

## ارزیابی عملکرد مدل WRF با نُه پیکربندی فیزیکی مختلف برای پیش‌بینی بارش زمستانه جنوب غرب ایران

سوزان ساسانیان<sup>۱</sup>، مجید آزادی<sup>۲</sup>، حسن عسگری شیرازی<sup>۳</sup>، ابراهیم میرزایی حاجی باغلو<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی دانشگاه آزاد اسلامی تهران شمال، تهران، ایران

۲- دانشیار، عضو هیأت علمی پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران

۳- استاد تمام، عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی تهران شمال، تهران، ایران

۴- دانشجوی دکتری هواشناسی، معاون فنی و شبکه ایستگاه‌های سازمان هواشناسی کشور

### چکیده

مدل میان‌مقیاس پیش‌بینی وضع هوا (WRF) دارای طرح‌واره‌های پارامتری‌سازی فیزیکی متنوعی است که انتخاب یک مجموعه بخصوص از این طرح‌واره‌ها می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر دقت پیش‌بینی‌های مدل داشته باشد. بنابراین باید با توجه به سامانه‌های جوی حاکم بر منطقه‌ی مورد مطالعه گزینه‌های مناسب انتخاب شوند. در این پژوهش دقت پیش‌بینی‌های ۲۴ ساعته در منطقه‌ی جنوب غرب ایران برای دوره‌ی اول دسامبر ۲۰۱۱ تا ۲۹ فوریه ۲۰۱۲، با استفاده از نُه پیکربندی متفاوت مدل WRF، راستی‌آزمایی می‌شود تا پیکربندی مناسب بدست آید. فرآیند راستی‌آزمایی با استفاده از جدول توافقی ۲×۲ و کمیت‌های راستی‌آزمایی وابسته به این جدول انجام شده است. با وجود اشکالات زیاد در پیش‌بینی بارش، نتایج راستی‌آزمایی کمیت‌های اریبی نشان می‌دهد که به طور کلی مدل WRF برای همه‌ی آستانه‌های بارشی برای همه‌ی پیکربندی‌ها غیر از آستانه‌ی بارشی ۱۵-۱۰ میلی‌متر برای پیکربندی سه و آستانه‌ی بارشی بیش از ۱۵ میلی‌متر برای پیکربندی دو و سه که فروپوشی‌هایی داشته است، دارای فرآیند پیش‌بینی می‌باشد.

مقدار کمیت نسبت صحیح (PC) برای بارش‌های زیر ۱۵ میلی‌متر با متوسط ۹۱ درصد پیکربندی سه را مناسب نشان می‌دهد و برای بارش‌های بیش از ۱۵ میلی‌متر پیکربندی دو را با ۹۷ درصد مناسب تشخیص داده است. همچنین امتیاز مهارتی پیرس (PSS) برای آستانه‌ی بارشی زیر ۱۰ میلی‌متر، پیکربندی دو را مناسب نشان می‌دهد. این امتیاز مهارتی برای آستانه‌ی بارشی ۱۵-۱۰ میلی‌متر، پیکربندی چهار و برای آستانه‌ی بارشی بیش از ۱۵ میلی‌متر پیکربندی هشت را مناسب تشخیص داده است.

به طور کلی برای بارش‌های سبک (۵-۱۰ میلی‌متر) و بارش‌های متوسط (۱۰-۵ میلی‌متر) پیکربندی‌های دو و سه در مقایسه با سایر پیکربندی‌ها از دقت بالاتری برخوردار است. برای بارش‌های شدید (۱۵-۱۰ میلی‌متر) پیکربندی‌های سه و چهار در مقایسه با سایر پیکربندی‌ها دقت بالاتری را داراست. ولی در مورد بارش‌های سنگین (بیشتر از ۱۵ میلی‌متر) پیکربندی‌های دو، سه و هشت از نتایج یکسانی برخوردار بوده و پیکربندی مشخصی را نمی‌توان برگزید.

**کلمات کلیدی:** پیکربندی، مدل WRF، راستی‌آزمایی، بارش، پارامتری‌سازی فیزیکی.

### مقدمه

دارد که هر کدام از این طرح‌واره‌ها از تقریب‌ها و روش‌های مختلفی برای پارامتری‌سازی فرآیندهای گوناگون استفاده می‌کنند. بنابراین انتظار داریم که تغییر طرح‌واره‌های فیزیکی مورد استفاده در مدل تأثیر قابل توجهی در پیش‌بینی‌های مدل به ویژه کمیت بارش داشته باشد و همچنین این تأثیر بستگی به منطقه مورد مطالعه و نوع سامانه‌های جوی دارد. بنابراین ضروری است که برای استفاده بهینه از سامانه مدل‌سازی ابتدا تأثیر طرح‌واره‌های مختلف فیزیکی در پیش‌بینی‌های بارش بر روی منطقه مورد نظر بررسی و تعیین شود تا ترکیب (های) بهینه برای استفاده در پیش‌بینی بدست آید. با توجه به اهمیت پیش‌بینی بارش و نقش مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا و همچنین لزوم بکارگیری پیکربندی مناسب، هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی عملکرد مدل WRF با گزینه‌های فیزیکی

تلاش در جهت پیش‌بینی وضع هوا همیشه به دلیل اثرات مطلوب و نامطلوبی که در زندگی انسان داشته مورد توجه و علاقه بشر بوده است. تأثیرات پدیده‌های جوی و اقلیمی بر اقتصاد، میزان منابع و ثروت‌های ملی، سلامت جان و مال انسان‌ها و غیره پوشیده از ابهام نیست و انسان همیشه به دنبال راهی برای بهبود شرایط زندگی از طریق غلبه بر نیروهای طبیعت و جلوگیری از آسیب‌های محیطی بوده است.

مدل WRF که سامانه‌ای با فن‌آوری به‌روز مدل‌سازی و با قابلیت‌های فراوان می‌باشد و عمدتاً جهت شبیه‌سازی پیش‌بینی‌های کوتاه مدت بکار می‌رود، گزینه‌های متعددی برای بخش‌های فیزیکی شامل لایه مرزی، همرفت، تابش، لایه سطحی، خرد فیزیک، طول موج بلند و طول موج کوتاه

مختلف برای پیش‌بینی بارش زمستانه بر روی جنوب غرب ایران می‌باشد.

از کارهای انجام شده در زمینه مدل‌های پیش‌بینی عددی میان‌مقیاس می‌توان به مقایسه بین مدل MM5 و WRF در خصوص بارش‌های سنگین و حاره‌ای در طی روزهای ۹ تا ۱۱ ژانویه ۲۰۰۲ در سنگال اشاره نمود. جانکو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۵) اثر پارامتری‌سازی‌های فیزیکی متفاوت در مدل WRF و اثر متقابل آن‌ها را بر روی بارش‌های همرفتی میان-مقیاس در فصل گرم بررسی نمودند. آن‌ها با استفاده از ۱۸ پیکربندی مدل WRF که متشکل از سه طرح‌واره همرفت، سه طرح‌واره خرد فیزیکی و دو طرح‌واره لایه مرزی بود، نشان دادند که با وجود اینکه اثر تغییرات اتفاق افتاده در پیش‌بینی بارش با استفاده از طرح‌واره‌های لایه مرزی و خرد فیزیکی قابل توجه است، ولی بیشترین تغییرپذیری از تغییر در انتخاب طرح‌واره‌های همرفتی می‌باشد.

