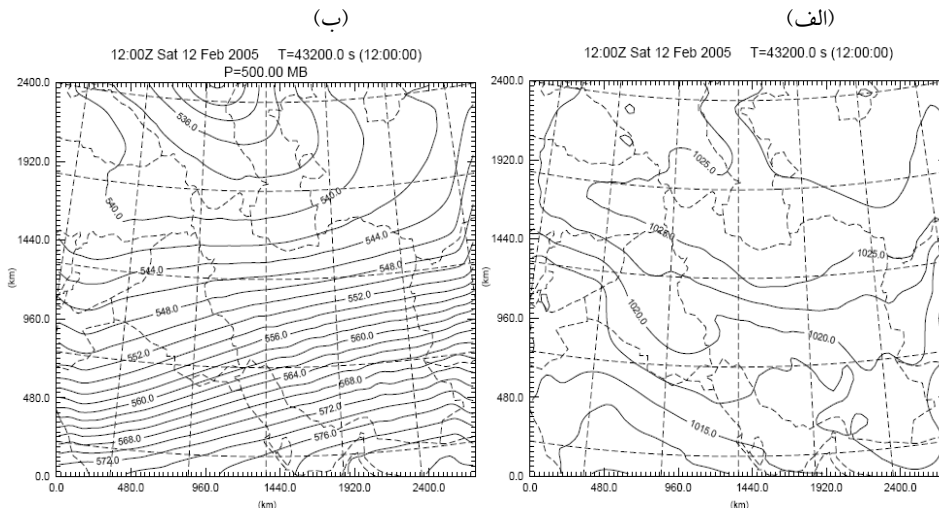
شکل ۷. شرایط مشابه شکل ۴ برای روز ۹ فوریه.



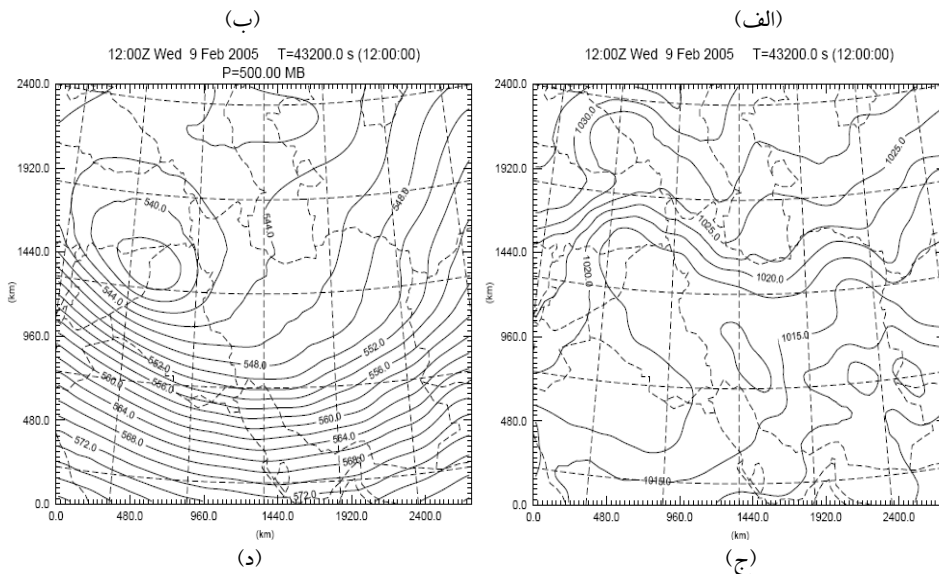
شکل ۸. شرایط مشابه شکل ۴ برای روز ۱۰ فوریه.



شکل ۹. شرایط مشابه شکل ۴ برای روز ۱۱ فوریه.



شکل ۱۰. شرایط مشابه شکل ۴ برای روز ۱۲ فوریه.



شکل ۱۱. نقشه‌های واقعی (الف) فشار سطح زمین (ب) ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ میلی‌بار ساعت ۱۲:۰۰ روز ۹ فوریه (ج) فشار سطح زمین و (د) ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ میلی‌بار ساعت ۱۲:۰۰ روز ۱۰ فوریه.

میزان قابل توجهی افزایش یافته است و به حدود ۱۲ میلی‌متر می‌رسد. همانند نقشه‌های قبلی بیشترین بارش برای مناطق ساحلی دریای خزر مشاهده می‌شود (بیشترین مقدار بارش ۴۹ میلی‌متر).

بارش تجمعی ۱۲ ساعته از ساعت UTC ۰۶:۰۰ تا ساعت UTC ۱۸:۰۰ روز ۹ فوریه ۲۰۰۵، کاهش بارش تا مقدار ۵ میلی‌متر را برای منطقه تهران نشان می‌دهد (شکل ۱۲-ز). در ۱۲ ساعت بعد یعنی از ساعت UTC ۱۸:۰۰ روز ۹ فوریه تا ساعت UTC ۰۶:۰۰ روز ۱۰ فوریه ۲۰۰۵ نیز بارش در تهران تغییر چندانی نیافته است و بیشترین مقدار آن حدود ۹ میلی‌متر است (شکل ۱۲-ح). در سواحل جنوبی دریای خزر بارش تجمعی ۱۲ ساعته تا مقدار ۴۵ میلی‌متر نیز مشاهده می‌شود.

