

گزینش طرحواره همرفت بهینه بر مبنای داده‌های رادار در حین اجرای مدل WRF برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت بارش

محمود صفر^۱ و فرهنگ احمدی‌گیوی^{۲*}

۱. دانش‌آموخته دکتری هواشناسی، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

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

(دریافت: ۹۵/۱۱/۲۰، پذیرش نهایی: ۹۶/۳/۲)

چکیده

هدف این پژوهش بررسی و پاسخ به این سؤال است که «آیا می‌توان با استفاده از داده‌های سنجش از دور مانند برگشت‌پذیری قطبش افقی رادار، بدون درگیر شدن با حجم بسیار بالای داده‌پردازی در روش‌های داده‌گذاری، روند اجرای مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا را تسهیل کرد و دقت پیش‌بینی را افزایش داد؟» برای دستیابی به این هدف، علاوه بر طراحی و توسعه یک نرم‌افزار تحلیل داده‌های راداری، مدل پیش‌بینی عددی میان‌مقیاس وضع هوا WRF به‌نحوی توسعه یافته است که بر مبنای خروجی فراهم‌شده توسط مدل راداری و همچنین با نوآوری در بخش کنترل همرفت، تعیین بهترین طرحواره همرفت در حین اجرای مدل پیش‌بینی عددی، امکان‌پذیر باشد. مدل عددی توسعه‌یافته برای یک بازه زمانی ۱۲ ساعته به‌منظور بررسی چگونگی پیش‌بینی بسیار کوتاه‌مدت اجرا شده است. این آزمون با استفاده از ۸ پیکربندی طرحواره‌های فیزیکی و همچنین واردکردن داده‌های راداری انجام گرفته است که در مجموع ۴۰ اجرا را شامل می‌شود. به‌علاوه، در مطالعه موردی نیز رخداد یک تندروزه نسبتاً قوی در منطقه تهران در ساعت UTC ۲۳۳۰ روز ۳۰ مارس ۲۰۰۹ بررسی شده است.

بررسی نتایج با استفاده از شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا و همچنین همبستگی بین مقدار بارش پیش‌بینی‌شده با مقادیر ثبت‌شده دیدبانی، بیانگر بهبود پیش‌بینی بارش بسیار کوتاه‌مدت ۶ ساعته برای کل منطقه مورد مطالعه است. در این ارزیابی‌ها، آزمون انطباق الگوی بارش پیش‌بینی‌شده با بارش دیدبانی نشان داد که الگوی بارش پیش‌بینی‌شده تا حد زیادی با دیدبانی هم‌خوانی دارد و روش‌های آماری نیز مؤید افزایش همبستگی بین بارش پیش‌بینی‌شده به مقدار ۰/۱۵ برای اجرای مرجع و دیدبانی و همچنین کاهش ریشه میانگین مربعات خطا به مقدار ۰/۲ است. به‌علاوه، برای ایستگاه هواشناسی مهرآباد تهران، سری زمانی بارش، تهیه و تحلیل و ارزیابی شد که نتایج حاکی از تأثیر بسیار خوب داده‌های راداری بر کاهش سری زمانی ریشه میانگین مربعات خطا است.

واژه‌های کلیدی: رادار هواشناسی، مدل پیش‌بینی عددی وضع هوا WRF، داده‌گذاری، بارش پیش‌بینی‌شده، طرحواره همرفت، درستی‌سنجی.

۱. مقدمه

مرسوم به تعقیب اهداف راداری، نحوه رفتار پدیده در لحظات آتی پیش‌بینی می‌شود (نول و فلیشر، ۱۹۶۰؛ بارکلی و ویلک، ۱۹۷۰؛ اینفالت و همکاران، ۱۹۹۰؛ دیکسون و وینر، ۱۹۹۳؛ مولر و همکاران، ۲۰۰۳؛ ویلسون و همکاران، ۲۰۱۰). این روش برای مواردی که وقوع یک توفان قطعی به نظر می‌رسد، بسیار مفید است و نتایج خروجی با واقعیت رخ داده هم‌خوانی قابل قبولی دارد. در روش دوم، داده‌های راداری با استفاده از سامانه داده‌گذاری به روند محاسباتی مدل عددی اضافه شده و

صدور پیش‌هشدار برای پدیده‌های حادی جو مانند بارش‌های شدید ناشی از تندروزه‌ها یکی از علت‌های توسعه سامانه‌های پیش‌بینی بسیار کوتاه‌مدت در کنار استفاده از داده‌های راداری است؛ در این زمینه تحقیقات بسیاری انجام گرفته است (لوشین، ۱۹۷۶). کاربست داده‌های راداری در این سامانه‌های پیش‌بینی به دو روش صورت می‌گیرد (برونینگ و همکاران ۱۹۸۲). در روش اول، با استفاده از داده‌های راداری، الگوی پدیده مشخص شده و سپس با به‌کار بردن الگوریتم‌های بسیار پیچیده

همکاران (۱۹۹۶) و برویستر (۱۹۹۶) نیز با استفاده از طرحواره تصحیحات متوالی (successive corrections) و کاربست داده‌های باد شعاعی راداری در مدل ARPS، نتایج رضایت‌بخشی در پیش‌بینی میدان باد به دست آوردند.

سوگیموتو و همکاران (۲۰۰۸) با به کار بردن مدل عددی WRF (Weather, Research and Forecasting) با تفکیک افقی ۴ کیلومتر و بدون استفاده از طرحواره‌های همرفت، داده‌های باد شعاعی حاصل از اندازه‌گیری‌های ۲۵ رادار موجود در شبکه رادار هواشناسی ایالات متحده را برای روش وردشی سه‌بعدی استفاده کردند که نتیجه پیش‌بینی سه‌ساعته باد افقی در کل حوزه، کاهش ریشه میانگین مربعات خطا را نشان می‌دهد.

کایا و همکاران (۲۰۰۵) رهیافت آماری صافی کالمن همادی با صد عضو و رهیافت وردشی چهاربعدی را مقایسه کردند. برای کاهش خطای اولیه بین دو رهیافت و امکان مقایسه بین این دو روش، شرایط آغازگری رهیافت وردشی توسط رهیافت صافی کالمن همادی ایجاد شد. در این مقایسه، یک‌بار فقط از داده‌های باد شعاعی راداری استفاده شد و یک‌بار علاوه بر داده‌های باد شعاعی، داده‌های برگشت‌پذیری نیز وارد چرخه داده‌گذاری گردید. مشاهده شد که با کاربست داده‌های بیشتری از رادار، عملکرد روش همادی صافی کالمن بهبود پیدا کرده است؛ علاوه بر این که کاهش مقدار و پیچیدگی‌های محاسباتی ناشی از مدل کمکی و عملگر غیرخطی آن را نیز در پی داشته است. از دیگر پژوهش‌های مرتبط می‌توان به کار وانگ و همکاران (۲۰۱۴) اشاره کرد که با استفاده از روش وردشی چهاربعدی طرحواره خردفیزیک ابر کسلر را تصحیح کردند. همچنین سان و همکاران (۲۰۱۶) روش وردشی جدیدی برای اصلاح تکانه ارائه کردند.

معضل دوم استفاده از داده‌های راداری که پیش‌تر بیان شد، این است که روند پیش‌پروازش و کنترل کیفی داده‌های راداری باید توسط کاربر سامانه انجام گیرد و توسعه‌دهندگان مدل‌های عددی، هیچ سامانه‌ای در این

وضعیت میدان‌های محاسباتی مدل به سمت مقادیر واقعی تصحیح می‌شود (وانگ و همکاران، ۱۹۹۸؛ ژو و همکاران، ۲۰۰۲؛ بنجامین و همکاران، ۲۰۰۴؛ پیرس و همکاران، ۲۰۰۴؛ شرودر و همکاران، ۲۰۰۶؛ لیو و همکاران، ۲۰۰۸؛ ویلسون و همکاران، ۲۰۱۰؛ کوشین و همکاران، ۲۰۱۱).