در سال ۲۰۰۵ نیز مقایسه‌ای بین خروجی‌های شبیه‌سازی مدل‌های MM5 و WRF با مقادیر دیدبانی شده برای سیلاب غرب ایالات متحده آمریکا صورت گرفت و نشان داد که نتایج حاصل از مدل WRF به مقادیر واقعی نزدیک‌تر است. این مدل برای بارش سنگین سال ۲۰۰۶ در شمال تایلند با استفاده از طرح‌واره‌های خرد فیزیکی مختلف اجرا و نتایج حاصل از آن با هم مقایسه شد.

گالوس<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۸) نیز مقایسه‌ای بین پنج طرح‌واره میکروفیزیکی برای سیستم خط تندوزه ۳ آلمان که در ۱۲ آگوست ۲۰۰۴ رخ داد، انجام دادند.

همچنین مطالعاتی برای ارزیابی پارامتری‌سازی‌های مدل WRF بر روی اقلیم جنوب اسپانیا، منطقه‌ای با توپوگرافی پیچیده انجام شده است. این مطالعه حساسیت مدل به هشت ترکیب از طرح‌واره‌های پارامتری‌ساز همرفت، خرد فیزیکی و لایه مرزی سیاره‌ای را در دوره‌ی ۱۹۹۰-۱۹۹۹ بررسی کرد. منطقه مورد مطالعه را به پنج منطقه بارشی و چهار منطقه دمایی منطقه‌بندی کرده و از داده‌های دیدبانی ۴۳۸ ایستگاه

بارانسنجی و ۱۵۲ ایستگاه دمایی استفاده شد. نتایج نشان داد که طرح‌واره‌های لایه مرزی و همرفت تأثیر اساسی بر روی بارش این منطقه دارند در حالیکه هیچ تفاوتی بین انتخاب‌های میکروفیزیکی بدست نیامد. شبیه‌سازی دما نیز با همه‌ی پیکربندی‌ها مشابه بدست آمد به جز انتخاب لایه مرزی سیاره‌ای که روی دمای کمینه اثر می‌گذاشت.

اِونس<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۱) در جنوب شرق استرالیا اثر پارامتری‌سازی‌های فیزیکی متفاوت در مدل WRF و اثر متقابل آن‌ها بر روی بارش‌های همرفتی میان‌مقیاس را مورد بررسی قرار دادند. با استفاده از ۳۶ پیکربندی متفاوت، مدل WRF برای چهار روز انتخاب شده مورد بررسی قرار گرفت و راستی‌آزمایی گردید.

نصرالهی و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی اثرات مختلف فیزیک بارش مدل WRF در شبیه‌سازی‌های هاریکن پرداختند. این مطالعه به بررسی عملکرد WRF در پیش‌بینی بارش، مسیر هاریکن و مدت بارش در خشکی با استفاده از طرح‌واره‌های خرد فیزیک و همرفت می‌پردازد. از یک مجموعه‌ای با ۲۰ ترکیب از طرح‌واره‌های خرد فیزیک و همرفت استفاده شد که خروجی‌های مدل در برابر مشاهدات زمینی مطابقت داشتند. در حالیکه انتخاب طرح‌واره‌های خرد فیزیک و همرفت می‌توانند تأثیر قابل توجهی در خروجی مدل داشته باشند، ولی اینگونه نیست که هر ترکیبی برای مدل‌سازی بتواند تمامی خصوصیات یک هاریکن مانند میزان بارش، مسیر هاریکن و مدت بارش خشکی را ایده‌آل در نظر گیرد. برای مثال، بهترین رویکرد توانایی مدل برای شبیه‌سازی بارش استفاده از پارامترساز همرفت BMJ (Betts-) WSM5 (Miller-Janjic) در ترکیب با طرح‌واره خرد فیزیک WRF Single Moment 5-class Microphysics (scheme) است.

طرح‌واره‌های WSM5-BMJ، WSM3-BMJ (WRF Single Moment 3-class Microphysics scheme) و خرد فیزیک Ferrier در ترکیب با طرح‌واره همرفت GD (Grell-) Devenyi (بهترین ترکیب برای شبیه‌سازی مدت بارش

1- Janko  
2- Gallus  
3- Squall line

همچنین آزادی و همکاران (۱۳۸۸) به ارزیابی عملکرد مدل WRF برای پیش‌بینی بارش بر روی ایران به مدت یک ماه ژانویه ۲۰۰۸ پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که حدود ۸۰ درصد موارد پیش‌بینی وقوع یا عدم وقوع بارش به درستی انجام شده است. همچنین آهنگ برخورد برای آستانه کمتر از ۰/۱ و بیش از ۱۰ میلی‌متر و برای هر دو پیش‌بینی‌های ۲۴ و ۴۸ ساعته نزدیک به یک می‌باشد که نشان می‌دهد مدل برای این دو آستانه به نسبت از دقت بالاتری برخوردار است. این کمیت برای محدوده بین یک‌دهم تا یک میلی‌متر مقدار ۰/۳ را به خود اختصاص داده است که نشان دهنده‌ی ضعف نسبی مدل در این محدوده می‌باشد. در مقایسه بین پیش‌بینی‌های ۲۴ و ۴۸ ساعته، نتایج حاصل از راست‌آزمایی نشان می‌دهد که برون‌داد مدل برای پیش‌بینی‌های ۲۴ ساعته به نسبت بهتر است. آزادی و همکاران (۱۳۸۹) به مقایسه پیش‌بینی بارش دو مدل منطقه‌ای MM5 و WRF بر روی ایران پرداختند. در این پژوهش خروجی‌های بارش دو مدل MM5 و WRF در مناطق مختلف ایران طی یک دوره هشت ماهه (نوامبر ۲۰۰۸ تا ژوئن ۲۰۰۹)، با هم مقایسه شده‌اند. نتایج نشان داد هر دو مدل در پدیده بارش، فرا پیش‌بینی دارند (فرا پیش‌بینی یعنی رویداد بیشتر از دیدبانی، پیش‌بینی شده است). در کل نتایج نشان می‌دهد که تمایل به پیش‌بینی‌های مثبت برای مدل WRF بیشتر از MM5 است، همچنین در پیش‌بینی ۲۴ ساعته بیشینه مقدار ارزش اقتصادی نسبی پیش‌بینی در مدل WRF اندکی (۰/۰۳۸) بیشتر از مقدار آن برای مدل MM5 است.