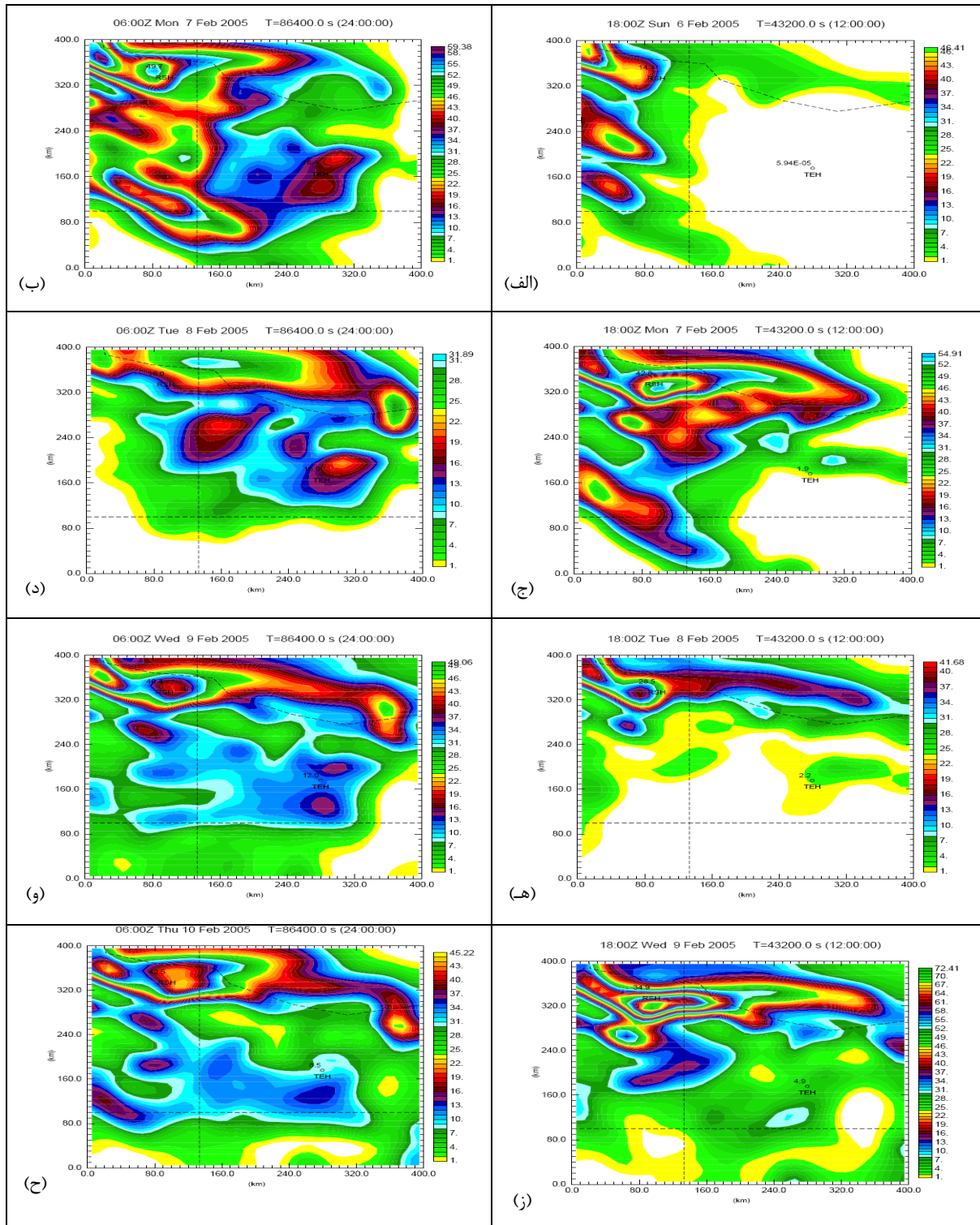
بارش تجمعی ۱۲ ساعته از ساعت UTC ۰۶:۰۰ تا ساعت UTC ۱۸:۰۰ روز ۱۰ فوریه ۲۰۰۵، بارش در منطقه تهران حدود ۷ میلی‌متر است و بیشترین بارش در سواحل دریای خزر به مقدار ۵۰ میلی‌متر مشاهده می‌شود (شکل ۱۲-ط). از ساعت UTC ۱۸:۰۰ روز ۱۰ فوریه تا ساعت UTC ۰۶:۰۰ روز ۱۱ فوریه ۲۰۰۵، بارشی در تهران مشاهده نمی‌شود. همچنین در مناطق غربی و مرکزی ایران نیز بارش پیش‌بینی نشده است. بارش در سواحل دریای خزر کاهش محسوسی داشته است و بیشترین مقدار آن به ۱۸ میلی‌متر می‌رسد (شکل ۱۲-ی).

به‌طور کلی الگوی بارشی نشان می‌دهد که از روز ۷ تا ۱۱ فوریه ۲۰۰۵، بیشترین مقدار بارش در نواحی ساحلی دریای خزر اتفاق افتاده است، همان محلی که گرادبان شدید فشار سطح زمین وجود داشت و با داده‌های واقعی بارش که برای نمونه بارش ۲۸۱ میلی‌متری را برای ایستگاه رشت و ۲۲۶ میلی‌متری را برای ایستگاه بندر انزلی نشان می‌دهد، همخوانی خوبی دارد. برای منطقه تهران طی این مدت زمانی الگوی نقشه‌های هم‌بارش روند افزایشی و کاهشی متناوب بارش را نشان می‌دهد که با مقادیر واقعی

