

بررسی عملکرد سامانه همادی چندفیزیکی مدل میان‌مقیاس WRF جهت شبیه‌سازی بارش در مناطق مرکزی ایران

فاطمه مرادیان^۱، سرمد قادر^۲ و مریم رضازاده^{۳*}

^۱دانشجوی دکتری هواشناسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
^۲دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۳استادیار، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۲)

چکیده

ماهیت آشوب‌ناک جو، موجب بروز عدم قطعیت پیش‌بینی عددی وضع هوا می‌شود که ناشی از نقص در شرایط اولیه مدل، خطاهای مدل مانند خطای تقریب برخی معادلات فیزیکی و کم بودن ذاتی پیش‌بینی‌پذیری پدیده‌های فیزیکی است. یکی از روش‌های غلبه بر این عدم قطعیت، تولید یک سامانه همادی با ایجاد پرنشیدگی در عوامل تولید آن است. از آنجاکه بارش یکی از دشوارترین پراسنج‌های قابل پیش‌بینی به‌شمار می‌رود، این تحقیق بر آن است تا با توسعه یک سامانه همادی چندفیزیکی برای مدل میان‌مقیاس WRF، عملکرد آن را در شبیه‌سازی بارش در مناطق مرکزی ایران بررسی کند. این سامانه با ۸۴ عضو، متشکل از دو طرح‌واره لایه مرزی، پنج طرح‌واره کومولوسی و حالت بدون کومولوس و هفت طرح‌واره میکروفیزیکی، با سه دامنه تودرتو با تفکیک ۴، ۱۲ و ۳۶ کیلومتری روی مناطق مرکزی ایران شامل ۱۳۲ ایستگاه برای دوازده روز بارشی منتخب از زمستان ۲۰۱۶-۲۰۱۵ اجرا شد. با استفاده از داده‌های مشاهداتی همدیدی سازمان هواشناسی، بارش ۲۴ ساعته خروجی سامانه همادی با محاسبه سنج‌های درستی‌سنجی استاندارد منتخب ارزیابی شد. نتایج نشان داد از بین طرح‌واره‌های انتخابی، طرح‌واره لایه مرزی MYJ، طرح‌واره‌های کومولوسی KF و GF و طرح‌واره‌های میکروفیزیکی WSM6، New Thompson و Goddard بهترین عملکرد را داشتند. علاوه بر این بررسی، سنج‌های درستی‌سنجی برای سه دسته بارشی کمتر از ۱ میلی‌متر، بین ۱ تا ۱۰ میلی‌متر و بین ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر، نشان دهنده کیفیت مناسب پیش‌بینی بارش سامانه همادی است و عملکرد آن با افزایش تعداد اعضاء بهبود می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی عددی وضع هوا، مدل WRF، پیش‌بینی همادی، بارش

۱ مقدمه

با پیشرفت علوم کامپیوتر و فیزیک جو، امکان بهره‌گیری از مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا (Numerical Weather Prediction یا به اختصار، NWP) جهت پیش‌بینی کمی بارش فراهم شده است (یانگ و همکاران، ۲۰۱۲). گواه این ادعا، توسعه مدل میان‌مقیاس پژوهش‌ها و پیش‌بینی وضع هوا، WRF (Weather Research and Forecasting Model) است که آخرین نسل از مدل‌های میان‌مقیاس پیش‌بینی عددی وضع هوا محسوب می‌شود و مرکز ملی تحقیقات جوی ایالات متحده آمریکا (National Center for Atmospheric Research, NCAR) آن را انجام داده است. کمیت بارش و الگوهای زمانی و مکانی آن با تفکیک افقی زیاد، یکی از پراسنجهای هواشناختی است که با مدل WRF شبیه‌سازی یا پیش‌بینی می‌شود. براساس پژوهش‌های انجام‌شده، با وجود کارایی زیاد این مدل نسبت به مدل‌های دیگر، بارش همچنان یکی از دشوارترین پراسنجهای قابل شبیه‌سازی و پیش‌بینی به‌شمار می‌رود (کولیسچون و همکاران، ۲۰۰۵؛ برونو و همکاران، ۲۰۱۴ و لی و همکاران، ۲۰۱۵). به دلیل آشوب‌ناک بودن جو، عوامل متعددی در عدم قطعیت شبیه‌سازی‌ها نقش دارند که ازجمله آنها می‌توان به کمبودهای موجود در تعریف شرایط اولیه مدل، خطاهای خود مدل مانند خطای تقریب برخی معادلات فیزیکی و بالاخره کم بودن ذاتی پیش‌بینی-پذیری پدیده‌های فیزیکی اشاره کرد؛ لذا با توجه به تأثیر این عدم قطعیت‌ها بر دقت شبیه‌سازی، به کارگیری روش-هایی برای کاهش آنها مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده است (کالنی، ۲۰۰۳). یکی از این روش‌ها، تولید یک سامانه همادی با ایجاد پیش‌بینی در عوامل تولید این عدم قطعیت‌هاست (توت و کالنی، ۱۹۹۷ و ایوانز و همکاران، ۲۰۱۱) که با استفاده از آن می‌توان احتمال رخداد پدیده‌ها را تخمین زد (اندرسون ۱۹۹۶) یا اطمینان-

پذیری پیش‌بینی‌ها را تعیین کرد (بویزا، ۱۹۹۷). به‌طور کلی، تولید یک سامانه همادی با ایجاد پیش‌بینی به سه روش زیر صورت می‌گیرد:

(۱) پیش‌بینی کردن شرایط اولیه مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های مدل؛

(۲) پیش‌بینی در مدل پیش‌بینی وضع هوا؛

(۳) پیش‌بینی در شرایط مرزی.

روش اول یعنی پیش‌بینی کردن شرایط اولیه، برای کاهش خطاهای ذاتی اندازه‌گیری پراسنجهای هواشناسی، سامانه‌های ناقص گواردها و مشاهدات ناقص جو انجام می‌شود (بدیهی است همه متغیرها در همه مکان‌ها و زمان‌ها قابل مشاهده نیستند). روش دوم یعنی پیش‌بینی در خود مدل، با هدف منظور کردن خطاهای آن صورت می‌گیرد.

خطاهای مدل از دو منبع سرچشمه می‌گیرند: الف) ساده‌سازی ریاضی و محدودیت محاسبات عددی هم از نظر زمانی و هم از نظر مکانی و ب) رفتار ناکامل فرایندهایی از قبیل پارامتره‌سازی. گفتنی است براساس مطالعات انجام‌شده، تنها روشی که با کمک آن می‌توان اثرهای کلی فرایندهای فیزیکی در مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا را تعیین کرد، روش پارامتره‌سازی یا تعریف طرح‌واره فیزیکی است (واسکونی، ۲۰۱۸). هر طرح‌واره فیزیکی در مدل، رفتار واقعی جو را به‌طور متفاوت تقریب می‌زند که خود یک منبع عدم قطعیت شبیه‌سازی محسوب می‌شود و در بسیاری از موارد، نمی‌توان آن را نادیده گرفت (ژانگ و پو، ۲۰۱۰)؛ بنابراین هر پیش‌بینی یا شبیه‌سازی عددی حتی اگر شرایط اولیه عالی داشته باشد، به توسعه خطاهای ناشی از تفاوت بین روندهای مدل و روندهای دنیای واقعی گرفتار می‌شود و لذا سامانه‌های پیش‌بینی همادی به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که علاوه بر اعمال روش‌های پیش‌بینی در شرایط اولیه، می‌توانند خطاها و عدم قطعیت‌های مدل را نیز به حساب

آوردند. عملکرد عدم‌قطعیت مدل در مقایسه با عدم‌قطعیت شرایط اولیه بسیار کمتر شناخته شده است، اما دو روش مهمی که به‌طور رایج برای رفتار با عدم‌قطعیت‌های ناشی از مدل به‌کار می‌روند عبارت‌اند از: همدادی چندمدلی و همدادی چندفیزیکی. در همدادی چندمدلی که از رایج‌ترین و پرکاربردترین روش‌های پریشیدگی در پیش‌بینی‌های همدادی محسوب می‌شود، از دو یا چند روش پیش‌بینی یا مدل عددی برای تولید همدادی استفاده می‌شود (سیولو و همکاران، ۱۹۹۷) و در همدادی چندفیزیکی، از ترکیب‌های متفاوت طرح‌واره‌های فیزیکی در یک مدل عددی، یک همدادی ساخته می‌شود (سازمان جهانی هواشناسی، ۲۰۱۲). همدادی چندمدلی می‌تواند عدم‌قطعیت‌های هر دو طرح‌واره فیزیکی و دینامیکی را بیان کند درحالی‌که روش چندفیزیکی تنها معرف عدم‌قطعیت‌های طرح‌واره‌های فیزیکی است (دو و همکاران، ۲۰۱۸). دو مزیت مهم همدادی‌های چندمدلی و چندفیزیکی عبارت‌اند از: ساختار به‌نسبت درست و تأثیرگذاری آنها در به‌دام‌انداختن عدم‌قطعیت‌های پیش‌بینی با یک گسترش بزرگ همدادی و حذف اریبی (بایاس) بالقوه در میانگین همدادی (دو و همکاران، ۲۰۱۲). تحقیقات گوناگونی در زمینه سامانه‌های پیش‌بینی براساس روش‌های چندمدلی و چندفیزیکی یا ترکیب این دو صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به مولن و همکاران (۱۹۹۹)، تراکتون و کالنی (۱۹۹۳)، دو و تراکتون (۲۰۰۱)، دو و همکاران (۲۰۰۳)، فلوناس و همکاران (۲۰۱۱)، جانکوف و همکاران (۲۰۰۵) و تیان و همکاران (۲۰۱۷) اشاره کرد.

هدف از تحقیق حاضر، توسعه یک همدادی چندفیزیکی و تعیین عملکرد آن در شبیه‌سازی بارش در مناطق مرکزی ایران با استفاده از مدل میان‌مقیاس WRF است. مدل WRF، طرح‌واره‌های فیزیکی متنوعی را برای موارد مختلف معرفی کرده است که هرکدام از آنها بر فرایندهای فیزیکی متفاوتی تأکید دارند. این طرح‌واره‌ها

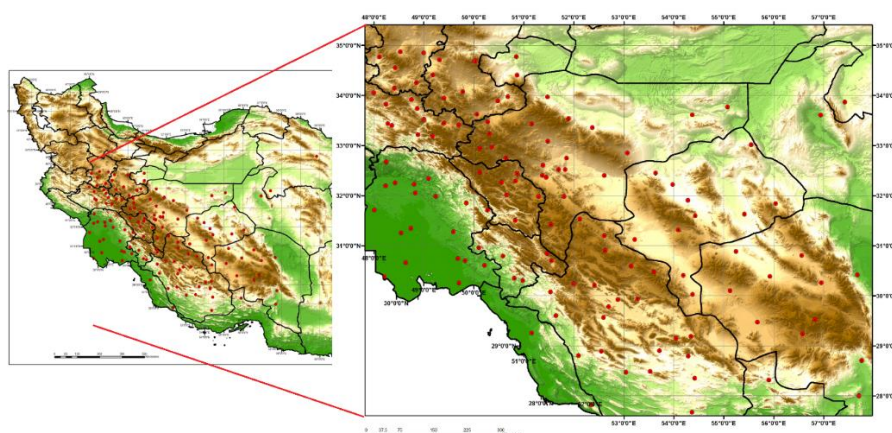
در هفت دسته جای گرفته‌اند و عبارت‌اند از: خردفیزیک (mp_physics)، تابش طول موج بلند (ra_lw_physics)، تابش طول موج کوتاه (ra_sw_physics)، لایه سطحی زمین (sf_surface_physics)، لایه مرزی سیاره‌ای (لایه مرزی (bl_pbl_physics)، کومولوسی (cu_physics)، موانع شهری (sf_urban_physics) و فیزیک سطح خشکی‌ها (sf_sfclay_physics). شایان ذکر است انواع این طرح‌واره‌های فیزیکی، ساختار و پیچیدگی‌های ویژه خود را دارند و می‌توانند تأثیر بزرگی بر شبیه‌سازی‌های بارش داشته باشند. از طرف دیگر، توسعه مدل WRF و امکان انتخاب‌های بیشتری از میان این طرح‌واره‌های فیزیکی، تعیین ترکیب بهینه آنها را روزبه‌روز دشوارتر کرده است (تیان و همکاران، ۲۰۱۷) و سبب انجام دادن مطالعات و پژوهش‌های جداگانه‌ای در نقاط مختلف دنیا جهت تعیین حساسیت عددی طرح‌واره‌های فیزیکی WRF شده است (کلین و همکاران، ۲۰۱۵). براساس این مطالعات، اغلب، سه طرح‌واره خردفیزیک، لایه مرزی سیاره‌ای (لایه مرزی) و کومولوسی بیشترین تأثیر را در شبیه‌سازی بارش داشته‌اند (جانکوف و همکاران، ۲۰۱۱؛ مادالا و همکاران، ۲۰۱۴ و پنلی و همکاران، ۲۰۱۴؛ بنابراین علاوه بر این مطالعات، پژوهش‌های متعدد دیگری با استفاده از همدادی فیزیکی برای تعیین ترکیب بهینه این طرح‌واره‌ها صورت گرفته است که برای نمونه می‌توان به پژوهش فلوناس و همکاران (۲۰۱۱) اشاره کرد که یک همدادی شش‌عضوی شامل دو طرح‌واره لایه مرزی و سه طرح‌واره کومولوسی را در غرب آفریقا اجرا کردند. جانکوف و همکاران (۲۰۰۵) نیز یک همدادی هجده‌عضوی شامل سه خردفیزیک، سه لایه مرزی و دو طرح‌واره کومولوسی را در نواحی مرکزی و جنوبی ایالات متحده آمریکا بررسی کردند. یک همدادی دیگر با ۳۶ عضو شامل دو لایه مرزی، دو کومولوس، سه خردفیزیک و سه طرح‌واره تابشی برای یک سری

رویدادهای بارش در ساحل جنوب شرقی استرالیا آزمایش شد (جانکوف و همکاران، ۲۰۰۵). تیان و همکاران (۲۰۱۷) نیز از شاتزده ترکیب طرح‌واره‌های فیزیکی استفاده کردند که از دو طرح‌واره خردفیزیک، دو لایه مرزی و سه کومولوسی تشکیل می‌شد. تمام این مطالعات نشان دادند هیچ ترکیبی از طرح‌واره‌های فیزیکی وجود ندارد که به تنهایی بهترین شبیه‌سازی را برای تمام رویدادهای بارش ارائه دهد.