## ۲- مباحث نظری

### ۲-۱- مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا

مدل WRF سامانه‌ای با قابلیت‌های فراوان است که می‌توان وضعیت‌های مختلف جو را با استفاده از آن شبیه‌سازی نمود. مدل مذکور، قابل نصب بر روی سامانه‌های مختلف و رایانه‌ای شامل خوشه‌ی رایانه می‌باشد. محدوده‌ی کاربرد آن بسیار وسیع است و گستره‌ی بین چندین متر تا هزاران کیلومتر را تحت پوشش قرار می‌دهد. مدل پیشرفته‌ی WRF یک مدل غیر هیدرو استاتیک (با گزینه هیدرو استاتیک) است.

خشکی، معین شدند. همچنین بهترین تخمین برای مسیر طوفان با استفاده از انتخاب‌های خرد فیزیک Lin-et al. و Kessler با پارامتری‌ساز همرفت BMJ بود. بر خلاف مطالعات قبلی، این نتایج تعیین می‌کنند که استفاده از طرح‌واره‌های همرفت خروجی مدل را زمانیکه اندازه شبکه کمتر از ۱۰ کیلومتر باشد، بهبود می‌دهند.

در زمینه مدل WRF و ارزیابی پیش‌بینی‌های این مدل عددی، تحقیقاتی نیز در داخل کشور انجام گرفته است. به عنوان مثال آزادی و همکاران (۱۳۸۲) مطالعه‌ای روی مقایسه‌ی پارامتری‌سازی‌های فیزیکی روی بارندگی‌های زمستانی ایران انجام داده‌اند که بررسی ترکیب طرح‌واره‌های مختلف در این مقاله نشان می‌دهد، ترکیب طرح‌واره‌های Grell, Betts-Miller یا Kain-Fritsch برای همرفت با طرح‌واره Blackadar برای لایه مرزی در مقایسه با دیگر ترکیب‌ها نتایج بهتری را به همراه دارد.

همچنین قندهاری و همکاران (۱۳۸۵) به منظور پیش‌بینی بارش‌های رگباری در مناطق مستعد سیل در ایران (جنوب و جنوب‌غرب) با استفاده از مدل MM5، بر روی شش مورد بررسی‌هایی را انجام داده و در اکثر موارد نتایج نسبتاً قابل قبولی را بدست آورده‌اند. آن‌ها در این شبیه‌سازی نشان دادند که پیش‌بینی بارش‌های رگباری خصوصاً بارش‌های حاصل از سامانه‌های سرد با استفاده از این مدل به واقعیت نزدیکتر است.

آزادی و همکاران (۱۳۸۸) مدل WRF را در ایران برای یک مورد بارشی خاص از ۱۴ تا ۲۰ دی ۱۳۸۶ با شش پیکربندی مختلف اجرا نمودند. خروجی مدل برای بارندگی با مقادیر دیدبانی شده مقایسه شد. نتایج بیانگر آن بود که دو پیکربندی KFMJY(KF) نمایانگر طرح‌واره همرفت Kain-Fritsch و MYJ نمایانگر طرح‌واره لایه مرزی Mellor-Yamada-Janjic و (GD)GDYJ نمایانگر طرح‌واره همرفت Grell-Devenyi ensemble و MYJ نمایانگر طرح‌واره لایه مرزی Mellor-Yamada-Janjic نسبت به سایر پیکربندی‌های استفاده شده در این مقاله، از دقت قابل قبول‌تری برخوردار هستند.

سطحی، زمین\_سطح، لایه مرزی سیاره‌ای و تابش جوئی هستند.

### ۲-۳- راستی آزمایی

ارزیابی یا آزمودن مدل بخش اساسی فرآیند تحقیق (کاربردی) است. روش‌های راستی آزمایی پیش‌بینی از امتیازها و شاخص‌های آماری مرسوم تا روش‌هایی برای راستی آزمایی فرایابی و علمی مفصل تر گسترش می‌یابد.

برخی از امتیازهای راستی آزمایی استفاده شده در این تحقیق، که در ادامه شرح مختصری از آن‌ها بیان شده است، با استفاده از رویکرد جدول توافقی (جدول ۱) به دست آمده‌اند. توضیح کامل‌تر این کمیت‌ها در مراجع مرتبط مانند [14] و [22] وجود دارد. جدول ۱ ساختار نوعی جدول توافقی ۲×۲ را نشان می‌دهد که برای راستی آزمایی بارش استفاده می‌شود.

برای یک آستانه فرضی ( $0/1 \text{ mm day}^{-1}$ ) تعداد پیش‌بینی‌های صحیح بارش یا برخوردها، b تعداد هشدارهای نادرست، c تعداد از دست رفته‌ها و d تعداد دفعاتی است که بارش رخ نداده و پیش‌بینی هم نشده است.

شبکه‌بندی مدل شبکه آراکاوای<sup>۱</sup> -C می‌باشد. در این مدل از طرح‌واره‌های انتگرال‌گیری مرتبه دوم و سوم زمانی رانگ-کوتا<sup>۲</sup> و طرح‌واره‌های مرتبه دو تا شش برای فرارفت در دو راستای افقی و قائم استفاده می‌شود. این مدل از گام-های کوچک زمانی برای مدهای اکوستیک و امواج گرانشی استفاده می‌کند.

### ۲-۲- پارامتری سازی‌های فیزیکی در مدل WRF

مدل WRF چندین انتخاب فیزیکی که به هر طریقی می‌تواند با یکدیگر ترکیب شوند، را پیشنهاد می‌دهد. انتخاب‌ها به طور معمول از ساده و کارآمد تا پیشرفته و محاسبات پرهزینه و همچنین از طرح‌واره‌هایی که به تازگی توسعه یافته‌اند تا طرح‌واره‌هایی که به خوبی آزموده شده‌اند، متغیر هستند. توضیحات مشروح مربوط به انواع طرح‌واره‌های پارامتری‌سازی موجود در مدل WRF در مرجع بیان شده است. انواع پارامتری‌سازی‌های فیزیکی مدل به چند دسته تقسیم می‌شوند که هر کدام از آن‌ها دارای چند حالت متفاوت است. دسته‌های مذکور شامل پارامترسازی‌های فیزیکی مربوط به خردفیزیک، همرفت کومه‌ای، لایه

جدول ۱- ساختار جدول توافقی ۲×۲ مورد استفاده برای راستی آزمایی بارش

دیدبانی		پیش‌بینی
بدون بارش	بارش	
b	a	بارش
d	c	بدون بارش

### ۲-۳-۱- نسبت صحیح (PC)

این کمیت به صورت ساده برابر است با کسری از n مورد پیش‌بینی که برای آن پیش‌بینی غیر احتمالی به درستی وقوع یا عدم وقوع را پیش‌بینی کرده است.

$$PC = \frac{a+d}{n} \quad (1)$$

### ۲-۳-۲- اریبی (B)

اریبی، یا مقایسه میانگین پیش‌بینی با میانگین دیدبانی،

اگر چه جدول توافقی  $2 \times 2$  داده‌های راستی آزمایی را برای ساده‌ترین نوع پیش‌بینی خلاصه می‌کند، ولی اطلاعات عملکرد پیش‌بینی در جدول توافقی با کمتر از سه پارامتر نمی‌تواند به طور کامل بیان شود. کمیت‌های نرده‌ای متعددی ابداع شده‌اند که برای سنجش عملکرد پیش‌بینی با استفاده از این جدول استفاده می‌شوند و بسته به کاربرد اسامی مختلفی دارند. این بخش مهم‌ترین کمیت‌های عددی وابسته به جدول توافقی ۲×۲ را معرفی می‌نماید.

