

بررسی برون‌داد مدل WRF با ۴ روش پس‌پردازش آماری برای تندی باد ده متری بر روی شمال و شمال غرب ایران

رسول قربان‌فلاح^۱، مجید آزادی^۲، فروزان ارکیان^۳

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

۲- دانشیار، عضو هیئت علمی پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

۳- استادیار، عضو هیئت علمی و مدیر گروه هواشناسی دانشگاه آزاد اسلامی تهران شمال، تهران، ایران

چکیده

در این تحقیق برون‌داد مدل میان‌مقیاس WRF با استفاده از چهار روش تصحیح چرخه پیش‌بینی روزانه، پیش‌بینی تصحیح‌شده کمینه مربعات خطی، پیش‌بینی با میانگین و واریانس تصحیح شده و میانگین سه روش قبلی، پس‌پردازش شد. کمیت مورد مطالعه تندی باد ۱۰ متری سطح زمین بر روی شمال و شمال غرب ایران می‌باشد. به این منظور مدل پیش‌بینی عددی وضع هوا WRF برای صدور پیش‌بینی‌های ۳، ۱۵، ۲۷، ۳۹، ۵۱، ۶۳، ۷۵، ۸۷، ۹۹ و ۱۱۱ ساعته از اول نوامبر ۲۰۱۱ لغایت سی‌ام آوریل ۲۰۱۲، با تفکیک افقی ۱۵ کیلومتر اجرا شده است. با تغییر دوره آموزش و انجام آزمایشات، بهترین طول دوره آموزش برای هر چهار روش انتخاب گردید. نتایج نشان می‌دهد، در هر چهار روش، میانگین خطا در همه ایستگاه‌ها به میزان قابل توجهی کاهش یافته و مقدار آن صفر یا نزدیک صفر شده است، که نشان دهنده حذف بخش سامان‌مند خطا از برون‌داد مدل WRF برای تندی باد ده متری است. به طور کلی روش پیش‌بینی تصحیح‌شده کمینه مربعات خطی (LLS) نسبت به سه روش دیگر در کاهش خطای سامان‌مند و تا حدودی خطای تصادفی مدل موثرتر بوده و بهبود پیش‌بینی برای ایستگاه‌های مختلف بین ۲۶ تا ۴۲ درصد متغیر است. در این روش، میانگین خطای مطلق در حدود ۳۶ درصد برای همه پیش‌بینی‌ها در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه کاهش داده شده است. همچنین در این روش بیشترین بهبود مربوط به ایستگاه‌های قزوین، بلده و آلاشت مازندران و لاهیجان گیلان و کمترین بهبود مربوط به ایستگاه‌های اردبیل و نیر از استان اردبیل و خدابنده زنجان می‌باشد که به ترتیب ۶۵ و ۱ درصد میانگین خطای مطلق بهبود یافته است.

کلمات کلیدی: پس‌پردازش، مدل WRF، تصحیح چرخه پیش‌بینی روزانه، پیش‌بینی تصحیح‌شده کمینه مربعات خطی، پیش‌بینی با میانگین و واریانس تصحیح‌شده

۱- مقدمه

و تفکیک ضعیف توپوگرافی در مدل نسبت به شرایط واقعی است. لذا پس‌پردازش برون‌داد خام مدل‌های مورد استفاده در پیش‌بینی عددی وضع هوا از گام‌های اصلی و ضروری فرآیند پیش‌بینی‌های عملیاتی می‌باشد. از جمله روش‌های پس‌پردازش مورد استفاده می‌توان به:

روش پیش‌بینی کامل (PPM)^۱؛ روش آماره برون‌داد مدل (MOS)^۲؛ MOS تجدیدشونده (UMOS)^۳؛ روش میانگین لغزان (MA)^۴؛ روش بهترین برآورد کننده ساده (BES)^۵؛ پالایه کالمن (KAL)^۶؛ روش تصحیح اریبی کوتاه‌مدت (STB)^۷؛ روش تصحیح چرخه پیش‌بینی روزانه (DRL)^۸؛ پیش‌بینی تصحیح شده کمینه مربعات خطی

مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا بر پایداری جرم، تکانه و انرژی ترمودینامیکی استوارند. ایده‌ی اصلی این است که اگر حالت فعلی جو معلوم باشد می‌توان با حل معادله‌های حاکم بر دینامیک و فیزیک جو، حالت آینده جو را پیش‌بینی کرد. با وجود اینکه دقت پیش‌بینی وضع هوا توسط مدل‌های عددی در طی سال‌های اخیر بهبود یافته است، ولی این مدل‌ها همچنان دارای خطا در برون‌داد خود به ویژه در پیش‌بینی پارامترهای سطح زمین، نظیر دما و باد سطح زمین می‌باشند. مؤلفه سامان‌مند خطا بخش قابل توجهی از خطای کل را در بر دارد. مهم‌ترین دلیل این امر وجود نقص در پارامتری‌سازی‌های فیزیکی مورد استفاده در مدل‌های عددی

1- Perfect prognosis Method

2- Model Output Statistics

3- Updateable MOS

4- Moving Average

5- Best Easy Systematic

6- Kalman Filter forecasts

7- Short – term bias-correction forecasts

8- Diurnal cycle forecast correction

(LLS^1)؛ پیش‌بینی با میانگین و واریانس تصحیح شده (MAV^2)؛ اشاره کرد.

