

ارزیابی و مقایسه شبیه‌سازی‌های مدل‌های HARMONIE و WRF در مقیاس همرفتی در منطقه غرب ایران

ابوالفضل نیستانی^۱، سرمد قادر^{۲*}، نیلز گوستافسن^۳، علیرضا محب‌الحجه^۴

^۱استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
^۲دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۳دانشیار، موسسه هواشناسی و هیدرولوژی سوئد، نورشوپینگ، سوئد
^۴استاد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۰۹)

چکیده

استفاده از مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا برای پیش‌بینی پدیده‌های هواشناسی در مقیاس همرفتی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. بدین‌منظور استفاده از مدل‌های مختلف پیش‌بینی عددی وضع هوا و مقایسه نتایج شبیه‌سازی این مدل‌ها در درک بهتر مشکلات مرتبط با این مقیاس‌ها و شناخت خطاهای سامانمند مدل‌ها کمک بسیاری خواهد کرد. در این تحقیق شبیه‌سازی‌های مختلف با استفاده از دو مدل میان‌مقیاس WRF و HARMONIE و با شرایط اولیه و مرزی یکسان (ECMWF ERA-Interim) به مدت ۱۵ روز در ماه دسامبر ۲۰۱۳ انجام شده است. تمامی شبیه‌سازی‌ها با تفکیک افقی در مقیاس همرفتی ۲/۵ کیلومتر و آغازگری شده در ساعت‌های 00UTC و 12UTC می‌باشند. اجرای مدل به مدت ۷۲ ساعت در منطقه‌ای با کوهساری پیچیده در نیمه غربی ایران انجام شده است. نتایج نشان داد که دو مدل از عملکرد مشابهی در شبیه‌سازی متغیرهای مختلف برخوردار هستند. برای شبیه‌سازی بارش تجمعی، نتایج نشانگر عملکرد بهتر مدل WRF نسبت به مدل HARMONIE در دوره زمانی شبیه‌سازی است. برای بارش تجمعی ۲۴ ساعته، مدل WRF دارای همبستگی اندکی بیشتر و خطای میانگین مربعات کمتر در همه زمان‌های پیش‌بینی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است، اما برای اریبی بارش، HARMONIE دارای عملکرد بهتری است. به‌واسطه به‌کارگیری داده‌های بازتحلیل به‌عنوان شرایط مرزی جانبی، افزایش زمان پیش‌بینی اثر قابل توجهی بر امتیازهای ارزیابی بارش نداشت. برای متغیرهای هواشناسی سطح زمین، اختلاف قابل توجهی در ارتباط با اریبی رطوبت نسبی تراز ۲ متر برای مدل WRF و HARMONIE وجود داشت (فراتخمین رطوبت برای HARMONIE و فروتخمین برای مدل WRF). برای متغیرهای ترازهای بالا، بیشترین شباهت‌ها در اریبی و انحراف معیار خطا مرتبط با نیم‌رخ‌های قائم دما و بیشترین تفاوت‌ها در اریبی رطوبت نسبی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی عددی وضع هوا، مقیاس همرفتی، WRF، HARMONIE، ایران

۱ مقدمه

مدل‌های عددی میان‌مقیاس وضع هوا در مقیاس‌های همرفتی (فاصله شبکه‌ای افقی کمتر از ۴ کیلومتر) و بدون استفاده از پارامترسازی همرفت، ابزارهای بسیار ارزشمندی هستند. در سال‌های اخیر، استفاده از این مدل‌ها با تفکیک بالا و در مقیاس همرفتی توجه زیادی را به خود جلب کرده است (کین و همکاران، ۲۰۰۸؛ لین و همکاران، ۲۰۰۸؛ شوارتز و همکاران، ۲۰۰۹؛ بریان و موريسن، ۲۰۱۲؛ جانسن و همکاران، ۲۰۱۳؛ واندنبرگ و همکاران، ۲۰۱۴؛ قادر و همکاران، ۱۳۹۴). فاصله شبکه‌ای افقی بین ۱-۴ کیلومتر مقیاس مجاز همرفت نامیده می‌شود که قادر به نمایش ساختارهای اساسی سامانه‌های همرفتی عمیق است. تفکیک‌های شبکه‌ای بالاتر (برای نمونه: ۱۰۰-۲۰۰ متر) ممکن است نیاز به تفکیک بیشتر طیف حرکت‌های همرفتی (به‌طور نمونه: تفکیک ابرهای لایه مرزی و حرکت‌های درون ابر) داشته باشد (بریان و همکاران، ۲۰۰۳؛ پتچ، ۲۰۰۶؛ قرایلو و همکاران، ۱۳۸۷). در مقایسه با مدل‌هایی که فاصله شبکه‌ای بزرگ را با همرفت پارامترسازی شده به‌کار می‌برند، مدل‌های همرفت-مجاز (Convection-permitting)، پیش‌بینی‌های بارش بسیار دقیق‌تر (ویسمن و همکاران، ۱۹۹۷؛ مس و همکاران، ۲۰۰۲؛ شوارتز و همکاران، ۲۰۰۹؛ کلارک و همکاران، ۲۰۰۹) و تصویر خیلی واقعی‌تری از پیش‌بینی وضع هوای مخرب (دون و همکاران، ۲۰۰۴؛ کین و همکاران، ۲۰۰۶؛ ویسمن و همکاران، ۲۰۰۸؛ کین و همکاران، ۲۰۱۰) تولید می‌کنند.

به‌طور کلی، مطالعات بسیار کمی مزیت‌های بالقوه به‌کارگیری فاصله شبکه‌ای کمتر از ۳-۴ کیلومتر را در پیش‌بینی وضع هوای مخرب نشان داده‌اند، اما بعضی از تحقیقات مزایای فاصله شبکه‌ای ۱ کیلومتر را نسبت به فاصله شبکه‌ای ۴ کیلومتر برای پیش‌بینی‌های بارش کل بر روی مناطق همراه با تنوع کوهساری نشان داده‌اند (کول و

مس، ۲۰۰۰؛ لین و همکاران، ۲۰۰۸؛ شوارتز، ۲۰۱۴). این مطالعات ضرورت استفاده از تفکیک‌های افقی بالاتر در شبیه‌سازی وضع هوا به‌منظور افزایش دقت پیش‌بینی را بیان می‌کنند. در این میان، پیش‌بینی‌های عددی وضع هوای نزدیک سطح (۱۰٪ لایه مرزی جو) به‌واسطه برهم‌کنش مستقیم با سطح زمین منحصربه‌فرد هستند (استال، ۱۹۸۸). برای نمونه تغییرات روزانه دما، فشار و سرعت و جهت باد در نزدیک سطح زمین بسیار بارز است، در صورتی که در لایه‌های بالایی این تغییرات بسیار ناچیز می‌باشد. به‌واسطه این ویژگی منحصربه‌فرد، پیش‌بینی دقیق شرایط جوئی نزدیک سطح در بسیاری از کاربردها مانند پیش‌بینی سیل، توفان‌های سطحی و غیره بسیار حائز اهمیت است. با این وجود، دشواری‌های پیش‌بینی متغیرهای نزدیک سطح شناسایی و مطالعه شده است (هانا و یانگ، ۲۰۰۱؛ ژانگ و ژانگ، ۲۰۰۴). بنابراین، شبیه‌سازی دقیق متغیرهای هواشناسی نزدیک سطح و با تفکیک افقی بالا فرآیندی مشکل و با اهمیت در پیش‌بینی عددی وضع هواست.

در زمینه ارزیابی و درستی‌سنجی پیش‌بینی‌های مدل‌های میان‌مقیاس در مقیاس‌های همرفتی و غیرهمرفتی تحقیقاتی در سال‌های اخیر انجام شده است (ویسمن و همکاران، ۲۰۰۸؛ کانلیو و همکاران، ۲۰۱۳؛ کومار داس و همکاران، ۲۰۱۴)؛ اما تحقیقات در زمینه مقایسه ارزیابی شبیه‌سازی‌های دو مدل مختلف با یکدیگر بسیار محدود بوده و در اکثر تحقیقات تنها از یک مدل میان‌مقیاس معتبر برای شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. به‌طور نمونه، ویسمن و همکاران (۲۰۰۸) پیش‌بینی‌های همرفتی صریح ۰-۳۶ ساعت با تفکیک افقی ۴ کیلومتر را با استفاده از مدل (Weather Research and Forecasting model) WRF Eta انجام داده و نتایج را با پیش‌بینی‌های عملیاتی مدل (Eta Coordinate Regional Model) با تفکیک افقی ۱۲ کیلومتر که همرفت به‌طور ضمنی در آنها پارامترسازی شده بود، مقایسه کردند. نتایج آنها بهبود قابل توجه در

مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل HARMONIE نیز برای پیش‌بینی‌های عملیاتی روزانه در بعضی از کشورهای اروپایی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه دو مدل مورد استفاده در این تحقیق در دو مرکز متفاوت توسعه یافته‌اند و روش‌های متفاوتی را برای حل معادلات دینامیکی به کار می‌برند و همچنین قابلیت استفاده در مقیاس‌های همرفتی را دارند، مقایسه عملکرد آنها با یکدیگر به منظور اعتبارسنجی آنها ضروری است. از طرفی با توجه به فراهم بودن امکان استفاده از هر دوی این مدل‌ها در منطقه ایران، نتایج مدل WRF به نوعی با نتایج مدل HARMONIE در این منطقه اعتبارسنجی شده است. این مقایسه ضروری است، زیرا ممکن است مدل عملیاتی مورد استفاده در منطقه ایران بهینه نبوده و نتایج مناسبی نداشته و نیاز به جایگزین کردن آن با یک مدل عددی مناسب‌تر وجود داشته باشد.

۲ توصیف مدل‌های پیش‌بینی و داده‌های مورد استفاده

مدل‌های پیش‌بینی به کار رفته در این مطالعه شامل WRF و HARMONIE می‌باشند. مدل پیش‌بینی و تحقیقاتی WRF، یک سامانه مدل‌سازی عددی میان‌مقیاس است که با همکاری چندین موسسه و سازمان در ایالات متحده توسعه یافته است و برای پیش‌بینی‌های عملیاتی و نیازهای تحقیقاتی به کار می‌رود (اسکاماروک و همکاران، ۲۰۰۵). این مدل یک مدل منطقه‌محدود، ناآب‌ایستایی (Non-hydrostatic) (با قابلیت آب‌ایستایی) و معادلات بسط با انتخاب‌های چندگانه برای طرحواره‌های پارامترسازی فیزیکی گوناگون است. برای شبیه‌سازی‌های مدل WRF، هسته دینامیکی تحقیقاتی پیشرفته مدل (WRF-ARW) که بر پایه حل‌کننده اولیه برای معادلات بسط کاملاً تراکم‌پذیر و ناآب‌ایستایی است، مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. همه شبیه‌سازی‌های

شبیه‌سازی‌های با مقیاس بالا در نمایش پدیده‌های همرفتی را نشان داد. پاتانایاک و موهانتی (۲۰۰۸) عملکرد مدل‌های MM5 (PSU/NCAR Mesoscale Model) و WRF را در شبیه‌سازی چرخندهای حاره‌ای بر روی اقیانوس هند با تفکیک افقی ۲۷ کیلومتر مورد مقایسه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که مدل WRF در پیش‌بینی مسیر و شدت چرخند بهتر عمل می‌کند. روندا و همکاران (۲۰۱۳) عملکرد مدل WRF و HARMONIE (Hirlam and Aladin Research Model On Non-hydrostatic-forecast Inside Europe) برای دو رخداد مه را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها نتیجه گرفتند که برای مدل WRF، فرمول‌بندی طرحواره لایه مرزی جنبه‌ای اساسی برای آغاز مه می‌باشد. همچنین مدل HARMONIE عملکرد بهتری در پیش‌بینی مه نزدیک به جبهه سرد نشان داد.

