

پس‌پردازش خروجی مدل WRF به روش کوکریجینگ، برای کمیت‌های دمای کمینه و بیشینه بر روی ایران

مجتبی شکوهی^{۱*}، ابراهیم اسعدی اسکویی^۱ و محمدرضا محمدپور پنجاه^۱

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

(دریافت: ۱۴۰۰/۵/۲۳، پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰)

چکیده

در مسائل مرتبط با هواشناسی، آب‌شناسی و کشاورزی دسترسی به پیش‌بینی‌های دقیق دمای کمینه و بیشینه در هر مکانی ضروری است. از این‌رو استفاده از پیش‌بینی‌های با دقت مناسب مدل WRF در تمام نقاط شبکه ضروری است. اما خروجی مدل با خطای سامانمند همراه است. هدف این مطالعه تصحیح خطای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته دمای بیشینه و کمینه 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 ۲۰۱۹/۱۱/۱۱ 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. RMSE برون‌داد خام مدل برای کل کشور در پیش‌بینی‌های دمای بیشینه و کمینه به ترتیب تقریباً ۶ و ۵ درجه سلسیوس است، که بعد از تصحیح، به ترتیب به کمتر از ۲ و ۴ درجه می‌رسند. تغییرپذیری نمره مهارت در تمامی نواحی اقلیمی و ماه‌های مختلف بعد از تصحیح خطا بسیار کاهش یافته و در محدوده صفر تا یک قرار می‌گیرد. 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

(Chaotic) جریانات جوی می‌باشد (مک کالر و استول، ۲۰۰۸). خطاهای سیستماتیک عمدتاً در اثر تفاوت بین توپوگرافی 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). از روش‌های آماری می‌توان برای رفع خطای سامانمند مدل استفاده کرد (هکر و رایف، ۲۰۰۷). روش‌های پس‌پردازش آماری برون‌داد مدل بر اساس محاسبه روابط

پیش‌بینی‌های دقیق آب‌وهوایی در مسائل مرتبط با هواشناسی، آب‌شناسی و کشاورزی، حائز اهمیت است (جنونگ و لی، ۲۰۱۸). استفاده از پیش‌بینی هرچه دقیق‌تر مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا مانند WRF (Weather Research and Forecasting) می‌تواند به پژوهشگران مسائل مرتبط با هواشناسی، آب‌شناسی و کشاورزی 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 (سیستماتیک) و ۲- خطای تصادفی (محمدی و همکاران، ۲۰۱۷). خطای تصادفی بیشتر مربوط به ذات بی‌نظم

برونداد مدل با مشاهدات در بازه زمانی گذشته، و تعمیم آنها به پیش‌بینی‌های آینده عمل می‌کنند (ترمونیا و دکمین، ۲۰۰۷). 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. هکر و رایف (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 شد و سپس خطای ایستگاهی به نقاط شبکه با استفاده از مدل‌های کوواریانسی تعمیم داده شد. نصرافهانی و همکاران (۱۳۹۸) عملکرد مدل WRF را برای پیش‌بینی دما در حوزه آبریز زایندرود بررسی کردند، نتایج آنها نشان داد از لحاظ آماری داده‌های مدل ارتباط قابل‌قبولی با داده‌های مشاهده شده دارند. مس و همکاران (۲۰۰۸) ابتدا برونداد مدل عددی میان مقیاس MM5 را با استفاده از روش MOS پس‌پردازش کرده و سپس خروجی پس‌پردازش شده را با استفاده از درون‌یابی به روش ارتقا 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 تعمیم دادند. هردیا و همکاران (۲۰۱۸) خطای پیش‌بینی بارش توسط مدل WRF در نقاط مشاهداتی را با استفاده از روش کریجینگ به سایر نقاط شبکه تعمیم 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 به‌دست آمده را به نقاط شبکه تعمیم 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).

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 تصحیح شده در دیگر نقاط شبکه. در روش دوم، خطا فقط در نقاطی از شبکه که دارای داده مشاهداتی 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 تعمیم داده می‌شود. بدین ترتیب پیش‌بینی خام مدل برای نقاطی از شبکه که فاقد داده مشاهداتی هستند کنار گذاشته می‌شوند، و مقدار پیش‌بینی تصحیح شده در نقاط دارای داده مشاهداتی به سایر نقاط تعمیم داده می‌شود 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 داده مشاهداتی هستند محاسبه شده و سپس با استفاده از روش درون‌یابی کوکریجینگ، این خطا در سایر نقاط شبکه (که فاقد داده مشاهداتی هستند) برآورد شود، بدین‌صورت خطا در تمام نقاط شبکه برآورد می‌شود و سپس این لایه خطا بر پیش‌بینی‌های خام مدل اعمال می‌شود. بدین ترتیب پیش‌بینی خام مدل برای نقاطی از شبکه که فاقد داده مشاهداتی 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.

بنابراین هدف این مطالعه در مرحله اول ارتقا کیفیت پیش‌بینی‌های مدل عددی وضع هوا WRF، برای دمای بیشینه و کمینه 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 دمای بیشینه و کمینه نیز در سطح

مشابه (از لحاظ شاخص‌های دما، بارش، ارتفاع از سطح دریا) و اجرای روش تصحیح خطا، می‌تواند عوامل بروز خطای پیش‌بینی مدل، مثل توپوگرافی سطحی، گرادیان ارتفاعی، شرایط رطوبتی و ... را محدود به نواحی هم‌اقلیم کند و عوامل ایجاد خطای مدل به سایر نواحی تعمیم داده نشود.

۲-۲. داده‌ها

داده‌های مشاهده شده دمای بیشینه و کمینه روزانه برای کلیه ایستگاه‌های هواشناسی سطح کشور (همدیدی، اقلیم‌شناسی) که به‌صورت روزانه در گزارش‌های سازمان هواشناسی آورده می‌شوند برای دوره ۲۰۱۹/۱۱/۱ الی ۲۰۲۱/۲/۱ تهیه شد. تعداد کل این ایستگاه‌ها ۵۶۰ عدد می‌باشد که در شکل ۱ موقعیت مکانی آنها نشان داده شده است.