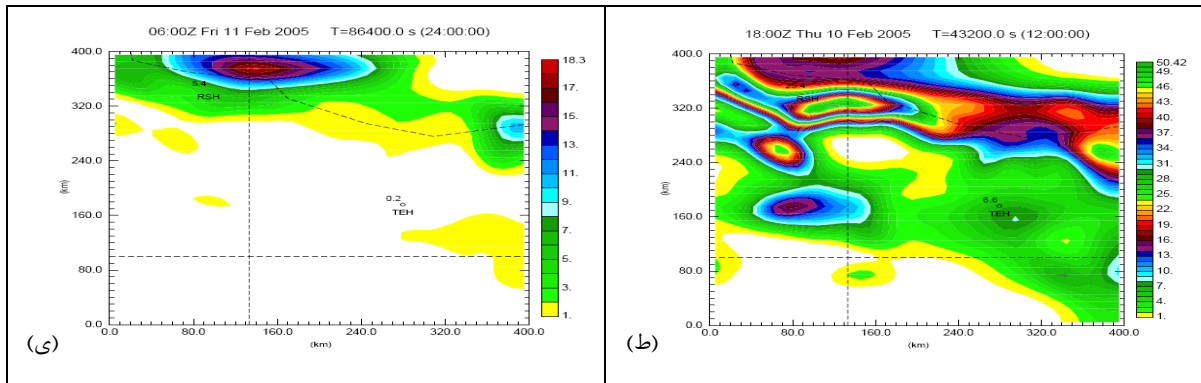
شکل (۱۲-الف) بارش تجمعی ۱۲ ساعته را از ساعت UTC ۰۶:۰۰ تا ساعت UTC ۱۸:۰۰ روز ۶ فوریه ۲۰۰۵ نشان می‌دهد که برای منطقه تهران بارش اتفاق نیفتاده است. مرکز بیشترین بارش در نواحی غرب دریای خزر، شمال غرب و تا حدی غرب ایران مشاهده می‌شود که به میزان ۴۶ میلی‌متر می‌رسد. در نقشه مربوط به بارش تجمعی ۱۲ ساعته از ساعت UTC ۱۸:۰۰ روز ۶ فوریه تا ساعت UTC ۰۶:۰۰ روز ۷ فوریه ۲۰۰۵، شکل (۱۲-ب)، بارش تا نواحی شرقی تهران نیز کشیده شده است، مقدار بارش روی تهران حدود ۱۷ میلی‌متر مشاهده می‌شود.

شکل (۱۲-ج) بارش تجمعی ۱۲ ساعته را از ساعت UTC ۰۶:۰۰ تا ساعت UTC ۱۸:۰۰ روز ۷ فوریه ۲۰۰۵ نشان می‌دهد. بارش در منطقه تهران تضعیف شده و مرکز آن حدود ۲ میلی‌متر است. بیشترین بارش روی نواحی ساحل غربی و مرکزی دریای خزر، ارتفاعات غربی رشته‌کوه البرز و ارتفاعات شمالی رشته‌کوه زاگرس مشاهده می‌شود. بارش تجمعی ۱۲ ساعته از ساعت UTC ۱۸:۰۰ روز ۷ فوریه تا ساعت UTC ۰۶:۰۰ روز ۸ فوریه ۲۰۰۵، روی منطقه تهران مجدداً افزایش یافته و به مقدار ۱۶ میلی‌متر رسیده است. از سمت غرب ایران بارش در حال تضعیف است و بیشترین بارش‌ها به نواحی شرقی‌تر جابه‌جا شده است. در سواحل دریای خزر همچنان بارش از شدت قابل توجهی دارد (شکل ۱۲-د).

در شکل (۱۲-ه) بارش تجمعی ۱۲ ساعته را از ساعت UTC ۰۶:۰۰ تا ساعت UTC ۱۸:۰۰ روز ۸ فوریه ۲۰۰۵ مشاهده می‌شود. به‌جز نواحی جنوبی دریای خزر که بارش قابل توجه است و بیشینه بارش به مقدار ۴۲ میلی‌متر نیز می‌رسد، در نواحی دیگر شدت بارش به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاسته شده است. بارش در منطقه تهران حدوداً به ۳ میلی‌متر می‌رسد. بارش تجمعی ۱۲ ساعته از ساعت UTC ۱۸:۰۰ روز ۸ فوریه تا ساعت UTC ۰۶:۰۰ روز ۹ فوریه ۲۰۰۵، شکل (۱۲-و)، در منطقه تهران به



شکل ۱۲. الف-ی، به ترتیب بارندگی تجمعی ۱۲ ساعته از ساعت ۱۸ روز ۶ فوریه الی ساعت ۰۶ روز ۱۱ فوریه.



ادامه شکل ۱۲.

مدل در پیش‌بینی بارش، دوره زمانی آن، و حتی شدت و ضعف آن دقیق عمل کند.

۳-۳ اجرای مرحله سوم، شبکه با تفکیک افقی ۴ کیلومتر: در مرحله سوم، با افزایش تفکیک افقی شبکه به بررسی ریزتر و دقیق‌تری از تحولات سامانه مورد بررسی می‌پردازیم. به این منظور هر ۶ ساعت یک‌بار داده‌های واقعی بارش برای سه ایستگاه مهرآباد، اقدسیه و فرودگاه امام خمینی با نتایج شبیه‌سازی مدل مقایسه شده و در جدول‌های ۲ تا ۴ آورده شده است. همچنین مقادیر ۲۴ ساعته بارش نیز برای ۷ ایستگاه که در جدول ۵ آمده، با نتایج حاصل از مدل مقایسه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که به‌طور کلی مدل در پیش‌بینی وجود بارش موفق عمل کرده است و همچنین روند زمانی- مکانی پیش‌بینی بارش در ایستگاه‌های متفاوت با روند زمانی- مکانی مقادیر واقعی تقریباً همخوانی دارد. همان‌طور که مقایسه مقادیر جدول نشان می‌دهد، در برخی موارد بین نتایج مدل و داده‌های واقعی بارش، از نظر کمی تفاوت، فاحشی وجود دارد. علت وجود این تفاوت در کنار خطای مدل در پیش‌بینی، خطای درونی مقادیر بارش به نقاط شبکه نیز وجود دارد. همچنین به دلیل

بارش همخوانی دارد. موضوعی که حائز اهمیت است این است که در این‌گونه بررسی‌ها به دلیل نبود داده‌های پیوسته بارش ارزیابی توانایی‌های مدل در پیش‌بینی بارش امکان‌پذیر نیست و هنر اساسی مدل‌ها که پیش‌بینی لحظه‌ای بارش‌های شدید است قابل اثبات نیست.