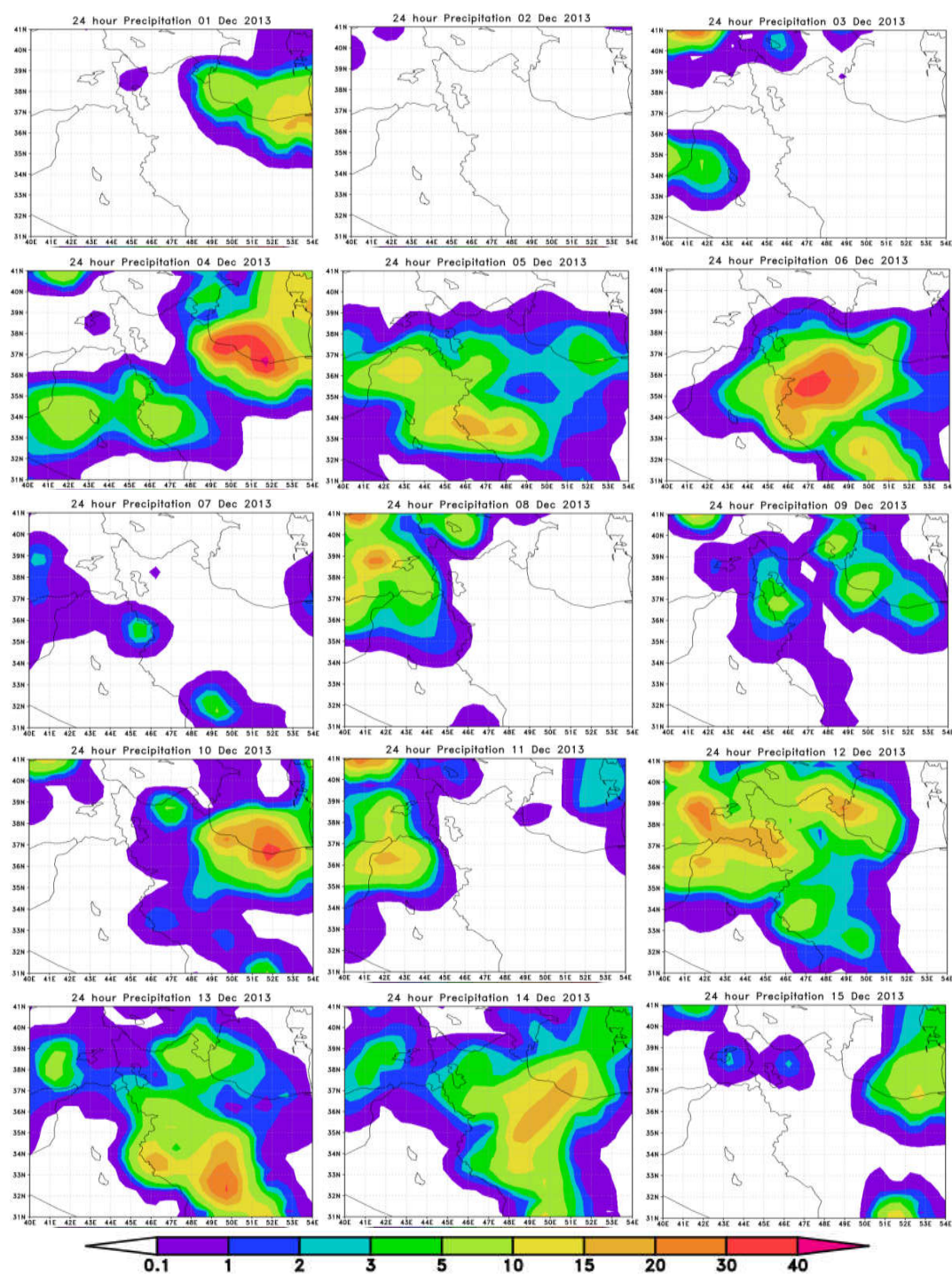
در مطالعه حاضر، مقایسه و ارزیابی رفتار دو مدل عددی HARMONIE و WRF در ناحیه‌ای با کوهساری (توپوگرافی) پیچیده در نیمه غربی ایران برای مقیاس همرفتی ۲/۵ کیلومتر و در نیمه اول ماه دسامبر ۲۰۱۳ مورد بررسی قرار گرفته و بر مبنای این مقایسه، بعضی نتایج اولیه استنباط شده است. بدین‌منظور مدل میان‌مقیاس WRF همراه با هسته دینامیکی تحقیقاتی پیشرفته مدل (ARW) (میشالاک و همکاران، ۲۰۰۱؛ اسکاماروک و همکاران، ۲۰۰۵) و مدل HARMONIE (بونوا و همکاران، ۱۹۹۵؛ بروسو و همکاران، ۲۰۱۱) در مقیاس افقی پیش‌فرض که در واقع مدل مقیاس همرفتی (Application of Research to Operations) AROME (at Mesoscale convective-scale model) هواشناسی فرانسه می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفته است. در حال حاضر مدل WRF به‌طور گسترده‌ای در مراکز تحقیقاتی و عملیاتی متعدد در سراسر جهان برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی‌های جوئی در مقیاس‌های همرفتی و غیرهمرفتی

از این طرحواره می‌تواند به کار رود. یک هسته دینامیکی اولیری هم موجود است، اما در سال‌های اخیر به ندرت به کار می‌رود. به‌طور کلی، پارامترسازی‌های فیزیکی پذیرفته شده در مدل HARMONIE با پارامترسازی‌های فیزیکی مدل AROME یکسان می‌باشد (سیتی و همکاران، ۲۰۱۱). طرحواره‌های فیزیکی به کار رفته در این مطالعه برای این مدل شامل: طرحواره ICE3 برای پارامترسازی خردفیزیک ابر، طرحواره طول موج بلند RRTM، طرحواره تابش طول موج کوتاه Morcrette، طرحواره سطح زمین SURFEX و طرحواره لایه مرزی HARATU می‌باشد. از آنجایی که بسیاری از طرحواره‌های فیزیکی برای مدل HARMONIE با طرحواره‌های مدل WRF متفاوت است، اما در انتخاب طرحواره‌ها این مسئله در نظر گرفته شده که بیشترین تطابق وجود داشته باشد. البته متفاوت بودن انتخاب‌های فیزیکی، در هدف کلی این تحقیق که درستی‌سنجی نتایج مدل WRF و سپس اعتبارسنجی نتایج این مدل با مدل HARMONIE است، مشکلی ایجاد نخواهد کرد.

همه آزمایش‌های شبیه‌سازی با به‌کارگیری داده‌های بازتحلیل ECMWF ERA-Interim با تفکیک مکانی ۰/۷۵ درجه برای شرایط اولیه و بر روی مرزهای جانبی انجام شده است (دی و همکاران، ۲۰۱۱). به همین دلیل، می‌توان گفت آزمایش‌های انجام گرفته نوعی آزمایش شبیه‌سازی مدل (Model Simulation Experiment) می‌باشند. به علت عدم توازن و تنظیم در نزدیکی مرزهای حوزه در شبکه‌های تودرتو برای سامانه‌های داده‌گویی منطقه‌ای و مشکل بودن حفظ سازگاری تحلیل تولید شده توسط داده‌گویی در بین حوزه‌های مدل چندگانه (هوتکامر و ژانگ، ۲۰۱۶)، تنها به یک حوزه مجزا برای آزمایش‌های مدل‌ها بدون داده‌گویی بسنده شده است، زیرا باید آزمایش‌های کنترلی و آزمایش‌های همراه با داده‌گویی در ادامه این تحقیق با شرایط یکسانی انجام

انجام شده در این مطالعه با نسخه ۳.۷.۱ مدل WRF انجام شده است. طرحواره‌های فیزیکی به کار رفته در این مطالعه برای اجرای مدل WRF شامل: طرحواره لایه مرزی YSU، طرحواره خردفیزیک WSM5، طرحواره تابش طول موج کوتاه Dudhia، طرحواره تابش طول موج بلند مدل انتقال تابشی سریع RRTM، طرحواره لایه سطحی Revised Noah MM5 Monin-Obukhov، و طرحواره سطح می‌باشد (اسکاماروک و همکاران، ۲۰۰۵؛ ونگ و همکاران، ۲۰۱۴) که بر اساس تحقیق انجام شده در منطقه خاورمیانه توسط شو و همکاران (۲۰۰۹) انتخاب شده است. البته در کار حاضر هدف بررسی حساسیت نتایج به انتخاب طرحواره‌های متفاوت فیزیکی نبوده است که این خود می‌تواند در تحقیق جداگانه‌ای مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به انتخاب مقیاس افقی همرفتی برای شبیه‌سازی‌ها، طرحواره پارامترسازی همرفت در اجراهای مدل غیرفعال شده است.

مدل HARMONIE با قابلیت همرفت (Convection-Permitting) ناآب‌ایستایی با همکاری اداره هواشناسی فرانسه (Météo-France) و کنسرسیوم (ALADIN) (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement International) توسعه یافته است. در تفکیک‌های افقی پیش‌فرض (کمتر یا مساوی ۲/۵ کیلومتر)، مدل پیش‌بینی و سامانه تحلیل بر اساس مدل مقیاس-همرفتی AROME مربوط به اداره هواشناسی فرانسه است (بروسو و همکاران، ۲۰۱۱؛ سیتی و همکاران، ۲۰۱۱). این مدل یک مدل طیفی ناآب‌ایستایی است که هسته دینامیکی آن (توسعه یافته توسط ALADIN) بر پایه گسسته‌سازی نیمه لاگراژی نیمه‌ضمنی دو تراز زمانی از معادلات کاملاً کشسان و مختصه قائم پیوندی (هایبرید) است. توصیف بیشتر در مورد مدل AROME در سیتی و همکاران (۲۰۱۱) آمده است. به‌طور انتخابی، برای حوزه‌های بزرگ‌تر و تفکیک‌های درشت‌تر، نسخه آب‌ایستایی (Hydrostatic)



شکل ۱. الگوی بارش تجمعی ۲۴ ساعته بر روی حوزه شبیه‌سازی برای دوره زمانی شبیه‌سازی (۱-۱۵ دسامبر ۲۰۱۳)، روزهای همراه با بارش ۲۴ ساعته سنگین در این دوره زمانی در این شکل به‌وضوح مشخص است.

