

کاربست داده‌گواری در مدل WRF برای شبیه‌سازی بارش ناشی از یک سامانه همدیدی در غرب ایران

ابوالفضل نیستانی^۱، سرمد قادر^{۲*} و علیرضا محب‌الحججه^۲

^۱ دانشجوی دکتری هواشناسی، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۵/۰۲/۱۲، تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۹/۱۳)

چکیده

استفاده از مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا برای پیش‌بینی عددی توزیع مکانی و زمانی بارش با تفکیک بالا توجه زیادی را به خود جلب کرده است. کاهش دقت پیش‌بینی‌ها عمدتاً وابسته به میزان خطا در شرایط اولیه و انتخاب نامناسب طرحواره‌های فیزیکی می‌باشد. در این تحقیق تاثیر داده‌گواری در بهبود پیش‌بینی بارش در منطقه غرب ایران مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌های داده‌گواری مختلف با استفاده از روش داده‌گواری وردشی سه‌بعدی (3DVAR) با اجرای مدل پیشرفته تحقیقاتی و پیش‌بینی وضع هوا WRF و کاربست بسته داده‌گواری مدل طراحی شده است. یک مورد رخداد بارش سنگین ناشی از یک سامانه همدیدی قوی در منطقه غرب ایران به منظور بررسی تاثیر داده‌گواری بر پیش‌بینی بارش انتخاب گردید. شبیه‌سازی‌ها شامل اجزای کنترلی با سه مجموعه داده شرایط اولیه از سه منبع مختلف و اجزای داده‌گواری با استفاده از میدان زمينه GFS همراه با مشاهدات سطحی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های همدیدی سازمان هواشناسی ایران و مشاهدات مرکز NCEP می‌باشد. استفاده از داده‌های مشاهداتی برای اصلاح میدان زمينه، تاثیر قابل توجهی در شرایط اولیه دمای تراز ۲ متر و مولفه‌های باد مداری و نصف‌النهاری تراز ۱۰ متر نشان داد. برای مثال، در بعضی از مناطق شبیه‌سازی، دما در میدان زمينه ۳+ درجه سلسیوس دارای فروتخمین نسبت به تحلیل به دست آمده بوده است و میدان باد نیز در بعضی مناطق به میزان ± 3 متر بر ثانیه تصحیح شد. همچنین مقایسه نمودارهای پراکنش میدان زمينه و تحلیل نسبت به مشاهدات مؤید کاهش پراکندگی و کاهش خطا در تحلیل به دست آمده از روش 3DVAR می‌باشد. نتایج نشان داد که دقت پیش‌بینی‌ها بسته به نوع داده به کار رفته در شرایط اولیه مدل و طرحواره‌های فیزیکی انتخابی دارای تفاوت‌های اساسی است. در تحلیل اریبی بارش در ایستگاه‌های منتخب در غرب ایران، داده‌گواری در یکی از پیکربندی‌های فیزیکی با داده‌های سطحی سازمان هواشناسی ایران باعث کاهش ۷۳٪ در میزان اریبی پیش‌بینی بارش تجمعی ۲۴ ساعته گردید و در پیش‌بینی‌های بارش تجمعی ۴۸ ساعته تاثیر داده‌گواری کاهش یافت. تحلیل همبستگی به منظور مقایسه الگوهای بارش پیش‌بینی شده و مشاهدات نشان داد که داده‌گواری تاثیری مثبت ولی محدود دارد. همچنین بیشینه تاثیر داده‌گواری بر الگوی همبستگی پیش‌بینی‌های بارش نسبت به حالت کنترلی حدود ۸٪ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی عددی، داده‌گواری، WRF، 3DVAR، پیش‌بینی کمی بارش

۱ مقدمه

در سال‌های اخیر، تلاش‌های بسیاری به منظور پیش‌بینی دقیق‌تر وضع هوا با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا انجام شده است. از سوی دیگر به واسطه رفتار آشوبناک جو (لورنتس، ۱۹۶۵) این تلاش‌ها برای نمایش دقیق‌تر و جامع‌تر فرآیندهای فیزیکی در داخل مدل‌ها تمرکز دارد. با این وجود در مدل‌های منطقه‌ای پیش‌بینی عددی وضع هوا یکی از محدودیت‌های پیچیده، عدم قطعیت در شرایط مرزهای جانبی و شرایط اولیه فراهم شده توسط مدل‌های جهانی می‌باشد (وارنر و همکاران، ۱۹۹۷). عدم قطعیت‌های مرتبط با آغازگری مدل می‌تواند اعتمادپذیری پیش‌بینی‌های قطعی را کاهش دهد. بنابراین کاربست مدل‌های منطقه‌ای برای شبیه‌سازی دقیق پدیده‌های جوی مانند توفان و بارش مرتبط با آن، نیازمند به کارگیری مدل‌های میان‌مقیاس با تفکیک فضایی بالا، انتخاب ترکیب مناسبی از طرحواره‌های فیزیکی و نمایش درست وضعیت جو در شرایط اولیه مدل با استفاده از مشاهدات فراوان و روش‌های داده‌گوارای پیچیده می‌باشد (کولی و مس، ۲۰۰۰؛ مس و همکاران، ۲۰۰۲).

بارش به‌منزله یکی از مولفه‌های اصلی چرخه آب‌شناختی، تاثیر بسزایی در اقلیم و فرایندهای آب‌شناختی در مقیاس‌های جهانی و منطقه‌ای دارد (چامبن و همکاران، ۲۰۱۳). پیش‌بینی بارش‌های سنگین با تفکیک و دقت بالا، نقش اساسی در پیش‌بینی سیلاب و سامان‌دهی منابع آب بازی می‌کند (سو و همکاران، ۲۰۱۴). از طرفی قرارگیری منطقه ایران بر روی کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان، اهمیت پیش‌بینی دقیق بارش را که معمولاً در این منطقه به‌صورت سیلاب جاری می‌شود، دوچندان می‌کند.

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که مدل پیش‌بینی میان‌مقیاس وضع هوای Weather Research and Forecasting (WRF)، دارای توان مطلوبی در استخراج

ویژگی‌های بارش مانند زمان، مکان و تحول آن می‌باشد (ارگسو و همکاران، ۲۰۱۲؛ کارداسو و همکاران، ۲۰۱۳). با این وجود، نتایج برای کمیت بارش معمولاً به‌دلیل پایین بودن کیفیت شرایط اولیه، از حالت آرمانی به‌دور است (کالوتی و پریرا فیلو، ۲۰۱۴)، اما می‌تواند با استفاده از فرآیند داده‌گوارای (Data assimilation) بهبود یابد (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۳).

به منظور بهبود پیش‌بینی مدل‌های عددی وضع هوا، چندین روش داده‌گوارای مختلف مانند داده‌گوارای وردشی سه‌بعدی و چهاربعدی (3DVAR, 4DVAR) و صافی کالمن همادی (Ensemble Kalman filter) توسعه یافته است (لیو و همکاران، ۲۰۱۳؛ ژیانگ و همکاران، ۲۰۱۳). در دو دهه گذشته روش‌های وردشی در پیش‌بینی‌های عملیاتی وضع هوا به‌دلیل مزیت‌های گوارد فیزیک-محور که قیدهای دینامیکی و ترمودینامیکی مدل را برآورده می‌کنند، و همچنین به واسطه توانایی ترکیب موثر انواع مشاهدات متداول و نامتداول از منابع مختلف و در زمان‌های مختلف، بسیار پرطرفدار بوده‌اند (کورتیر و همکاران، ۱۹۹۸؛ کالنی، ۲۰۰۳). اگرچه روش‌های 4DVAR و EnKF توانایی بیشتری را نشان می‌دهند، اما هنوز به علت هزینه‌های محاسباتی بالا برای پیش‌بینی‌های عملیاتی وضع هوا در همه جا استفاده از آنها امکان‌پذیر نیست. در حالت چرخه‌ای پیوسته (شروع گرم) که پیش‌بینی‌های مدل در چرخه‌های بعدی داده‌گوارای همراه با مشاهدات به عنوان شرایط اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش 3DVAR در تولید تحلیل‌های منطقی از میدان‌های هواشناختی مرتبط با فرایندهای آب‌شناختی با بازدهی محاسباتی بیشتری نسبت به روش‌های 4DVAR و EnKF عمل می‌کند (بارکر و همکاران، ۲۰۰۴؛ ژبو و سان، ۲۰۰۷).

بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که پیش‌بینی بارش با مدل‌های عددی وضع هوا را می‌توان به‌طور موثری با

مشاهدات میان‌مقیاس ناهمگن را در مطالعه موردی یک همرفت شدید بر روی بخشی از ایالات متحده بررسی کردند. آنها داده‌های مشاهداتی نیم‌رخ باد، بارش ساعتی، دمای نقطه شبنم سطحی و داده‌های آب بارش شو GPS زمین-محور را با طراحی آزمایش‌های داده‌گذاری با موفقیت به‌کاربردند. هر کدام از این مجموعه داده‌ها تأثیری مثبت بر پیش‌بینی یکی از متغیرهای خروجی نشان داد. ها و همکاران (۲۰۱۴) از گوارد داده‌های شکست اختفاء رادیویی (GPS RO) در سامانه WRF 3DVAR استفاده و تأثیر آن را بر پیش‌بینی موردی یک رخداد بارش سنگین در شبه جزیره کره بررسی کردند. در پیش‌بینی بارش شدید، دقت کمی پیش‌بینی‌های بارش با گوارد داده‌های GPS RO تطابق خوبی با مشاهدات پیشینه مقادیر بارش دیدبانی شده داشت. یسوبابو و همکاران (۲۰۱۶) با مطالعه موردی یک رخداد بارش سنگین در شهر جدّه در عربستان سعودی، تأثیر داده‌گذاری داده‌های مشاهداتی متداول و ماهواره‌ای را بر رخداد بارش بررسی کردند و نتایج مثبتی را در بهبود پیش‌بینی‌ها به‌دست آوردند.

اگرچه تأثیر داده‌گذاری بر پیش‌بینی‌های بارش در مناطق بسیاری از جهان انجام شده است، اما در منطقه ایران تحقیقات در این زمینه بسیار محدود است. برای نمونه صفر و همکاران (۱۳۹۱)، اثر گوارد داده‌های رادار در مدل عددی APRS را در شبیه‌سازی بارش حاصل از یک سامانه همدیدی در منطقه تهران بررسی کردند. در این تحقیق با استفاده از سامانه داده‌گذاری مدل ARPS به روش کشانش (Nudging)، تأثیر داده‌گذاری بر پیش‌بینی کوتاه‌مدت بارش در منطقه تهران و قم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنها نشان‌دهنده تأثیر داده‌های رادار در طول زمان اجرای مدل و به‌ویژه در زمان‌های پایانی آن بود. ذاکری و همکاران (۱۳۹۴) نیز به بررسی اثر گوارد داده‌های ماهواره و ایستگاه‌های همدیدی بر روی

گوارد داده‌های بازتابش رادار (سوکول و رضاکوا، ۲۰۰۶؛ سوکول، ۲۰۱۱؛ صفر و همکاران، ۱۳۹۱؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۳) یا داده‌های بارش استخراج شده از رادار (مکفرسن، ۲۰۰۱؛ استفان و همکاران، ۲۰۰۸) بهبود داد. با این وجود داده‌های تهیه شده با افزارهای سنجش از دور باید در برابر مقادیر درست زمینی اعتبارسنجی شوند (الایپی و همکاران، ۲۰۰۸). داده‌های مشاهداتی سطحی نیز به نوبه خود اطلاعات ارزشمندی دارند که در شبیه‌سازی پدیده‌های هواشناختی میان‌مقیاس می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند (روگیرو و همکاران، ۲۰۰۰). بنابراین گوارد مشاهدات سطحی در مدل‌های عددی وضع هوا احتمالاً باعث بهبود عملکرد مدل خواهند شد. مطالعات قبلی در این زمینه برای بهبود شبیه‌سازی کمیت‌های وضع هوا با به‌کارگیری مشاهدات مستقیم و مدل‌سازی شده سطحی انجام گرفته است. در این مطالعات از داده‌گذاری مشاهدات دما، نسبت آمیختگی بخار آب، باد (هکر و رستکر ادلستین، ۲۰۰۷) و دمای بالقوه (پتانسیلی) در تراز ۲ متر، دمای نقطه شبنم در تراز ۲ متر و مشاهدات باد در تراز ۱۰ متر (استنسر و همکاران، ۲۰۰۹) در مدل عددی پیش‌بینی وضع هوا استفاده شده است. این تحقیقات بهبود نسبی در نتایج شبیه‌سازی‌های مدل بعد از داده‌گذاری را نشان داده‌اند. همچنین تحقیقات نشان داده‌اند که در سامانه داده‌گذاری مدل WRF، داده‌گذاری ماهواره‌ای به تنهایی به اندازه داده‌گذاری مشاهدات متداول سطحی و ماهواره‌ای برای بهبود پیش‌بینی‌های بارش موثر نخواهد بود (وان و ژو، ۲۰۱۱؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۳).

در خصوص اثر داده‌گذاری بر پیش‌بینی در مطالعات موردی، به‌ویژه در داده‌گذاری به روش وردشی بر اساس الگوریتم‌های پیاده‌سازی شده در مدل‌های عددی میان‌مقیاس مانند MMS و WRF، پژوهش‌های زیادی در سال‌های اخیر انجام گرفته است. به‌طور نمونه گو و همکاران (۲۰۰۰) تأثیر داده‌گذاری وردشی چهاربعدی با

متغیرهای دما در تراز ۲ متر و مولفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد در تراز ۱۰ متر، میدان‌های تحلیل حاصل از داده‌گذاری با میدان زمینه مقایسه شده‌اند. در نهایت شبیه‌سازی‌های انجام شده در حالت کنترلی و همراه با داده‌گذاری از نظر رخداد بارش مقایسه و ارزیابی شده‌اند.