در ایران نیز مطالعات متعددی جهت شبیه‌سازی یا پیش‌بینی پراسنج‌های مختلف هواشناختی از جمله بارش با استفاده از مدل WRF انجام شده است که می‌توان به بررسی بارش احتمالی حاصل از پس‌پردازش یک سامانه همادی توسعه داده شده برای مدل MM5 و WRF (آزادی و همکاران، ۱۳۹۱) اشاره کرد که با به‌کارگیری روش‌های واسنجی، بهبودهایی در پیش‌بینی احتمالی مشاهده شد. قصابی و همکاران (۱۳۹۳) عملکرد مدل WRF را در برآورد بارش‌های جنوب غربی ایران بررسی کردند. در پژوهشی دیگر، فتحی و همکاران (۱۳۹۷) نتایج واسنجی خروجی احتمالی یک سامانه همادی حاصل از هشت پیکربندی فیزیکی مدل WRF را بررسی کردند و نشان دادند واسنجی انجام‌شده تأثیر مثبتی در نتایج به همراه داشته است. علاوه‌براین، فتحی و همکاران (۱۳۹۸)

بهبود پیش‌بینی یقینی را با استفاده از میانگین وزنی سامانه همادی بررسی کردند. نیستانی و همکاران (۱۳۹۶) نیز تأثیر داده‌گذاری را در بهبود پیش‌بینی بارش در منطقه غرب ایران بررسی کردند. در مورد پراسنج‌های دیگر، قادر و همکاران (۱۳۹۴) ارزیابی طرح‌واره‌های فیزیکی پیش‌بینی میدان باد سطحی را با استفاده از یک سامانه پانزده عضوی برای منطقه خلیج فارس انجام دادند. نتیجه مشترک بیشتر این مطالعات این بود که انتخاب طرح‌واره برای یک شبیه‌سازی مناسب، به هدف و کاربرد مدل و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد نظر بستگی دارد؛ از این‌رو، مطالعات حساسیت نیازمند تمرکز بر ترکیب مناسب طرح‌واره‌ها برای یک منطقه خاص است.

همان‌گونه که گفته شد، هدف از این مطالعه تعیین عملکرد مدل WRF در شبیه‌سازی مناسب بارش با به‌کارگیری همادی چندفیزیکی برای دامنه به‌نسبت بزرگ مناطق مرکزی ایران بود. برای این مطالعه دوازده روز از ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه زمستان ۲۰۱۵-۲۰۱۶ آزمایش و بارش ۲۴ ساعته این روزها با یک همادی ۸۴ عضوی از ترکیب‌های مختلف طرح‌واره‌های فیزیکی شبیه‌سازی شد. در پایان، نتایج همادی درستی‌سنجی و عملکرد طرح‌واره‌های فیزیکی مدل WRF برای این منطقه از ایران در دوره زمانی مورد مطالعه تعیین شد.



شکل ۱. موقعیت ۱۳۲ ایستگاه همدیدی مورد استفاده واقع در مناطق مرکزی ایران.

۲ داده‌ها و روش کار

۱-۲ داده‌ها و تاریخ‌های شبیه‌سازی

در تحقیق حاضر از دو گروه داده استفاده شد که گروه اول، داده‌های مشاهداتی جهت اعتبارسنجی مدل و گروه دوم داده‌های مورد نیاز برای تأمین شرایط اولیه و شرایط مرزی مدل WRF بود. داده‌های مشاهداتی مورد استفاده، داده‌های بارش روزانه ۱۳۲ ایستگاه هواشناسی همدیدی در مناطق مرکزی ایران واقع در کوچک‌ترین دامنه محاسباتی مدل بود که موقعیت مکانی آنها در شکل ۱ ارائه شده است. گفتنی است به دلیل نقش مهم کیفیت داده‌های مشاهداتی بارش در ارزیابی عملکرد مدل و با توجه به اینکه داده‌های مشاهداتی مورد استفاده از نوع روزانه بودند، داده‌های بارش در منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش‌هایی همچون روش آزمون همگنی نرمال استاندارد، شناسایی داده‌های پرت با توجه به بارش ایستگاه‌های مجاور، بهره‌گیری از تصاویر رادار هواشناسی در صورت وجود و در نهایت، مقایسه داده‌های ایستگاه‌های همدیدی سازمان هواشناسی با داده‌های روزانه ایستگاه‌های باران‌سنجی وزارت نیرو تا حد ممکن کیفیت‌سنجی شد.

گروه دوم داده‌ها، داده‌های مدل‌های جهانی بودند که برای تأمین شرایط اولیه و شرایط مرزی مدل WRF استفاده شدند. مراکز و سازمان‌های مهمی در دنیا به تهیه و تولید داده‌های بازتحلیل مشغول هستند. قدیمی‌ترین نسل از داده‌های بازتحلیل را مرکز ملی پیش‌بینی‌های محیطی (National Center for Environmental Prediction, NCEP) تولید می‌کند. در این مطالعه از داده‌های FNL (Final Analysis) استفاده شد که از نوع داده‌های تحلیل هستند. این داده‌ها که با تفکیک افقی یک درجه در چهار نوبت به صورت روزانه تولید شدند، ۲۷ تراز فشاری دارند و از سال ۱۹۹۹ موجود هستند (برای دریافت جزئیات بیشتر درباره داده‌های FNL به تارنمای

<http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.0> مراجعه شود).

برای انتخاب روزهای مناسب جهت شبیه‌سازی و دستیابی به نتایج قابل اعتماد، علی‌رغم حجم زیاد محاسبات و زمان طولانی مورد نیاز، دوازده روز با در نظر گرفتن بارش‌های کم، متوسط و زیاد جهت انجام شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد مدل انتخاب شد. روزهای منتخب عبارت‌اند از:

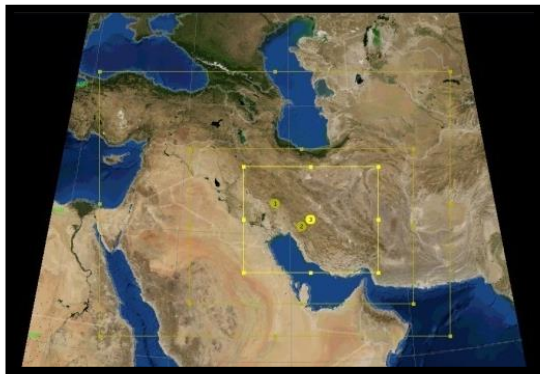
- ۶، ۱۴، ۱۵ و ۲۴ دسامبر ۲۰۱۵؛
- ۱، ۲، ۲۳ و ۲۵ ژانویه ۲۰۱۶؛
- ۱۱، ۲۳، ۲۴ و ۲۶ فوریه ۲۰۱۶.

۲-۲ پی‌یکربندی مدل WRF و طراحی همدادی

فیزیکی

در این مطالعه از نسخه ۳-۹ مدل هواشناسی میان‌مقیاس WRF با هسته دینامیکی ARW (Advanced Research WRF) استفاده شد. مدل هواشناسی WRF که از نوع غیرآب‌ایستا و کاملاً انعطاف‌پذیر است، شامل فیزیک، محاسبات عددی، دینامیک پیشرفته و گوارد داده‌ها است و چون می‌تواند گستره بزرگی از چندین متر تا هزاران کیلومتر را شبیه‌سازی کند، برای اهداف مختلف استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌های مدل WRF با تفکیک افقی زیاد برای بارش را می‌توان به عنوان ورودی برای مدل‌های هیدرولوژیکی به کاربرد که براساس پژوهش‌ها، مناسب‌تر از نتایج دیگر مدل‌ها برای این منظور است (کاردوسو و همکاران، ۲۰۱۳ و چامبون و همکاران، ۲۰۱۴). برای کسب اطلاعات بیشتر درباره این مدل، به ونگ و همکاران (۲۰۰۹) و اسکاماروک و همکاران (۲۰۰۸) رجوع کنید.

با توجه به گستردگی محدوده مورد مطالعه که شامل مناطق مرکزی ایران از جمله بخش‌های وسیعی از ارتفاعات زاگرس است (شکل ۱)، برای تعیین بهترین تفکیک افقی که در آن مدل WRF بتواند مناسب‌ترین شبیه‌سازی‌های بارش را ارائه دهد، مدل با شش تفکیک



شکل ۲. نمایی از دامنه‌های محاسباتی برای مدل WRF در این پژوهش.

از آنجاکه هدف تحقیق، بررسی عملکرد مدل در شبیه‌سازی بارش با اجرای همادی فیزیکی از ترکیب طرح‌واره‌های مختلف فیزیکی و یافتن بهترین ترکیب جهت شبیه‌سازی بارش در منطقه مورد مطالعه است، انجام تنظیمات مناسب مدل، به‌ویژه تعیین طرح‌واره‌های فیزیکی آن قبل از اجرا بسیار مهم است. بارش نسبت به طرح‌واره‌های فیزیکی انتخاب‌شده بسیار حساس است و انتخاب طرح‌واره نامناسب، به شبیه‌سازی‌های نادرست منجر خواهد شد؛ بنابراین با توجه به خصوصیات هر طرح‌واره مندرج در راهنمای نسخه ۳-۹ مدل WRF و نتایج تحقیقات دیگران (برای مثال، کلارک و همکاران، ۲۰۰۹؛ آلیگو و همکاران، ۲۰۰۹؛ گالوس و برش، ۲۰۰۶؛ جانکوف و همکاران، ۲۰۰۵ و جانکوف و همکاران، ۲۰۰۷) تعداد هفت طرح‌واره از دسته خردفیزیک، پنج طرح‌واره از دسته کومولوسی و یک طرح‌واره بدون کومولوس (در مجموع، شش انتخاب کومولوسی) و دو طرح‌واره لایه مرزی انتخاب و از ترکیب آنها یک سامانه همادی ۸۴ عضوی ساخته شد (جدول ۱). برای انواع دیگر طرح‌واره‌های فیزیکی شامل سطح زمین، تابش طول موج بلند و کوتاه، عوارض سطح زمین و موانع شهری به‌طور ثابت از طرح‌واره‌هایی استفاده شد که بیشترین کاربرد را در پژوهش‌های مختلف داشتند.

افقی مختلف ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۱۰ کیلومتر اجرا شد. شبیه‌سازی‌ها برای دو تفکیک افقی ۱ و ۲ کیلومتر، برای سه تفکیک افقی ۳، ۴ و ۵ کیلومتر و تفکیک افقی ۱۰ کیلومتر به‌ترتیب براساس طراحی چهار دامنه، سه دامنه و دو دامنه صورت گرفت. نسبت ریزمقیاس شدن دامنه‌ها نسبت به یکدیگر در تمام موارد ۳ به ۱ بود. بررسی و مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌های بارش با تفکیک‌های افقی مذکور نشان داد در منطقه مورد مطالعه، افزایش تفکیک افقی تا حد معینی در بهبود شبیه‌سازی‌ها (پیش‌بینی‌ها) مؤثر است و افزایش بیشتر تفکیک افقی بیش از آنکه تأثیر درخور توجهی بر کیفیت شبیه‌سازی داشته باشد، موجب افزایش چشمگیر حجم محاسبات و زمان اجرا خواهد شد. در مجموع، با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، تفکیک افقی ۴ کیلومتر به‌عنوان تفکیک افقی بهینه با لحاظ کردن حجم و زمان محاسبات برای منطقه مورد مطالعه انتخاب شد؛ بنابراین حوزه محاسباتی نهایی جهت شبیه‌سازی‌ها، سه دامنه تودرتو با گام‌های شبکه‌ای ۴، ۱۲ و ۳۶ کیلومتر تعیین شد که مرکز دامنه سوم در نقطه‌ای با مختصات 24° طول جغرافیایی و $48^{\circ} 36'$ عرض جغرافیایی قرار داشت (شکل ۲). تعداد ترازهای قائم برای هر سه دامنه ۴۵ تراز فرض و گام زمانی تولید اطلاعات خروجی، یک ساعت تنظیم شد. به‌منظور انتخاب زمان تطبیق (spin up) مناسب، مدل با زمان‌های تطبیق ۶ (گیوتی و همکاران، ۲۰۱۲)، ۱۲ (هیو و همکاران، ۲۰۱۰) و ۲۴ (وانگ و همکاران، ۲۰۱۲) ساعت اجرا شد که نتایج، حاکی از مناسب بودن زمان تطبیق ۱۲ ساعت در مقایسه با دو مورد دیگر بود؛ لذا از آنجایی که هدف از اجرای مدل، تولید شبیه‌سازی‌های روزانه بود، طول مدت شبیه‌سازی، ۳۶ ساعت و زمان تطبیق آن ۱۲ ساعت در نظر گرفته شد. در نظر گرفتن مدت زمان تطبیق برای لحاظ کردن توسعه ویژگی‌های همرفتی کوچک‌مقیاس در مدل WRF ضروری است.

جدول ۱. طرح‌واره‌های انتخابی از پارامتره‌سازی‌های فیزیکی مدل WRF مورد مطالعه در این پژوهش.

