

## پس‌پردازش خروجی مدل WRF به‌روش کوکریجینگ، برای کمیت‌های متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی بر روی ایران

مجتبی شکوهی<sup>۱\*</sup>، ابراهیم اسعدی اسکویی<sup>۱</sup> و محمدرضا محمدپور پنجاه<sup>۱</sup>

۱. استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

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

### چکیده

پیش‌بینی‌های متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی در هر مکانی با دقت مناسب، در هواشناسی مهم است. خروجی مدل WRF با خطا همراه است، از این رو نیاز به ارتقاء کیفیت پیش‌بینی‌های است. هدف این مطالعه تصحیح خطای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته متوسط روزانه سرعت باد ده‌متری و رطوبت نسبی در نقاط شبکه بر روی ایران است. خطای مدل طی دوره آموزش ۵ و ۱۴ روزه، برای نقاطی از شبکه که دارای داده‌های مشاهده‌ای هستند محاسبه شد. این خطاها در نواحی هم‌اقلیم، با استفاده از روش درون‌یابی کوکریجینگ، در سایر نقاط شبکه برآورد شد. بدین ترتیب پیش‌بینی خام مدل برای نقاط فاقد داده‌های مشاهده‌ای حفظ و تنها مقادیر برآورده شده خطا بر روی آنها اعمال می‌شود. دوره آماری ۱۵ ماه، از ۲۰۱۹/۱۱/۱ الی ۲۰۲۱/۲/۱ برای ۵۶۰ ایستگاه مشاهده‌ای کشور در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد خطای برونداد خام مدل در ماه‌ها، مکان‌ها و نواحی اقلیمی مختلف، توزیع یکنواختی ندارد. به‌طور متوسط نمره مهارت مدل، برای پیش‌بینی رطوبت نسبی بیشتر از سرعت باد است. به‌طور کلی RMSE پیش‌بینی‌های سرعت باد و رطوبت نسبی برای کل کشور بعد از تصحیح، به ترتیب ۱۳ و ۱۸ درصد کاهش و نمره مهارت حداکثر تا ۱۶۰ و ۳۰۸ درصد افزایش می‌یابد. مدل، سرعت باد را در اکثر مناطق کشور کمتر از مقدار مشاهده شده و رطوبت نسبی را بیشتر برآورد می‌کند. روش تصحیح خطای ۱۴ روزه نسبت به روش ۵ روزه چندان سبب بهبود نمره مهارت مدل نشد و می‌توان با روش ۵ روزه با هزینه محاسباتی کمتر به دقتی مشابه رسید.

واژه‌های کلیدی: خطای سامانمند، درون‌یابی، کوکریجینگ، نمره مهارت، نواحی اقلیمی.

### ۱. مقدمه

(سیستماتیک) و ۲- خطای تصادفی (محمدی و همکاران، ۲۰۱۷). خطای تصادفی بیشتر مربوط به ذات بی‌نظم (Chaotic) جریان‌های جوی می‌باشد (مک کالر و استول، ۲۰۰۸). خطاهای سیستماتیک عمدتاً در اثر تفاوت بین کوهساری مدل و عوارض واقعی، کاربری زمین و همچنین نقص در طراحی مدل فرایندهای فیزیکی به وجود می‌آیند (مرادی و مرتضی‌پور، ۱۳۹۷). خطاهای سامانمند قابل تصحیح می‌باشند (والاپیل و همکاران، ۲۰۲۰). از جمله روش‌های تصحیح خطای سامانمند می‌توان به بهبود پارامترسازی‌های فیزیکی مدل و بهبود شرایط اولیه و روش‌های اجرای همادی مدل‌ها و پس‌پردازش آماری برونداد مدل عددی اشاره کرد (جنونگ و لی، ۲۰۱۸).

پیش‌بینی‌های دقیق آب‌وهوایی در مسائل مرتبط با هواشناسی حائز اهمیت است (جنونگ و لی، ۲۰۱۸). با توجه به نقش باد و رطوبت در تشکیل فرایندهای میعانی مانند مه و شاخص‌های کیفیت هوا، پیش‌بینی دقیق آنها اهمیت ویژه‌ای دارد (کاراگولیان و همکاران، ۲۰۱۹). استفاده از پیش‌بینی هرچه دقیق‌تر مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا مانند WRF (Weather Research and Forecasting) می‌تواند به پژوهشگران مسائل مرتبط با هواشناسی، که نیاز به داده‌های پیش‌بینی مدل با دقت مناسب دارند، راه‌گشا باشد. اما خروجی تمام مدل‌های عددی پیش‌بینی جوی شامل خطاهایی است که بر کیفیت و دقت پیش‌بینی‌ها تأثیر می‌گذارد. خطای مدل را به دو دسته می‌توان تقسیم کرد: ۱- خطای سامانمند

برای پیش‌بینی دما در حوزه آبریز زاینده‌رود بررسی کردند، نتایج آنها نشان داد از لحاظ آماری داده‌های مدل ارتباط قابل‌قبولی با داده‌های مشاهده‌شده دارند. آزادی و همکاران (۱۳۸۷) دماهای بیشینه و کمینه دومتری از سطح زمین را برای ۱۱۷ ایستگاه همدیدی کشور با روش فیلترکالمن و برای برون‌داد مدل MM5 پس‌پردازش کردند.

در کل دو دسته روش برای تصحیح برون‌داد مدل در همه نقاط شبکه وجود دارد: ۱- محاسبه خطا در نقاط ایستگاهی و سپس تعمیم خطا بر روی نقاط شبکه (تهیه ماتریس خطا برای کل نقاط شبکه) ۲- تصحیح برون‌داد مدل در نقاط ایستگاهی و سپس درون‌یابی این مقادیر تصحیح‌شده در دیگر نقاط شبکه. در روش دوم، خطا فقط در نقاطی از شبکه که دارای داده‌های مشاهده‌ای هستند محاسبه شده و سپس پیش‌بینی مدل برای این نقاط تصحیح شده و در ادامه این پیش‌بینی تصحیح شده است که به سایر نقاط شبکه اختصاص داده می‌شود. بدین ترتیب پیش‌بینی خام مدل برای نقاطی از شبکه که فاقد داده‌های مشاهده‌ای هستند کنار گذاشته می‌شوند و مقدار پیش‌بینی تصحیح شده در نقاط دارای داده‌های مشاهده‌ای به سایر نقاط تعمیم و این می‌تواند یکی از معایب روش دوم باشد. در این پژوهش سعی بر این است که ابتدا خطای مدل در نقاطی از شبکه که دارای داده‌های مشاهده‌ای هستند محاسبه شده و سپس با استفاده از روش درون‌یابی کوکریجینگ، این خطا در سایر نقاط شبکه (که فاقد داده‌های مشاهده‌ای هستند) برآورد شود، بدین‌صورت خطا در تمام نقاط شبکه برآورد و سپس این لایه خطا بر پیش‌بینی‌های خام مدل اعمال می‌شود. بدین ترتیب پیش‌بینی خام مدل برای نقاطی از شبکه که فاقد داده‌های مشاهده‌ای هستند، حفظ شده و تنها مقادیر خطا بر روی آنها اعمال می‌شود. همچنین از این روش نیز می‌توان برای تهیه نقشه‌های رستری (گرید) پارامترهای جوی روزانه با استفاده از تصحیح خطای برون‌داد مدل نیز استفاده کرد.

از روش‌های آماری می‌توان برای رفع خطای سامانمند مدل استفاده کرد (هکر و ریف، ۲۰۰۷). روش‌های پس‌پردازش آماری برون‌داد مدل بر اساس محاسبه روابط برون‌داد مدل با مشاهدات در بازه زمانی گذشته و تعمیم آنها به پیش‌بینی‌های آینده عمل می‌کنند (ترمونیا و دکمین، ۲۰۰۷). هکر و ریف (۲۰۰۷) با استفاده از تخمین خطا بر روی نقاط شبکه به تصحیح پیش‌بینی‌های آینده پرداختند. ابتدا خطا در نقاط ایستگاهی با استفاده از میانگین متحرک محاسبه و سپس خطای ایستگاهی با استفاده از مدل‌های کوواریانسی به نقاط شبکه تخصیص داده شد. مس و همکاران (۲۰۰۸) ابتدا برون‌داد مدل عددی میان‌مقیاس MM5 را با استفاده از روش MOS پس‌پردازش کرده و سپس خروجی پس‌پردازش شده را با استفاده از درون‌یابی به روش ارتقاء داده شده کرسمن به نقاط شبکه تعمیم دادند. محمدی و همکاران (۲۰۱۷) نیز ابتدا خروجی مدل WRF را در نقاط ایستگاهی تصحیح کرده و سپس با روش‌های درون‌یابی مختلف، خروجی تصحیح شده را به نقاط شبکه اختصاص دادند. والاپیل و همکاران (۲۰۲۰) عملکرد دو روش کالمن فیلتر (KF) و تصحیح نسبتی (RC) را برای تصحیح خطای پیش‌بینی‌های دما و رطوبت نسبی مدل WRF در امارات متحده عربی بررسی کردند. هردیا و همکاران (۲۰۱۸) خطای پیش‌بینی بارش توسط مدل WRF در نقاط مشاهده‌ای را با استفاده از روش کریجینگ به سایر نقاط شبکه برازش دادند. سامالوت و همکاران (۲۰۱۹) برای تصحیح سرعت باد ابتدا با استفاده از روش کالمن فیلتر به تصحیح خطا در نقاط ایستگاهی پرداخته و سپس با استفاده از روش کریجینگ خطای به‌دست‌آمده را به نقاط شبکه تخصیص دادند و بدین ترتیب نتایج مدل را در نقاط شبکه تصحیح کردند. مطالعات متعددی تاکنون از روش‌های درون‌یابی برای تصحیح خطای مدل‌های عددی آب‌وهوا استفاده کرده‌اند (لوپز گومز و همکاران، ۲۰۲۰؛ دارس و همکاران، ۲۰۲۰). نصرانفهنانی و همکاران (۱۳۹۸) عملکرد مدل WRF را

پراکنش نقاط ایستگاهی در کشور چندان مناسب نیست حتی با وجود سیستم‌های قدرتمند نیز، درون‌یابی کوکریجینگ با محدودیت روبه‌رو است از این‌رو بایستی نواحی مورد مطالعه را محدود کرد تا تمام کشور را در برگیرد و سوم این‌که برای ارزیابی عملکرد پیش‌بینی‌های مدل WRF و روش تصحیح خطا در مناطق مختلف کشور از طبقه‌بندی شش‌گانه اقلیمی استفاده شد. علاوه‌بر مواردی که ذکر شد، به کارگیری ایستگاه‌ها در یک اقلیم مشابه (از لحاظ شاخص‌های دما، بارش، ارتفاع از سطح دریا) و اجرای روش تصحیح خطا، می‌تواند عوامل بروز خطای پیش‌بینی مدل، مثل کوهساری سطحی، گرادیان ارتفاعی، شرایط رطوبتی و... را محدود به نواحی هم‌اقلیم کند و عوامل ایجاد خطای مدل به سایر نواحی تعمیم داده نشود.

