

ارزیابی عملکرد طرحواره‌های همرفت کومهای و لایه مرزی مدل WRF-NMM در

شبیه‌سازی بارش‌های فرین استان بوشهر در دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۰

نفیسه پگاه‌فر*

استادیار، پژوهشکده علوم جوی، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۹/۱۴، پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۱/۳۰)

چکیده

برای استفاده از مدل‌های عددی که دارای انواع پارامترسازی‌های فیزیکی هستند، لازم است تا قبل از اجرا انتخاب صحیحی بین طرحواره‌های مختلف انجام شود. در این تحقیق، عملکرد چندین طرحواره فیزیکی همرفت کومهای و لایه مرزی مدل WRF-NMM برای شبیه‌سازی ۱۲ بارش فرین در استان بوشهر ارزیابی شد. در پیکربندی مدل، سه دامنه با تفکیک‌های ۳، ۹ و ۲۷ کیلومتر و داده‌های ERA5 برای شرایط اولیه و مرزی (با ۱۰۸ اجرا برای انتخاب طرحواره همرفت کومهای مناسب و ۷۲ اجرا برای انتخاب طرحواره لایه مرزی مناسب) انجام شد. برای ارزیابی بارش شبیه‌سازی شده، از دو نوع داده مشاهداتی (۱) ثبت شده در نقاط ایستگاهی استان بوشهر و (۲) داده‌های بارش ماهواره GPM (محصول IMERG-DL) در نقاط شبکه‌ای استفاده شد. فرایند ارزیابی با کاربست شاخص‌های آماری و به تفکیک زمان بارش‌ها و ایستگاه‌های ساحلی و غیرساحلی انجام شد. عدم پیش‌بینی بارش رگباری توسط هسته NMM موجب فروتخمین شدن بارش در شبیه‌سازی‌ها شد. با این حال، از بین ۶ طرحواره همرفت کومهای oldSAS، SAS، BMJ، NSAS و KF، TiedTKE، oldSAS، BMJ و MRF، MYJ و QNSE در برآورد بارش با انتخاب طرحواره همرفت کومهای oldSAS (در دو دامنه بزرگتر)، هم نشان داد که طرحواره MRF در نقاط ایستگاهی و نقاط شبکه‌ای کمترین خط را تولید کرده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که مدل WRF-NMM نتایج قابل قبولی برای منطقه داشته است و ضرورت استفاده از طرحواره‌های بهینه را برای تحقیقات آتی روشن ساخت.

واژه‌های کلیدی: بارش فرین، استان بوشهر، مدل WRF-NMM، طرحواره همرفت، طرحواره لایه مرزی.

۱. مقدمه

بودن کشور ایران موجب شده تا دینامیک و ترمودینامیک حاکم بر پدیده‌های حدی در سراسر این منطقه تنوع چشم‌گیری داشته باشد. از این‌رو، امر پیش‌بینی وضع هوا و برنامه‌ریزی‌های اقلیمی در ایران از حساسیت‌های خاصی برخوردار است. در چنین شرایطی تمایز میان تحقیقاتی که پدیده‌های منفرد را بررسی می‌کنند و آنها یکی که به طور اقلیمی پدیده‌ای را بررسی می‌کنند، چشم‌گیر و قابل توجه می‌شود. دلیل آن این است که در مورد دوم انتخاب پارامترسازی‌های فیزیکی و همچنین هزینه محاسبات بسیار متفاوت می‌گردد. واضح است که مدیریت و تحلیل نتایج شبیه‌سازی‌هایی که با چندین فیزیک و در مقیاس زمانی طولانی انجام می‌گیرد بسیار پیچیده‌تر است.

همواره صدور پیش‌بینی برای پدیده‌های حدی جو همانند بارش‌های سیل‌آسا یکی از دلایل توسعه سامانه‌های پیش‌بینی کوتاه‌مدت بوده است (برای نمونه، سان و همکاران، ۲۰۲۰). توفان‌های تندri تشکیل دهنده سامانه‌های همرفتی میان مقیاس با بادهای جستی، بارش‌های سنگین و تگرگ همراه هستند که منجر به خسارت‌های انسانی و طبیعی گسترده‌ای می‌شوند. از این‌رو، پیش‌بینی دقیق با زمان واقعی این پدیده بسیار ضروری است (مادالا و همکاران، ۲۰۱۴). فیزیک و دینامیک حاکم بر توفان‌های تندri شدید را می‌توان با شبیه‌سازی این سامانه‌ها به کمک مدل‌های میان‌مقیاس درک کرد. برای توسعه پیش‌بینی دقیق به اطلاعات کافی و ضروری از شرایط جوی و چینه‌بندی محل نیاز است. چند اقلیمی

آغاز همرفت، ساختار توفان و تکامل آن و همچنین بارش بوده است. اسپیریدونو و کوریک (۲۰۱۹) عوامل فعال شدن توفان ابریاخته‌ای همچون فراهنج تراز زبرین (upper-level updraft)، فرارفت رطوبت، مقادیر بالای Convective CAPE (CAPE)، همگرایی نزدیک سطح WRF-NMM و افزایش تاوه پتانسیلی را با استفاده از مدل WRF-NMM در مقدونیه ارزیابی کردند و نشان دادند که کاربست مدل WRF-NMM جزئیات بیشتری از دینامیک و سازوکار rotational تولید فراهنج‌های چرخان و میان‌چرخند (updrafts and mesocyclone mesocyclone) را تولید کرده است. همچنین اسپیریدونو و همکاران (۲۰۲۰) با جفت کردن یک مدل ابر با مدل WRF-NMM در شبیه‌سازی المان‌های همرفتی و شدت و ساختار سلول‌های همرفتی به نتایج مشتبی دست یافتند. لازم به ذکر است که مدل WRF-NMM در مرکز ملی پیش‌بینی محیطی (NCEP) به عنوان مدل میان‌مقیاس عملیاتی در حال اجرا است، در حالی که مدل WRF-ARW مدل تحقیقاتی در مرکز ملی تحقیقات جوی (NCAR) است (جوربا و همکاران، ۲۰۰۸).

على رغم نتایج حاصل از پژوهش‌های انجام شده در خارج از کشور مبنی بر دقّت هسته NMM در پیش‌بینی بارش‌های فرین در مناطق مختلفی از جهان که در بالا به پاره‌ای از آن‌ها اشاره شد، اما در تحقیقاتی که داخل کشور انجام شده (به طور نمونه، پگاهفر و همکاران (۲۰۲۲)، احمدلو و همکاران (۲۰۲۲)، آزادی و همکاران (۱۳۹۵)، رضازاده و همکاران (۱۳۹۹)؛ مرادی و همکاران (۱۳۹۹)؛ نیستانی و همکاران (۱۳۹۶)؛ تقوی و همکاران (۱۳۹۲) و دنیادوست و همکاران (۱۳۹۴)) از هسته ARW استفاده شده است. در مورد ارزیابی عملکرد WRF-NMM در ایران تنها می‌توان به تحقیق پگاهفر (۱۴۰۰) اشاره کرد که در آن عملکرد پنج طرحواره همرفت کومهای اعم از KF، BMJ، SAS، BMJ و BMJ و HWRF در مدل TiedTKE (که بر پایه هسته دینامیکی

یکی از مدل‌های پرکاربرد برای پیش‌بینی پدیده‌های هواشناسی مدل پیش‌بینی و تحقیقات جوی (WRF) است که از نوع پارامترسازی قابل توجهی برخوردار است. فیزیک متنوع مدل WRF موجب شده تا در بسیاری از تحقیقات مورد استفاده قرار گیرد و درستی‌سنگی بروندادهای آن هدف بسیاری از محققان بوده است. با توجه به اولویت اثر متقابل مستقیم میان فرایندهای فیزیکی پارامترشده (۱. همرفت، ۲. خردفیزیک، ۳. لایه مرزی، ۴. تابش و ۵. لایه سطحی، دبرا بکر و همکاران (۲۰۰۹) موجب نوع تحقیقات مبتنی بر پیکربندی مدل WRF شده است. برای نمونه، لیتا و موهانتی (۲۰۰۸) با بررسی توفان‌های تندری در فصل پیش‌مانسون در غرب خلیج بنگال و شرق هند، نشان دادند که مدل WRF-NMM در تولید شاخص‌های ناپایداری بسیار موفق عملکرده است. لیتا و همکاران (۲۰۱۲) عملکرد دو هسته ARW و NMM در شبیه‌سازی توفان تندری در شرق هند را بررسی کردند و نشان دادند که هسته NMM در شبیه‌سازی خط تندوزه، دمای قله ابر، تولید، تقویت و انتشار تندوزه‌ها، افزایش سریع رطوبت و کاهش سریع دما بهترین عملکرد را داشته است. پلنی و همکاران (۲۰۱۴) در خلال سه پدیده سیل آسا در آلبرتا، عملکرد چهار طرحواره همرفت KF، BMJ، G3D و GD و شبیه‌سازی صریح (بدون استفاده از طرحواره) از WRF-NMM را ارزیابی کردند و دریافتند که طرحواره KF بهترین عملکرد را داشته است بهویژه وقتی که تفکیک افقی بیش از ۶ کیلومتر انتخاب شده بود. مرجان‌نویج و همکاران (۲۰۱۷) در منطقه غربی بالکان حساسیت مدل WRF-NMM به ترازهای قائم در خلال یک بارش سنگین را ارزیابی و نتایج را با مدل Eta مقایسه کردند. آن‌ها نشان دادند که مدل WRF-NMM در باز تولید بارش تجمعی دوروزه با تولید اریبی $0/3$ تا $0/5$ برای آستانه بارش ۲۵ تا ۵۵ میلی‌متر بهتر از مدل Eta عمل کرده است. اسپیریدونو و همکاران (۲۰۱۷) در منطقه پاراگونه برای یک نمونه موردنی نشان دادند که ترکیب WRF-NMM با یک مدل ابر به خوبی قادر به شبیه‌سازی

۲. مواد و روش‌ها

در این تحقیق از چهار دسته داده استفاده شده است که عبارتند از (۱) داده‌های رخداد سیل در استان بوشهر از سامانه مدیریت اطلاعات حوادث و سوانح کشور، (۲) داده‌های بارش ایستگاه‌های هواشناسی استان بوشهر از سازمان هواشناسی، (۳) داده‌های بازتحلیل ERA5 با تفکیک ۰/۲۵ درجه در راستای طول و عرض جغرافیایی در بازه زمانی سیل‌های رخ داده در استان بوشهر و (۴) داده‌های ماهواره اندازه‌گیری بارش جهانی (Global Precipitation Measurement, GPM) که هر یک در ادامه توضیح داده می‌شود.

۱-۱. داده‌های ایستگاهی

داده‌های ایستگاهی بارش برای ایستگاه‌های استان بوشهر از وبگاه سازمان هواشناسی (<https://www.irimo.ir/>) برداشت شده است. فهرست ایستگاه‌ها و مشخصات آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است. یکسان نبودن بازه ثبت اطلاعات در تمام ایستگاه‌ها در انتخاب نمونه‌های موردنی بارش‌های سنگین مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو، برای انتخاب رویداد سعی شد تا از رویدادهای سال‌های اخیر استفاده شود تا نقاط ایستگاهی بیشتری برای ارزیابی در دسترس باشد. مقدار آستانه بارش با سطح اطمینان ۹۵٪ برای هر ایستگاه محاسبه و به همراه انحراف معیار و میانگین بارش رویدادهای منتخب برای هر ایستگاه در جدول ۱ نشان داده شده است. برای این منظور از داده‌های آماری بارش هر ایستگاه از زمان تأسیس استفاده شده است. فهرست تاریخ رویدادهای منتخب استان بوشهر در جدول ۲ آمده است. بازه نمونه برداری هر ایستگاه نیز در شکل ۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که ایستگاه آب‌پخش در بازه مورد بررسی تنها ۱۲ ساعت ثبت بارش داشته است، لذا از ایستگاه‌های مورد بررسی کنار گذاشته شده است.