1- Arakawa C  
2- RungeKutta

### ۲-۳-۵- فاصله اطمینان<sup>۱</sup>

محاسبه‌ی قابل اعتماد کمیت‌های راستی‌آزمایی و امتیازهای مهارتی، یکی از مبانی اصلی موفقیت در روزرسانی و صحت‌سنجی مدل می‌باشد. هر چه کمیت‌های راستی‌آزمایی و امتیازهای مهارتی از مبانی علمی و سطح معنی‌داری بالاتری برخوردار باشند، اعتماد به آن‌ها بیشتر شده و مدل مربوطه با اعتماد بیشتری صحت‌سنجی می‌گردد. تعیین سطح معنی‌داری کمیت‌های راستی‌آزمایی و امتیازهای مهارتی، روش‌های آماری خاص خود را طلب می‌نماید که در سال‌های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است.

یک فاصله‌ی اطمینان برای میانگین جامعه با فرمول زیر بدست می‌آید:

$$\theta \pm Z_{\alpha/2} \cdot V(\theta) \quad (5)$$

در فرمول فوق:

$$V(\theta) = V(\bar{X}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / (n - 1)} \quad (7)$$

می‌باشد که در سطح معنی‌داری ۹۵ درصدی  $Z=1.96$  می‌باشد.

برای محاسبه‌ی  $V(\theta)$  (خطای استاندارد) برای کمیت‌های راستی‌آزمایی و امتیازهای مهارتی از جدول نرم‌افزار MET(V5.0)<sup>۲</sup> استفاده شده است.

### خطای استاندارد امتیاز مهارتی پیرس

$$V(PSS) = \sqrt{\frac{H(1-H)}{n_H} + \frac{F(1-F)}{n_F}} \quad (8)$$

که پارامترهای  $H$ ،  $n_H$ ،  $F$ ،  $n_F$  به ترتیب عبارتند از:

$$H = \frac{a}{a+c} \quad (9)$$

$$F = \frac{b}{b+d} \quad (10)$$

$$n_h = (a + c) \quad (11)$$

$$n_f = (b + d) \quad (12)$$

و برای پارامتر PC، خطای استاندارد از رابطه‌ی:

$$V(p) = \sqrt{p(1-p)/n} \quad (13)$$

محاسبه می‌گردد.

معمولاً به‌عنوان نسبتی برای راستی‌آزمایی جداول توافقی بیان می‌شود. با استفاده از جدول ۱ نسبت اریبی برابر است با:

$$B = \frac{a+b}{a+c} \quad (2)$$

برای پیش‌بینی‌های غیر اریب  $B = 1$  است، یعنی تعداد پیش‌بینی پدیده برابر با تعداد دفعاتی است که پدیده رخ داده است. اریب بزرگ‌تر از یک دلالت بر این دارد که رویداد بیشتر از دیدبانی، پیش‌بینی شده است، و فرآیند پیش‌بینی گفته می‌شود. بالعکس، اریب کمتر از یک دلالت بر این دارد که پیش‌بینی پدیده کمتر از دیدبانی است، یا فرو پیش‌بینی است.

### ۲-۳-۳- کمیت آهنگ برخورد (H)

آهنگ برخورد طبق تعریف عبارت است از:

$$H = \frac{a}{a+c} \quad (3)$$

تنها با در نظر گرفتن وقوع رویداد، آهنگ برخورد نسبت پیش‌بینی‌های درست است به تعداد دفعاتی که این پدیده رخ داده است.

مهارت پیش‌بینی معمولاً به عنوان امتیاز مهارتی معرفی می‌شود که به صورت درصد بهبود نسبت به پیش‌بینی مرجع تفسیر می‌شود. انتخاب‌های رایج برای پیش‌بینی‌های مرجع مقادیر متوسط اقلیمی پیش‌بینی شونده، پیش‌بینی‌های پایدار (مقادیر پیش‌بینی شونده در دوره زمانی قبل) یا پیش‌بینی‌های تصادفی (نسبت به فراوانی نسبی اقلیمی پیش‌بینی پدیده‌ها) هستند. امتیاز مهارتی مورد استفاده در این تحقیق، امتیاز مهارتی پیرس می‌باشد.

### ۲-۳-۴- امتیازهای مهارتی پیرس (PSS)

امتیاز مهارتی پیرس به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$PSS = \frac{(ad-bc)}{(a+c)(b+d)} \quad (4)$$

امتیاز مهارتی PSS این مزیت را دارد که مقدار آن برای عدم پیش‌بینی پدیده (پیش‌بینی پدیده) ولی درست با افزایش رخداد اقلیمی پدیده (کمتر شدن رخداد اقلیمی پدیده) افزایش می‌یابد.

1- Confidence interval

2- Model Evaluation Tools Version 5.0

### ۳- منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

#### ۳-۱- معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان مساحتی حدود ۴۳۷۱۵۰ کیلومتر مربع دارد. جریان‌های سطحی بخش قابل توجهی از این حوضه یا مستقیم به درون کشور عراق جریان می‌یابند یا پس از پیوستن با رودخانه دجله و فرات، به خلیج فارس می‌ریزند. بزرگ‌ترین و مهم‌ترین رودخانه‌های این قسمت از حوضه آبریز خلیج فارس شامل رودخانه‌های سیروان، مارون، کارون، دز و جراحی هستند که از ارتفاعات زاگرس در جنوب غربی ایران سرچشمه گرفته و به خلیج فارس منتهی می‌شوند و رودخانه کرخه نیز از مناطق جنوب غرب آغاز و به تالاب هورالعظیم می‌ریزد.