بنابراین هدف این مطالعه در مرحله اول ارتقاء کیفیت پیش‌بینی‌های مدل عددی وضع هوا WRF، برای سرعت باد و رطوبت نسبی روزانه از طریق توسعه روش درون‌یابی خطای برون‌داد مدل بر روی نقاط شبکه بوده و در مرحله دوم اعتبارسنجی روش تصحیح خطا است. همچنین توزیع مکانی و زمانی خطای برون‌داد مدل عددی وضع هوا WRF برای پیش‌بینی سرعت باد و رطوبت نسبی روزانه در سطح کشور بررسی می‌شود. آگاهی از توزیع مکانی و زمانی خطای برون‌داد مدل عددی وضع هوا و تصحیح خطای مدل می‌تواند به محققین در کاربرد هرچه بهتر برون‌داد مدل‌های عددی کمک کند.

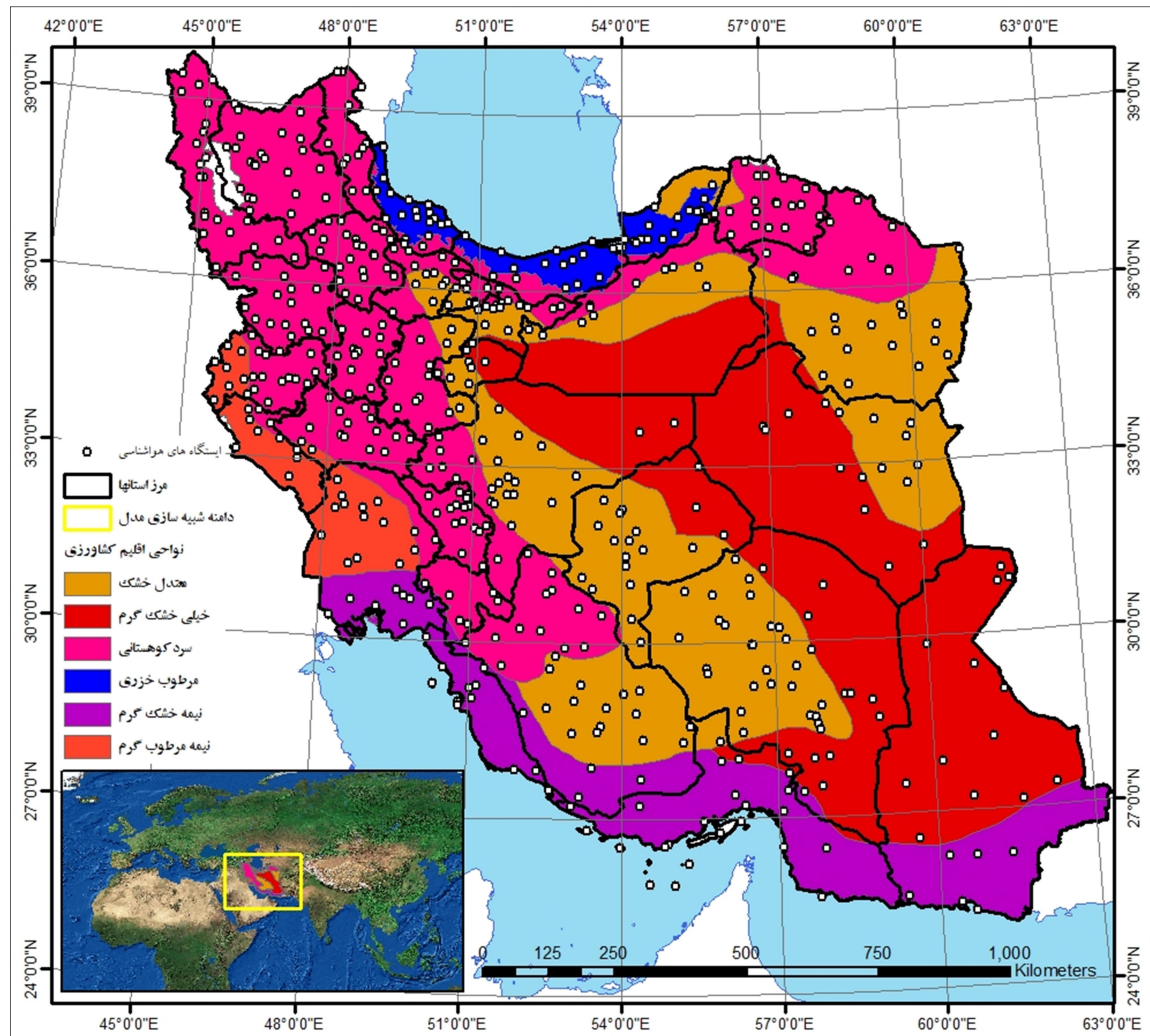
## ۲. روش پژوهش

### ۲-۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه کل ایران را در بر می‌گیرد. سازمان هواشناسی کشور، مناطق اقلیمی ایران را بر اساس ویژگی اقلیمی، کشاورزی و با استفاده از شاخص‌های دما، بارش، ارتفاع از سطح دریا، نوع محصول و نظریات محلی و کارشناسی به شش منطقه مشابه آگروکلیمایی (هواشناسی کشاورزی) تقسیم‌بندی کرده است. این مناطق شامل، منطقه نیمه‌مرطوب گرم، نیمه‌خشک گرم، مرطوب خزری، سرد کوهستانی، خیلی‌خشک گرم و خشک معتدل می‌باشد که در شکل ۱ نشان داده شده است (مؤسسه تحقیقات خاک و آب و سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۸). به سه دلیل از طبقه‌بندی شش‌گانه اقلیمی استفاده شد، اول، درون‌یابی خطا به‌روش کوکریجینگ برای مساحتی در حد کشور ایران نیاز به محاسبات سنگین دارد که با سیستم‌های در دسترس نمی‌توان به آن رسید، دوم، از آنجاکه

### ۲-۲. داده‌های مشاهده‌ای

برای برآورد متوسط روزانه سرعت باد (ارتفاع ده‌متری) و رطوبت نسبی (۲ متری)، در ابتدا گزارشات روزانه کلیه ایستگاه‌های هواشناسی سطح کشور (همدیدی، اقلیم شناسی) در ساعات سینوپ گزارش‌دهی (فواصل زمانی سه‌ساعته از ساعت 00UTC الی 23UTC) برای دوره ۲۰۱۹/۱۱/۱ الی ۲۰۲۱/۲/۱ تهیه شد. در ادامه ایستگاه‌های که دارای حداقل چهار گزارش‌دهی روزانه در در ساعات سینوپ گزارش‌دهی هستند، برای برآورد متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی در نظر گرفته شد. در نهایت متوسط سرعت باد و رطوبت نسبی در ساعات گزارش‌دهی، به‌عنوان متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی در هر ایستگاه در نظر گرفته شد. تعداد کل این ایستگاه‌ها ۵۶۰ عدد می‌باشد که در شکل ۱ موقعیت مکانی آنها نشان داده شده است.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه، نواحی اقلیمی، ایستگاه‌های هواشناسی و دامنه اجرای مدل.

### ۳-۲. خروجی مدل WRF

در این مطالعه از خروجی مدل تحقیقات و پیش‌بینی هوا (اسکاماروک و همکاران، ۲۰۰۸)، که توسط سازمان هواشناسی کشور به صورت روزانه اجرا می‌شود، استفاده شد. مدل شامل دو دامنه تو در تو با تفکیک افقی دامنه بزرگ‌تر ۲۷ کیلومتر و دامنه کوچک‌تر ۹ کیلومتر است. شکل ۱ نمایی از دامنه اجرای مدل (دامنه کوچک‌تر ۹ کیلومتر) برای تحلیل داده‌های پیش‌بینی مدل را نشان می‌دهد. برای تأمین شرایط اولیه و مرزی مدل از داده‌های (System Forecast Global) GFS استفاده شده است. در قسمت تنظیمات فیزیکی مدل، برای میکروفیزیک، از طرحواره لین و همکاران (۱۹۸۳) بهره

برده شده که با فرایندهای یخ، برف و تگرگ ساخته شده است، این طرحواره برای شبیه‌سازی با تفکیک افقی بالا بسیار مناسب می‌باشد (لین و همکاران، ۱۹۸۳). برای تابش طول‌موج بلند طرحواره RRTM (مدل انتقال سریع تابشی) به دلیل کارایی بالا مورد استفاده قرار گرفته است (ملاور و همکاران، ۱۹۹۷). از طرحواره دادها (Dudhia) برای طول‌موج کوتاه بهره گرفته شده زیرا برای جذب و پراکندگی ابر و آسمان صاف کارآمد می‌باشد (دادها، ۱۹۸۹) در قسمت لایه سطحی، از طرحواره Monin-Obukhov و همچنین طرحواره MYJ برای لایه مرزی انتخاب شده است (جانجیچ، ۱۹۹۴). خروجی‌های اجرای مدل WRF که توسط سازمان هواشناسی کشور

آموزش تا ۱۵ روز باعث کاهش RMSE شده است و افزایش طول دوره آموزش به بیش از ۱۵ روز حتی ممکن است سبب افزایش دوباره RMSE شود. از این رو به منظور تصحیح خطای پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت مدل WRF (پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته) دو دوره آموزشی ۵ و ۱۴ روزه قبل از پیش‌بینی‌ها در نظر گرفته شد (طی ۵ و ۱۴ روز گذشته) که به ترتیب با 5d (دوره آموزشی ۵ روز گذشته) و 14d (دوره آموزشی ۱۴ روز گذشته) نشان داده شده است. طی دوره آموزش، برون داد مدل WRF در روز اول (۲۴ ساعت اول) برای متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی در هر اجرای روزانه مدل استخراج شد. سپس مقادیر این برون‌دادها طی دوره آموزش برای متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی در محل ایستگاه‌ها استخراج شد. در ادامه خطای بین مقادیر برون‌داد مدل و مشاهده شده در محل ایستگاه‌ها (طی دوره آموزش) با استفاده از رابطه (۱) زیر محاسبه شد.