۲-۳. خروجی مدل WRF

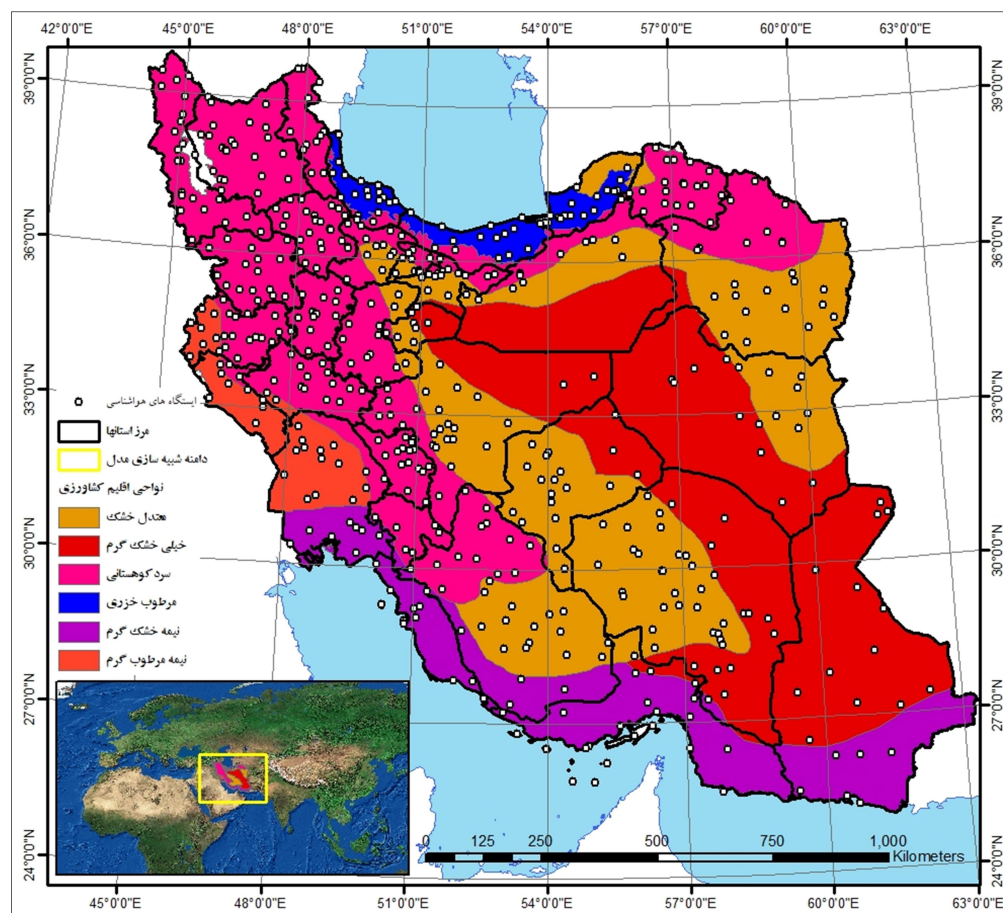
در این مطالعه از خروجی مدل تحقیقات و پیش‌بینی هوا WRF (اسکاماروک و همکاران، ۲۰۰۸)، که توسط سازمان هواشناسی کشور به‌صورت روزانه اجرا می‌شود، استفاده شد. مدل شامل دو دامنه تو در تو با تفکیک افقی دامنه بزرگ‌تر ۲۷ کیلومتر و دامنه کوچک‌تر ۹ کیلومتر است. شکل ۱ نمایی از دامنه استفاده شده (دامنه کوچک‌تر ۹ کیلومتر) برای تحلیل داده‌های پیش‌بینی مدل را نشان می‌دهد. خروجی‌های اجرای مدل WRF استفاده شده در این مطالعه که توسط سازمان هواشناسی کشور به‌صورت روزانه اجرا می‌شود، توسط سایر محققین نیز در سطح کشور مورد استفاده قرار گرفته است (آزادی و همکاران، ۱۳۹۰؛ محمدی و همکاران، ۲۰۱۷).

کشور بررسی می‌شود. آگاهی از توزیع مکانی و زمانی خطای برون‌داد مدل عددی وضع هوا و تصحیح خطای مدل می‌تواند به محققین در کاربرد هر چه 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 اگروکلیمایی (هواشناسی کشاورزی) تقسیم‌بندی کرده است. این مناطق شامل، منطقه نیمه‌مرطوب گرم، نیمه‌خشک گرم، مرطوب خزری، سرد کوهستانی، خیلی خشک 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 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. علاوه بر مواردی که ذکر شد، به‌کارگیری ایستگاه‌ها در یک اقلیم



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

۴-۲. استخراج پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت دمای بیشینه و

کمینه مدل

مدل به صورت روزانه در ساعت 12 UTC 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) دمای بیشینه و کمینه، 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 دمای بیشینه و کمینه برای هر روز از خروجی مدل، به ترتیب حداکثر و حداقل دمای پیش‌بینی شده، از پیش‌بینی‌های ساعتی استخراج شده و

به عنوان دمای بیشینه و کمینه برای آن روز لحاظ می‌شود.

۵-۲. 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 می‌شود 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 آموزش تا ۱۵ روز باعث کاهش RMSE شده است و افزایش طول دوره آموزش به بیش از ۱۵ روز حتی ممکن

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 می‌شود (گووآرتس، ۱۹۹۷).

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

$$; \sum_{i_2=1}^m w_{i_2} = 0, \sum_{i_1=1}^n w_{i_1} = 1 \quad (2)$$

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 (Residual Sum of Squares: RSS) بین واریوگرام تجربی و مدل واریوگرامی برازش‌داده‌شده (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 می‌شود. 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 ($\hat{e}_{ij}$). به عبارتی با استفاده از این روش درون‌یابی، خطاها در نقاط ایستگاه‌ها 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 می‌شود.

$$\bar{e}_j = \frac{\sum_{i=1}^N e_{ij}}{N} \quad (3)$$

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، برون‌داد مدل WRF در روز اول (۲۴ ساعت اول) برای دمای پیشینه و کمینه در هر اجرای روزانه مدل استخراج شد. سپس مقادیر این برون‌دادها طی دوره آموزش برای دمای پیشینه و کمینه در محل ایستگاه‌ها استخراج شد. در ادامه خطای بین مقادیر برون‌داد مدل و مشاهده‌شده 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 مشاهده‌شده و مقدار مدل برای روز i ام در محل ایستگاه‌ها است. با استفاده از روش‌های خانواده کوکریجینگ (کوکریجینگ ساده و کوکریجینگ) خطا در نقاط شبکه برآورد شد. از متغیر کمکی ارتفاع نقاط در روش کوکریجینگ استفاده شده است. کوکریجینگ 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 کوکریجینگ 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 استفاده کند. از آنجاکه ارتفاع توپوگرافی عامل مهمی در پیش‌بینی دمای دومتري است (نصراصفهانی و همکاران، ۱۳۹۸)، 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

میانگین، واریانس و همبستگی پیش‌بینی مدل با شرایط مشاهده شده را لحاظ کند. بنابراین از نمره مهارت (Skill Score: SS) بین شبیه‌سازی مدل (m) و مشاهدات (o) به‌صورت زیر استفاده شد (شکوهی و همکاران، ۱۳۹۷).

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

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 هر چه 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. بحث و نتایج

نتایج اعتبارسنجی روش تصحیح خطا نشان داد، به‌طور متوسط برای کل کشور قدرمطلق میانه خطا، ضریب همبستگی و RMSE برای دمای بیشینه و کمینه، بعد از تصحیح خطا نسبت به قبل از تصحیح خطا بهبود می‌یابد (شکل ۲). علاوه بر این همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، بعد از تصحیح خطا تغییرپذیری قدرمطلق میانه خطا، ضریب همبستگی و RMSE نسبت به قبل از تصحیح ضریب کمتری می‌شود (طول جعبه‌ها در نمودار جعبه‌ای کمتر می‌شود). 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. به‌عبارتی می‌توان گفت روش تصحیح خطا برای سایر نقاط شبکه که در برگزیده ایستگاه مشاهداتی نیستند، دارای اعتبار است.

که در آن $\hat{e}_{ij}$ 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 $m_{Correctionj}$ به‌صورت زیر به‌دست می‌آید.

$$m_{Correctionj} = m_{rj} - \bar{e}_j \quad (4)$$

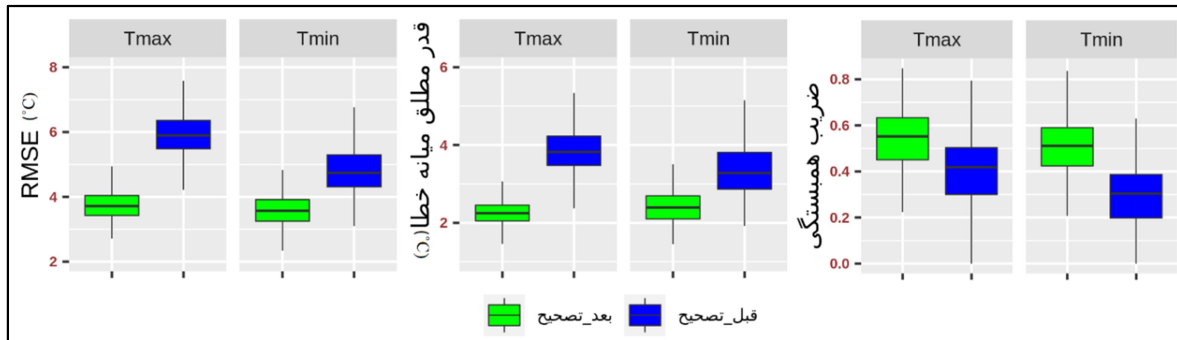
که در آن m_{rj} و $m_{Correctionj}$ به‌ترتیب پیش‌بینی خام مدل و پیش‌بینی تصحیح شده مدل برای نقطه j ام در شبکه است.