ردیف	کد طرح‌واره	نام اختصاری	معرفی کوتاه
طرح‌واره‌های خردفیزیک (mp_physics)			
۱	۲	Lin	طرح‌واره پیچیده‌ای با پنج دسته هیدرومتئور است که برای شبیه‌سازی با تفکیک زیاد مناسب است (لین و همکاران، ۱۹۸۳).
۲	۶	WSM6	برای مقادیر زیاد ابر و بارش‌های سطحی بهبودهایی دارد و خردفیزیک گراپل براساس کار لین و همکاران (۱۹۸۳) و رولنج و هابز (۱۹۸۳) به آن اضافه شده است.
۳	۳	WSM3	این طرح‌واره، یک طرح‌واره تجدیدنظرشده از فرایندهای خردفیزیک ابر با پارامتره‌سازی خردفیزیکی توده‌ای پرکاربرد و با تأکید بر نمایش صحیح ویژگی‌های یخ ابر است (هونگ و همکاران، ۲۰۰۲).
۴	۱	Kessler	یک طرح‌واره ابر گرم ساده است و شامل بخار آب، آب ابر و باران است (کسلر، ۱۹۶۹).
۵	۵	Eta	برای ارتقای تفکیک افقی و قائم، افزایش توان محاسبات موازی از ابر و بهبود پیش‌بینی کمی بارش و ابر، با اعمال برخی تغییرات بر تحلیل اتما میان‌مقیاس NCEP تولید شده است (راجرز و همکاران، ۲۰۰۱).
۶	۸	New Thompson	یک طرح‌واره جدید با فرایندهای برف، یخ و گراپل برای شبیه‌سازی‌های با تفکیک زیاد است (تامپسون و همکاران، ۲۰۰۸).
۷	۷	Goddard	در این طرح‌واره که از فرایندهای برف، یخ و گراپل برای شبیه‌سازی‌های با تفکیک زیاد تشکیل شده است، فرایند اشباع برای محاسبه میعان (نشست) جهت مصرف تمام هوای فوق‌اشباع یا مقدار تبخیر (تصعید) جهت مصرف هوای زیراشباع اصلاح شده است. در این فرایند قطره‌ها (یا یخ) نیز وجود دارند (تائو و همکاران، ۱۹۸۹).
طرح‌واره‌های لایه مرزی سیاره‌ای (bl_pbl_physics)			
۱	۲	MYJ (Mellor-Yamada-Janic)	یک طرح‌واره بسته محلی است (ایوانز و همکاران، ۲۰۱۱) و برای تمام شارش‌های پایدار یا کمی ناپایدار مناسب است (جانجیک، ۱۹۹۴).
۲	۱	YSU (Yonsei University)	این طرح‌واره برعکس MYJ، یک طرح‌واره بسته غیرمحلی است (ایوانز و همکاران، ۲۰۱۱) و عملکردش را در همرفت‌های شدید براساس طرح‌واره MRF بهبود بخشیده است (هانگ و همکاران، ۲۰۰۶).
طرح‌واره‌های کومولوسی (cu_physics)			
۱	۰	بدون کومولوس	طرح‌واره‌ای از نوع شارش جرم، دارای مقیاس زمانی، بدون اثری پتانسیل همرفتی در دسترس (cape) اجزای سطحی و انتقال تکانه است (تایدکی، ۱۹۸۹).
۲	۶	Tiedtke	بهبودیافته طرح‌واره GD است که گذار مقیاس‌های دربرگیرنده ابر را هموار می‌کند (آراکوا، ۲۰۰۴).
۳	۳	GF (Grell-Fretas)	به‌طور روزافزون در دنیا استفاده شده است و می‌تواند ناپایداری‌های محیط را با تولید همرفت عمیق شبیه‌سازی کند. چون مقطع دما و رطوبت را مطابقت می‌دهد، برای وضعیت همرفتی مناسب‌تر است (یانج، ۱۹۹۴).
۴	۲	BMJ	یک پارامتره‌سازی کومولوسی همدادی است و می‌تواند برای مدل‌های با تفکیک زیاد استفاده شود (گرل و فریتاس، ۲۰۱۴).
۵	۵	GD (Grell-D3)	یک پارامتره‌سازی کومولوسی کلاسیک است و به‌طور موفقیت‌آمیزی در موقعیت‌های علمی مختلف استفاده شده است. این طرح‌واره یک مدل ابر ساده است که می‌تواند دمای بسته هوا را هنگامی که صعودش در ترازهای میعان بیشتر از محیط است راه اندازی کند (پنلی و همکاران، ۲۰۱۴).
۶	۱	KF (Kain-Fritch)	
طرح‌واره لایه سطح زمین (sf_surface_physics)			
۱	۲	Noah	در شبیه‌سازی‌های بارش بیشترین استفاده را دارند (کیو و همکاران، ۲۰۱۴) و چن (اف) و همکاران، ۲۰۱۴).
طرح‌واره تابش طول موج بلند (ra_lw_physics)			
۱	۱	RRTM	در شبیه‌سازی‌های بارش بیشترین استفاده را دارند (کیو و همکاران، ۲۰۱۴) و چن (جی) و همکاران، ۲۰۱۴).
طرح‌واره تابش طول موج کوتاه (ra_sw_physics)			
۱	۱	Dudhia	در شبیه‌سازی‌های بارش بیشترین استفاده را دارند (کیو و همکاران، ۲۰۱۴) و چن (جی) و همکاران، ۲۰۱۴).

از دیدگاه عملیاتی، یکی از جالب‌ترین طرح‌واره‌ها، همرفت مرطوب یا همان همرفت کومولوسی است؛ زیرا مربوط به پیش‌بینی زمانی و مکانی بارش است. طرح‌واره‌های همرفتی متفاوت نه تنها بر مقدار عددی بارش بلکه بر تکامل دینامیکی آن نیز تأثیر می‌گذارند؛ زیرا طرح‌واره‌ها نمایه‌های گرمایی عمودی متفاوتی دارند که موجب پاسخ دینامیکی متفاوت می‌شوند. نسل کنونی و آتی مدل‌های منطقه محدود می‌توانند در تفکیک‌های افقی ۱ تا ۳ کیلومتر اجرا شوند و همرفت‌های ضخیم را با دقتی پذیرفتنی در نظر بگیرند، اما مقیاس‌های افقی در فرایندهای همرفتی بسیار کوچک‌تر از مقیاس‌هایی هستند که مدل‌های بزرگ‌مقیاس و میان‌مقیاس NWP با آن کار می‌کنند؛ لذا طی چهل سال گذشته، روش‌های متعددی در مدل‌های NWP جهت بیان فرایندهای همرفت مرطوب به کار گرفته شده است که در ویژگی‌های مدل ابر، فرضیات و کارایی محاسباتی با هم فرق دارند. دلیل کند بودن پیشرفت‌های حاصل در این زمینه، وجود پرسش‌های اساسی در خصوص نحوه حل کردن مشکل و وجود عدم قطعیت‌های زیاد در مدل‌سازی این فرایندها (آراکاوا، ۲۰۰۴) بوده است. این موضوع بیانگر پیچیدگی فرایندهای فیزیکی درگیر و نیز عدم قطعیت‌های مرتبط با استفاده از یک طرح‌واره خاص در مقایسه با گزینه‌های دیگر است (واسکونی، ۲۰۱۸).

شایان ذکر است توسعه‌دهندگان مدل WRF در شیوه‌نامه کاربرد این مدل توصیه کرده‌اند در پیش‌بینی بارش برای دامنه‌های با تفکیک افقی کمتر از ۵ کیلومتر از طرح‌واره کومولوسی استفاده نشود؛ به عبارتی دیگر، گزینه بدون کومولوس برای این موارد اعمال شود. برخی مطالعات نیز نشان داده‌اند استفاده از طرح‌واره کومولوسی برای تفکیک‌های افقی کوچک نامعتبر است، اما آستانه این تفکیک افقی را تعیین نکرده‌اند (آرگوسو و همکاران، ۲۰۱۱؛ ایوانز و همکاران، ۲۰۱۱ و پی و

همکاران، ۲۰۱۴). درمقابل، مطالعات زیادی نیز طرح‌واره‌های کومولوسی را تا تفکیک افقی حدود ۱ کیلومتر برای شبیه‌سازی پراسنج‌های مختلف وضع هوا استفاده کرده‌اند؛ برای مثال شفرد و والش (۲۰۱۶) از چهار طرح‌واره کومولوسی KF، BMJ، J-c و TD برای شبیه‌سازی چرخندهای حاره‌ای در سه دامنه تودرتو با تفکیک ۱/۳۳، ۴ و ۱۲ کیلومتر و رمان و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه حساسیت مدل WRF از طرح‌واره‌های کومولوسی GD، BMJ، KF1 و KF2l برای چهار دامنه تودرتو با تفکیک‌های ۱، ۳، ۹ و ۲۷ کیلومتر استفاده کرده‌اند.

۲-۳ انتخاب سنج‌های استاندارد برای درستی‌سنجی عملکرد مدل

برای ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی هر پراسنج هواشناختی و یافتن پیکربندی مناسب از طرح‌واره‌های فیزیکی که بتواند بهترین تخمین را از آن پراسنج تولید کند، باید نتایج شبیه‌سازی‌ها با توجه به داده‌های مشاهداتی موجود ارزیابی شوند که برای این منظور، سنج‌های درستی‌سنجی استاندارد و مناسبی وجود دارند. در مطالعه حاضر به منظور سنجش درستی نتایج مدل در شبیه‌سازی بارش، از سه دسته سنج درستی‌سنجی شبیه‌سازی‌های احتمالی رویدادهای دسته‌ای بیش از دو دسته، متغیرهای پیوسته و رویدادهای باینری استفاده شده است که در ادامه این سنج‌ها توضیح داده می‌شوند.

۲-۳-۱ سنج‌های درستی‌سنجی پیوسته

از بین سنج‌های درستی‌سنجی پیوسته، سه سنج خطای میانگین، خطای مطلق میانگین و جذر میانگین مربعات خطا برای درستی‌سنجی شبیه‌سازی بارش با استفاده از سامانه همدادی فیزیکی استفاده شده است که شرح مختصری از این سنج‌ها و نحوه محاسبه آنها در ادامه ذکر

خواهد شد.

مقایسه با MAE روش مناسبی برای وزن‌دهی به خطاهاست. این سنجه محدوده‌ای از صفر تا ∞ دارد و مقدار عالی آن صفر است (میلیر و همکاران، ۲۰۰۶):

$$RMSE = \sum_{i=1}^n \sqrt{(F_i - O_i)^2}$$

در این رابطه F و O به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر پیش‌بینی و مشاهده شده در یک زمان و مکان مشخص است.

۲-۳-۲ سنجه‌های درستی‌سنجی رویدادهای دسته‌ای بیشتر از دو دسته

این دسته از سنجه‌ها برای درستی‌سنجی پیش‌بینی‌هایی تعریف می‌شوند که با دسته‌های مختلف (پیش‌بینی چنددسته‌ای) سروکار دارند. در پیش‌بینی‌های دسته‌ای تنها یکی از مجموعه رویدادهای ممکن روی خواهد داد. برای محاسبه این سنجه‌ها، می‌توان از ترکیب حالت‌های مختلف بین مشاهدات و پیش‌بینی، یک جدول توافقی 2×2 را تشکیل داد (ویلکز، ۱۹۹۵) و سنجه‌های مختلفی را تعریف و بررسی کرد (قلی، ۲۰۰۹). با استفاده از این نوع طبقه‌بندی، با گذشت زمان امتیازات یا سنجه‌های مختلف زیادی برای ارزیابی خواص مختلف پیش‌بینی دسته‌ای طراحی و معرفی شد (برای مثال، هانسن و کوپیرز، ۱۹۶۵؛ مک برید و ابرت، ۲۰۰۰؛ شفر، ۱۹۹۰؛ استفانسن، ۲۰۰۰ و ویلکز، ۱۹۹۵). در تحقیق حاضر از بین این سنجه‌ها، احتمال آشکارسازی (POD)، نرخ هشدار نادرست (FAR)، نرخ تشخیص غلط (F) و شاخص فراوانی اریبی (FBI) محاسبه شده است.

در یک جدول توافقی 2×2 (جدول ۲) مقادیر y و o که به ترتیب معرف داده‌های پیش‌بینی و مشاهده هستند و مقادیر a، b، c و d که شاخص‌های درستی‌سنجی این بخش براساس آنها محاسبه می‌شوند، عبارت‌اند از:

O₁: مشاهداتی مثبت (وقوع پدیده)،
O₂: مشاهداتی منفی (عدم وقوع پدیده)،

۱) اریبی (Bias) یا خطای میانگین ME (Mean Error)

اریبی، عملکرد پیش‌بینی نسبت به مشاهدات است؛ سوی خطای میانگین نظام‌مند (systematic) (مثبت یا منفی) را نشان می‌دهد و روند پیش‌بینی به سوی بیش‌تخمینی یا کم‌تخمینی مشاهدات را تعیین می‌کند. اگر اریبی‌های مدل به‌خوبی شناخته شوند، می‌توان تصحیح‌های لازم را برای تولید یک پیش‌بینی دقیق‌تر برای یک منطقه خاص به‌کاربرد. اریبی از رابطه زیر تعیین می‌شود و براساس این رابطه، دامنه‌ای بین $-\infty$ تا ∞ دارد که امتیاز عالی آن صفر است (میلیر و همکاران، ۲۰۰۶):

$$Mean Error = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)$$

که در آن F و O به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر پیش‌بینی و مشاهده شده در یک زمان و مکان مشخص و N تعداد کل جفت پیش‌بینی و مشاهده است.

۲) خطای مطلق میانگین MAE (Mean Absolute Error)
این سنجه بیانگر میانگین قدر مطلق خطا است و بنابراین جهت خطا را نشان نمی‌دهد و مطابق رابطه زیر، میانگین مقادیر مطلق خطاهای جداگانه پیش‌بینی است. MAE از نظر محاسباتی ارزان است، اما درعمل، بیشتر از خطای میانگین مربع (MSE) استفاده می‌شود (میلیر و همکاران، ۲۰۰۶).

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_i - O_i|$$

در این رابطه نیز F و O به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر پیش‌بینی و مشاهده شده در یک زمان و مکان مشخص و N تعداد کل جفت پیش‌بینی و مشاهده است.