با توجه به نتایج این مرحله مشاهده می‌شود مدل به خوبی قادر به پیش‌بینی کیفی پدیده بارش، تناوب بارش، نوع بارش، و تا اندازه‌های مقدار بارش بوده است. در خصوص تفاوت احتمالی بارش پیش‌بینی شده با مقدار دیدبانی شده می‌توان گفت، بارش اندازه‌گیری شده دیدبان‌ها اولاً تجمعی است و امکان پیدایش تفاوت در این زمینه طی ۲۴ ساعت کاملاً بدیهی است و دوم اینکه نقاط شبکه که در آنها مقادیر بارش تعیین می‌شود لزوماً بر ایستگاه‌های اندازه‌گیری منطبق نیست و با توجه به تغییرات زیاد زمانی و مکانی بارش، امکان وارد شدن خطا در این‌گونه موارد دور از انتظار نیست و سوم اینکه با توجه به نوع بارش، خصوصاً بارش برف، به دلیل وجود طیف بسیار وسیع نوع برف از جهت میزان آب موجود در دانه‌های برف، و نبودن طرح‌واره‌های خردفیزیک ابر به این تعداد، امکان وجود تفاوت در میزان بارش (آب به‌دست آمده از دیدبان ذوب برف) نیز هست، هر چند که

مشاهده، تفاوت دمای ۴ درجه سلسیوسی در سطح زمین است. به عبارت دیگر مدل دما را حدود ۴ درجه سلسیوس کمتر پیش‌بینی کرده است.

در نمودار Skew-T مربوط به ساعت UTC ۰۰۰۰ روز ۸ فوریه ۲۰۰۵ (شکل ۱۳-ج و ۱۳-د)، هر دو حالت شبیه‌سازی و مشاهده از نظر میزان رطوبت با یکدیگر همخوانی خوبی دارند و تا تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال رطوبت مناسب است. از تراز ۵۰۰ تا ۴۰۰ هکتوپاسکال از میزان رطوبت کاسته می‌شود و از تراز ۴۰۰ هکتوپاسکال به بالا هوای کاملاً خشک با وارونگی دمایی از هوای مرطوب سطوح زیرین جدا شده است. از لحاظ سمت و سرعت باد، مدل مشابه مشاهده است و هر دو نمودار فرارفت هوای گرم را نشان می‌دهند. همچنین مدل، ساختار دمایی مشاهده شده را به خوبی شبیه‌سازی کرده است.

در نمودار Skew-T مربوط به ساعت UTC ۰۰۰۰ روز ۹ فوریه ۲۰۰۵ (شکل ۱۳-ه)، شبیه‌سازی رطوبت تا تراز ۴۰۰ هکتوپاسکال نسبتاً خوب است و هوای مرطوبی زیر این تراز وجود دارد. هوای خشک بالاتر از تراز ۴۰۰ هکتوپاسکال از هوای مرطوب زیرین با یک وارونگی دمایی جدا می‌شود. از لحاظ سمت و سرعت باد شبیه‌سازی مدل مناسب است و به دلیل چرخش ساعتگرد باد با ارتفاع فرارفت هوای گرم در ایستگاه حاکم است. از نظر ساختار دمایی، مدل دما را در سطح زمین حدود ۴ درجه سلسیوس کم‌تر شبیه‌سازی کرده است. در نمودار Skew-T مربوط به ساعت UTC ۰۰۰۰ روز ۱۰ فوریه ۲۰۰۵ (شکل ۱۳-ز)، همانند روزهای قبل، به‌طور کلی شبیه‌سازی مدل مناسب است. در نمودارهای پیش‌گفته، همواره نمایه قائم دما در حالت شبیه‌سازی نسبت به مشاهده هموارتر است که دلیل آن استفاده از داده‌های GFS در شبیه‌سازی است. همچنین شبیه‌سازی صورت گرفته در این تحقیق، نوع بارش را به‌صورت برف نشان می‌دهد که با مشاهده همخوانی دارد.