۲-۶. اعتبارسنجی روش تصحیح خطای مدل

به‌منظور اعتبارسنجی (بررسی تعمیم‌پذیری روش تصحیح خطا) روش تصحیح خطا، بیست درصد از کل ایستگاه‌ها در هر روز به‌صورت 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 به‌منظور 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.

۲-۷. ارزیابی روش تصحیح خطای پیش‌بینی‌های مدل

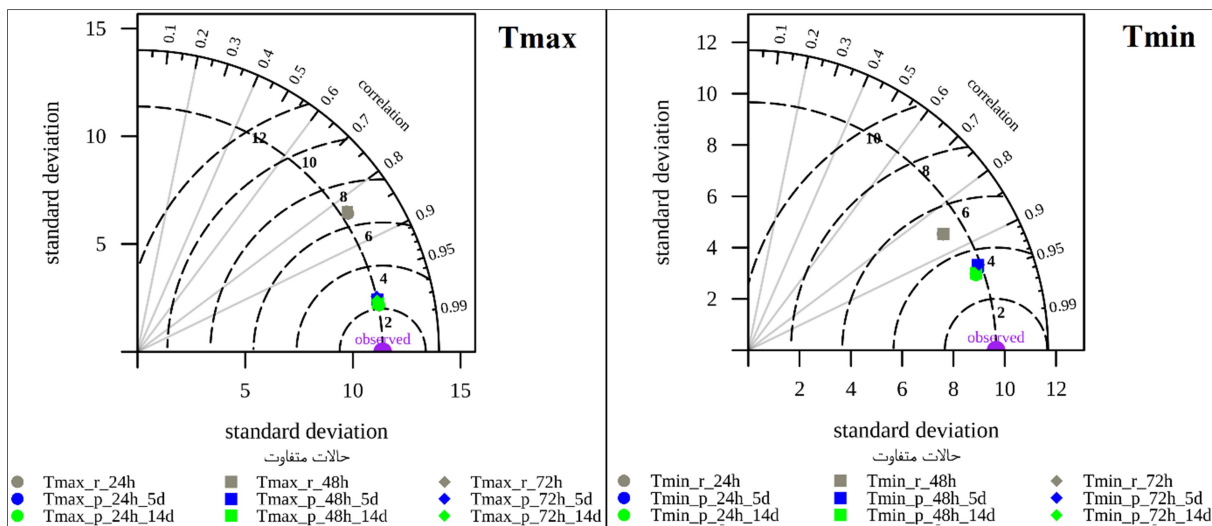
برای ارزیابی توانایی مدل در شبیه‌سازی یا پیش‌بینی، نیاز به شاخصی است که همزمان سه پارامتر مهم تطابق،



شکل ۲. نمودار جعبه‌ای اعتبارسنجی روش تصحیح خطا برای دمای بیشینه (Tmax) و کمینه (Tmin) بر اساس قدرمطلق میانه خطا، ضریب همبستگی و RMSE، برای کل کشور.

روش ۵d و ۱۴d است. بر اساس نتایج نمودار تیلور می‌توان گفت RMSE پرونداد خام مدل برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته دمای بیشینه اندکی بیشتر از ۶ درجه سلسیوس، و برای دمای کمینه این مقدار تقریباً ۵ درجه سلسیوس می‌باشد (شکل ۳). این در حالی است که بعد از تصحیح خطا، RMSE برای دمای کمینه و بیشینه به ترتیب به اندکی کمتر از ۴ درجه سلسیوس و اندکی بیشتر از ۲ درجه سلسیوس می‌رسد (شکل ۳).

به‌طور کلی میزان توافق یا شباهت روش تصحیح خطای مدل، با دوره آموزش ۵روزه (۵d)، ۱۴روزه (۱۴d) و پرونداد خام مدل (r) برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته (۲۴h، ۴۸h، ۷۲h) دمای بیشینه و کمینه 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 نشان دهنده پرونداد خام مدل و رنگ‌های آبی و سبز نشان دهنده پرونداد پس‌پردازش شده (به‌ترتیب

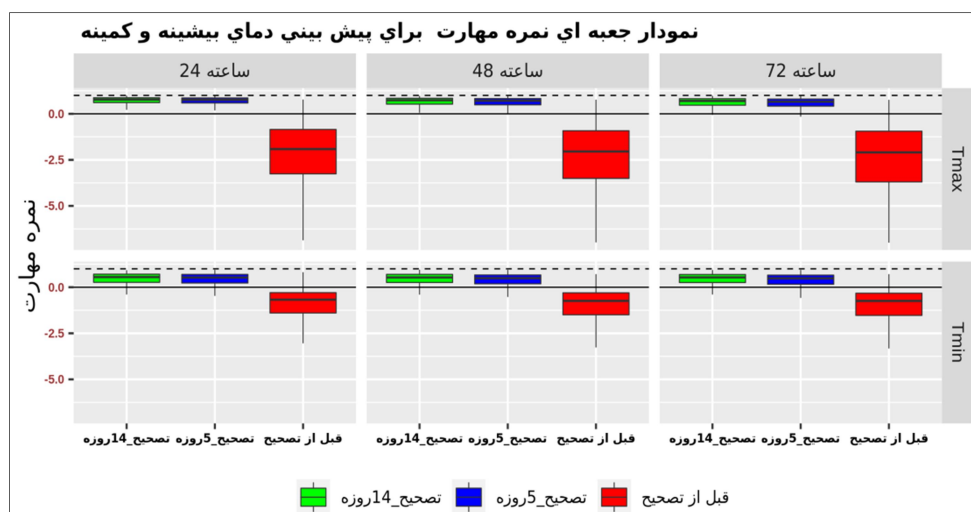


شکل ۳. نمودار تیلور برای مقایسه حالات پس‌پردازش (تصحیح خطای مدل) دمای بیشینه (Tmax) نمودار سمت چپ و کمینه (Tmin) نمودار سمت راست. بعد از زاویه‌ای نشان دهنده همبستگی (خطوط خاکستری) و خط‌های مقطع نشان‌دهنده RMSE است. رنگ‌های خاکستری، آبی و سبز به ترتیب نشان دهنده پرونداد خام مدل (r)، روش تصحیح خطای مدل با دوره آموزش ۵روزه (۵d) و روش تصحیح خطای مدل با دوره آموزش ۱۴روزه (۱۴d). شکل‌های دایره، مربع و لوزی بر روی نمودار به ترتیب نشان‌دهنده پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ است. پسوند p به معنای پرونداد پس‌پردازش شده مدل است. به عنوان مثال، Tmax_p_24h_14d به معنی پس‌پردازش پرونداد پیش‌بینی ۲۴ ساعته مدل برای دمای بیشینه بر اساس دوره آموزش ۱۴روزه.