۲ توصیف وضعیت همدیدی حاکم

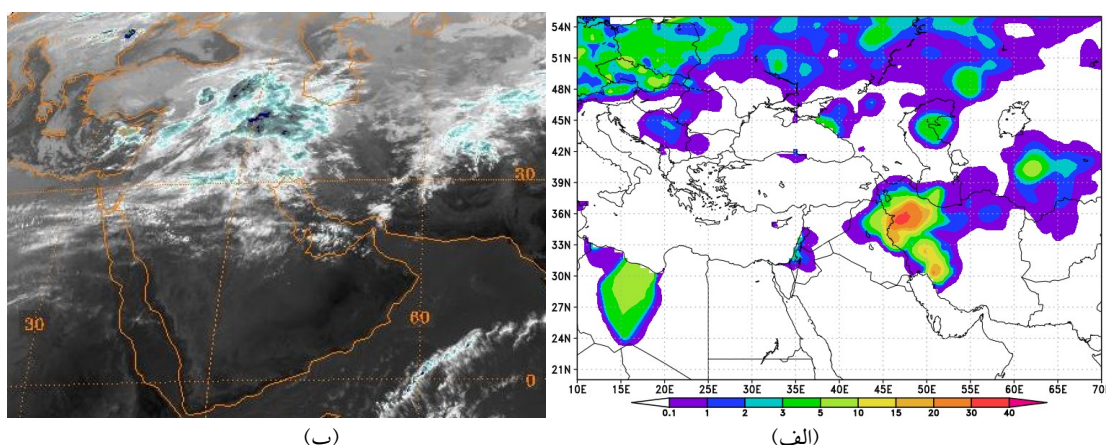
نمونه موردی انتخاب شده برای شبیه‌سازی بارش مربوط به یک ناوه نسبتاً قوی در غرب ایران برای تاریخ ۵ دسامبر ۲۰۱۳ است. الگو و میزان بارش ۲۴ ساعته رخ داده در روز ۵ دسامبر بر اساس داده‌های مبتنی بر باران‌سنج برگرفته از "مرکز پیش‌بینی اقلیم" موسوم به CPC (چن و همکاران، ۲۰۰۸) در شکل ۱-الف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، منطقه بیشینه بارش ۲۴ ساعته در غرب ایران و در استان کردستان واقع شده است. همچنین بر اساس مقادیر ایستگاهی دریافتی از سازمان هواشناسی ایران (IRIMO)، بعضی از ایستگاه‌ها رخداد بارش ۲۴ ساعته تجمعی بیش از ۳۰ میلی‌متر و ۴۸ ساعته تجمعی بیش از ۴۰ میلی‌متر را گزارش کرده‌اند. موقعیت و مقادیر بارش رخ داده در این ایستگاه‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. در اثر ورود سامانه‌های مدیترانه‌ای که از مهم‌ترین جریان‌ات موثر در این منطقه در فصل خنک و

پیش‌بینی‌های مدل WRF پرداختند و فقط اندکی بهبود در پیش‌بینی‌های دما در تراز ۲ متر و سرعت باد در تراز ۱۰ متر مشاهده کردند.

در مطالعه حاضر، تاثیر شرایط اولیه و اصلاح آن با استفاده از داده‌گذاری بر پیش‌بینی کوتاه‌مدت بارش در ناحیه‌ای با کوهساری (توپوگرافی) پیچیده با انتخاب یک نمونه موردی بارش سنگین در منطقه غرب ایران در ماه دسامبر ۲۰۱۳ مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور مدل عددی WRF همراه با هسته دینامیکی تحقیقاتی پیشرفته مدل (ARW) (میشالاک و همکاران، ۲۰۰۱)؛ اسکاماروک و همکاران، ۲۰۰۵) و سامانه داده‌گذاری مدل به نام WRFDA استفاده شده است. داده‌های مشاهداتی مورد استفاده نیز شامل داده‌های سطحی ایستگاه‌های همدیدی سازمان هواشناسی ایران (IRIMO) و مشاهدات سطحی و ترازهای بالای (National Center for NCEP Environmental Prediction) می‌باشد. مشاهدات سطحی و تراز بالای NCEP با قالب prepbuf از سال ۱۹۹۷ به‌طور پیوسته جمع‌آوری و آماده می‌شوند (<http://dss.ucar.edu/datasets/ds337.0/>). آزمایش‌های مختلف کنترلی و آزمایش‌های همراه با داده‌گذاری به روش 3DVAR اجرا شده‌اند. در آزمایش‌های داده‌گذاری با دو منبع مشاهداتی، برای

جدول ۱. ایستگاه‌های همدیدی با بارش چشمگیر در روزهای ۵ و ۶ دسامبر ۲۰۱۳.

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	بارش تجمعی ۲۴ ساعته (۵ دسامبر) بر حسب میلی‌متر	بارش تجمعی ۴۸ ساعته (۵ و ۶ دسامبر) بر حسب میلی‌متر
مریوان	۴۹/۸	۳۴/۱	۸۱	۹۵
کوه‌رنگ	۵۰	۳۲/۴	۵۱	۸۰
بانه	۴۵/۹	۳۶	۵۸/۶	۶۱
سرپل ذهاب	۴۵/۹	۳۴/۵	۴۸/۵	۵۳/۸
سنندج	۴۷	۳۵/۳	۳۵/۴	۵۴/۴
ایلام	۴۶/۴۳	۳۳/۶۳	۲۸	۴۶
بیجار	۴۷/۶۲	۳۵/۸۸	۳۱/۷	۴۹
تویسرکان	۴۸/۳۴	۳۴/۵۵	۳۲/۷	۴۱/۷

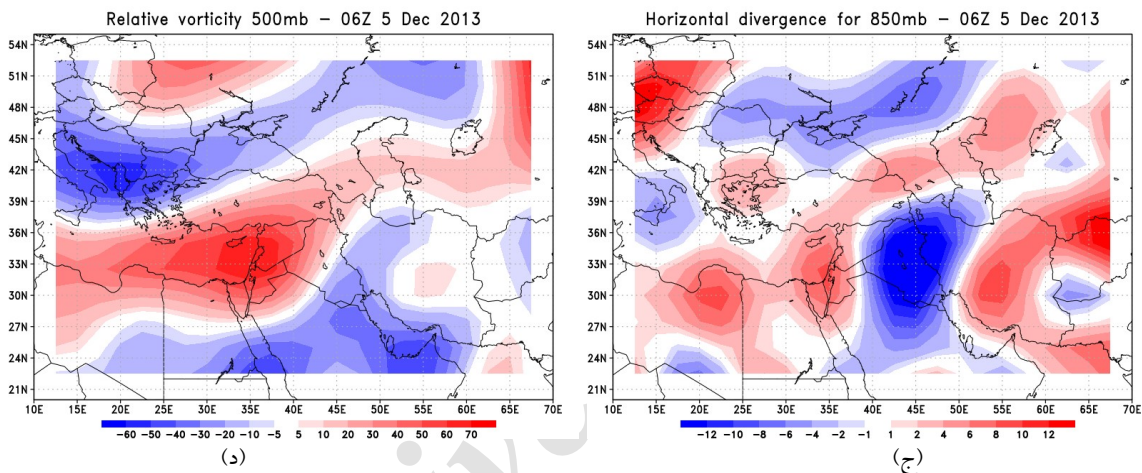
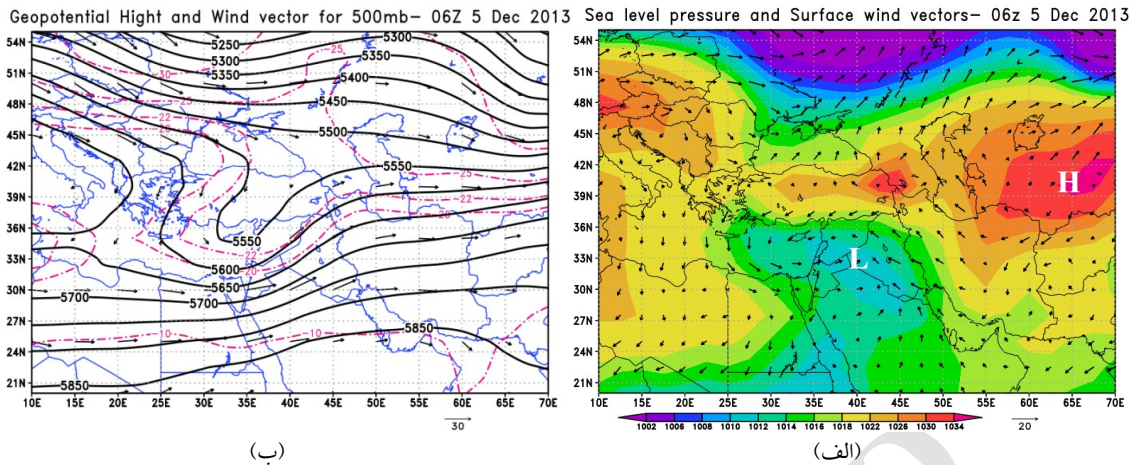


شکل ۱. (الف) توزیع مکانی بارش تجمعی ۲۴ ساعته برای روز ۵ دسامبر ۲۰۱۳ بر حسب میلی‌متر بر اساس داده‌های مشاهداتی مبتنی بر ایستگاه‌های باران‌سنجی تهیه شده در مرکز پیش‌بینی اقلیم، (ب) تصویر ماهواره‌ای پوشش ابر در تاریخ ۵ دسامبر ۲۰۱۳ در ساعت UTC05:30 بر اساس اطلاعات ماهواره Meteosat-7.

واچرخندی ایجاد شده توسط سامانه‌های پرفشار واقع در منطقه، منجر به تقویت جریانات چرخندی در سلول کم فشار در منطقه غرب ایران شده است. در نقشه ارتفاع ژئوپتانسیلی (شکل ۲-ب) ناوه عمیقی در منطقه شرق مدیترانه با محور جنوب‌غربی-شمال‌شرقی همبسته با کم‌فشار سطح زمین قرار دارد. قرار داشتن مرکز کم‌فشار سطح زمین در جلوی ناوه مذکور نشان از آن دارد که هنوز این سامانه همدمیدی در مرحله تکوین قرار دارد. همخوان با مرحله تکوین، ناوه دمایی در اینجا کمی عقب‌تر از ناوه ارتفاعی قرار گرفته است.

از نقشه واگرایی میانگین در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در شکل ۲-ج می‌توان وجود همگرایی شدید (واگرایی منفی) در سطوح زیرین را در مرزهای غربی ایران استنباط کرد. بنابراین شرایط برای ایجاد حرکات صعودی در جو و نیز تقویت سامانه همدمیدی در این منطقه مساعد است. در شکل ۲-د، در وردسپهر میانی مقادیر بیشینه تاوایی نسبی مثبت در شرق مدیترانه و منطبق بر محور ناوه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال است. این وضعیت با طول موج کوتاه ناوه شرق مدیترانه همخوانی دارد و عاملی برای تقویت چرخندزایی در این منطقه است.

سرد سال می‌باشد، پوشش گسترده ابر و بارش در ایران رخ می‌دهد. در تاریخ مورد بررسی نیز با نفوذ سامانه‌ای مدیترانه‌ای به مناطق غرب و شمال غرب ایران، پوشش گسترده ابر در این مناطق شکل گرفته است (شکل ۱-ب). همچنین برای بررسی همدمیدی نمونه موردی انتخاب شده، الگوهای سطح زمین و ترازهای بالا در روز ۵ دسامبر ۲۰۱۳ در ساعت 0600 UTC بر اساس داده‌های بازتحلیل NCEP/NCAR با تفکیک ۲/۵ درجه در شکل ۲-الف براساس میدان‌های فشار تراز میانگین دریا و باد سطحی و در شکل ۲-ب براساس میدان‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی، دما و باد در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نشان داده شده است. برطبق شکل ۲-الف، الگوی یک سامانه کم‌فشار (با پربند ۱۰۱۰-۱۰۱۲ هکتوپاسکال) در سواحل شرق مدیترانه واقع شده و جریانات چرخندی همراه با آن به‌خوبی مشاهده می‌شود. چند سامانه پرفشار نیز در منطقه حضور دارند که مهم‌ترین آنها پرفشار سبیری از سمت شرق و شمال شرق ایران با جریانات واچرخندی منطقه را تحت تاثیر خود قرار داده است. سامانه پرفشار کوچکی در انتهای شمال غرب کشور واقع شده و سامانه پرفشار دیگری در مناطق مرکزی اروپا قرار گرفته است. جریانات



شکل ۲. (الف) پریندهای فشار تراز دریا (با مقیاس رنگی) و باد سطحی (بردارها)، (ب) پریندهای ارتفاع ژئوپتانسیلی (خط پُر مشکی)، دما (خط چین قرمز) و بردارهای باد در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، (ج) واگرایی افقی (با مقیاس رنگی) در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، (د) تاوایی نسبی (با مقیاس رنگی) در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، برای روز ۵ دسامبر ۲۰۱۳ ساعت ۰۰۰۶ UTC.