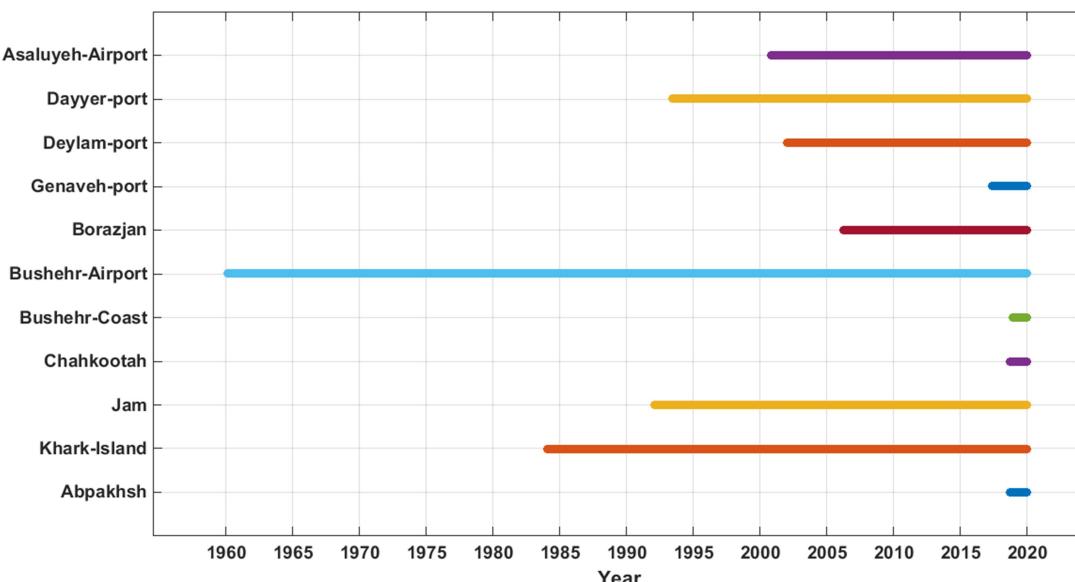
NMM (با شده است) برای شبیه‌سازی مشخصه‌های توفان حاره‌ای گونو بررسی شده است. نتایج آن مطالعه نشان داد که طرحواره SAS در زمانی که شدت توفان کم بوده است، دقیق‌ترین نتیجه را تولید کرده و همچنین کمترین خطا در شبیه‌سازی جریان‌های نزولی و صعودی را تولید کرده است. در آن تحقیق، الگوی واگرایی تراز زیرین توسط میدان‌های تحلیلی و شبیه‌سازی شده مشاهده شد، اما همگرایی تراز زیرین در هیچ‌کدام از اجراء‌ها دیده نشد و بیشینه مقدار CAPE شبیه‌سازی شده نسبت به تحلیلی در فاصله دورتری از سواحل عمان پیش‌بینی شد. البته بیشینه مقدار بارش تجمعی پیش‌بینی شده توسط هر پنج طرحواره یکسان و نصف مقدار مشاهداتی بود. با وجود اثبات عملکرد مناسب و نتایج دقیق‌تر مدل WRF با هسته NMM (در مقایسه با عملکرد هسته ARW) در برخی پژوهش‌ها، درستی‌سنگی کاربرت هسته دینامیکی NMM برای شبیه‌سازی پذیده بارش فرین که خسارات‌های مالی و جانی بسیاری را بوجود می‌آورد، از نوآوری‌های این پژوهش به حساب می‌آید، بهویژه در منطقه‌ای همچون استان بوشهر که از شارش هوای مرطوب از روی منابع آبی در جنوب و همچنین جریانات غربی تأثیر می‌پذیرد. با توجه به آسیب‌پذیری‌بودن منطقه مذکور، تعیین ترکیب بهینه‌ای از پارامترسازی‌های فیزیکی برای شبیه‌سازی بارش‌های فرین بسیار ارزشمند خواهد بود. در این تحقیق، بعد از تشریح داده‌های مورد استفاده، بارش‌های فرین منتخب، مشخصات مدل WRF-NMM به همراه پیکربندی آن و شاخص‌های آماری در بخش ۲، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها با اتخاذ انواع طرحواره‌های همرفت کومهای و لایه مرزی به همراه ارزیابی آماری در بخش ۳ ارائه خواهد شد. در انتهای، طرحواره‌های بهینه برای پارامترسازی همرفت کومهای و لایه مرزی در خلال بارش‌های فرین منتخب در استان بوشهر معرفی خواهند شد.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های استان بوشهر به همراه انحراف معیار و میانگین بارش مشاهداتی (برحسب mm) رویداده در بازه رویدادهای منتخب.

ردیف	نام ایستگاه (علامت اختصاری)	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	ارتفاع از سطح دریا (متر)	آستانه بارش با سطح اطمینان ۹۵٪	انحراف معیار	میانگین بارش
۱	جزیره خارک (KH)	۵۰/۳۱۵۲۸	۲۹/۲۶۵۵۶	-۱/۲	۳۰/۲۸	۲۵/۵۶	۳۵/۳۱
۲	Jam	۵۲/۳۵۵۸۳	۲۷/۸۱۵	۶۵۹	۴۸/۴	۳۲/۳۴	۲۸/۱۵
۳	(CHA)	۵۱/۰۹	۲۹/۰۳	۳۰	۲۸/۴۵	۱۲/۳۸	۱۸/۲۶
۴	(BC)	۵۰/۸۲۱۱۱	۲۸/۹۰۳۸۹	۵	۳۰/۷۴۵	۲۲/۳۱	۲۷/۷۲
۵	(BA)	۵۰/۸۱۹۲	۲۸/۹۶۲۱	۶	۳۲	۲۳/۶۵	۲۱/۹۱
۶	(BO)	۵۱/۱۶۶۶۷	۲۹/۲۵	۸۹/۹	۲۷/۷۸	۲۰/۴۵	۲۰/۰۰
۷	(GE)	۵۰/۰۵۰۸۱	۲۹/۵۵۹۲	۴/۳	۲۴/۸	۱۳/۴۱	۱۹/۳۳
۸	(DE)	۵۰/۱۶۶۶۷	۳۰/۰۵۰۲۸	۳	۳۲/۲	۲۹/۲۵	۲۸/۱۱
۹	(DA)	۵۱/۹۳۳۳۳	۲۷/۸۳۳۳۳	۴	۳۵/۶۶	-	-
۱۰	(AS)	۵۲/۶۱۶۳۹	۲۷/۴۸۴۷۲	۷	۲۷	۲۰/۹۲	۱۲/۸۹
۱۱	آبپخش	۵۱/۰۳	۲۹/۲۲	۴۶	در بازه مورد بررسی تنها ۱۲ ساعت ثبت بارش داشته است.		

جدول ۲. فهرست تاریخ رویدادهای منتخب به همراه مجموع بارش ثبت شده در استان.

ردیف	تاریخ رویداد (میلادی)	مجموع بارش ایستگاهها (mm)	ردیف	تعداد ایستگاه‌های ثبت کننده بارش	تاریخ رویداد (میلادی)	ردیف	تعداد ایستگاه‌های ثبت کننده بارش	مجموع بارش ایستگاهها (mm)
۱	۲۰۱۲/۱۱/۲۴-۲۶	۶۵۰	۷	۸	۲۰۱۸/۱۱/۶	۲۵۳/۵	۶	۲۵۳/۵
۲	۲۰۱۳/۵/۱-۲	۱۰۹	۸	۶	۲۰۱۸/۱۱/۲۵	۳۷۷/۱	۹	۳۷۷/۱
۳	۲۰۱۴/۱۱/۲۵	۲۲۵/۵	۹	۸	۲۰۱۹/۳/۲۵-۲۶	۱۹۰/۹	۹	۱۹۰/۹
۴	۲۰۱۵/۱۱/۱۰	۳۱۵/۴	۱۰	۷	۲۰۱۹/۱۲/۳	۲۲۲/۴	۱۰	۲۲۲/۴
۵	۲۰۱۷/۳/۲۵	۲۳۶/۶	۱۱	۸	۲۰۱۹/۱۲/۱۶-۱۷	۷۰۹/۱	۱۱	۷۰۹/۱
۶	۲۰۱۷/۱۱/۲۲-۲۳	۵۳۲/۵	۱۲	۹	۲۰۲۰/۱۲/۶	۱۹۱/۷	۷	۱۹۱/۷



شکل ۱. بازه ثبت داده‌های بارش برای ایستگاه‌های استان بوشهر.

۴-۲. مدل WRF-NMM و پیکربندی

مدل WRF سامانه عددی پیش‌بینی وضع هوا در میان مقیاس است که برای اهدافی همچون پیش‌بینی عملیاتی و ریز مقیاس‌نمایی بروندادهای مدل‌های اقلیمی بسیار پر کاربرد می‌باشد. این مدل دارای دو هسته دینامیکی NMM و ARW است که در این تحقیق از هسته NMM استفاده شده است. هسته NMM توسط اداره ملی اقیانوسی و جوی (NOAA) برای NCEP و با استفاده از مدل Eta توسعه یافت. این مدل به منظور ارائه سامانه مدل‌سازی میان مقیاس منعطف و کارآمد و برای استفاده با کاربری گسترده‌ای اعم از پیش‌بینی وضع هوا و کاربردهای تحقیقاتی آرمانی، با تأکید بر اندازه‌های شبکه افقی در محدوده ۱ تا ۱۰ کیلومتر، طراحی شده است. این مدل از مختصات قائم هیبریدی سیگما-فشار زمینگان-پیرو و جابه‌جایی شبکه E-grid آراکاوا برای شبکه افقی استفاده می‌کند و حتی در پیش‌بینی چرخند حراره‌ای نیز استفاده و عملیاتی شده است. در حالی که هسته ARW از مختصات قائم فشار-آب‌ایستایی زمینگان پیرو استفاده می‌کند که امکان کشیدگی قائم شبکه در آن وجود دارد و جابه‌جایی شبکه C-grid آراکاوا برای شبکه افقی آن منظور شده است. تحقیقات انجام شده در مناطق مختلف اروپا ثابت کرده که پیکربندی WRF-ARW خطاهای سامانمند بزرگ‌تری نسبت به پیکربندی WRF-NMM تولید کرده‌اند (جوربا و همکاران، ۲۰۰۸). همچنین نشان داده شده است که نتایج پیکربندی WRF-NMM در شبیه‌سازی برخی پارامترهای هواشناختی در شرایط نامطلوب هواشناسی تطابق خوبی با مشاهدات داشته است (فرانچیتو و همکاران، ۲۰۱۹). قابل توجه است که دو هسته دینامیکی ARW و NMM قابل تجمعی نیست، زیرا هر هسته به مجموعه‌ای از نرم‌افزارهای دینامیکی مرتبط است که روی نگاشت شبکه (grid projection)، مختصات قائم مخصوص به خود و جابه‌جایی شبکه متفاوتی عمل می‌کند (اسکاموروک و همکاران، ۲۰۰۵). نتایج عملیاتی نشان داده که تفاوت‌های چشم‌گیر میان

۲-۲. داده‌های باز تحلیل

در پژوهش حاضر برای اجرای اجرای مدل WRF-NMM از داده‌های باز تحلیل نسل پنجم مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ERA5) برای شرایط اولیه و مرزی استفاده شد. تفکیک این مجموعه داده در راستای طول و عرض جغرافیایی ۰/۲۵ درجه است. تفکیک مناسب و در دسترس بودن داده‌های ERA5 در بازه زمانی مورد نظر موجب شد تا کاربرست این داده در اولویت قرار گیرد.