$$e_i = m_i - o_i \quad (1)$$

که در آن  $e_i$ ،  $m_i$  و  $o_i$  به ترتیب مقدار خطا، مقدار مشاهده شده و مقدار مدل برای روز  $i$ ام در محل ایستگاه‌ها است. با استفاده از روش‌های خانواده کریجینگ (کریجینگ ساده و کوکریجینگ) خطا در نقاط شبکه برآورد شد. از متغیر کمکی ارتفاع نقاط در روش کوکریجینگ استفاده شده است. کریجینگ به خانواده‌ای از روش‌های رگرسیون حداقل مربعات در زمین آمار اشاره دارد که مقادیر یک متغیر را در مکان‌های نمونه‌برداری نشده (مکان‌های بدون اندازه‌گیری) را در یک همسایگی مشخص از مکان‌های نمونه‌برداری شده تخمین می‌زند (ایساکس و همکاران، ۱۹۸۹؛ گووآرتس، ۱۹۹۷). روش کوکریجینگ اصلاح‌شده، روش کریجینگ ساده است. مزیت اصلی کوکریجینگ این است که می‌تواند بیش از یک متغیر (متغیرهای ثانویه) را به جای استفاده از تنها یک متغیر اصلی در فرایند تخمین به کار می‌گیرد. از آنجاکه ارتفاع کوهساری عامل مهمی در پیش‌بینی سرعت باد و رطوبت نسبی است (سولانو و همکاران، ۲۰۲۱، غیریت و

به صورت روزانه اجرا می‌شود، توسط سایر محققین نیز در سطح کشور مورد استفاده قرار گرفته است (آزادی و همکاران، ۱۳۹۰؛ محمدی و همکاران، ۲۰۱۷).

## ۲-۴. استخراج پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت متوسط روزانه

سرعت باد و رطوبت نسبی مدل مدل به صورت روزانه در ساعت 12UTC اجرا و بازه زمانی پیش‌بینی آن ۱۲۰ ساعته بوده است. به منظور تصحیح خطای پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت یک، دو و سه روزه (پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته) متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی، این پیش‌بینی‌ها برای هر روز در دوره ۲۰۱۹/۱۱/۱ الی ۲۰۲۱/۲/۱، از برون‌داد مدل استخراج شد. در این مطالعه منظور از پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته، به ترتیب پیش‌بینی روز بعد، دو و سه روز بعد از، روز اجرای مدل است. به عنوان مثال منظور از پیش‌بینی ۲۴ ساعته، پیش‌بینی اولین روز بعد از روز اجرای مدل است. به منظور استخراج پیش‌بینی متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی، متوسط کل پیش‌بینی‌های ساعتی مدل برای سرعت باد و رطوبت نسبی برای آن روز لحاظ می‌شود. منظور از سرعت باد همان اندازه سرعت باد است که از مؤلفه‌های افقی و قائم سرعت باد به دست می‌آید.

## ۲-۵. تصحیح خطای پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت مدل

### WRF بر روی نقاط شبکه

برای تصحیح خطای پیش‌بینی تعداد روزهای مشخصی به عنوان دوره آموزش تعیین شد. دوره آموزش شامل تعداد روزهای از گذشته می‌باشد که برای آن دوره، مقادیر مشاهده شده وجود دارد. خطای مدل در دوره آموزش از مقایسه خروجی مدل با مشاهدات به دست می‌آید. دوره آموزش در مطالعات مختلف از ۵ تا حتی ۴۵ روز در نظر گرفته شده است. هکر و رایف (۲۰۰۷) در یک مطالعه رابطه مقدار تغییرات RMSE با طول دوره آموزش را نشان دادند. بر اساس نتایج آنها، طول دوره

در پلی‌گون‌های هم‌اقلیم به تمام نقاط شبکه درون‌یابی شده و به تعداد روزهای دوره آموزش لایه‌های رستری خطا برآورد شد. بنابراین میانگین خطا برای یک نقطه از شبکه  $\bar{e}_j$  به صورت زیر تعریف شد.

$$\bar{e}_j = \frac{\sum_{i=1}^N e_{ij}}{N} \quad (۳)$$

که در آن  $e_{ij}$  خطای برآورد شده در روز  $i$ ام برای نقطه  $j$ ام در شبکه،  $\bar{e}_j$  میانگین خطای برآورده شده برای نقطه  $j$ ام در شبکه و  $N$  تعداد روزها در دوره آموزش است. با اعمال لایه رستری میانگین خطای برآورده شده بر پیش‌بینی خام مدل  $m_{rj}$  پیش‌بینی تصحیح شده مدل برای نقطه  $j$ ام در شبکه  $m_{Correctionj}$  به صورت زیر به دست می‌آید.

$$m_{Correctionj} = m_{rj} - \bar{e}_j \quad (۴)$$

که در آن  $m_{rj}$  و  $m_{Correctionj}$  به ترتیب پیش‌بینی خام مدل و پیش‌بینی تصحیح شده مدل برای نقطه  $j$ ام در شبکه است.

## ۲-۶. اعتبارسنجی روش تصحیح خطای مدل

به منظور اعتبارسنجی روش تصحیح خطا (بررسی تعمیم‌پذیری روش تصحیح خطا)، بیست درصد از کل ایستگاه‌ها در هر روز به صورت تصادفی از فرایند تصحیح خطا کنار گذاشته شده (باکس و مایر، ۱۹۸۶) و تصحیح خطا بر اساس مابقی ایستگاه‌ها انجام شد (برای روزهای گذشته). در اعتبارسنجی، تکیه بر داده‌هایی است که مشاهده شده‌اند ولی در هنگام توسعه روش تصحیح خطا به کار گرفته نمی‌شوند. این داده‌ها به منظور بررسی و سنجش کارایی روش تصحیح خطا در نقاطی است که داده مشاهده شده ندارند، به کار می‌روند. پس از انجام فرایند تصحیح خطا در هر روز، توانایی روش تصحیح خطا، برای ایستگاه‌های که داده‌های آنها در فرایند توسعه روش آماری درون‌یابی خطا دخیل نبوده‌اند، بر اساس قدر مطلق میانه خطا، ضریب همبستگی و ریشه میانگین مربعات خطا RMSE در آن ایستگاه‌ها سنجیده شد.

همکاران، (۲۰۲۰)، عامل ارتفاع به عنوان متغیر ثانویه در روش کوکریجینگ استفاده شد. از روش کوکریجینگ برای افزایش تخمین متغیر اصلی (در اینجا خطا  $e_i$ ) با استفاده از متغیر ثانویه (ارتفاع نقاط) استفاده می‌شود (ایساکس و همکاران، ۱۹۸۹). برآوردگر کوکریجینگ با در نظر گرفتن یک متغیر ثانویه (در اینجا ارتفاع)، که با متغیر اصلی همبستگی متقابل دارد (در اینجا خطا  $e_i$ ) به صورت زیر بیان شد (گووآرتس، ۱۹۹۷).

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i_1=1}^n w_{i_1} Z(s_{i_1}) + \sum_{i_2=1}^m w_{i_2} V(s_{i_2}) \quad ;$$

$$\sum_{i_2=1}^m w_{i_2} = 0, \quad \sum_{i_1=1}^n w_{i_1} = 1 \quad (۲)$$

که در آن  $\hat{Z}(s_0)$  مقادیر برآورد شده متغیر اصلی  $Z$  (در اینجا خطا  $e_i$ ) در مکان بدون مقدار  $s_0$  (در اینجا در نقاط شبکه که می‌خواهیم در آن نقاط خطا برآورد شود) است و  $w_{i_1}$  و  $w_{i_2}$  ضرایب وزنی هستند که به ترتیب با توجه به مکان‌های دارای مقدار (نمونه‌برداری شده) متغیر اصلی و ثانویه تعیین می‌شوند و  $n$  و  $m$  تعداد نقاط نمونه‌برداری (دارای مقدار) متغیر اصلی و ثانویه است. در این مطالعه توابع نمایی، گاوسی و کروی بر واریوگرام تجربی برازش داده شد و بر اساس مجموع باقی‌مانده مربعات RSS (Residual Sum of Squares) بین واریوگرام تجربی و مدل واریوگرامی برازش داده شده (رابرتسون، ۲۰۰۸)، بهترین مدل واریوگرامی انتخاب شد. لازم به ذکر است شرط مثبت قطعی PDC (Positive-Definite Condition) در مدل واریوگرامی کوکریجینگ می‌بایستی برقرار باشد (گووآرتس، ۱۹۹۹)، چنانچه این شرط برقرار نباشد روش کوکریجینگ ساده اعمال شد. بنابراین با استفاده از روش کوکریجینگ یا کوکریجینگ ساده خطای محاسبه شده در محل ایستگاه‌ها برای هر روز دوره آموزش به سایر نقاط شبکه تعمیم داده شده و خطا در سایر نقاط شبکه نیز برآورد شد ( $e_{ij}$ ). به عبارتی با استفاده از این روش درون‌یابی، خطاها در نقاط ایستگاه‌ها

۱۴روزه (14d)) و برون داد خام مدل (r)، برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته (24h, 48h, 72h) متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی در نمودار تیلور نشان داده شده است (شکل ۳). نمودار تیلور بر اساس داده‌های روزانه تمام ایستگاه‌ها در طی دوره آماری حاصل شده است. در نمودار تیلور (شکل ۳) رنگ خاکستری نشان‌دهنده برون‌داد خام مدل و رنگ‌های آبی و سبز نشان‌دهنده برون‌داد پس‌پردازش شده (به ترتیب روش 5d و 14d) است. بر اساس نتایج نمودار تیلور می‌توان گفت RMSE برون‌داد خام مدل برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته متوسط روزانه سرعت باد بیشتر از رطوبت نسبی می‌باشد (شکل ۳). به طور کلی مقادیر برون‌داد خام مدل و مقادیر تصحیح‌شده برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته متوسط روزانه رطوبت نسبی، نسبت به متوسط روزانه سرعت باد، به مقادیر مشاهده نزدیک‌تر است (شکل ۳). به طور کلی مقدار ضریب همبستگی، بعد از تصحیح خطای مدل (برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی) نسبت به برون‌داد خام مدل (داده تصحیح نشده) افزایش قابل توجه‌ای دارد (شکل ۳). این مقدار برای متوسط روزانه سرعت باد از ۰/۳۸ قبل تصحیح به ۰/۶۲ و برای متوسط روزانه رطوبت نسبی از ۰/۸۲ به ۰/۹ می‌رسد. در کل از نمودار تیلور می‌توان نتیجه گرفت تصحیح خطای مدل سبب شده، برون‌داد خام مدل بسیار به مشاهدات (Observed) نزدیک شود. با نگاه به شکل ۳ می‌توان دریافت روش تصحیح ۱۴روزه (14d) اندکی نسبت به روش ۵روزه (5d) به مشاهدات نزدیک‌تر است و این برای متوسط روزانه سرعت باد واضح‌تر است. به عبارتی می‌توان گفت برای متوسط روزانه سرعت باد نسبت به متوسط روزانه رطوبت نسبی، روش تصحیح ۱۴روزه (14d) نسبت به روش ۵روزه (5d) اندکی بیشتر سبب بهبود برون‌داد خام مدل می‌شود (شکل ۳).