می‌کند. اگرچه در این تحقیق هیچ داده‌های مشاهده‌ای برای تصحیح شرایط اولیه و داده‌گذاری مورد استفاده قرار نگرفته است، اما هدف از این تحقیق به‌نوعی آزمایش‌های

شوند. همچنین کیفیت بالای داده‌های بازتحلیل ERA-Interim به‌عنوان شرایط اولیه و مرزی امکان مقایسه دو مدل در یک حوزه مجزا با تفکیک بالاتر را فراهم

قائم مدل برای WRF، ۴۹ و برای HARMONIE، ۶۵ در نظر گرفته شده است. علت کمتر بودن تعداد ترازهای قائم مدل WRF در مقایسه با مدل HARMONIE، بعضی محدودیت‌ها برای اجرای مدل WRF و حجم بسیار بالای داده‌های خروجی بوده است. به علاوه، خروجی‌های مدل HARMONIE تنها برای اعتبارسنجی مدل WRF استفاده شده و اندکی متفاوت بودن تعداد ترازهای قائم مشکل زیادی در این تحلیل ایجاد نخواهد کرد. همچنین یکسان بودن تعداد ترازهای قائم در دو مدل به دلیل متفاوت بودن الگوریتم‌های درون‌یابی قائم نیز شرایط کاملاً یکسانی را ایجاد نخواهد کرد.

شبیه‌سازی‌های مدل‌های توصیف شده در این تحقیق در ساعت‌های 00UTC و 12UTC هر روز آغاز شده و در کل، ۳۰ شبیه‌سازی برای دوره زمانی مورد بررسی انجام شده است. همچنین شبیه‌سازی‌ها تا ۷۲ ساعت ادامه یافته‌اند. انگیزه از کاربرد این زمان شبیه‌سازی طولانی، تحقیق در مورد هرگونه مسائل سامانمند مرتبط با مدل است که می‌تواند تأثیر فرآیند داده‌گواری را در آزمایش‌های پیش رو در تحقیقات آتی، پنهان سازد.

به منظور درستی‌سنجی نتایج مدل‌ها، با استفاده از سامانه درستی‌سنجی مدل HARMONIE، امتیازهای ارزیابی متداول مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق، ضریب همبستگی، خطای اریبی و خطای انحراف معیار استفاده شده است.

۴ تحلیل نتایج

در این بخش در ابتدا به ارزیابی شبیه‌سازی‌های متغیرهای سطحی توسط هر دو مدل و مقایسه آنها پرداخته می‌شود. با توجه به اهمیت ارزیابی بارش‌های تجمعی کمی (QPF)، شبیه‌سازی‌های بارش مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس دیگر متغیرهای سطحی بررسی شده است. علاوه بر ارزیابی و مقایسه نتایج برای متغیرهای سطحی، ارزیابی

اعتبارسنجی دو مدل به منظور شناسایی خطاهای سامانمند مدل قبل از آزمایش‌های داده‌گواری (به جای مقیاس‌کاهی خالص داده‌های مدل جهانی) در تحقیقات آتی خواهد بود. به علاوه لازم به ذکر است تحلیل‌ها و مقایسه‌ها به غیر از زمان آغازگری که مدل هنوز شروع به اجرا نکرده است، از ۱۲ ساعت بعد از شروع شبیه‌سازی‌ها انجام شده‌اند که زمان مذکور به عنوان Spin-up در نظر گرفته شده است.

سامانه درستی‌سنجی مدل HARMONIE به منظور اعتبارسنجی مقادیر شبیه‌سازی شده توسط هر دو مدل به کار رفته است. مشاهدات مورد استفاده در این سامانه مبتنی بر داده‌های مشاهداتی رادیوگمانه و داده‌های سطحی می‌باشد که از آرشیو داده‌های ECMWF استخراج شده است. علاوه بر این، برای درستی‌سنجی مقادیر بارش، مشاهدات بارش تجمعی دریافتی از سازمان هواشناسی ایران به کار رفته است.

۳ طراحی آزمایش‌های عددی و روش ارزیابی

در این تحقیق، آزمایش‌های شبیه‌سازی با مدل‌های WRF و HARMONIE در مقیاس همرفتی (۲/۵ کیلومتر) بر روی حوزه یکسان در نیمه غربی ایران برای دوره زمانی ۱-۱۵ دسامبر ۲۰۱۳ انجام شده است. این دوره زمانی شامل چندین رخداد بارش سنگین بر روی حوزه انتخاب شده می‌باشد (شکل ۱).

حوزه شبیه‌سازی مدل در شکل ۲-الف نشان داده شده است. ویژگی بارز حوزه انتخابی در برداشتن کوهساری پیچیده، زمین‌های هموار و همچنین حوضه‌های آبی در داخل منطقه شبیه‌سازی است (شکل ۲-ب). تعداد نقاط شبکه‌ای برای مدل WRF، ۵۰×۴۰ در نظر گرفته شده است. حوزه شبیه‌سازی برای مدل HARMONIE به واسطه قید تبدیل‌های فوریه اندکی بزرگ‌تر (۵۰×۴۲) می‌باشد (HARMONIE یک مدل طیفی است). تعداد ترازهای

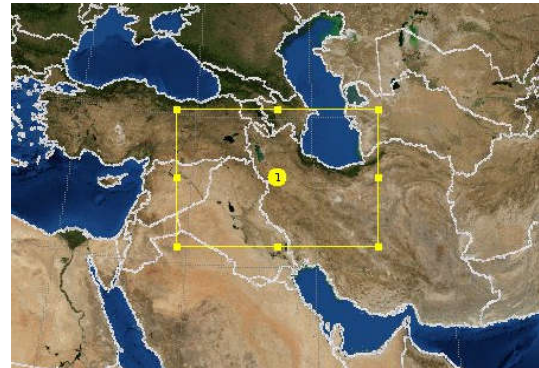
۴-۱ ارزیابی متغیرهای سطحی

۴-۱-۱ بارش تجمعی ۲۴ ساعته

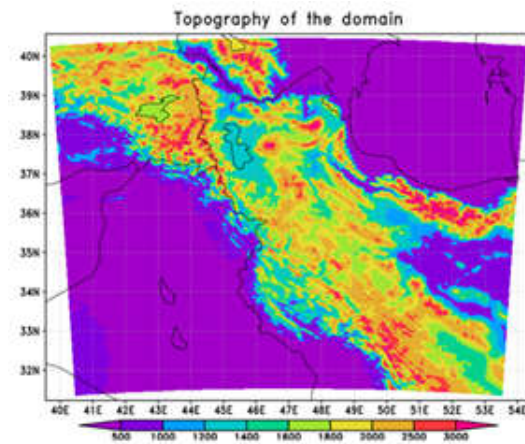
با استفاده از داده‌های مشاهداتی بارش دریافتی از سازمان هواشناسی کشور، درستی‌سنجی مقادیر بارش شبیه‌سازی شده با مدل‌های WRF و HARMONIE در حوزه انتخابی انجام شده است. توزیع مکانی ایستگاه‌های باران‌سنجی بر روی حوزه انتخابی در شکل ۲-ج نشان داده شده است. در این مطالعه، ۲۲۰ ایستگاه در منطقه ایران با هدف درستی‌سنجی مقادیر بارش شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. هر پیش‌بینی (شبیه‌سازی مدل) در ساعت 00UTC در هر روز آغازگری شده است. بارش تجمعی ۲۴ ساعته مدل‌ها برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت در مقابل مشاهدات بارش تجمعی برای دوره زمانی یکسان درستی‌سنجی شده است.

ضریب همبستگی برای سنجش میزان تطابق الگوی نقطه‌ای پیش‌بینی‌ها و مشاهدات با استفاده از داده‌های مشاهداتی از سازمان هواشناسی کشور (۲۲۰ ایستگاه) و داده‌های پیش‌بینی شده (بارش تجمعی) از مدل WRF و HARMONIE در نقاط ایستگاهی محاسبه شده است. اگرچه ضریب همبستگی اطلاعات دقیقی در مورد درستی‌سنجی نتایج نمی‌دهد و همواره باید امتیازهای ارزیابی دیگر برای درستی‌سنجی به همراه آن به کار رود، اما می‌تواند به‌عنوان اولین گام در تحلیل‌های ارزیابی و مقایسه شبیه‌سازی‌های مدل مخصوصاً مقایسه شباهت الگوی بین مشاهدات و پیش‌بینی‌ها در نقاط مشاهدات مورد استفاده قرار گیرد. در اینجا ضریب همبستگی تنها برای مشاهده میزان تطابق این الگوها استفاده شده و چون همراه با دیگر امتیازهای درستی‌سنجی بررسی شده است (Bias و RMSE) می‌تواند به‌عنوان سنجش تکمیلی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین نوعی سازگاری بین ضریب همبستگی و مقادیر خطای RMSE در این تحلیل وجود دارد. شکل ۳ تغییرات همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی شده

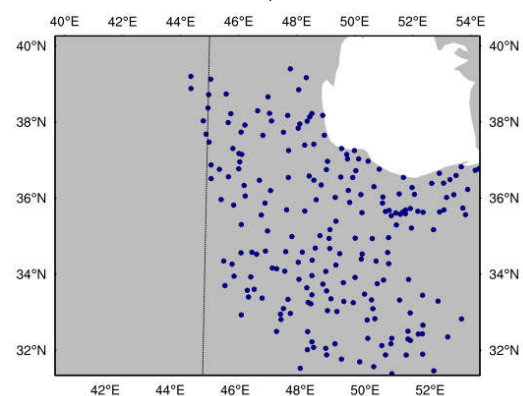
نیمرخ‌های قائم شبیه‌سازی شده با استفاده از مشاهدات رادیوگمانه انجام شده است.



(الف)



(ب)



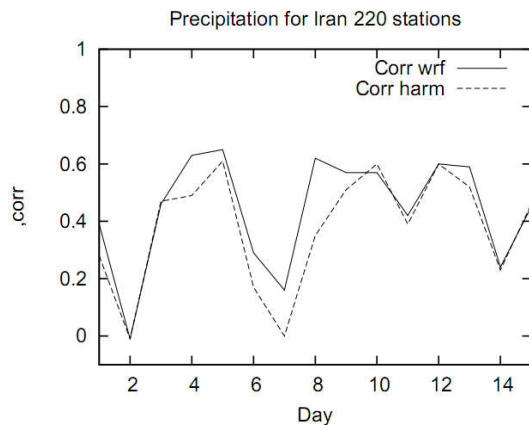
(ج)

شکل ۲. (الف) حوزه شبیه‌سازی مدل‌ها، (ب) وضعیت کوهساری منطقه، (ج) توزیع مشاهدات بارش تجمعی دریافتی از سازمان هواشناسی کشور.