روش‌های نوین داده‌گذاری راداری، شامل روش‌های وردشی سه‌بعدی و چهاربعدی و روش‌های مبتنی بر درون‌یابی بهینه هستند؛ همچنین استفاده از صافی کالمن با رویکردهای خطی و غیرخطی، رشد و گسترش داشته است (لورنس، ۱۹۸۶؛ قیل، ۱۹۸۹؛ دلی، ۱۹۹۱). داده‌گذاری راداری دارای دو معضل پیچیده است که اولین مورد آن مربوط به محاسبات بسیار زیاد در داده‌گذاری با کاربست داده‌های حجیم و متراکم راداری است؛ علاوه بر این که استفاده از محصولات برگشت‌پذیری رادار در مواقعی باعث نتیجه عکس در نتایج می‌شود. به طور کلی در کاربست داده‌های رادار، نوع داده مهم است. در صورتی که تنها از داده‌های برگشت‌پذیری رادار در روش‌های وردشی استفاده کنیم، با دشواری غیرخطی شدن مدل کمکی مواجه می‌شویم (سان و کروک، ۱۹۹۸). از سوی دیگر، به کار بردن داده‌های باد شعاعی که از رادار استخراج می‌شود، نیاز به منطبق‌سازی پیچیده با شبکه‌های محاسباتی مدل‌های عددی دارد.

صفر و همکاران (۱۳۹۱) با ورود داده‌های برگشت‌پذیری افقی رادار هواشناسی تهران، به صورت مستقیم (nudging) به مدل پیش‌بینی عددی ARPS (Advanced Regional Prediction System) مشاهده کردند در مناطقی که داده‌های رادار کیفیت مطلوب داشته و درگیر نوفه نبوده‌اند، پیش‌بینی کوتاه‌مدت بارش از بهبود چشم‌گیری برخوردار است. لین و همکاران (۱۹۹۳) و ویگنت و همکاران (۲۰۰۲) داده‌های باد شعاعی راداری را، مستقیم در مدل عددی استفاده کردند و برای شبکه‌بندی نزدیک به تفکیک مکانی داده‌های رادار، بهبود در نتایج پیش‌بینی میدان باد و اندازه بارش را ملاحظه کردند. آلبرز و

راداری بعد از طی روند کنترل کیفی به صورت منطبق با شبکه مدل‌سازی تبدیل شود. در گام دوم، مدل عددی برای خواندن اطلاعات فوق به صورت خودکار در هر گام زمانی، باید توسعه داده شود. در گام نهایی، با استفاده از روش‌های درستی‌سنجی پیش‌بینی‌های بسیار کوتاه‌مدت، نتایج حاصل از ترکیب دو مدل عددی و داده‌پردازی راداری تدوین‌شده، ارزیابی گردد. شکل ۱ به صورت کامل روند این پژوهش را نشان می‌دهد.

۲-۱. پردازش داده‌های راداری

داده‌پردازی راداری دارای سه بخش اصلی است؛ در بخش اول باید داده‌های راداری مورد نیاز رمزگشایی شود. با توجه به این که داده‌های رادارهای هواشناسی ایران با فرمت XML ذخیره می‌گردد، نیاز است که برنامه‌ای خاص برای رمزگشایی از این داده‌ها طراحی و نوشته شود. در بخش دوم، داده‌های راداری به کنترل کیفی نیاز دارند. در این مرحله با استفاده از روش‌های منطبق با مختصات داده‌های راداری، یک نرم‌افزار کنترل کیفی راداری طراحی و ارزیابی شد که نتایج آن در کار صفر و همکاران (۱۳۹۵) آمده است. رادار تهران از سمت شمال‌غرب متأثر از انتشار امواج نوار C است که پهنه بزرگی از این منطقه را کاملاً اشباع کرده و در محاسبات عددی منجر به خطاهای بزرگ می‌شود (صفر و همکاران، ۱۳۹۱). صافی به کاررفته در پژوهش حاضر نوفه این منطقه را نیز به طور مناسبی کاهش داده و کیفیت داده‌ها را اصلاح کرده است. کارایی صافی‌ها به تنظیم آستانه حساسیت آن‌ها بستگی دارد که بنابر کاربرد داده‌ها این آستانه باید انتخاب شود. برای درستی‌سنجی عملکرد صافی‌ها از یک مدل نوفه‌ساز با توزیع گاوسی استفاده شد و نوفه ناشی از اختلال الکترومغناطیسی نیز که ماهیت اضافه‌ای (به صورت مقداری اضافه‌شده به نوفه اصلی) دارد، به آن اضافه گردید.

در بخش سوم، لازم است ضمن تفکیک مناطق بارشی در داده‌های راداری، شدت و مکان بارش‌های همرفتی، تعیین

زمینه ارائه نکرده‌اند. صفر و همکاران (۱۳۹۵) یک روند کنترل کیفی داده‌های رادار هواشناسی تهران را ارائه کرده و برای یک مطالعه موردی نتایج آن را ارزیابی نمودند. همچنین آن‌ها سامانه پیش‌پردازش بومی رادارهای هواشناسی ایران را به صورت کاربردی، اجرا و نتایج را برای توسعه مدل‌های عددی استفاده کردند.

هدف پژوهش حاضر بررسی این موضوع است که آیا می‌توان به روش‌های نوین، با اضافه کردن محصولات سنجش از دور رادار مربوط به الگویابی پدیده‌های حدی جو به روند اجرای مدل‌های عددی میان‌مقیاس، بدون تحمیل هزینه محاسباتی سامانه داده‌گواری، نتایج خروجی مدل را بهبود بخشید؟ در پیش‌بینی مدل‌های عددی رایج با انتخاب یکی از طرحواره‌های متعدد پارامترسازی فیزیکی همرفت و همچنین روش‌های محاسباتی پیچیده در سامانه‌های داده‌گواری مواجه هستیم که به طور گسترده با موضوعاتی مربوط به خطاهای محتمل گسسته‌سازی، نحوه انطباق داده‌های اندازه‌گیری نامنظم به داده‌های منظم شبکه‌ای، نحوه جایگزینی مقادیر دیدبانی با متغیرهای مدل و خطاهای مربوط به دیدبانی درگیر است. سؤال اصلی و مهم آن است که «آیا می‌توان به راه‌حلی دست یافت که بدون مواجهه با این حجم وسیع اطلاعات و محاسبات پیچیده، با استفاده از روشی صریح وقوع پدیده خاصی را به مدل یادآوری کرد و ساختاری را در مدل بنیاد نهاد که با یادگیری، به طور مناسب یکی از طرحواره‌های فیزیکی همرفت را در هر گام زمانی و هر نقطه شبکه‌ای انتخاب کند؟

۲. روش کار

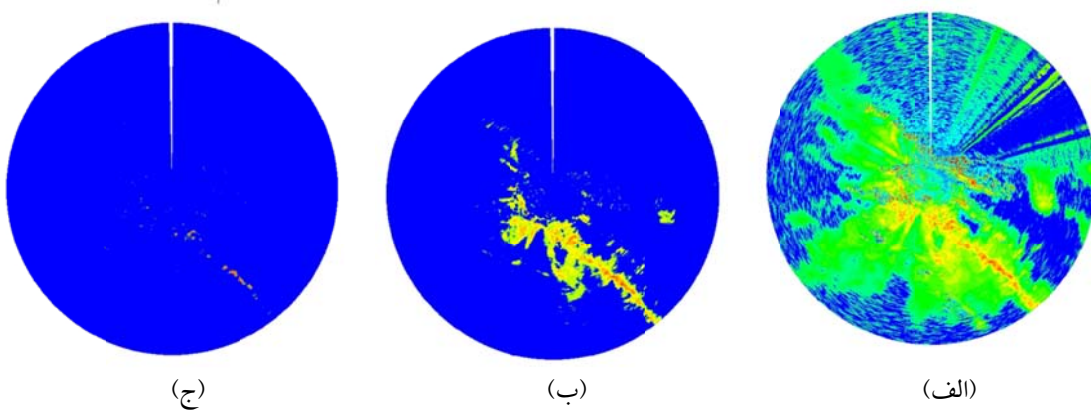
در این پژوهش سعی شده است با به‌هنگام‌سازی مدل WRF مطابق روش استاندارد ارائه‌شده از سوی طراحان و توسعه‌دهندگان مدل، امکان کاربست داده‌های راداری با استفاده از زیربرنامه‌ای نوشته‌شده در قسمت کنترل طرحواره‌های همرفت، فراهم شود. برای این منظور، سه گام عملی مورد نیاز است؛ در گام اول باید داده‌های

هستند؛ بنابراین پیش‌بینی می‌شود با توجه به طول عمر ابرهای همرفتی شدید در این عرض جغرافیایی، در دو یا حداکثر سه دسته داده راداری متوالی، شاهد شکل‌گیری، بلوغ و میرایی یک هسته همرفتی باشیم. در ادامه، با استفاده از ساختار افقی و قائم برگشت‌پذیری، مناطق بارش همرفتی و پوشنی، مشخص شده و بعد از طبقه‌بندی مناطق بارش همرفتی بر اساس مقدار برگشت‌پذیری به ۵ دسته شدت همرفت، زمان، مکان و شدت همرفت در یک پرونجاهی نوشته شده و به پرونجاهی اجرای مدل عددی ارسال می‌شود. شکل ۲ نمونه داده‌های اولیه رمزگشایی شده و همچنین منطقه همرفتی و محل مرکز یاخته‌های همرفت را نشان می‌دهد.