## ۲-۷. ارزیابی روش تصحیح خطای پیش‌بینی‌های مدل

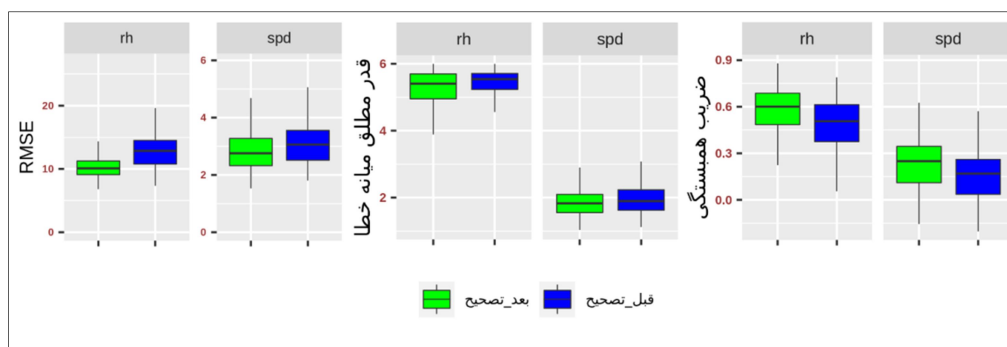
برای ارزیابی توانایی مدل در شبیه‌سازی یا پیش‌بینی، نیاز به شاخصی است که همزمان سه پارامتر مهم تطابق، میانگین، واریانس ( $\sigma^2$ ) و همبستگی (R) داده‌های پیش‌بینی مدل با شرایط مشاهده شده را لحاظ کند. بنابراین از نمره مهارت SS (Skill Score) بین شبیه‌سازی مدل (m) و مشاهدات (o) به صورت زیر استفاده شد (ویلکس، ۲۰۱۱).

$$SS = [R^2] - \left[ R - \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_o} \right) \right]^2 - \left[ \frac{(\bar{m} - \bar{o})}{\sigma_o} \right]^2 \quad (5)$$

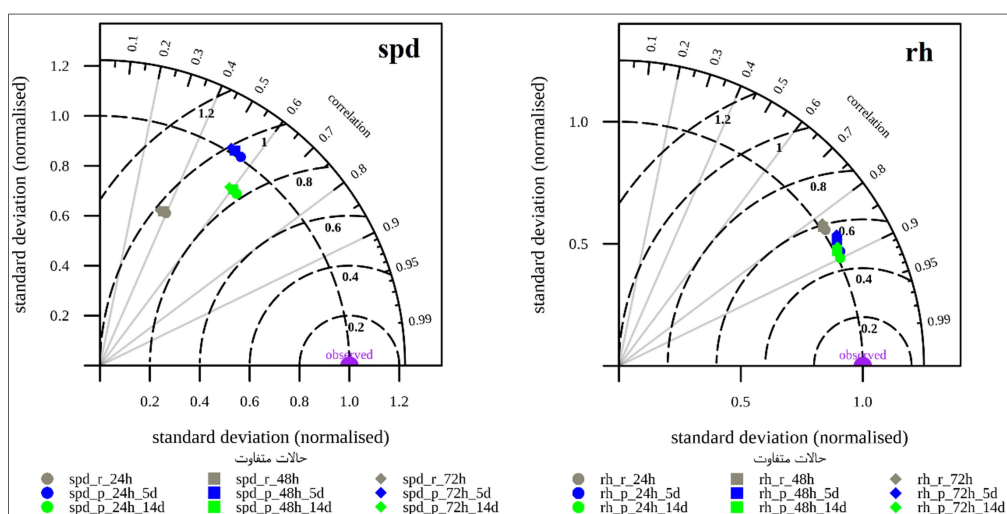
مدلی که دقیقاً کلیه خصوصیات مشاهدات را پیش‌بینی و بازتولید کند نمره مهارت آن ۱ است. حدود تغییرات نمره مهارت SS از منفی بی‌نهایت تا ۱ می‌باشد. برای نشان دادن گرافیکی میزان توافق یا شباهت بین پیش‌بینی مدل و مشاهدات از نمودار تیلور استفاده شد (تیلور، ۲۰۰۱). در نمودار تیلور هرچه مقادیر پیش‌بینی برای یک متغیر به مشاهدات شبیه‌تر باشد، آن مدل بر روی نمودار به نقطه مرجع نزدیک‌تر است و در نتیجه طبق رابطه (۵) می‌توان گفت نمره مهارت برای آن مدل به یک نزدیک‌تر می‌شود.

## ۳. نتایج و بحث

اعتبارسنجی روش تصحیح خطا نشان داد، به طور متوسط برای کل کشور قدر مطلق میانه خطا، ضریب همبستگی و RMSE برای متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی، بعد از تصحیح خطا نسبت به قبل از تصحیح خطا بهبود می‌یابد (شکل ۲). نتایج اعتبارسنجی نشان می‌دهد روش تصحیح خطا برای نقاطی از شبکه، که در آنها داده ایستگاه مشاهداتی موجود نیست، منجر به بهبود برون‌داد مدل شده است. به عبارتی می‌توان گفت روش تصحیح خطا برای سایر نقاط شبکه که در بر گیرنده ایستگاه مشاهداتی نیستند، دارای اعتبار است. میزان توافق یا شباهت مقادیر مشاهده شده با مقادیر روش تصحیح خطای مدل (با دوره آموزش ۵روزه (5d)،



شکل ۲. نمودار جعبه‌ای اعتبارسنجی روش تصحیح خطا برای متوسط روزانه سرعت باد (spd) و رطوبت نسبی (rh) بر اساس قدم‌مطلق میانه خطا، ضریب همبستگی و RMSE، برای کل کشور.



شکل ۳. نمودار تیلور برای مقایسه حالات مختلف پس‌پردازش (تصحیح خطای مدل) متوسط روزانه سرعت باد (spd) نمودار سمت چپ و رطوبت نسبی (rh) نمودار سمت راست. بعد زاویه‌ای نشان‌دهنده همبستگی (خطوط خاکستری) و خط‌های مقطع نشان‌دهنده RMSE است. رنگ‌های خاکستری، آبی و سبز به ترتیب نشان‌دهنده برون‌داد خام مدل (f)، روش تصحیح خطای مدل با دوره آموزش ۵ روزه (5d) و روش تصحیح خطای مدل با دوره آموزش ۱۴ روزه (14d). شکل‌های دایره، مربع و لوزی بر روی نمودار به ترتیب نشان‌دهنده پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ (24h, 48h, 72h) است. پسوند p به معنای برون‌داد پس‌پردازش شده مدل است. به عنوان مثال، spd\_p\_24h\_14d به معنی پس‌پردازش برون‌داد پیش‌بینی ۲۴ ساعته مدل برای متوسط روزانه سرعت باد بر اساس دوره آموزش ۱۴ روزه.

سبب کاهش تغییرپذیری نمره مهارت شود (شکل ۴). نمره مهارت مدل برای پیش‌بینی‌های خام متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی برای بیش از ۷۵ درصد روزها، کمتر از صفر بوده است (جعبه‌های قرمز رنگ در شکل ۴). در کل نمره مهارت مدل برای پیش‌بینی‌های خام متوسط روزانه رطوبت نسبی نسبت به متوسط روزانه سرعت باد بهتر است (جعبه‌های قرمز رنگ در شکل ۴). نتایج مطالعه یو و همکاران (۲۰۲۰) در چنین نشان داد مدل، رطوبت نسبی را بهتر از سرعت باد شبیه‌سازی می‌کند. به‌طور متوسط میانه نمره مهارت برای پیش‌بینی‌های خام متوسط روزانه رطوبت نسبی برای بیش

نمودار جعبه‌ای نمره مهارت برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی، قبل و بعد از تصحیح خطای مدل با دوره آموزش ۵ و ۱۴ روزه، در شکل ۴ نشان داده شده است. برای این که نمودارهای جعبه‌ای مربوط به تصحیح خطای مدل با دوره آموزش ۵ و ۱۴ روزه در شکل ۴ با جزئیات بهتری دیده شوند، این قسمت در شکل ۵ به صورت مجزا آورده شده است. در پیش‌بینی متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی، تغییرپذیری نمره مهارت برون‌داد خام مدل نسبت به مقادیر تصحیح شده تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند (شکل ۴). به عبارتی روش تصحیح خطا نتوانسته به طرز چشمگیری



عملکرد بهتری دارد (شکل ۵). به‌طور متوسط نمره مهارت مدل بعد از تصحیح خطا، برای پیش‌بینی‌های رطوبت نسبی نسبت به سرعت باد بهتر شده است، به‌طوری که در بیش از ۵۰ درصد روزها نمره مهارت برای پیش‌بینی‌های سرعت باد بیش از ۰/۲۵ و برای رطوبت نسبی بیش از ۰/۴ است (شکل ۵). در مطالعه‌ای که در امارات متحده عربی توسط والاپیل و همکاران (۲۰۲۰) انجام گرفت، نمره مهارت مدل WRF با تصحیح کالمن فیلتر برای پیش‌بینی رطوبت نسبی، به‌طور متوسط در محدوده ۰/۲۵ تا ۰/۳۵ قرار گرفت.