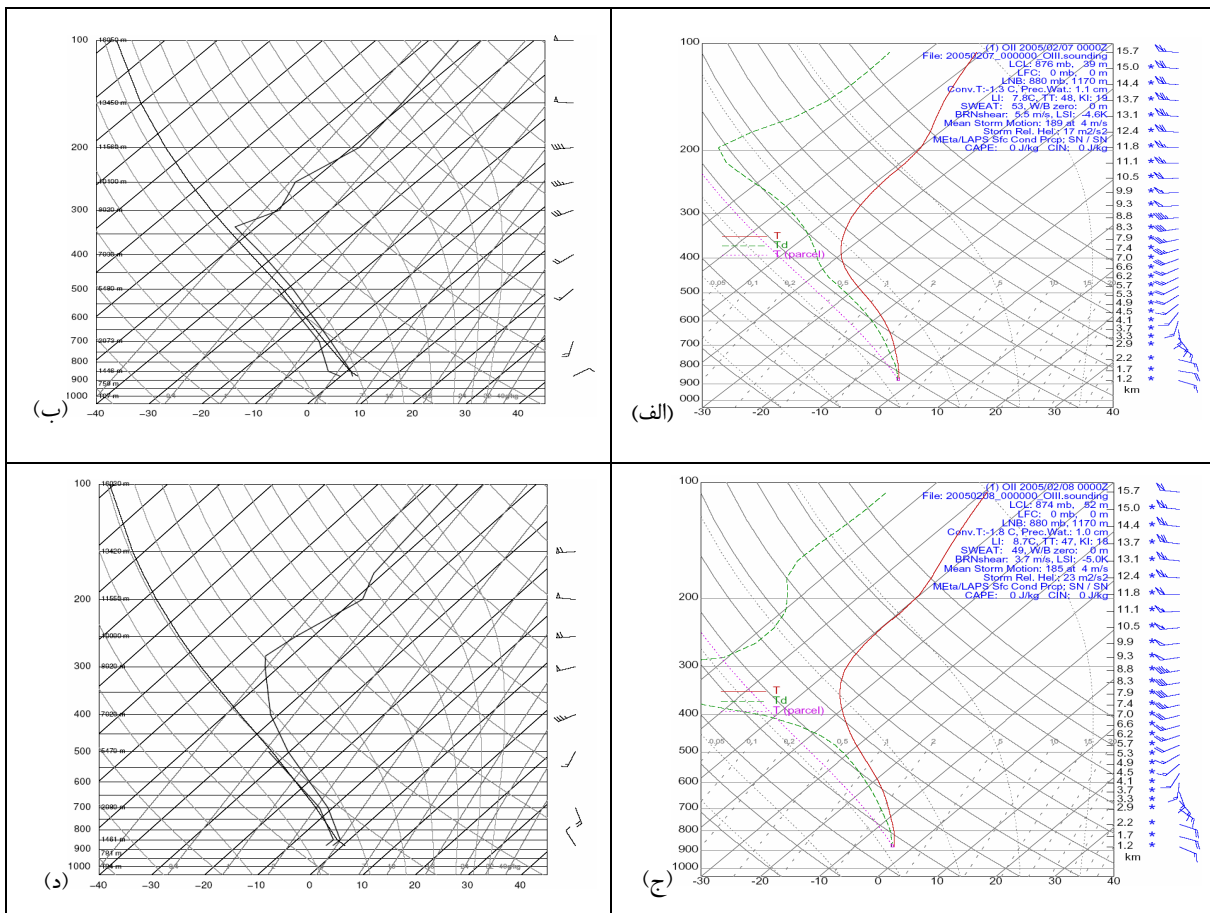
هموارسازی مدل از ارتفاعات در این تفکیک افقی (< 5 km) و نقش زیاد مقادیر ارتفاع در میزان بارش، بخشی از خطا نیز به این صورت قابل توجیه است (یاو و همکاران، ۲۰۰۴).

با توجه به اینکه مقایسه مقادیر کمی نتایج شبیه‌سازی بارش مدل با استفاده از داده‌های GFS معیار مناسبی برای ارزیابی عملکرد مدل در پیش‌بینی نیست، در ادامه شاخص Skew-T ایستگاه مهرآباد که نمایه قائم جو را در ایستگاه مورد نظر نشان می‌دهد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. یکی از کاربردهای مهم این منحنی تشخیص شرایط پایداری و ناپایداری جو است که برخی مواقع بر روی نقشه‌های همدیدی قابل تشخیص نیست. همچنین از این نمودارها می‌توان ویژگی‌های ترمودینامیکی حاکم بر جو یک منطقه را تشخیص داد.