باران‌های اواخر فصل زمستان و اوایل بهار، فرآیند ذوب برف‌ها را تسریع می‌کند و سیلاب‌های بزرگی را به‌ویژه در دشت خوزستان جاری می‌کند. به همین دلیل و به دلیل اهمیت هیدرولوژی باران در تامین آب سدهای موجود منطقه، بزرگ‌ترین سدهای مخزنی ایران در همین حوضه‌ها احداث شده یا در حال ساخته شدن و مطالعه هستند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به حوزه کرخه در محل سد کرخه با مساحت ۴۲۷۲۰ کیلومترمربع، حوزه دز در محل سد دز با مساحت ۱۷۳۵۱ کیلومترمربع، حوزه کارون در محل سد گتوند با مساحت ۳۲۷۵۷ کیلومترمربع، و دو زیر حوزه مارون در دو محل سد شهدای بهبهان با مساحت ۳۷۹۹ کیلومترمربع و جره با مساحت ۳۰۰۳ کیلومترمربع بسته شده است.

حدود جغرافیایی این محدوده شامل طول جغرافیایی ۵° ۴۶° تا ۳° ۵۱° شرقی و عرض جغرافیایی ۱۵° ۳۰° تا ۵۵° ۳۴° شمالی می‌باشد. در این محدوده می‌توان به سدهای کرخه، دز، کارون ۱، کارون ۳ و مارون اشاره کرد. بنابراین هم از نظر مدیریت منابع آب، هم از نظر مدیریت انرژی الکتریکی سدها و نیز از نظر مدیریت ریسک بلایای جوی، مدیریت سیلاب از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می‌شود.

#### ۳-۲- داده‌ها

بدیهی است که چون فرآیند راستی‌آزمایی براساس مقایسه داده‌های پیش‌بینی و دیدبانی انجام می‌شود برای این کار به هر دو دسته از داده‌ها برای بارش نیاز است. در ادامه نحوه جمع آوری و مقایسه این داده‌ها توضیح داده شده است.

#### ۳-۲-۱- داده‌های دیدبانی

داده‌های دیدبانی و کنترل کیفی شده در ایستگاه‌های همدیدی در جنوب غرب ایران برای دوره مورد نظر (اول دسامبر ۲۰۱۱ تا ۲۹ فوریه ۲۰۱۲) از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد. شکل ۲ پراکندگی ایستگاه‌های در دسترس را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. در اکثر ایستگاه‌ها، دیدبانی‌های بارندگی به صورت تجمعی شش ساعته بودند.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه.

در ارتفاعات این ناحیه که جزو مناطق پر باران کشور فصل پاییز به‌شمار می‌آیند، بخش قابل توجهی از ریزش‌ها در زمستان به‌صورت برف است که رسوب شدن آن از اواخر فصل زمستان آغاز می‌شود و تا اواخر بهار ادامه دارد. در حقیقت ذوب برف و جریان پایه، بخش چشمگیری از منابع آب این حوضه‌ها را تأمین می‌کند و گاهی نیز بارش

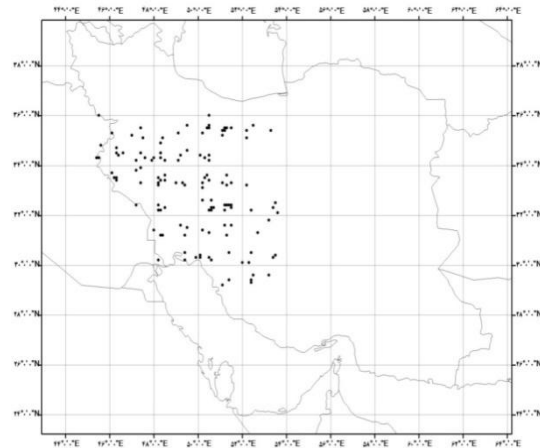
ساعت ۱۲، گزارش دیدبانی نداده باشد و دیدبانی بارندگی تجمعی ۲۴ ساعته در آن تاریخ برای آن ایستگاه از دست می‌رفت. لذا ایستگاه‌هایی که تعداد داده‌های آن‌ها در دوره راستی آزمایشی کمتر از ۶۰ روز بود حذف شدند. در نهایت حدود ۱۲۸ ایستگاه باقی ماند که البته این تعداد بسته به مدل NWP و نیز برد پیش‌بینی متفاوت بود.

### ۳-۳-۲- داده‌های پیش‌بینی

مدل WRF که در سال‌های اخیر معرفی شده و برای مقاصد پژوهشی و عملیاتی طراحی شده است، یک مدل عملیاتی رسمی در مراکز هواشناسی است و یکی از مدل‌های میان‌مقیاسی است که مورد توجه پژوهشگران و کارشناسان هواشناسی در ایران قرار گرفته است. این مدل برای دوره سه ماهه مورد نظر (اول دسامبر ۲۰۱۱ تا ۲۹ فوریه ۲۰۱۲) اجرا شد. در این تحقیق از تفکیک افقی ۱۵ کیلومتر استفاده شده است. تفکیک افقی داده‌های ناهمواری و کاربری زمین برابر دو دقیقه (حدود چهار کیلومتر) است.

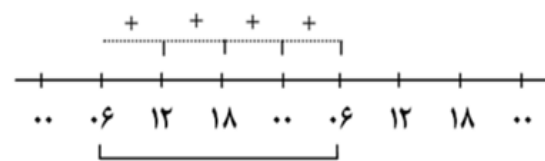
طرح‌واره‌های فراسنج‌سازی فیزیکی که برای WRF استفاده شده‌اند عبارتند از طرح‌اره لین<sup>۱</sup> و همکاران (خرد فیزیک)، موج کوتاه گدارد<sup>۲</sup> (تابش موج کوتاه)، طرح‌واره مونین<sup>۳</sup> ابوکوف<sup>۴</sup> (جانجیک اتا<sup>۵</sup>) (لایه سطحی)، مدل سطحی - نوآلند<sup>۶</sup> (سطح خشکی<sup>۷</sup>)، طرح‌واره انرژی جنبشی تلاطمی<sup>۸</sup> (TKE) ملور<sup>۹</sup>- یامادا<sup>۱۰</sup> - جانجیک (اتا) (لایه مرزی سیاره‌ای)، و طرح‌واره کین<sup>۱۱</sup> فریچ (اتا جدید) (فراسنج‌سازی همرفت کومه‌ای).

اجرای مدل به صورت روزانه و برای ساعت ۰۶ UTC بوده و در هر اجرا پیش‌بینی ۲۴ ساعت آینده برای دوره راستی آزمایشی گفته شده تولید شده است.



شکل ۲- پراکندگی ایستگاه‌های دیدبانی همدیدی روی جنوب غرب ایران. نقاط روی شکل محل ایستگاه‌ها را نشان می‌دهند.

آن چه که در این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد بارندگی تجمعی ۲۴ ساعته است. بارندگی تجمعی نیز از ساعت ۰۶ UTC تا ۰۶ UTC روز بعد گزارش می‌گردد. در مورد دیدبانی‌های تجمعی شش ساعته که در ساعت‌های ۰۰، ۰۶، ۱۲ و ۱۸ UTC انجام شده بودند دیدبانی بارندگی در ساعت‌های ۰۰، ۰۶ یک روز با دیدبانی بارندگی در ساعت ۱۲ و ۱۸ UTC روز قبل جمع شدند (شکل ۳). بدین ترتیب دیدبانی بارندگی تجمعی ۲۴ ساعته از ساعت ۰۶ UTC تا ۰۶ UTC روز بعد به دست آمد.