از ۵۰ درصد روزها بیش از ۰/۲۵- بوده است و این برای متوسط روزانه سرعت باد ۰/۵- است (جعبه‌های قرمز رنگ در شکل ۴). پس از تصحیح خطا، نمره مهارت مدل به یک نزدیک‌تر شده و برای بیش از ۷۵ درصد روزها به بالای صفر می‌رسد (جعبه‌های آبی و سبز رنگ در شکل ۴). روش تصحیح خطای ۱۴ روزه نسبت به روش تصحیح خطای ۵ روزه چندان سبب بهبود نمره مهارت مدل نشده است (شکل ۵). اما می‌توان گفت نمره مهارت در روش تصحیح خطای ۱۴ روزه پیش‌بینی سرعت باد، نسبت به روش ۵ روزه، در قیاس با پیش‌بینی رطوبت نسبی،



شکل ۴. نمودار جعبه‌ای نمره مهارت برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته متوسط روزانه سرعت باد (spd) و رطوبت نسبی (rh) قبل از تصحیح خطای مدل و بعد از تصحیح خطای مدل با دوره آموزش ۵ روزه (تصحیح\_۵روزه) و روش تصحیح خطای مدل با دوره آموزش ۴ روزه (تصحیح\_۱۴روزه) برای روزهای دوره آماری. خطوط خطا در پایین و بالای هر جعبه به ترتیب صدک ۱۱م و ۹۹م.



شکل ۵. نمودار جعبه‌ای نمره مهارت برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته سرعت باد (spd) و رطوبت نسبی (rh)، برای تصحیح خطای مدل با دوره آموزش ۵ روزه (تصحیح\_۵روزه) و روش تصحیح خطای مدل با دوره آموزش ۴ روزه (تصحیح\_۱۴روزه) برای روزهای دوره آماری. خطوط خطا در پایین و بالای هر جعبه به ترتیب صدک ۱۱م و ۹۹م.

گرم) بیشتر از سرعت باد است (شکل ۶). می توان گفت مقدار نمره مهارت مدل و تغییرپذیری آن در نواحی اقلیمی مختلف متفاوت است. بعد از تصحیح خطا در تمامی نواحی اقلیمی، مقدار نمره مهارت برای پیش بینی رطوبت نسبی بیشتر از سرعت باد است (شکل ۷)، اما تغییرپذیری نمره مهارت نسبت به قبل از تصحیح کاهش قابل توجهی ندارد (شکل ۶). تمامی نواحی اقلیمی بعد از تصحیح خطا، دارای نمره مهارت بالاتری نسبت به قبل تصحیح هستند (شکل ۶). به طوری که نمره مهارت مدل برای اکثر نواحی اقلیمی بعد از تصحیح خطا برای بیش از ۵۰ درصد روزها به بالای صفر خواهد رسید (شکل ۶ و ۷). تفاوت چندان مشخصی بین نمره مهارت مدل برای پیش بینی های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته رطوبت نسبی و سرعت باد برای قبل و بعد از تصحیح خطا در بین نواحی اقلیمی مشاهده نشد اما به طور کلی می توان گفت اندکی میانه نمره مهارت برای پیش بینی ۲۴ ساعته نسبت به ۴۸ ساعته و ۴۸ ساعته نسبت به ۷۲ ساعته بیشتر است (شکل ۶ و ۷). تفاوت قابل توجهی بین مقدار نمره مهارت مدل و تغییرپذیری آن برای تصحیح خطا به روش ۵ و ۱۴ روزه در بین نواحی اقلیمی مشاهده نشد (شکل ۷). می توان گفت روش ۵ و ۱۴ روزه تصحیح خطا در بین نواحی اقلیمی عملکرد تقریباً مشابهی دارند (شکل ۷). در کل می توان گفت با توجه به وسعت کشور تراکم ایستگاه ها به ویژه در مناطق مرکزی (مانند ناحیه خیلی خشک) برای درون یابی خطا با محدودیت همراه است و این می تواند یکی از دلایل خطا باشد.

در شکل ۵ و جدول ۱ مشخص است که، میانه نمره مهارت برای پیش بینی های ۲۴ ساعته نسبت به ۴۸ ساعته و ۴۸ ساعته نسبت به ۷۲ ساعته اندکی بهتر است (جدول ۱) اما همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، این تفاوت ها محسوس نیست. علاوه بر این میانه نمره مهارت برای تصحیح پیش بینی ها به روش ۱۴ روزه نسبت به روش ۵ روزه اندکی بهتر است (جدول ۱) اما همان طور که در شکل ۵ مشخص است این تفاوت ها معنادار نمی باشد. همان طور که در شکل های ۴ و ۵ و جدول ۱ نشان داده شد، نمره مهارت مدل بعد از تصحیح خطا برای پیش بینی های متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی، افزایش داشته اما تغییرپذیری آن تقریباً تغییری نکرده است. عملکرد مدل قبل و بعد از تصحیح خطا در هر ناحیه اقلیمی در شکل ۶ نشان داده شده است. در شکل ۶ و ۷ نمودار جعبه ای نمره مهارت برای پیش بینی های متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی به تفکیک ناحیه اقلیمی نشان داده شده است. برای این که نمودارهای جعبه ای مربوط به تصحیح خطای مدل با دوره آموزش ۵ و ۱۴ روزه در شکل ۶ با جزئیات بهتری دیده شوند، این قسمت در شکل ۷ به صورت مجزا آورده شده است. در حالت قبل از تصحیح خطا، نمره مهارت مدل برای پیش بینی رطوبت نسبی در تمامی نواحی اقلیمی (به جز ناحیه نیمه مرطوب گرم و خیلی خشک گرم) بهتر از پیش بینی سرعت باد است (شکل ۶). در حالت قبل از تصحیح خطا، تغییرپذیری نمره مهارت برای پیش بینی رطوبت نسبی در تمامی نواحی (به جز ناحیه نیمه خشک

جدول ۱. میانه نمره مهارت برای پیش بینی های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی، برای تصحیح خطای مدل به روش دوره آموزش ۵ و ۱۴ روزه و برونداد خام مدل برای کل کشور.

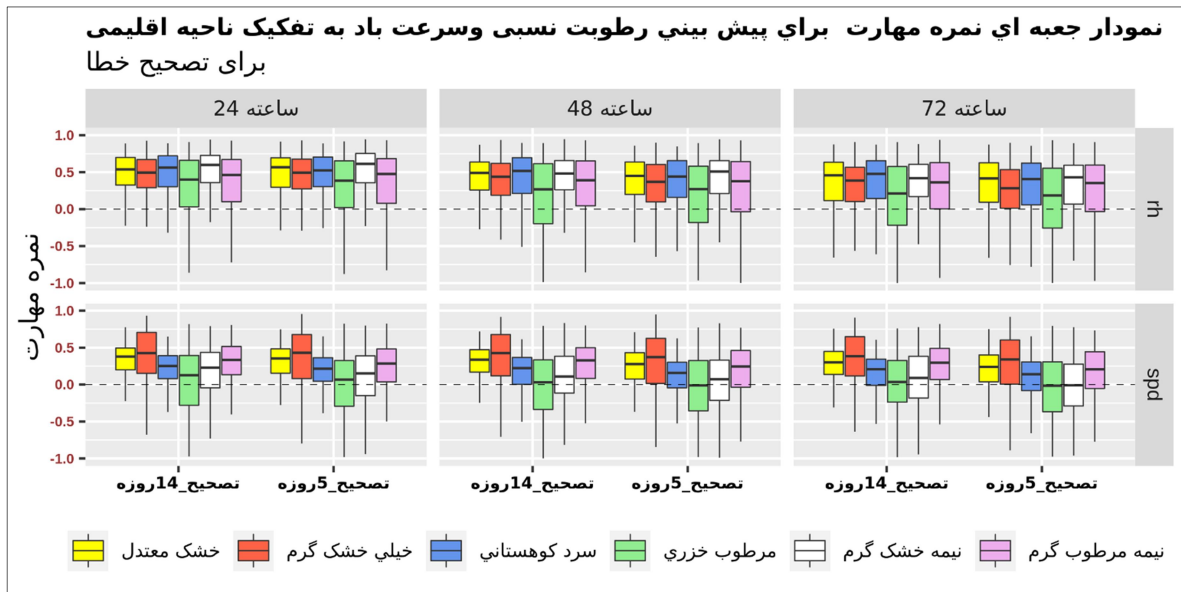
میانه نمره مهارت											کمیت	
پیش بینی ۷۲ ساعته			پیش بینی ۴۸ ساعته			پیش بینی ۲۴ ساعته			حد اکثر درصد بهبود	برونداد خام مدل		تصحیح ۱۴ روزه
حد اکثر	برونداد خام مدل	تصحیح ۱۴ روزه	تصحیح ۵ روزه	تصحیح ۵ روزه	حد اکثر	برونداد خام مدل	تصحیح ۱۴ روزه	تصحیح ۵ روزه			تصحیح ۵ روزه	
۱۳۶	-۰/۵۸	۰/۲۱	۰/۱۲	۱۴۵	-۰/۵۳	۰/۲۴	۰/۱۵	۱۶۰	-۰/۴۷	۰/۲۸	۰/۲۳	متوسط روزانه سرعت باد
۱۹۵	-۰/۳۸	۰/۳۶	۰/۲۹	۲۳۲	-۰/۳۱	۰/۴۱	۰/۳۶	۳۰۸	-۰/۲۴	۰/۵	۰/۴۹	متوسط روزانه رطوبت نسبی



شکل ۶. نمودار جعبه‌ای نمره مهارت برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته متوسط روزانه سرعت باد (spd) و رطوبت نسبی (rh)، قبل از تصحیح خطای مدل و بعد از تصحیح خطای مدل با دوره آموزش ۵ روزه (تصحیح ۵ روزه) و روش تصحیح خطای مدل با دوره آموزش ۴ روزه (تصحیح ۴ روزه) به تفکیک ناحیه اقلیمی. خطوط خطا در پایین و بالای هر جعبه به ترتیب صدک ۱۱ و ۹۹ ام.