۳) جذر میانگین مربعات خطا RMSE (Root Mean Square Error)

RMSE، که براساس مربع خطای مدل است، نسبت به خطاهای بزرگ حساس است؛ به‌عبارتی، خطاهای بزرگ را جریمه سنگین‌تری می‌کند و در یک سطح خاص، در

جدول ۲. جدول توافقی (۲×۲).

	O1	O2	
Y1	a	b	a + b
Y2	c	d	c + d
	a+c	b+d	n=a+b+c+d

صفر تا بی نهایت و امتیاز ۱ نشان دهنده عالی بودن پیش بینی است. شاخص FBI از رابطه زیر تعیین می شود:

$$FBI = B = \frac{a+b}{a+c}$$

(۳) نسبت هشدار خطا یا FAR (False Alarm Ratio)

این شاخص که تنها تابعی از هشدارهای خطا و موفقیت است، نسبت هشدار اشتباه پیش بینی را نشان می دهد. شاخص FAR با کم پیش بینی بهبود می یابد و دامنه ای بین صفر تا یک دارد. امتیاز عالی برای این شاخص صفر است. شاخص FAR با معادله زیر محاسبه می شود:

$$FAR = \frac{b}{a+b}$$

(۴) نرخ هشدار غلط یا F (False Alarm Rate, F

Probability of False Detection)

این شاخص که احتمال آشکارسازی نادرست را تعیین می کند، به هشدارهای غلط و منفی صحیح حساس است و با کم تخمینی بهبود می یابد. شاخص F اغلب به همراه POD برای تعیین امتیاز ROC استفاده می شود، دامنه ای بین صفر تا ۱ دارد و امتیاز عالی آن صفر است:

$$F = \frac{b}{b+d}$$

در تحقیق حاضر، با توجه به طیف مقادیر بارش در مناطق مرکزی ایران که تعیین بیشتر از دو دسته بارشی را ایجاب می کرد، از پیش بینی های چنددسته ای و از بین سنجه های معرفی شده در جدول توافقی ۲×۲، از سه سنجه POD، FAR و FBI استفاده شد که از پرکاربردترین سنجه ها از این دسته محسوب می شوند. برای این منظور، با توجه به مقادیر بارش های روزانه در سراسر کوچک ترین دامنه محاسباتی شامل مناطق پست مرکزی و

Y1: پیش بینی های مثبت (وقوع پدیده) ،

Y2: پیش بینی های منفی (عدم وقوع پدیده) ،

a: تعداد دفعاتی که پدیده اتفاق افتاده و وقوع آن پیش بینی شده باشد؛

b: تعداد دفعاتی که پدیده اتفاق نیفتاده ولی وقوع آن پیش بینی شده باشد؛

c: تعداد دفعاتی که پدیده اتفاق افتاده و وقوع آن پیش بینی نشده باشد؛

d: تعداد دفعاتی که پدیده اتفاق نیفتاده ولی وقوع آن پیش بینی نشده باشد.

از مهم ترین شاخص های دسته ای می توان به موارد زیر اشاره کرد:

(۱) احتمال آشکارسازی یا POD (Probability of Detection)

این شاخص که به H (Hit Rate) نیز معروف است، درصد شبیه سازی درست بارش را در مقایسه با داده های مشاهداتی نشان می دهد. دامنه این شاخص صفر تا یک و امتیاز کامل آن یک است. معادله تعیین این شاخص با توجه به جدول توافقی ۲ عبارتست از:

$$H = POD = \frac{a}{a+c}$$

(۲) شاخص فراوانی اریبی یا FBI (Frequency Bias Index)

این شاخص نشان می دهد مدل WRF چقدر به بیش تخمینی یا کم تخمینی رخداد گرایش دارد. اگر FBI بزرگ تر از یک باشد، مدل، بیش پیش بینی و اگر کمتر از یک باشد، مدل کم پیش بینی دارد. دامنه این شاخص بین

جدول ۳. جدول توافقی ۳×۳ برای دسته‌های تعریف‌شده.

مشاهده بارش	مشاهده بارش	مشاهده بارش	مشاهده بارش
بین ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر بر روز	بین ۱ تا ۱۰ میلی‌متر بر روز	کوچک‌تر از ۱ میلی‌متر بر روز	
t	s	r	پیش‌بینی بارش کوچک‌تر از ۱ میلی‌متر بر روز
w	v	u	پیش‌بینی بارش بین ۱ تا ۱۰ میلی‌متر بر روز
z	y	x	پیش‌بینی بارش بین ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر بر روز

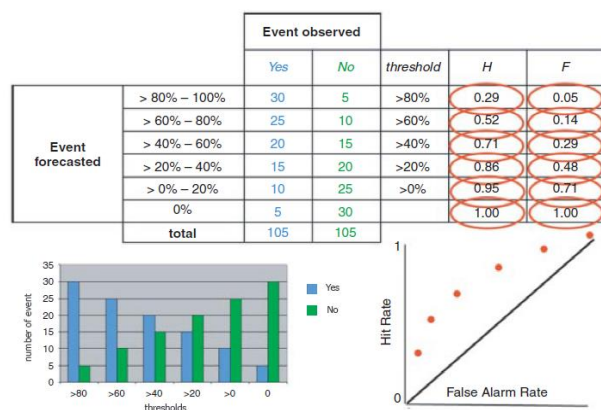
ارتفاعات وسیع زاگرس و با رعایت شیوه‌نامه دسته‌بندی بارش روزانه مطابق با راهنمای سال ۲۰۱۴ سازمان جهانی هواشناسی برای استانداردسازی درستی‌سنجی، سه آستانه بارشی ۲۴ ساعته ۱، ۱۰ و ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد و بنابراین چهار دسته کوچک‌تر از ۱، بین ۱ تا ۱۰، بین ۱۰ تا ۵۰ و بزرگ‌تر از ۵۰ میلی‌متر بر روز برای درستی‌سنجی استفاده شد که با در نظر گرفتن کم بودن تعداد نمونه‌های بیش از ۵۰ میلی‌متر در منطقه مورد مطالعه در روزهای منتخب، این دسته ارزیابی نشد و سه دسته به ترتیب کوچک‌تر از ۱، بین ۱ تا ۱۰ و بین ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر بر روز به عنوان دسته‌های جدول توافقی تعریف شد. جدول ۳ جدول توافقی ۳×۳ را معرفی می‌کند. در این جدول نه حالت پیش‌بینی و مشاهدات وجود دارد که جمع کل آنها $n=r+s+t+u+v+w+x+y+z$ است.

۳-۳-۲ سنج‌های درستی‌سنجی شبیه‌سازی‌های احتمالی

در تحقیق حاضر، از میان سنج‌های درستی‌سنجی شبیه‌سازی‌های احتمالی، از نمودار و امتیاز Receiver Operating Characteristic (یا به اختصار ROC) به دلیل داشتن توانایی اندازه‌گیری کیفیت یک پیش‌بینی باینری یا

A تصمیم $\approx$ براساس احتمال پیش‌بینی (بویزا و پالمر، ۱۹۹۸ و میسون و گراهام، ۱۹۹۹) استفاده شده است. در منحنی ROC که در این پژوهش براساس سه دسته بارشی تعریف شده ترسیم می‌شود، محور X، نرخ هشدار نادرست یک رویداد (F) و محور Y، احتمال پیش‌بینی درست یک رویداد (POD) است. به عبارت دیگر، برای تعیین ROC ابتدا مقادیر POD و F برای هر آستانه احتمال پیش‌بینی تعیین و سپس برای هر کدام از این آستانه‌ها یک نقطه روی نمودار ROC ترسیم می‌شود که در نهایت، منجر به یک منحنی می‌شود. سطح میان منحنی و محور افقی، امتیاز ROC یا مهارت پیش‌بینی است (شکل ۳). محدوده مقادیر ROC از صفر تا یک است. امتیاز عالی ROC یک است و نشان می‌دهد پیش‌بینی کامل است درحالی‌که امتیاز ۰/۵ و کمتر از آن، نشان‌دهنده نبود مهارت پیش‌بینی است. امتیاز ۰/۷ نشان‌دهنده حد پایین پیش‌بینی مفید است (بویزا و همکاران، ۱۹۹۹). جهت آشنایی بیشتر با شاخص ROC به واندیشن و همکاران (۲۰۰۱) رجوع شود.

در این پژوهش، ترسیم نمودار ROC نیازمند محاسبه احتمال وقوع بارش برای سه آستانه بارشی کمتر از ۱ میلی‌متر بر روز، بین ۱ تا ۱۰ میلی‌متر بر روز و بین ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر بر روز است که برای تحقق آن از روش انتخابات



شکل ۳. طرح کلی منحنی ROC تولیدشده براساس آستانه‌های احتمال تعریف‌شده برای پیش‌بینی احتمالی (اینس و دورلینگ، ۲۰۱۳).

آستانه‌های احتمال ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ در نظر گرفته شده است.

۳ بحث و نتایج

با توجه به روش کار مطرح‌شده در بخش قبل، به‌طور کلی پس از تعیین تفکیک افقی ۴ کیلومتر به‌عنوان تفکیک بهینه اجرای مدل برای شبیه‌سازی بارش، سامانه همادی فیزیکی برای ۱۳۲ ایستگاه، ۱۲ روز و ۸۴ عضو اجرا و سپس به‌ترتیب برای طرح‌واره‌های خردفیزیکی، کومولوسی و لایه مرزی، جدول توافقی به‌صورت جداگانه تشکیل شد که برای تشکیل این جدول برای هریک به‌ترتیب یک همادی با ۱۲، ۱۴ و ۴۲ عضو مدنظر قرار گرفت. انواع سنجه‌های منتخب برای سه گروه پیوسته، دسته‌ای و احتمالی محاسبه و نمودارهای لازم برای تحلیل آنها ترسیم شد. سپس با بررسی، ارزیابی و مقایسه نمودارها و نتایج محاسبات سنجه‌های منتخب، طرح‌واره‌هایی تعیین شدند که نسبت به سایر طرح‌واره‌ها کمترین عدم‌قطعیت در شبیه‌سازی بارش را داشتند. البته این نتایج، فقط مربوط به شبیه‌سازی بارش در مناطق مرکزی ایران در ماه دسامبر ۲۰۱۵ و ماه‌های ژانویه و فوریه ۲۰۱۶ است.

آزاد (Democratic Voting) استفاده شده است. نام این روش برگرفته از این موضوع است که در پیش‌بینی احتمالی غیرواسنجیده، سهم اعضای سامانه همادی یکسان در نظر گرفته می‌شود و هر عضو یک رأی مساوی در تعیین حالت واقعی جو دارد؛ بنابراین احتمال بارش کمتر از یک آستانه معین برابر است با تعداد اعضای سامانه که پیش‌بینی کمتر از آن آستانه بر روز را دارند تقسیم بر تعداد اعضای سامانه. به همین ترتیب، احتمال بارش بین دو آستانه برابر با تعداد اعضای سامانه با پیش‌بینی بین این دو آستانه تقسیم بر تعداد اعضا است (ویلکز و همیل، ۲۰۰۷ و کنت، ۲۰۰۲). رابطه زیر بیانگر نحوه محاسبه احتمال پیش‌بینی است:

$$P(V > \tau) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1 \text{ if } x_i > \tau, 0 \text{ if } x_i < \tau)$$

که x_i مقدار پیش‌بینی عضو i ام، τ آستانه بارشی و n تعداد اعضای سامانه است.

پس از محاسبه احتمال وقوع بارش برای هر دسته، برای ترسیم نمودار ROC لازم است آستانه‌های احتمالی تعریف شود. تعداد این آستانه‌ها نباید از پنج کمتر باشد و تعداد رخدادها واقع در هر آستانه احتمالی نباید از صد کمتر باشد؛ از این‌رو، برای ترسیم نمودار ROC در این پژوهش

جدول ۴. نحوه محاسبه پارامترهای جدول توافقی ۳×۳ برای دسته‌های تعریف‌شده.

مشاهده بارش کوچک‌تر از ۱ میلی‌متر بر روز	مشاهده بارش بین ۱ تا ۱۰ میلی‌متر بر روز	مشاهده بارش بین ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر بر روز	مشاهده بارش
z	v	r	a
x+y	u+w	s+t	b
t+w	s+y	u+x	c
r+s+u+v	r+t+x+z	v+w+y+z	d

۳-۱ سنج‌های درستی‌سنجی پیوسته

نتایج محاسبه سنج‌های درستی‌سنجی منتخب از میان این گروه شامل سه سنج RMSE، MAE، ME برای طرح‌واره‌های خردفیزیکی، کومولوسی و لایه مرزی به ترتیب در جداول ۵ تا ۷ ارائه شده است. گفتنی است در تمام این سنج‌ها هرچه امتیاز به صفر نزدیک‌تر باشد، خطای شبیه‌سازی کمتر است.

مقدار سنج‌های مندرج در جدول ۵ براساس این سه سنج تا حدودی به هم نزدیک است که می‌توان آن را نتیجه ارزیابی هر طرح‌واره به صورت یک همدای دانست؛ چون در ارزیابی هریک از طرح‌واره‌های خردفیزیکی، یک همدای متشکل از دو طرح‌واره لایه مرزی و شش حالت کومولوسی شامل پنج طرح‌واره کومولوسی و یک حالت بدون کومولوسی در نظر گرفته شده است. در مجموع، طرح‌واره خردفیزیکی شماره ۸

(New Thompson) و پس از آن طرح‌واره شماره ۶ (WSM6) بهتر از دیگر طرح‌واره‌ها می‌تواند بارش را شبیه‌سازی کنند.