این است که ضریب همبستگی به طور کلی در پیش‌بینی‌های زمانی مختلف تغییر زیادی نداشته است که به دلیل به کارگیری داده‌های بازتحلیل ERA-Interim می‌باشد.

جدول ۱. ضریب همبستگی بین شبیه‌سازی‌های بارش مدل‌های WRF و HARMONIE و مشاهدات برای کل دوره شبیه‌سازی.

| HARMONIE | WRF | زمان پیش‌بینی |
|----------|------|---------------|
| ۰/۵۸ | ۰/۶۲ | ساعت ۲۴ |
| ۰/۶۰ | ۰/۶۲ | ساعت ۴۸ |
| ۰/۵۷ | ۰/۵۹ | ساعت ۷۲ |

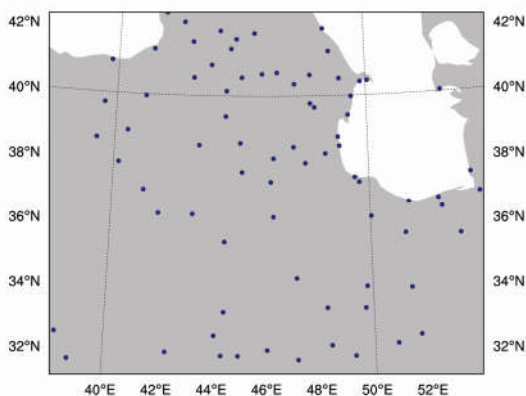


شکل ۳. تغییرات ضریب همبستگی بین مقادیر بارش تجمعی ۲۴ ساعته مشاهده شده و شبیه‌سازی شده (برای پیش‌بینی ۲۴ ساعته) برای مدل WRF (خط پر) و مدل HARMONIE (خط چین) برای کل دوره زمانی شبیه‌سازی.

تحلیل اریبی (میانگین اختلاف‌های بین مدل و مشاهدات) در جدول ۲ نشان داده شده است. برای متغیر بارش، مدل HARMONIE مقادیر کوچک‌تری از اریبی نسبت به مدل WRF برای همه پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته دارد. ریشه میانگین مربعات خطا با افزایش زمان پیش‌بینی، برای هر دو مدل افزایش می‌یابد (خطاهای بزرگ‌تر در پیش‌بینی‌های زمانی طولانی‌تر - جدول ۳). با این وجود به دلیل شرایط مرزی جانبی با کیفیت بالا (ERA-Interim) این افزایش کاملاً ناچیز است و این مسئله سازگار به نظر می‌رسد. این کیفیت بالا از سازگاری

و مشاهده شده بارش (بارش تجمعی ۲۴ ساعت نخست) را برای کل دوره شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر روز همبستگی شبیه‌سازی‌های مدل WRF اندکی بیشتر از همبستگی شبیه‌سازی‌های مدل HARMONIE است. نتیجه همبستگی الگو برای کل دوره شبیه‌سازی و برای پیش‌بینی بارش تجمعی ۲۴ ساعته ناشی از پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته در جدول ۱ نشان داده شده است. مقادیر میانگین ضریب همبستگی نشان می‌دهد که شبیه‌سازی‌های مدل WRF همبستگی بیشتری نسبت به شبیه‌سازی‌های مدل HARMONIE برای کل دوره شبیه‌سازی دارد (افزایش ۴٪ برای پیش‌بینی ۲۴ ساعته، ۲٪ برای پیش‌بینی ۴۸ و ۷۲ ساعته)؛ بنابراین مدل WRF در نمایش الگوی بارش شبیه‌سازی شده عملکرد بهتری داشته است. به دلیل استفاده از داده‌های بازتحلیل ECMWF به عنوان شرایط مرزی جانبی (داده‌های با کیفیت مناسب)، همبستگی برای پیش‌بینی‌های مختلف بسیار مشابه است. به عبارت دیگر، مدل‌های WRF و HARMONIE برای یک تفسیر دینامیکی از شرایط مرزی جانبی به کار رفته است تا از پیش‌بینی واقعی بازشناخته شود. این بدین معنی است که استفاده از داده‌های بازتحلیل در فرآیند پیش‌بینی عددی، تنها یک شبیه‌سازی دینامیکی از گذشته تولید می‌کند و با پیش‌بینی عملیاتی با استفاده از شرایط مرزی جانبی استخراج شده از پیش‌بینی‌های مدل‌های جهانی که در مراکز پیش‌بینی انجام می‌شود، متفاوت است. همچنین پیش‌بینی و شبیه‌سازی انجام شده از یک روز مشخص برای روزهای بعد (۲۴ ساعت اول، ۲۴ ساعت دوم و ۲۴ ساعت سوم و غیره) بستگی به پیش‌بینی‌پذیری جو در آن روز خاص دارد و ممکن است در حالت میانگین، گاهی اوقات پیش‌بینی ۴۸ یا ۷۲ ساعته ضریب همبستگی اندکی بهتر را با مشاهدات نشان دهند؛ گرچه انتظار بر این است که پیش‌بینی ۲۴ ساعته همبستگی بالاتری داشته باشد. نکته مهم در اینجا

زمانی مختلف محاسبه شده که برای کل دوره زمانی شبیه‌سازی میانگین‌گیری شده است. نتایج این تحلیل در شکل ۵-الف نشان داده شده است. در تمام زمان‌های آغازگری به‌طور میانگین اریبی منفی (-1°C) برای مدل WRF و اریبی مثبت ($+0.7^{\circ}\text{C}$) برای مدل HARMONIE وجود دارد. انحراف معیار خطا به‌طور میانگین مقادیر بزرگ‌تری در زمان‌های آغازگری برای مدل HARMONIE دارد. بعد از زمان آغازگری و اجرای مدل‌ها، در امتداد محور زمان پیش‌بینی، مشاهده می‌شود که اریبی برای WRF مثبت شده و برای HARMONIE منفی می‌شود. همچنین بزرگی اریبی برای هر دو مدل، با پیشروی در امتداد محور زمان پیش‌بینی افزایش می‌یابد. بعد از ۱۲ ساعت از زمان آغازگری، میانگین انحراف معیار خطا برای مدل HARMONIE نسبت به مدل WRF اندکی کوچک‌تر است. با توجه به اینکه اریبی مشخصه‌ای از میزان خطای سامانمند مدل است، هر مدلی می‌تواند با توجه به ساختار تعریف شده در آن و طرحواره‌های فیزیکی استفاده شده، اریبی مخصوص به خود را برای کمیت‌های مختلف داشته باشد. متفاوت بودن اریبی در اینجا می‌تواند مرتبط با انتخاب‌های طرحواره‌های فیزیکی باشد.



شکل ۴. ایستگاه‌های دیدبانی سطحی بر اساس داده‌های ECMWF در حوزه شبیه‌سازی برای اهداف درستی‌سنجی مقادیر شبیه‌سازی شده.

بین میدان‌های مختلف و استفاده از مشاهدات بیشتر در فرآیند بازتحلیل و داده‌گوارای جهانی ناشی می‌شود. این سازگاری رشد و گسترش ناپایداری‌ها را در مدل به تأخیر انداخته و می‌تواند شبیه‌سازی‌های دقیق‌تری در زمان‌های پیش‌بینی طولانی‌تر ایجاد کند.

جدول ۲. اریبی شبیه‌سازی بارش با مدل‌های WRF و HARMONIE برای کل دوره شبیه‌سازی.

| زمان پیش‌بینی | WRF | HARMONIE |
|---------------|-------|----------|
| ۲۴ ساعت | -۰/۴۱ | -۰/۳۵ |
| ۴۸ ساعت | -۰/۶۵ | -۰/۶۵ |
| ۷۲ ساعت | -۰/۷۷ | -۰/۷۷ |

جدول ۳. ریشه میانگین مربعات خطای شبیه‌سازی بارش با مدل‌های WRF و HARMONIE برای کل دوره شبیه‌سازی.

| زمان پیش‌بینی | WRF | HARMONIE |
|---------------|------|----------|
| ۲۴ ساعت | ۷/۶ | ۷/۶۵ |
| ۴۸ ساعت | ۷/۹۲ | ۸/۰۳ |
| ۷۲ ساعت | ۸/۱۸ | ۸/۴۴ |

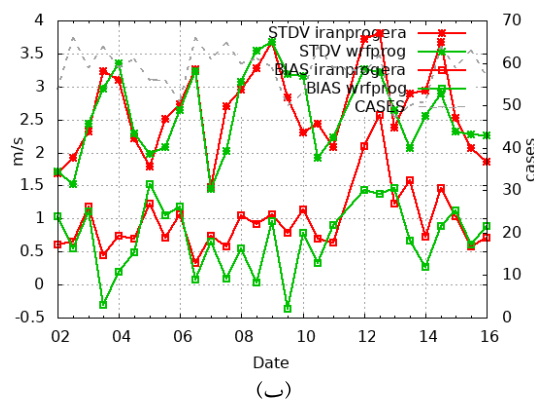
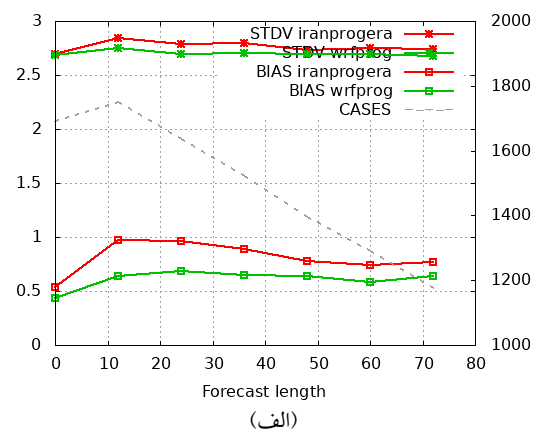
۴-۱-۲ دمای تراز ۲ متر

داده‌های مشاهداتی برای ارزیابی دما و رطوبت ویژه (نسبت آمیختگی) تراز ۲ متر از سطح زمین و باد تراز ۱۰ متر از آرشیو داده‌ای ECMWF استخراج شده است. توزیع مکانی نمونه برای ایستگاه‌های سطحی (SYNOP) موجود در داده‌های این آرشیو در شکل ۴ نشان داده شده است. در این مطالعه، در حدود ۷۰ اندازه‌گیری سطحی در هر زمان برای اهداف درستی‌سنجی متغیرهای سطحی به‌کار رفته است. همچنین، پیش‌بینی‌ها در ساعت‌های 00 UTC و 12 UTC آغازگری شده‌اند.