پیش‌بینی میان‌مدت وضع هوا (ECMWF) موسوم به ERA-Interim نیز با تفکیک ۰/۷۵ درجه در چند آزمایش کنترلی مقایسه‌ای برای شرایط مرزی و اولیه به کار گرفته شده‌اند. مجموعه داده‌های مشاهداتی برای داده‌گذاری، داده‌های دریافتی ملی و بین‌المللی را شامل می‌شوند. در ابتدا تاثیر مجموعه داده‌های سطح زمین اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های همدیدی سازمان هواشناسی ایران (IRIMO) در هر یک از آزمایش‌های داده‌گذاری مورد بررسی قرار گرفته است. این داده‌ها شامل مجموعه

۳ داده‌ها و روش‌شناسی ۱-۳ داده‌ها

برای تامین شرایط اولیه و مرزی در آزمایش‌های کنترلی و داده‌گذاری از مجموعه داده‌های (Global GFS Forecast System) با تفکیک ۰/۵ درجه در اجرای مدل WRF استفاده شده است. این داده‌ها با مدل جهانی GFS تولید می‌شوند و پیش‌بینی‌ها هر سه ساعت یک بار (در ساعات استاندارد) تا ۱۶ روز آینده در دسترس هستند. همچنین داده‌های تحلیل نهایی مرکز NCEP (FNL) با تفکیک ۱ درجه و داده‌های بازتحلیل مرکز اروپایی

اجرای مدل پیش‌بینی عددی) اعمال می‌شود، داده‌گذاری وردشی سه‌بعدی (3DVAR) نامیده می‌شود. این روش معادل با روش آماری برآورد درست‌نمایی بیشینه (Maximum likelihood estimation) با فرض خطاهای گوسی است. اولین کاربرد روش‌های وردشی در یافتن میدان تحلیل برای پیش‌بینی عددی وضع هوا مربوط به ساساکی (۱۹۵۸) است. در روش‌های وردشی، معادلات حاکم بر شارش به‌منزله قید در نظر گرفته شده و مسئله با استفاده از اصول وردشی مانند کمینه‌سازی مغایرت بین مدل و مشاهدات بسته می‌شود (بلوم و همکاران، ۲۰۰۹). در روش وردشی یک تابع هزینه متناسب با فاصله بین تحلیل و حدس اولیه و همچنین مشاهدات تعریف و برای به‌دست آوردن تحلیل کمینه می‌شود (ساساکی، ۱۹۷۰).

بیشتر مراکز پیش‌بینی عملیاتی وضع هوا در حال حاضر روش وردشی در سه یا چهار بعد (3DVAR و 4DVAR) را به‌کار می‌برند (اینز و درلینگ، ۲۰۱۳). داده‌گذاری وردشی هیچگونه محدودیتی را بر روی مشخصات داده‌های گوارد شده تحمیل نمی‌کند و در اصل، اجازه ترکیب همه انواع داده شامل: رطوبت، سرعت و جهت باد و دما را که در ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری شده و یا میدان تابشی که ماهواره اندازه‌گیری می‌کند، می‌دهد (زو و همکاران، ۱۹۹۳).

تابع هزینه برای داده‌گذاری وردشی سه‌بعدی (3DVAR) به صورت ذیل تعریف می‌شود (لینچ، ۲۰۱۱):

$$J = (\mathbf{x} - \mathbf{x}^b)^T \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}^b) + (\mathbf{y}^o - \mathbf{H}\mathbf{x})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y}^o - \mathbf{H}\mathbf{x}) = J_B + J_o, \quad (1)$$

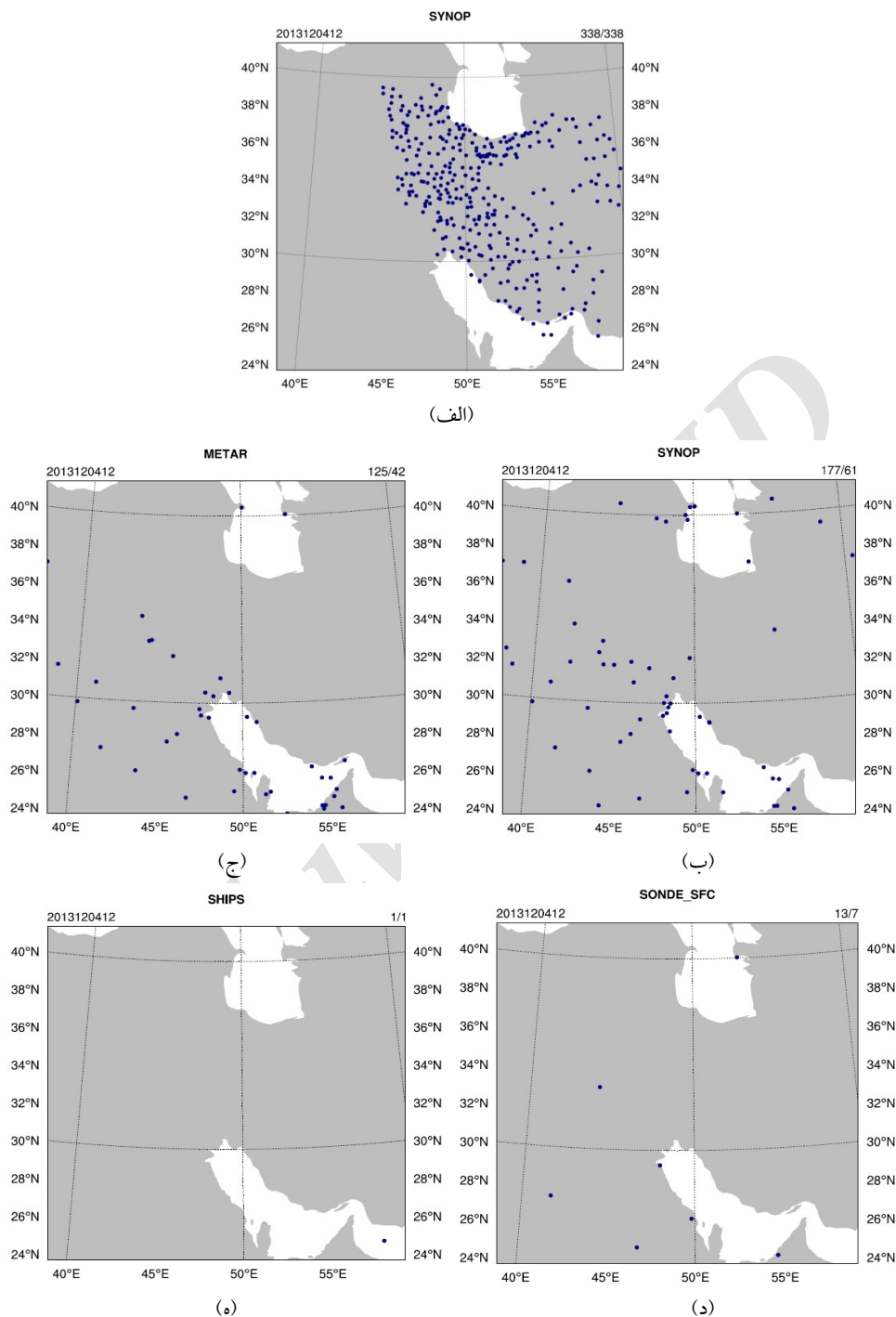
در این رابطه حالت جو در یک زمان خاص در جملاتی از بردار حالت \mathbf{x} از متغیرها در همه نقاط شبکه مدل تعریف می‌شود. در اینجا باید بهترین تخمین \mathbf{x} (یعنی \mathbf{x}^a) بر اساس داده‌های موجود استنباط شود. \mathbf{x}^b (یک

داده‌های فشار سطحی، سرعت و جهت باد سطحی، دما و نقطه شبنم است. داده‌های ۳۳۸ ایستگاه سطح زمین برای ساعت 1200 UTC در روز ۴ دسامبر ۲۰۱۳ آماده شده و همه آنها پس از کنترل کیفی در فرایند داده‌گذاری مدل WRF وارد شده‌اند (شکل ۳-الف).

مجموعه داده‌های مشاهداتی بین‌المللی شامل داده‌های متداول و ماهواره‌ای جهانی سطح زمین و سطوح بالا است که به‌طور عملیاتی مرکز NCEP جمع‌آوری می‌کند. این داده‌ها شامل داده‌های سطحی در خشکی و دریا، رادیوگمانه، گزارش بالون‌های اکتشافی و هواپیماها از سامانه ارتباط از راه دور جهانی (Global GTS (Teleconnection System)، نیم‌رخ‌نگارها (Profilers)، بادهای اقیانوسی (Special Sensor Microwave SSM/I (Imager)، داده‌های باد ماهواره‌ای و چند مجموعه داده دیگر است که در قالب prepbufr آماده شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند. گزارش‌ها شامل فشار، ارتفاع ژئوپتانسیلی، دما، نقطه شبنم، جهت و سرعت باد بوده و فاصله زمانی گزارش‌ها از ۱ ساعت تا ۱۲ ساعت متغیر است. توزیع مکانی داده‌های بین‌المللی اندازه‌گیری شده در سطح که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته، در شکل‌های ۳-ب تا ۳-ه نشان داده شده است. علاوه بر این مشاهدات، نیم‌رخ‌های قائم دیگری نیز در این مجموعه داده‌ها استفاده شده است. لازم به توضیح است که استفاده از داده‌های مشاهداتی در بسته داده‌گذاری مدل WRF فقط در دو قالب Little_r و Buf_r (prepbufr) امکان‌پذیر است، بنابراین لازم است داده‌های مشاهداتی پیش از کاربست به یکی از دو قالب اخیر تبدیل شوند.

۲-۳ روش‌شناسی

روش استفاده شده برای داده‌گذاری و یافتن میدان تحلیل در این تحقیق، بر اساس کمینه‌سازی تابع هزینه (Cost function) است که چون در یک زمان خاص (زمان آغاز



شکل ۳. موقعیت مکانی و تعداد انواع مختلف داده‌های مورد استفاده در داده‌گذاری برای (الف) مجموعه داده‌های مشاهداتی سطحی سازمان هواشناسی ایران (IRIMO)، (ب) مشاهدات SYNOP، (ج) مشاهدات METAR، (د) مشاهدات رادیوگمانه، (ه) مشاهدات بویه، دریافتی از مرکز NCEP برای ساعت 1200 UTC روز ۴ دسامبر ۲۰۱۳.

می‌آید. این روش الگوریتمی برای حل عددی دستگاه معادلات خطی خاص با ماتریس متقارن و مثبت می‌باشد و پیاده‌سازی آن با روش‌های تکرار امکان‌پذیر است. در داده‌گواری وردشی، افزودن یک "جمله جریمه" (Penalty) برای مقیدسازی تحلیل و توازن میدان‌ها کافی خواهد بود.

۴ طراحی آزمایش‌های عددی

در این تحقیق به بررسی تاثیر داده‌گواری بر پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت بارش مدل WRF با استفاده از روش وردشی سه‌بعدی پرداخته می‌شود. مدل WRF یک مدل تراکم‌پذیر و ناآب‌ایستایی (nonhydrostatic) (با قابلیت آب‌ایستایی) است. مختصه قائم آن مختصه سیگما (Sigma coordinate) است که از عوارض زمینی پیروی می‌کند. بسته داده‌گواری مدل که با نام WRF-DA شناخته می‌شود، کار محاسبه تحلیل از میدان‌های زمینه و مشاهدات را با کمینه‌سازی تابع هزینه به روش وردشی انجام می‌دهد.

حوزه انتخابی برای شبیه‌سازی (شکل ۴-الف) متشکل از سه حوزه می‌باشد که داخلی‌ترین حوزه در غرب کشور متمرکز شده است. تفکیک افقی حوزه اصلی ۴۵ km و تفکیک حوزه‌های داخلی به ترتیب ۱۵ km و ۵ km است. همچنین مدل WRF و سامانه داده‌گواری WRF-DA نسخه 3.7 برای شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است.

کوهساری (توپوگرافی) منطقه درحوزه اصلی و داخلی‌ترین حوزه شبیه‌سازی به ترتیب در شکل‌های ۴-ب و ۴-ج نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، منطقه از کوهساری پیچیده‌ای برخوردار است که شامل بخش‌هایی از رشته کوه البرز و زاگرس می‌شود. ارتفاع بیشتر مناطق مورد بررسی بیش از ۱۴۰۰ متر از سطح دریای آزاد بوده و مناطق مرتفع با ارتفاع بیش از ۲۲۰۰ متر در بخش‌های مختلف حوزه مشاهده می‌شود.

آرایه سه‌بعدی) میدان زمینه یا حدس اولیه است و معمولاً همان پیش‌بینی کوتامدت است که به زمان تحلیل منتسب می‌شود. همچنین y^0 بردار مشاهدات است و باید توجه شود که y^0 در مشخصه با x^b تفاوت دارد، زیرا مشاهدات توزیع نامنظم دارند و متغیرهای مشاهده شده ممکن است متغیرهای معمول هواشناختی مانند دما و فشار نباشند. برای نمونه ماهواره‌ها شدت تابش را اندازه می‌گیرند که باید به‌طور غیرمستقیم به متغیرهای مدل تبدیل شود. در اینجا H عملگر مشاهدات (Observational operator) است که کار درون‌یابی فضایی به نقاط مشاهدات و همچنین تغییر متغیرهای مدل به متغیرهای مشاهده شده را بر پایه روابط فیزیکی انجام می‌دهد. در حالت کلی H غیرخطی است ولی برای سادگی در اینجا فرض می‌شود که خطی باشد. همچنین در اینجا B ماتریس هم‌وردایی خطای مرتبط با خطاهای زمینه و R ، ماتریس هم‌وردایی خطای مرتبط با خطاهای مشاهدات است.

همان‌طور که رابطه (۱) نشان می‌دهد تابع هزینه مجموعی از دو مولفه است: جمله J_B نشان‌دهنده فاصله بین تحلیل x و میدان زمینه x^b است که به وسیله هم‌وردایی خطای B وزن‌دهی شده و جمله J_0 نشان‌دهنده فاصله بین تحلیل و مقادیر مشاهده شده y^0 است که با هم‌وردایی خطای مشاهدات R وزن‌دهی شده است. در اینجا نیز عملگر H خطی در نظر گرفته شده است. کمینه J در $x^a = x$ رخ می‌دهد، یعنی در جایی که $\nabla_x J = 0$ است. به عبارت دیگر، برای کمینه شدن لازم است شیو (گرادیان) J نسبت به مقادیر تحلیل شده صفر باشد. با محاسبه شیو رابطه (۱)، خواهیم داشت:

$$\nabla_x J = 2B^{-1}(x - x^b) + 2R^{-1}(Y - Hx). \quad (2)$$

کمینه تابع هزینه با به‌کارگیری یک الگوریتم مانند روش شیو مزدوج (Conjugate gradient) به‌دست

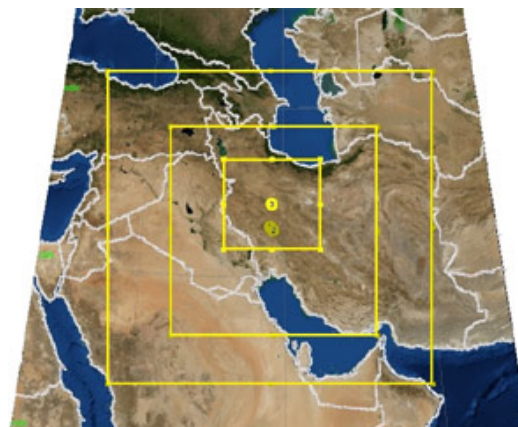
بر اساس تحقیقات قبلی پیش‌بینی عددی وضع هوا در این منطقه (به طور نمونه: شو و همکاران، ۲۰۰۹؛ قادر و همکاران، ۱۳۹۴)، از دو پیکربندی منتخب برای طرح‌های فیزیکی استفاده شده است. در جدول ۲ مشخصات هر کدام از این پیکربندی‌ها آورده شده است.