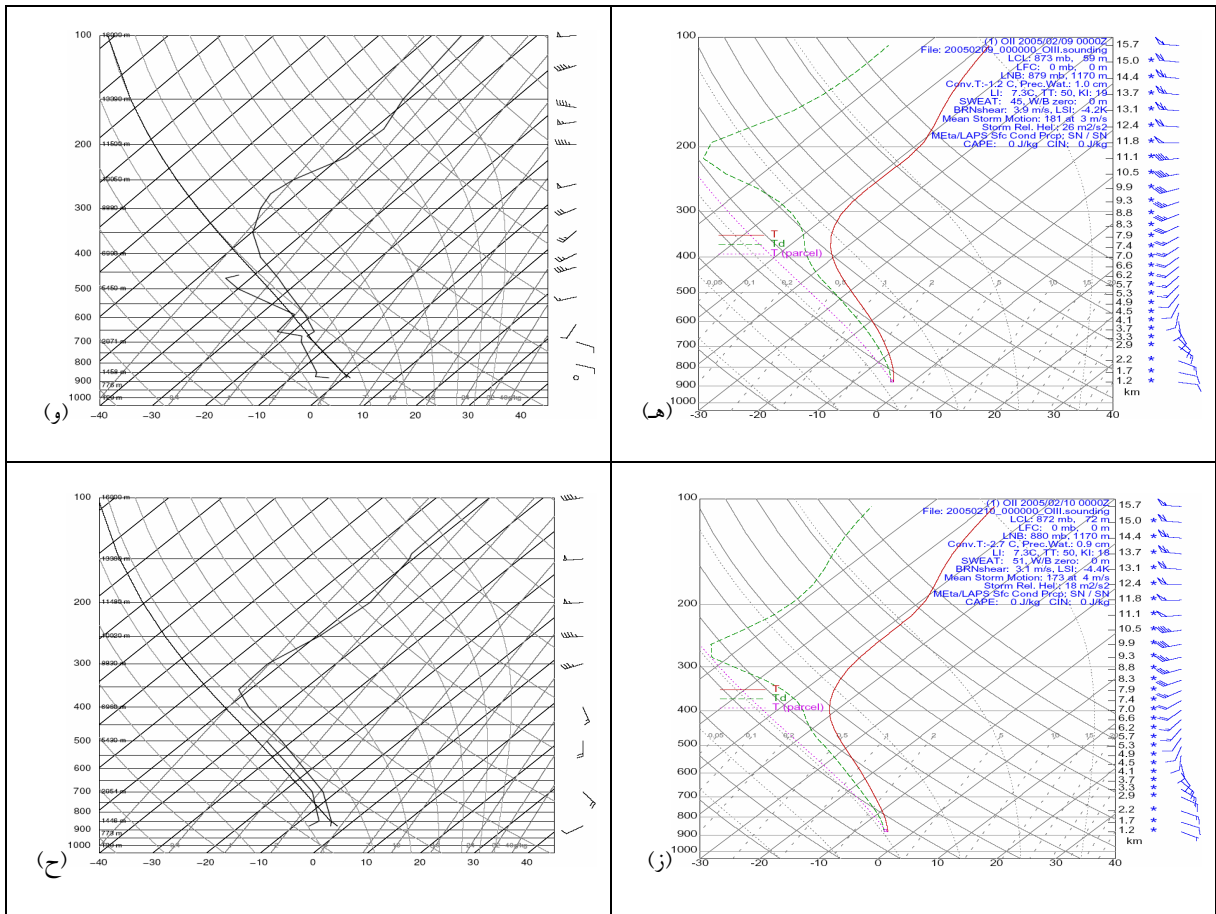
در نمودار Skew-T مربوط به ساعت UTC ۰۰۰۰ روز ۷ فوریه ۲۰۰۵ (شکل ۱۳-الف)، تا تراز ۴۰۰ هکتوپاسکال مدل با مشاهدات همخوانی دارد. پایین‌تر از تراز ۴۵۰ هکتوپاسکال برای هر دو مورد شبیه‌سازی و مشاهده، هوای نسبتاً مرطوبی دیده می‌شود. در شبیه‌سازی، بالاتر از ۴۰۰ هکتوپاسکال هوا خشک و از هوای مرطوب زیرین با یک وارونگی دمایی جدا می‌شود. در حالت واقعی این وارونگی دمایی بالاتر از ۳۳۰ هکتوپاسکال مشاهده می‌شود. به‌طور کلی میزان رطوبت در حالت شبیه‌سازی و مشاهده تقریباً یکسان است و از لحاظ رطوبت شبیه‌سازی مدل مناسب است. از لحاظ سمت باد و جهت چرخش باد با ارتفاع، هر دو حالت شبیه‌سازی و مشاهده همخوانی خوبی با یکدیگر دارند و هر دو حالت نشان‌دهنده چرخش ساعتگرد باد با ارتفاع (فرارفت هوای گرم) است. اما از آنجا که مدل سرعت باد بیشتری را نسبت به حالت واقعی در ترازهای متفاوت نشان می‌دهد، فرارفت هوای گرم نیز در مدل با شدت بیشتری شبیه‌سازی شده است. از موارد دیگر تفاوت بین شبیه‌سازی و

نتیجه شبیه‌سازی‌های صورت گرفته از شدت ناپایداری کمتری برخوردار بوده‌اند. مشابه این وضعیت برای مقادیر SI (هر چه مقدار SI کمتر و به عدد صفر نزدیک‌تر یا کوچک‌تر از صفر باشد، شدت ناپایداری بیشتر است) اتفاق افتاده است و ناپایداری جو شبیه‌سازی شده کمتر از مقدار واقعی آن بوده است. به همین دلیل مقادیر TT (Total Totals Index) که مقادیر کوچک‌تر آن معرف ناپایداری کمتر است در مورد شبیه‌سازی نیز کمتر از TT مشاهده شده است. به همین صورت در مورد مقادیر T_c (Convective Temperature) شبیه‌سازی شده نیز منفی و کمتر از مقادیر مشاهده است و جو پایدارتری را نشان می‌دهد.

در جدول ۶ برخی از پارامترهای حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر مشاهده شده، مقایسه شده‌اند. ارتفاع LCL (Lifting Condensation Level) در شبیه‌سازی نسبت به مشاهده کمتر است. همچنین مقادیر آب قابل بارش (PW, Precipitable Water) شبیه‌سازی بیشتر از مقدار مشاهده است که هر دو این موارد با مقدار بارش شبیه‌سازی شده در ایستگاه مهرآباد که بیشتر از مشاهده شده است، تطابق دارد (جدول ۲). مقادیر KI که یکی دیگر از شاخص‌های ناپایداری است و هر چه مقدار آن بیشتر و به عدد ۳۰ نزدیک‌تر باشد، شدت ناپایداری بیشتر است، در آزمایش‌های صورت گرفته، مقادیر شبیه‌سازی کمتر از مشاهده است و در



شکل ۱۳. الف، ج، ه و ز نمودار Skew-T شبیه‌سازی شده مربوط به ساعت ۰۰۰ UTC روزهای ۷ الی ۱۰ فوریه ۲۰۰۵، و شکل ب، د، ح نمودارهای واقعی ساعت ۰۰۰ UTC روزهای ۷ الی ۱۰ فوریه ۲۰۰۵.



ادامه شکل ۱۳.

جدول ۲. مقادیر بارش ۶ ساعته ایستگاه مهرآباد (شبیه‌سازی و واقعیت).