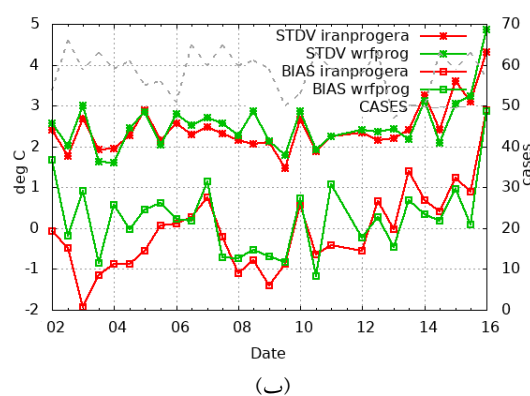
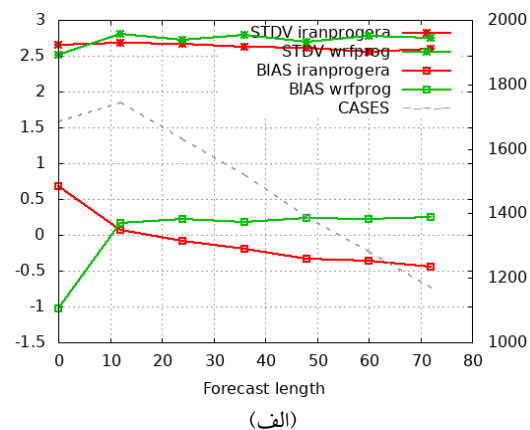
برای همه ایستگاه‌ها بر روی حوزه، در هر زمان (هر ۱۲ ساعت در امتداد طول مدت پیش‌بینی)، اریبی و انحراف معیار خطا برای هر دو مدل در پیش‌بینی‌های

۳-۱-۴ سرعت و جهت باد در تراز ۱۰ متر

نتایج امتیازهای درستی سنجی انحراف معیار خطا و اریبی برای سرعت باد در تراز ۱۰ متر در شکل ۶-الف نشان داده شده است. در زمان آغازگری، اریبی مثبت (در حدود $+0.5$ متر بر ثانیه) برای هر دو مدل وجود دارد و این اریبی مثبت در مدت زمان پیش‌بینی مثبت باقی می‌ماند. علاوه بر این، انحراف معیار خطا نیز مقادیر یکسانی برای هر دو مدل در لحظه آغازگری دارد. بررسی دقیق‌تر این امتیازها نشان می‌دهد که برای کل مدت زمان پیش‌بینی، اریبی و انحراف معیار خطا در شبیه‌سازی‌های سرعت باد مدل WRF، اندکی کمتر هستند.



شکل ۶. الف) اریبی (خطوط پایین) و انحراف معیار (خطوط بالا) خطا برای شبیه‌سازی سرعت باد در تراز ۱۰ متر با مدل WRF (خط قرمز) و مدل HARMONIE (خط سبز) برحسب زمان پیش‌بینی تا ۷۲ ساعت، ب) سری زمانی اریبی و انحراف معیار خطا برای شبیه‌سازی ۲۴ ساعته با مدل WRF و مدل HARMONIE برای کل دوره مطالعه (۲-۱۶ دسامبر ۲۰۱۳).



شکل ۵. الف) اریبی (خطوط پایین) و انحراف معیار خطا (خطوط بالا) برای شبیه‌سازی دمای تراز ۲ متر با مدل WRF (خط قرمز) و مدل HARMONIE (خط سبز) برحسب زمان پیش‌بینی تا ۷۲ ساعت، ب) سری زمانی اریبی و انحراف معیار خطا برای شبیه‌سازی ۲۴ ساعته با مدل WRF و مدل HARMONIE برای کل دوره مطالعه (۲-۱۶ دسامبر ۲۰۱۳). خط چین تعداد نمونه‌ها (مشاهدات) را در فرآیند درستی‌سنجی نشان می‌دهد.

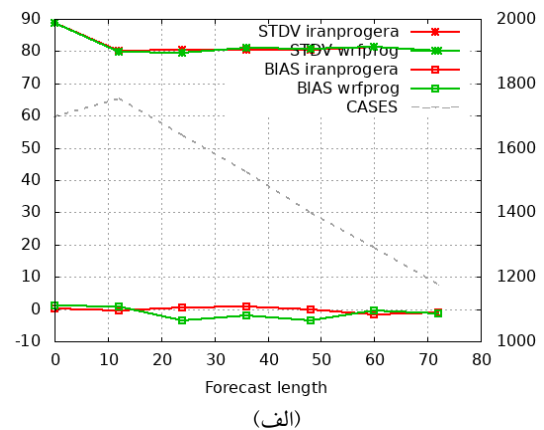
شکل ۵-ب تغییرات زمانی امتیازهای ارزیابی انحراف معیار خطا و اریبی دما را در امتداد محور زمان (سری زمانی) و فقط برای پیش‌بینی‌های ۲۴ ساعته در هر اجرا نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای هر دو مدل اریبی بین مقادیر منفی و مثبت در امتداد محور زمان نوسان می‌کند، اما برای هر دوی آنها این تغییرات نسبتاً همبسته هستند. اریبی ارزیابی شده در زمان‌های مشخص، بین -2°C تا $+3^{\circ}\text{C}$ برای دما در دوره زمانی شبیه‌سازی تغییر می‌کند. همچنین برای هر دو مدل، انحراف معیار خطاها همبسته بوده و نوسان‌های آنها بسیار مشابه است.

زمان پیش‌بینی، هر دو مدل انحراف معیار 80° برای خطا دارند که تا ۷۲ ساعت در امتداد زمان پیش‌بینی ثابت می‌ماند. البته باید توجه شود که متغیر جهت باد در نزدیکی سطح زمین از عدم قطعیت بالایی برخوردار است. شکل ۷-ب تغییرات زمانی امتیازهای ارزیابی اریبی و انحراف معیار جهت باد در تراز ۱۰ متر را در امتداد دوره زمانی پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد. اریبی دارای مقادیر مثبت و منفی می‌باشد و نوسان‌های گوناگونی برای هر دو مدل از خود نشان می‌دهد (تغییرات بین -40° تا $+40^\circ$). انحراف معیار خطا نیز بسیار مشابه بوده و برای هر دو مدل به شدت همبسته است.

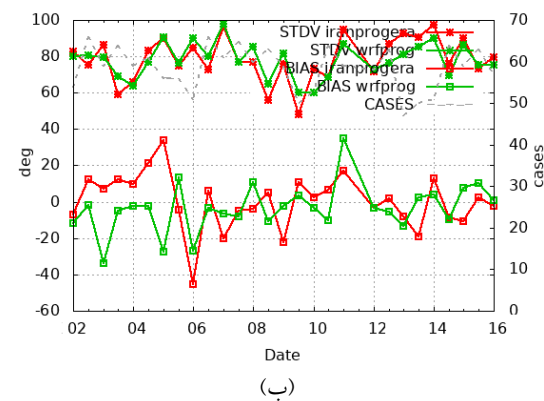
۴-۱-۴ رطوبت ویژه (نسبت آمیختگی) در تراز ۲ متر

نتایج امتیازهای ارزیابی اریبی و انحراف معیار و خطا برای رطوبت ویژه در شکل ۸-الف نشان داده شده است. اریبی همواره برای مدل WRF منفی است (فرو تخمین رطوبت) و اندازه آن با گذشت زمان پیش‌بینی بزرگ‌تر می‌شود. برعکس، اریبی برای مدل HARMONIE مثبت است (فرا تخمین رطوبت) و اندازه آن با گذشت زمان پیش‌بینی کوچک‌تر می‌شود. انحراف معیار خطا در لحظه آغازگری برای مدل WRF نسبت به مدل HARMONIE کوچک‌تر است، اما بعد از ۱۲ ساعت در امتداد زمان پیش‌بینی، میزان آن برای HARMONIE کمتر می‌شود.

شکل ۸-ب تغییرات امتیازهای ارزیابی انحراف معیار و اریبی خطا را برای رطوبت نسبی بر حسب زمان پیش‌بینی نشان می‌دهد. تغییرات زمانی امتیازهای درستی‌سنجی انحراف معیار و اریبی دو مدل به هم شبیه است. برای انحراف معیار خطا، مقادیر برای هر دو مدل بسیار مشابه است، اما برای اریبی، شبیه‌سازی‌های مدل WRF در مقایسه با شبیه‌سازی‌های مدل HARMONIE برای همه زمان‌ها همواره خشک‌تر است (مقادیر منفی بیشتر).



(الف)



(ب)

شکل ۷. مانند شکل ۵ ولی برای جهت باد.

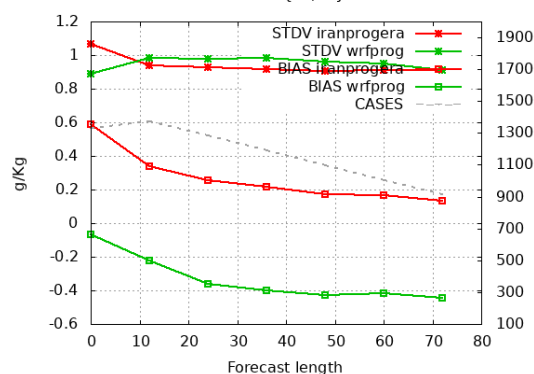
شکل ۶-ب، تغییرات انحراف معیار و اریبی خطای پیش‌بینی سرعت باد تراز ۱۰ متر را در امتداد محور زمان تنها برای پیش‌بینی ۲۴ ساعته نشان می‌دهد. اریبی خطا برای مدل HARMONIE همواره مثبت است (فرا تخمین سرعت باد)، اما برای مدل WRF، گاهی نزدیک صفر یا منفی است. انحراف معیار خطا رفتار مشابهی در هر دو مدل دارد (مانند تغییرات نسبت به زمان). کمینه و بیشینه انحراف معیار خطا در حدود $1/5$ متر بر ثانیه و $3/75$ متر بر ثانیه است.