جدول ۲. طرح‌های فیزیکی انتخابی در دو پیکربندی مختلف.

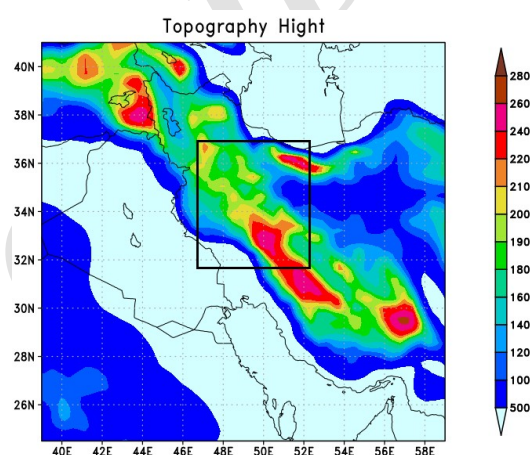
نوع طرح‌های فیزیکی	پیکربندی (P1)	پیکربندی (P2)
لایه مرزی	YSU	YSU
خردفیزیک	WSM5	Lin
همرفت کومه‌ای	Grell-Devenyi	Kain-Fritsch
تابش طول موج کوتاه	Dudhia	Goddard
تابش طول موج بلند	RRTM	RRTM
لایه سطحی	Revised MM5	Revised MM5
سطح	Noah	Noah

شبیه‌سازی با مدل WRF از ساعت ۱۲ روز ۴ دسامبر ۲۰۱۳ آغاز می‌شود. ۱۲ ساعت اول برای زمان تنظیم (spin-up) در نظر گرفته شده است. در ابتدا، شبیه‌سازی‌هایی با استفاده از دو پیکربندی فیزیکی منتخب و میدان زمینه استخراج شده از داده‌های GFS، FNL و ECMWF برای شرایط اولیه اجرا شده است (آزمایش‌های کنترلی). سپس داده‌های مشاهداتی در دسترس به منظور اصلاح شرایط اولیه در میدان زمینه مرتبط با داده‌های GFS و رسیدن به میدان تحلیل جدید با استفاده از روش وردشی سه‌بعدی مورد استفاده قرار گرفته و مدل با استفاده از داده‌های میدان تحلیل اجرا می‌شود (آزمایش‌های داده‌گوار).)

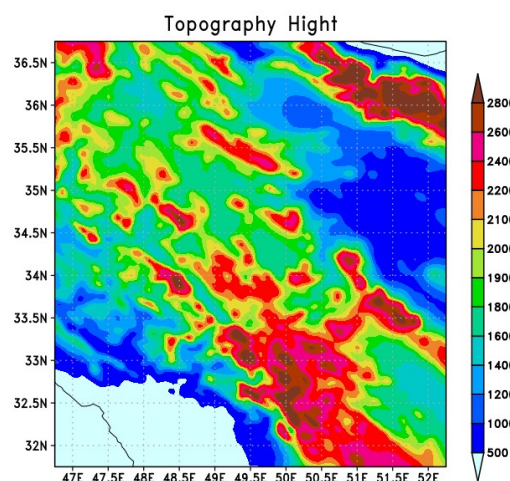
جدول ۳ حالت‌های مختلف شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، دو حالت پیکربندی فیزیکی انتخاب شده است (P1 و P2) که با هر کدام از آنها سه آزمایش کنترلی (Control، FNL و ECMWF) و دو آزمایش داده‌گوار (DA-irimo و DA-bufr) انجام شده است. آزمایش کنترلی اصلی (Control) با



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴. (الف) حوزه‌های انتخابی برای پیش‌بینی عددی وضع هوا، (ب) ارتفاع کوهساری حوزه اصلی، (ج) ارتفاع کوهساری داخلی‌ترین حوزه.

کنترلی در فضای فیزیکی هستند و این روش صافی بازگشتی قائم را برای مدل‌سازی هم‌وردایی قائم به‌کار می‌برد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۴). خطای مشاهدات نیز برای ارتفاع، باد، دما، فشار و رطوبت نسبی بر اساس اطلاعات خطای مشاهدات نیروی هوایی آمریکا مورد استفاده قرار گرفته است که در واقع جدول خطای پیش‌فرض می‌باشد.

۵ تحلیل نتایج

در این بخش ابتدا میدان‌های زمینه و تحلیل برای متغیرهای سطحی دما در تراز ۲ متر و مولفه‌های باد در تراز ۱۰ متر در آزمایش کنترلی با داده‌های شرایط اولیه GFS بررسی شده و تأثیر آزمایش‌های داده‌گواری بر این میدان‌ها نشان داده می‌شود. سپس تابع هزینه و شیو آن در هر یک از آزمایش‌های داده‌گواری با روش 3DVAR شرح داده خواهد شد. در ادامه، مقادیر زمینه و تحلیل به‌دست آمده با داده‌گواری برای چند متغیر جوئی در مقایسه با مشاهدات اعتبارسنجی شده است. پس از اصلاح شرایط اولیه، انتگرال‌گیری مدل در حالت کنترلی و همراه با داده‌گواری انجام شده و مقدار بارش شبیه‌سازی شده در منطقه مورد بررسی نشان داده شده است. در نهایت ارزیابی فضایی برای مقادیر بارش شبیه‌سازی شده، انجام شده است.

۵-۱ اختلاف میدان زمینه و تحلیل

پس از اصلاح داده‌های شرایط اولیه GFS با استفاده از داده‌های مشاهداتی مختلف، با استفاده از روش 3DVAR و شروع سرد، مقادیر تحلیل به‌دست آمد. به‌منظور مقایسه مقادیر تحلیل جدید با میدان زمینه GFS در شرایط اولیه، اختلاف بین این دو میدان در آزمایش‌های داده‌گواری مختلف برای متغیرهای دمای تراز ۲ متر و مولفه‌های باد تراز ۱۰ متر محاسبه شد. شکل ۵ اختلاف بین تحلیل و

استفاده از داده‌های شرایط اولیه GFS و دو آزمایش کنترلی دیگر با استفاده از داده‌های شرایط اولیه FNL و ECMWF اجرا شده‌اند. همچنین در آزمایش داده‌گواری DA-irimo، مشاهدات سطحی IRIMO و در آزمایش داده‌گواری DA-bufr، مشاهدات بین‌المللی مرکز NCEP همراه با میدان زمینه GFS استفاده شده است. در تصحیح میدان‌های شرایط اولیه از روش زمینه شروع سرد (Cold start background) استفاده شده است. در این روش میدان زمینه فقط در یک زمان از طریق مشاهدات اصلاح می‌شود.

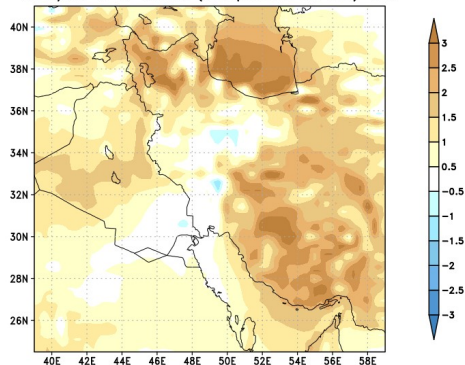
جدول ۳. آزمایش‌های مختلف برای شبیه‌سازی بارش.

آزمایش‌های کنترلی	آزمایش‌های با داده‌گواری
Control-P1	DA-irimo-P1
FNL-P1	DA-bufr-P1
ECMWF-P1	
Control-P2	DA-irimo-P2
FNL-P2	DA-bufr-P2
ECMWF-P2	

ماتریس هم‌وردایی خطای زمینه BE (Background Error covariance) از بین حالت‌های موجود در بسته داده‌گواری به صورت CV3 (ماتریس هم‌وردایی خطای - زمینه NCEP) انتخاب شده است که یک BE جهانی می‌باشد و به هر حوزه‌ای می‌تواند اعمال شود. این ماتریس در فضای شبکه‌ای با آنچه که به نام روش (National Meteorological Center) (NMC) معروف است، تخمین زده می‌شود (پاریش و دربر، ۱۹۹۲). آماره‌ها با اختلاف پیش-بینی‌های GFS ۲۴ و ۴۸ ساعته با تفکیک T170 تخمین زده می‌شود، که در زمان یکسان برای ۳۵۷ مورد که روی دوره یک‌سال توزیع شده، معتبر است. با انتخاب ماتریس هم‌وردایی خطای زمینه CV3، خطاهای زمینه به مجموعه یکسانی از متغیرهای کنترلی، توابع جریان، پتانسیل سرعت نامتوازن، دمای نامتوازن، فشار سطح نامتوازن و رطوبت شبه‌نسبی اعمال می‌شود. همچنین با CV3 متغیرهای

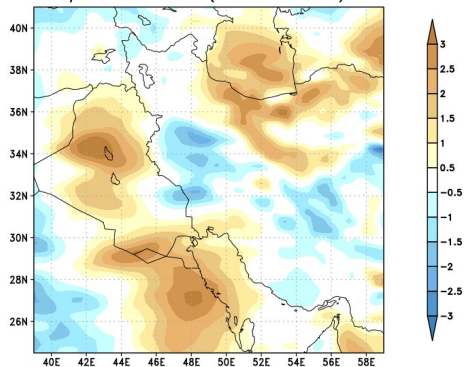
هستند. مولفه باد نصف‌النهاری نیز اختلافی در محدوده ۳- تا بیش از ۳+ متر بر ثانیه نسبت به حالت زمینه نشان می‌دهد (شکل ۶-ج).

Analysis-First Guess (Temperature at 2m) GFS



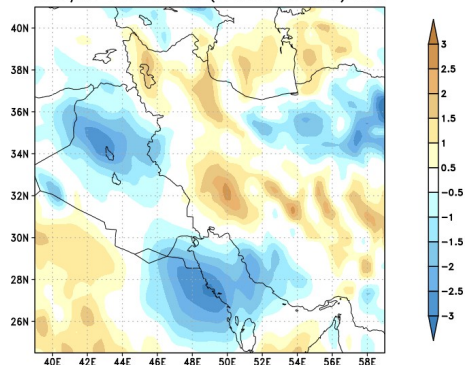
(الف)

Analysis-First Guess (V wind at 10m) GFS



(ب)

Analysis-First Guess (U wind at 10m) GFS



(ج)

شکل ۵. اختلاف بین تحلیل و میدان زمینه برای متغیرهای (الف) دمای تراز ۲ متر، (ب) مولفه مداری باد تراز ۱۰ متر، (ج) مولفه نصف‌النهاری باد تراز ۱۰ متر، پس از اجرای داده‌گواری سرد با استفاده از داده‌های مشاهدات سطحی سازمان هواشناسی ایران.

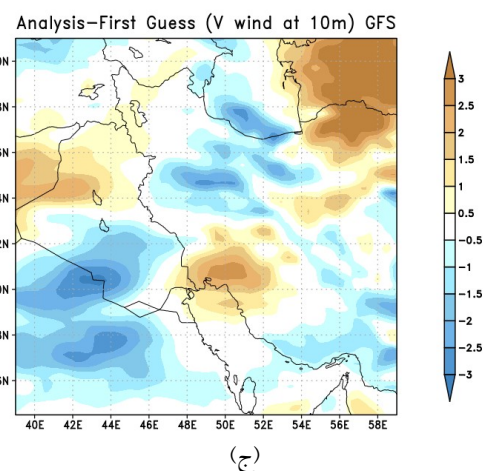
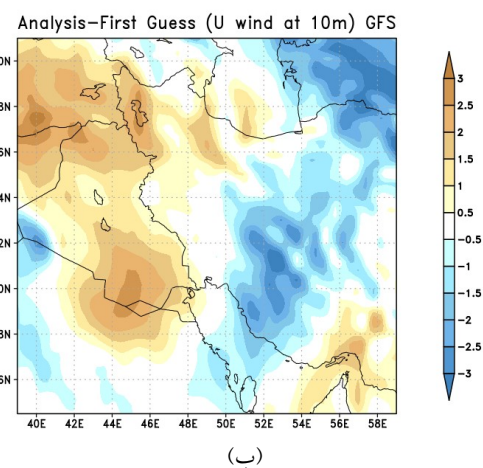
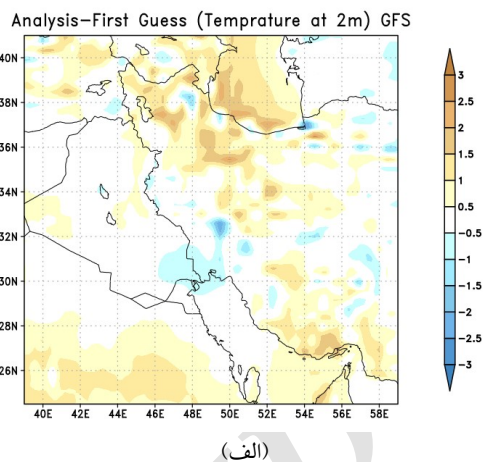
مقادیر زمینه برای این متغیرها را با استفاده از داده‌گواری داده‌های سطحی سازمان هواشناسی ایران نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوی اختلاف دمای بین تحلیل و مقادیر زمینه (شکل ۵-الف) نشان می‌دهد که تحلیل به‌دست آمده در بیشتر منطقه شبیه‌سازی دارای فروتخمین دما نسبت به زمینه می‌باشد، به طوری که این فروتخمین در بعضی از مناطق بیش از ۲/۵ درجه سلسیوس است. اما در بخش عمده‌ای از غرب ایران، فروتخمین و فروتخمین چندان بزرگ نیست. مناطق دارای فروتخمین بزرگ در شمال‌غرب و مناطق مرکزی و جنوبی ایران و بر روی دریای خزر واقع شده‌اند. اختلاف بین باد مداری تراز ۱۰ متر در شکل ۵-ب تا ۳- تا ۳+ متر بر ثانیه متغیر است. دامنه اختلاف بین باد نصف‌النهاری (شکل ۵-ج) نیز از ۲/۵- تا ۳+ متر بر ثانیه می‌باشد. لازم به ذکر است که استفاده از دو واژه فروتخمین و فروتخمین در این مقاله صرفاً برای راحتی مقایسه دو میدان تحلیل و زمینه بدون پیش‌داوری در مورد برتری یکی بر دیگری است.