و با فرمت مشخصی برای استفاده در مدل عددی حاضر شود. برای تفکیک مناطق بارش همرفتی، الگوریتمی پیشرفته براساس فیزیک ابرهای همرفتی قوی طراحی و تولید شد که با توان تفکیک بالا، به دقت مناطق بارش همرفتی را مشخص می‌کند. در این مرحله یک پرونجاهی (file) ثبت‌کننده برای تعیین نقاط همرفت تولید می‌شود. محتویات این ثبت‌کننده، طول و عرض جغرافیایی محل رخداد همرفت در گستره پویش راداری، شدت همرفت با توجه به مساحت یاخته همرفت تشخیصی در پایین‌ترین زاویه تیلت آنتن (۵/۰ درجه) و همچنین زمان رخداد این پدیده به وقت UTC را شامل می‌شود. درخور ذکر است که داده‌های راداری استفاده شده در این پژوهش، دارای فاصله زمانی ۱۵ دقیقه و به‌هنگام شده توسط ایستگاه رادار



شکل ۱. روند کلی گزینش طرحواره همرفت بهینه بر مبنای داده های راداری در مدل WRF برای پیش‌بینی بارش کوتاه مدت.



شکل ۲. نمونه‌ای از داده‌های اولیه؛ الف: برگشت‌پذیری افقی، ب: خط همرفتی و ج: مرکز یاخته‌های همرفت.

۲-۲. توسعه مدل عددی WRF

در این مرحله، زیربرنامه پیش‌برنده طرحواره‌های همرفت در مدل عددی WRF، توسعه داده شده و با استفاده از برنامه‌های موجود در بسته این مدل که وظیفه تنظیم نقشه و تبدیل مناطق مطالعاتی به شبکه محاسباتی را دارند، داده‌های راداری با نقاط شبکه‌ای تنظیم می‌شوند. برای این کار، ابتدا تنظیمات نقشه استفاده‌شده در مدل به‌هنگام شده و داده‌های رادار، بر روی این نقشه که در پژوهش حاضر «المبرت» تعیین شده است، قرار می‌گیرند. بدین منظور با استفاده از زیربرنامه‌های مربوط به ایجاد شبکه محاسباتی در پرونجاهی مدل WRF و ایجاد نمایه لازم، این برنامه‌ها فراخوانی شده و با تعریف پرونجاهی اطلاعات راداری به‌عنوان ورودی، محل وقوع پدیده همرفت به‌صورت نمایه‌های i و j و همچنین زمان رخداد آن با توجه به گام زمانی اجرای مدل به‌عنوان خروجی تهیه می‌شود. سپس مشخصات شبکه‌ای متناظر با داده‌های راداری مشخص شده و پرونجاهی نهایی داده‌های رادار شامل شدت پدیده همرفت و همچنین محل وقوع پدیده بر روی مختصات مدل برای پردازش‌های بعدی فراهم می‌شود.

مدل WRF برای انتخاب طرحواره همرفت انعطاف‌پذیر بوده و دارای حق انتخاب در هر بازه مکانی و هر گام زمانی است؛ بنابراین باید تغییرات لازم در همه لایه‌های مدل انجام گیرد. شکل ۳ طرحواره‌ای از این تغییرات را

نشان می‌دهد. در مرحله اول، باید متغیرهای جدیدی را که برای توسعه مدل لازم است، به‌صورت سلسله‌مراتبی در مسیر جریان داده‌ای مدل تعریف کرد که پرونجاهی ثبیتی مدیریت این بخش را برعهده دارد؛ بنابراین با معرفی یک متغیر جدید در بخش تعاریف طرحواره‌های همرفت شرایط لازم برای ایجاد یک روند برای انتخاب طرحواره بهینه با استفاده از الگوی راداری فراهم گردید (شکل ۴). اگرچه هدف این پژوهش طراحی یک طرحواره همرفت بر مبنای اصول فیزیکی یا ترمودینامیکی با رهیافت جدید نیست، ولی برای انسجام کار و عدم تغییر در برنامه‌های استاندارد مدل عددی، این‌گونه طراحی شد که با انتخاب یک عدد (پارامتر) در فایل «لیست نام‌ها»، پردازش‌های جدید صورت می‌پذیرد. در مرحله بعد، با گسترش این پارامتر در مسیر داده‌ای مدل به پایین‌ترین لایه مدنظر، یعنی لایه پیش‌برنده طرح‌واره‌های همرفت، این پارامتر تعریف و متغیرهای لازم آن به‌صورت مناسب مشخص شد (شکل ۵). همچنین همه پودمان‌های (modules) لازم که در بخش‌های دیگر مدل کاربرد دارند، مانند پودمان‌های مربوط به خواندن فایل‌های خارجی اضافه، پودمان‌های مربوط به انطباق داده‌ها با نقشه جغرافیایی استفاده‌شده و در نهایت پودمان‌های مورد نیاز در بخش تبدیل داده‌ها از عرض و طول جغرافیایی به شبکه مدل‌سازی، در لایه پیش‌برنده آدرس‌دهی شدند.



شکل ۳. طرحواره به هنگام رسانی معماری مدل عددی.

package	kfetascheme	cu_physics==1	-	-
package	bmjscheme	cu_physics==2	-	-
package	gdscheme	cu_physics==3	-	-
package	sasscheme	cu_physics==84	-	-
package	osasscheme	cu_physics==4	-	-
package	g3scheme	cu_physics==5	-	state:cugd_qvten,cugd_tten,cugd_
package	camzmscheme	cu_physics==7	-	state:precz,zmdt,zmdq,zmdice,zmd
package	g3tave	cu_diag==1	-	state:GD_CLOUD,GD_CLOUD2,GD_CLDF
package	tiedtkescheme	cu_physics==6	-	-
package	nsasscheme	cu_physics==14	-	-
package	kfscheme	cu_physics==99	-	-
package	safarscheme	cu_physics==199	-	-

شکل ۴. اضافه کردن یک طرحواره همرفتی به مدل عددی در بخش ثبتي.

```

!-----
USE module_model_constants
USE module_state_description, ONLY:      KFScheme, BMJScheme      &
                                           ,KFETAScheme, GDScheme      &
                                           ,G3Scheme, SAFARScheme      &
                                           ,P_QC,P_QI,Param_FIRST_SCALAR &
                                           ,CAMZMScheme, SASScheme      &
                                           ,OSASScheme                &
                                           ,NSASScheme                &
                                           ,TIEDTKEScheme

! *** add new modules of schemes here
USE module_llxy
USE module_cu_kf      , ONLY : kfcp
USE module_cu_bmj     , ONLY : bmjdrv
    
```

شکل ۵. اضافه کردن طرحواره به کاررفته در لایه پيش برنده همرفت.

پیش‌فرض ۱۲ ساعت در نظر گرفته شده است (۶ ساعت برای زمان تنظیم و ۶ ساعت برای پیش‌بینی بسیار کوتاه‌مدت)، مدل با اسکریپت‌های نوشته‌شده در محیط لینوکس اجرا می‌شود. شایان‌گفتن است که در حین اجرای مدل، اگر داده‌های راداری جدید دریافت شوند و بعد از تغییر فرمت زمان - مکان این داده‌ها اطمینان حاصل شود که داده‌های راداری در بازه گام زمانی مناسب مدل عددی هستند و در واقع از نظر زمانی سوخته نیستند، این داده‌های جدید نیز در روند اجرای مدل استفاده می‌شوند. در غیر این صورت، با استفاده از حلقه تصمیم‌گیری، یک اجرای جدید و جداگانه برای مدل توسط سامانه شروع می‌شود.