نتایج اریبی و انحراف معیار خطا برای جهت باد تراز ۱۰ متر در شکل ۷-الف نشان داده شده است و بر اساس این شکل، تغییر زمانی اریبی در هر دو مدل بسیار کوچک است. انحراف معیار 90° برای خطا در زمان آغازگری برای هر دو مدل وجود دارد و بعد از ۱۲ ساعت در امتداد

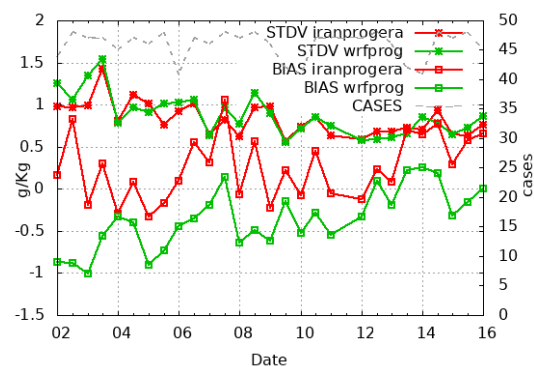
در راستای قائم و برای پیش‌بینی آغازگری شده در ساعت‌های 00UTC و 12UTC و تحلیل‌های آماری انجام شده در ساعت 00UTC (شکل ۹-الف) و 12UTC (شکل ۹-ب) نشان می‌دهد. برای پیش‌بینی‌های ساعت 00UTC هر روز، اریبی و انحراف معیار خطا برای هر دو مدل و در هر تراز قائم بسیار مشابهند. در ترازهای ۹۲۵، ۸۵۰، ۷۰۰ و ۲۰۰ هکتوپاسکال اریبی خطا مثبت بوده، اما برای دیگر ترازاها اریبی منفی است. در پایین‌ترین تراز (۹۲۵ هکتوپاسکال) و بالاترین ترازاها (۱۰۰ و ۱۵۰ هکتوپاسکال) و همچنین در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، اریبی برای مدل HARMONIE کوچک‌تر است، اما در سایر ترازاها، مقادیر اریبی دو مدل کاملاً به یکدیگر شباهت دارند. برای انحراف معیار خطا، هر دو مدل تقریباً مقادیر یکسانی دارند. برای پیش‌بینی‌های ساعت 12UTC هر روز، خطای اریبی برای مدل HARMONIE در همه ترازاها به‌استثنای ۷۰۰ و ۲۰۰ هکتوپاسکال، کوچک‌تر است. انحراف معیار خطا برای هر دو مدل مشابه بوده اما برای پایین‌ترین تراز (۹۲۵ هکتوپاسکال) و دو تراز بالا (۱۰۰ و ۱۵۰ هکتوپاسکال)، میزان خطای مدل HARMONIE کمتر است.

۴-۲-۲-۴ سرعت و جهت باد

شکل ۱۰ نیم‌رخ‌های قائم امتیازهای درستی سنجی انحراف معیار و اریبی خطا را برای سرعت باد بر روی ۸ تراز فشاری استاندارد نشان می‌دهد. برای پیش‌بینی‌های ساعت 00UTC هر روز (شکل ۱۰-الف)، در دو تراز پایین (۹۲۵ و ۸۵۰ هکتوپاسکال) و سه تراز بالا (۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ هکتوپاسکال)، اریبی مدل HARMONIE کوچک‌تر است، اما در سایر ترازاها، دو مدل مقادیر مشابهی دارند. همچنین برای هر دو مدل و در همه ترازاها قائم مقادیر منفی اریبی مشاهده می‌شود. مقادیر انحراف معیار خطا در دو تراز ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال مشابه بوده، اما برای



(الف)



(ب)

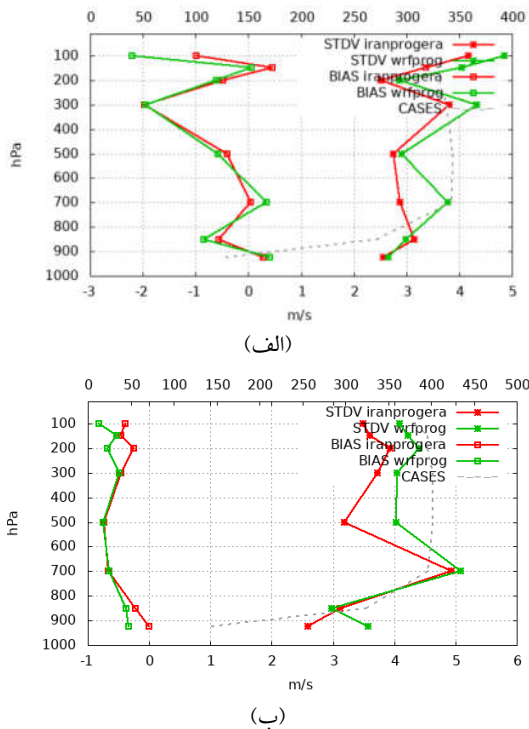
شکل ۸ مانند شکل ۵ ولی برای رطوبت ویژه تراز ۲ متر.

۴-۲-۴ ارزیابی نیم‌رخ‌های قائم

برای درستی سنجی میدان‌های پیش‌بینی در ترازاها بالا، داده‌های مشاهداتی ۶ ایستگاه رادیوگمانه در داخل حوزه مدل در پیش‌بینی‌های ۱۲، ۲۴، ۳۶، ۴۸، ۶۰ و ۷۲ ساعته مورد استفاده قرار گرفته است. تمام پیش‌بینی‌های آغازگری شده در ساعت‌های 00UTC و 12UTC در این بخش به کار رفته‌اند. در تحلیل نیم‌رخ‌های قائم با استفاده از امتیازهای درستی سنجی، توجه به تعداد کمتر مشاهدات در دو تراز قائم پایین (۹۲۵ و ۸۵۰ هکتوپاسکال) ضروری است، زیرا بعضی از ایستگاه‌های رادیوگمانه، در مناطق مرتفع واقع شده‌اند.

۴-۲-۴-۱ دما

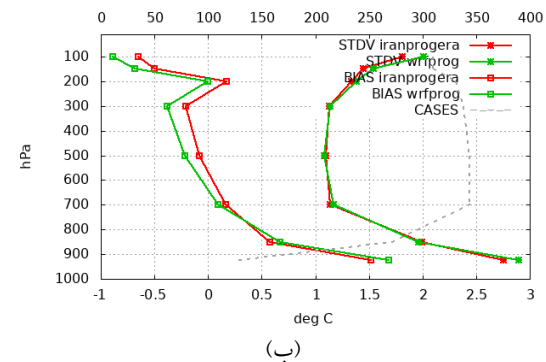
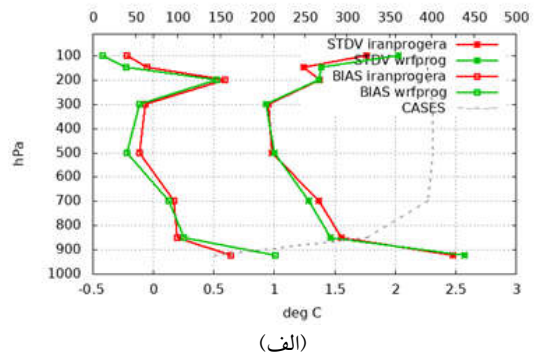
شکل ۹ نیم‌رخ قائم امتیازهای درستی سنجی انحراف معیار و اریبی خطا را برای دما بر روی ۸ تراز فشاری استاندارد



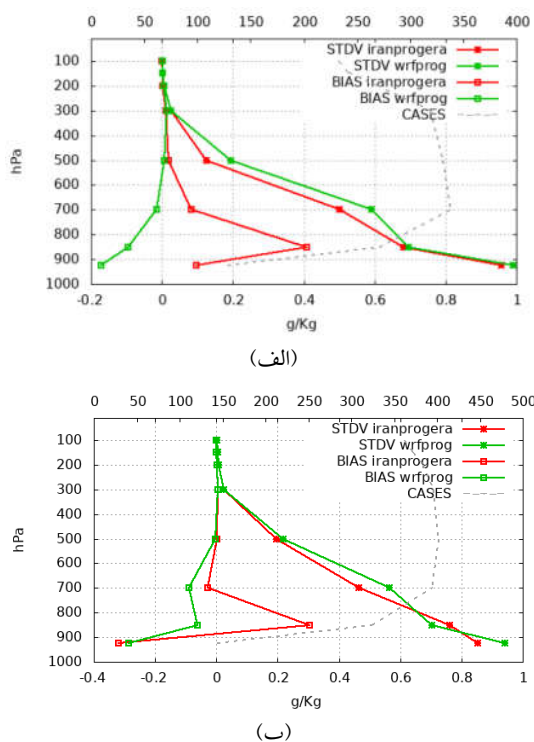
شکل ۱۰. مانند شکل ۹ ولی برای سرعت باد.

شکل ۱۱ نیم‌رخ‌های قائم امتیازهای مهارتی اریبی و انحراف معیار خطای جهت باد را بر روی ۸ تراز فشاری نشان می‌دهد. برای پیش‌بینی‌های ساعت ۰۰UTC هر روز (شکل ۱۱-الف)، در ترازهای بالاتر از ۵۰۰ هکتوپاسکال، اریبی هر دو مدل تقریباً نزدیک صفر و در مدل HARMONIE، اندکی کوچک‌تر است؛ بنابراین در ترازهای بالا، اریبی خطا بسیار کوچک و کمتر از ۴۰ است. برای دو تراز پایین (۹۲۵ و ۸۵۰ هکتوپاسکال)، علامت اریبی خطای دو مدل کاملاً متفاوت است. مقادیر بیشینه اریبی خطای هر دو مدل در ترازهای ۷۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال که در حوزه انتخابی نزدیک سطح هستند، قرار دارد. در همه ترازها، مقادیر انحراف معیار خطا برای مدل HARMONIE کوچک‌تر بوده، اما رفتار منحنی‌های خطا یکسان است. مقادیر بیشینه انحراف معیار خطا در دو تراز پایین (۹۲۵ و ۸۵۰ هکتوپاسکال) بوده و انحراف معیار

دیگر ترازها مدل HARMONIE مقادیر کمتری نسبت به مدل WRF دارد (به‌خصوص در ترازهای ۵۰۰ و ۹۲۵ هکتوپاسکال). برای پیش‌بینی‌های ساعت ۱۲UTC هر روز، اریبی خطای دو مدل شبیه است، اما مدل HARMONIE مقادیر کوچک‌تر اریبی در بالاترین تراز (۱۰۰ هکتوپاسکال) دارد. نوسان‌های بیشتر و مقادیر بزرگ‌تر اریبی در پیش‌بینی‌های آغازگری شده در ساعت ۱۲UTC نسبت به پیش‌بینی‌های آغازگری شده در ساعت ۰۰UTC دیده می‌شود. در بیشتر ترازها، مقادیر انحراف معیار خطای مدل HARMONIE از مدل WRF کوچک‌ترند.



شکل ۹. (الف) نیم‌رخ قائم اریبی (خطوط سمت چپ) و انحراف معیار (خطوط سمت راست) خطا برای شبیه‌سازی‌ها با مدل WRF (خط قرمز) و مدل HARMONIE (خط سبز) در ساعت ۰۰UTC (ب) در ساعت ۱۲UTC، برای کل دوره مطالعه. محور پایینی مقدار خطا و محور قائم ترازهای فشاری را نشان می‌دهد. همچنین تعداد نمونه‌های به کار رفته در درستی سنجی که با خطچین در داخل هر شکل نشان داده شده، در محور افقی بالای هر شکل مشخص شده است.