به طوری که نمره مهارت به صفر یا حتی کمتر نیز می‌رسد. در کل می‌توان گفت اگرچه روش تصحیح خطا سبب افزایش میان‌نمره مهارت مدل نسبت به قبل از تصحیح خطا در تمامی نواحی اقلیمی شده است، اما این افزایش مقدار نمره مهارت برای پیش‌بینی سرعت باد در نواحی مرطوب خزری، نیمه‌خشک گرم و سرد کوهستانی همچنان کمتر از  $\frac{1}{3}$  و برای پیش‌بینی رطوبت نسبی در نواحی مرطوب خزری و نیمه‌مرطوب گرم کمتر از  $\frac{1}{45}$  است (شکل ۷). بنابراین می‌توان گفت همان‌طور که نمره مهارت مدل در حالت قبل از تصحیح خطا در نواحی مختلف متفاوت است، در همین راستا نیز عملکرد روش تصحیح خطا در نواحی مختلف اقلیمی متفاوت است به طوری که در برخی نواحی مانند ناحیه نیمه‌خشک گرم، تصحیح خطا سبب افزایش میان‌نمره مهارت مدل به بالای  $\frac{1}{4}$  برای پیش‌بینی رطوبت نسبی شده در حالی که برای پیش‌بینی سرعت باد میان‌نمره مهارت مدل به کمتر از  $\frac{1}{2}$  می‌رسد.

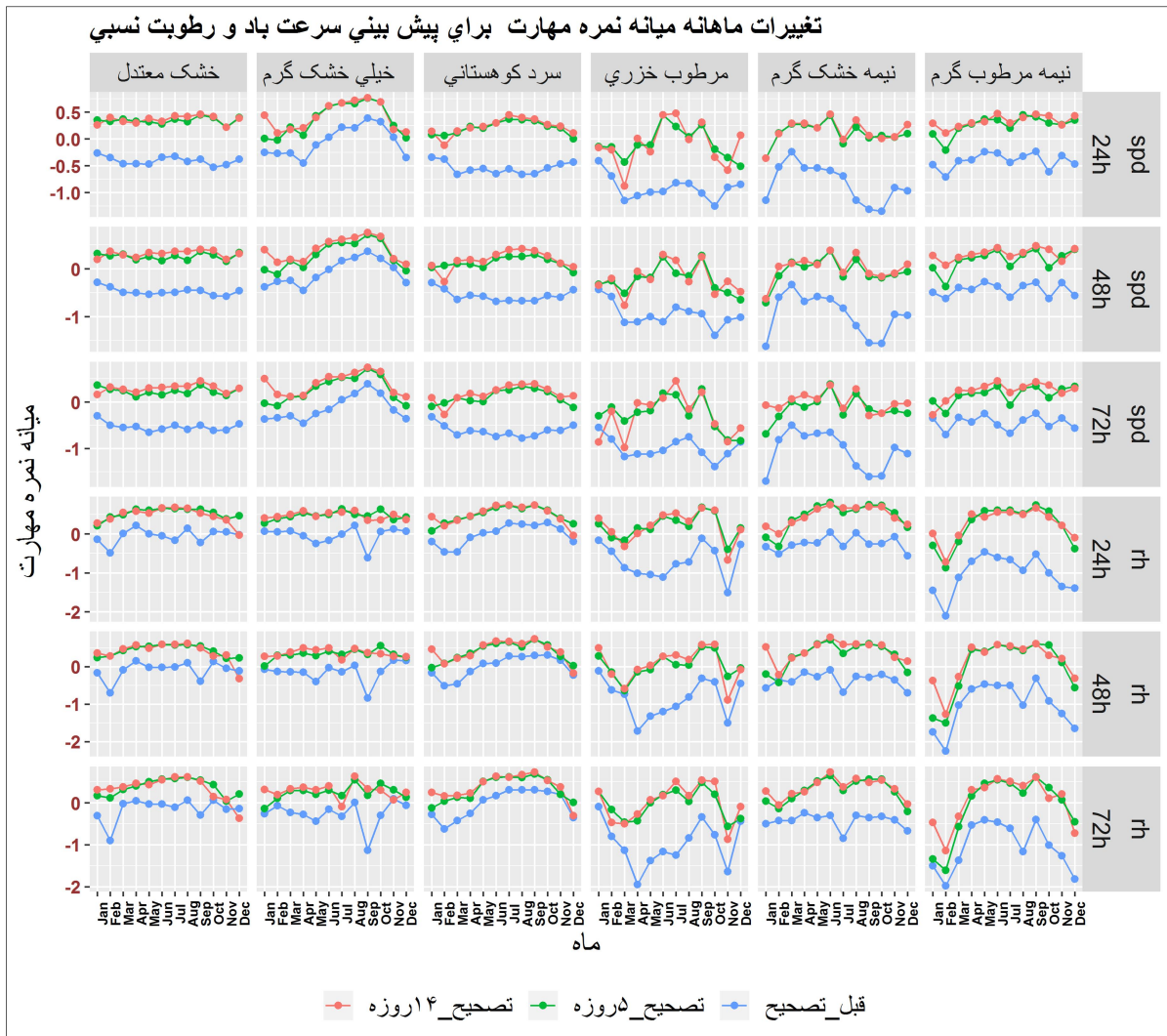
کمترین میان‌نمره مهارت برای پیش‌بینی‌های خام (تصحیح نشده) رطوبت نسبی، مربوط به نواحی نیمه‌مرطوب گرم و مرطوب خزری و برای سرعت باد مربوط به نواحی نیمه‌خشک گرم و مرطوب خزری است (شکل ۶). این در حالی است که بعد از تصحیح خطا میان‌نمره مهارت مدل برای پیش‌بینی‌های رطوبت نسبی برای ناحیه نیمه‌خشک گرم و برای پیش‌بینی‌های سرعت باد در ناحیه خیلی خشک گرم به بالاترین می‌رسد (شکل ۷). در کل می‌توان گفت بعد از تصحیح خطای پیش‌بینی رطوبت نسبی، به جز ناحیه مرطوب خزری برای سایر نواحی اقلیمی نمره مهارت برای بیش از ۵۰ درصد روزها بیش از  $\frac{1}{4}$  بوده است (شکل ۷). بعد از تصحیح خطای پیش‌بینی سرعت باد، فقط در نواحی خیلی خشک گرم، خشک معتدل و نیمه‌مرطوب گرم است که میان‌نمره مهارت برای بیش از ۵۰ درصد روزها بیشتر از  $\frac{1}{4}$  است و عملکرد روش تصحیح خطا در نواحی مرطوب خزری و نیمه‌خشک چندانی قابل قبول نیست.



شکل ۷. نمودار جعبه‌ای نمره مهارت برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته متوسط روزانه سرعت باد (spd) و رطوبت نسبی (rh)، برای تصحیح خطای مدل با دوره آموزش ۵ روزه (تصحیح\_۵روزه) و روش تصحیح خطای مدل با دوره آموزش ۴ روزه (تصحیح\_۴روزه) به تفکیک ناحیه اقلیمی. خطوط خطا در پایین و بالای هر جعبه به ترتیب صدک ۱۱ و ۹۹ام.

رطوبت نسبی در نواحی اقلیمی دقیقاً در چه ماه خاص مشترکی به حداقل خود می‌رسد، به‌عنوان نمونه برای پیش‌بینی‌های سرعت باد در ناحیه مرطوب خزری کمترین میانه نمره مهارت مربوط به ماه اکتبر و در ناحیه خیلی خشک گرم مربوط به ماه آپریل است (شکل ۸). بالاتری مقدار نمره مهارت بعد از تصحیح خطای پیش‌بینی سرعت باد، مربوط به ماه‌های جوئن الی اکتبر در نواحی خیلی خشک گرم و نیمه‌مرطوب گرم است (شکل ۸). به‌طور کلی در اکثر نواحی اقلیمی کمترین نمره مهارت قبل و بعد از تصحیح خطای پیش‌بینی رطوبت نسبی در ماه‌های سردتر سال یعنی نوامبر تا فوریه رخ می‌دهد (شکل ۸). به‌طور کلی می‌توان گفت نمره مهارت برون‌داد خام مدل برای پیش‌بینی سرعت باد در اقلیم‌های نیمه‌خشک گرم و مرطوب خزری در ماه اکتبر به کمترین مقدار خود در بین نواحی و ماه‌ها می‌رسد (شکل ۸). نمره مهارت مدل برای تصحیح خطا به‌روش ۵ و ۱۴ روزه در تمام نواحی اقلیمی و در تمام ماه‌ها تقریباً مشابه یکدیگر بوده است (شکل ۸).

تغییرات میانه نمره مهارت برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی، قبل و بعد از تصحیح خطای مدل به تفکیک ناحیه اقلیمی برای هر ماه، در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸ می‌توان گفت در اکثر نواحی اقلیمی برون‌داد مدل قبل از تصحیح خطا دارای تغییرپذیری در بین ماه‌ها است. در پیش‌بینی‌های سرعت باد در نواحی مرطوب خزری، نیمه‌خشک گرم و خیلی خشک گرم و برای پیش‌بینی‌های رطوبت نسبی در نواحی مرطوب خزری و نیمه‌مرطوب گرم، الگوی کاهشی افزایشی با تغییرپذیری بیشتری در میانه نمره مهارت نسبت به سایر نواحی مشاهده می‌شود (شکل ۸). بعد از تصحیح خطای مدل در تمامی نواحی اقلیمی و در تمام ماه‌ها، نمره مهارت برای پیش‌بینی‌های متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی افزایش می‌یابد اما تغییرات میانه نمره مهارت در بین ماه‌ها همچنان الگوی اولیه خود (تغییرپذیری در بین ماه‌ها) را حفظ می‌کند (شکل ۸). به‌طور کلی نمی‌توان گفت که کمترین میانه نمره مهارت پیش‌بینی‌های متوسط روزانه سرعت باد و



شکل ۸. تغییرات میان‌نمره مهارت در هر ماه برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸، و ۷۲ ساعته متوسط روزانه سرعت باد (spd) و رطوبت نسبی (rh)، قبل از تصحیح خطای مدل و بعد از تصحیح خطای مدل با دوره آموزش ۵روزه (تصحیح\_۵روزه) و روش تصحیح خطای مدل با دوره آموزش ۱۴روزه (تصحیح\_۱۴روزه) به تفکیک ناحیه اقلیمی.