در این تحقیق از پارامترهای موجود در داده‌های ERA5 در سطح و در ترازهای فشاری استفاده شد. داده‌های سطحی عبارتند از مؤلفه‌های باد در ارتفاع ۱۰ متری، دما و دمای نقطه شبنم در ارتفاع دو متری، فشار متوسط تراز دریا، پوشش دریا-یخ، دمای سطح آب، دمای پوسته، پوشش خشکی-دریا، چگالی برف، عمق برف، دمای خاک در چهار لایه، فشار سطح، چهار لایه آب حجمی خاک. داده‌های ترازهای فشاری نیز شامل ارتفاع ژئوپتانسیل، رطوبت نسبی، رطوبت ویژه، دما، مؤلفه‌های افقی باد بوده است. ترازهای فشاری شامل ۱، ۲، ۳، ۵، ۷، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰، ۱۰۰، ۱۲۵، ۱۵۰، ۱۷۵، ۲۰۰، ۲۲۵، ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰، ۵۰۰، ۵۵۰، ۶۰۰، ۶۵۰، ۷۰۰، ۷۵۰، ۷۷۵، ۷۵۰، ۹۵۰، ۹۰۰، ۸۷۵، ۸۵۰، ۸۲۵، ۸۰۰، ۷۷۵، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ هکتوپاسکال بوده است.

۳-۲. داده‌های ماهاواره

داده‌های شبکه‌بندی شده بارش GPM در بازه‌های زمانی یک ساعته (late run of GPM, 3IMERGDL v06) استخراج شد (هافمن و همکاران، ۲۰۱۹). تفکیک داده‌های GPM برابر ۰/۱ درجه در راستای طول و عرض جغرافیایی می‌باشد. از آنجا که داده‌های بارش ایستگاهی در UTC ۰۶:۰۰، هر روز ثبت می‌گردد، برای محاسبه بارش ۲۴ ساعته با استفاده از داده‌های GPM بازه زمانی از UTC ۰۶:۰۰ یک روز قبل استفاده شد.

هر سه به مرکز ایستگاه فرودگاهی بوشهر است. در شکل ۲ موقعیت هر سه دامنه نشان داده شده است. در این ترکیب، تعداد نقاط در راستای طول و عرض جغرافیایی در بزرگترین دامنه $nx \times ny = 80 \times 170$ ، آشیانه میانی 73×208 و درونی ترین آشیانه میانی 121×310 است. فهرست طرحواره‌های انتخاب شده در پیکربندی مدل WRF-NMM در جدول ۳ آمده است. طول هر اجرا ۴۸ ساعت بوده است که ۲۴ ساعت اولیه برای spin-up در نظر گرفته شده است. در تنظیمات داخلی ترین آشیانه، طرحواره همراه کومهای UTC در نظر گرفته نشده است. زمان شروع و خاتمه اجرا ۰۶:۰۰ بوده است.

پیش‌بینی‌های دو هسته دینامیکی NMM و ARW اغلب به دلیل فیزیک متفاوت آنها است نه طراحی‌های هسته‌های دینامیکی. هسته NMM که کاملاً آب‌ایستایی تراکم‌پذیر است و از مختصات قائم مبتنی بر جرم استفاده می‌کند، طوری بسط داده شده تا حرکت‌های ناآب‌ایستایی را شامل بشود (جانجیک، ۲۰۰۳). در حالیکه، هسته ARW مدل ناآب‌ایستایی اویلری کاملاً تراکم‌پذیر با گزینه دردسترس آب‌ایستایی زمان‌اجرا است.

در تحقیق حاضر مدل WRF-NMM بر روی سه دامنه اجرا شد. بزرگترین دامنه ها تفکیک افقی ۲۷ کیلومتر و دو آشیانه تودرتو به ترتیب با تفکیک‌های ۹ و ۳ کیلومتر

جدول ۳. پیکربندی مدل WRF-NMM به همراه برخی ویژگی‌های طرحواره‌های همراه کومهای و لایه مرزی.

تفکیک دامنه‌ها (km)	
تعداد ترازهای قائم	۳ و ۹، ۲۷
گام زمانی	۳۸ ساعت
طول شبیه‌سازی	۴۸ ساعت
سامانه تصویر نقشه	rotated_Lat-Lon
طرحواره تفاضل گیری مکانی	Arakawa E-grid
طرحواره‌های پارامترسازی تابش (موچ کوتاه و موج بلند)	تفاضل گیری مرکزی مرتبه ششم
طرحواره لایه سطحی	GFDL
مدل سطح خشکی	طرحواره Eta
طرحواره لایه مرزی	طرحواره Noah
طرحواره‌های همراه (برای بزرگ- ترین دامنه هو آشیانه میانی)	نام طرحواره
	مشخصات از قبیل نوع طرحواره/درون آمیزی ابر/بستار
	KF
	شار جرم /+ حذف
	BMJ
	طرحواره
	SAS
	oldSAS
	TiedTKE
	NSAS
طرحواره لایه مرزی	Yonsei
	Mellor-Yamada-
	Janjic (پیشنهاد خود مدل)
	MRF
	Quasi-Normal Scale Elimination PBL
طرحواره خردفیزیک	Ferriar-Aligo

حاصل از شبیه‌سازی توسط مدل، داده‌های مشاهداتی و مقدار متغیر را نشان می‌دهند.

۳. نتایج و تحلیل

روند انجام تحقیق با توجه به وجود اولویت در لایه‌های مدل WRF-NMM تعیین شد. از این‌رو، ابتدا عملکرد مدل WRF-NMM با انتخاب طرحواره‌های متنوع برای همرفت کومهای بررسی شد. سپس با استفاده از بهینه‌ترین طرحواره همرفت کومهای، فرایند حساسیت‌سنجی با انتخاب طرحواره‌های لایه مرزی انجام شد. ارزیابی نتایج در دو مرحله اعم از (۱) مقایسه ایستگاهی (میان بروندادهای داخلی‌ترین آشیانه مدل WRF-NMM و مقادیر ایستگاهی) و (۲) مقایسه پنهنه (میان بروندادهای آشیانه میانی مدل WRF-NMM و پنهنه بارش مستخرج از GPM) انجام شد. از آنجائیکه سیل‌های انتخابی در ماه‌های مارس، آوریل، نوامبر و دسامبر بوده‌اند، به منظور بررسی فصلی نتایج، در مرحله مقایسه ایستگاهی، شاخص‌های آماری در دو دسته فصلی مارس–آوریل و نوامبر–dsامبر و با تفکیک نوع ایستگاه (اعم از ساحلی و غیر ساحلی) نیز در نظر گرفته شد. در مرحله مقایسه پنهنه‌ها نیز تفکیک فصلی (ماه‌های مارس–آوریل و نوامبر–dsامبر) بررسی شد.

خلاصه‌ای از مشخصات طرحواره‌های همرفت کومهای اعم از نوع طرحواره، شامل شدن یا نشدن درون‌آمیختگی ابر و بستار مربوطه به همراه مشخصات طرحواره‌های لایه مرزی در جدول ۳ آورده شده است. در مرحله پس‌پردازش بروندادهای مدل WRF-NMM، ابتدا با استفاده از نرم افزار RIP اطلاعات استخراج شد و با توجه به نگاشت استفاده شده در سامانه تصویر نقشه (rotated (lat/lon) برای هر پارامتر، واحد مختصات جغرافیایی متصل به هر پارامتر تغییر داده شد.

۴-۵. شاخص‌های آماری

شش شاخص آماری اعم از اُریبی (Bias)، جذر میانگین مربعی خطأ (Root Mean Square Error, RMSE)، انحراف معیار (Standard Deviation, STD) و ضریب همبستگی (Correlation Coefficient, CC) در این تحقیق به ترتیب طبق روابط زیر استفاده شده‌اند.

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i) \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}, \quad (2)$$

$$STD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X - \bar{X})^2}. \quad (3)$$

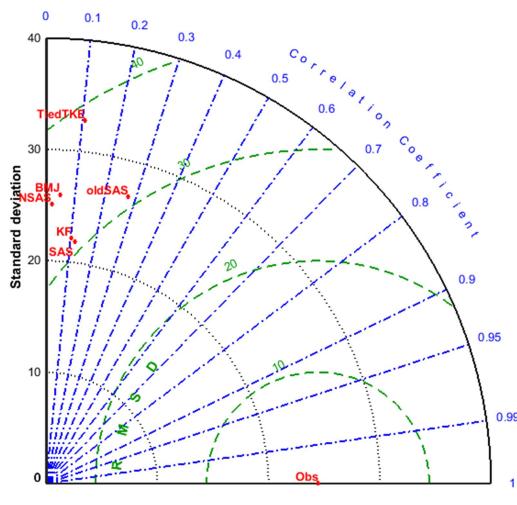
$$CC = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{M_i - \bar{M}}{STD_M} \right) \left(\frac{O_i - \bar{O}}{STD_O} \right) \quad (4)$$

که در آنها N تعداد داده، O ، M و X نیز به ترتیب نتایج



شکل ۲. نمای دامنه‌ها هبه مرکز ایستگاه فرودگاه بوشهر به ترتیب با تفکیک‌های ۹، ۲۷ و ۳ کیلومتر در راستای طول و عرض جغرافیایی.

مستخرج از بروندادهای مدل و برای تمامی تاریخ‌های منتخب محاسبه شد. همانطور که شکل ۳ نشان می‌دهد که طرحواره‌های SAS، KF و oldSAS به ترتیب در برآورد بارش ایستگاهی بهترین عملکرد را داشته‌اند. با توجه به اینکه شاخص RMSE خطای میان داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد، می‌توان ادعا کرد که مقدار خطای حاصل از سه طرحواره فوق نزدیک به یکدیگر بوده و این سه طرحواره در برآورد مقدار بارش در تمام ایستگاه‌های استان بوشهر نتایج مشابهی تولید کرده‌اند.



شکل ۳. شاخص‌های آماری در قالب نمودار تیلور میان داده‌های مشاهداتی تمام ایستگاه‌های استان بوشهر و مقادیر مستخرج از دامنه سوم شبیه‌سازی‌ها با انتخاب انواع طرحواره‌های همرفت کومهای در مدل WRF-NMM در خلال رویدادهای منتخب.

۱-۳. طرحواره‌های همرفت کومهای

۱-۱-۳. ارزیابی ایستگاهی

در خلال بارش‌های منتخب، مقادیر شاخص‌های آماری (انحراف معیار، جذر میانگین مربعی خطای و همبستگی) میان نتایج مدل WRF-NMM و مقادیر ایستگاهی برای هر ایستگاه به طور جداگانه محاسبه و در قالب نمودار تیلور (تیلور، ۲۰۰۱) به تصویر کشیده شد (شکل‌ها به دلیل تعداد زیاد نشان داده نشده است). مقدار جذر میانگین مربعی خطای حاصل از اتخاذ انواع طرحواره‌های همرفت کومهای برای هر ایستگاه در جدول ۴ فهرست شده است. قابل توجه است که اغلب بارش‌های استان بوشهر بارش‌های رگباری می‌باشد که متساقن توسط مدل پدرسی شبیه‌سازی نشده است. این امر موجب شده تا در برخی ایستگاه‌ها خطای شبیه‌سازی به مراتب افزایش یابد. این مورد در سایر نقاط جهان نیز مسبوق به سابقه بوده است، بطور نمونه کالینین و همکاران (۲۰۱۳) نتیجه گرفتند که مدل قادر به شبیه‌سازی بارش‌های رگباری در منطقه پرم نبوده است.

از میان شش طرحواره بررسی شده طرحواره SAS کمترین خطای را در میان ۱۰ ایستگاه تولید کرده است. برای نتیجه‌گیری دقیق‌تر شاخص‌های آماری RMSE، CC و STD میان مقادیر مشاهداتی در تمام ایستگاه‌ها با مقادیر

جدول ۴. میزان جذر میانگین مربعی خطای برآورد شده با کاربست شش طرحواره متنوع همرفت کومهای برای هر ایستگاه بین مقادیر مشاهداتی ایستگاهی و نتایج بروندادهای مدل WRF-NMM با انتخاب طرحواره‌های مختلف همرفت کومهای برای رویدادهای منتخب. کمترین مقدار هر ستون با رنگ خاکستری متمایز شده است.