اختلاف بین تحلیل و مقادیر زمینه برای متغیرهای مورد بررسی با استفاده از داده‌گواری مشاهدات بین‌المللی مرکز NCEP در شکل ۶ نشان داده شده است. الگوی اختلاف دمای بین تحلیل و مقادیر زمینه (شکل ۶-الف) نشان می‌دهد که تحلیل به‌دست آمده در بیشتر منطقه شبیه‌سازی دارای اختلاف کم‌تری نسبت به میدان زمینه در مقایسه با تحلیل به‌دست آمده از داده‌های مشاهدات سطحی سازمان هواشناسی ایران می‌باشد؛ اما به‌طور مشابه با تحلیل به‌دست آمده از داده‌های سطحی سازمان هواشناسی ایران، بیشتر به صورت فروتخمین میدان تحلیل نسبت به زمینه ظاهر شده است. همچنین مناطق فروتخمین و فروتخمین تحلیل تا حدودی بر یکدیگر منطبق می‌باشند. اختلاف بین باد مداری تراز ۱۰ متر در شکل ۶-ب نیز در محدوده ۳- تا ۳+ متر بر ثانیه متغیر است. در نیمه غربی حوزه، اختلاف‌ها شرق‌وزان و در نیمه شرقی غرب‌وزان

۲-۵ تابع هزینه و شیوآن

در اینجا عملکرد روش کمینه‌سازی تابع هزینه برای روش 3DVAR در آزمایش‌های مختلف داده‌گواهی مورد بررسی قرار گرفته است. برای قضاوت در مورد موفقیت آزمایش‌های 3DVAR، اولین گام در نظر گرفتن همگرایی در فرآیند کمینه‌سازی است؛ یعنی تابع هزینه و شیو آن باید در مدت کمینه‌سازی تا حد ممکن کاهش یابد. اگر همگرایی مطلوب باشد، دومین گام، آزمایش موثر بودن داده‌گواهی اطلاعات مشاهداتی و تنظیم‌های منطقی روش داده‌گواهی است. گام نهایی نیز درستی سنجی میدان‌های هواشناختی داده‌گواهی شده در برابر مشاهدات مستقل می‌باشد. قابل ذکر است که مسئله کمینه‌سازی در صورت خوش‌وضع (Well posed) نبودن مساله، همگرا نخواهد شد.

تابع هزینه و شیو آن برای آزمایش‌های داده‌گواهی مورد استفاده در این تحقیق به‌طور مطلوبی با تکرار کاهش یافته است (شکل ۷). تعداد بیشینه تکرار برای آزمایش‌های داده‌گواهی با داده‌های IRIMO برابر با ۲۰ و با استفاده از داده‌های مشاهده شده بین‌المللی NCEP برابر با ۲۴ است. اگر چه زمان شروع هر دو آزمایش یکسان است، اما به‌دلیل استفاده از دو مجموعه داده مشاهداتی مختلف، مقادیر اولیه تابع هزینه و شیو آن نیز برای این آزمایش‌های داده‌گواهی متفاوت است. این تفاوت به دلیل نوع و تعداد مختلف داده‌های به کار رفته در فرآیند داده‌گواهی است. مطابق با آنچه در شکل ۷-الف مشاهده می‌شود، بخش عمده کاهش تابع هزینه برای هر دو آزمایش تا تکرار ۱۰ است. همچنین مقدار تابع هزینه در آزمایش داده‌گواهی با داده‌های IRIMO، نسبت به مقدار اولیه به میزان ۲۴/۷٪ و در آزمایش با داده‌های NCEP به میزان ۲۵/۵٪ کاهش یافته است. شکل ۷-ب تغییرات شیو تابع هزینه با تکرار را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود شیو تابع هزینه در آزمایش با داده‌های NCEP به



شکل ۶. اختلاف بین تحلیل و میدان زمینه برای متغیرهای (الف) دمای تراز ۲ متر، (ب) مولفه مداری باد تراز ۱۰ متر، (ج) مولفه نصف‌النهاری باد تراز ۱۰ متر، پس از اجرای داده‌گواهی سرد با استفاده از داده‌های مشاهدات بین‌المللی مرکز NCEP.

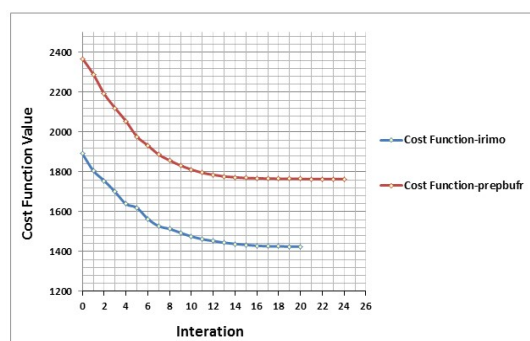
بررسی اینکه چگونه این مشاهدات میدان‌های مربوط به خود را در مدل اصلاح می‌کنند، بسیار اهمیت دارد. نمودارهای پراکنش در شکل ۸ مشاهدات استفاده شده از مجموعه داده‌های سطحی سازمان هواشناسی ایران را در مقابل داده‌های زمینه GFS و تحلیل به‌دست آمده از فرآیند داده‌گذاری برای متغیرهای دینامیکی و ترمودینامیکی مانند باد مداری و باد نصف‌النهاری، دما و نسبت آمیختگی بخار آب در شرایط اولیه اجرای مدل نشان می‌دهند. همان‌طور که دیده می‌شود، پراکنش کمتر داده‌ها بعد از داده‌گذاری نشان‌دهنده کاهش خطا بعد از محاسبه تحلیل با روش 3DVAR می‌باشد. میزان بهبود برای متغیرهای مختلف پس از داده‌گذاری تا اندازه‌ای وابسته به تعداد مشاهدات استفاده شده است.

جدول ۴ مقادیر میانگین، جذر میانگین مربعات خطا و انحراف معیار (نشان‌دهنده میزان پراکنش داده‌ها) را در میدان‌های زمینه و تحلیل نسبت به مشاهدات برای متغیرهای مورد بررسی نشان می‌دهد. میزان کاهش خطای آماری در مولفه باد مداری بعد از داده‌گذاری داده‌های سطحی سازمان هواشناسی ایران، بیش از ۱۲٪ می‌باشد (جذر میانگین مربعات خطا از ۲/۵۴ متر بر ثانیه به ۲/۲۴ متر بر ثانیه رسیده است). میزان بهبود برای باد نصف‌النهاری حدود ۱۰٪، برای دما حدود ۱۹٪ و برای نسبت آمیختگی حدود ۴۱٪ می‌باشد

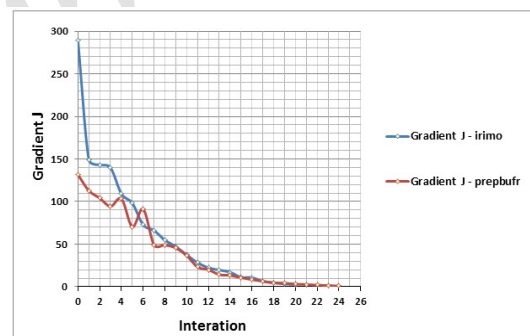
۵-۳-۲ مشاهدات بین‌المللی مرکز NCEP

به منظور بررسی تاثیر مشاهدات سطحی و جو بالای بین‌المللی مرکز NCEP در اصلاح شرایط اولیه، نمودارهای پراکنش مربوط به تأثیر این مشاهدات بر تحلیل در مقایسه با حالت زمینه به‌دست آمد (در اینجا نشان داده نشده است). در این مجموعه داده‌ها از مشاهدات مختلفی استفاده شده است. جدول‌های ۵، ۶ و ۷ میانگین، جذر میانگین مربعات خطا و انحراف معیار را

مقدار ۹۹/۳٪ و در آزمایش با داده‌های IRIMO به مقدار ۹۹٪ نسبت به مقدار اولیه کاهش یافته است. به‌طور نظری، شیو تابع هزینه باید در هنگام کمینه‌سازی به صفر نزدیک شود. شیو تابع هزینه نیز در هر دو آزمایش نوسان‌هایی را به‌ویژه در نخستین تکرارها نشان می‌دهد که مقدار نوسان‌ها در آزمایش داده‌گذاری با مشاهدات NCEP بیشتر است.



(الف)



(ب)

شکل ۷. مقایسه (الف) تابع هزینه J ، (ب) شیو تابع هزینه، نسبت به تعداد تکرار در فرآیند داده‌گذاری با استفاده از مشاهدات سطحی سازمان هواشناسی ایران (خط آبی) و مشاهدات بین‌المللی NCEP (خط قرمز).

۵-۳-۳ درستی‌سنجی مقادیر زمینه و تحلیل با مقادیر مشاهداتی

۵-۳-۱ مشاهدات سطحی سازمان هواشناسی ایران (IRIMO)

همان‌طور که در بخش داده‌ها بیان شد، از مشاهدات منابع ناهمگن برای داده‌گذاری مدل استفاده می‌شود. بنابراین

جدول ۴. مقادیر میانگین، جذر خطای میانگین مربعات و انحراف معیار برای متغیرهای مورد بررسی در میدان‌های زمينه و تحليل با استفاده از داده‌های سطحی سازمان هواشناسی ایران.

متغیر مورد بررسی		میانگین		جذر خطای میانگین مربعات		انحراف معیار	
حدس اولیه	تحليل	حدس اولیه	تحليل	حدس اولیه	تحليل	حدس اولیه	تحليل
۰/۲۹	-۰/۰۲	۲/۵۴	۲/۲۴	۲/۵۲	۲/۲۴	حدس اولیه	تحليل
۰/۲۷	۰/۰۱	۲/۵۶	۲/۳	۲/۵۵	۲/۳	حدس اولیه	تحليل
۱/۶۶	۰/۲۱	۳/۲۴	۲/۳۲	۲/۷۸	۲/۳۱	حدس اولیه	تحليل
۰/۸۹	۰/۲۴	۱/۷۶	۱/۰۴	۱/۵۲	۱	حدس اولیه	تحليل

جدول ۵. مقادیر میانگین، جذر خطای میانگین مربعات و انحراف معیار برای متغیرهای مورد بررسی در میدان‌های زمينه و تحليل با استفاده از داده‌های SYNOP مرکز NCEP.

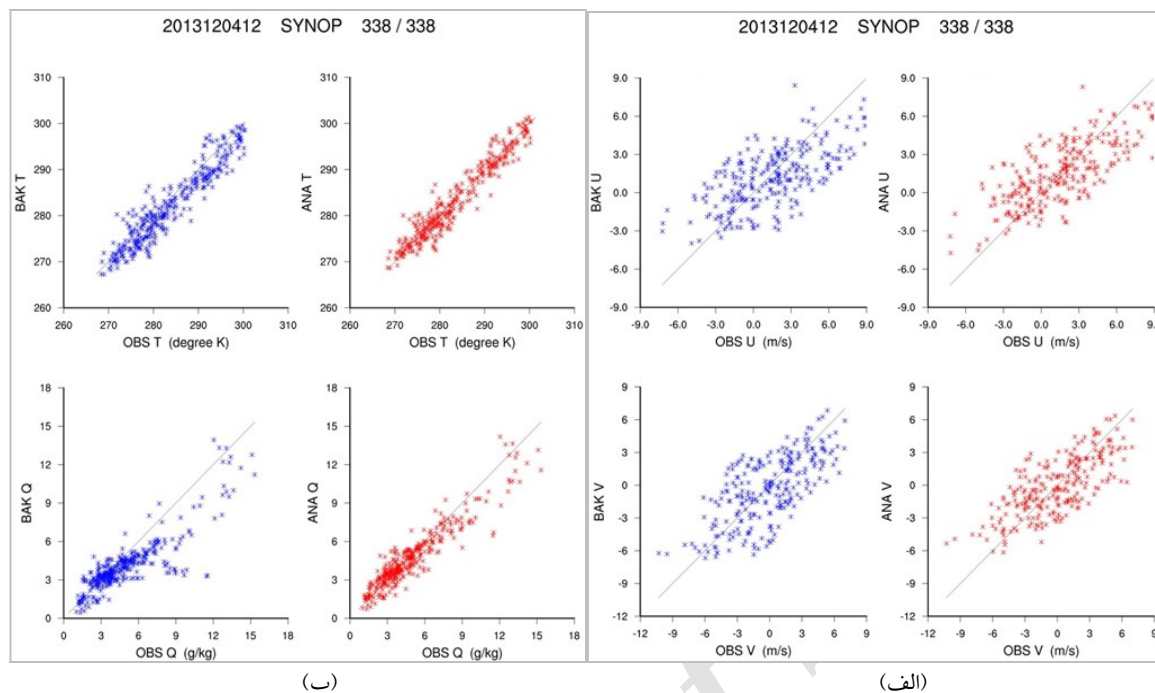
متغیر مورد بررسی		میانگین		جذر خطای میانگین مربعات		انحراف معیار	
حدس اولیه	تحليل	حدس اولیه	تحليل	حدس اولیه	تحليل	حدس اولیه	تحليل
۰/۱۸	-۰/۰۵	۲/۰۵	۱/۲۲	۲/۰۴	۱/۲۲	حدس اولیه	تحليل
۰/۲۴	۰/۱۷	۲/۱۶	۱/۴۳	۲/۱۵	۱/۴۲	حدس اولیه	تحليل
-۰/۳۴	-۰/۳۳	۲/۱۹	۱/۷۷	۲/۱۶	۱/۷۴	حدس اولیه	تحليل
۱/۹۸	۱/۲۴	۳/۲۸	۲/۴۲	۲/۶۲	۲/۰۸	حدس اولیه	تحليل

جدول ۶. مقادیر میانگین، ریشه خطای میانگین مربعات و انحراف معیار برای متغیرهای مورد بررسی در میدان‌های زمينه و تحليل با استفاده از داده‌های METAR مرکز NCEP.