به‌طور کلی مقدار ضریب همبستگی، بعد از تصحیح خطای مدل (برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته دمای بیشینه و کمینه) نسبت به برون‌داد خام مدل (داده تصحیح نشده) افزایش قابل توجهی دارد (شکل ۳). این مقدار برای دمای بیشینه از ۰/۸۴ قبل تصحیح به ۰/۹۸ می‌رسد. در کل از نمودار تیلور می‌توان نتیجه گرفت تصحیح خطای مدل سبب شده، برون‌داد خام مدل بسیار به مشاهدات (Observed) نزدیک شود. برون‌داد خام مدل برای پیش‌بینی‌های دمای کمینه نسبت به دمای بیشینه به مشاهدات نزدیک‌تر است؛ اما پس از تصحیح خطای مدل، این دمای بیشینه است که به مشاهدات (Observed) نزدیک‌تر می‌شود (شکل ۳). با نگاه به شکل ۳ می‌توان دریافت روش تصحیح ۱۴ روزه (۱۴d) اندکی نسبت به روش ۵ روزه (۵d) به مشاهدات نزدیک‌تر است و این برای دمای کمینه واضح‌تر است. به عبارتی می‌توان گفت برای دمای کمینه نسبت به دمای بیشینه، روش تصحیح ۱۴ روزه (۱۴d) نسبت به روش ۵ روزه (۵d) اندکی بیشتر سبب بهبود برون‌داد خام مدل می‌شود (شکل ۳).

نمودار جعبه‌ای نمره مهارت برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته دمای بیشینه و کمینه، 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 به‌صورت مجزا آورده شده است. در کل تغییرپذیری برون‌داد خام مدل برای پیش‌بینی دمای کمینه نسبت به دمای بیشینه کمتر است (جعبه‌های قرمز رنگ در شکل ۴). نمره مهارت مدل برای پیش‌بینی‌های خام دمای کمینه و بیشینه 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 دمای کمینه نسبت به دمای بیشینه بهتر است (جعبه‌های قرمز رنگ در شکل ۴). نتایج مطالعه مولر و همکاران (۲۰۱۶) نیز نشان داد مدل، دمای کمینه را بهتر از دمای بیشینه شبیه‌سازی می‌کند. به‌طوری که میانه نمره مهارت برای پیش‌بینی‌های خام دمای کمینه برای بیش از ۵۰ درصد روزها بیش از ۰/۷۶- بوده است و این برای دمای بیشینه ۲- است (جعبه‌های قرمز رنگ در شکل ۴). پس از تصحیح خطای مدل برای پیش‌بینی‌های دمای کمینه و بیشینه، 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). پس از تصحیح خطای مدل، تغییرپذیری نمره مهارت نسبت به قبل از تصحیح خطا بسیار کمتر شده و تقریباً در محدوده صفر تا یک قرار می‌گیرد (شکل ۴ و ۵).



شکل ۴. نمودار جعبه‌ای نمره مهارت برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته دمای بیشینه (Tmax) و کمینه (Tmin)، 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 ۱۴ روزه (تصحیح_۱۴_روزه) برای روزهای دوره آماری. خطوط خطا در پایین و بالای هر جعبه به‌ترتیب صدک ۱۱ و ۹۹ ام.



شکل ۵. نمودار جعبه‌ای نمره مهارت برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته دمای بیشینه (Tmax) و کمینه (Tmin)، برای تصحیح خطای مدل با دوره آموزش ۵ روزه (تصحیح_۵_روزه) و روش تصحیح خطای مدل با دوره آموزش ۴ روزه (تصحیح_۴_روزه) برای روزهای دوره آماری. خطوط خطا در پایین و بالای هر جعبه به ترتیب صدک ۱۱ و ۹۹ام.

۴۸ ساعته نسبت به ۷۲ ساعته اندکی بهتر است (جدول ۱)؛ اما همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، این تفاوت‌ها محسوس نیست. علاوه بر این میانه نمره مهارت برای تصحیح پیش‌بینی‌ها به روش ۱۴ روزه نسب به روش ۵ روزه اندکی بهتر است (جدول ۱) اما همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است، این تفاوت‌ها معنادار نمی‌باشد. همان‌طور که در شکل‌های ۵، ۶ و جدول ۱ نشان داده شد، نمره مهارت مدل بعد از تصحیح خطا برای پیش‌بینی‌های دمای بیشینه، افزایش قابل توجه‌ای یافته و تغییرات آن بسیار کاهش می‌یابد.

روش تصحیح خطای ۱۴ روزه نسبت به روش تصحیح خطای ۵ روزه چندان سبب بهبود نمره مهارت مدل نشده است، و تقریباً شبیه به یکدیگر عمل کرده‌اند (شکل ۵). بعد از تصحیح خطا نمره مهارت مدل، برای پیش‌بینی‌های دمای بیشینه نسبت به دمای کمینه بهتر شده است، به‌طوری که در بیش از ۵۰ درصد روزها نمره مهارت برای پیش‌بینی‌های دمای بیشینه بیش از ۰/۷۰، و برای دمای کمینه بیش از ۰/۵۲ است (شکل ۵). در شکل ۵ و جدول ۱ مشخص است که، میانه نمره مهارت برای پیش‌بینی‌های ۲۴ ساعته نسبت به ۴۸ ساعته و

جدول ۱. میانه نمره مهارت برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته دمای بیشینه و کمینه، برای تصحیح خطای مدل به روش دوره آموزش ۵ و ۱۴ روزه و برون داد خام مدل برای کل کشور.

کمیت	میانه نمره مهارت								
	پیش‌بینی ۲۴ ساعته			پیش‌بینی ۴۸ ساعته			پیش‌بینی ۷۲ ساعته		
	تصحیح ۵ روزه	تصحیح ۱۴ روزه	برونداد خام مدل	تصحیح ۵ روزه	تصحیح ۱۴ روزه	برونداد خام مدل	تصحیح ۵ روزه	تصحیح ۱۴ روزه	برونداد خام مدل
دمای بیشینه	۰/۷۶	۰/۷۷	-۲/۰۲	۰/۷۱	۰/۷۴	-۲/۲۱	۰/۶۶	۰/۷	-۲/۳۱
دمای کمینه	۰/۵۳	۰/۵۵	-۰/۶۹	۰/۴۹	۰/۵۳	-۰/۷۵	۰/۴۸	۰/۵۲	-۰/۷۶

کاهش می‌یابد و نمره مهارت تقریباً در بین نواحی عملکرد مشابهی دارد (شکل ۶ و ۷). نمره مهارت مدل قبل از تصحیح خطا در تمامی نواحی اقلیمی برای بیش از ۷۵ روزها کمتر از صفر بوده است (به‌جز ناحیه مرطوب خزری برای پیش‌بینی دمای بیشینه که برای بیش از ۵۰ روزها کمتر از صفر بوده). در تمامی نواحی اقلیمی بعد از تصحیح خطا دارای نمره مهارت بالاتری نسبت به قبل تصحیح دارند (شکل ۶). به‌طوری که نمره مهارت مدل برای اکثر نواحی اقلیمی بعد از تصحیح خطا برای بیش از ۷۵ درصد روزها به بالای صفر خواهد رسید (شکل ۶ و ۷). تفاوت چندان مشخصی بین نمره مهارت مدل برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته دمای بیشینه و کمینه برای قبل و بعد از تصحیح خطا در بین نواحی اقلیمی مشاهده نشد؛ اما به‌طور کلی می‌توان گفت اندکی میانه نمره مهارت برای پیش‌بینی ۲۴ ساعته نسبت به ۴۸ ساعته و ۴۸ ساعته نسبت به ۷۲ ساعته بیشتر است (شکل ۶ و ۷). تفاوت چندان مشخصی بین نمره مهارت مدل برای تصحیح خطا به‌روش ۵ و ۱۴ روزه در بین نواحی اقلیمی مشاهده نشد؛ اما به‌طور کلی می‌توان گفت اندکی تغییرپذیری میانه نمره مهارت برای روش ۱۴ روزه کمتر است (شکل ۷).