از بین طرح‌واره‌های کومولوسی در مجموع، دو طرح‌واره شماره ۳ (GF) و شماره ۱ (KF) عملکرد بهتری نشان می‌دهند (جدول ۶). از طرف دیگر، براساس راهنمای مدل WRF، برای دامنه‌های با تفکیک افقی کمتر از ۵ کیلومتر استفاده از طرح‌واره کومولوسی توصیه نمی‌شود، اما نتایج این بخش نشان می‌دهد که عملکرد مناسب طرح‌واره‌های کومولوسی در دامنه‌ای با تفکیک ۴ کیلومتر حتی می‌تواند بهتر از حالت بدون طرح‌واره کومولوسی باشد. این نتیجه، مؤید نتایج برخی پژوهش‌های دیگر مانند شفر و والش (۲۰۱۶) و رمسان و همکاران (۲۰۱۵) در این زمینه است که در بخش معرفی مدل به آن اشاره شد.

جدول ۵. نتایج محاسبه سنج‌های درستی‌سنجی طرح‌واره‌های خردفیزیکی.

کد طرح‌واره	RMSE	MAE	ME
۱	۴/۸۶	۲/۱۸	۱/۴۲
۲	۴/۳۸	۲/۲۴	۱/۵۳
۳	۴/۸	۲/۳۶	۲/۰۶
۵	۴/۲۳	۲/۵۱	۱/۹۲
۶	۳/۹۶	۲/۰۸	۱/۵۳
۷	۴/۲۶	۲/۲۳	۱/۸۵
۸	۴/۱۳	۲/۱۵	۱/۰۷
همدای کلی	۳/۹۴	۲/۱۲	۱/۶۲

جدول ۶. نتایج محاسبه سنج‌های درستی سنجی طرح‌واره‌های کومولوسی.

کد طرح‌واره	RMSE	MAE	ME
۰	۴/۱۷	۲/۷۸	۲/۴۲
۱	۴/۰۹	۲/۲۰	-۱/۸۷
۲	۴/۳۸	۲/۹	۲/۴۸
۳	۴/۰۶	۲/۱۹	۱/۵
۵	۴/۶	۳/۲۳	۲/۷۲
۶	۴/۴	۳/۱۳	۲/۵۵
همادی کلی	۳/۹۴	۲/۱۲	۱/۶۲

مطابق جدول ۷، دو طرح‌واره لایه مرزی با کدهای ۱ و ۲ مقادیر خطای تقریباً یکسانی در شبیه‌سازی نشان می‌دهند، اما طرح‌واره لایه مرزی با کد ۲ (MYJ) با اندک اختلاف، کارایی بیشتری از خود نشان می‌دهد که این نتیجه نیز با نتایج به‌دست‌آمده از زو و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت دارد.

در هر سه جدول ۵ و ۶ مقادیر به‌دست‌آمده برای همادی کلی، مطلوب‌تر از مقادیر محاسبه‌شده برای هر طرح‌واره خردفیزیکی و کومولوسی است که می‌توان دلیل آن را تفاوت در تعداد اعضای همادی به‌کاررفته در محاسبه این مقادیر یعنی ۱۲ عضو برای هر طرح‌واره خردفیزیکی، ۱۴ عضو برای هر طرح‌واره کومولوسی و ۸۴ عضو برای همادی کلی دانست و نتیجه گرفت که افزایش تعداد اعضای سامانه همادی در بهبود نتایج آن مؤثر است. مقادیر سنج‌ها در جدول ۷ برای همادی کلی و طرح‌واره‌ها نزدیک است. استفاده از ۴۲ عضو همادی

برای هر طرح‌واره لایه مرزی می‌تواند گویای این موضوع باشد که افزایش تعداد اعضای همادی تا حدی می‌تواند در افزایش کیفیت پیش‌بینی‌های سامانه نتیجه‌بخش باشد و بیش از آن، تفاوت در خورتوجهی در نتایج مشاهده نخواهد شد.

۲-۳ سنج‌های درستی سنجی رویدادهای دسته‌ای بیشتر از دو دسته

نتایج محاسبات عملکرد سامانه همادی در پیش‌بینی بارش با استفاده از سه سنج منتخب POD، FAR و FBI از میان سنج‌های این گروه برای سه دسته بارشی کمتر از ۱ میلی‌متر بر روز، بین ۱ تا ۱۰ میلی‌متر بر روز و بین ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر بر روز در شکل‌های ۴ تا ۶ به‌ترتیب برای طرح‌واره‌های خردفیزیکی، کومولوسی و لایه مرزی نشان داده شده است. با مقایسه شکل‌های ۴ تا ۶ همانند نتیجه به‌دست‌آمده از

جدول ۷. نتایج محاسبه سنج‌های درستی سنجی طرح‌واره‌های لایه مرزی.

کد طرح‌واره	RMSE	MAE	ME
۱	۳/۹۹	۲/۲	۱/۷۵
۲	۳/۹۴	۲	۱/۵
همادی کلی	۳/۹۴	۲/۱۲	۱/۶۲

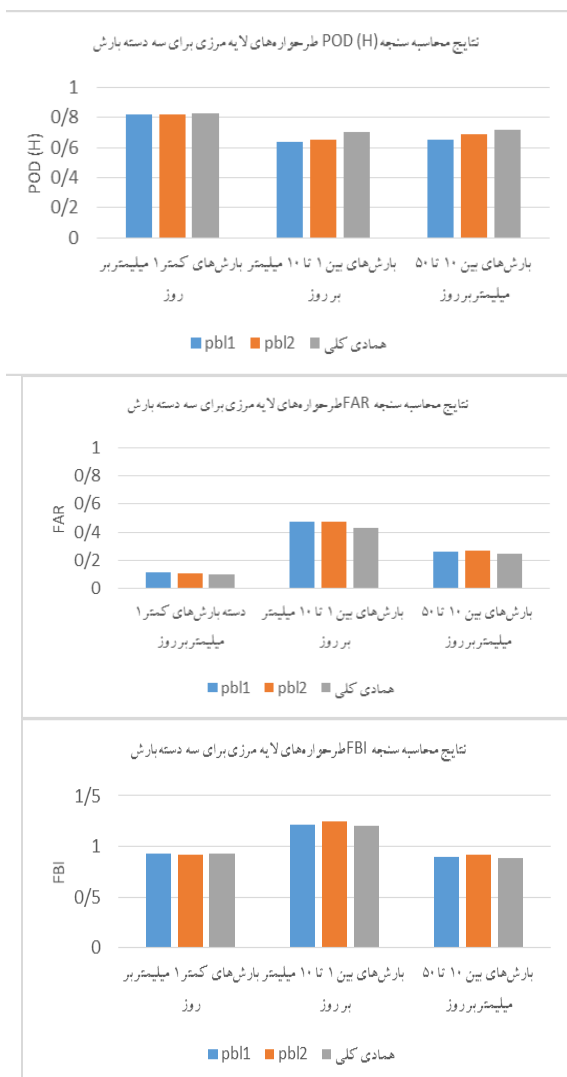
بارشی ۱ تا ۱۰ میلی‌متر، طرح‌واره‌های بدون کومولوسی و کومولوسی با کدهای ۱، ۲ و ۳ و در دسته بارشی ۱۰ تا ۵۰



شکل ۴. نمودار محاسبه سنجه‌های راستی‌آزمایی (الف) POD (ب) FAR (ج) FBI برای طرح‌واره‌های خردفیزیکی. نماد mp در راهنمای نمودار مخفف microphysics و عدد کنار هر mp معرف شماره ردیف هر طرح‌واره مندرج در راهنمای WRF و جدول ۲ است.

بند ۳-۱ می‌توان نتیجه گرفت همدی کلی توانایی بیشتری نسبت به طرح‌واره‌های جداگانه در شبیه‌سازی مناسب بارش دارد. با افزایش اعضای همدی، عملکرد مدل بهبود می‌یابد ولی مقادیر نزدیک سنجه‌ها در نمودارهای مربوط به طرح‌واره لایه مرزی که با ۴۲ عضو محاسبه شده‌اند نسبت به همدی کلی، بیانگر این است که احتمالاً افزایش تعداد اعضاء می‌تواند تا درجه معینی باعث بهبود کیفیت شبیه‌سازی شود. به‌علاوه، عملکرد همدی فیزیکی در مورد دو دسته بارشی کمتر از ۱ میلی‌متر بر روز و بین ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر بر روز مناسب‌تر از دسته بارشی بین ۱ تا ۱۰ میلی‌متر بر روز است به‌طوری‌که در دسته بارشی کمتر از ۱ میلی‌متر بر روز، عملکرد تمامی طرح‌واره‌های بررسی شده بسیار مناسب است و این نشان می‌دهد مدل در شبیه‌سازی نبود رویداد بارش مهارت زیادی دارد؛ بنابراین در انتخاب طرح‌واره‌های با عملکرد مناسب‌تر در بندهای بعد، تنها دو دسته بارش ۱ تا ۱۰ میلی‌متر و ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر بر روز ملاک تشخیص قرار گرفت.

براساس شکل‌های ۴-الف، ۴-ب و ۴-ج در دسته بارشی ۱ تا ۱۰ میلی‌متر، طرح‌واره‌های خردفیزیکی با کدهای ۵، ۶، ۷ و ۸ و در دسته بارشی بین ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر بر روز، طرح‌واره‌های خردفیزیکی با کدهای ۶، ۷ و ۸ بهترین عملکرد را دارند که در مجموع، طرح‌واره‌های ۶ (WSM6)، ۷ (Godard) و ۸ (New Thompson) می‌توانند بهترین طرح‌واره‌های خردفیزیکی از دیدگاه سنجه‌های منتخب درستی‌سنجی شبیه‌سازی‌های احتمالی از رویدادهای دسته‌ای باشند. همان‌طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، مقادیر سنجه‌های محاسبه‌شده برای مدل در دسته بارشی بین ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر بهتر از مقادیر محاسبه شده برای دسته بارشی بین ۱ تا ۱۰ میلی‌متر است و بنابراین در دسته بارش‌های ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر، مدل عملکرد مناسب‌تری در شبیه‌سازی بارش داشته است. علاوه‌براین، با توجه به شکل‌های ۵-الف، ۵-ب و ۵-ج، در دسته

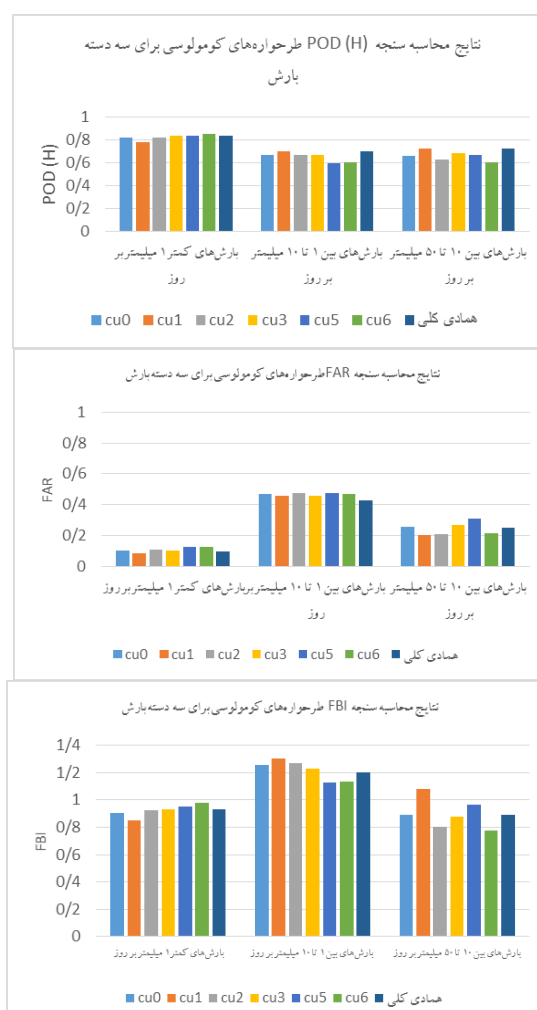


شکل ۶. نمودار محاسبه سنجه‌های راستی‌آزمایی (الف) POD (ب) FAR (ج) FBI برای طرحواره‌های لایه مرزی. نماد pbl در راهنمای نمودار، مخفف planetary boundary layer و عدد کنار هر pbl معرف کد طرح‌واره مندرج در راهنمای WRF و جدول ۲ است.

۳-۳ سنجه‌های درستی‌سنجی شبیه‌سازی‌های احتمالی

همان‌طور که در بخش روش کار ذکر شد، نمودار و امتیاز ROC یکی از پرکاربردترین شاخص‌های درستی‌سنجی شبیه‌سازی این دسته رویدادها جهت تعیین مهارت مدل در

میلی‌متر، طرح‌واره‌های ۱ و ۳ بهترین توانایی را نشان می‌دهند که می‌توان نتیجه گرفت طرح‌واره‌های کومولوسی با کدهای ۱ (KF) و ۳ (GF) گزینه‌های ارجح هستند. گفتنی است بررسی این شکل نیز نکته مطرح شده در بخش قبل در خصوص عملکرد به نسبت بهتر پیکربندی‌های با طرح‌واره کومولوسی نسبت به حالت بدون کومولوسی را حتی در تفکیک ۴ کیلومتر تأیید می‌کند.



شکل ۵. نمودار محاسبه سنجه‌های راستی‌آزمایی (الف) POD (ب) FAR (ج) FBI برای طرحواره‌های کومولوسی. نماد cu در راهنمای نمودار، مخفف cumulus و عدد کنار هر cu معرف کد طرح‌واره مندرج در راهنمای WRF و جدول ۲ است.

بارش کمتر از ۱ میلی‌متر بسیار خوب است، تحلیل‌های دیگر در این بخش که منحصر به تعیین مناسب‌ترین طرح‌واره‌های خردفیزیکی، کومولوسی و لایه مرزی جهت شبیه‌سازی بارش است، به دو دسته بارشی دیگر محدود شد.