روز	۰۶۰۰ تا ۰۶۰۰		۰۶۰۰ تا ۱۲۰۰		۱۲۰۰ تا ۱۸۰۰		۱۸۰۰ تا ۲۴۰۰	
	واقعیت	شبیه‌سازی	واقعیت	شبیه‌سازی	واقعیت	شبیه‌سازی	واقعیت	شبیه‌سازی
۶ فوریه			۰	۰	۰	۰	۰/۵	۶
۷ فوریه	۴	۱۶	۰/۹	۵	۱	۴	۷	۷
۸ فوریه	۳	۱۶	۳	۲	۰/۱	۰/۳	۰/۲	۰/۹
۹ فوریه	۰/۴	۱۴	۴	۲	۳	۰/۴	۰/۹	۴
۱۰ فوریه	۳	۷	۹	۰/۶	۱	Tr	۰	۰
۱۱ فوریه	۰	۰						

جدول ۳. مقادیر بارش ۶ ساعته ایستگاه اقدسیه (شبیه‌سازی و واقعیت).

روز	۰۶۰۰ تا ۰۰۰۰		۱۲۰۰ تا ۱۸۰۰		۱۸۰۰ تا ۲۴۰۰	
	واقعیت	شبیه‌سازی	واقعیت	شبیه‌سازی	واقعیت	شبیه‌سازی
۶ فوریه			Tr	۰	۰	۰
۷ فوریه	۱۲	۴	۱۰	۱	۵	۲
۸ فوریه	۱۴	۹	۲	۰	۱۳	۳
۹ فوریه	۱۱	۰	۰/۴	۱	۰/۸	۲
۱۰ فوریه	۵	۴	۰/۲	۰	۴	۴
۱۱ فوریه	۰	۰				

جدول ۴. مقادیر بارش ۶ ساعته ایستگاه امام (شبیه‌سازی و واقعیت).

روز	۰۶۰۰ تا ۰۰۰۰		۱۲۰۰ تا ۱۸۰۰		۱۸۰۰ تا ۲۴۰۰	
	واقعیت	شبیه‌سازی	واقعیت	شبیه‌سازی	واقعیت	شبیه‌سازی
۶ فوریه			۰	۰	۰	۰/۴
۷ فوریه	۱۲	۱	۰/۵	۰/۱	۰/۲	۱
۸ فوریه	۱۲	۰/۲	۰	۰	۰	۰/۶
۹ فوریه	۱۲	۲	۰/۴	۲	۴	۰/۲
۱۰ فوریه	۸	۴	۰	۰/۳	۶	۳
۱۱ فوریه	۰	۰				

جدول ۵. مقادیر بارش ۲۴ ساعته ایستگاه‌های تهران (شبیه‌سازی و واقعیت).

نام ایستگاه	۰۶۰۰ روز ۷		۰۶۰۰ روز ۸		۰۶۰۰ روز ۹		۰۶۰۰ روز ۱۰		۰۶۰۰ روز ۱۱	
	واقعیت	شبیه‌سازی	واقعیت	شبیه‌سازی	واقعیت	شبیه‌سازی	واقعیت	شبیه‌سازی	واقعیت	شبیه‌سازی
مهرآباد	۴/۱	۲۸/۶	۱۸/۳	۱۷/۸	۳/۲	۱۵/۲	۵/۱	۱۵/۲	۱۰/۱	۰/۶
اقدسیه	۹/۳	۱۹/۸	۳۶/۴	۱۵/۹	۱۵/۳	۹/۳	۵/۱	۹/۳	۳/۹	۴/۵
دوشان تپه	۲/۷	۳۰/۴	۱۳/۶	۱۷/۴	۳/۵	۱۴/۸	۲/۲	۱۴/۸	۹/۸	۰/۶
ژئوفیزیک	۴/۳	۳۴/۸	۲۳/۶	۱۸	۶/۳	۱۳/۸	۸/۱	۱۳/۸	۸/۴	۴/۹
آبعلی	۲/۴	۲۶/۳	۱۷	۱۵/۳	۵/۱	۸/۷	۰/۸	۸/۷	۶/۳	۰
چیتگر	۲/۷	۱۹/۷	۲۹/۵	۱۵/۳	۵	۱۱	۱۶/۳	۱۱	۶/۶	۲/۲
فرودگاه امام	۱/۶	۱۶/۵	۱۱/۳	۱۳/۵	۲/۴	۱۱/۹	۸/۵	۱۱/۹	۳/۳	۶/۳

جدول ۶. مقایسه برخی شاخص‌های Skew-T شبیه‌سازی و واقعیت مربوط به ایستگاه مهرآباد.

۱۰ روز ۰۰۰۰		۹ روز ۰۰۰۰		۸ روز ۰۰۰۰		۷ روز ۰۰۰۰		شاخص
واقعیت	شبیه‌سازی	واقعیت	شبیه‌سازی	واقعیت	شبیه‌سازی	واقعیت	شبیه‌سازی	
۸۲۴/۵	۸۷۲	۸۳۶	۸۷۳	۸۶۱	۸۷۴	۸۴۵	۸۷۶	LCL(mb)
۷/۳	۹	۶/۲	۱۰	۷/۳	۱۰	۹/۳	۱۱	PW (mm)
۱۹/۶	۱۸	۲۰/۹	۱۹	۲۴	۱۸	۲۴	۱۹	KI
۳/۹	۶	۳/۱	۶	۲/۷	۸	۲/۱	۷	SI
۵۳/۷	۵۰	۵۴/۲	۵۰	۶۰	۴۷	۵۵	۴۸	TT
۲/۶	-۳	۲/۳	-۱	۲/۲	-۲	۴	-۱	T _c

۴ نتیجه‌گیری

همخوانی دارد.