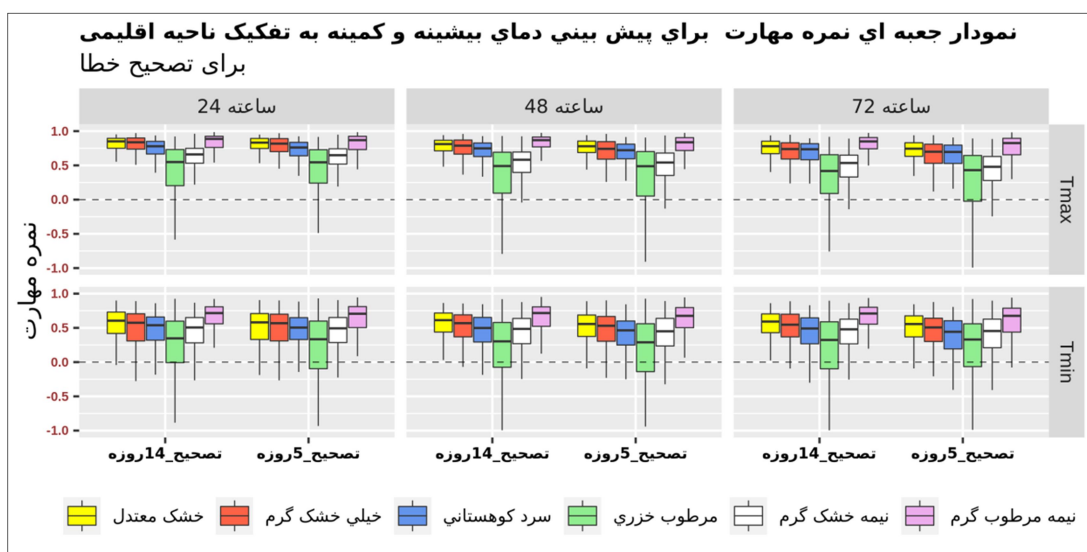
عملکرد مدل قبل و بعد از تصحیح خطا در هر ناحیه اقلیمی در شکل ۶ نشان داده شده است. در شکل ۶ و ۷ نمودار جعبه‌ای نمره مهارت برای پیش‌بینی‌های دمای بیشینه و کمینه به تفکیک ناحیه اقلیمی نشان داده شده است. برای این که نمودارهای جعبه‌ای مربوط به تصحیح خطای مدل با دوره آموزش ۵ و ۱۴ روزه در شکل ۶ با جزئیات بهتری دیده شوند، این قسمت در شکل ۷ به‌صورت مجزا آورده شده است. در حالت قبل از تصحیح خطا و برای داده‌های خام مدل، نمره مهارت مدل برای پیش‌بینی دمای کمینه در تمامی نواحی اقلیمی (به‌جز ناحیه مرطوب خزری) بهتر از پیش‌بینی دمای بیشینه است (شکل ۶). تغییرپذیری نمره مهارت مدل قبل از تصحیح خطا (داده خام مدل)، در تمامی نواحی (به‌جز ناحیه خزری) برای پیش‌بینی دمای کمینه کمتر از دمای بیشینه است (شکل ۶). اما بعد از تصحیح خطا در تمامی نواحی اقلیمی این موضوع برعکس شده و نمره مهارت برای پیش‌بینی دمای بیشینه بیشتر از دمای کمینه است و تغییرپذیری آن نیز کمتر می‌شود (شکل ۷). اما می‌توان گفت تغییرپذیری نمره مهارت در تمامی نواحی اقلیمی بعد از تصحیح خطا در مقایسه با قبل از تصحیح خطا به طرز چشم‌گیری



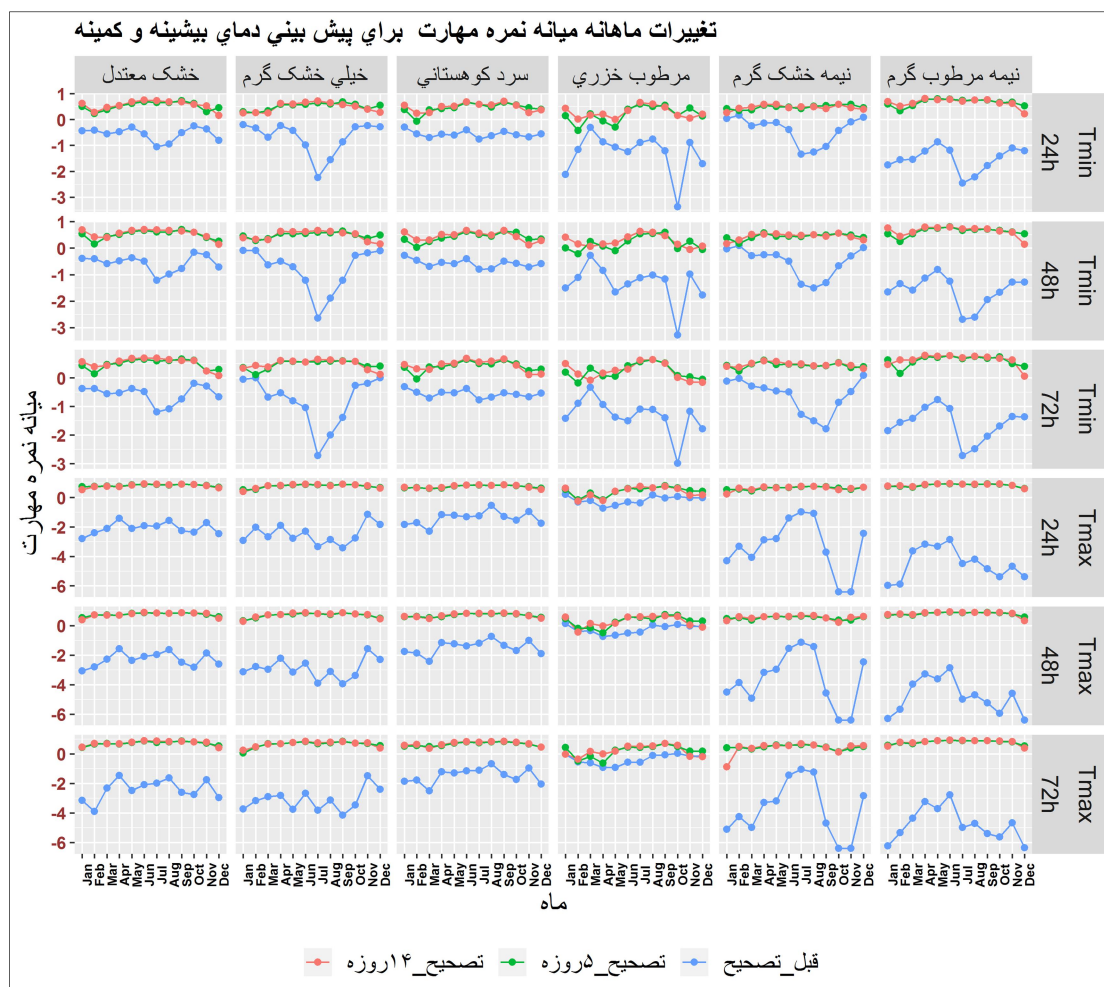
شکل ۶. نمودار جعبه‌ای نمره مهارت برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته دمای بیشینه (Tmax) و کمینه (Tmin)، قبل از تصحیح خطای مدل و بعد از تصحیح خطای مدل با دوره آموزش ۵ روزه (تصحیح_۵روزه) و روش تصحیح خطای مدل با دوره آموزش ۱۴ روزه (تصحیح_۱۴روزه) به تفکیک ناحیه اقلیمی. خطوط خطا در پایین و بالای هر جعبه به ترتیب صدک ۱۱ و ۹۹ام.