با بررسی نمودارهای موجود در شکل‌های ۷ تا ۹ و نیز جدول‌های ۸ تا ۱۰، می‌توان نتیجه گرفت که در مجموع، با در نظر گرفتن هر دو دسته بارشی بین ۱ تا ۱۰ میلی‌متر و ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر، طرح‌واره‌های خردفیزیکی با کدهای ۶ (WSM6) و ۸ (New Thompson) بهترین طرح‌واره‌ها برای شبیه‌سازی بارش هستند. علاوه بر این، طرح‌واره‌های بدون کومولوسی و کومولوسی با کدهای ۱ (KF) و ۳ (GF) و نیز طرح‌واره لایه مرزی با کد ۲ (MYJ) بهترین طرح‌واره برای این نوع پارامتره‌سازی به نظر می‌رسد که دوباره تأییدکننده نتایج دو بخش قبلی در این موضوع هستند. در شکل‌های ۷ تا ۹، عملکرد بهتر مدل در دسته بارشی ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر نسبت به دسته ۱ تا ۱۰ میلی‌متر نیز در قالب نزدیک‌تر بودن نمودارهای دسته ۱ تا ۱۰ میلی‌متر به خط نیمساز نمودار مشهود است.

شبیه‌سازی پراسنج‌های هواشناسی از جمله بارش است؛ بنابراین همانند بخش‌های ۱-۳ و ۲-۳، ابتدا نمودارهای ROC طرح‌واره‌های خردفیزیکی، کومولوسی و لایه مرزی برای سه دسته بارشی کمتر از ۱ میلی‌متر بر روز، بین ۱ تا ۱۰ میلی‌متر بر روز و بین ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر بر روز ترسیم و سپس جداول امتیاز مربوطه که سطح زیر منحنی ROC است، برای این سه طرح‌واره به ترتیب در جدول‌های ۸ تا ۱۰ محاسبه شد. پس از بررسی این سه جدول، علاوه بر اخذ نتایج مشابه نتایج دو بخش قبل، با مقایسه امتیازهای ROC طرح‌واره‌های خردفیزیکی و کومولوسی دیده می‌شود طرح‌واره‌های خردفیزیکی نسبت به طرح‌واره‌های کومولوسی تأثیر بیشتری در شبیه‌سازی بارش دارند و طرح‌واره‌های لایه مرزی نیز به میزان چشمگیری مؤثر هستند.

همان‌طور که از نتایج دو بخش ۱-۳ و ۲-۳ انتظار می‌رفت، سطح زیر منحنی ROC برای همدادی کلی بیشتر از سطح زیر منحنی ROC طرح‌واره‌ها به‌طور جداگانه بود که حاکی از توانایی بیشتر همدادی کلی در شبیه‌سازی بارش نسبت به طرح‌واره‌های جداگانه است. از آنجایی که به‌طور مشابه با بخش ۱-۳ و ۲-۳، عملکرد مدل برای

جدول ۸. امتیاز ROC برای درستی‌سنجی طرح‌واره‌های خردفیزیکی.

کد طرح‌واره	بارش کمتر از ۱ میلی‌متر بر روز	بارش بین ۱ تا ۱۰ میلی‌متر بر روز	بارش ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر بر روز
۱	۰/۹۱	۰/۸۲	۰/۷۹
۲	۰/۹	۰/۸۴	۰/۸۶
۳	۰/۹۱	۰/۸۵	۰/۸۴
۵	۰/۹	۰/۸۵	۰/۸۹
۶	۰/۹۱	۰/۸۵	۰/۸۹
۷	۰/۸۹	۰/۸۱	۰/۸۷
۸	۰/۹	۰/۸۴	۰/۸۷
همادی کلی	۰/۹۲	۰/۸۷	۰/۹

جدول ۹. امتیاز ROC برای درستی سنجی طرح‌واره‌های کومولوسی.

کد طرح‌واره	بارش کمتر از ۱ میلی‌متر بر روز	بارش بین ۱ تا ۱۰ میلی‌متر بر روز	بارش ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر بر روز
۰	۰/۹	۰/۸۵	۰/۸۵
۱	۰/۸۹	۰/۸۳	۰/۸۶
۲	۰/۹	۰/۸۴	۰/۸۵
۳	۰/۹۲	۰/۸۵	۰/۸۳
۵	۰/۸۸	۰/۸	۰/۸۳
۶	۰/۸۹	۰/۸۲	۰/۸۱
همادی کلی	۰/۹۲	۰/۸۷	۰/۹

۴ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

برای دستیابی به اهداف این پژوهش، سامانه همادی فیزیکی در مدل هواشناسی میان‌مقیاس WRF برای شبیه‌سازی بارش در ۱۳۲ ایستگاه همدیدی در مناطق مرکزی ایران طی دوازده روز با بارش‌های کم، متوسط و زیاد در ماه دسامبر ۲۰۱۵ و ماه‌های ژانویه و فوریه ۲۰۱۶ اجرا شد. از آنجایی که براساس تحقیقات، سه پارامتره‌سازی خردفیزیکی، کومولوسی و لایه مرزی بیشترین نقش را در شبیه‌سازی بارش ایفا می‌کنند، همادی فیزیکی روی هفت طرح‌واره خردفیزیکی، شش طرح‌واره کومولوسی و دو طرح‌واره لایه مرزی اجرا شد که به تولید ۸۴ عضو همادی برای سامانه مورد نظر منجر شد. انتخاب این طرح‌واره‌ها نیز براساس نتایج پژوهش‌های انجام‌شده

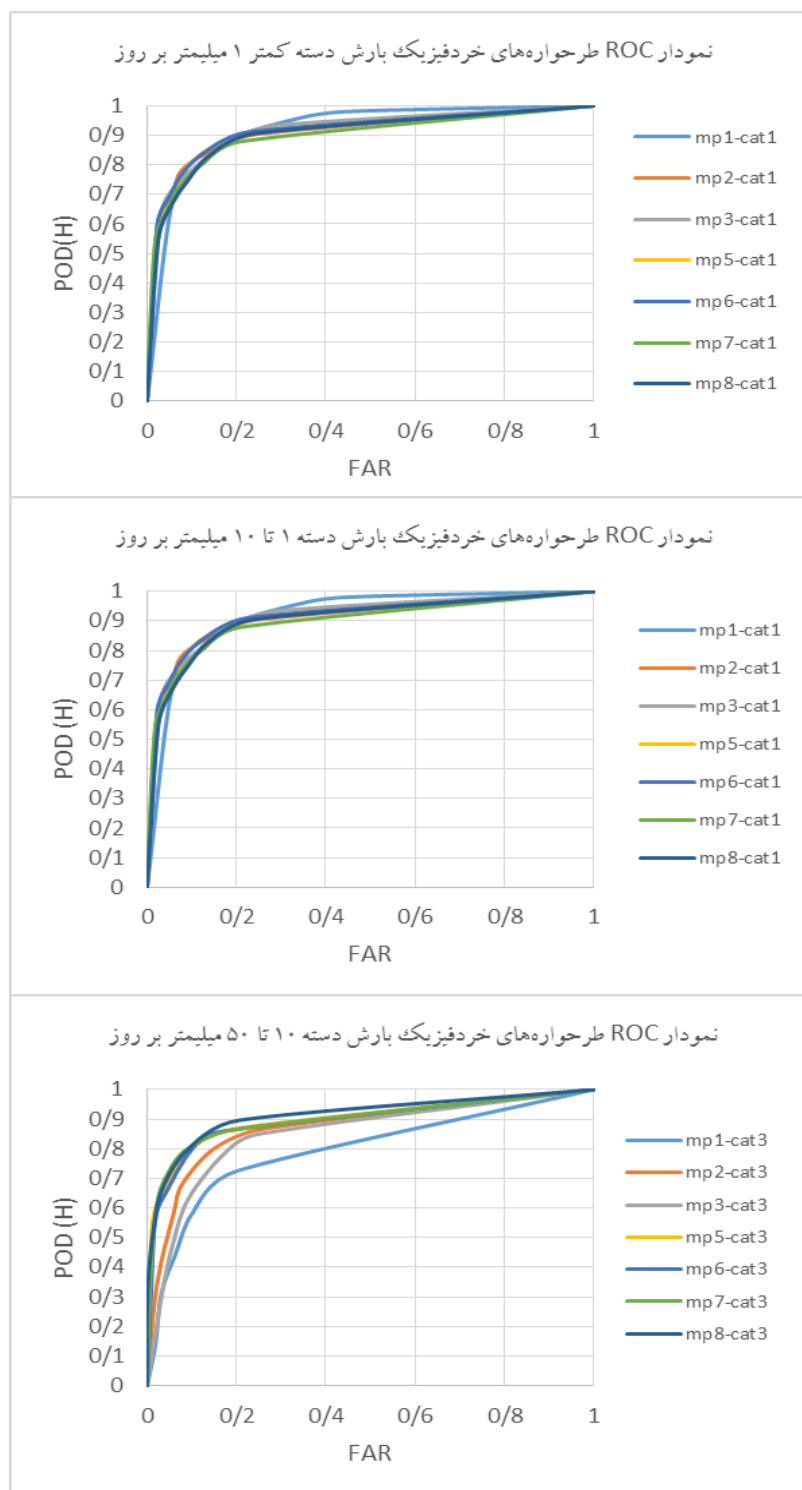
مبنی بر تأثیر درخور توجه آنها بود. گفتنی است برای یافتن بهترین تفکیک افقی مدل برای شبیه‌سازی دقیق‌تر بارش، قبل از اجرای همادی، مدل با شش تفکیک افقی مختلف ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۱۰ کیلومتر اجرا و تفکیک افقی بهینه تعیین شد.

به‌هرحال پس از اجرای همادی فیزیکی، عملکرد سامانه با در نظر گرفتن داده‌های مشاهداتی و استفاده از سنج‌های مختلف آماری از سه گروه سنج کلی زیر درستی سنجی شد. این سه گروه سنج عبارت بودند از:

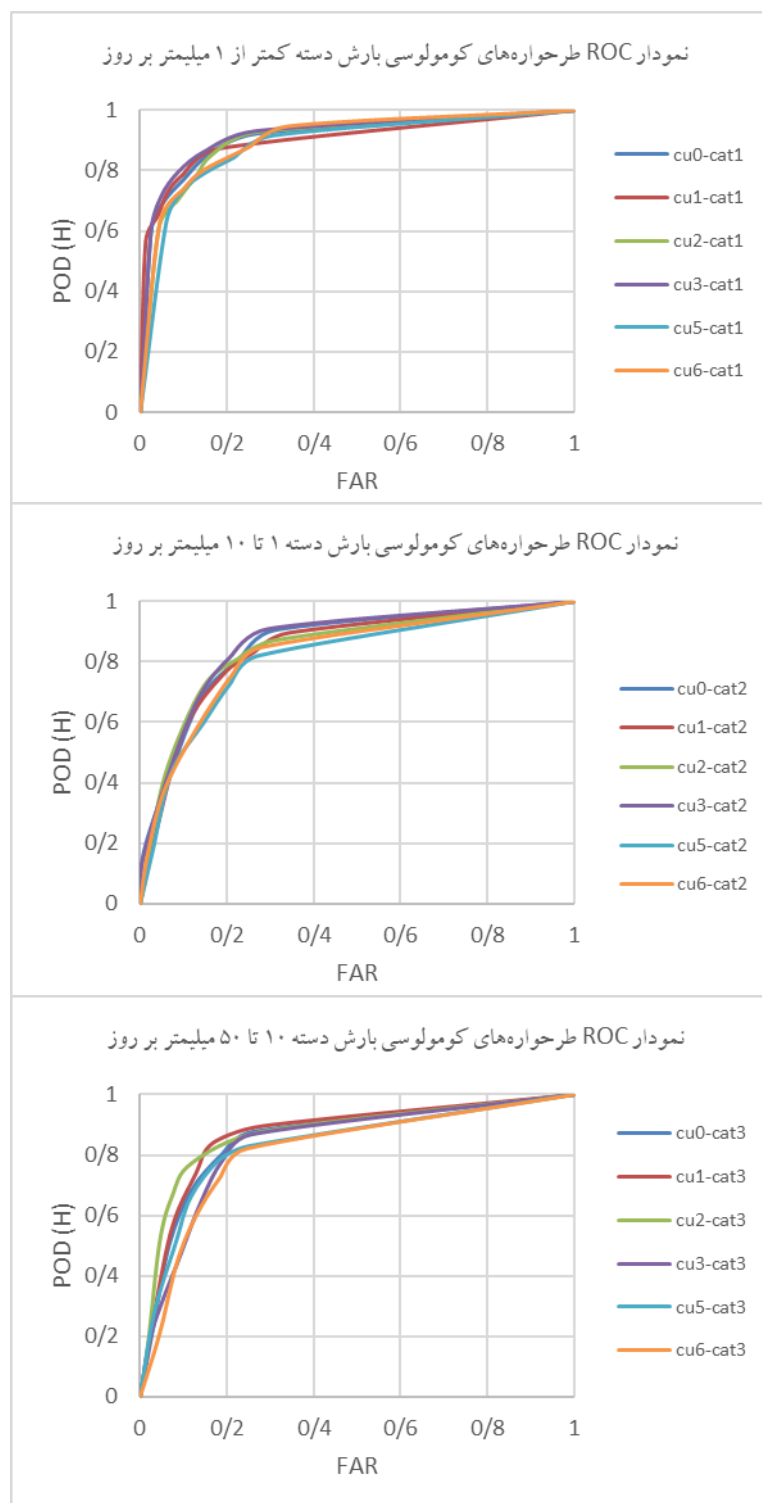
- سنج‌های درستی سنجی پیوسته؛
- سنج‌های درستی سنجی رویدادهای دسته‌ای بیش از دو دسته؛
- سنج‌های درستی سنجی شبیه‌سازی‌های احتمالی.

جدول ۱۰. امتیاز ROC برای درستی سنجی طرح‌واره‌های لایه مرزی.