ردیف	طرحواره همرفت	خارجک	جم	چاه کوتاه	بوشهر ساحلی	بوشهر فروندگاهی	برازجان	گناوه	دیلم	دیر	علسولیه
۱	BMJ	۳۵/۵۳	۳۲/۲۸	۸/۶۸	۲۸/۷۴	۲۷/۲۲	۲۳/۶۱	۲۹/۱۶	۶۴/۱۳	۱۴/۸۰	۲۵/۸۳
۲	KF	۴۷/۵۴	۴۹/۲۲	۳/۳۲	۲۵/۴۲	۳۰/۷۴	۲۲/۱۶	۴۰/۴۵	۳۷/۹۸	۱۵/۴۴	۲۴/۴۲
۳	NSAS	۳۹/۸۴	۳۴/۹۸	۹/۱۵	۵۵/۸۰	۲۵/۴۸	۲۵/۱۸	۲۶/۳۱	۳۸/۱۵	۱۶/۲۰	۲۹/۴۱
۴	oldSAS	۲۷/۴۱	۳۷/۸۰	۴/۶۱	۳۱/۶۵	۳۱/۵۳	۲۲/۳۰	۱۸/۳۷	۴۴/۵۰	۱۳/۷۴	۳۲/۰۰
۵	SAS	۲۴/۲۷	۲۸/۱۶	۱۰/۲۶	۳۴/۸۲	۴۰/۶۵	۲۰/۷۳	۳۱/۶۳	۳۷/۷۳	۲۵/۹۳	۲۵/۶۱
۶	TiedTKE	۲۵/۳۴	۲۸/۵۰	۱۵/۹۷	۳۹/۷۵	۵۹/۲۶	۲۶/۷۳	۷۲/۶۱	۳۴/۳۷	۱۰/۲۹	۲۷/۱۱

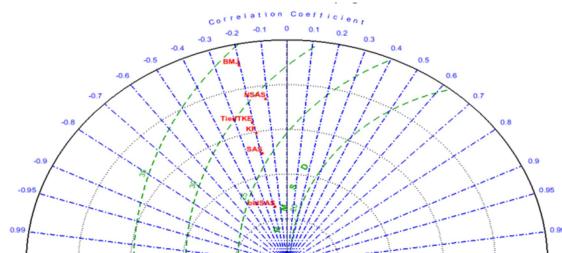
پنهانه‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، با توجه به تعداد نقاط شبکه‌ای بیشتری را در بر می‌گیرد، از اعتبار آماری بیشتری برخوردار خواهد بود.

۲-۱-۳. ارزیابی پنهانه

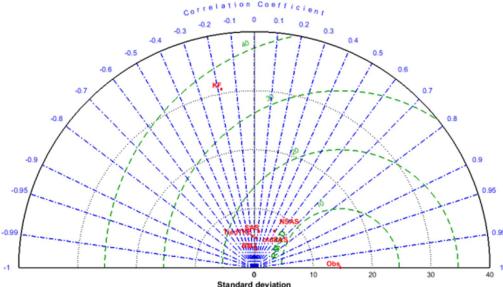
با توجه به تعداد کم ایستگاه‌های ثبت داده بارش در استان بوشهر، به منظور ارزیابی دقیق‌تر، بروندادهای مدل-WRF-NMM با انتخاب انواع طرحواره‌های همرفت کومهای با داده‌های بارش مستخرج از GPM برای تاریخ‌های منتخب مقایسه گردید. با توجه به تفکیک داده‌های GPM (تقریباً ۱۰ کیلومتر)، بروندادهای دامنه دوم شبیه‌سازی‌ها با تفکیک ۹ کیلومتر برای این مقایسه استفاده شد. به طور نمونه، در شکل ۵ نمونه‌ای از پنهانه بارش مستخرج از شبیه‌سازی‌های WRF-NMM برای هر طرحواره همرفت کومهای و همچنین توزیع بارش مستخرج از GPM برای تاریخ ۱۷ دسامبر ۲۰۱۹ نشان داده شده است.

نتایج حاصل از مقایسه عملکرد طرحواره‌های همرفت کومهای برای رویدادها با تفکیک در دو بازه زمانی مارس-آوریل و نوامبر-دسامبر و همچنین برای ایستگاه‌های ساحلی و غیر ساحلی در شکل ۴ نشان داده شده است.

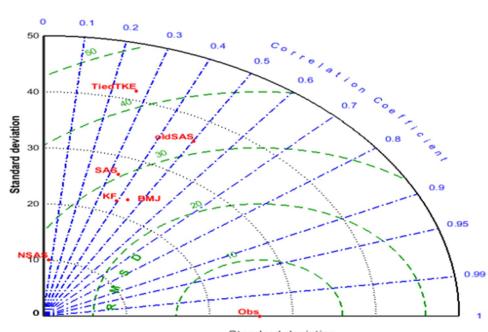
همانطور که شکل ۴ نشان می‌دهد در ماههای نوامبر-دسامبر طرحواره‌های KF و BMJ (و با خطای کمی KF) کمترین خطای در برآورد بارش به ترتیب در ایستگاه‌های ساحلی و غیر ساحلی داشته‌اند، در حالیکه برای سیل‌های فصل بهار طرحواره‌های oldSAS و NSAS و به ترتیب در ایستگاه‌های ساحلی و غیر ساحلی بهترین عملکرد را داشته‌اند. البته با توجه به تعداد محدود ایستگاه‌ها و دسته‌بندی آنها در دو دسته ساحلی و غیر ساحلی و کاهش تعداد رویدادها با تفکیک فصلی آنها، نتایج حاصل از این قسمت برای انتخاب مناسب‌ترین طرحواره همرفت کومهای از دقت آماری کافی برخوردار نباشد. از این‌رو، مقایسه



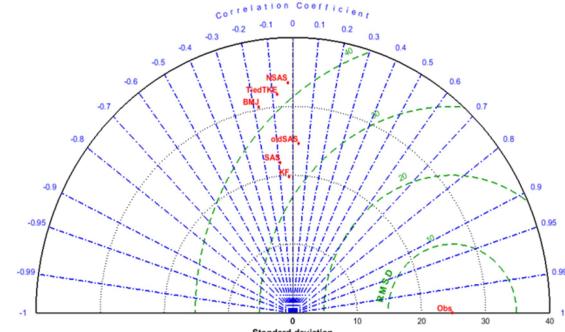
(ب) مارس-آوریل، غیرساحلی



(الف) مارس-آوریل، ساحلی

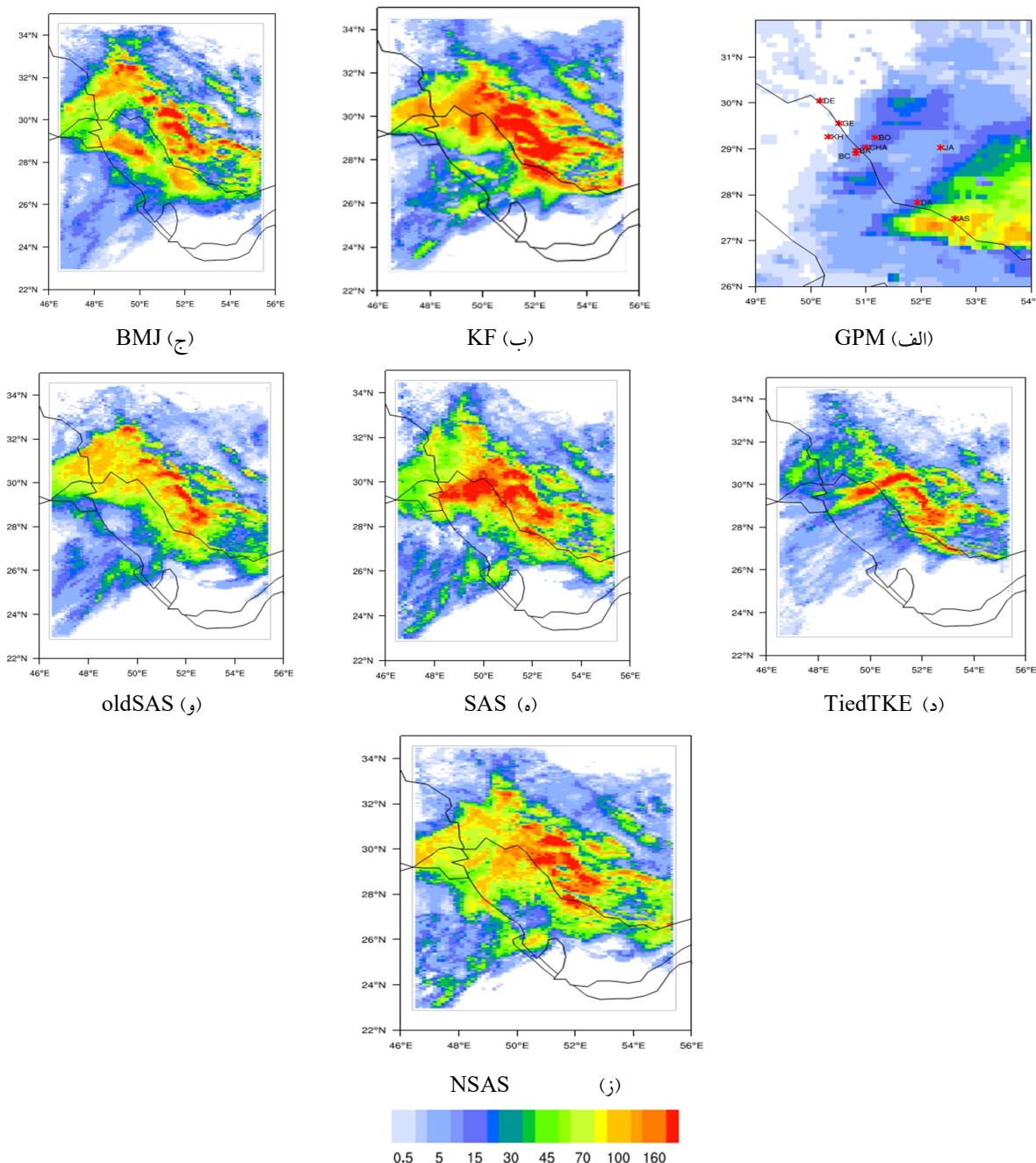


(د) نوامبر-دسامبر، غیرساحلی



(ج) نوامبر-دسامبر، ساحلی

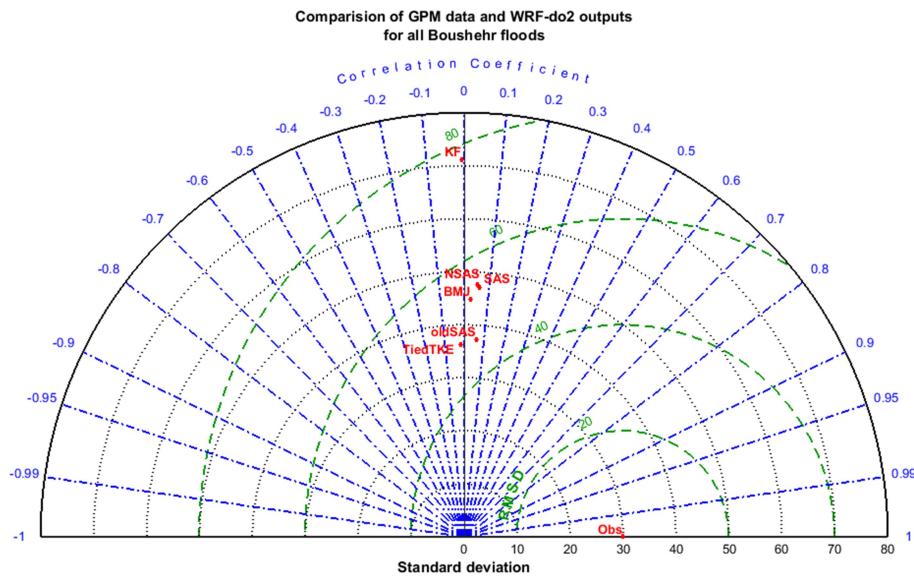
شکل ۴. شاخص‌های آماری در قالب نمودار تیلور میان داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های ساحلی (الف و ج) و غیرساحلی (ب و د) در استان بوشهر در دو دسته فصلی مارس-آوریل (الف و ب) و نوامبر-دسامبر (ج و د) و مقادیر مستخرج از دامنه سوم شبیه‌سازی‌ها با انتخاب انواع طرحواره‌های همرفت کومهای در مدل WRF-NMM.