متغیر مورد بررسی		میانگین		جذر خطای میانگین مربعات		انحراف معیار	
حدس اولیه	تحليل	حدس اولیه	تحليل	حدس اولیه	تحليل	حدس اولیه	تحليل
۰/۲۱	-۰/۰۸	۱/۹۳	۱/۳۵	۱/۹۲	۱/۳۵	حدس اولیه	تحليل
-۰/۱۴	-۰/۰۱	۱/۹۸	۱/۵۸	۱/۹۷	۱/۵۸	حدس اولیه	تحليل
۰/۴۴	۰/۳۸	۲/۰۳	۱/۹۱	۱/۹۸	۱/۸۷	حدس اولیه	تحليل
۱/۶	۰/۸۴	۲/۸۹	۲/۱۱	۲/۴۱	۱/۹۳	حدس اولیه	تحليل

جدول ۷. مقادیر میانگین، جذر خطای میانگین مربعات و انحراف معیار برای متغیرهای مورد بررسی در میدان‌های زمينه و تحليل با استفاده از داده‌های رادیوگمانه مرکز NCEP.

متغیر مورد بررسی		میانگین		جذر خطای میانگین مربعات		انحراف معیار	
حدس اولیه	تحليل	حدس اولیه	تحليل	حدس اولیه	تحليل	حدس اولیه	تحليل
۰/۲۶	۰/۱۸	۱/۰۸	۰/۷۵	۱/۰۴	۰/۷۳	حدس اولیه	تحليل
۰/۴۱	۰/۶۳	۱/۵۲	۱/۱۴	۱/۴۷	۰/۹۵	حدس اولیه	تحليل
۰/۴۸	۰/۳۷	۱/۴۳	۰/۸۶	۱/۳۴	۰/۷۸	حدس اولیه	تحليل
-۰/۳۱	-۰/۶۵	۱/۳۴	۱/۵۹	۱/۳۱	۱/۴۵	حدس اولیه	تحليل



شکل ۸. نمودارهای پراکنش مشاهدات نسبت به میدان‌های زمینه (آبی) و تحلیل (قرمز) در مجموعه مشاهدات سطحی مربوط به سازمان هواشناسی ایران برای (الف) متغیرهای باد مداری و نصف‌النهاری، (ب) متغیرهای دما و نسبت آمیختگی در زمان 1200 UTC روز ۴ دسامبر ۲۰۱۳.

بارش برای حوزه اصلی (۴۵ کیلومتر) و داخلی‌ترین حوزه (۵ کیلومتر) نمایش داده شده است. نتایج برای هر کدام از پیکربندی‌های فیزیکی به‌طور جداگانه برای حالت کنترلی، داده‌گواری با داده‌های سطحی سازمان هواشناسی ایران و داده‌گواری با داده‌های مشاهداتی بین‌المللی مرکز NCEP مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل ۹ اختلاف شبیه‌سازی کنترلی بارش تجمعی ۲۴ ساعته را برای پیکربندی P1 نسبت به آزمایش‌های داده‌گواری با داده‌های IRIMO (شکل ۹-الف) و داده‌های NCEP (شکل ۹-ب) نشان می‌دهد. مناطق فراتخمین و فروتخمین نسبت به حالت کنترلی در این شکل نشان داده شده است و دامنه تقریبی تغییرات، ± 15 میلی‌متر است. مقایسه اثر کاربست داده‌های مشاهداتی از دو منبع مختلف به منظور داده‌گواری بر تخمین‌های بارش نشان می‌دهد که هر دو مجموعه داده مشاهداتی، الگوی

برای هر مجموعه داده مشاهداتی مورد استفاده نشان می‌دهند. به استثنای تحلیل مربوط به نسبت آمیختگی داده‌های رادیوگمانه (جدول ۷) که میزان جذر میانگین مربعات خطا حدود ۱۹٪ نسبت به حدس اولیه افزایش یافته، در باقی موارد، تحلیل به‌دست آمده از داده‌گواری از میدان زمینه بهتر است.

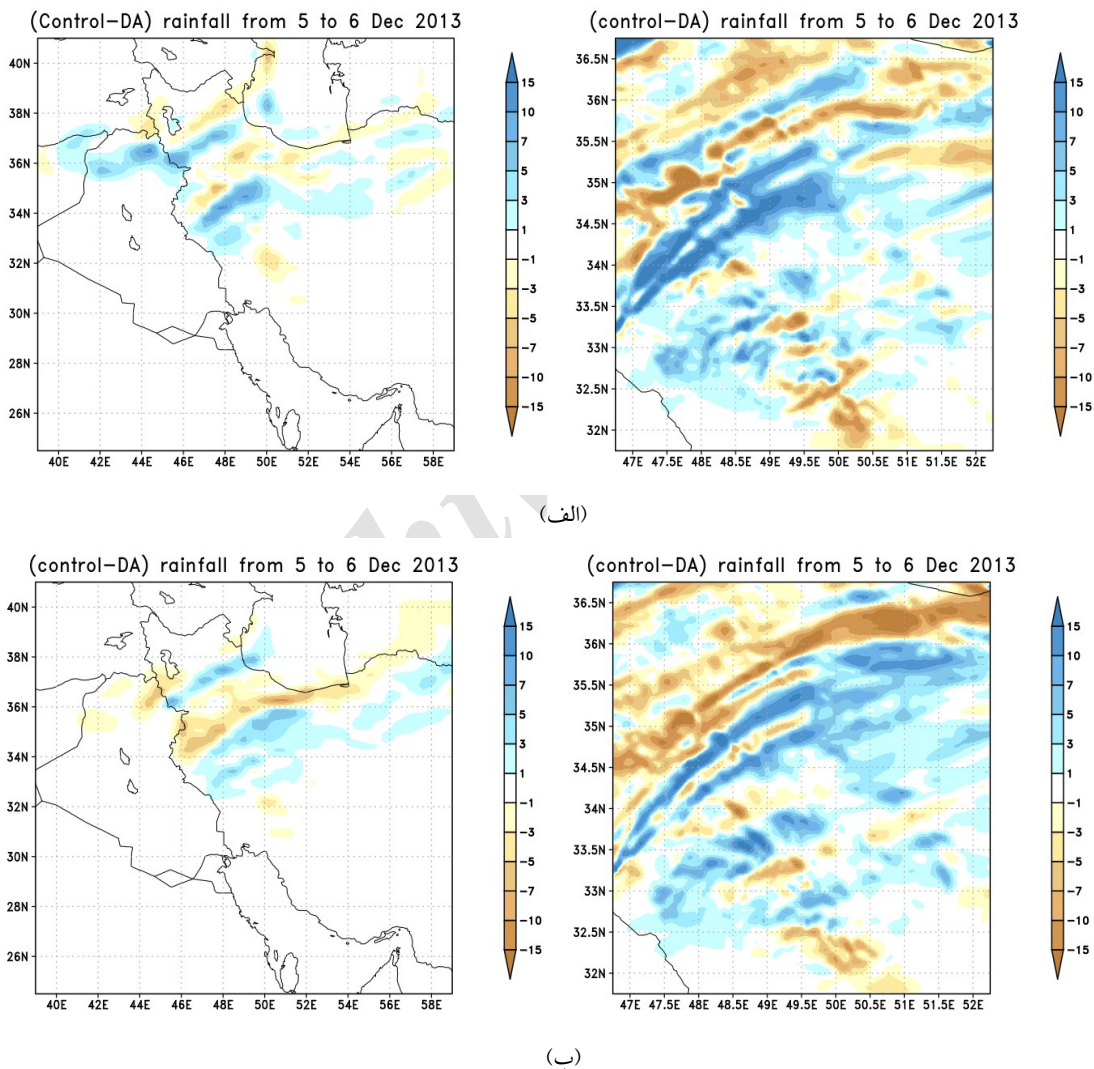
۴-۵ مقایسه بارش در آزمایش‌های داده‌گواری و آزمایش‌های کنترلی

این بخش اختصاص به بررسی اختلاف الگوی مکانی توزیع بارش در آزمایش‌های کنترلی و آزمایش‌های داده‌گواری با استفاده از داده‌های شرایط اولیه GFS در آزمایش‌های DA-irimo-P1,P2، Control-P1,P2 و DA-bufr-P1,P2 در پیش‌بینی بارش ۲۴ ساعته دارد. به منظور بررسی تاثیر تفکیک افقی مدل، اختلاف توزیع

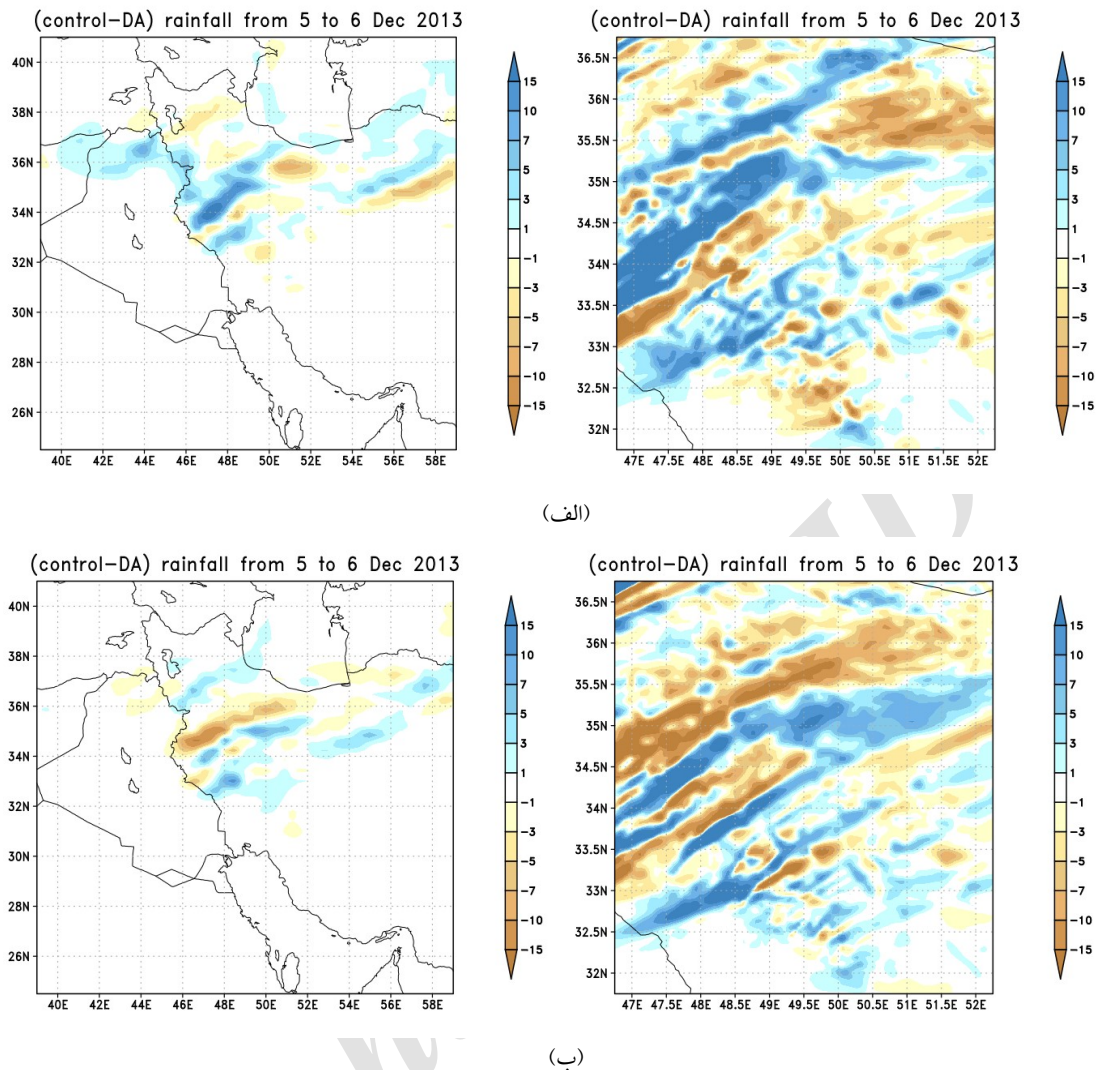
داده‌گذاری با داده‌های IRIMO (شکل ۱۰-الف) و داده‌های NCEP (شکل ۱۰-ب) نشان می‌دهد. مناطق فراتخمین و فروتخمین نسبت به حالت کنترلی در این شکل نشان داده شده است و میزان آنها نسبت به حالت کنترلی در بعضی مناطق بیش از ۱۵ میلی‌متر می‌باشد. الگوی اختلاف در این پیکربندی برای دو مجموعه داده مشاهداتی مورد استفاده متفاوت بوده، اما بیشینه تغییرات در مناطق با بارش بیشینه رخ داده است.