خطای تا ۱۰ متر بر ثانیه، کمتر از مقادیر مشاهده شده برآورد کرده است (شکل ۹). رحیمیان و رشیدی (۱۳۹۸) طی مطالعه‌ای در منطقه تهران، کم‌برآوردی مدل WRF در شبیه‌سازی‌های سرعت باد را گزارش دادند. در همان‌طور که بیان شد مدل در اکثر مناطق کشور رطوبت نسبی را بیشتر از مقدار مشاهده شده برآورد می‌کند. سینگ و همکاران (۲۰۱۵) نیز نشان دادند به‌طور کلی مدل WRF رطوبت نسبی را بیشتر از مقدار مشاهده شده برآورد می‌کند. اما در برخی مناطق به‌ویژه نوار ساحلی خلیج فارس، مدل رطوبت نسبی را کمتر از مقدار مشاهده شده با خطای تا محدوده ۱۹ تا ۲۵ درصد کمتر از مقدار

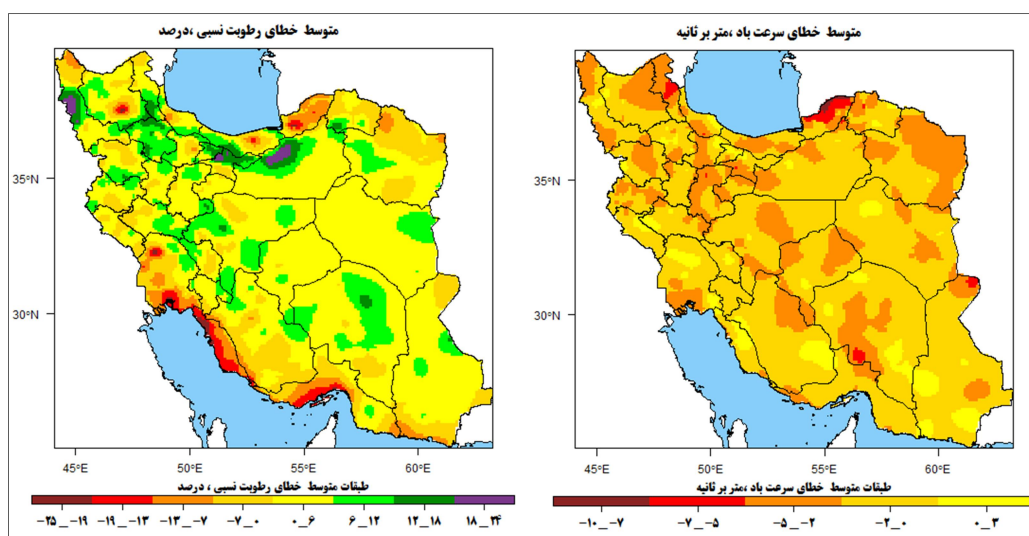
توزیع مکانی طبقات متوسط خطای برونداد خام مدل برای شبیه‌سازی متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است در اکثر نقاط کشور متوسط خطای مدل برای شبیه‌سازی سرعت باد منفی و برای رطوبت نسبی مثبت است، به‌عبارتی مدل، سرعت باد را در اکثر مناطق کشور کمتر از مقدار مشاهده‌شده و رطوبت نسبی را بیشتر از مقدار مشاهده‌شده برآورد می‌کند. به‌طوری که متوسط خطای مدل برای شبیه‌سازی سرعت باد، در برخی مناطق در محدوده ۷- تا ۱۰- متر بر ثانیه قرار دارد، به‌عبارتی مدل، متوسط روزانه سرعت باد را در این مناطق با متوسط

مشاهداتی هستند محاسبه و سپس با استفاده از روش درون‌یابی کوکریجینگ، این خطا در سایر نقاط شبکه که فاقد داده‌های مشاهده‌ای هستند برآورد شد. بدین ترتیب پیش‌بینی خام مدل برای نقاطی از شبکه که فاقد داده‌های مشاهده‌ای هستند حفظ شده و تنها مقادیر خطا بر روی آنها اعمال و پیش‌بینی خام مدل تصحیح شد. دو دوره آموزشی ۵ و ۱۴ روزه برای محاسبه خطای مدل به‌کارگیری شد تا میانگین خطا در این دوره‌ها برای تصحیح پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت مدل استفاده شود. برای محاسبه خطای مدل از داده‌های روزانه ۵۶۰ ایستگاه هواشناسی (اعم از همدیدی و اقلیم‌شناسی) استفاده شد، که باتوجه به وسعت کشور تراکم ایستگاه‌ها برای درون‌یابی خطا با محدودیت همراه است. به‌منظور ارزیابی روش تصحیح خطای پیش‌بینی‌های مدل از شاخص نمره مهارت استفاده شد. نتایج اعتبارسنجی نشان داد روش تصحیح خطا توانسته، خطای مدل را در نقاطی که حتی داده‌های مشاهده‌ای ندارند، کاهش داده و سبب ارتقاء کیفیت پیش‌بینی‌های مدل شود. نتایج نشان داد برای تمام ایستگاه‌ها مقدار ضریب همبستگی، بعد از تصحیح خطای مدل نسبت به برون‌داد خام مدل افزایش قابل توجهی دارد و این مقدار برای متوسط روزانه سرعت باد از ۰/۳۸ قبل تصحیح به ۰/۶۲ و برای متوسط روزانه رطوبت نسبی از ۰/۸۲ به ۰/۹ می‌رسد.

مشاهده شده شبیه‌سازی می‌کند (شکل ۹). در حالی که خطای مدل در شبیه‌سازی متوسط روزانه رطوبت نسبی در قسمتی از نواحی شمالی استان سمنان، نواحی مرزی بین استان تهران و البرز و غرب دریاچه ارومیه تا محدوده ۱۸ تا ۲۴ درصد، بیشتر از مقدار مشاهده شده رخ داده است (شکل ۹). در نواحی مابین استان تهران و البرز و سمنان به دلیل وجود نواحی صنعتی و تراکم بالای جمعیت، می‌توان گفت وجود جزیره‌های گرمایی و آلودگی جوی، سبب بروز خطا در برون‌داد مدل می‌شود. جابری و همکاران (۱۳۹۹) نیز در منطقه تهران، بالا بودن خطای مثبت در پیش‌بینی رطوبت نسبی را گزارش کردند.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه برای تصحیح خطای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی برون‌داد مدل WRF بر روی ایران، روش درون‌یابی کوکریجینگ (با متغیر کمکی ارتفاع کوهساری) خطا، توسعه داده شد. در این مطالعه عملکرد مدل WRF برای پیش‌بینی متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی در یک دوره ۱۵ ماهه برای کل کشور (با ۵۶۰ ایستگاه مشاهده‌ای) با رویکرد نواحی اقلیمی ارزیابی شد که به نوبه خود تاکنون در سطح کشور کم نظیر است. در این مطالعه ابتدا خطای مدل در نقاطی از شبکه که دارای داده



شکل ۹. توزیع مکانی طبقات متوسط خطای برون‌داد خام مدل، برای متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی طی دوره آماری مورد بررسی.

روش تصحیح خطای پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت مدل WRF، خطای برون‌داد مدل را کاهش و سبب افزایش نمره مهارت و ارتقاء کیفیت پیش‌بینی‌ها در تمامی نواحی اقلیمی شد. به‌طور کلی عملکرد مدل و روش تصحیح خطای پیش‌بینی‌ها در ماه‌ها و اقلیم‌های گوناگون، متفاوت است. از آنجاکه پیش‌بینی رطوبت نسبی در اطراف دریاچه ارومیه و بر روی نواحی مانند استان تهران و البرز با خطای زیادی همراه است به نظر می‌رسد سازمان هواشناسی می‌بایستی در پیکربندی اجرای مدل WRF از داده‌های کاربری اراضی به‌روزتر با اندازه تفکیک بالاتر استفاده کند. در روش درون‌یابی (کوکریجینگ) و تعمیم خطای برون‌داد مدل بر روی تمام نقاط شبکه لازم است نقاط یا ایستگاه‌های مشاهداتی، تراکم قابل قبول و پراکنش یکنواختی داشته باشند که این مورد در نواحی مرکزی کشور چندان مطلوب نیست.

#### مراجع

- آزادی، م.، جعفری، س.، میرزایی، ا. و عربلی، پ.، ۱۳۸۷، پس‌پردازش برون‌داد مدل میان مقیاس MMS برای دمای بیشینه و کمینه با استفاده از فیلتر کالمن. مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۴(۱)، ۴۵-۶۱.
- آزادی، م.، شیرغلامی، م.، حجام، س. و صحرايان، ف.، ۱۳۹۰، پس‌پردازش برون‌داد مدل WRF برای بارش روزانه در ایران، مجله تحقیقات منابع آب، ۷(۳)، ۸۱-۷۱.
- جابری، پ.، ثابت‌قدم، س. و سرمد، ق.، ۱۳۹۹، پیش‌بینی کاهش دید ناشی از مه و بارش در منطقه تهران با استفاده از مدل WRF. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۷، ۱۰۷-۱۲۴.
- رحیمیان، م. و رشیدی، ی.، ۱۳۹۸، ارزیابی عملکرد مدل یکپارچه WRF/CALMET در توسعه میدان باد ورودی به مدل‌های کیفیت هوا. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۱(۵)، ۹۷۹-۹۹۲.

به‌طور متوسط نمره مهارت مدل، برای پیش‌بینی رطوبت نسبی بیشتر از سرعت باد است. در کل نمره مهارت برون‌داد خام مدل برای پیش‌بینی متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی برای بیش از ۷۵ درصد مواقع کمتر از صفر است که بعد از تصحیح خطا، نمره مهارت افزایش یافته و برای بیش از ۷۵ درصد مواقع به بیش از صفر می‌رسد. و این نشان می‌دهد عملکرد پیش‌بینی مدل با استفاده از تصحیح خطا ارتقاء می‌یابد. به‌طور کلی نمره مهارت برون‌داد خام مدل برای پیش‌بینی رطوبت نسبی در نواحی نیمه‌مرطوب گرم و مرطوب خزری و برای سرعت باد در نواحی نیمه‌خشک گرم و مرطوب خزری، نسبت به سایر نواحی اقلیمی کمتر است. نمره مهارت پیش‌بینی‌های رطوبت نسبی بعد از تصحیح خطا در تمامی نواحی اقلیمی (جز ناحیه مرطوب خزری) برای بیش از ۵۰ درصد روزها بیش از ۰/۴ و برای سرعت باد تنها در نواحی نیمه‌مرطوب گرم، خیلی‌خشک گرم و خشک معتدل برای بیش از ۵۰ درصد روزها بیش از ۰/۲۵ بوده است.