۲-۳. روش اجرای مدل عددی و نحوه درستی‌سنجی
مطالعه مورد نظر به ۳۱ مارس ۲۰۰۹ مربوط و با فعالیت قوی پرفشار سبیری همراه با سه زبانه پرفشار واقع در شمال‌غرب، شمال و شمال‌شرق ایران و همچنین ورود کم‌فشار قوی مدیترانه‌ای همراه با رطوبت بالا و کم‌فشار کم‌عمق دریای سرخ از سمت جنوب‌غرب به کشور هم‌زمان است. همبستگی منفی بین دمای سطح دریای خلیج فارس و وقوع بارش گسترده و شدید این نوع سامانه‌ها پس از عبور از کوهساری زاگرس به صورت مستقل، موضوع تحقیق بسیاری از اقلیم‌شناسان و هواشناسان کشور بوده و بدین صورت بارش سامانه مستقل پس از عبور از منطقه گرم و خشک شمال‌شرق عربستان توجیه شده است. مدل عددی به کار رفته در این پژوهش در سه حوزه تودرتو شامل حوزه‌های بیرونی، میانی و درونی با گام شبکه‌ای به ترتیب ۴۵، ۱۵ و ۵ کیلومتر اجرا شده است (شکل ۶). علت انتخاب این گام‌های شبکه‌ای استفاده از طرحواره همرفت در هر سه حوزه است؛ در واقع با توجه به راهنمای کاربری مدل، برای گام شبکه‌ای بیش از ۳ کیلومتر، به تعیین طرحواره همرفت در تنظیمات نیاز است.

در ادامه با استفاده از استانداردهای لازم و انتشاریافته توسط توسعه‌دهندگان مدل، روندی جدید برای کنترل روند اجرای مدل عددی، طراحی و برنامه‌های مورد نیاز طبق استاندارد مدل نوشته شد. نکته مهم در این برنامه آن است که برای ارزیابی نمونه مورد مطالعه، شرایط لازم برای اجرای طرحواره همرفت بتس-میلر-یانچ (Betts-Miller-Janjic; BMJ) (بتس و میلر، ۱۹۸۶؛ یانچ، ۱۹۹۴ و ۲۰۰۲) به صورت متوالی، بررسی و با توجه به نوع همرفت مشخص‌شده توسط رادار، این طرحواره برای گام زمانی معین و نقطه شبکه‌ای مورد نظر اجرا شده و در بقیه نقاط شبکه از طرحواره کین-فریچ (Kain-Fritsch) (کین و فریچ، ۱۹۹۰ و ۱۹۹۳؛ کین، ۲۰۰۴) استفاده می‌شود. برای این منظور، طرحواره همرفت BMJ نیز بررسی شد و با ایجاد تغییرات لازم در آن، اجرای این طرحواره در نقاط خاص ممکن شد. در نهایت، نتیجه همرفت برای مجموعه شبکه مدل‌سازی، به صورت کلی در آرایه‌های گرایش همرفت جمع گردید.

الگوریتم به کار رفته در مدل عددی برای انتخاب طرحواره همرفت بهینه بدین صورت است که در اجرای عادی مدل و به منظور حفظ پایداری و عدم بروز گسستگی در میدان‌های محاسباتی، طرحواره همرفت کین-فریچ برای اجرای سه شبکه بیرونی، میانی و درونی به صورت پیش‌فرض فعال است. در شرایطی که مدل راداری بعد از مراحل کنترل کیفی و داده‌پردازی، یک هسته همرفتی را شناسایی کند، با مشخص شدن زمان، مکان و شدت توفان، پرونیج‌ای (فایل) ثبت‌کننده این اطلاعات را در زیرشاخه run مدل WRF به هنگام‌سازی می‌کند. از سوی دیگر، روند فراخوانی طرحواره‌ها بر اساس داده‌های مشاهداتی اضافه‌شده به مدل عددی، در هر گام زمانی ثبت‌کننده اطلاعات راداری را بررسی کرده و در صورت وجود اطلاعات جدید، روند اجرای مدل را تغییر می‌دهد. ضمن ایجاد تغییرات لازم در زمان اجرای مدل که به صورت



شکل ۶. سه حوزه محاسباتی اجرای مدل WRF. حوزه بیرونی دارای گام شبکه‌ای ۴۵ کیلومتر، حوزه میانی، ۱۵ کیلومتر و حوزه درونی، ۵ کیلومتر در هر دو راستای عرض و طول جغرافیایی است.

مشابه روند اول اجرا شده است، ولی مدل مجاز به استفاده از داده‌های رادار در ۶ ساعت دوم است و داده‌های معتبر نرم‌افزار راداری در ساعاتی که پیش‌بینی در آن‌ها مد نظر است، تحلیل و ارزیابی می‌شود. علت ایجاد روند دوم در ارزیابی پیش‌بینی بارش این موضوع است که ممکن است در لحظات ابتدایی پیش‌بینی مدل عددی و درست در زمان اتمام اجرای اسپین آپ مدل، داده راداری جدیدی در دسترس قرار گرفته باشد. لازم است بررسی شود این داده‌ها که در زمان اسپین آپ وارد مراحل پیش‌بینی نشده است، به چه نحوی در نتایج خروجی تأثیر می‌گذارند.

درستی‌سنجی نتایج مدل عددی WRF طی دو مرحله طراحی شده است. در مرحله اول، مطابقت بارش پیش‌بینی شده مدل با بارش ثبت شده در ۶ ساعت اول روز ۳۱ مارس ۲۰۰۹ از نظر همبستگی مکانی ارزیابی می‌شود. در مرحله دوم، جزئیات بارش با استفاده از استخراج مقادیر پیش‌بینی در محل دقیق ایستگاه‌ها از دید آماری و همچنین پارامترهای تکه‌ای مکانی بررسی می‌شود. در این پژوهش بر مبنای ابرت و مک برای (۲۰۰۰) مناطق مختلف بارشی را تفکیک کرده و خطای بارش در هر منطقه به خطای ناشی از تخمین نادرست مکانی، خطای موجود در برآورد بارش و خطای باقیمانده تقسیم شده است.

مدل عددی WRF با هشت پیکربندی متفاوت از طرحواره‌های فیزیکی با استفاده از داده‌های تحلیل نهایی مرکز ملی پیش‌بینی محیطی (NCEP/FNL) با تفکیک افقی ۱ درجه در دو راستای طول و عرض جغرافیایی به صورت دو روند کلی اجرا شده است که جزئیات آن به تفصیل در جدول ۱ دیده می‌شود. با توجه به جدول، در مجموع ۴۰ اجرا به صورت ۵ دسته ۸ تایی انجام گرفته است. در دسته اول با به کار بردن هشت پیکربندی ترکیبی متنوع، بدون استفاده از داده‌های راداری، مدل برای ساعت UTC ۱۸۰۰ روز ۳۰ مارس ۲۰۰۹ تا ساعت UTC ۰۶۰۰ روز ۳۱ مارس برای هر سه حوزه انتخابی، اجرا شد و نتایج به دست آمد.

همان‌طور که گفته شد، در اجرای مدل عددی دو روند در نظر گرفته شده است. در روند اول، ۶ ساعت اول از اجرای مدل به عنوان زمان تنظیم (spin up) فرض شده و داده‌های راداری مؤثر نیز به صورت همزمان پردازش شده است. در دقایق انتهایی ۶ ساعت اول، یعنی در ساعات ۰۵۱۵، ۰۵۳۰ و ۰۵۴۵ از زمان شروع اجرای مدل، «طرحواره توسعه یافته» در بخش همرفت مدل عددی، مجاز به استفاده از داده‌های خروجی نرم‌افزار راداری برای تغییر در طرحواره‌های همرفت، براساس برگشت‌پذیری و مکان‌یابی یاخته‌های همرفتی است. در روند دوم، مدل

جدول ۱. چهل پیکربندی اجرای مدل (در قالب ۵ دسته ۸ تایی) با استفاده از طرحواره‌های فیزیکی و داده‌های رادار به صورت ترکیبی مختلف؛ دو ستون سمت چپ مربوط به زمان استفاده از داده‌های رادار در ۶ ساعت اول یا ۶ ساعت دوم از زمان اجرای مدل است که علامت «ستاره» زمان استفاده از هریک از آن‌ها را نشان می‌دهد. d01 تا d03 معرف سه شبکه تودرتوی محاسباتی هستند.