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 برون داد مدل قبل از تصحیح خطا دارای تغییرپذیری زیادی در بین ماه‌ها است، به طوری که در برخی مناطق مانند ناحیه نیمه خشک گرم شاهد یک الگوی کاهشی افزایشی در میانه نمره مهارت هستیم (شکل ۸). این در حالی است که بعد از تصحیح خطای مدل در تمامی نواحی اقلیمی و در تمام ماه‌ها، نمره مهارت برای پیش‌بینی‌های دمای بیشینه و کمینه بالاتر از صفر و تقریباً در تمام ماه‌ها یکسان بوده و در مقایسه با حالت قبل از تصحیح خطا دارای تغییرپذیری بسیار کمتری است (شکل ۸). در نواحی خشک و معتدل، خیلی خشک و گرم، سرد کوهستانی و نیمه مرطوب گرم در حالت قبل از تصحیح برون داد مدل، نمره مهارت برای پیش‌بینی دمای کمینه در ماه جولای به حداقل خود می‌رسد (شکل ۸). در ناحیه خزری این مقدار در ماه اکتبر به حداقل خود می‌رسد (شکل ۸). این در حالی است که در ناحیه سرد کوهستانی نمره مهارت (برای برون داد خام مدل) برای پیش‌بینی دمای کمینه تقریباً در تمام ماه‌ها بین صفر و منفی یک قرار داشته و تغییرپذیری کمتری دارد (شکل ۸).

قبل از تصحیح خطا در بین نواحی اقلیمی، ناحیه نیمه مرطوب گرم دارای کمترین میانه نمره مهارت برای پیش‌بینی‌های دمای بیشینه و کمینه است (شکل ۶). این در حالی است که بعد از تصحیح خطا میانه نمره مهارت مدل برای پیش‌بینی‌های دمای بیشینه و کمینه برای ناحیه نیمه مرطوب گرم به بالاترین مقدار در بین سایر نواحی خواهد رسید (شکل ۶ و ۷). نمره مهارت مدل قبل از تصحیح خطا برای پیش‌بینی دمای بیشینه در ناحیه مرطوب خزری نسبت به سایر نواحی بیشتر است و تغییرپذیری آن نسبت به سایر نواحی کمتر است (شکل ۶). این در حالی است که بعد از تصحیح خطا این موضوع برعکس شده و نمره مهارت مدل برای پیش‌بینی دمای بیشینه در ناحیه مرطوب خزری نسبت به سایر نواحی کمتر شده و تغییرپذیری آن نسبت به سایر نواحی بیشتر است (شکل ۶ و ۷). میانه نمره مهارت مدل قبل از تصحیح خطا برای پیش‌بینی دمای کمینه در ناحیه نیمه خشک گرم نسبت به سایر نواحی بیشتر است (شکل ۶)، اما این ناحیه سرد کوهستانی است که دارای کمترین تغییرپذیری نمره مهارت برای پیش‌بینی دمای کمینه است (شکل ۶). تغییرات میانه نمره مهارت برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته دمای بیشینه و کمینه، قبل و بعد از تصحیح خطای



شکل ۷. نمودار جعبه‌ای نمره مهارت برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته دمای بیشینه (Tmax) و کمینه (Tmin)، برای تصحیح خطای مدل با دوره آموزش ۵ روزه (تصحیح_۵ روزه) و روش تصحیح خطای مدل با دوره آموزش ۱۴ روزه (تصحیح_۱۴ روزه) به تفکیک ناحیه اقلیمی. خطوط خطا در پایین و بالای هر جعبه به ترتیب صدک ۱۱ و ۹۹ام.



شکل ۸. تغییرات میانه نمره مهارت در هر ماه برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته دمای بیشینه (Tmax) و کمینه (Tmin)، 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 ۱۴ روزه (تصحیح_۱۴روزه) به تفکیک ناحیه اقلیمی.

است. همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است متوسط خطای مدل برای شبیه‌سازی دمای بیشینه و کمینه در اکثر نقاط کشور منفی است، به عبارتی مدل، دمای بیشینه و کمینه را در اکثر مناطق کشور کمتر از مقدار مشاهده شده برآورد می‌کند. به‌طوری که متوسط خطای مدل برای شبیه‌سازی دمای بیشینه، در برخی مناطق در محدوده ۱۹- تا ۱۰- درجه سانتی‌گراد قرار دارد، به عبارتی مدل، دمای بیشینه را در این مناطق با متوسط خطای تا ۱۹ درجه سانتی‌گراد، کمتر از مقادیر مشاهده شده برآورد کرده است (شکل ۹، شکل سمت چپ). به‌طور کلی متوسط خطای مدل برای شبیه‌سازی دمای کمینه کمتر از شبیه‌سازی دمای بیشینه است (شکل ۹). به‌شکلی که

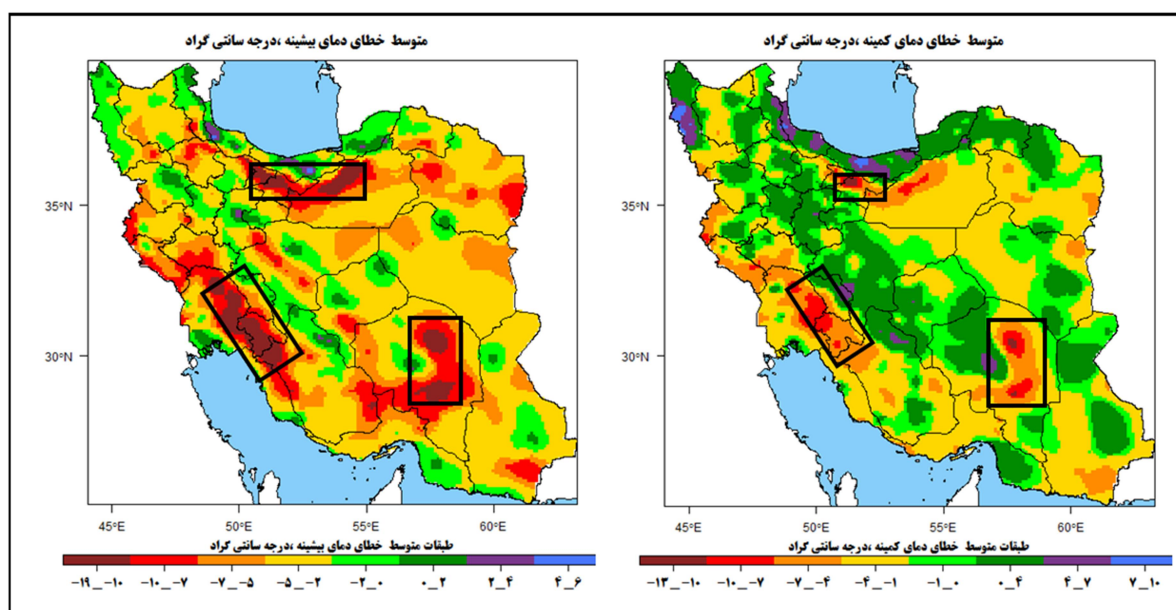
به‌طور کلی می‌توان گفت برای نواحی دارای اقلیم خشک و گرم، نمره مهارت برون‌داد خام مدل برای پیش‌بینی دمای کمینه در ماه‌های جولای، اگوست و سپتامبر به حداقل خود می‌رسد (شکل ۸). در ناحیه نیمه‌خشک گرم در حالت قبل از تصحیح برون‌داد مدل، نمره مهارت برای پیش‌بینی دمای بیشینه در ماه‌های اکتبر و نوامبر به حداقل خود می‌رسد (شکل ۸). نمره مهارت مدل برای تصحیح خطا به‌روش ۵ و ۱۴ روزه در تمام نواحی اقلیمی و در تمام ماه‌ها تقریباً مشابه بوده و در محدوده بین صفر و یک با تغییرپذیری کم قرار می‌گیرد (شکل ۸).

توزیع مکانی طبقات متوسط خطای برون‌داد خام مدل برای شبیه‌سازی دمای بیشینه و کمینه در شکل ۹ نشان داده شده

از برونداد مدل WRF بر روی ایران را بررسی کرد، نتایج برای برای سه ماه اول سال (۲۰۱۲ ژانویه، فوریه و مارس) نشان داد خطای برونداد خام مدل می‌تواند در برخی مناطق به ۱۲ درجه رسیده و به‌طور متوسط در محدوده ۶ تا ۸ درجه قرار گیرد.