اختلاف بارش تقریباً مشابهی نسبت به حالت کنترلی ایجاد می‌کنند؛ بدین معنی که مناطق فراتخمین و فروتخمین تا حدودی بر همدیگر منطبق هستند، گرچه تفاوت‌ها نیز کاملاً مشهود است (شکل‌های ۹-الف و ۹-ب). همچنین بیشترین تفاوت‌ها نسبت به حالت کنترلی در مناطقی دیده می‌شود که بیشترین بارش برای آنها پیش‌بینی شده است.

شکل ۱۰ اختلاف شبیه‌سازی کنترلی بارش تجمعی ۲۴ ساعته را برای پیکربندی P2 نسبت به آزمایش‌های



شکل ۹. اختلاف بارش تجمعی ۲۴ ساعته بین حالت کنترلی و آزمایش داده‌گذاری در پیکربندی فیزیکی P1 (الف) داده‌های IRIMO، (ب) داده‌های NCEP. همان‌طور که مشاهده می‌شود تفاوت بین بارش در حالت کنترلی و داده‌گذاری با هر دو مجموعه داده مشاهداتی در منطقه غرب ایران شباهت بسیاری به یکدیگر دارند.



شکل ۱۰. اختلاف بارش تجمعی ۲۴ ساعته بین حالت کنترلی و آزمایش داده‌گذاری در پیکربندی فیزیکی P2 (الف) داده‌های IRIMO، (ب) داده‌های NCEP همان‌طور که مشاهده می‌شود تفاوت بین بارش در حالت کنترلی و داده‌گذاری با هر دو مجموعه داده‌های مشاهده‌ای در منطقه غرب ایران بارز است.

شبه‌سازی، فراتخمین پیش‌بینی بارش وجود دارد. مقایسه اریبی کل در بارش تجمعی ۲۴ ساعته نشان می‌دهد که در پیکربندی فیزیکی P1، استفاده از داده‌گذاری در آزمایش‌های DA-irimo-P1 و DA-bufr-P1 نسبت به حالت کنترلی (Control-P1)، میزان اریبی را کاهش داده است. میزان کاهش با استفاده از داده‌های سطحی سازمان هواشناسی ایران حدود ۷۳٪ و با استفاده از داده‌های بین‌المللی NCEP، حدود ۱۸٪ است. استفاده از مجموعه داده‌های شرایط اولیه ECMWF، پیش‌بینی‌های با اریبی

۵-۵ ارزیابی فضایی پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت بارش

۵-۵-۱ ارزیابی اریبی

به منظور ارزیابی کمی بارش رخ داده در کل منطقه شبه‌سازی، اختلاف مقادیر بارش پیش‌بینی شده و مشاهده شده در حوزه غرب ایران و در ایستگاه‌های مورد بررسی برای همه آزمایش‌های شبه‌سازی در جدول ۸ نشان داده شده است. میزان اریبی تقریباً در همه آزمایش‌های شبه‌سازی ۲۴ ساعته مثبت است، یعنی در کل حوزه

منفی بوده که بیانگر فروتخمین بودن مقادیر بارش است. مقدار اریبی در پیکربندی فیزیکی P1 برای پیش‌بینی بارش تجمعی ۴۸ ساعته در آزمایش‌های داده‌گذاری DA-irimo-P1، ۱۴٪ و در آزمایش DA-bufr-P1، ۹٪ افزایش یافته است. در پیکربندی فیزیکی P2، میزان اریبی در آزمایش DA-irimo-P2 به میزان ۵۶٪ افزایش و در آزمایش DA-bufr-P2، ۸٪ کاهش یافته است. هرچند پیش‌بینی‌های اجرا شده با داده‌های ECMWF بیشترین مقدار اریبی را در پیش‌بینی بارش تجمعی ۲۴ ساعته دارند، اما اریبی کمتری در پیش‌بینی بارش ۴۸ ساعته تجمعی نسبت به آزمایش کنترلی و دیگر آزمایش‌ها (اثر جبرانی ناشی از پیش‌بینی ۲۴ ساعت اول) دربردارند. به‌طور کلی بهترین پیش‌بینی بارش ۲۴ ساعته از لحاظ اریبی، آزمایش DA-irimo-P1 و FNL-P1 و پس از آن آزمایش داده‌گذاری DA-irimo-P1 می‌باشد.

۵-۲-۵ تحلیل همبستگی

میزان همبستگی بین الگوهای بارش در هر یک از آزمایش‌های شبیه‌سازی در جدول ۹ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر دو پیکربندی فیزیکی به استثنای آزمایش DA-irimo-P2، استفاده از داده‌گذاری مقدار همبستگی الگوهای پیش‌بینی و مشاهدات را در پیش‌بینی بارش تجمعی ۲۴ ساعته افزایش داده است (آزمایش‌های DA-irimo و DA-bufr برای پیکربندی‌های فیزیکی P1 و P2). همچنین استفاده از داده‌های شرایط اولیه ECMWF برای شرایط اولیه، بیانگر همبستگی بسیار بهتر الگوی کلی بارش پیش‌بینی شده با مشاهدات نسبت به همه آزمایش‌های دیگر می‌باشد. آزمایش با داده‌های شرایط اولیه FNL نیز همبستگی بسیار بالاتری نسبت به آزمایش‌های آغازگری با داده‌های GFS نشان می‌دهد. به علاوه، از میان آزمایش‌های داده‌گذاری، آزمایش DA-bufr-P1 در پیش‌بینی ۲۴ ساعته، دارای

بیشتر نسبت به آزمایش Control-P1 ایجاد کرده است که میزان اریبی در این آزمایش نسبت به آزمایش Control-P1 بیش از چهار برابر می‌باشد. کمترین میزان اریبی در پیش‌بینی بارش تجمعی ۲۴ ساعته در این پیکربندی مربوط به داده‌های FNL می‌باشد که میزان اریبی نسبت به آزمایش کنترلی ۹۰٪ کاهش یافته است. میزان اریبی در پیکربندی فیزیکی P2 در همه آزمایش‌های پیش‌بینی ۲۴ ساعته بارش نسبت به پیکربندی فیزیکی P1 افزایش یافته است. به عبارتی، پیش‌بینی‌ها در این پیکربندی از لحاظ اریبی نسبت به پیکربندی P1 بدتر شده است. تأثیر داده‌گذاری تنها در آزمایش‌های DA-irimo-P2 و FNL-P2 مثبت بوده و میزان اریبی به ترتیب ۲۸٪ و ۸٪ کاهش یافته است، اما در آزمایش DA-bufr-P2، اریبی ۸٪ افزایش یافته است. همچنین آزمایش ECMWF-P2 افزایش ۸۶٪ را در میزان اریبی نسبت به آزمایش کنترلی نشان می‌دهد.

جدول ۸. اریبی کل بارش تجمعی ۲۴ و ۴۸ ساعته در هر یک از آزمایش‌های داده‌گذاری در حوزه غرب ایران.

آزمایش‌های داده‌گذاری	اریبی کلی بارش ۲۴ ساعته	اریبی کلی بارش ۴۸ ساعته
Control-P1	۱/۱	-۶/۳
DA-irimo-P1	۰/۳	-۷/۲
DA-bufr-P1	۰/۹	-۶/۹
ECMWF-P1	۴/۵	-۳/۳
FNL-P1	-۰/۱	-۷/۱
Control-P2	۳/۵	-۲/۵
DA-irimo-P2	۲/۵	-۳/۹
DA-bufr-P2	۳/۸	-۲/۳
ECMWF-P2	۶/۵	-۰/۸
FNL-P2	۳/۲	-۳/۷

میزان اریبی در همه پیش‌بینی‌های بارش تجمعی ۴۸ ساعته منفی است. به عبارت دیگر تقریباً در همه آزمایش‌های پیش‌بینی بارش تجمعی ۴۸ ساعته، اریبی

جدول ۹. همبستگی فضایی کل بین بارش رخ داده و بارش پیش‌بینی شده در هر یک از آزمایش‌های شبیه‌سازی.

پیش‌بینی‌ها		P پیکربندی ۱		پیکربندی P2	
مشاهدات بارش ۲۴		مشاهدات بارش ۴۸		مشاهدات بارش ۴۸	
ساعته	ساعته	ساعته	ساعته	ساعته	ساعته
۰/۲۶۸	۰/۴۲۵	۰/۲۴۷	۰/۴۲۵	۰/۴۴۶	۰/۴۴۶
۰/۳۰۸	۰/۴۲۰	۰/۲۳۴	۰/۴۲۰	۰/۴۲۹	۰/۴۲۹
۰/۳۱۳	۰/۴۷۲	۰/۲۸۳	۰/۴۷۲	۰/۴۹۵	۰/۴۹۵
۰/۶۹۳	۰/۷۶۷	۰/۵۸۴	۰/۷۶۷	۰/۶۹۲	۰/۶۹۲
۰/۵۰۳	۰/۵۶۹	۰/۴۴۸	۰/۵۶۹	۰/۵۹۶	۰/۵۹۶
Control					
DA-irimo					
DA-bufr					
ECMWF					
FNL					

در پیکربندی P2، تنها با استفاده از داده‌های FNL افزایش ضریب همبستگی مشاهده می‌شود. همچنین این افزایش همبستگی نشان‌دهنده کاهش تأثیر داده‌گواری در پیش‌بینی بارش تجمعی ۴۸ ساعته است. در پیش‌بینی ۴۸ ساعته، بالاترین تأثیر داده‌گواری بر الگو به میزان ۸/۴٪ مربوط به آزمایش DA-bufr-P2 می‌باشد. برای دیگر آزمایش‌ها با داده‌های آغازگری ECMWF و FNL، میزان همبستگی نسبت به حالت کنترلی (آغازگری با داده‌های GFS) بسیار پایین‌تر بوده و در نتیجه الگوهای بارش متفاوت‌تری نسبت به همدیگر داشته‌اند.

جدول ۱۰. همبستگی فضایی کل بین بارش شبیه‌سازی شده در حالت کنترلی (GFS) و آزمایش‌های دیگر.

پیش‌بینی		Control
پیش‌بینی	پیش‌بینی	
بارش ۲۴	بارش ۴۸	
ساعته	ساعته	
۰/۹۵۱	۰/۹۶۷	پیکربندی P1
۰/۹۵۴	۰/۹۵۶	DA-irimo
۰/۵۶۴	۰/۵۶۹	DA-bufr
۰/۶۲۱	۰/۶۸۸	ECMWF
۰/۹۳۱	۰/۹۲۷	FNL
۰/۹۱۹	۰/۹۱۶	پیکربندی P2
۰/۶۴۵	۰/۶۱۲	DA-irimo
۰/۴۵۰	۰/۴۹۷	DA-bufr
		ECMWF
		FNL

بیشترین همبستگی با بارش رخ داده بوده و برای پیش‌بینی ۴۸ ساعته، آزمایش DA-bufr-P2 دارای بیشترین همبستگی است. افزایش ضریب همبستگی در پیش‌بینی‌های بارش تجمعی ۴۸ ساعته نسبت به ۲۴ ساعته به دلیل گسترش بازه زمانی با واقعیت سازگار می‌باشد. همچنین در هر دو پیکربندی P1 و P2، تأثیر داده‌گواری در پیش‌بینی ۴۸ ساعته نسبت به حالت کنترلی با استفاده از داده‌های سطحی سازمان هواشناسی ایران اندکی منفی بوده، اما تأثیر مثبت با استفاده از داده‌های بین‌المللی مرکز NCEP، مشابه حالت ۲۴ ساعته باقی مانده است.

همبستگی فضایی بین آزمایش‌های کنترلی (با داده‌های شرایط اولیه GFS) و هر یک از آزمایش‌های داده‌گواری و همچنین آزمایش آغازگری با داده‌های شرایط اولیه ECMWF و FNL در هر یک از پیکربندی‌های فیزیکی برای پیش‌بینی تجمعی ۲۴ و ۴۸ ساعته بارش در جدول ۱۰ ارائه شده است. به‌طور کلی در هر دو پیکربندی P1 و P2، برای بارش تجمعی ۲۴ ساعته، تأثیر داده‌گواری بر تغییر الگوی بارش نسبت به حالت کنترلی حدود ۸٪ بوده است. بیشترین تأثیر در آزمایش DA-bufr-P2 به میزان ۸/۸٪ و کمترین آن در آزمایش DA-bufr-P1 به میزان ۴/۶٪ است. برای پیش‌بینی بارش تجمعی ۴۸ ساعته، میزان ضریب همبستگی در پیکربندی P1 نسبت به پیش‌بینی ۲۴ ساعته اندکی افزایش یافته، اما

۶ نتیجه‌گیری

در این مطالعه تاثیر داده‌گواری با مشاهدات موجود به همراه انتخاب شرایط مرزی و اولیه از سه مجموعه داده مختلف در دو پیکربندی فیزیکی برای پیش‌بینی بارش تجمعی ۲۴ و ۴۸ ساعته ناشی از یک سامانه همدیدی در غرب ایران مورد ارزیابی قرار گرفت. روش داده‌گواری انتخاب شده بر مبنای روش وردشی سه‌بعدی با شروع سرد و استفاده از ماتریس هم‌وردایی خطای زمینه NCEP که با روش موسوم به NMC تخمین زده می‌شود، بود. برای آزمون حساسیت مدل به انتخاب داده‌های شرایط اولیه و همچنین داده‌گواری، چندین آزمایش (شامل آزمایش‌های کنترلی و داده‌گواری) طراحی و در آزمایش‌های داده-گواری از داده‌های مشاهداتی دو منبع مختلف، استفاده شد. داده‌گواری مشاهدات در میدان زمینه به میزان زیادی خطا در شرایط اولیه مدل را کاهش داد. نتایج، تأثیر مثبت داده‌گواری را با استفاده از مدل WRF هم از لحاظ مقدار بارش و هم از لحاظ الگوی بارش نشان داد، اما این تأثیر در کل کمتر از آنی بود که پیشتر انتظار می‌رفت. همچنین با افزایش بازه پیش‌بینی بارش، تأثیر داده‌گواری در پیکربندی P1 اندکی کاهش و در پیکربندی P2 اندکی افزایش نشان داد. به‌طور کلی برای اظهار نظر قطعی در مورد تأثیر مثبت داده‌گواری بر پیش‌بینی‌های بارش، دما و دیگر متغیرها، بایستی آزمایش‌های گسترده‌تری در منطقه مورد بررسی انجام شود تا بهترین نتایج به‌عنوان مبنای پیش‌بینی‌های عملیاتی آینده مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

از سازمان هواشناسی ایران برای در اختیار قرار دادن داده‌های مورد نیاز این تحقیق و از دانشگاه تهران برای حمایت از این کار تحقیقاتی تشکر می‌شود.