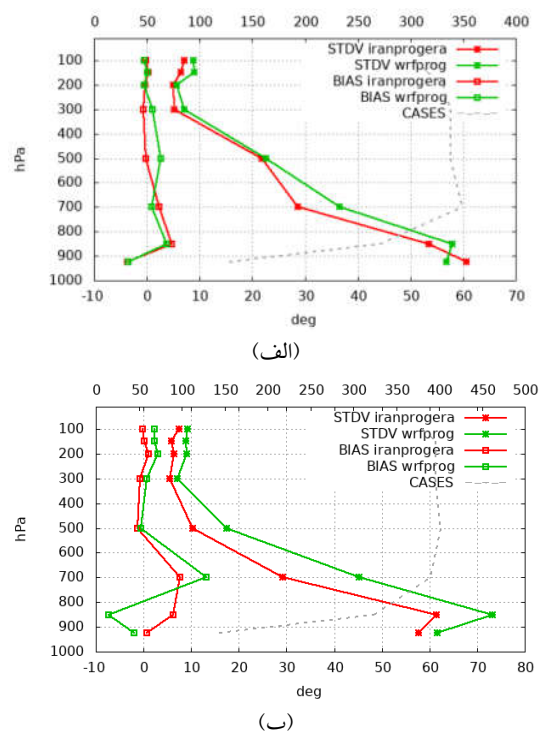
شکل ۱۲. مانند شکل ۹ ولی برای رطوبت ویژه.

۴-۲-۳ رطوبت ویژه (نسبت آمیختگی)

شکل ۱۲ نیم‌رخ قائم امتیازهای ارزیابی اریبی و انحراف معیار خطا را برای رطوبت ویژه در ۸ تراز فشاری استاندارد نشان می‌دهد. برای پیش‌بینی‌های ساعت 00UTC هر روز (شکل ۱۲-الف)، در ترازهای بالای ۵۰۰ هکتوپاسکال، اریبی خطای هر دو مدل تقریباً صفر است. برای ترازهای پایین‌تر از ۵۰۰ هکتوپاسکال، اریبی خطای مدل WRF همیشه منفی است، اما برای مدل HARMONIE، اریبی مثبت قوی (۰/۳ گرم بر کیلوگرم) در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال وجود دارد. کاهش بسیار شدید انحراف معیار خطا با افزایش ارتفاع وجود دارد. به‌طور کلی، مقادیر انحراف معیار خطای مدل HARMONIE کوچک‌ترند. برای پیش‌بینی‌های ساعت 12UTC هر روز، برای ترازهای بالای ۵۰۰ هکتوپاسکال، اریبی هر دو مدل تقریباً صفر است. برای ترازهای پایین‌تر از ۵۰۰

خطای هر دو مدل با افزایش ارتفاع به‌شدت کاهش می‌یابد (فقط بین ۸۵۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال).

برای پیش‌بینی‌های ساعت 12UTC هر روز (شکل ۱۱-ب)، در ترازهای بالای ۵۰۰ هکتوپاسکال، اریبی تقریباً نزدیک صفر (کمتر از 4°) است. در پایین‌تر از ۵۰۰ هکتوپاسکال، اریبی مدل WRF و HARMONIE بسیار مشابه می‌باشند. مقدار بیشینه اریبی (حدود 5°) برای هر دو مدل در ۷۰۰ هکتوپاسکال است. برای سه تراز قائم پایین (۹۲۵، ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال)، اریبی‌ها در 12UTC نسبت به 00UTC کوچک‌تر است. تقریباً در همه ترازها، مقادیر خطای انحراف معیار برای مدل HARMONIE کوچک‌تر هستند، اما روند این خطا در هر دو مدل مشابه می‌باشد. مقادیر بیشینه خطای انحراف معیار در ترازهای پایین (۹۲۵ و ۸۵۰ هکتوپاسکال) است. خطای انحراف معیار برای هر دو مدل با ارتفاع به‌شدت کاهش می‌یابد (فقط برای ترازهای بین ۸۵۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال).



شکل ۱۱. مانند شکل ۹ ولی برای جهت باد.

ضریب همبستگی و ریشه میانگین مربعات خطا، امتیازهای درستی‌سنجی در همه زمان‌های پیش‌بینی فقط اندکی تفاوت دارند، اما برای اریبی، مدل HARMONIE عملکرد بهتری دارد. به واسطه به‌کارگیری داده‌های بازتحلیل برای شرایط مرزی جانبی، افزایش زمان پیش‌بینی اثر قابل توجهی بر امتیازهای درستی‌سنجی ندارد.

نتایج برای دمای تراز ۲ متر، سرعت و جهت باد تراز ۱۰ متر و رطوبت ویژه (نسبت آمیختگی) در تراز ۲ متر، با استفاده از امتیازهای درستی‌سنجی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. رفتار مشابهی در هر دو مدل در امتیاز درستی‌سنجی انحراف معیار خطا یافت شد؛ اگرچه بعضی اختلاف‌های کوچک در بعضی زمان‌های پیش‌بینی مشاهده شد. اختلاف قابل توجه نتایج دو مدل مربوط به اریبی خطای رطوبت ویژه در تراز ۲ متر است (فرا تخمین رطوبت برای HARMONIE و فرو تخمین برای WRF). این رفتار می‌تواند به دلیل استفاده از طرحواره‌های فیزیک مختلف و همچنین نوعی از انطباق به شرط سطحی باشد. در تحقیقات آتی، تأثیر داده‌گذاری بر این نتایج مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

با ملاحظه نیم‌رخ‌های قائم اریبی و انحراف معیار خطا، شباهت‌ها و اختلاف‌هایی در ساختار قائم خطا در متغیرهای شبیه‌سازی شده دو مدل نشان داده شد. بیشترین شباهت (اختلاف) مربوط به اریبی و انحراف معیار خطا در نمایه‌های نیم‌رخ‌های دما (رطوبت ویژه در ۸۵۰ هکتوپاسکال) مشاهده شد. یک اریبی خشک برای مدل WRF در ترازهای پایین (برای نمونه: ۸۵۰ هکتوپاسکال) همان‌طور که نتایج درستی‌سنجی با داده‌های رادیوگمانه نشان داد، مشخص شد. همچنین این اریبی خشک برای رطوبت ویژه در تراز ۲ متر که با داده‌های سطحی راستی‌آزمایی درستی‌سنجی شد، نیز آشکار گردید که در طی زمان پیش‌بینی افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد که اریبی منفی یافت شده در بارش مدل WRF که آن هم با

هکتوپاسکال، اریبی همواره برای WRF منفی و در پایین‌ترین تراز بزرگ‌تر است، اما اریبی مثبت برای HARMONIE با مقدار بیشینه (۰/۴ گرم بر کیلوگرم) در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال وجود دارد. کاهش بسیار شدید انحراف معیار خطا با افزایش ارتفاع دیده می‌شود. به‌طور کلی، همانند پیش‌بینی‌های ساعت 00UTC، مقادیر انحراف معیار خطای مدل HARMONIE کوچک‌ترند.

۵ نتیجه‌گیری

مقایسه درونی شبیه‌سازی‌های دو مدل عددی منطقه‌ای (WRF-ARW و HARMONIE-AROME) برای یک دوره زمانی دو هفته‌ای (۱-۱۵ دسامبر ۲۰۱۳) بر روی منطقه‌ای کوهستانی در نیمه غربی ایران مورد بررسی قرار گرفت. هر دو مدل با تفکیک افقی بسیار بالا (۲/۵ کیلومتر) با هدف آشکارسازی پدیده‌های مقیاس همرفتی اجرا شده‌اند. درستی پیش‌بینی‌های ۱۲ تا ۷۲ ساعته آغازگری شده با داده‌های مرزی بازتحلیل ECMWF مورد آزمایش قرار گرفت و بعضی از متغیرهای هواشناسی انتخاب و ارزیابی شدند. با توجه به هدف این تحقیق، تنها به شبیه‌سازی صریح همرفت در شبیه‌سازی‌ها اکتفا شده است. منظور در اینجا بررسی اثرات پارامترسازی همرفت به‌طور ضمنی و جداسازی اثرات همرفتی از اثرات غیرهمرفتی نبوده است؛ بنابراین نیازی به تشریح اثرات همرفتی در این تحقیق دیده نشد و تأثیر افزایش تفکیک افقی در بهبود پیش‌بینی‌ها مورد توجه بوده است.

به‌طور کلی، مدل‌های WRF و HARMONIE عملکرد قابل مقایسه‌ای داشته‌اند؛ هر دوی آنها نتایج مشابهی برای برخی متغیرها و در بعضی از ترازهای فشاری در همه زمان‌های پیش‌بینی دارند. برای پیش‌بینی‌های بارش تجمعی ۲۴ ساعته، ضریب همبستگی، اریبی خطا و ریشه میانگین مربعات خطا برای مقایسه عملکرد هر دو مدل در منطقه یکسان مورد استفاده قرار گرفت. برای

کارهای آینده مورد توجه قرار خواهد گرفت. نتایجی که ارائه شد، گام اول در اصلاح شرایط اولیه مدل، مقایسه دو مدل با انجام آزمایش‌های مشابه و درک بیشتر در مورد رفتار آنها در منطقه‌ای با کوهساری و شرایط سطح پیچیده چون ایران بوده و برای رسیدن به اهداف مذکور بسیار دلگرم‌کننده هستند.

تشکر و قدردانی

از دانشگاه تهران و مؤسسه هواشناسی و هیدرولوژی سوئد (SMHI) برای در اختیار قرار دادن امکانات لازم برای انجام این کار پژوهشی تشکر می‌شود.

منابع

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.

قرایلو، م.، بیدختی، ع. و مزرعه‌فراهانی، م.، ۱۳۸۷، بررسی عددی تحول ابر همرفتی با استفاده از مدل ابر یک‌بعدی کج وابسته به زمان صریح ((ETTM): مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۵ (۳)، ۹۷-۱۱۶.

Brousseau, P., Berre, L., Bouttier, F., and Desroziers, G., 2011, Background-error covariances for a convective-scale data-assimilation system: AROME-France 3D-Var: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, **137**, 409-422.

Bryan, G. H., and Morrison, H., 2012, Sensitivity of a simulated squall line to horizontal resolution and parameterization of microphysics: Monthly Weather Review, **140**, 202-225.

Bryan, G. H., Wyngaard, J. C., and Fritsch, J. M., 2003, Resolution requirements for the simulation of deep moist convection: Monthly Weather Review, **131**, 2394-2416.

افزایش زمان پیش‌بینی بزرگ‌تر می‌شود، با این اریبی خشک مرتبط باشد. آغازگری ضعیف وضع سطح و شرایط خاک نیز ممکن است در پیدایش این اریبی خشک و به همراه آن اریبی منفی بارش سهم داشته باشد. تغییرات خیلی ناچیز امتیازهای درستی‌سنجی با زمان پیش‌بینی که در بالا برای بارش مورد بحث قرار گرفت، همچنین برای دیگر متغیرهای سطح و به‌ویژه برای متغیرهای ترازهای بالای دو مدل دیده شد (شکل‌ها در اینجا نشان داده نشده است). همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، این تغییر اندک با زمان پیش‌بینی از کاربست شرایط مرزی جانبی بازتحلیل ECMWF با کیفیت بالا ناشی می‌شود.