شکل ۳- نحوه‌ی به دست آوردن بارندگی تجمعی ۲۴ ساعته با استفاده از دیدبانی‌های شش ساعته.

داده‌های دیدبانی بارندگی برای ایستگاه‌های همدیدی در جنوب غرب ایران که حدود ۱۳۵ ایستگاه بود استخراج شد که تعداد روزهای دیدبانی در همه آن‌ها یکسان نبود و برخی از ایستگاه‌ها در برخی از تاریخ‌ها دیدبانی منظمی گزارش نکرده بودند. برای مثال ممکن بود یک ایستگاه که به صورت شش ساعته گزارش دیدبانی داده بود، در یک مورد، به فرض

- 1- Lin
- 2- Goddard
- 3- Monin
- 4- Obukhov
- 5- JanjicEta
- 6- Noahland
- 7- land surface
- 8- Turbulent Kinetic Energy
- 9- Muller
- 10- Yamada
- 11- Kain - Fritsch



جدول ۲- چهار آستانه‌ی بارشی بکار رفته.

نوع بارش	محدوده‌ی بارش
سبک	۰/۱-۵
متوسط	۵-۱۰
شدید	۱۰-۱۵
سنگین	۱۵ <

بالاترین مقدار (H) دارای بهترین حالت در بین نُه پیکربندی از این نظر می‌باشد.

مقدار عددی امتیاز مهارتی پیرس (PSS) بین ۰/۰۷۴ برای پیکربندی سه و ۰/۱۷۶ برای پیکربندی دو متغیر بوده است.

#### ۴-۱-۲- راستی آزمایی پیش‌بینی وقوع یا عدم وقوع بارش برای آستانه ۱۰-۵ میلی‌متر

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که کمیت نسبت صحیح (PC) برای کلیه پیکربندی‌ها بین ۹۴/۴ تا ۹۵/۵ درصد موارد پیش‌بینی وقوع یا عدم وقوع بارش بدرستی انجام شده است.

کمیت اریبی (B) محاسبه شده در نُه پیکربندی گویای آن است که در تمامی پیکربندی‌ها، مدل دارای فرا پیش‌بینی بوده با این حال با توجه به عدد یک برای پیکربندی سوم که کمترین مقدار در بین اعداد اریبی می‌باشد و از آنجا که مقدار B برای پیش‌بینی کامل یک است می‌توان این پیکربندی را از نظر مقدار اریبی مناسب دانست.

مقدار کمیت آهنگ‌برخورد (H) برای نُه پیکربندی از ۴/۵ تا ۱۰/۹ متغیر می‌باشد.

مقدار عددی امتیاز مهارتی پیرس (PSS) برای نُه پیکربندی بین ۰/۰۲۲ برای پیکربندی سه و ۰/۰۸۰ برای پیکربندی دو متغیر بوده است.

#### ۴-۱-۳- راستی آزمایی پیش‌بینی وقوع یا عدم وقوع بارش برای آستانه ۱۰-۱۵ میلی‌متر

کمیت نسبت صحیح (PC) برای کلیه پیکربندی‌ها بین ۹۷/۳ برای پیکربندی‌های چهار، پنج و هشت تا ۹۸ برای پیکربندی سه متغیر بوده است.

کمیت اریبی (B) محاسبه شده نشان می‌دهد که در تمامی پیکربندی‌ها به جز پیکربندی سه که دارای فروپیش‌بینی است، در سایر موارد فراپیش‌بینی داشته‌ایم. از آنجا که پیکربندی سه با عدد ۰/۹ نزدیک‌ترین عدد به یک است (نزدیک به پیش‌بینی کامل) می‌توان این پیکربندی را از نظر مقدار اریبی مناسب دانست.

میزان کمیت آهنگ‌برخورد (H) برای نه پیکربندی از ۱/۷ تا ۵/۸ متغیر است.

#### ۴- بحث و نتایج

برای بررسی بارش در جنوب غرب ایران، بارش‌ها به ۴ آستانه بارشی تقسیم شد

#### ۴-۱- راستی آزمایی پیش‌بینی وقوع یا عدم وقوع بارش برای آستانه‌های مختلف

با توجه به داده‌های جداول توافقی و روابطی که پیش از این تعریف شد، در هر یک از آستانه‌های بارشی تعریف شده، کمیت‌های راستی آزمایی محاسبه و نمودارهای مربوطه ترسیم می‌شوند.

#### ۴-۱-۱- راستی آزمایی پیش‌بینی وقوع یا عدم وقوع بارش برای آستانه ۵-۰/۱ میلی‌متر

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که کمیت نسبت صحیح (PC) برای کلیه پیکربندی‌ها بین ۷۶/۴ تا ۷۸/۸ درصد موارد پیش‌بینی وقوع یا عدم وقوع بارش بدرستی انجام شده است و با توجه به اینکه مقدار این کمیت برای پیش‌بینی کامل، برابر واحد و برای پیش‌بینی کاملاً نادرست، صفر می‌باشد، پیکربندی سه نسبت به سایر پیکربندی‌ها دقت قابل قبول‌تری دارد.

کمیت اریبی (B) محاسبه شده در نُه پیکربندی گویای آن است که در تمامی پیکربندی‌ها، مدل دارای فراپیش‌بینی بارش بوده است. با این حال با توجه به عدد ۱/۲ برای پیکربندی سوم که کمترین مقدار در بین اعداد اریبی می‌باشد و از آنجا که مقدار B برای پیش‌بینی کامل یک است، می‌توان این پیکربندی را از نظر مقدار اریبی مناسب دانست.

مقدار کمیت آهنگ‌برخورد (H) برای نُه پیکربندی از ۲۰/۹ تا ۳۳/۶ متغیر است. از این رو پیکربندی دو با توجه به



مقدار عددی امتیاز مهارتی پیرس (PSS) برای نُه پیکربندی بین ۰/۰۱۸ برای پیکربندی دو و ۰/۰۷۴ برای پیکربندی هشت متغیر بوده است.

#### ۴-۲- نتایج

با توجه به کمیت نسبت صحیح (PC) برای بارش‌های زیر ۱۵ میلی‌متر پیکربندی سه، متوسط ۹۱ درصد پیش‌بینی وقوع یا عدم وقوع بارش را بدرستی انجام داده است و برای بارش‌های بیش از ۱۵ میلی‌متر (سنگین) پیکربندی دو با ۹۷ درصد صحت پیش‌بینی وقوع یا عدم وقوع بارش را به درستی انجام داد.