شکل ۵. توزیع بارش ۲۴ ساعته (بر حسب میلی‌متر) برگرفته از داده‌های ماهواره GPM (الف) و بروندادهای مدل WRF-NMM با اتخاذ طرحواره‌های (ب)، (ج)، (ز)، (د)، (ه)، (و) و NSAS (ز) در تاریخ ۱۷ دسامبر ۲۰۱۹. نوار رنگی مربوط به مقادیر در آخرین زیرشکل نشان داده شده است.

محاسبه شد. لازم به ذکر است که برای این منظور تنها میزان بارش در نقاط جغرافیایی که هم در شبیه‌سازی‌ها و هم در داده‌های GPM حاوی اطلاعات بودند استفاده شد که تعداد آن به ۱۲۷۱ نقطه شبکه‌ای رسید. نتایج این بررسی کمی در شکل ۶ نشان داده شده است.

همانطور که شکل ۵ نشان می‌دهد هر شش طرحواره توزیع بارش را در شمال‌غرب الگوی GPM تولید کرده‌اند. این جایه‌جایی در تمام شبیه‌سازی‌ها به چشم می‌خورد. به منظور بررسی کمی، شاخص‌های آماری میان بارش حاصل از شبیه‌سازی‌های تمام رویدادهای منتخب و الگوی بارش GPM



شکل ۶. شاخص‌های آماری در قالب نمودار تیلور میان داده‌های بارش مستخرج از GPM و مقادیر مستخرج از دامنه دوم شبیه‌سازی‌ها با انتخاب انواع طرحواره‌های همرفت کومهای در مدل WRF-NMM در خلال رویدادهای منتخب.

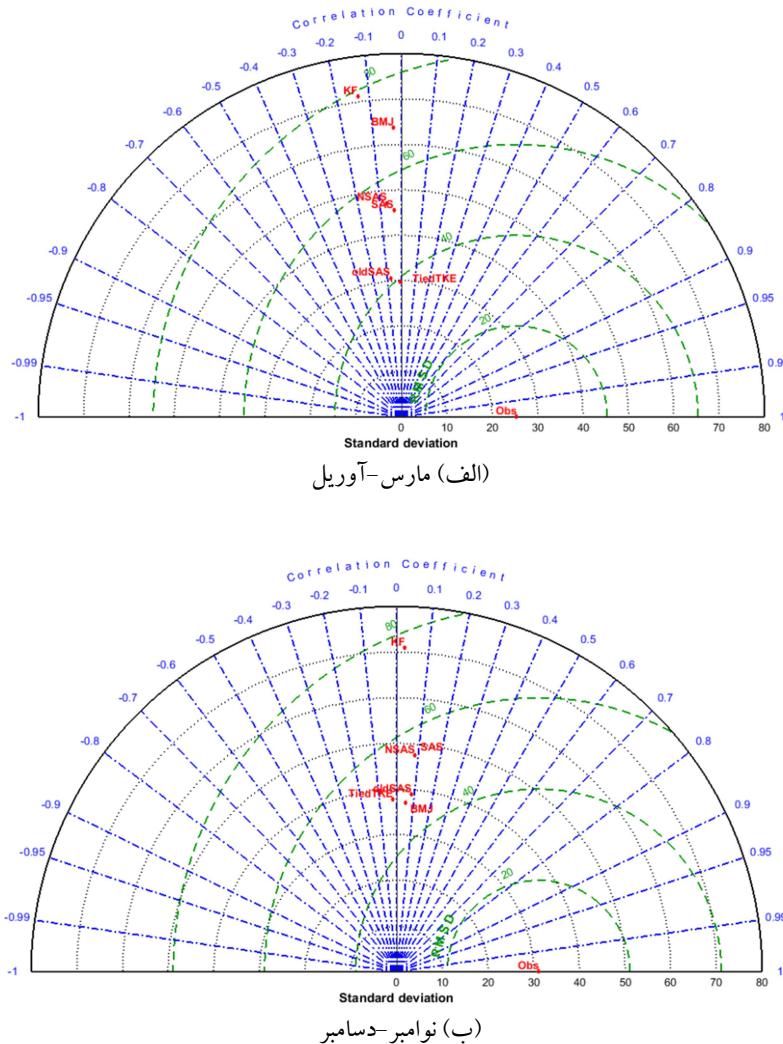
مشاهداتی مورد استفاده در بررسی ایستگاهی نتایج بوده است، نتایج حاصل از بررسی پهنه نسبت به نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد طرحواره‌ها در نقاط ایستگاهی به مرتب از اعتبار آماری بیشتری برخوردار است.

به منظور بررسی عملکرد طرحواره‌های همرفت کومهای در فصول مختلف، شاخص‌های آماری برای رویدادهای ماههای مارس-آوریل و نوامبر-دسامبر به تفکیک در شکل ۷ نشان داده شده است.

همانطور که شکل ۶ نشان می‌دهد طرحواره oldSAS کمترین خطا در برآورد پهنه بارش در خلال تمامی رویدادهای منتخب استان بوشهر را تولید کرده است. همانطور که جدول ۵ نشان می‌دهد طرحواره‌های همرفت کومهای در نقاط ایستگاهی اُریبی خشک (فراتخیم) و در نقاط شبکه‌ای موجود در دامنه دوم اُریبی تر (فراتخیم) تولید کرده‌اند. با توجه به اینکه تعداد نقاط شبکه‌ای در بررسی پهنه بارش به مرتب بیش از تعداد ایستگاه‌های

جدول ۵. اُریبی میان مقادیر بارش ایستگاهی و ماهواره‌ای GPM با مقادیر شبیه سازی شده با استفاده از انواع طرحواره‌های همرفت کومهای.

GPM	ایستگاهها	نام طرحواره
۴/۷۶	-۱۳/۵۰	BMJ
۲۱/۶۰	-۱۴/۴۱	KF
۱۰/۸۰	-۱۵/۳۰	NSAS
۳/۱۷	-۱۲/۰۳	OldSAS
۹/۵۲	-۱۵/۱۶	SAS
-۴/۹۳	-۱۰/۲۴	TiedTKE



شکل ۷. شاخص‌های آماری برای رویدادهای (الف) مارس-آوریل و (ب) نوامبر-دسامبر میان بروندادهای دامنه دوم مدل WRF و داده‌های GPM.

گرفت. ارزش این نتیجه زمانی روشن می‌شود که بدانیم عملکرد طرحواره‌های همرفت کومهای یکسان نیست. بطور نمونه، حسن و اسلام (۲۰۱۸) برای بارش‌های سیل‌آسای بنگلادش، با بررسی ۱۸ نوع پیکربندی متفاوت طرحواره TiedTKE را بهینه یافته‌اند. در حالیکه جیورک و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که دقت طرحواره GF برای شبیه‌سازی دو نمونه بارش در دشت‌های بزرگ ایالت متحده بیش از سایر طرحواره‌ها بوده است. البته چاوala و همکاران (۲۰۱۸) طرحواره BMJ را در برآورد بارش در منطقه گگا بهینه معرفی کردند، ولی گایلو و همکاران (۲۰۱۸) برای بارش‌های فرین در دارالسلام طرحواره KF را دقیق‌تر دانستند.

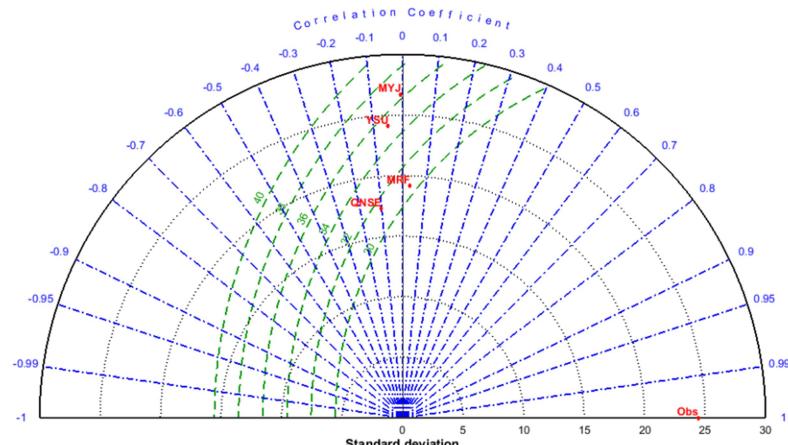
با تفکیک بازه زمانی رویدادهای برای پدیده‌های رویداده در ماه‌های مارس-آوریل طرحواره‌های همرفت کومهای oldSAS و TiedTKE با اختلاف اندکی کمترین خطای را در پهنه مورد مطالعه تولید کرده‌اند. در حالیکه برای پدیده‌های رویداده در ماه‌های نوامبر-دسامبر طرحواره‌های همرفت کومهای J و BMJ و oldSAS و TiedTKE خطای نسبتاً مشابهی را تولید کردند. نتایج نشان می‌دهد که با تفکیک فصلی نیز همچنان می‌توان طرحواره oldSAS را برای رویدادها در زمان‌های مختلف سال به عنوان طرحواره با کمترین خطای انتخاب کرد. از این‌رو، طرحواره oldSAS به عنوان طرحواره همرفت با بهینه‌ترین عملکرد در ادامه مورد استفاده قرار خواهد

خطا و همبستگی) در قالب نمودار تیلور (Taylor، ۲۰۰۱) با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شد (شکل‌ها به دلیل تعداد زیاد نشان داده نشده است). در جدول ۶ مقدار مربوط به جذر میانگین مربعی خطای برای هر ایستگاه فهرست شده است.

همانطور که جدول ۶ نشان می‌دهد برای ۱۲ رویداد منتخب که ۱۸ روز طول کشیده است، به ترتیب طرحواره‌های MRF و QNSE توانسته‌اند در ایستگاه‌های بیشتری کمترین خطای را تولید کنند. دو طرحواره باقیمانده بویژه طرحواره YSU که در هیچ ایستگاهی نتوانسته کمینه خطای در برآورد بارش را تولید کند، ضعیف‌ترین عملکرد را داشته‌اند. برای مقایسه جزئی‌تر، هر سه شاخص آماری ذکر شده برای تمامی نقاط ایستگاهی و برای تمامی رویدادهای یاد شده بین مقادیر شبیه‌سازی شده و ثبت شده محاسبه و در قالب نمودار تیلور در شکل ۸ نشان داده شده است. این شکل نیز به وضوح نتایج بدست آمده از جدول ۶ را به تصویر کشیده است.

جدول ۶. میزان جذر میانگین مربعی خطای برآورد شده هبرای هر ایستگاه بین مقادیر مشاهداتی ایستگاهی و بروندادهای مدل WRF-NMM با انتخاب طرحواره‌های مختلف لایه مرزی برای رویدادهای منتخب. کمترین مقدار هر ستون با رنگ خاکستری متمایز شده است.

ردیف	طرحواره همرفت	خارک	جم	چاه کوتاه	بوشهر ساحلی	بوشهر	برآذجان	گناوه	دیلم	دیر	علسویه
۱	MRF	۲۶/۶۷	۰/۵۰	۱/۴۰	۱۳/۱۴	۲۹/۳۹	۲۷/۷۵	۲۱/۷۸	۸/۱۸	۲/۳۷	۱۰/۸۸
۲	MYJ	۲۳/۱۷	۵۲/۳۰	۷/۵۲	۲۱/۵۰	۲۲/۱۳	۱۰/۱۵	۹/۹۰	۲۶/۰۵	۸/۲۹	۲۹/۸۴
۳	QNSE	۷/۴۵	۲۹/۱۷	۰/۰۲	۱۹/۱۳	۱۷/۰۷	۱۵/۷۴	۳/۴۹	۱۰/۵۷	۱۶/۴۷	۱۸/۸۴
۴	YSU	۳۲/۴۰	۱۸/۸۶	۱/۵۷	۳۴/۸۱	۲۱/۳۷	۱۴/۸۷	۹/۶۰	۲۸/۵۰	۱۲/۸۱	۲۵/۳۷



شکل ۸. شاخص‌های آماری در قالب نمودار تیلور میان داده‌های مشاهداتی تمام ایستگاه‌های استان بوشهر و مقادیر مستخرج از دامنه سوم شبیه‌سازی‌ها با انتخاب طرحواره‌های لایه مرزی متنوع در مدل WRF-NMM در خلال رویدادهای منتخب.