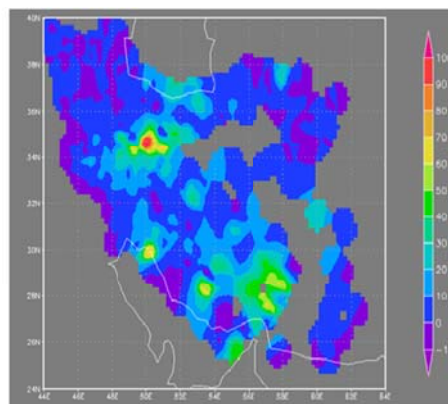
شماره دسته اجرا	پیکربندی	خرم فیزیک	تابش موج بلند	تابش موج کوتاه	فیزیک سطح	لایه مرزی	طرحواره همرفت			زمان استفاده از داده‌های رادار	
							شبکه بزرگ (d01)	شبکه میانی (d02)	شبکه کوچک (d03)	روز ۳۰ مارس 1800 UTC	روز ۳۱ مارس 0600 UTC
۱	۱	WSM 3	rstm	Dudhia	Noah-MP	YSU	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch		
	۲	Ferrier	GFDL	GFDL	Noah-MP	MYJ	BMJ	BMJ	BMJ		
	۳	Ferrier	rstm	Dudhia	Noah-MP	YSU	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch		
	۴	WSM 6	rstm	Dudhia	Noah-MP	YSU	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch		
	۵	Thompson	Rrtm	Dudhia	Noah-MP	YSU	BMJ	BMJ	BMJ		
	۶	WSM 6	Rrtm	Dudhia	Noah-MP	YSU	BMJ	BMJ	BMJ		
	۷	Thompson	Rrtm	Dudhia	Noah-MP	YSU	Grell-Freitas ensemble	Grell-Freitas ensemble	Grell-Freitas ensemble		
	۸	Thompson	Rrtm	Dudhia	Noah-MP	MYJ	Grell-Freitas ensemble	Grell-Freitas ensemble	Grell-Freitas ensemble		
۲	۸ اجرا مانند اجرای دسته شماره یک با به کار بردن داده‌های رادار در ۶ ساعت اول و در شبکه کوچک									*	Radar Scheme
۳	مانند دسته دوم ولی با به کار بردن داده‌های رادار در دو شبکه کوچک و میانی									*	Radar Scheme
۴	مانند دسته سوم ولی با به کار بردن داده‌های رادار در ۶ ساعت اول و ۶ ساعت دوم									*	Radar Scheme
۵	مانند دسته دوم ولی با به کار بردن داده‌های رادار در ۶ ساعت اول و ۶ ساعت دوم									*	Radar Scheme

۳. نتایج

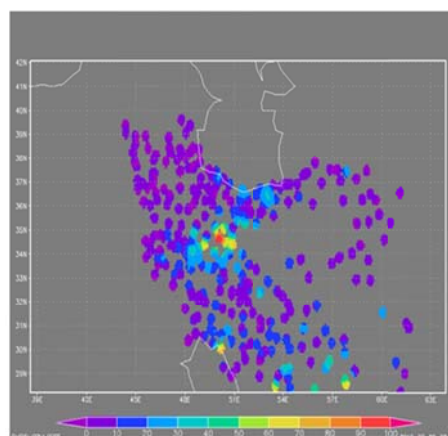
کمبود داده‌های دیدبانی باعث به وجود آمدن نقاط خالی از داده در مناطق مرکزی و نواحی مرزی کشور شده است. با محاسبه ضریب همبستگی مکانی در کل حوزه مورد بررسی، ضرایب همبستگی بین پیکربندی‌های اجرای مدل و مقادیر دیدبانی نیز به دست آمد که نتایج آن در شکل ۸ دیده می‌شود. در این شکل، محور افقی نشان‌دهنده شماره پیکربندی مورد استفاده (از ۴۰ پیکربندی) و محور قائم نشان‌دهنده مقدار ضریب همبستگی بین بارش ثبت شده و پیش‌بینی توسط مدل با کاربست پیکربندی مربوطه است.

در مرحله اول دقت پیش‌بینی‌های صورت گرفته از لحاظ تطبیق با الگوی بارش دیدبانی ارزیابی شده است. بدین منظور ابتدا بارش‌های دیدبانی شده با استفاده از روش درون‌یابی ایستگاه به نقاط شبکه نرم‌افزار GrADS مبتنی به درون‌یابی کرسمن به سه شبکه مدل‌سازی بزرگ، میانی و کوچک درون‌یابی شده و سپس ضریب همبستگی مکانی این دو دسته داده محاسبه گردیده است. شکل ۷ نقشه بارش دیدبانی درون‌یابی شده بر روی نقاط شبکه‌ای را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشخص است،

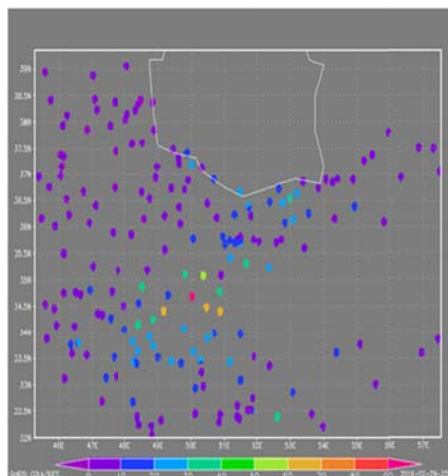
طبق شکل ۸-الف مربوط به شبکه d01، مقادیر ضریب همبستگی مکانی بین ۰/۲۹ و ۰/۳۳ است که برای اجراهای شماره ۲۱ و ۳۷ بیشینه مقدار و برای اجرای شماره ۵ کمینه مقدار به دست آمده است. شکل ۸-ب نشان می‌دهد برای شبکه d02 مقادیر ضریب همبستگی بهتری در مقایسه با d01 به دست آمده است که یکی از دلایل آن را می‌توان دقت بیشتر این شبکه از لحاظ تفکیک مکانی دانست. مقادیر بیشینه در این شبکه در حدود ۰/۴۹ مربوط به اجرای شماره ۸ و کمینه آن برابر ۰/۳۶ مربوط به اجرای شماره ۳ است؛ برای اجرای شماره ۲۱ مقدار به دست آمده برابر ۰/۴۳ است که در رتبه دوم قرار دارد. نکته شایان ذکر آن است که با توجه به این شکل و دسته‌های ۸ تایی در جدول ۱، ضرایب همبستگی اجراهایی که از داده‌های راداری بیشتری استفاده کرده‌اند دارای میانگین بیشتر و انحراف از معیار کمتری هستند. در شکل ۸-ج مربوط به d03 مشاهده می‌شود که مقدار همبستگی مکانی افزایش یافته است و این امر می‌تواند به علت بهبود گام شبکه‌ای به ۵ کیلومتر و همچنین قابل مقایسه بودن تفکیک مکانی مدل عددی و داده‌های راداری باشد. در این شبکه، بیشترین همبستگی برای اجرای شماره ۸ با مقدار ۰/۶۵ و کمترین همبستگی برای اجرای شماره ۳ با مقدار ۰/۳۵ به دست آمده است. با توجه به شکل‌های ۸-الف تا ۸-ج نتیجه می‌شود که اجرای شماره ۲۱ (با به کار بردن طرحواره راداری و ورود داده‌ها در دو بازه زمانی) و اجرای شماره ۸ دارای بیشترین تطبیق الگوی بارش پیش‌بینی شده با ثبت شده هستند. براساس شکل‌های ۸-الف و ۸-ب، اجرای شماره ۲۱ در هر سه شبکه عملکرد خوبی داشته است؛ اگرچه با در نظر گرفتن پیچیدگی‌های مرتبط با پیش‌بینی بارش و همچنین محدودیت تعداد ایستگاه‌ها در این بررسی، نتیجه اکثر پیش‌بینی‌ها مورد قبول است.



(الف)



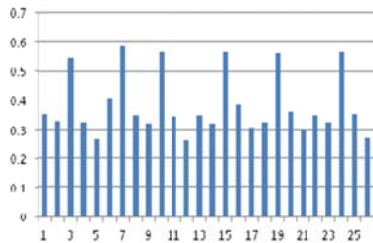
(ب)



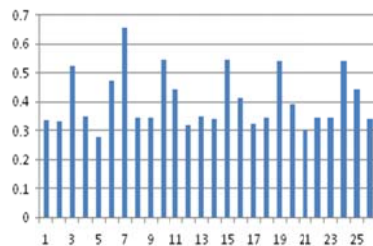
(ج)

شکل ۷. مقادیر بارش دیدبانی شده بعد از درون‌یابی بر روی شبکه‌های مدل‌سازی؛ الف: شبکه بزرگ (d01)، ب: شبکه میانی (d02) و ج: شبکه کوچک (d03).