برای به دست آوردن نتایج دقیق‌تر و مقایسه بهتر نتایج شبیه‌سازی با واقعیت مشاهده شده، اجرای با تفکیک افقی ۴ کیلومتر صورت گرفت و مقادیر کمی بارش در برخی از ایستگاه‌های تهران مقایسه شد. مدل از نظر وقوع یا واقع نشدن بارش و همچنین از لحاظ کیفی، به معنی پیش‌بینی شدت بارش، به خوبی عمل کرده است، هرچند مقادیر کمی بارش در اغلب موارد بیشتر از مقادیر واقعی گزارش شده از ایستگاه‌ها است. همچنین مقایسه نمودارهای ترمودینامیکی Skew-T در ایستگاه مهرآباد تهران، نشان‌دهنده موفقیت نسبی مدل در شبیه‌سازی نمایه قائم جو است.

هرچند داده‌های GFS که با تفکیک افقی ۱ درجه و دوره ۶ ساعته در دسترس‌اند، درحکم شرایط اولیه و شرایط مرزی برای اجرای مدل مورد استفاده قرار گرفته است، اما نتایج بارش به دست آمده در مواردی قابل قبول است و در برخی موارد ناهمخوانی دارد. پیش‌بینی نمایه‌های ترمودینامیکی، به خصوص نمایه قائم ناپایداری، شباهت بسیار خوبی نتایج مدل و واقعیت را به دست می‌دهد.

در این تحقیق مدل ARPS در سه مرحله با تفکیک‌های افقی ۳۰، ۱۰ و ۴ کیلومتر اجرا شده و نتایج آن مورد تحلیل قرار گرفته است. در اجرای با تفکیک افقی ۳۰ کیلومتر، نقشه‌های هم‌تراز دریا و ۵۰۰ هکتوپاسکال مربوط به شبیه‌سازی با نقشه‌های واقعی مقایسه شد. به‌طور کلی در نقشه‌های هم‌تراز دریا، مقادیر فشار شبیه‌سازی شده با مدل کمتر از مقادیر واقعی است، اما الگوی نقشه‌ها همخوانی قابل قبولی دارد؛ از طرفی نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیل شبیه‌سازی شده در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال تطابق بسیار خوبی با واقعیت مشاهده شده دارند.

در مرحله بعد، اجرای با تفکیک افقی ۱۰ کیلومتر، نقشه‌های هم‌بارش مربوط به نیمه شمالی ایران مورد تحلیل قرار گرفت. به‌طور کلی الگوی بارشی بیشترین میزان بارش را در نواحی ساحلی دریای خزر نشان می‌دهد که با داده‌های واقعی بارش گزارش شده از ایستگاه‌های هواشناسی مطابقت دارد. برای منطقه تهران طی این مدت زمانی الگوی نقشه‌های هم‌بارش روند افزایشی و کاهشی متناوب بارش را نشان می‌دهد که با مقادیر واقعی بارش

- Xue, M., Wang, D.-H., Gao, J.-D., Brewster, K., and Droegemeier, K. K., 2003, The Advanced Regional Prediction System (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation. *Meteor. Atmos. Phys.*, **82**, 139-170.
- Xue, M., Droegemeier, K. K., and Wong, V., 1995, Advanced Regional Prediction System (ARPS) and real-time storm prediction, Preprint, International workshop on limited-area and variable resolution models. Beijing, China, 23-27 Oct. 1995.
- Yau, M. K., Liu, Y., Zhang, D. L., and Chen, Y., 2004, A Multiscale Numerical Study of Hurricane Andrew (1992). Part VI: Small-Scale Inner-Core Structures and Wind Streaks. *Mon. Weather. Rev.*, **132**, 1410-1433

تشکر و قدردانی

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران و مؤسسه ژئوفیزیک، به خاطر کمک مالی در قالب طرح تحقیقاتی "نصب و کاربست مدل ARPS به مطالعات میان مقیاس" به شماره ۶۵۱/۳/۱۰۸۴ سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- Anthes, R. A., 1972, The development of asymmetries in a three-dimensional numerical model of tropical cyclone. *Mon. Weather. Rev.*, **100**, 461-476.
- Cangialosi, J. P., Chen, S. S., Zhao, W., Wang, W., and Michalakis, J., 2005, Real-Time High-Resolution MM5 and WRF Forecasts during RAINEX. the 6th WRF / 15th MM5 Users' Workshop, National Center for Atmospheric Research, June 27-30, 2005.
- Emanuel, K. A., 1988, The maximum intensity of hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 1143-1155.
- Holland, G. J., and Merrill, R. T., 1984, On the dynamics of tropical cyclone structure changes. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **110**, 723-745.
- Jones, R. W., 1977, A nested grid for a three-dimensional model of tropical cyclone. *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1528-1533.
- Kasahara, A., 1961, A numerical experiment on the development of tropical cyclone. *J. Meteor.*, **18**, 259-282.
- Liu, Y., Zhang, D. L., and Yau, M. K., 1997, A multiscale study of Hurricane Andrew (1992). Part I: Explicit simulation and verification. *Mon. Weather. Rev.*, **125**, 3073-3093.
- Nedjlika, B., and Vesna, J., 1997, Numerical simulation of the Adriatic cyclone development, *Geofizika*, **14**, 22-46.
- Xue, M., Droegemeier, K. K., and Wong, V., 2000, The Advanced Regional Prediction System (ARPS)-A multiscale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part I: Model dynamics and verification. *Meteor. Atmos. Phys.*, **75**, 161-193.
- Xue, M., Droegemeier, K. K., Wong, V., Shapiro, A., Brewster, K., Carr, F., Weber, D., Liu, Y., and Wang, D.-H., 2001, The Advanced Regional Prediction System (ARPS)-A multiscale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part II: Model physics and applications. *Meteor. Atmos. Phys.*, **76**, 134-165.