مقایسه کمیت اریبی (B) برای نُه پیکربندی در چهار آستانه بارشی گویای آن است که در بارش‌های خفیف و متوسط، مدل فراییش‌بینی، برای بارش‌های شدید غیر از پیکربندی سه و برای بارش‌های سنگین غیر از پیکربندی دو و سه، مدل دارای فراییش‌بینی است. همچنین این کمیت برای بارش‌های خفیف تا شدید پیکربندی سه و برای بارش‌های سنگین پیکربندی چهار را مناسب ارزیابی کرده است.

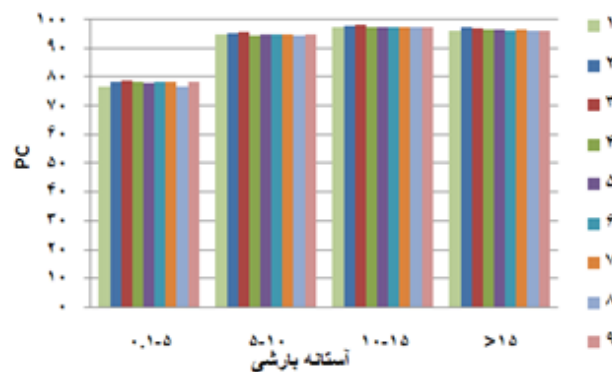
مقدار عددی امتیاز مهارتی پیرس (PSS) بین ۰/۰۰۱ برای پیکربندی هفت و ۰/۰۴۱ برای پیکربندی چهار متغیر بوده است.

#### ۴-۱-۴- راستی‌آزمایی پیش‌بینی وقوع یا عدم وقوع بارش برای آستانه بیشتر از ۱۵ میلی‌متر

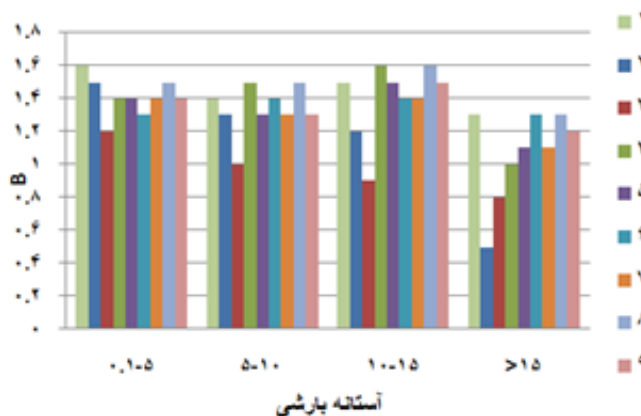
کمیت نسبت صحیح (PC) برای کلیه پیکربندی‌ها ۹۵/۹ تا ۹۷/۱ درصد موارد پیش‌بینی وقوع یا عدم وقوع بارش به درستی انجام شده است.

مقایسه کمیت اریبی (B) برای نُه پیکربندی گویای آن است که در تمامی پیکربندی‌ها به جز پیکربندی‌های دو و سه که دارای فراییش‌بینی هستند و پیکربندی چهار که مقدار یک را می‌دهد، مدل دارای فراییش‌بینی است. از آنجا که مقدار B برای پیش‌بینی کامل یک است، می‌توان پیکربندی چهار را از نظر مقدار اریبی مناسب دانست.

مقدار آهنگ‌برخورد (H) برای نُه پیکربندی از ۲/۷ تا ۹/۸ متغیر است.



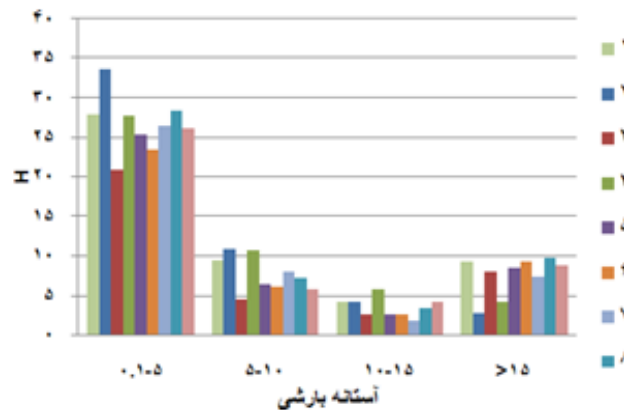
شکل ۴- کمیت راستی‌آزمایی نسبت صحیح (PC) بین نُه پیکربندی برای ۴ آستانه بارشی



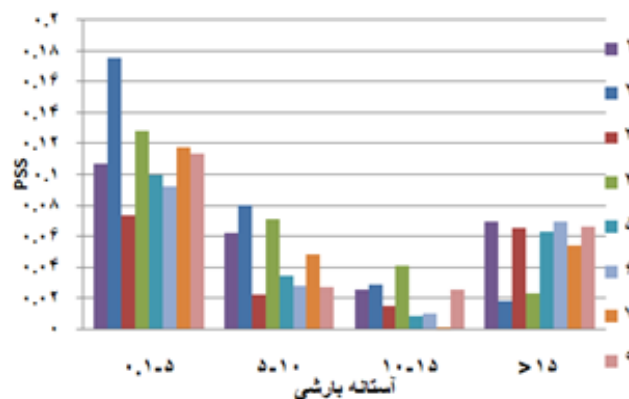
شکل ۵- کمیت راستی‌آزمایی اریبی (B) بین نُه پیکربندی برای ۴ آستانه بارشی

امتیاز مهارتی پیرس (PSS) پیکربندی دو را برای بارش‌های زیر ۱۰ میلی‌متر، پیکربندی چهار را برای بارش‌های شدید و پیکربندی ۸ را برای بارش‌های سنگین مناسب ارزیابی کرد.

کمیت آهنگ برخورد (H) نیز پیکربندی دو را برای بارش‌های خفیف تا متوسط، پیکربندی چهار را برای بارش‌های شدید و پیکربندی هشت را برای بارش‌های سنگین مناسب تشخیص داده است.



شکل ۶- کمیت راستی آزمایی آهنگ برخورد (H) بین نه پیکربندی برای ۴ آستانه بارشی



شکل ۷- امتیاز مهارتی پیرس (PSS) بین نه پیکربندی برای ۴ آستانه بارشی

روی پیش‌بینی بارش یک منطقه دارد و مشاهده می‌شود که استفاده از گزینه‌های متفاوت برای همرفت بیشترین تأثیر را در پیش‌بینی بارش دارد. با محاسبه بازه اعتماد برای سنجه‌های راستی آزمایی مورد بررسی در این تحقیق، نتایج در سطح ۹۵٪ معنی دار است. نتایج نشان می‌دهد که مدل مورد بررسی با همی ترکیب‌های طرح‌واره‌های بکار رفته دارای پیش‌بینی اضافی است، هر چند مقدار پیش‌بینی اضافی برای آستانه‌های مختلف متفاوت است.