کد طرح‌واره	بارش کمتر از ۱ میلی‌متر بر روز	بارش بین ۱ تا ۱۰ میلی‌متر بر روز	بارش ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر بر روز
۱	۰/۹۱	۰/۸۶	۰/۸۵
۲	۰/۹۲	۰/۸۸	۰/۸۸
همادی کلی	۰/۹۲	۰/۸۷	۰/۹

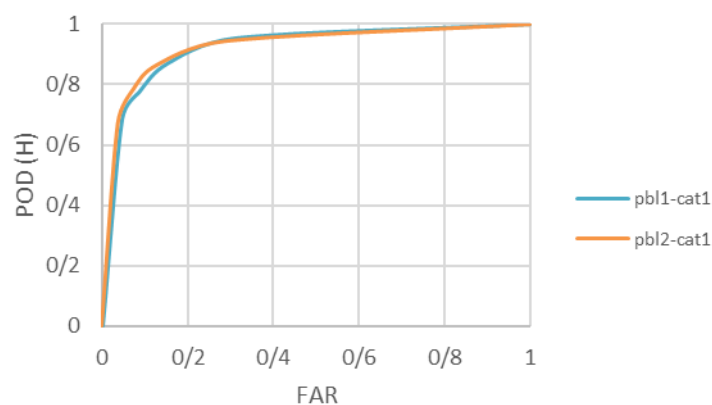


شکل ۷. نمودار ROC طرحواره‌های خردفیزیکی برای سه دسته بارشی. نمادهای به‌کاررفته در راهنمای نمودار مانند شکل ۴ است با این تفاوت که نماد cat مخفف category و برای نمایش دسته بارشی است که سنجه برای آن محاسبه شده است.

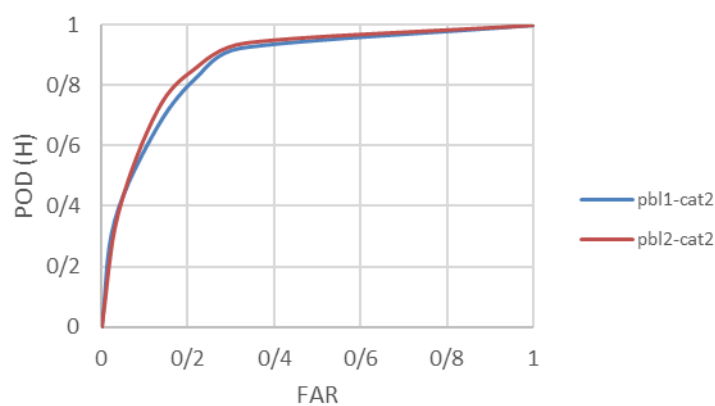


شکل ۸. نمودار ROC طرحواره‌های خردفیزیکی برای سه دسته بارشی. نمادهای به‌کاررفته در راهنمای نمودار مانند شکل ۵ است با این تفاوت که نماد cat مخفف category و برای نمایش دسته بارشی است که سنجه برای آن محاسبه شده است.

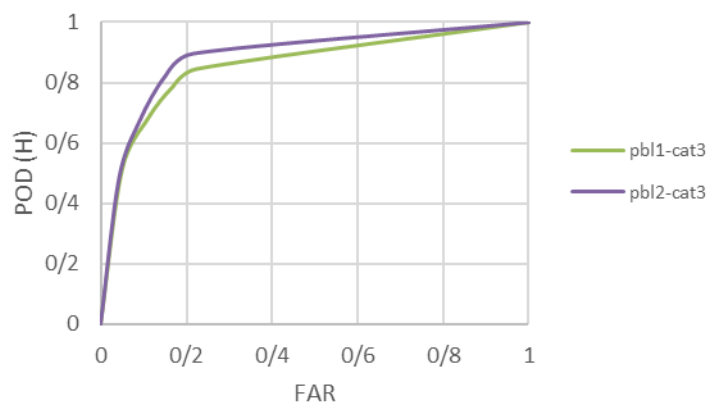
نمودار ROC طرحواره‌های لایه مرزی بارش دسته کمتر از ۱ میلی‌متر بر روز



نمودار ROC طرحواره‌های لایه مرزی بارش دسته ۱ تا ۱۰ میلی‌متر بر روز



نمودار ROC طرحواره‌های لایه مرزی بارش دسته ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر بر روز



شکل ۹. نمودار ROC طرحواره‌های خردفیزیکی برای سه دسته بارشی. نمادهای به‌کاررفته در راهنمای نمودار مانند شکل ۶ است با این تفاوت که نماد cat مخفف category و برای نمایش دسته بارشی است که سنججه برای آن محاسبه شده است.

منطقه مورد مطالعه، افزایش تفکیک افقی تا حد معینی در بهبود شبیه‌سازی‌ها مؤثر است و افزایش بیشتر تفکیک

بررسی و مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌های بارش برای روزهای منتخب با تفکیک‌های افقی مذکور نشان داد در

همادی فیزیکی و همادی پریشیدگی استفاده شود. به طور کلی، سامانه همادی مورد مطالعه، مهارت زیادی در شبیه سازی نبود بارش و مهارت مناسبی در شبیه سازی بارش بین ۱۰ تا ۵۰ میلی متر دارد و عملکرد آن در شبیه سازی بارش بین ۱ تا ۱۰ میلی متر نیز پذیرفتنی است.

منابع

- آزادی، م.، واشانی، س. و حجام، س.، ۱۳۹۱، پیش بینی احتمالی بارش با استفاده از پس پردازش (Post Processing) برون داد یک سامانه همادی: مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۸(۳)، ۲۰۳-۲۱۶.
- فتحی، م.، آزادی، م.، کمالی، غ. و مشکاتی، ا.، ۱۳۹۷، واسنجی پیش بینی احتمالاتی بارش برون داد سامانه همادی به روش میانگین گیری بایزی بر روی ایران، نشریه هواشناسی و علوم جو، ۱۱(۲)، ۱۱۴-۱۲۹.
- فتحی، م.، آزادی، م.، کمالی، غ. و مشکاتی، ا.، ۱۳۹۸، بهبود پیش بینی یقینی بارش با استفاده از میانگین وزنی سامانه همادی بر روی ایران: نیوار، ۴۳، ۶۳-۶۷.
- قادر، س.، یازجی، د.، سلطانپور، م. و نعمتی، م. ح.، ۱۳۹۴، بکارگیری یک سامانه همادی توسعه داده شده برای مدل WRF جهت پیش بینی میدان باد سطحی در محدوده خلیج فارس: مجله هیدروفیزیک، ۱، ۴۱-۵۴.
- قصابی، ز.، کمالی، غ.، مشکوتی، ا. ح.، حجام، ح. و جواهری، ن.، ۱۳۹۳، ارزیابی عملکرد طرح واره های پارامتره سازی خرد فیزیکی و همرفت مدل WRF بر آورد بارش در حوضه آبریز کارون در جنوب غرب ایران: نشریه پژوهش های اقلیم شناسی، ۵، ۱-۱۰.
- نیستانی، ا.، قادر، س. و محب الحجه، ع.، ۱۳۹۶، کاربست داده گواری در مدل WRF برای شبیه سازی بارش ناشی از یک سامانه همادی در غرب ایران: مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۱(۱)، ۱۰۱-۱۲۳.
- افقی بیش از آنکه تأثیر درخور توجهی بر کیفیت شبیه سازی داشته باشد، موجب افزایش چشمگیر حجم محاسبات و در پی آن افزایش زمان اجرا خواهد شد؛ بنابراین با توجه به بررسی های انجام شده، تفکیک افقی ۴ کیلومتر به عنوان تفکیک افقی بهینه با لحاظ کردن حجم و زمان محاسبات برای منطقه مورد مطالعه انتخاب شد.
- در مجموع، نتایج درستی سنجی سامانه همادی، تأیید کننده نتایج تحقیقات گذشته مبنی بر تأثیر طرح واره های خرد فیزیکی، لایه مرزی و کومولوسی انتخاب شده جهت شبیه سازی بارش است به طوری که برخلاف شیوه نامه مدل WRF مبنی بر در نظر نگرفتن طرح واره های کومولوسی برای پیش بینی بارش برای دامنه های با تفکیک افقی کمتر از ۵ کیلومتر، نتیجه این تحقیق مؤید این است که اعمال این طرح واره در پیکربندی فیزیکی مدل می تواند در بهبود پیش بینی بارش نقش داشته باشد.
- از میان طرح واره های انتخابی که مطابق با مقالات معتبر، مناسب ترین طرح واره ها برای شبیه سازی بارش در عرض های میانی بودند، طرح واره های خرد فیزیکی با کدهای ۶ و ۸، طرح واره های کومولوسی با کد ۱ و ۳ و طرح واره لایه مرزی با کد ۲ بهترین عملکرد را در شبیه سازی بارش در مناطق مرکزی ایران در دوره زمانی مورد مطالعه داشته اند. اگر این مطالعه برای چند سال متوالی یا غیر متوالی شامل دوره های خشک و تر برای همین منطقه انجام شود، می توان بهترین طرح واره را برای این منطقه برای تمام سال ها بدون آزمایش هر ساله به دست آورد.
- مجموع بررسی ها نشان داد افزایش تعداد اعضای همادی فیزیکی می تواند بر کیفیت عملکرد آن تأثیر مثبت داشته باشد، اما ممکن است با امکانات و میزان توسعه فعلی مدل از یک آستانه ای به بعد، این افزایش از لحاظ هزینه های اجرایی به صرفه نباشد و بهتر باشد تا پس از انتخاب تعدادی از پیکربندی های مناسب از ترکیب

- Aligo, E. A., Gallus, W. A., and Segal, M., 2009, On the impact of WRF model vertical grid resolution on Midwest summer rainfall forecasts: *Weather Forecasting*, **24**, 575–594, doi:10.1175/2008WAF2007101.1.
- Anderson, J. L., 1996, A method for producing and evaluating probabilistic forecasts from ensemble model integrations: *Journal of Climate*, **9**, 1518–1530.
- Arakawa, A., 2004, The cumulus parameterization problem: Past, present, and future: *Journal of Climate*, **17**, 2493–2525.
- Argüeso, D., Hidalgo, J. M., Gámizfortis, S. R., Estebanparra, M. J., Dudhia, J., and Castrodiez, Y., 2011, Evaluation of WRF parameterizations for climate studies over Southern Spain using a multistep regionalization: *Journal of Climate*, **24**, 5633–5651, doi:10.1175/JCLI-D-11-00073.1.
- Bruno, F., Cocchi, D., Greco, F., and Scardovi, E., 2014, Spatial reconstruction of rainfall fields from rain gauge and radar data: *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **28**, 1235–1245, doi:10.1007/s00477013-0812-0.
- Buizza, R., 1997, Potential Forecast Skill of ensemble prediction and spread and skill distributions of the ECMWF ensemble prediction system: *Monthly Weather Review*, **125**, 99–119.
- Buizza, R., and Palmer, T. N., 1998, Impact of ensemble size on ensemble prediction: *Monthly Weather Review*, **126**, 2503–2518.
- Buizza, R., Miller, M., and Palmer, T. N., 1999, Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **125**, 2887–2908.
- Cardoso, R. M., Soares, P. M., Miranda, P. M. A., and Belo-Pereira, M., 2013, WRF high resolution simulation of Iberian mean and extreme precipitation climate: *International Journal of Climatology*, **33**, 2591–2608, doi:10.1002/joc.3616.
- Chambon, P., Zhang, S. Q., Hou, A. Y., Zupanski, M., and Cheung, S., 2014, Assessing the impact of pre-GPM microwave precipitation observations in the Goddard WRF ensemble data assimilation system: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **140**, 1219–1235, doi:10.1002/qj.2215.
- Chen, J., Brissette, F. P., and Li, Z., 2014, Postprocessing of ensemble weather forecasts using a stochastic weather generator: *Monthly Weather Review*, **142**, 1106–1124.
- Chen, F., Liu, C., Dudhia, J., and Chen, M., 2014, A sensitivity study of high-resolution regional climate simulations to three land surface models over the western United States: *Journal of Geophysical Research*, **119**, 7271–7291, doi: 10.1002/2014JD021827.
- Clark, A. J., Gallus, W. A., Xue, M., and Kong, F., 2009, A comparison of precipitation forecast skill between small convection-allowing and large convection-parameterizing ensembles: *Weather Forecasting*, **24**, 1121–1140.
- Collischonn, W., Haas, R., Andreolli, I., and Tucci, C. E. M., 2005, Forecasting River Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model: *Journal of Hydrology*, **305**, 87–98, doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.08.028.
- Du, J. and M. S. Tracton, 2001, Implementation of a real-time short-range ensemble forecasting system at NCEP: an update: *Preprints, 9th Conference on Mesoscale Processes*, Ft. Lauderdale, Florida, American Meteorological Society, 355–356.
- Du, J., DiMego, G., Tracton, M. S., and Zhou, B., 2003, NCEP short-range ensemble forecasting (SREF) system: multi-IC, multi-model and multi-physics approach: *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling* (edited by J. Cote), Report 33, CAS/JSC Working Group Numerical Experimentation (WGNE), WMO/TD-No. **1161**, 5.09–5.10.
- Du, J., DiMego, G., Zhou, B., Jovic, D., Ferrier, B., Pyle, M., Manikin, G., Yang, B., Wolff, J., and Etherton, B., 2012, “New 16km NCEP Short-Range Ensemble Forecast (SREF) system: what we have and what we need?”: SREF.v6.0.0, implementation date: Aug. 21, 2012; <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/SREF/SREF.html>
- Du, J., Berner, J., Buizza, R., Charron, M., Houtekamer, P., Hou, D., Isidora, J., Mu, M., Wang, X., Wei, M., Yuan, H., 2018, Ensemble methods for meteorological predictions: U.S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Weather Service National Centers for Environmental Prediction (NCEP), 5830 University Research Court, College Park, MD 20740.
- Evans, J. P., Ekström, M., and Ji, F., 2011, Evaluating the performance of a WRF physics