۲-۳. طرحواره‌های لایه مرزی

برای بررسی عملکرد WRF-NMM در برآورد بارش در خلال رویدادهای منتخب، طرحواره‌های لایه مرزی اعم از طرحواره Mellor-Yamada-Janjic (MYJ)، طرحواره MRF و Yonsei University (YSU) طرحواره Quasi-Normal Scale Elimination PBL (QNSE) انتخاب شدند. طبق نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد طرحواره‌های همرفت، در پیکربندی جدید از طرحواره oldSAS به عنوان طرحواره همرفت استفاده شد. نتایج حاصل از ارزیابی شبیه‌سازی‌ها در مکان ایستگاه‌ها و در دامنه منتخب در ذیل ارائه شده است.

۳-۱. ارزیابی ایستگاهی

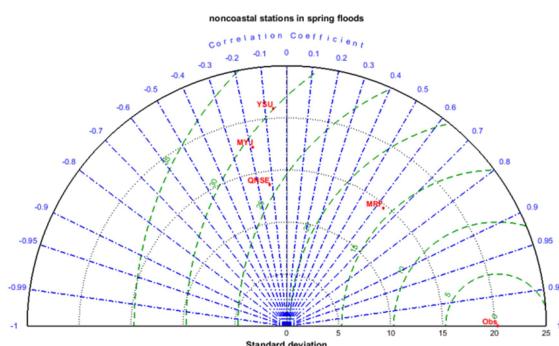
از بروندادهای آشیانه سوم شبیه‌سازی‌های مدل WRF-NMM با کاربست طرحواره‌های متنوع لایه مرزی، مقدار بارش در نقاط ایستگاهی استخراج و با استفاده از شاخص‌های آماری (انحراف معیار، جذر میانگین مربعی

است.

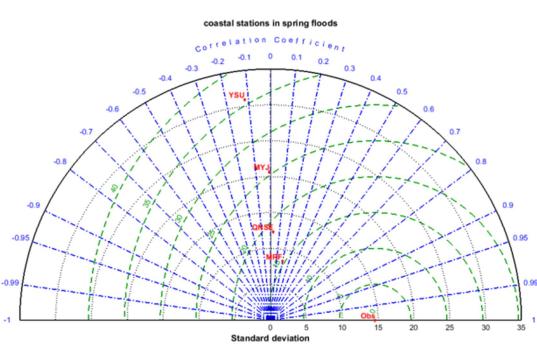
۲-۳. ارزیابی پهنی

به منظور ارزیابی عملکرد طرحواره‌های لایه مرزی در برآورد الگوی توزیع بارش، مقادیر بارش شبیه‌سازی شده حاصل از دامنه دوم (با تفکیک ۹ کیلومتر) در نقاط شبکه‌ای با مقادیر مشاهداتی حاصل از ماهواره GPM مقایسه گردید. برای نمونه توزیع بارش ۲۴ ساعته در تاریخ ۲۰۱۹/۱۲/۱۷ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. برای درک کمی از این مقایسه، شاخص‌های آماری در خلال نمودار تیلور محاسبه و در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

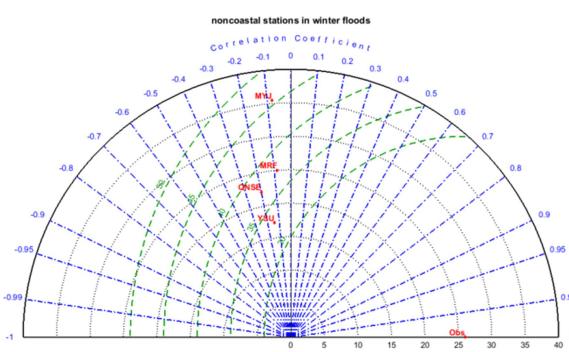
به منظور بررسی عملکرد طرحواره‌های لایه مرزی با تفکیک فصلی و ایستگاهی، شاخص‌های آماری برای ایستگاه‌های ساحلی و غیرساحلی و ماههای مارس-آوریل و نوامبر-دسامبر بطور جداگانه محاسبه شد. همانطور که شکل ۹ نشان می‌دهد در ایستگاه‌های ساحلی برای رویدادهای هر دو بازه مارس-آوریل (شکل ۹-الف) و نوامبر-دسامبر (شکل ۹-ج) و همچنین در ایستگاه‌های غیرساحلی برای رویدادهای بازه مارس-آوریل (شکل ۹-ب) طرحواره لایه مرزی MRF بهترین عملکرد را داشته است، در حالیکه در ایستگاه‌های غیرساحلی برای رویدادهای بازه نوامبر-دسامبر (شکل ۹-د) طرحواره لایه مرزی YSU کمترین خطای را تولید کرده



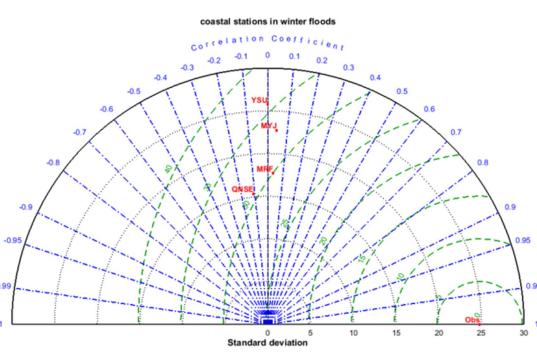
(ب) مارس-آوریل، غیرساحلی



(الف) مارس-آوریل، ساحلی

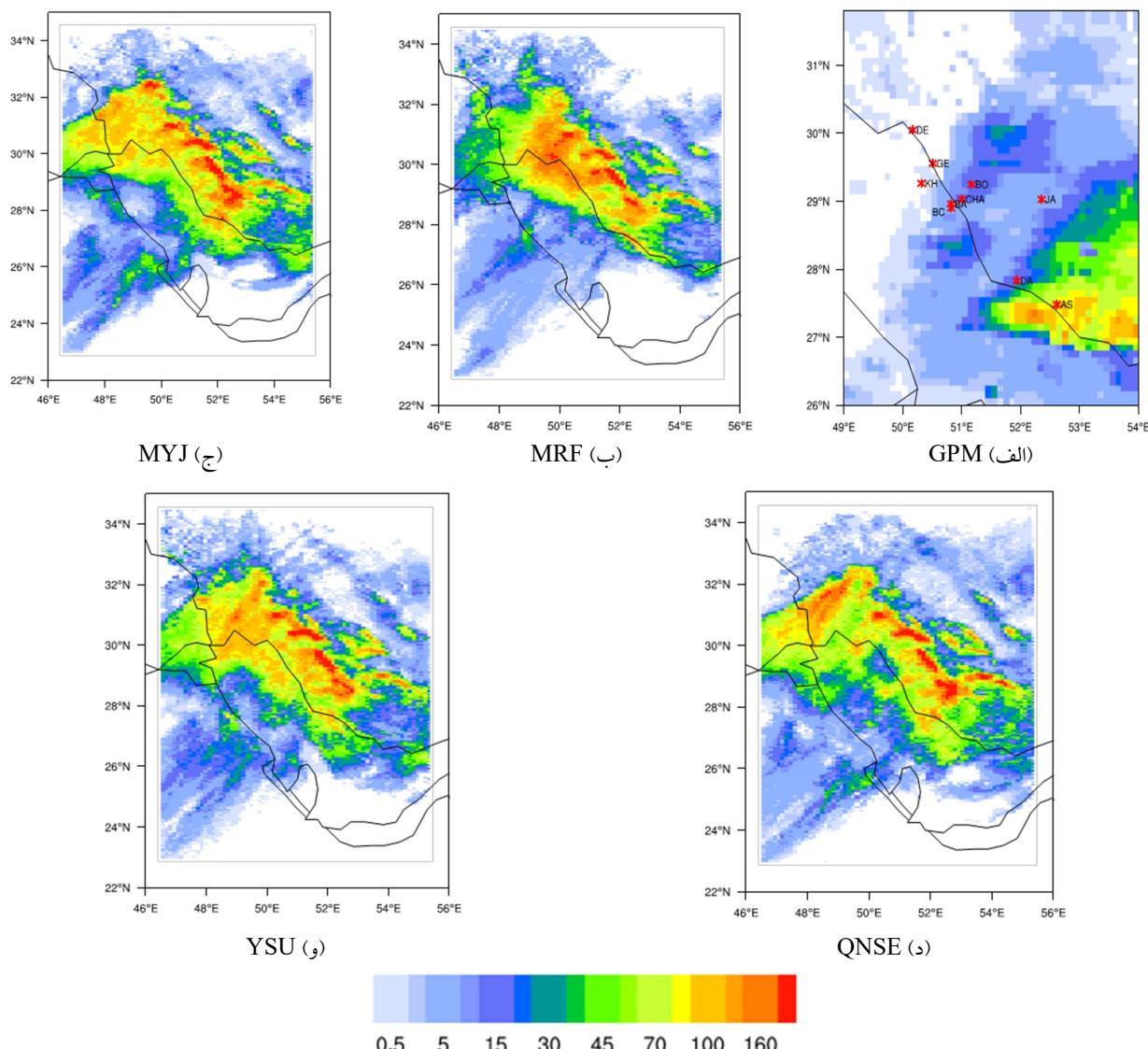


(د) نوامبر-دسامبر، غیرساحلی



(ج) نوامبر-دسامبر، ساحلی

شکل ۹. شاخص‌های آماری در قالب نمودار تیلور میان داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های ساحلی (الف و ج) و غیرساحلی (ب و د) در استان بوشهر در دو دسته فصلی مارس-آوریل (الف و ب) و نوامبر-دسامبر (ج و د) و مقادیر مستخرج از دامنه سوم شبیه‌سازی‌ها با انتخاب انواع طرحواره‌های لایه‌مرزی در مدل WRF-NMM.



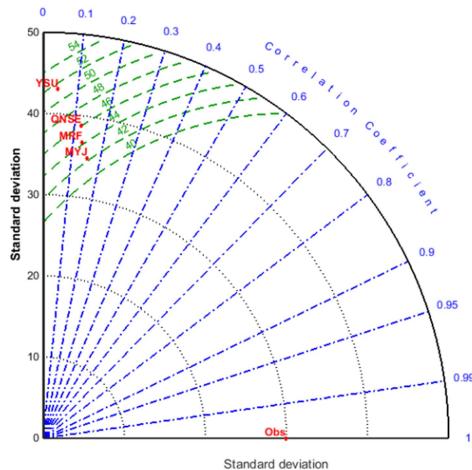
شکل ۱۰. توزیع بارش ۲۴ ساعته (بر حسب میلی‌متر) برگرفته از داده‌های ماهواره GPM (الف) و بروندادهای مدل WRF-NMM (ب) با اتخاذ طرحواره‌های (ج) MYJ، (د) MRF، (و) QNSE و (ه) YSU در تاریخ ۱۷ دسامبر ۲۰۱۹. نوار رنگی مربوط به مقادیر در آخرین زیرشکل نشان داده شده است.

شده که در جدول ۷ فهرست شده است نیز حاکی از این مساله است که تمامی طرحواره‌های لایه مرزی در نقاط ایستگاهی اُریبی خشک و در مجموع نقاط شبکه‌ای دامنه دوم اُریبی تر با مقادیر کمتر از ۶ میلی‌متر تولید کرده‌اند.

همانطور که شکل ۱۱ نشان می‌دهد، در خلال ۲۲۸۷۸ ثانیه شبکه‌ای (به ازای هر رویداد ۱۲۷۱ نقطه شبکه‌ای استفاده شده است) طرحواره‌های MYJ و MRF و QNSE با کمترین خطای تولید کرده‌اند. نتایج اُریبی محاسبه

جدول ۷. اُریبی میان مقادیر بارش (mm) ایستگاهی و ماهواره‌ای GPM با مقادیر شبیه سازی شده با استفاده از انواع طرحواره‌های لایه مرزی.