متوسط خطای مدل برای شبیه‌سازی دمای بیشینه و کمینه برای سه منطقه که با کادر مشکی رنگ در شکل ۹ مشخص شده، دارای بیشترین خطاها هستند. برونداد مدل برای شبیه‌سازی دمای بیشینه و کمینه در مناطق شرق استان کرمان، شرق و شمال شرق استان خوزستان، نواحی جنوبی استان کهگیلویه و بویراحمد در بین مرز با استان فارس و نواحی مابین استان تهران با البرز و سمنان نسبت به سایر مناطق کشور با متوسط خطای بیشتری همراه است. در این مناطق گرادیان ارتفاعی زیاد است به‌عبارتی نواحی بسیار پست در کنار ارتفاعات قرار گرفته‌اند و این سبب بروز گرادیان ارتفاعی شدیدی در این مناطق شده است که این می‌تواند سبب بروز خطای بیشتر مدل شود. علاوه بر این در نواحی مابین استان تهران و البرز و سمنان به دلیل وجود نواحی صنعتی و تراکم بالای جمعیت، می‌توان گفت وجود جزیره‌های حرارتی، سبب بروز خطا در برونداد مدل می‌شود.

متوسط خطای مدل برای شبیه‌سازی دمای کمینه (شکل ۹، شکل سمت راست)، در برخی مناطق به ۱۰ تا ۱۳- درجه سانتی‌گراد می‌رسد (برونداد مدل کمتر از مقدار مشاهده شده است). البته در نواحی خزری، نواحی شرقی زاگرس مانند مناطق غربی استان اصفهان، استان مرکزی و همدان، شمال فارس و شمال استان کرمان، مدل، دمای کمینه را بیشتر از مقدار مشاهده شده شبیه‌سازی می‌کند (شکل ۹، شکل سمت راست). بهمن‌زاده و همکاران (۱۳۹۸) عملکرد مدل WRF را در تاریخ دوم ژوئن سال ۲۰۱۰ برای منطقه دریای عمان بررسی کردند، نتایج آنها نشان داد در تاریخ مذکور جذر میانگین خطا دمای دومتري در نوار ساحلی دریای عمان در محدوده ۲ تا ۳ درجه سلسیوس است. نصرافهانی و همکاران (۱۳۹۸) نشان دادند به‌طور کلی متوسط خطای مدل WRF برای پیش‌بینی دما در حوزه آبریز زاینده‌رود در محدوده ۲ تا ۳ درجه قرار می‌گیرد. پيله‌وران و اکبری (۱۳۹۷) در بازه زمانی ۳ ماه از اول آوریل تا پایان ژوئن ۲۰۱۸ برونداد مدل WRF برای پیش‌بینی دمای بیشینه و کمینه در استان لرستان بررسی کردند، نتایج آنها نشان متوسط خطای پیش‌بینی برای ایستگاه‌های منتخب بیش از ۳ درجه است. افشاری (۱۳۹۳) پیش‌بینی عددی دمای دو متری با استفاده



شکل ۹. توزیع مکانی طبقات متوسط مقدار خطای برونداد خام مدل برای دمای بیشینه و کمینه طی دوره آماری مورد بررسی.

۴. نتیجه گیری

در این مطالعه برای تصحیح خطای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته دمای بیشینه و کمینه برون‌داد مدل WRF بر روی ایران، روش درون‌یابی کوکریجینگ (با متغیر کمکی ارتفاع توپوگرافی) خطا، توسعه داده شد. در این مطالعه عملکرد مدل WRF برای پیش‌بینی دمای بیشینه و کمینه روزانه در یک دوره ۱۵ ماه برای کل کشور (با ۵۶۰ ایستگاه مشاهداتی) با رویکرد نواحی اقلیمی ارزیابی شد که به نوبه خود تاکنون در سطح کشور کم‌نظیر است. در این راستا به منظور ارزیابی عملکرد برون‌داد خام مدل WRF و روش تصحیح خطا در نواحی مختلف اقلیمی کشور و همچنین اجرای روش تصحیح خطای مدل، کشور ایران به شش ناحیه اقلیمی طبقه‌بندی شد و تحلیل‌های مربوطه در نواحی هم‌اقلیم انجام شد. در این مطالعه ابتدا خطای مدل در نقاطی از شبکه که دارای داده مشاهداتی هستند محاسبه، و سپس با استفاده از روش درون‌یابی کوکریجینگ، این خطا در سایر نقاط شبکه که فاقد داده مشاهداتی هستند، برآورد شد. بدین ترتیب پیش‌بینی خام مدل برای نقاطی از شبکه که فاقد داده مشاهداتی 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 به کارگیری 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 با توجه به وسعت کشور تراکم ایستگاه‌ها برای درون‌یابی خطا با محدودیت همراه است. به منظور 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 داده مشاهداتی ندارند کاهش دهد. نتایج نشان داد برای تمام ایستگاه‌ها مقدار ضریب همبستگی، بعد از تصحیح خطای مدل نسبت به برون‌داد خام مدل افزایش قابل

توجه‌ای دارد و این مقدار برای دمای بیشینه از ۰/۸۴ قبل تصحیح به ۰/۹۸ و برای دمای کمینه از ۰/۸۵ به ۰/۹۵ می‌رسد.

به طور متوسط خطای برون‌داد خام مدل و تغییرات نمره مهارت (برای داده خام مدل)، برای پیش‌بینی دمای بیشینه بیشتر از دمای کمینه است. در کل نمره مهارت برون‌داد خام مدل برای پیش‌بینی دمای بیشینه و کمینه برای بیش از ۷۵ درصد مواقع کمتر از ۰/۲- است که بعد از تصحیح خطا، نمره مهارت افزایش قابل توجهی یافته و برای بیش از ۷۵ درصد مواقع به بیش از ۰/۴ می‌رسد. اما نکته قابل توجه این که بعد از تصحیح خطا، تغییرات نمره مهارت نسبت به قبل از تصحیح خطا کاهش چشم‌گیری می‌یابد. و این نشان می‌دهد نتایج پیش‌بینی مدل با استفاده از تصحیح خطا با تغییرات کمتری همراه است.

به طور کلی نمره مهارت برون‌داد خام مدل برای پیش‌بینی دمای بیشینه در ناحیه نیمه مرطوب گرم نسبت به سایر نواحی اقلیمی کمتر است. اما از طرف دیگر این تغییرات نمره مهارت است که در ناحیه نیمه خشک گرم و خیلی خشک گرم نسبت به سایر نواحی بیشتر است. این در حالی است که نمره مهارت برون‌داد خام مدل برای پیش‌بینی دمای بیشینه در ناحیه مرطوب خنثی نسبت به سایر نواحی بیشتر و با تغییرات کمتری همراه است. به طور کلی نمره مهارت برون‌داد خام مدل برای پیش‌بینی دمای کمینه در ناحیه نیمه مرطوب گرم نسبت به سایر نواحی اقلیمی کمتر است. اما از طرف دیگر این تغییرات نمره مهارت است که در ناحیه مرطوب خنثی نسبت به سایر نواحی بیشتر است. به نظر می‌رسد میزان رطوبت نواحی و دامنه تغییرات شبانه‌روزی دما می‌تواند عوامل مهمی در میزان خطای برون‌داد خام مدل برای پیش‌بینی دمای بیشینه باشد. بعد از تصحیح خطا، نمره مهارت مدل برای پیش‌بینی دمای بیشینه و کمینه در تمامی نواحی اقلیمی برای بیش از ۵۰ درصد مواقع به بالای ۰/۵ رسید و تغییرات نمره مهارت تقریباً برای تمامی نواحی به یک میزان می‌رسد. این نشان می‌دهد روش تصحیح خطا توانسته نمره مهارت

به‌عنوان متغیر کمکی در کوکریجینگ استفاده شد، با این‌حال با توجه به توزیع مکانی خطا در سطح کشور به نظر می‌رسد، رطوبت نیز می‌تواند عاملی در توزیع مکانی خطا باشد.