- ensemble over South-East Australia: Climate Dynamics, **39**, 1241–1258, doi:10.1007/s00382-011-1244-5.
- Flaounas, E., Bastin, S., and Janicot, S., 2011, Regional climate modelling of the 2006 West African monsoon: sensitivity to convection and planetary boundary layer parameterization using WRF: Climate Dynamics, **36**, 1083–1105, doi:10.1007/s00382-010-0785-3.
- Gallus, W. A. and Bresch, J. F., 2006, Comparison of impacts of WRF dynamic core, physics package, and initial conditions on warm season rainfall forecasts: Monthly Weather Review, **134**, 2632–2641.
- Ghelli, A., ECMWF, Verification of categorical predictands: 4IWVM - Tutorial Session, June 2009.
- Givati, A., Lynn, B., Liu, Y., and Rimmer, A., 2012, Using the WRF model in an operational streamflow forecast system for the Jordan River: Journal of Applied Meteorology and Climatology, **51**, 285–299, doi:10.1175/JAMC-D-11-082.1.
- Grell, G. A., and Freitas, S. R., 2014, A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling: Atmospheric Chemistry and Physics, **14**, 5233–5250, doi: 10.5194/acp-145233-2014.
- Hanssen, A.W. and Kuipers, W.J.A., 1965: On the relationship between the frequency of rain and various meteorological parameters: Mededeelingen en Verhandelingen, Royal Netherlands Meteorological Institute, **81**.
- Hong, S. Y., Noh, Y., and Dudhia, J., 2006, A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes: Monthly Weather Review, **134**, 2318–2341.
- Hu, X. M., Nielsengammon, J. W., and Zhang, F., 2010, Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model: Journal of Applied Meteorology and Climatology, **49**, 1831–1844, doi:10.1175/2010JAMC2432.1.
- Inness P., Dorling S., 2013, Operational weather forecasting: John Wiley & Sons, 231pp.
- Janjic, I. Z., 1994, The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes: Monthly Weather Review, **122**, 927–945, doi:10.1175/1520-493(1994)122<0927: TSMECM>2.0.CO;2.
- Jankov, I., Gallus, W. A., Swgal, M., and Koch, S. E., 2005, The impact of different WRF model physical parameterizations and their interactions on warm season MCS rainfall: Weather Forecasting, **20**, 1048–1060, doi:10.1175/WAF888.1.
- Jankov, I., Gallus, W. A., Segal, M., and Koch, S. E., 2007, Influence of initial conditions on the WRF–ARW model QPF response to physical parameterization changes: Weather Forecasting, **22**, 501–519.
- Jankov, I., Grasso, L. D., Senguota, M., Neiman, P. J., Zupanski, D., Zupanski, M., Lindsey, D., Hillger, D. W., Birkenheuer, D. L., Brummer, R., and Yuan, H., 2011, An evaluation of five ARW-WRF microphysics schemes using synthetic GOES imagery for an atmospheric river event affecting the California coast: Journal of Hydrometeorology, **12**, 618–633, doi:10.1175/2010JHM1282.1.
- Kalnay, E., 2003, Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability: Cambridge, Cambridge University Press, 341pp.
- Kenneth, R., 2002, Decision-making from probability forecasts based on forecast value: Meteorological Applications, **9**, 307–315.
- Kessler, E., 1969, On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations: Meteorological Monographs, **32**: American Meteorological Society.
- Klein, C., Heinzeller, D., Bliefernicht, J., and Kunstmann, H., 2015, Variability of West African monsoon patterns generated by a WRF multi-physics ensemble: Climate Dynamics, **45**, 1–23, doi:10.1007/s00382-015-2505-5.
- Lee, J., Shin, H. H., Hong, S., and Hong, J., 2015, Impacts of subgrid-scale orography parameterization on simulated surface layer wind and monsoonal precipitation in the highresolution WRF Model: Journal of Geophysical Research, **120**, 644–653, doi: 10.1002/2014JD022747.
- Lin, Y. L., Farley, R. D., and Orville, H. D., 1983, Bulk parameterization of the snow field in a cloud model: Journal of Climate and Applied Meteorology, **22**, 1065–1092.
- Madala, S., Satyanarayana, A. N. V., and Rao, T. N., 2014, Performance evaluation of PBL and cumulus parameterization schemes of WRF ARW model in simulating severe thunderstorm events over Gadanki MST radar facility – Case study: Atmospheric Research, **139**, 1–17, doi: 0.1016/j.atmosres.2013.12.017.
- Mailier, P.J., Jolliffe, I.T., Stephenson, D.B., 2006, Quality of Weather Forecasts: Royal Meteorological Society.

- Mason, S. J., and Graham, N. E., 1999, Conditional probabilities, relative operating characteristics, and relative operating levels: Weather Forecasting, **14**, 713–725.
- McBride, J. L. and Ebert, E. E., 2000, Verification of quantitative precipitation forecasts from operational numerical weather prediction models over Australia: Weather Forecast., **15**, 103–121.
- Mullen, S. L., Du, J., and Sanders, F., 1999, The dependence of ensemble dispersion on analysis forecast system: implications to short-range ensemble forecasting of precipitation, Monthly Weather Review, **127**, 1674–1686.
- Pei, L., Moore, N., Zhong, S., Luo, L., Hyndman, D. W., Heilman, W. E., and Gao, Z., 2014, WRF model sensitivity to land surface model and cumulus parameterization under short-term climate extremes over the Southern Great Plains of the United States: Journal of Climate, **27**, 7703–7724, doi:10.1175/JCLI-D-14-00015.1.
- Pennelly, C., Reuter, G., and Flesch, T., 2014, Verification of the WRF model for simulating heavy precipitation in Alberta: Atmospheric Research, **135–136**, 172–179, doi: 10.1016/j.atmosres.2013.09.004.
- Qie, X., Zhu, R., Yuan, T., Wu, X. K., Li, W., and Liu, D., 2014, Application of total-lightning data assimilation in a mesoscale convective system based on the WRF model: Atmospheric Research, **145–146**, 255–266, doi: 10.1016/j.atmosres.2014.04.012.
- Remesan, R., Bellerby, T., Holman, I., and Frostick, L., 2015, WRF model sensitivity to choice of parameterization: a study of the “York Flood 1999”: Theoretical And Applied Climatology, **122**, 229–247, doi: 10.1007/s00704-014-1282-0.
- Rogers, E., Black, T., Ferrier, B., Lin, Y., Parrish, D., and DiMego, G., 2001, Changes to the NCEP Meso Eta Analysis and Forecast System: Increase in resolution, new cloud microphysics, modified precipitation assimilation, modified 3DVAR analysis: NWS Technical Procedures Bulletin, **488**, 15 pp.
- Rutledge, S. A., and Hobbs, P., 1983, The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. VIII: A model for the “seeder-feeder” process in warm-frontal rainbands: Journal of Atmospheric Sciences, **40**, 1185–1206, doi:10.1175/1520-0469(1983)040<1185: MAMSA>2.0.CO;2, 1983.
- Schaefer, J.T., 1990, The critical success index as an indicator of forecasting skill: Weather Forecasting, **5**, 570–575.
- Shepherd, T. J. and Walsh, K. J., 2016, Sensitivity of hurricane track to cumulus parameterization schemes in the WRF model for three intense tropical cyclones: impact of convective asymmetry: Meteorology and Atmospheric Physics, **16**, 1–30, doi:10.1007/s00703-016-0472-y.
- Sivillo, J. K., Ahlquist, J. E., Toth, Z., 1997, An ensemble forecasting primer: Weather and Forecasting, **12**, 809–818.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhi, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X. Y., Wang, W., and Powers, J. G., 2008, A Description of the Advanced Research WRF Version 3: NCAR Technical note 475+STR.
- Tao, W. K., Simpson, J., and McCumber, M., 1989, An ice-water saturation adjustment: Monthly Weather Review, **117**, 231–235.
- Stephenson, D.B., 2000, Use of the ‘odds ratio’ for diagnosing forecast skill. Weather Forecasting, **15**, 221–232.
- Thompson, G., Field, P. R., Rasmussen, R. M., and Hall, W. D., 2008, Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization: Monthly Weather Review, **136**, 5095–5115, doi:10.1175/2008MWR2387.1.
- Tian, J., Li, J., Yan, D., Li, H., and Yu, F., 2017, Numerical rainfall simulation with different spatial and temporal evenness by using a WRF multiphysics ensemble: Natural Hazards and Earth System Sciences, **17**, 563–579, doi:10.5194/nhess-17-563-2017.
- Tiedtke, M., 1989, A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models: Monthly Weather Review, **117**, 177–180.
- Toth, Z., and Kalnay, E., 1997, Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method: Monthly Weather Review, **125**, 3297–3319.
- Tracton, M. S., and Kalnay, E., 1993, Operational ensemble prediction at the National Meteorological Center: Practical aspects: Weather Forecasting, **8**, 379–398.
- Vasconi, M., Montani, A., and Paccagnella, T., 2018, Sensitivity of forecast skill to the parameterisation of moist convection in a Limited-area ensemble forecast system: Master’s Thesis in Physics of the Earth System, University of Bologna, Italy, Manuscript under review for journal Nonlin.

- Processes Geophys., Discussion started: 27 March 2018 Nonlinear Processes in Geophysics. available at http://amslaurea.unibo.it/14566/1/Tesi_Magistrale_Vasconi.pdf.
- Wandishin, M. S., Mullen, S. L., Stensrud, D. J., and Brooks, H. E., 2001, Evaluation of a short-range multimodel ensemble system: Monthly Weather Review, **129**, 729–747.
- Wang, S., Yu, E., and Wang, H., 2012, A simulation study of a heavy rainfall process the Yangtze River valley using the two-way nesting approach: Advances in Atmospheric Sciences, **29**, 731–743, doi:10.1007/s00376012-1176-y.
- Wang, X., Hamill, T. M., Whitaker, J. S., and Bishop, C. H., 2009, A comparison of the hybrid and EnSRF analysis schemes in the presence of model error due to unresolved scales: Monthly Weather Review, **137**, 3219–3232.
- Wilks, D., 1995, Statistical methods in the atmospheric sciences: International Geophysics Series, **59**, Academic Press.
- Wilks, D. S., and Hamill, T. M., 2007, Comparison of ensemble-MOS methods using GFS reforecasts: Monthly Weather Review, **135**, 2379–2390.
- World Meteorological Organization, 2012, Guidelines on Ensemble Prediction Systems and Forecasting: WMO-No. **1091**.
- World Meteorological Organization, 2014, Draft Document on Standardized Surface Verification of Deterministic NWP Products: 4.1_v3.
- Xue, L., Chu, X., Rasmussen, R., Breed, D., Boe, B., and Geerts, B., 2014, The dispersion of silver iodide particles from ground-based generators over complex terrain. Part II: WRF large eddy simulations versus Observations: Journal of Applied Meteorology and Climatology, **53**, 1342–1361.
- Yang, B., Zhang, Y., and Qian, Y., 2012, Simulation of urban climate with high-resolution WRF model: A case study in Nanjing, China, Asia-Pac: Journal of the Atmospheric Sciences, **48**, 227–241, doi:10.1007/s13143-0120023-5, 2012.
- Zhang, H., Pu, Zh., 2010, “Review Article, Beating the Uncertainties: Ensemble Forecasting and Ensemble-Based Data Assimilation in Modern Numerical Weather Prediction”, Advances in Meteorology, Hindawi Publishing Corporation Advances in Meteorology, Volume 2010, Article ID 432160, 10 pages, doi:10.1155/2010/432160

Evaluation of a WRF model multi-physics ensemble forecasting system for simulation of precipitation over central region of Iran

Fatemeh Moradian¹, Sarmad Ghader² and Maryam Rezazadeh^{3*}

¹Ph.D Student, Marine Science and Technology faculty, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

²Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

³Assistant Professor, Marine Science and Technology faculty, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

(Received: 03 December 2019, Accepted: 22 January 2020)

Summary

The chaotic nature of the atmosphere, inexact equations of motions, and gaps in specifying the initial state of the atmosphere result in some uncertainties in the weather forecasting. One of the operational methods that has been employed to overcome this difficulty and improve the accuracy of weather forecasts is ensemble forecasting which gains popularity as a technique in numerical weather prediction due to its improved forecast results. There are some different approaches to develop an ensemble forecasting system including using multi-numerical weather prediction models with different numerics, utilizing different physical parametrization schemes, and perturbing initial and boundary conditions. The aim of the present work is to develop a multi-physics ensemble forecasting system for the Weather Research and Forecasting (WRF) model and to evaluate its performance in forecasting of precipitation as a low predictability parameter. To construct the ensemble members, seven microphysics, two planetary boundary layers (PBL) and six cumulus parameterization schemes are employed. These choices are used to generate 84 members of the ensemble system. For running the model, a three-nested domain consisting of 36, 12, and 4 km spatial resolution was used to simulate the precipitation for 12 days during 2015-2016 winter in central region of Iran. The one degree FNL data of National Center for Environmental Prediction (NCEP) are utilized as the initial condition for running WRF. The model outputs are evaluated against observations using some standard metrics of forecasting verification including categorical, continuous and probabilistic indices. The observed 24-h accumulated precipitation measured at 132 synoptic stations of national meteorological organization of Iran was used for verification of simulations.

In this study, the general performance of the different members of ensemble system is discussed. The members employing MYJ planetary boundary layer scheme, KF and GF cumulus schemes and WSM6, Goddard and New Thompson schemes are found to be appropriate more than the others for accumulated precipitation simulation in the study region. Furthermore, a multi categorical verification using three threshold of 1, 10, and 50 mm/day showed the suitable appraisal of the total performance of ensemble system. Moreover, increasing in ensemble size results in better outputs. However, it seems that expanding the ensemble members might be limited at an optimum number. It means that the skill of ensemble system doesn't change significantly when the ensemble members are more than the optimum number. In addition, the results show that using a cumulus parametrization scheme for the spatial resolution of the finest domain of this study (i.e., 4 km) is useful to improve the precipitation simulations. It is worth to mention that this finding is in agreement with reports of other studies.

Keywords: numerical weather prediction, WRF model, ensemble forecasting, precipitation

*Corresponding author:

rezazadeh@hormozgan.ac.ir