ارزیابی انجام شده در این تحقیق، در واقع درستی‌سنجی خروجی هر یک از مدل‌ها با مشاهدات موجود به‌طور مجزا و همچنین اعتبارسنجی نتایج مدل WRF با یک مدل میان‌مقیاس متداول دیگر (HARMONIE) می‌باشد. هدف در این قسمت از تحقیق این بوده است که ببینیم آیا دو مدل نتایج تقریباً مشابهی تولید می‌کنند یا نه؟ و اختلاف‌های اصلی در پیش‌بینی کدام متغیرها است؟ که این هدف در این تحقیق برآورده شده است. یافتن فراتخمین‌ها یا فروتخمین‌ها در این تحقیق، تنها به‌منظور برجسته کردن اختلاف‌های دو مدل بوده و گرچه طرحواره‌های فیزیکی مدل‌ها در پیش‌بینی مدل‌ها مؤثر هستند، اما داده‌گواری هم می‌تواند به همان اندازه مؤثر باشد. هدف در تحقیقات آتی، استفاده از داده‌گواری برای کم کردن فراتخمین‌ها و فروتخمین‌های خطا، با فرض طرحواره‌های فیزیکی ثابت می‌باشد که تأثیر داده‌گواری در کاهش این خطاها در هر دو مدل بر روی حوزه با تفکیک افقی بالا بررسی خواهد شد. در صورت بهبود در نتایج و کاهش خطاها، در مورد توجیه اختلاف‌ها می‌توان اظهار نظر نمود. البته توجه به طرحواره‌های متفاوت پارامترسازی فیزیکی نیز خود بخشی از مطلب است که در

- atmospheric data assimilation: *Monthly Weather Review*, **144**, 4489-4532.
- Johnson, A., Wang, X., Kong, F., and Xue, M., 2013, Object-based evaluation of the impact of horizontal grid spacing on convection-allowing forecasts: *Monthly Weather Review*, **141**, 3413-3425.
- Kain, J. S., Weiss, S. J., Bright, D. R., Baldwin, M. E., Levit, J. J., Carbin, G. W., Schwartz, C. S., Weisman, M. L., Droegemeier, K. K., Weber, D. B., and Thomas, K. W., 2008, Some practical considerations regarding horizontal resolution in the first generation of operational convection-allowing NWP: *Weather and Forecasting*, **23**, 931-952.
- Kain, J. S., Xue, M., Coniglio, M. C., Weiss, S. J., Kong, F., Jensen, T. L., Brown, B. G., Gao, J., Brewster, K., Thomas, K. W., Wang, Y., Schwartz, C. S., and Levit, J. J., 2010, Assessing advances in the assimilation of radar data and other mesoscale observations within a collaborative forecasting-research environment: *Weather and Forecasting*, **25**, 1510-1521.
- Kain, J. S., Weiss, S. J., Levit, J. J., Baldwin, M. E., and Bright, D. R., 2006, Examination of convection-allowing configurations of the WRF model for the prediction of severe convective weather: The SPC/NSSL Spring Program 2004: *Weather and Forecasting*, **21**, 167-181.
- Kumar Das, A., Bhowmick, M., Kundu, P. K., and Bhowmick, S. K. R., 2014, Verification of WRF rainfall forecasts over India during monsoon 2010: CRA method: *Geofizika*, **31**, 105-126.
- Lean, H. W., Clark, P. A., Dixon, M., Roberts, N. M., Fitch, A., Forbes, R., and Halliwell, C., 2008, Characteristics of high-resolution versions of the Met Office Unified Model for forecasting convection over the United Kingdom: *Monthly Weather Review*, **136**, 3408-3424.
- Mass, C. F., Owens, D., Westrick, and Colle, B. A., 2002, Does increasing horizontal resolution produce more skillful forecasts?: *Bulletin of the 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
- Bubnova, R. H., Bénard, G. P., and Geleyn, J. F., 1995, Integration of the fully elastic equations cast in the hydrostatic pressure terrain-following coordinate in the framework of the ARPEGE/Aladin system: *Monthly Weather Review*, **123**, 515-535.
- Clark, A. J., Gallus Jr., W. A., Xue, M., and Kong, F., 2009, A comparison of precipitation forecast skill between small near convection-permitting and large convection-parameterizing ensembles: *Weather and Forecasting*, **24**, 1121-1140.
- Colle, B. A., and Mass, C. F., 2000, The 5-9 February 1996 flooding event over the Pacific Northwest: Sensitivity studies and evaluation of the MM5 precipitation forecasts: *Monthly Weather Review*, **128**, 593-618.
- Coniglio, M. C., Correia Jr., J., Marsh, P. T., and Kong, F., 2013, Verification of convection-allowing WRF model forecasts of the planetary boundary layer using sounding observations: *Weather and Forecasting*, **28**, 842-862.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J. J., Park, B. K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J. N., and Vitart, F., 2011, The ERA-Interim reanalysis, configuration and performance of the data assimilation system: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **137**(656), 553-597.
- Done, J., Davis, C. A., and Weisman, M. L., 2004, The next generation of NWP, Explicit forecasts of convection using the Weather Research and Forecasting (WRF) model: *Atmospheric Science Letters*, **5**, 110-117.
- Hanna, S. R., and Yang, R., 2001, Evaluations of mesoscale models' simulations of near-surface winds, temperature gradients, and mixing depths: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **40**, 1095-1104.
- Houtekamer, P. L., and Zhang, F., 2016, Review of the ensemble Kalman filter for

- Powers, J. G., 2005, A description of the advanced research WRF, Version 2: National Center for Atmospheric Research Technical Notes, NCAR/TN-4681STR, 94 pp.
- Stull, R. B., 1988, An Introduction to Boundary Layer Meteorology: Springer, 666 pp.
- Vandenberg, M. A., Coniglio, M. C., and Clark, A. J., 2014, Comparison of next-day convection-allowing forecasts of storm motion on 1- and 4-km grids: *Weather and Forecasting*, **29**, 878–893.
- Wang, W., Bruyere, C., Duda, M., Dudhia, J., Gill, D., Kavulich, M., Keene, K., Lin, H. C., Michalakes, J., Rizvi, S., and Zhang, X., 2014, ARW version 3 modeling system user's guide: NCAR MMM.
- Weisman, M. L., Davis, C., Wang, W., Manning, K. W., and Klemp, J. B., 2008, Experiences with 0–36-h explicit convective forecasts with the WRF-ARW model: *Weather and Forecasting*, **23**, 407–437.
- Weisman, M. L., Skamarock, W. C., and Klemp, J. B., 1997, The resolution dependence of explicitly modeled convective systems: *Monthly Weather Review*, **125**, 527–548.
- 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.
- Zhang, D. L., and Zheng, W., 2004, Diurnal cycles of surface winds and temperatures as simulated by five boundary-layer parameterizations: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **43**, 157–169.
- Computing in Meteorology, W. Zwiefelhofer and N. Kreitz, Eds., World Scientific, 269–276.
- Pattanayak, S., and Mohanty, U. C., 2008, A comparative study on performance of MM5 and WRF models in simulation of tropical cyclones over Indian seas: *Current Science*, **95** (7), 923–936.
- Petch, J. C., 2006, Sensitivity studies of developing convection in a cloud-resolving model: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **132**, 345–358.
- Ronda, R. J., Steeneveld, G. J., and Holtslag, A. A. M., 2013, The performance of the mesoscale models WRF and HARMONIE for two contrasting fog events at the Cabauw research facility: *EMS Annual Meeting Abstracts*, **10**, 13th EMS.
- Schwartz, C. S., 2014, Reproducing the September 2013 recordbreaking rainfall over the Colorado Front Range with high resolution WRF model forecasts: *Weather and Forecasting*, **29**, 393–402.
- Schwartz, C. S., Kain, J. S., Weiss, S. J., Xue, M., Bright, D. R., Kong, F., Thomas, K. W., Levit, J. J., and Coniglio, M. C., 2009, Next-day convection-allowing WRF model guidance: A second look at 2-km versus 4-km grid spacing: *Monthly Weather Review*, **137**, 3351–3372.
- Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., Lac, C., and Masson, V., 2011, The AROME-France convective-scale operational model: *Monthly Weather Review*, **139**, 976–991.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., and

Inter-comparison of HARMONIE and WRF model simulations in convective-permitting scale over western area of Iran

Neyestani, Abolfazl¹, Sarmad Ghader^{2*}, Gustafsson, Nils³, and Alireza Mohebalhojeh⁴

¹Assistant Professor, Physics Department, Razi University, Kermanshah, Iran

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

³Associate Professor, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping, Sweden

⁴Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 05 February 2017, Accepted: 29 April 2017)

Summary

Ever increasing attention is being paid to the use of Numerical Weather Prediction (NWP) models in the convection-permitting mode for providing high-resolution forecasts. In such applications, the use of NWP models and comparison among the simulations of models help us to understand the problems associated with these scales and to unravel the systematic errors of the models.

In this study, two weeks of “model simulation experiments” have been conducted with the HARMONIE-AROME and the WRF-ARW meso-scale NWP models at 2.5 km horizontal resolution, in order to partly resolve convective phenomena on the same domain over the mountainous areas of the west of Iran for the period of 1–15 December 2013. All experiments have been conducted by using the ECMWF ERA-Interim reanalyses for the lateral boundary conditions, and for this reason, they are called “model simulation experiments”.

The HARMONIE Verification System has been used for the validation, and operational radiosonde and SYNOP observations from the ECMWF have been used for the verification. The precipitation observations from some climatological stations of Iran have also been used. The model simulations described in this study were run up to +72 h. The motivation for this long simulation time is to investigate any possible systematic model problems that could hide possible impact of data assimilation in the planned data assimilation forecast experiments.

Generally, the WRF and HARMONIE have a comparable performance, both of which have similar results for some variables at all forecast lead times. For 24-hour accumulated precipitation forecasts, the correlation coefficient, the bias and the root mean square error (RMSE) were used to compare the performance of both models over the same area. For the correlation coefficient and the RMSE, the WRF has slightly better verification scores at all lead times.

The results for the temperature at 2 m, wind speed and direction at 10 m, and specific humidity (mixing ratio) at 2 m are verified by using different verification scores. A similar behavior is found for both models in the error standard deviation (STDV) verification score; although some minor differences are observed at some lead times and for some variables. A more significant difference is related to the bias of specific humidity at 2 m for the WRF and HARMONIE as over-estimation of moisture for the HARMONIE and its under-estimation for the WRF.

Considering the upper air profiles of the bias and the STDV of the error, both similarities and differences were shown for the vertical structures of various quantities as obtained by the two model simulations. While the strongest similarity was seen in the bias and the STDV of the temperature error profiles, the relative humidity at 850 hPa exhibited the largest differences in both measures of error. A dry bias, which increased with the forecast time, was noticed for the WRF at low levels (850 hPa) as verified against the radiosonde data as well as the SYNOP data at 2 m level.

Keywords: NWP, convective scale, HARMONIE, WRF, Iran

*Corresponding author:

sghader@ut.ac.ir