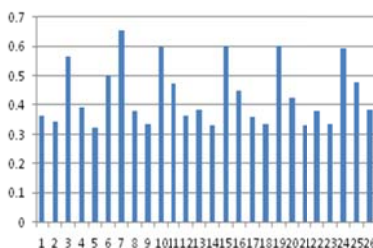
ایستگاه‌ها به‌عنوان خروجی با مقادیر ثبت‌شده مقایسه گردید. منظور از این کار، ارزیابی خطای مقدار بارش ثبت‌شده است. شکل ۹ ضریب همبستگی بین مقادیر بارش ثبت‌شده و پیش‌بینی را برای سه شبکه مدل‌سازی نشان می‌دهد. نکته درخور توجه آن است که این ارزیابی برای ۲۶ اجرایی صورت گرفته است که بیشترین تطبیق الگوی بارش پیش‌بینی را با الگوی دیدبانی داشتند. طبق شکل ۹، ضریب همبستگی مقادیر بارش ثبت‌شده و پیش‌بینی‌شده عمدتاً بین ۰/۳ و ۰/۶ قرار دارد و الگوی موجود در سه شبکه تقریباً یکسان است. مقادیر بیشینه مربوط به پیکربندی شماره ۴ از سایر دسته‌ها است که تقریباً مقدار مساوی دارند.



(الف)

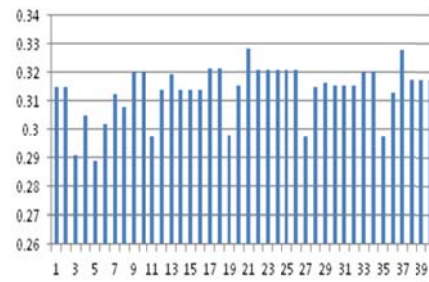


(ب)

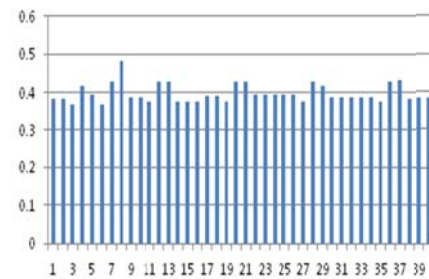


(ج)

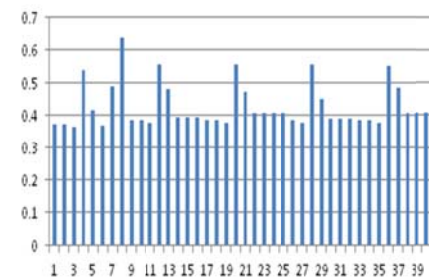
شکل ۹. ضریب همبستگی بین مقدار بارش دیدبانی و پیش‌بینی برای تعیین بیشترین دقت در پیش‌بینی مقدار بارش؛ الف: شبکه d01، ب: شبکه d02 و ج: شبکه d03.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۸. ضریب همبستگی مکانی بین بارش دیدبانی و پیش‌بینی برای تعیین بیشترین دقت در پیش‌بینی الگوی بارش؛ الف: شبکه d01، ب: شبکه d02 و ج: شبکه d03. در این شکل‌ها محور افقی شماره اجرای مدل ذکرشده در جدول ۱ است.

در مرحله دوم، به‌صورت مستقیم ضریب همبستگی بین مقدار بارش ثبت‌شده ایستگاهی و مقدار بارش پیش‌بینی‌شده برای یک بازه جغرافیایی مشخص از کشور، شامل طول جغرافیایی ۴۸ تا ۶۰ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۰ تا ۳۷ درجه شمالی برای شبکه‌های d01 و d02 و طول جغرافیایی ۴۸ تا ۵۴ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۳/۵ تا ۳۷ درجه شمالی برای شبکه d03، محاسبه شده است. در این مرحله با استفاده از امکانات tslist مدل عددی، مقدار بارش پیش‌بینی‌شده در محل

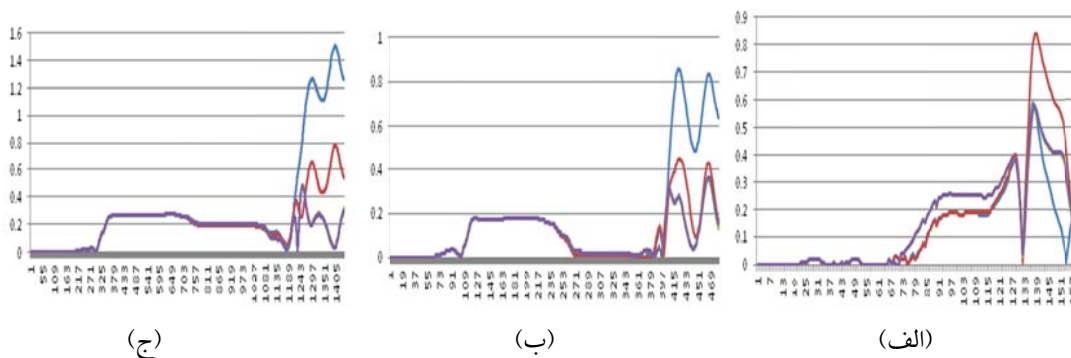
دیگر است (۱۶۰ گام زمانی خروجی در شبکه بزرگ، ۴۸۰ گام زمانی برای شبکه میانی و ۱۴۴۰ گام زمانی خروجی برای شبکه کوچک). هرچند خروجی مدل بدون استفاده از داده‌های راداری نیز دارای خطا است، ولی مقصود از کاربست این روش، نشان‌دادن تأثیر هدایت داده‌های رادار در تغییر طرحواره همرفت برای اصلاح نتایج است.

تحلیل نتایج حاصل و ارزیابی موردی فوق (شکل ۱۰) مانند افزایش نسبی ضریب همبستگی و همچنین کاهش خطای کمترین مربعات، بیانگر آن است که استفاده از طرحواره اضافه‌شده به همرفت در مدل عددی و همچنین سامانه کنترل ثبات راداری طراحی شده، عملکرد موفق‌تری در هم‌خوانی بیشتر الگوی مکانی و مقدار بارش پیش‌بینی‌شده و دیدبانی یا به تعبیری کاهش مقدار ریشه میانگین مربعات خطا در مورد الگو و مقدار بارش، چه در بازه زمانی تنظیم مدل عددی و چه در بازه زمانی پیش‌بینی عملی مدل عددی، داشته است.

ارزیابی موردی انجام گرفته برای بررسی عملکرد مدل عددی و سامانه راداری، به ایستگاه همدیدی مهرآباد مربوط است که دلیل انتخاب آن در وهله اول، وجود تجهیزات مدرن و قابل اطمینان در ثبت بارش و در وهله دوم، موقعیت بسیار مهم این ایستگاه دیدبانی هواشناسی است. روش ارزیابی نتایج در این نقطه بدین صورت است که براساس نتایج کلی به‌دست‌آمده در بخش قبل، پیکربندی‌هایی که در همه اجراها عملکرد بهتری داشته‌اند (جدول ۱)، مشخص و با نتایج حاصل از همان پیکربندی بدون استفاده از داده‌های رادار مقایسه شده‌اند و ریشه میانگین مربعات خطا محاسبه و رسم شده است (شکل ۱۰). همان‌طور که ذکر شد، در جدول ۲ اجراهایی انتخاب شده است که در مرحله قبل دارای بهترین نتیجه بوده‌اند و همچنین با افزودن سامانه راداری، عملکرد این اجراها بهبود یافته است. علت انتخاب این روش ارزیابی، زیاد بودن فاصله زمانی داده‌های دیدبانی بارش (هر سه ساعت) از یک سو و متراکم‌بودن داده‌های مدل از سوی

جدول ۲. پیکربندی‌های مختلف که با استفاده و بدون استفاده از سامانه راداری دارای بهترین عملکرد در ایستگاه مهرآباد بوده‌اند. دو ستون سمت چپ بیانگر استفاده از داده‌های رادار در ۶ ساعت اول یا دوم اجرای مدل و علامت پیکان نشان‌دهنده تغییر طرحواره همرفت در شبکه‌های میانی و کوچک است.

پیکربندی	بارش روزانه	تاریخ وقوع بارش	تاریخ وقوع بارش	پیکربندی سطح	لایه مرزی	طرحواره همرفت			سامانه راداری	
						d01	d02	d03	ریشه میانگین مربعات	ضریب همبستگی
۱	WSM 6	Rrtm	Dudhia	Noah-MP	YSU	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch	-	-
۲	WSM 6	Rrtm	Dudhia	Noah-MP	YSU	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch ↓ BMJ	✓✓	-
۳	WSM 6	Rrtm	Dudhia	Noah-MP	YSU	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch ↓ BMJ	Kain-Fritsch ↓ BMJ	✓✓	-
۴	WSM 6	Rrtm	Dudhia	Noah-MP	YSU	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch ↓ BMJ	Kain-Fritsch ↓ BMJ	✓✓	✓✓
۵	WSM 6	Rrtm	Dudhia	Noah-MP	YSU	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch ↓ BMJ	✓✓	✓✓



شکل ۱۰. ریشه میانگین مربعات خطای محاسبه‌شده بارش بین اجراهای ۲ تا ۵ از جدول ۲ نسبت به اجرای ۱ (اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی‌شده با اجرای مرجع) برای الف: شبکه d01، ب: شبکه d03، ج: شبکه d05. اعداد محور افقی بیانگر شماره گام زمانی (از ۱۶۰ گام در ۱۲ ساعت) بوده و رنگ آبی در این شکل به اجرای دو، رنگ قرمز به اجرای سه، رنگ سبز به اجرای ۴ و رنگ بنفش به اجرای ۵ مربوط است.