با بقیه پیکربندی‌ها نتایج نسبتاً بهتری را ارائه می‌دهند. می‌توان گفت که استفاده از پیکربندی دو (لایه مرزی سیاره‌ای (MYJTKE)، لایه سطحی (MOJ)، زمین سطح (Ufiednoah)، همرفت کومه‌ای (KF)، خرد فیزیک (Kessler) و تابش جوی (Didhia/rmtm)) یا سه (لایه مرزی سیاره‌ای (MYJTKE)، لایه سطحی (MOJ)، زمین سطح (Ufiednoah)، همرفت کومه‌ای (GD Ensemble)، خرد فیزیک (Kessler) و تابش جوی (Didhia/rmtm)) در مقایسه استفاده از گزینه‌های فیزیکی مختلف تأثیر قابل توجهی بر

۵- قندهاری، ش.، ا. ح.، مشکواتی و م.، مزرعه فراهانی، ۱۳۸۵، بررسی عملکرد موردی مدل میان مقیاس MM5 در شبیه‌سازی بارش‌های رگباری، همایش پیش‌بینی عددی وضع هوا پژوهشکده هواشناسی- مرکز ملی اقلیم شناسی.

۶- هاشمی‌پرست، م.، ۱۳۷۸، آمار و احتمال در مهندسی، انتشارات سیمای دانش.

7- Ackoff, R. L., 1962, Scientific Method: Optimizing Applied Research Decisions. New York, John Wiley and Sons, 464pp.

8- Argueso, D., Hidalgo-Munoz, J. M., Gamiz-Fortis, S. R. and Esteban-Parra, M. J., 2011, Evaluation of WRF Parameterizations for Climate Studies over Southern Spain Using a Multistep Regionalization, Amer. Meteor. Soc., vol 24, 5633-5650.

9- Evans, J. P. and Marie, E., FeiJi, 2011, Evaluating the performance of a WRF physics ensemble over South-East Australia.

10- Fall, S., and Niyogi, D., and Mohanty, U. and Kumar, A., 2007, Application of weather prediction models for hazard mitigation planning: a case study of heavy off-season rains in Senegal, Vol.41.00 Issue. 1, 227-243.

11- Gilbert, G. K., 1884, Finley's Tornado prediction. Amer. Meteor. J., 1, 166-172.

12- Gallus, W. A. and Pfeifer, M., 2008, Inter comparison of simulations using 5 WRF microphysical schemes with dual-Polarization data for a German squall line, Adv. Geosci., vol 16, 109 - 116.

13- Jankov, I., Jr. Gallus, W. A., Segal, M., Shaw, B. and Koch, S. E., 2005, The Impact of Different WRF Model Physical Parameterizations and Their Interactions on Warm Season MCS Rainfall. Amer. Meteor. Soc., 20, 1048-1060.

14- Jolliffe, I. T. and Stephenson, D. B., 2003, Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science, John Wiley and Sons, 240pp.

15- Kamol, P., S., 2006, Microphysics Schemes Simulation of Heavy Rainfalls in low Pressure Trough passed the North of Thailand. 4353 Numerical Weather Prediction (NWP), Thai Meteorological Department, Sukhumvit Rd., Bangna, Bangkok, Thailand, 10260.

16- McBride, J. L. and Ebert, E. E., 2000, Verification of Quantitative Precipitation Forecasts from Operational Numerical Weather Prediction Models over Australia. Wea. Forecasting, 15, 103-121.

17- Model Evaluation Tools Version 5.0 (METv5.0) User's Guide 5.0

به طور کلی مقایسه نتایج ارائه شده در کار حاضر با کارهای مشابه در دیگر نقاط (اسکوئیان، ۱۳۹۴، اونس و همکاران، ۲۰۱۱) نشان می‌دهد که برون‌داد مدل در منطقه‌ی مورد نظر از دقت به نسبت خوبی برخوردار است. به گونه‌ای که برای پیش‌بینی‌های عملیاتی و کاربردهای مختلف مانند هیدرولوژی و مدیریت منابع آب مطلوب است. شایان گفتن است که علت اصلی دقت به نسبت بالای مدل، آن است که بخش عمده‌ای از بارش در منطقه جنوب غرب ایران و در دوره‌ی مورد مطالعه توسط سامانه‌های جوی هم‌دید مقیاس ایجاد می‌شود و سهم اثرات محلی و کوچک مقیاس به نسبت کمتر است. در صورتی که بخش عمده‌ای از بارش توسط سامانه‌های همرفتی در مقیاس کوچک ایجاد شود، در این صورت توجه بیشتر برای تنظیم دقیق‌تر طرح‌واره‌های فیزیکی بخصوص همرفت ضروری است.

## مراجع

۱- آزادی، م.، پ.، رضازاده، ا.، میرزایی و غ.، وکیلی، ۱۳۸۲، پیش‌بینی عددی سیستم‌های زمستانی روی ایران: مطالعه مقایسه‌ای پارامتری‌سازی‌های فیزیکی، هشتمین کنفرانس دینامیک شارها.

۲- آزادی، م.، س.، جعفری، ز.، کلاته سیفری، ۱۳۸۸، ارزیابی عملکرد مدل WRF در ایران برای پیش‌بینی بارش با استفاده از طرح‌واره‌های فیزیکی مختلف: مطالعه موردی، دوازدهمین کنفرانس دینامیک شارها، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران.

۳- آزادی، م.، قاضی میرسعید، م.، جعفری، س.، (۱۳۸۸)، ارزیابی عملکرد مدل WRF برای پیش‌بینی بارش بر روی ایران به مدت یک‌ماه، دوازدهمین کنفرانس دینامیک شارها، تهران-انجمن فیزیک ایران: دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.

۴- آزادی، م.، غ.، وکیلی، ۱۳۸۹، مقدمه‌ای بر پیش‌بینی عددی. در دست چاپ.

- 21- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M., Huang, X.-Y., Wang, W. and Powers, J. G, 2008, A Description of the Advanced Research WRF Version 3 , NCAR Technical Note.
- 22- Wilks, D. S, 2013, Statistical Methods in the Atmospheric Sciences.
- 23- Yang, B., Qian, Y., Lin, G., Leung, R. and Zhang, Y, 2012, Some issues in uncertainty quantification and parameter tuning: a case study of convective parameterization scheme in the WRF regional climate model, Atmos. Chem. Phys., 12, 2409–2427.
- 18- Nasrollahi, N. and AghaKouchak, A, 2012, Assessing the Impacts of Different WRF Precipitation Physics in Hurricane Simulations. Center for Hydrometeorology and Remote Sensing, University of California, Irvine, Irvine, California
- 19- Oskouian, M., Heron, M. L., Mobasheri, M. R, 2008, Quantitative Precipitation Forecast in the Caspian Sea/Alburz Mountain Region: MM5 Verification, Asian Network for Scientific, Information., 14, 2523-2533.
- 20- Peirce, C. S, 1884, The numerical measure of the success of predictions. Science, 4, 453–454.