نتایج نشان داد نمره مهارت برون‌داد خام مدل برای پیش‌بینی متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی برای ماه‌های مختلف، دارای یک توزیع یکنواخت نبوده و دارای تغییرات افزایشی و کاهش‌ی است. به‌طور کلی در اکثر نواحی اقلیمی کمترین نمره مهارت قبل و بعد از تصحیح خطای پیش‌بینی رطوبت نسبی در ماه‌های سردتر سال یعنی نوامبر تا فوریه رخ می‌دهد. به‌طور کلی می‌توان گفت نمره مهارت برون‌داد خام مدل برای پیش‌بینی سرعت باد در اقلیم‌های نیمه‌خشک گرم و مرطوب خزری در ماه اکتبر به کمترین مقدار خود در بین نواحی و ماه‌ها می‌رسد. توزیع مکانی خطای برون‌داد خام مدل برای شبیه‌سازی متوسط روزانه سرعت باد و رطوبت نسبی نشان داد برخی مناطق دارای خطای بیشتری هستند. مدل، سرعت باد را در اکثر مناطق کشور کمتر از مقدار مشاهده شده و رطوبت نسبی را بیشتر از مقدار مشاهده شده برآورد می‌کند.

- ۱۳۹۸، تهیه نقشه خرد اقلیم کشاورزی کشور،  
<https://agro.irimo.ir>  
 نصراصفهانى، م.، یزدان پناه، ح.ا. و نصراصفهانى، م.،  
 ۱۳۹۸، ارزیابی مدل WRF برای پیش‌بینی دما و  
 رخداد سرمازدگی در حوضه آبریز زاینده رود.  
 پژوهش‌های جغرافیای طبیعی ۵۱، ۱۶۳-۱۸۲.
- Box, G.E. and Meyer, R.D., 1986, An analysis for unreplicated fractional factorials. *Technometrics*, 28(1), 11-18.
- Dars, G. H., Strong, C., Kochanski, A. K., Ansari, K. and Ali, S. H., 2020, The Spatiotemporal Variability of Temperature and Precipitation Over the Upper Indus Basin: An Evaluation of 15 Year WRF Simulations. *Applied Sciences* 10(5), 1765.
- Dudhia, J., 1989, Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of Atmospheric Sciences* 46, 3077-3107.
- Gheyret, G., Mohammad, A. and Tang, Z., 2020, Elevational patterns of temperature and humidity in the middle Tianshan Mountain area in Central Asia. *Journal of Mountain Science* 17, 397-409.
- Goovaerts, P., 1997, Geostatistics for natural resources evaluation. Oxford University Press on Demand.
- Goovaerts, P., 1999, Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma* 89, 1-45.
- Hacker, J. P. and Rife, D. L., 2007, A Practical Approach to Sequential Estimation of Systematic Error on Near-Surface Mesoscale Grids. *Weather and Forecasting* 22, 1257-1273.
- Heredia, M. B., Junquas, C., Prieur, C. and Condom, T., 2018, New Statistical Methods for Precipitation Bias Correction Applied to WRF Model Simulations in the Antisana Region, Ecuador. *Journal of Hydrometeorology* 19, 2021-2040.
- Isaaks, E. H., and Srivastava, R. M., 1989, *Applied Geostatistics*. illustrate. Oxford University Press.
- Janjić, Z. I., 1994, The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review* 122, 927-945.
- Jeong, J. and Lee, S.-J., 2018, A Statistical Parameter Correction Technique for WRF Medium-Range Prediction of Near-Surface Temperature and Wind Speed Using Generalized Linear Model. *Atmosphere*.  
<https://doi.org/10.3390/atmos9080291>.
- Karagulian, F., Temimi, M., Ghebreyesus, D., Weston, M., Kondapalli, N. K., Valappil, V. K., Aldababesh, A., Lyapustin, A., Chaouch, N. and Al Hammadi, F., 2019, Analysis of a severe dust storm and its impact on air quality conditions using WRF-Chem modeling, satellite imagery, and ground observations. *Air Quality, Atmosphere & Health* 12, 453-470.
- Lin, Y.-L., Farley, R. D. and Orville, H. D., 1983, Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *Journal of Applied Meteorology and climatology* 22, 1065-1092.
- López Gómez, J., Troncoso Pastoriza, F., Granada Álvarez, E. and Eguía Oller, P., 2020, Comparison between Geostatistical Interpolation and Numerical Weather Model Predictions for Meteorological Conditions Mapping. *Infrastructures*, 5(2), 15.
- Mass, C. F., Baars, J., Wedam, G., Gritmit, E. and Steed, R., 2008, Removal of systematic model bias on a model grid. *Weather and Forecasting* 23, 438-459.
- McCollor, D. and Stull, R., 2008, Hydrometeorological accuracy enhancement via postprocessing of numerical weather forecasts in complex terrain. *Weather and forecasting* 23, 131-144.
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J. and Clough, S. A., 1997, Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 102, 16663-16682.
- Mohammadi, S. A., Azadi, M. and Rahmani, M., 2017, Comparison of spatial interpolation methods for gridded bias removal in surface temperature forecasts. *Journal of Meteorological Research* 31, 791-799.
- Robertson, G. P., 2008, *GS+：“Geostatistics for the Environmental Sciences”*, Gamma Design Software, Plainwell, Michigan USA. Pdf document available for free at: <https://geostatistics.com/files/GSPlusUserGuide.pdf>.



- Samalot, A., Astitha, M., Yang, J. and Galanis, G., 2019, Combined Kalman Filter and Universal Kriging to Improve Storm Wind Speed Predictions for the Northeastern United States. *Weather and Forecasting* 34, 587–601.
- Singh, J., Yeo, K., Liu, X., Hosseini, R. and Kalagnanam, J. R., 2015, Evaluation of WRF model seasonal forecasts for tropical region of Singapore. *Advances in Science and Research* 12, 69–72.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W. and Powers, J. G., 2008, A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Technical note-475+ STR.
- Solano, J. C., Montaña, T., Maldonado-Correa, J., Ordóñez, A. and Pesantez, M., 2021, Correlation between the wind speed and the elevation to evaluate the wind potential in the southern region of Ecuador. *Energy Reports* 7, 259–268.
- Taylor, K. E., 2001, Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 106, 7183–7192.
- Termonia, P. and Deckmyn, A., 2007, Model-inspired predictors for model output statistics (MOS). *Monthly weather review* 135, 3496–3505.
- Valappil, V. K., Temimi, M., Weston, M., Fonseca, R., Nelli, N. R., Thota, M. and Kumar, K. N., 2020, Assessing Bias correction methods in support of operational weather forecast in arid environment. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 56, 333–347.
- Wilks, D. S., 2011, *Statistical methods in the atmospheric sciences* (Vol. 100). Academic Press.
- Yu, C., Zhao, T., Bai, Y., Zhang, L., Kong, S., Yu, X., He, J., Cui, C., Yang, J. and You, Y., 2020, Heavy air pollution with a unique “non-stagnant” atmospheric boundary layer in the Yangtze River middle basin aggravated by regional transport of PM 2.5 over China. *Atmospheric Chemistry and Physics* 20, 7217–7230.

## Post Processing of WRF Model Output by Cokriging Method for Daily Average Wind Speed and Relative Humidity on Iran

Shokouhi, M.<sup>1\*</sup>, Asadi Oskouei, E.<sup>1</sup> and Mohammadpour Penchah, M. R.<sup>1</sup>

*1. Assistant Professor, Atmospheric Sciences and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran*

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

### Summary

Weather forecasting and monitoring systems based on numerical weather forecasting models have been increasingly used to manage issues related to meteorology and agriculture. Using more accurate daily average wind speed (10m) and relative humidity forecasts can be helpful in this regard. But systematic and random errors in the model affect the accuracy of forecasts. In this study, the model errors during the 5 and 14 days training period in the same climate areas on the points of the network where the observations are available were calculated. Then the errors were generalized on all points of the network using the cokriging interpolation method. This preserves the model forecasts for other points of the network and only error values are applied to them. To better evaluate the model, the spatial and temporal distribution of daily average wind speed (10m) and relative humidity forecast errors were also investigated over Iran. Observed daily wind speed and relative humidity data from 560 meteorological stations for the period 1/11/2019 to 1/2/2021 were used to evaluate the WRF model performance. The WRF model was run daily at 12UTC, with a forecast time of 120 hours, and first 12 hours of each run was consider as the model spin-up time and was not used in errors calculation. In order to correct wind speed and relative humidity forecast errors for next three days (forecasts of 36, 60 and 84 hours), the forecasts for each day in the period of 11/1/ 2019 to 1/2/2021, was extracted from the model outputs. In order to evaluate the error correction method, the skill score index was used. The validation results of the error correction method showed that the absolute mean error value, correlation coefficient and RMSE improved after the error correction compared to results that were before the error correction, which showed that the error correction method can be used for other network points that did not contain observational data. In general after correction, the RMSE for wind speed and relative humidity forecasts could decrease by 13% and 18%, and the skill score could increase to a maximum of 160% and 308%, respectively. Value of correlation coefficient, after correcting the model error, was significantly increased, compared to the raw model output. In general skill score for the raw wind speed and relative humidity forecast for more than 50% of the days was more than -0.5 and -0.3, but after corrections were increased to 0.2, 0.4 respectively. Without exception, all climatic regions after error correction have higher skill scores than before error correction, so that the model skill score for most climatic regions after error correction was reached above zero for more than 75% of the days. The results showed that errors of the model in different months, places and climatic zones did not have a uniform distribution. In general, the model underestimated the wind speed and overestimated the relative humidity in most areas. In general, the lowest skill scores for relative humidity forecasts occurred in the colder months of November to February in most climatic zones. The 14-day error correction method did not improve the modeling skill score much compared to the 5-day error correction method, and they acted almost similarly. Knowing the spatial and temporal distribution of model forecast error can be helpful for researchers to have an overview of the areas (and months) where the model forecast error can be high or low.

**Keywords:** Climatic Zones, Cokriging, Interpolation, Skill Score, Systematic Error.

---

\* Corresponding author:

mojtabashokohi@gmail.com