۴. نتیجه‌گیری

ساعت اول، سامانه همرفتی قوی در محدوده تهران شناسایی شد و ثبت‌کننده‌ها برای هدایت مدل عددی و تغییر طرحواره همرفت تنظیم گردید. بعد از ورود به بازه ۶ ساعت دوم (از 0000UTC تا 0600UTC روز ۳۱ مارس) که در واقع بازه زمانی پیش‌بینی عددی است، دو بسته راداری نیز در ساعت اولیه از شروع پیش‌بینی فراهم بود که توسط سامانه راداری همرفت تشخیص داده شد و امکان تغییر در طرحواره همرفت با استفاده از این داده‌ها نیز فراهم گردید.

با توجه به ماهیت بارش به‌عنوان پدیده‌ای کاملاً گسسته در مکان و زمان، ارزیابی و درستی‌سنجی نتایج از دو جنبه الگویی و آماری انجام گرفته است. از جنبه الگویی، نحوه هم‌خوانی و همبستگی مکانی بین الگوی بارش پیش‌بینی‌شده با الگوی بارش ثبت‌شده بررسی شده است. در این خصوص با توجه به وجود روش‌های گوناگون درون‌یابی مکانی بارش، به درون‌یابی کرسمن نرم‌افزار GrADS اعتماد شده است. از جنبه آماری نیز با استفاده از پارامترهای همبستگی و محاسبه ریشه میانگین مربعات خطا به‌صورت نقطه به نقطه (محل ایستگاه‌های دیدبانی در دسترس) نتایج بررسی شده است. در این روش، امکانات مدل عددی برای درون‌یابی بارش در نقاط ایستگاه‌ها به کار رفته است. نتایج این بررسی‌ها حاکی از آن است که با کاربست الگوریتم یاد شده، نتایج پیش‌بینی بهبود قابل‌ملاحظه‌ای می‌یابد و از لحاظ برازش بارش‌ها بر

در این پژوهش از داده‌های رادار تهران برای اجرای مدل توسعه‌یافته میان‌مقیاس WRF در سه شبکه تودرتو (با گام‌های شبکه‌ای ۴۵، ۱۵ و ۵ کیلومتر) استفاده شده است. ابتدا برای کنترل کیفی داده‌های راداری مورد نیاز، ساختارهای قائم و افقی میدان اندازه‌گیری‌شده برگشت‌پذیری مورد ارزیابی‌های گوناگون قرار گرفت و محاسبات طیفی برای رفع خطاهای متعدد داده‌ای صورت پذیرفت. نتایج محاسبات نشان‌دهنده رفع مطلوب نوفه‌های ناشی از کلان‌ترهای ثابت و پخش ناهمگون و همچنین نوفه‌های نقطه‌ای و محلی است.

برای آزمایش چگونگی عملکرد الگوریتم فوق، یک سامانه خط تندوزه که در ساعت UTC ۲۳۳۰ روز ۳۰ مارس سال ۲۰۰۹ از فراز منطقه تهران عبور کرده است، انتخاب شد. علت انتخاب این سامانه، وجود ساختارهای بارش پوشنی و همرفتی در آن است. برای پیش‌بینی بارش تجمعی ۶ ساعته ناشی از گذر این سامانه همرفتی میان‌مقیاس از مناطق مرکزی ایران، مدل به‌مدت دوازده ساعت شامل ۶ ساعت برای تنظیم (اسپین‌آپ) و ۶ ساعت برای پیش‌بینی اجرا گردید. در ۶ ساعت اول، با استفاده از داده‌های FNL شرایط اولیه برای ساعت 1800UTC روز ۳۰ مارس ۲۰۰۹ و شرایط مرزی برای ساعت 0000UTC روز ۳۱ مارس ۲۰۰۹ فراهم شد. همچنین براساس داده‌های راداری موجود در این بازه زمانی، در ساعت آخر از ۶

حاصل از کاربست روش ابداعی در این پژوهش دارند. به بیان دیگر می‌توان نتیجه گرفت که این روش ابداعی با درک دقیق مفاهیم فیزیکی به کار رفته در طرحواره‌های همرفت و مطابقت دادن آن‌ها با مورد مطالعاتی، می‌تواند در بهبود نتایج تأثیرگذار باشد. به‌طور کلی در تمامی چیدمان و استفاده از داده‌های رادار، چه در بازه ۶ ساعت اول و چه در بازه ۶ ساعت دوم در صورت وجود داده، شاهد بهبود نتایج هستیم، ولی بهترین عملکرد مربوط به زمانی است که داده‌های رادار به‌صورت حداکثری و همچنین در بیش از یک شبکه محاسباتی استفاده می‌شود.

مراجع

صفر، م.، احمدی گیوی، ف. و گلستانی، ی.، ۱۳۹۵، کنترل کیفی داده‌های رادار هواشناسی با استفاده از ساختار افقی و قائم برگشت پذیری: مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۰(۲)، ۱۲۰-۱۳۱.

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.

مکان‌های جغرافیایی، ریشه میانگین مربعات خطا، کاهش و مقدار همبستگی افزایش نشان می‌دهد؛ بنابراین به نظر می‌رسد یکی از خطاهای رایج که خطای جابه‌جایی نام دارد، با این الگوریتم کاهش یافته است.

در بررسی موردی یک ایستگاه هواشناسی (مهرآباد تهران)، سری زمانی ریشه میانگین مربعات خطا برای کمیت بارش در کل ۱۲ ساعت از اجرای مدل، با استفاده و بدون استفاده از سامانه راهبری راداری، تهیه و ترسیم شد. نتیجه بررسی نشان‌دهنده وجود مقدار بسیار کم این خطا در بازه زمانی تنظیم (۶ ساعت اول) و کاهش محسوس و کنترل این خطا در بازه زمانی پیش‌بینی (۶ ساعت دوم) با استفاده از سامانه راهبری راداری، علی‌رغم افزایش معنادار آن در آغاز بازه پیش‌بینی است.

از دیگر نتایج آن‌که در استفاده از سامانه راهبری راداری، وقتی طرحواره پیش‌فرض همرفت، طرحواره کین-فریج و طرحواره جایگزین، طرحواره بتس-میلر باشد، نتایج پیش‌بینی بهبود می‌یابد. به نظر می‌رسد به‌علت ماهیت بارش گرم مورد انتخابی در این پژوهش است که تغییر طرحواره همرفت به طرحواره بتس-میلر، بهبود نتایج را در پی داشته است؛ این در حالی است در پیکربندی‌هایی که از ابتدای اجرای مدل در آن از طرحواره همرفت بتس-میلر استفاده شده است، نتایج ضعیف‌تر از نتایج

Albers, S., McGinley, J. M., Birkenheuer, D. and Smart, J., 1996, The local analysis and prediction system (LAPS): Analyses of clouds, precipitation and temperature. *Wea. Forecasting*, 11, 273-287.

Barclay, P. E. and Wilk, K. E., 1970, Sever thunderstorm radar echo motion and related weather events hazardous to aviation operation. *ESSA Tech. Mem.*, NSSL, 63 pp.

Benjamin, S. G., Devenyi, D., Weygandt, S. S., Brundage, K. J., Brown, J. M., Grell, G. A., Kim, D., Schwartz, B. E., Smirnova, T. G., Smith, T. L. and Manikin, G. S., 2004, An hourly assimilation-forecast cycle: The RUC. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 495-518.

Benjamin, S. G., Grell, G. A., Brown, J. M., Smirnova, T. G. and Bleck, R., 2004, Mesoscale weather prediction with the RUC hybrid isentropic-terrain-following coordinate model. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 473-494.

Betts, A. and Miller, M. J., 1986, A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX, and arctic air mass data sets. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 112, 693-709.

Brewster, K., 1996, Implementation of a Bratseth analysis scheme including Doppler radar. Pages 19-23 in *Proceeding of the 15th Conference on Weather Analysis and Forecasting*, American Meteorological Society, Boston, USA.