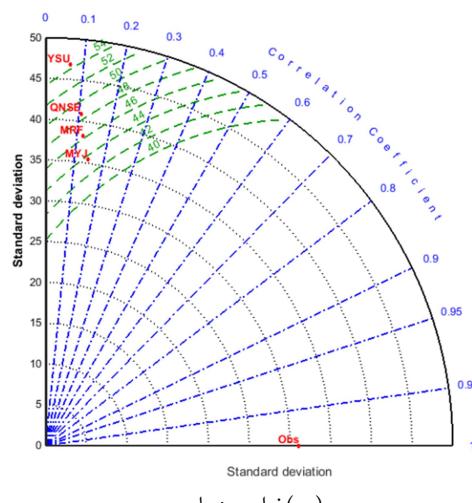
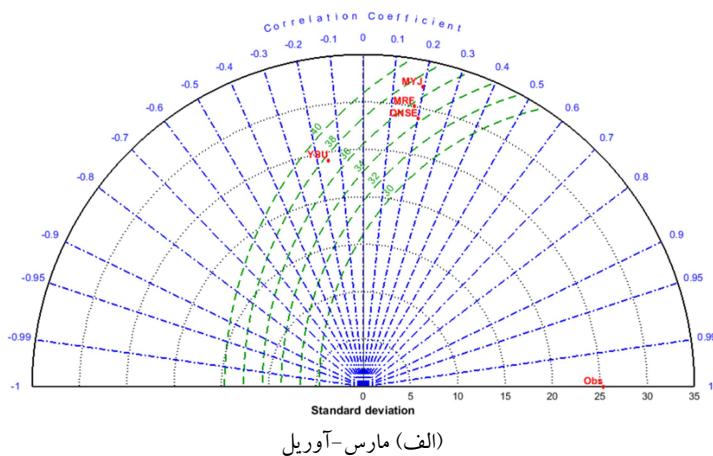
GPM	ایستگاهها	نام طرحواره
۲/۴۶	-۱۶/۸۳	MRF
۳/۰۰	-۱۳/۳۱	MYJ
۳/۵۶	-۱۵/۴۸	QNSE
۵/۱۸	-۱۴/۲۰	YSU



شکل ۱۱. شاخص‌های آماری در قالب نمودار تیلور میان داده‌های مشاهداتی برگرفته از ماهواره GPM و مقادیر مستخرج از دامنه دوم شبیه‌سازی‌ها با انتخاب طرح‌واره‌های لایه مرزی متنوع در مدل WRF-NMM در خالق رویدادهای منتخب.

بازه‌های مارس–آوریل و نوامبر–دسامبر بطور جداگانه محاسبه شد.

به منظور ارزیابی دقیق‌تر عملکرد طرح‌واره‌های لایه مرزی در شبیه‌سازی رویدادهای که در بازه‌های زمانی مختلف رخ داده‌اند، شاخص‌های آماری با تفکیک رویدادهای



شکل ۱۲. شاخص‌های آماری برای رویدادهای (الف) مارس–آوریل و (ب) نوامبر–دسامبر میان بارش مستخرج از دامنه دوم مدل WRF و داده‌های GPM.

انجام شد. برای این منظور با بررسی آمار داده‌های بارش و داده‌های رویدادهای رخ داده در مدیریت اطلاعات حوادث و سوانح کشور، ۱۲ مورد بارش فرین که در کل ۱۸ روز به طول انجامیده بود در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ انتخاب شد. دلیل انتخاب این بازه یکسان نبودن بازه ثبت داده در ایستگاه‌های مختلف استان بوشهر و تاسیس برخی ایستگاهها در سال‌های اخیر و همچنین استفاده از داده‌های ماهواره GPM (داده‌های در دسترس از ۲۰۰۰ تاکنون) بوده است. برای این هدف، در پیکربندی مدل WRF-NMM از شش طرحواره همرفت کومهای (شامل KF، BMJ، NSAS، SAS، oldSAS و TiedTKE) و چهار طرحواره لایه مرزی (اعم از MRF، MYJ، QNSE و YSU) به همراه آشیانه‌بندی با یک دامنه مادر ۲۷ کیلومتری و دو آشیانه ۹ و ۳ کیلومتری استفاده شد. فرایند ارزیابی در دو بخش مقایسه ایستگاهی و مقایسه پهنه بارش انجام شد. برای مقایسه ایستگاهی مقدار بارش، نتایج برونداد مدل WRF-NMM با انواع طرحواره‌ها و از دامنه سوم در نقاط ایستگاهی با داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌ها مقایسه شد. در مقایسه پهنه بارش نیز نتایج شبیه‌سازی‌های دامنه دوم با مقادیر بارش ماهواره GPM برای ۱۲۷۱ نقطه شبکه‌ای مقایسه شد. در مقایسه ایستگاهی به منظور بررسی جزئی‌تر، فرایند بررسی به تفکیک بازه زمانی رویدادها (در دو بازه مارس-آوریل و نوامبر-دسامبر) و تفکیک ایستگاهی (ایستگاه‌های ساحلی و غیرساحلی) انجام شد. در فرایند مقایسه پهنه بارش نیز برای بررسی دقیق‌تر، تفکیک بازه زمانی رویدادها (در دو بازه مارس-آوریل و نوامبر-دسامبر) مورد توجه قرار گرفت. نتایج بدست آمده بطور فهرست‌وار در ذیل ارائه شده است:

الف) ارزیابی عملکرد طرحواره همرفت کومهای: در فرایند ارزیابی ایستگاهی، در بازه مارس-آوریل طرحواره‌های مشتق از خانواده SAS (به ترتیب SAS و oldSAS) در ایستگاه‌های ساحلی و غیرساحلی کمترین خطأ در برآورد بارش را داشته‌اند و در بازه نوامبر-دسامبر

همانطور که شکل ۱۲-الف نشان می‌دهد طرحواره‌های QNSE، و با اختلاف کمی طرحواره MRF، در برآورد مقدار بارش در پهنه دامنه دوم در خلال رویدادهای بازه زمانی مارس-آوریل عملکرد بهتری داشته‌اند. برای رویدادهای بازه زمانی نوامبر-دسامبر طرحواره MYJ، و با اختلاف کمی طرحواره MRF، کمترین خطأ را تولید کرده‌اند.

لازم به ذکر است که علی‌رغم روش‌شن شدن اهمیت طرحواره لایه مرزی در عملکرد نهایی مدل WRF برای شبیه‌سازی بارش‌های سنگین، با اینحال در نقاط مختلف و در شرایط مختلف نتایج متفاوتی گزارش شده است. بطور نمونه، فلاوناس و همکاران (۲۰۱۱) برای بارش‌های مانسونی در غرب آفریقا طرحواره MYJ را بعنوان طرحواره بهینه معرفی کردند. سیرینیواس و همکاران (۲۰۱۸) با حساسیت‌سنگی عملکرد مدل WRF به انتخاب طرحواره لایه مرزی برای یک نمونه بارش فرین در ایالت چنانی هندوستان، عملکرد طرحواره MYNN را دقیق‌تر از YSU و MYJ دریافتند. رای و پتنیک (۲۰۱۹) دقت طرحواره‌های غیر محلی لایه مرزی همچون MRF و ACM2 را برای شبیه‌سازی بارش‌های مانسونی در کل هند به مراتب بیش‌تر از طرحواره‌های لایه مرزی محلی (همچون BouLac و MYNN2) یافتد. هزرا و پتنیک (۲۰۲۰) برای بارش‌های مانسونی در شرق هند (ایالت اودیشا) طرحواره MRF را مناسب اعلام کردند. مرونی و همکاران (۲۰۲۱) تأثیر انتخاب طرحواره لایه مرزی بر بارش در صحراهای آفریقا را بررسی کردند و نشان دادند که با توجه به اینکه طرحواره‌های غیر محلی لایه مرزی شامل اختلاط قائم توسط پیچک‌های بزرگ بوده است، عملکرد بهتری تولید کرده‌اند.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی عملکرد طرحواره‌های همرفت کومهای و لایه مرزی مدل WRF-NMM در برآورد مقدار ایستگاهی و پهنه بارش در استان بوشهر

بوشهر) و طرحواره‌های بهینه در سایر نقاط جهان (حاصل از پژوهش‌های دیگر محققان) نشان داد که استفاده از نتایج حاصل از این تحقیق در ارزیابی عملکرد سایر پارامترسازی‌ها (اعم از انواع طرحواره‌های خردیزیک، - موج کوتاه و موج بلند) و همچنین ریزمقیاس‌نمایی داده‌های شبکه‌بندی شده جهانی و بروندادهای مدل‌های اقلیمی برای کاربست در منطقه استان بوشهر از اهمیت بالایی برخوردار است. ارزیابی موارد فوق در دستور کار محقق قرارداد.

تشکر و قدردانی

در اینجا نویسنده بر خود لازم می‌داند از سازمان هواشناسی کشور به عنوان حامی مالی پروژه با شماره قرارداد ۱۴۰۰/۶۹۰۳/دب کمال تشکر را داشته باشد. حدود ۲۰ درصد نتایج ارائه شده در این مقاله حاصل از پروژه مذکور است.

مراجع

- آزادی، م.، شیرغلامی، م. ر.، حجام، س. و صحراییان، ف.، ۱۳۹۰، پسپردازش برونداد مدل WRF برای بارندگی روزانه در ایران. *تحقیقات منابع آب*، ۷(۴)، ۷۱-۸۱.
- آزادی، م.، صوفیانی، م.، وکیلی، غ. و قائمی، م.، ۱۳۹۵، مطالعه موردنی اثر گوارد داده‌های ایستگاه‌های دیدبانی و جو بالا بر برونداد بارش مدل WRF روی منطقه ایران. *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۰(۲)، ۱۱۰-۱۱۹.
- پگاهفر، ن.، ۱۴۰۰، ارزیابی عملکرد طرحواره‌های همرفت کومه‌ای در مدل HWRF در پیش‌بینی مشخصه‌های توفان حاره‌ای، مطالعه موردنی توفان حاره‌ای گونه، م. فیزیک زمین و فضا، ۴۷(۱)، ۱۴۵-۱۷۴.

تقوی، ف.، نیستانی، الف. و قادر، س.، ۱۳۹۲، ارزیابی پیش‌بینی‌های کوتاه مدت بارش مدل عددی WRF در منطقه ایران در دوره یک ماهه، م. فیزیک زمین و

طرحواره‌های KF و BMJ (و با خطای کمی KF) به ترتیب در ایستگاه‌های ساحلی و غیرساحلی دقیق‌ترین نتایج را تولید کرده‌اند. در فرایند ارزیابی پنهان بارش، در بازه مارس-آوریل طرحواره‌های همرفت کومه‌ای TiedTKE و oldSAS و در بازه نوامبر-دسامبر طرحواره‌های همرفت کومه‌ای BMJ و oldSAS با اختلاف کمی بهترین نتایج بررسی شده در فرایند مقایسه پنهان بارش نسبت به تعداد ایستگاه‌ها در فرایند مقایسه oldSAS با استگاهی و با درنظر گرفتن اینکه طرحواره oldSAS نسبت به سایر طرحواره‌های همرفت کومه‌ای در برآورد بارش در نقاط ایستگاهی ساحلی و غیرساحلی و بازه‌های زمانی مختلف بیشترین دقت را تولید کرده بود، طرحواره oldSAS به عنوان طرحواره همرفت کومه‌ای بهینه انتخاب شد.