منابع

- ذاکری، ز.، آزادی، م. و قادر، س.، ۱۳۹۴، بررسی اثر داده‌گواری داده‌های ماهواره و ایستگاه‌های دیدبانی بر روی پیش‌بینی‌های مدل WRF: کنفرانس ملی هواشناسی ایران، اردیبهشت ۹۴، یزد.
- صفر، م.، احمدی گیوی، ف. و محب‌الحجه، ع.، ۱۳۹۱، بررسی اثر گوارد داده‌های رادار در مدل عددی ARPS در شبیه‌سازی بارش حاصل از سامانه همدیدی ۳۱ مارس ۲۰۰۹ در منطقه تهران: مجله ژئوفیزیک ایران، ۶ (۳)، ۹۴-۱۱۲.
- قادر، س.، یازجی، د. و شهبازی، ح.، ۱۳۹۴، پیش‌بینی میدان باد و سایر میدان‌های هواشناسی در محدوده شهر تهران با استفاده از یک سامانه همادی توسعه داده شده برای مدل WRF جهت استفاده در مدل‌های آلودگی هوا: چهارمین همایش ملی مدیریت آلودگی هوا و صدا، دی ۱۳۹۴، تهران.
- Alapaty, K., Niyogi, D. S., Chen, F., Pyle, P., Chandrasekar, A., and Seaman, N., 2008, Development of the flux-adjusting surface data assimilation system for mesoscale models: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **47**, 2331–2350.
- Argueso, D., Hidalgo-Munoz, J. M., Gamiz-Fortis, S. R., Esteban-Parra, M. J., and Castro-Diez, Y., 2012, High-resolution projections of mean and extreme precipitation over Spain using the WRF model (2070–2099 versus 1970–1999): *Journal of Geophysical Research*, **117**(12), IOD: 10.129/2011JDO11399.
- Barker, D. M., Huang, W., Guo, Y. R., and Xiao, Q. N., 2004, A three dimensional (3DVAR) data assimilation system for use with MM5: Implementation and initial results: *Monthly Weather Review*, **132**, 897–914.
- Blum, J., Le Dimet, F. X., and Navon, I. M., 2009, Data assimilation for geophysical fluids: in *Handbook of Numerical Analysis*. Edited by Temam, R. M., and Tribbia, J. J., Elsevier Science, 777 pp.

- Kalnay, E., 2003, Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability: Cambridge University Press, 341 pp.
- Liu, J., Bray, M., and Han, D., 2013, Exploring the effect of data assimilation by WRF-3DVar for numerical rainfall prediction with different types of storm events: Hydrological Processes, **27**, 3627–3640.
- Lorenz, E. N., 1965, A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model: Tellus, **17**, 321–333.
- Lynch, P., 2011, The Emergence of Numerical Weather Prediction: Richardson's Dream: Cambridge University Press, 1st edition, 290 pp.
- Macpherson, B., 2001, Operational experience with assimilation of rainfall data in the Met Office mesoscale model: Meteorology and Atmospheric Physics, **76**, 3–8.
- Mass, C. F., Ovens, D., Westrick, K., and Colle, B. A., 2002, Does increasing horizontal resolution produce more skillful forecasts: Bulletin American Meteorological Society, **83**, 407–430.
- Michalakes, J., Chen, S., Dudhia, J., Hart, L., Klemp, J., Middlecoff, J. and Skamarock, W., 2001, Development of a next generation regional weather research and forecast model: Development in Teracomputing, Proceedings of the Ninth ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology, W. Zwiefelhofer and N. Kreitz, Eds., World Scientific, 269–276.
- Parrish, D. F., and Derber, J. C., 1992, The National Meteorological Center's spectral statistical interpolation analysis system: Monthly Weather Review, **120**, 1747–1763.
- Ruggiero, F. H., Modica, G. D., and Lipton, A. E., 2000, Assimilation of satellite imagery data and surface observations to improve analysis of circulations forced by cloud shading contrasts: Monthly Weather Review, **128**, 434–448.
- Sasaki, Y., 1958, An objective analysis based on the variational method: Journal of the Meteorological Society of Japan, **36**, 1–12.
- Sasaki, Y., 1970, Some basic formalisms in numerical variational analysis: Monthly Weather Review, **98**, 875–883.
- Seo, J. H., Lee, Y. H., and Kim, Y. H., 2014, Feature selection for very short-term heavy rainfall prediction using evolutionary computation: Advances in Meteorology, **2014**, 1–15.
- Calvetti, L., and Pereira Filho, A. J., 2014, Ensemble hydrometeorological forecasts using WRF hourly QPF and top model for a middle watershed: Advances in Meteorology, **2014**, 1–12.
- Cardoso, R. M., Soares, P. M. M., Miranda, P. M. A., and Belo-Pereira, M., 2013, WRF high resolution simulation of Iberian mean and extreme precipitation climate: International Journal of Climatology, **33**, 2591–2608.
- Chambon, P., Zhang, S. Q., Hou, A. Y., Zupanski, M., and Cheung, S., 2013, Assessing the impact of pre-GPM microwave precipitation observations in the Goddard WRF ensemble data assimilation system: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, **140**, 1219–1235.
- Chen, M., Xie, P., and Co-authors, 2008, CPC unified gauge-based analysis of global daily precipitation: Western Pacific Geophysics Meeting, Cairns, Australia, 29 July – 1 August, 2008.
- Colle, B. A., and Mass, C. F., 2000, High-resolution observations and numerical simulations of easterly gap flow through the Strait of Juan de Fuca on 9–10 December 1995: Monthly Weather Review, **128**, 2398–2422.
- Courtier, P., Andersson, E., Heckley, W., Pailleux, J., Vasiljevic, D., Hamrud, M., Hollingsworth, A., Rabier, F., and Fisher, M., 1998, The ECMWF implementation of three dimensional variational assimilation (3D-Var). I: Formulation: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, **124**, 1783–1807.
- Guo, Y. R., Kuo, Y. H., and Parsons, D., 2000, Four-dimensional variational data assimilation of heterogeneous mesoscale observations for a strong convective case: Monthly Weather Review, **128**, 619–643.
- Ha, J., Lim, G., and Choi, S., 2014, Assimilation of GPS radio occultation refractivity data with WRF 3DVAR and its impact on the prediction of a heavy rainfall event: Journal of Applied Meteorology and Climatology, **53**, 1381–1395.
- Hacker, J. P., and Rostkier-Edelstein, D., 2007, PBL state estimation with surface observations, a column model, and an ensemble filter: Monthly Weather Review, **135**, 2958–2972.
- Inness, P., and Dorling, S., 2013, Operational Weather Forecasting: Wiley-Blackwell, 231 pp.

- Warner, T. T., Peterson, R. A., and Treadon, R. E., 1997, A tutorial on lateral boundary conditions as a basic and potentially serious limitation to regional weather prediction: *Bulletin of the American Meteorological Society*, **78**, 2599–2617.
- Xiao, Q., and Sun, J., 2007, Multiple-radar data assimilation and short range quantitative precipitation forecasting of a squall line observed during IHOP 2002: *Monthly Weather Review*, **135**, 3381–3404.
- Xiong, C. H., Zhang, L. F., Guan, J. P., Peng, J., and Zhang, B., 2013, Analysis and numerical study of a hybrid BGM-3DVAR data assimilation scheme using satellite radiance data for heavy rain forecasts: *Journal of Hydrodynamics*, **25**, 430–439.
- Xu, J., Rugg, S., Byerle, L. and Liu, Z., 2009, Weather forecasts by the WRF-ARW model with the GSI data assimilation system in the complex terrain areas of southwest Asia: *Weather and Forecasting*, **24**, 987–1008.
- Yesubabu, V., Venkata Srinivas, C., Langodan, S., and Hoteit, I., 2016, Predicting extreme rainfall events over Jeddah, Saudi Arabia: Impact of data assimilation with conventional and satellite observations: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **142**, 327–348.
- Zhang, S. Q., Zupanski, M., Hou, A. Y., Lin, X., and Cheung, S. H., 2013, Assimilation of precipitation-affected radiances in a cloud resolving WRF ensemble data assimilation system: *Monthly Weather Review*, **141**, 754–772.
- Zou, X., Navon, I. M., and Sela, J., 1993, Control of gravitational oscillations in variational data assimilation: *Monthly Weather Review*, **121**, 272–289.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W. and Powers, J. G., 2005, A description of the advanced research WRF, Version 2: NCAR Tech, Note NCAR/TN-4681STR, 94 pp.
- Sokol, Z., and Rezacova, D., 2006, Assimilation of radar reflectivity into the LMCOSMO model with a high horizontal resolution: *Meteorological Applications*, **13**, 317–330.
- Sokol, Z., 2011, Assimilation of extrapolated radar reflectivity into an NWP model and its impact on a precipitation forecast at high resolution: *Atmospheric Research*, **100**, 201–212.
- Stensrud, D. J., Yussouf, N., Dowell, D. C., and Coniglio, M. C., 2009, Assimilating surface data into a mesoscale model ensemble: Cold pool analyses from spring 2007: *Atmospheric Research*, **93**, 207–220.
- Stephan, K., Klink, S., and Schraff, C., 2008, Assimilation of radar derived rain rates into the convective-scale model COSMO-DE at DWD: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **134**, 1315–1326.
- Wan, Q., and Xu, J., 2011, A numerical study of the rainstorm characteristics of the June 2005 flash flood with WRF/GSI data assimilation system over south-east China: *Hydrological Processes*, **25**, 1327–1341.
- Wang W., Bruyère, C., Duda, M., Dudhia, J., Gill, D., Lin, H., Michalakes, J., Rizvi, S., Zhang, X., Beezley, J. D., Coen, J. L., and Mandel, J., 2014, User's Guide for the Advanced Research WRF (ARW) Version 3.6: NCAR.
- Wang, H., Sun, J., Fan, S., and Huang, X. Y., 2013, Indirect assimilation of radar reflectivity with WRF 3D-var and its impact on prediction of four summertime convective events: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **52**, 889–902.

Application of data assimilation using WRF model to simulate precipitations caused by synoptic systems in the western regions of Iran

Abolfazl Neyestani¹, Sarmad Ghader^{*2} and Alireza Mohebalhojeh²

¹Ph. D. Candidate, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

²Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 01 May 2016, Accepted: 03 December 2016)

Summary

Ever increasing attention is paid to numerical weather prediction (NWP) models with the purpose of providing high-resolution precipitation forecasts. In such applications, which are based on both the theoretical analysis and numerical experiments, the prediction accuracy is closely related to the errors in the initial conditions and in the physical parametrization schemes. In the present research, the potential of data assimilation in improving precipitation forecasts was investigated in a case study on an active weather system in the western regions of Iran. Various data assimilation experiments were designed by running the weather research and forecasting (WRF) model and its data assimilation package (WRF-DA). In each data assimilation experiment, we applied the three-dimensional variational data assimilation (3DVAR) method. A heavy rainfall event caused by a strong synoptic system in western Iran was selected in order to study the influence of data assimilation on precipitation forecast.

So as to carry out this study, the initial atmospheric and lateral boundary conditions were taken from three data categories: NCEP global forecast system (GFS), real-time forecasts at 3-h intervals, which are gridded to horizontal resolutions of 1° and 0.5° . NCEP FNL (Final) Operational Global Analysis data on 1° grids prepared operationally every six hours and ERA-Interim reanalysis dataset of ECMWF, gridded to horizontal resolution of approximately 80 km at 6-h intervals.

Simulations were divided into control runs and data assimilation runs, with the former runs being based on three sets of data as initial conditions. The data assimilation runs were conducted utilizing GFS data as the background and two sets of observations, namely the surface observations of Iran Meteorological Organization (IRIMO) and the NCEP observations. The observation data showed a significant impact on the initial conditions of 2m temperature and 10m zonal and meridional wind components, such that in certain parts of the simulation domain, the background temperature was estimated to be up to $+3^\circ\text{C}$ relative to the analysis and the wind field was revised by up to ± 3 meters per second in some areas.

The comparison between the scatter plots of the background and observations relative to the analysis corroborates the fact that the scatter and errors were decreased after using 3DVAR. The findings indicated that the accuracy of forecasts depends directly on the type of data employed as initial conditions for WRF model and the physical parametrization schemes, hence the fact that the simulations demonstrate significant differences. The bias analysis of precipitation for stations with precipitation records in the west illustrated that the assimilation of IRIMO surface data in one of the physical configurations decreased the forecast bias to a minimum of 73% of the cumulative 24-hour precipitation forecast. The impact of data assimilation, on the other hand, decreased in the cumulative 48-hour precipitation forecasts.

Correlation analysis of the forecasted precipitation patterns and the observed values demonstrated that data assimilation generates a higher correlation coefficient, implying that it had a discernible, though limited, positive impact on the case examined. In addition, the maximum impact of data assimilation on the correlation between data assimilation runs and control runs for precipitation was approximately 8%. Specifying a precipitation threshold for quantitative precipitation forecasts (QPF), the binary analysis was done, while the proportion correct score (PC) of each threshold was employed in order to investigate the forecasts quality. In conclusion, using the skill score of binary analysis is not a proper method to compare forecasts quality in different experimental runs when the number of forecasts and observational stations are limited.

Keywords: numerical prediction, data assimilation, WRF, 3DVAR, quantitative precipitation forecast

*Corresponding author:

sghader@ut.ac.ir