Browning, K. A., Collier, C. G., Larke, P. R., Menmuir, P., Monk, G. A. and Owens, R. G., 1982, On the forecasting of frontal rain using a weather radar network. *Mon. Wea. Rev.*, 110, 534-552.

Caya, A., Sun, J. and Snyder, C., 2005, A comparison between the 4DVAR and the ensemble Kalman filter techniques for radar data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, 133, 3081-

- 3094.
- Daley, R., 1991, *Atmospheric Data Analysis*. Cambridge Atmospheric and Space Science Series, Cambridge University Press, 457pp.
- Dixon, M. and Wiener, G., 1993, TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting, A radar-based methodology. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 10, 785-797.
- Ebert, E. and McBride, L., 2000, Verification of precipitation in weather systems: determination of systematic errors. *J. Hydrol.*, 239, 179-202.
- Einfalt, T., Denoeux, T. and Jacquet, G., 1990, A radar rainfall forecasting method designed for hydrological purposes. *J. Hydrol.*, 114, 229-224.
- Ghil, M., 1989, *Meteorological Data Assimilation for Oceanographers*. Part I: Description and Theoretical Framework. *Dyn. Atmos. Oceans*, 13, 171-218.
- Janjic, Z. I., 1994, The step-mountain Eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous, sublayer, and turbulence closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927-945.
- Janjic, Z. I., 2002, Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model. NCEP Office Note, No. 434, 61pp.
- Kain, J. S., 2004, The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, 43, 170-181.
- Kain, J. S. and Fritsch, J. M., 1993, Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models*, Meteor. Monogr., No. 46, Amer. Meteor. Soc., 165-170.
- Kain, J. S. and Fritsch, J. M., 1990, A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, 47, 2784-2802.
- Koskinen, J. T., Poutiainen, J., Schultz, D. M., Joffe, S., Koistinen, J., Saltikoff, E., Gregow, E., Turtiainen, H., Dabberdt, W. F., Damski, J., Eresmaa, N., Goke, S., Hyvarinen, O., Jarvi, L., Aarppinen, A., Kotro, J., Kuitunen, T., Kukkonen, J., Kulmala, M., Moisseev, D., Nurmi, P., Ponjola, H., Pylkko, P., Vesala, T., and Viisanen, Y., 2011, The Helsinki Testbed: A Mesoscale Measurement, Research and Service Platform. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 32, 325-342.
- Lin, Y., Ray, P. and Johnson, K., 1993, Initialization of a modeled convective storm using Doppler radar derived fields. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 2757-2775.
- Liu, Y., 2008, The operational mesogamma-scale analysis and forecast system of the U.S. army test and evaluation command'. Part I: overview of the modeling system, the forecast products, and how the products are used. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47, 1077-1092.
- Lorenc, A., 1986, Analysis methods for numerical weather prediction. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 112, 1177-1194.
- Lushine, J. B., 1976, Picture of the Month. Convective growth and movement as seen from GOES-1. *Mon. Wea. Rev.*, 104, 1449-1450.
- Mueller, C., Saxen, T., Roberts, R., Wilson, J., Betancourt, T., Dettling, S., Oien, N. and Yee, J., 2003, NCAR auto-nowcast system. *Wea. Forecasting*, 18, 545-561.
- Noel, T. M. and Fleisher, A., 1960, The linear predictability of weather radar signals. MIT Dept. of Meteorology Research Rep. 34, 46 pp.
- Pierce, C. E., 2004, The nowcasting of precipitation during Sydney 2000: an appraisal of the QPF algorithms. *Wea. Forecasting*, 19, 7-21.
- Schroeder, A. J., Stauffer, D. R., Seaman, N. L., Deng, A., Gibbs, A. M., Hunter, G. K. and Young, G. S., 2006, An automated high-resolution, rapidly relocatable meteorological nowcasting and prediction system. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 1237-1265.
- Sugimoto, S., Crook, N., Sun, J. and Xiao, Q., 2008, An examination of WRF 3DVAR radar data assimilation on its capability in retrieving unobserved variables and forecasting precipitation through observing system simulation experiments. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 4011-4029.
- Sun, J. Z., Wang, H. L., Tong, W. X., Zhang, Y., Lin, C.-Y. and Xu, D. M., 2016, Comparison of the impacts of momentum control variables on high-resolution variational data assimilation and precipitation forecasting. *Mon. Wea. Rev.*, 144, 149-169.
- Sun, J. Z. and Crook, N. A., 1998, Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part II: Retrieval experiments of an observed Florida convective storm. *J. Atmos. Sci.*, 55(5), 835-852.
- 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, Z., Droegemeier, K. and White, L., 1998, The adjoint truncated Newton algorithm for large-scale unconstrained optimization.

- Comput. Optimization Appl., 10(3), 283–320.
- Weygandt, S., Shapiro, A. and Droegemeier, K., 2002, Retrieval of model initial fields from single-Doppler observations of a supercell thunderstorm. I: Single-Doppler velocity retrieval. *Mon. Wea. Rev.*, 130, 433–453.
- Wilson, J. W., Feng, Y., Chen, M. and Roberts, R. D., 2010, Nowcasting challenges during the Beijing Olympics: successes, failures, and implications for future nowcasting systems. *Wea. Forecasting*, 25, 1691-1714.
- Xu, M., Liu, Y., Davis, C. and Warner, T., 2002, Sensitivity of nudging parameters on the performance of a mesoscale FDDA system: A case study. 15th Conference on Numerical Weather Prediction, 12–16 August, 2002, San Antonio, Texas, 127–130.

Optimal run-time selection of convection scheme based on radar data in the WRF model for short-range precipitation prediction

Safar, M.¹ Ahmad-Givi, F.^{2*}

1. *Ph.D. Graduated of Meteorology, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran*
2. *Associate Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran*

(Received: 8 Feb 2017, Accepted: 23 May 2017)

Summary

One of the challenges facing meteorologists in recent years is to improve the quality and accuracy of weather nowcasting for limited areas and in this regard various methods based on the statistics principles, such as data assimilation and ensemble forecasting methods, have been used in numerical weather prediction models. In the data assimilation methods, by transferring and collecting different data including atmospheric measurements by observational stations, satellites and radars, the process of rectifying the results of numerical models is performed statistically. The aim of this research is to investigate and address the question of whether it is possible to facilitate a cycle of numerical weather prediction and improve the prediction accuracy using remote sensing data, without involving very large computational effort required in the data assimilation techniques.

To reach the objectives of this research, we first designed and developed a software for radar data analysis. Second, based on both the output data provided by the radar model and the innovative changes in the relevant part of the main model for controlling convection, the Weather Research and Forecasting (WRF) model was modified in such a way that the best convection scheme is chosen during the execution of the model. In fact, the appropriate convection scheme is chosen automatically by the capability of the radar system in detecting convection within the execution of the model. To evaluate the results, the modified model was used for a region of Iran in such a way that the site of Tehran weather radar was located in the center of the simulation domain. Before carrying out the simulations, two necessary actions were taken. First, the sensitivity of the results provided by the WRF model to the initial input data was examined. In this stage, using two reanalysis datasets of the NCEP-FNL (Final) on $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ grid prepared operationally every six hours and the ECMWF dataset gridded to a horizontal resolution of approximately 80 km at 6-h intervals, a selected case was studied and the results were compared with the observational data. Then, the processing algorithms necessary to identify and remove radio electromagnetic interference (RFI) noise from radar returns were prepared.

The modified WRF model was run for 12 hours to evaluate its ability and the quality of prediction for very short time periods. In total, forty experiments were carried out using eight configurations of physical parameterization schemes as well as inclusion of the radar data. In addition, the modified model was implemented for a severe squall line that occurred in Tehran's area at 2330UTC on the 30th of March 2009 and was detected by the Tehran weather radar.

Results for the root mean square error index and correlation between the forecasted and the observed precipitation showed that the accuracy of precipitation forecast in the study area for very short time, e.g. 6 hours, was increased when the modified model was carried out. The comparison between the forecasted precipitation patterns and the observations confirms higher consistency for the modified model's results. Also, evaluating the results by the statistical methods, it is seen that the correlation between the forecasted precipitation and the observed values is increased significantly and the root mean square error is decreased. In addition, the time series of the precipitation data for Mehrabad synoptic station in Tehran was investigated for which the root mean square error in the precipitation time series was decreased when the Tehran radar data was included in the working of the WRF model.

Keywords: weather radar, WRF, data assimilation, nowcasting, convection scheme.

*Corresponding author:

ahmadig@ut.ac.ir