ب) ارزیابی عملکرد طرحواره‌های لایه مرزی: ارزیابی عملکرد طرحواره‌های لایه مرزی نشان داد که در ایستگاه‌های ساحلی برای رویدادهای هر دو بازه مارس-آوریل، نوامبر-دسامبر و همچنین در ایستگاه‌های غیرساحلی برای رویدادهای بازه مارس-آوریل طرحواره لایه مرزی MRF کمترین خطای تولید کرده بود. در حالیکه در ایستگاه‌های غیرساحلی برای رویدادهای بازه نوامبر-دسامبر طرحواره لایه مرزی YSU (و با اختلاف کمی طرحواره‌های MRF و QNSE) بهترین عملکرد را داشت. در مقایسه پنهان بارش، در خلال رویدادهای بازه زمانی مارس-آوریل طرحواره‌های QNSE و با اختلاف کمی طرحواره MRF نتایج دقیق‌تری تولید کردند و برای رویدادهای بازه زمانی نوامبر-دسامبر طرحواره MYJ، و با اختلاف کمی طرحواره MRF، کمترین خطای تولید کرد. در نهایت می‌توان به این جمع‌بندی رسید که برای بارش‌های فرین استان بوشهر هطرحواره لایه مرزی همینه بوده است. ه

مقایسه نتایج حاصل از ارزیابی طرحواره‌های بهینه همرفت کومه‌ای و لایه مرزی در منطقه مورد بررسی (استان

مرادی، ش.، جوانمرد، س.، قادر، س.، آزادی، م. و
قرایلو، م.، ۱۳۹۹، موثرترین طرحواره در بهبود
عملکرد مدل WRF جهت پیش‌بینی بارش در منطقه
شمال غرب ایران - مطالعه موردی، هواشناسی و علوم
جو، ۳(۳)، ۱۸۸-۲۰۰.

نیستانی، الف.، قادر، س. و محب الحججه، ع.، ۱۳۹۶،
کاربست داده‌گواری در مدل WRF برای شبیه‌سازی
بارش ناشی از یک سامانه همدیدی در غرب ایران،
مجله فیزیک زمین و فضا، ۱۱(۱)، ۱۰۱-۱۲۳.

Ahmadloo, M., Gharaylou, M., Mazraei Farahani, M. and Peghafar, N., 2022, Convection-permitting Simulation of a Mesoscale Convective System Accompanying an Intense Flood over Iran using the WRF Model. *Pure and applied geophysics*.

Chawla, I., Osuri, K.K., Mujumdar, P.P. and Niyogi, D., 2018, Assessment of the Weather Research and Forecasting (WRF) model for simulation of extreme rainfall events in the upper Ganga Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(2), 1095-1117.

Flaounas, E., Bastin, S. and Janicot, S., 2011, Regional climate modelling of the 2006 West African monsoon: sensitivity to convection and planetary boundary layer parameterisation using WRF. *Climate Dynamics*, 36(5), 1083-1105.

Franchito, S.H., Gan, M.A. and Fernandez, J.P.R., 2019, Strong Rainfall in Mato Grosso do Sul, Brazil: Synoptic Analysis and Numerical Simulation. In *Natural Hazards*. IntechOpen.

Hasan, M.A. and Islam, A.S., 2018, Evaluation of microphysics and cumulus schemes of WRF for forecasting of heavy monsoon rainfall over the Southeastern Hilly region of Bangladesh. *Pure and Applied Geophysics*, 175(12), 4537-4566.

Hazra, V. and Pattnaik, S., 2020, Systematic errors in the WRF model planetary boundary layer schemes for two contrasting monsoon seasons over the state of Odisha and its neighborhood region. *Theoretical and Applied Climatology*, 139(3), 1079-1096.

Huffman G.J., Stocker, E.F., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J. and Tan, J., 2019, GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree x 0.1 degree V06, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: [Data Access Date], 10.5067/GPM/IMERG/3B-HH/06.

Janjic, Z. I., 2003, A nonhydrostatic model based on a new approach, *Meteorol. Atmos. Phys.*,

فضاء، ۲(۳۹)، ۱۴۵-۱۷۰.

دنیادوست، غ.، ارکیان، ف.، رنجبر، ع. و میرزایی، م.، ۱۳۹۴، بررسی عددی توفان‌های تندی در تهران
توسط مدل WRF-ARW، پژوهش‌های اقلیم‌شناسی،

۲۳، ۴۹-۸۰.

رضازاده، م.، مرادیان، ف. و قادر، س.، ۱۳۹۹، بررسی عملکرد سامانه همادی چندفیزیکی مدل میان مقیاس WRF جهت شبیه‌سازی بارش در مناطق مرکزی ایران، *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۱۴(۱)، ۱۳-۳۸.

82, 271-285.

Jeworrek, J., West, G. and Stull, R., 2019, Evaluation of cumulus and microphysics parameterizations in WRF across the convective gray zone. *Weather and Forecasting*, 34(4), 1097-1115.

Jorba, O., Loridan, T., Jiménez-Guerrero, P. and Baldasano, J.M., 2008, Annual evaluation of WRF-ARW and WRF-NMM meteorological simulations over Europe. In *9th Annual WRF Users' Workshop*, 23-27.

Kalinin, N.A., Vetrov, A.L., Sviyazov, E.M. and Popova, E.V., 2013, Studying intensive convection in Perm krai using the WRF model. *Russian Meteorology and Hydrology*, 38(9), 598-604.

Litta, A.J., Mary Ididcula, S., Mohanty, U.C. and Kiran Prasad, S., 2012, Comparison of thunderstorm simulations from WRF-NMM and WRF-ARW models over east Indian region. *The Scientific World Journal*, 2012.

Litta, A.J. and Mohanty, U.C., 2008, Simulation of a severe thunderstorm event during the field experiment of STORM programme 2006, using WRFNMM model. *Curr. Sci.*, 95, 204-215.

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, 117.

Marjanović, D., Veljovic, K. and Zaric, M., 2017, Forecasts of extreme precipitation in the western Balkans in May 2014: model skill and sensitivity to the vertical co-ordinate. *Meteorological Applications*, 24(3), 387-396.

MDE, D.B., DEP, T.D.M., DEC, M.K.N., DEC, W.H.N., DEC, G.S.N., DEQ, M.K.V., DNR, M.J.I. and DNR, D.B.I., 2009, Sensitivity testing of WRF physics parameterizations for meteorological modeling and protocol in

- support of regional SIP air quality modeling in the OTR.
- Meroni, A.N., Oundo, K.A., Muita, R., Bopape, M.J., Maisha, T.R., Lagasio, M., Parodi, A. and Venuti, G., 2021, Sensitivity of some African heavy rainfall events to microphysics and planetary boundary layer schemes: Impacts on localised storms. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.
- Ngailo, T.J., Shaban, N., Reuder, J., Mesquita, M.D., Rutalebwa, E., Mugume, I. and Sangalungembe, C., 2018. Assessing Weather Research and Forecasting (WRF) Model parameterization schemes skill to simulate extreme rainfall events over Dar es Salaam on 21 December 2011. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 6(01), 36.
- Pegahfar, N., Gharaylou, M. and Shoushtari, M.H., 2022, Assessing the performance of the WRF model cumulus parameterization schemes for the simulation of five heavy rainfall events over the Pol-Dokhtar, Iran during 1999-2019, *Natural Hazard*.
- Pennelly, C., Reuter, G. and Flesch, T., 2014, Verification of the WRF model for simulating heavy precipitation in Alberta. *Atmospheric Research*, 135, 172-192.
- Rai, D. and Pattnaik, S., 2019, Evaluation of WRF planetary boundary layer parameterization schemes for simulation of monsoon depressions over India. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 131(5), 1529-1548.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Wang, W., and Powers, J.G., 2005, A Description of the Advanced Research WRF Version 2. NCAR Technical Note NCAR/TND468+STR, available at: http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v2.pdf.
- Spiridonov, V., Baez, J. and Telenta, B., 2017, Heavy convective rainfall forecast over Paraguay using coupled WRF-cloud model. In *Perspectives on Atmospheric Sciences*, 183-189.
- Spiridonov, V. and Ćurić, M., 2019, Evaluation of Supercell Storm Triggering Factors Based on a Cloud Resolving Model Simulation. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 55(3), 439-458.
- Spiridonov, V., Baez, J., Telenta, B. and Jakimovski, B., 2020, Prediction of extreme convective rainfall intensities using a free-running 3-D sub-km-scale cloud model initialized from WRF km-scale NWP forecasts. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 209, 105401.
- Srinivas, C. V., Yesubabu, V., Prasad, D. H., Prasad, K. H., Greeshma, M. M., Baskaran, R. and Venkatraman, B., 2018, Simulation of an extreme heavy rainfall event over Chennai, India using WRF: Sensitivity to grid resolution and boundary layer physics. *Atmospheric Research*, 210, 66-82.
- Sun, J., Zhang, Y., Ban, J., Hong, J.S. and Lin, C.Y., 2020, Impact of combined assimilation of radar and rainfall data on short-term heavy rainfall prediction: A case study. *Monthly Weather Review*, 148(5), 2211-2232.
- Taylor, K.E. 2001, Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J Geophys Res Atmos*, 106, 7183–7192.

Assessment of the performance of cumulus and boundary layer schemes in the WRF-NMM model in simulation of heavy rainfalls over the Bushehr Province during 2000-2020

Pegahfar, N.*

Assistant Professor, Atmospheric Science Center, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Tehran, Iran

(Received: 5 Dec 2021, Accepted: 19 April 2022)

Summary

The mesoscale numerical weather prediction system of Weather Research and Forecasting (WRF), with two cores of ARW and NMM, has been used for atmospheric research, operational forecasting, and dynamical downscaling of Global Climate Models. Many parameterizations for each physics option can be accessed in this model. It is noteworthy that the performance of the model depends on the selected configuration and varies in different areas. Therefore, choosing a configuration with the lowest error for each terrain is mandatory. Here, the performances of various physics schemes, including cumulus and boundary layer schemes of the WRF-NMM model, were examined to simulate twelve heaviest extreme rainfall events in the southwest of Iran, the Bushehr Province, during 2000-2020. These events lasted for eighteen days. Three domains with 27, 9, and 3 km resolution were used in the model configurations, with no cumulus option for the smallest one. The initial and boundary conditions were used from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Reanalysis v5 (ERA5) datasets. One hundred and eight simulations were done using six cumulus schemes of KF, BMJ, SAS, oldSAS, NSAS, and TiedTKE, and seventy-two runs were done to evaluate the boundary layer schemes of MRF, MYJ, QNSE, and YSU. The simulated precipitation patterns were assessed using two observational data sets, including (I) in-situ measured data from eleven automatic weather stations and (II) grid point data from Global Precipitation Measurement (GPM) satellite with 0.1-degree horizontal resolution. Four statistic indices of Root Mean Square Error, Correlation Coefficient, Standard Deviation, and Bias were applied in the evaluation process. The evaluation process with the data measured at 11 automatic weather stations was done using outputs of the third domain. The outputs of the second domain were used for evaluation basis on GPM data at grid points. For a comprehensive analysis, the assessment process was performed separately for rainfall events (March-April and November-December events) in coastal and non-coastal stations. Comparison of precipitation from simulations of various cumulus schemes with the eleven in-situ data showed that the schemes from SAS family well performed at March-April events at coastal and noncoastal stations. While, the KF scheme produced the least error at coastal and noncoastal stations during the November-December events. The precipitation data from 1271 GPM grid-point data revealed that the oldSAS scheme generated the least error for the March-April and November-December events. According to the number of GPM grid-point data, the oldSAS scheme opted as the cumulus option for the next runs. Evaluation of WRF-NMM simulations using different boundary layer physics with the in-situ data indicated that MRF scheme produced the minor error at coastal and noncoastal stations for both March-April and November-December events. Using the 1271 GPM grid-point data illustrated that the QNSE and MRF (MYJ and MRF) options did the best performance for March-April (November-December) events. In conclusion, based on the number of GPM grid-point data compared with in-situ measured data, it is suggested that the oldSAS cumulus scheme and MRF boundary layer scheme can be chosen with some robustness in predicting the amount and pattern of the heavy rainfall precipitation in Bushehr Province of Iran. It is also notable that the default options introduced by the model for cumulus scheme and boundary layer scheme in the WRF-NMM model produce the largest error and are not appropriate for the selected area. This reveals the importance of adequately selecting physics options for this area.

Keywords: heavy rainfall, Bushehr Province, WRF-NMM model, cumulus scheme, boundary layer scheme.

* Corresponding author:

pegahfar@inio.ac.ir