مراجع

افشاری، ف.، ۱۳۹۳، پیش‌بینی عددی دمای دو متری با استفاده از برون‌داد مدل WRF بر روی ایران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری - دانشگاه هرمزگان - دانشکده علوم پایه.

آزادی، م.، جعفری، س.، میرزایی، ا. و عربلی، پ.، ۱۳۸۷، پس‌پردازش برون‌داد مدل میان مقیاس MM5 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 صحرائیان، ف.، ۱۳۹۰، پس‌پردازش برون‌داد مدل WRF برای بارش روزانه در ایران، مجله تحقیقات منابع آب، ۷ (۳)، ۷۱-۸۱.

بهمن‌زاده، ف.، قادر، س.، حق‌شناس، س. و یازجی، د.، ۱۳۹۸، بررسی موردی عملکرد مدل WRF جهت پیش‌بینی میدان باد تراز ۱۰ متر و دمای تراز دومتر با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و ایستگاه‌های هم‌مدیدی در منطقه دریای عمان و دریای عرب، م. فیزیک زمین و فضا، ۴۵ (۲)، ۴۴۱-۴۵۸.

پيله واران، ر. و اکبری، ز.، ۱۳۹۷، پس‌پردازش برون‌داد مدل WRF برای دماهای بیشینه و کمینه در استان لرستان. نخستین همایش ملی «آینده نگاری راهبردی در حوزه علوم جغرافیایی و مطالعات شهری- منطقه‌ای».

شکوهی، م.، ثنائی نژاد، س.ح. و بنایان اول، م.، ۱۳۹۷، ارزیابی شبیه‌سازی دما و بارش مدل‌های اقلیمی CMIP5 در مطالعات منطقه‌ای تغییر اقلیم (مطالعه موردی: مناطق عمده تولید گندم دیم در ایران). آب و خاک ۳۲، ۱۰۱۳-۱۰۱۴.

پیش‌بینی مدل را در تمامی نواحی اقلیمی افزایش قابل توجه داده و تغییرات آن‌را در بین نواحی مختلف کاهش دهد به شکلی که تقریباً در یک سطح قرار گیرند.

نتایج نشان داد نمره مهارت برون‌داد خام مدل برای پیش‌بینی دمای بیشینه و کمینه برای ماه‌های مختلف، دارای یک توزیع یکنواخت نبوده و دارای تغییرات افزایشی و کاهش‌ی است. به‌طوری که در برخی ماه‌ها نمره مهارت برون‌داد خام مدل کاهش قابل توجه یافته و دوباره افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال برای نواحی دارای اقلیم خشک و گرم، نمره مهارت برون‌داد خام مدل برای پیش‌بینی دمای کمینه در ماه‌های جولای، اگوست و سپتامبر به حداقل خود می‌رسد. این در حالی است که بعد از تصحیح خطا، توزیع نمره مهارت مدل در بین ماه‌های مختلف تقریباً یکنواخت شده و مقدار نمره مهارت مدل در بین ماه‌ها تقریباً مشابه می‌شود.

توزیع مکانی خطای برون‌داد خام مدل برای شبیه‌سازی دمای بیشینه و کمینه نشان داد برخی مناطق دارای خطای بیشتری هستند. به‌طور کلی در مناطقی که گرادیان ارتفاعی شدید است، خطای مدل افزایش می‌یابد، به‌عنوان مثال نواحی مرزی بین استان خوزستان و کهگیلویه و بویراحمد. به‌طوری کلی می‌توان گفت مدل، دمای بیشینه و کمینه را در اکثر مناطق کشور کمتر از مقدار مشاهده برآورد می‌کند.

روش تصحیح خطای پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت مدل WRF، خطای برون‌داد مدل را به‌طرز چشم‌گیری کاهش داد و سبب افزایش نمره مهارت و کاهش تغییرپذیری نمره مهارت در تمامی نواحی اقلیمی مورد مطالعه شد. در روش درون‌یابی (کوکریجینگ) و تعمیم خطای برون‌داد مدل بر روی تمام نقاط شبکه لازم است نقاط یا ایستگاه‌های مشاهداتی، تراکم قابل‌قبول و پراکنش یکنواختی داشته باشند که این مورد در نواحی مرکزی کشور چندان مطلوب نیست. در این مطالعه از متغیر ارتفاع

- مرادی، م. و مرتضی‌پور، س.، ۱۳۹۷، پس‌پردازش خروجی مدل WRF به روش میانگین لغزان برای دما، دمای نقطه شبنم، دمای بیشینه و دمای کمینه، در ایستگاه هواشناسی فرودگاه رشت. هواشناسی و علوم جو، ۱، ۱۹۰-۲۰۱.
- مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان هواشناسی کشور،
- Box, G. E. and Meyer, R. D., 1986, An analysis for unreplicated fractional factorials. *Technometrics*, 28, 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.
- 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., Isaaks, D. A. E. S. E. H., Srivastava, R. M. and Firm, K., 1989, *Applied Geostatistics*, illustrate. ed. Oxford University Press.
- 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>.
- 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., Grimit, 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.
- 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.
- Müller, O. V., Lovino, M. A. and Berbery, E. H., 2016, Evaluation of WRF model forecasts and their use for hydroclimate monitoring over southern South America. *Weather and Forecasting* 31, 1001-1017.
- 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.
- 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.
- 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.

Post Processing of WRF Model Output by Cokriging Method for Minimum and Maximum Temperature in Iran

Shokouhi, M.^{1*}, Asadi Oskouei, E.¹ and Mohammadpour Penchah, M. R.¹

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

(Received: 14 Aug 2021, Accepted: 10 Jan 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 minimum and maximum temperature 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 are calculated. Then the errors are 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 the maximum and minimum temperature forecast errors are also investigated in the country. Observed daily maximum and minimum temperatures data from 560 meteorological stations for the period 1/11/2019 to 1/2/2021 are used to evaluate the WRF model. The WRF model is run daily at 12UTC, with a forecast time of 120 hours. And first 12 hours of each run is considered as the model spin-up and is not used in errors calculation. In order to correct the maximum and minimum temperature 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, is extracted from the model outputs. In order to evaluate the error correction method, the skill score index is used. The validation results of the error correction method shows that the absolute mean error value, correlation coefficient and RMSE are improved after the error correction compared to results that were before the error correction. This shows that the error correction method can be used for other network points that do not contain observational data. The results show that the RMSE of the raw model maximum (minimum) temperatures forecasts for next three days is approximately 6 degrees Celsius (5 degrees Celsius), which after error correction reaches 2 degrees Celsius (4 degrees Celsius). Also the value of correlation coefficient, after correcting for the model error, has a significant increase compared to the raw model output. The average skill score for the raw minimum and maximum temperature forecast for more than 50% of the days is more than -1 and -1.9, respectively, but after correction, the model skill scores become closer to one and for more than 75 percentage of days that reach above zero. Without exception, all climatic regions after error correction have a higher skill score than before error correction, so that the model skill score for most climatic regions after error correction reaches above zero for more than 75% of the days. Before error correction, the warm semi-humid zone has the lowest average skill score for forecasting maximum and minimum temperatures among climatic zones, but after error correction it reaches the highest value among other zones. In general, for areas with hot and dry climates, the raw output skill score for predicting the minimum temperature in July, August, and September is minimized. 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. In areas with high elevation gradient, the model error increases. In general, model underestimates the maximum and minimum temperatures in most areas. 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 is high.

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

* Corresponding author:

mojtabashokohi@gmail.com