در ایران نیز مطالعاتی در مورد پس‌پردازش برون‌داد مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا برای کمیت‌هایی مانند دما و بارش، با استفاده از پالایه کالمن صورت گرفته است. آزادی و همکاران با انجام پژوهشی در سال ۱۳۸۷ بر روی ایران نشان دادند، برای روزهایی که خطای مدل زیاد یا متوسط بود، پالایه کالمن توانست پیش‌بینی مدل را تا حد قابل قبولی اصلاح کند. همچنین آزادی و عربلی (۱۳۸۸) به مقایسه پیش‌بینی‌های رسمی و پیش‌بینی‌های مدل WRF (پس از پس‌پردازش) برای دمای بیشینه و کمینه‌ی روزانه در ایستگاه‌های همدیدی مراکز استان‌ها پرداختند. نتایج به دست آمده، نشان داد که پیش‌بینی‌های پالایه بر پیش‌بینی‌های رسمی برتری دارد و نیز لزوم استفاده از پس‌پردازش برون‌داد خام مدل را نشان داد.

غیبی و همکاران نیز در سال ۱۳۸۶ پس‌پردازش پیش‌بینی مدل MM5 برای دمای ۲ متری سطح زمین را با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی انجام داده‌اند. همچنین مطالعاتی در خصوص پس‌پردازش برون‌داد مدل WRF برای باد سطح زمین با استفاده از پالایه کالمن غیرخطی بر روی جنوب‌غرب ایران (خلیج بوشهر) توسط راستگو و همکاران در سال ۱۳۹۰ انجام گرفته است.

۲- مباحث نظری

۲-۱- مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا

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

شبکه‌بندی مدل شبکه آراکاوای^۳ -C می‌باشد. در این مدل از طرحواره‌های انتگرال‌گیری مرتبه دوم و سوم زمانی رانگ-کوتا^۴ و طرحواره‌های مرتبه دو تا شش برای فرارفت در دو راستای افقی و قائم استفاده می‌شود. این مدل از گام‌های کوچک زمانی برای مدهای اکوستیک و امواج گرانشی استفاده می‌کند.

۲-۲- روش‌های آماری مورد استفاده برای پس‌پردازش

در این تحقیق چهار روش پس‌پردازشی برای بررسی داده‌های خام تندی باد مدل استفاده و توانایی هر روش جهت بهبود پیش‌بینی مدل بررسی شد. هر روش برای دفعات و بردهای مختلف پیش‌بینی (۳، ۱۵، ۲۷، ۳۹، ۵۱، ۶۳، ۷۵، ۸۷، ۹۹ و ۱۱۱ ساعته) اجرا شد. در ادامه بطور خلاصه به توضیح هر یک از این روش‌ها پراخته می‌شود.

۲-۲-۱- پیش‌بینی اصلاح شده کمینه مربعات خطی (LLS)

اگر رابطه خطی بین تندی‌های باد پیش‌بینی شده و دیدبانی شده وجود داشته باشد، این رابطه می‌تواند برای اصلاح پیش‌بینی DMO استفاده شود. پیش‌بینی‌های اصلاح شده کمینه مربعات خطی با استفاده از پنجره غلتان ۲۷ روزه محاسبه شده است. برای هر ایستگاه، تندی‌های باد پیش‌بینی شده و متناظر دیدبانی شده در ۲۷ روز قبل برای محاسبه شیب (m) و عرض از مبدا (c)، استفاده شد. رابطه‌ی زیر تندی باد تصحیح شده کمینه مربعات خطی را نشان می‌دهد.

$$(LLS \text{ speed}) = m (\text{forecast speed}) + c \quad (1)$$

۲-۲-۲- اصلاح چرخه پیش‌بینی روزانه (DRL)

اگر میانگین خطای پیش‌بینی که حاصل میانگین کاسته تندی باد دیدبانی شده از تندی باد پیش‌بینی شده طی دوره آموزش به دست آمده می‌باشد، را از پیش‌بینی خام روز جاری کم کنیم، پیش‌بینی پس‌پردازش شده حاصل می‌شود که از رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$DRL (HH) = FC (HH) - err (HH) \quad (2)$$

۲-۲-۳- پیش‌بینی با میانگین و واریانس تصحیح شده (MAV)

در این روش برای بهبود پیش‌بینی؛ آن را به گونه‌ای پردازش می‌کنیم که همان میانگین و انحراف معیار داده‌های دیدبانی شده را داشته باشد. به بیان دیگر مجموعه‌ای از

دیدبانی را مشخص کند. هر چند به نظر می‌رسد که بهترین (کامل ترین) حالت مقدار میانگین خطای پیش‌بینی برابر صفر باشد، اما واقعاً این گونه نیست؛ چه بسا مقادیر پیش‌بینی شده دارای خطای زیادی باشند. ولی تفاضل مقدار دیدبانی شده از آن‌ها، گاهی مثبت و گاهی منفی شود و در نتیجه مقدار میانگین خطای پیش‌بینی صفر یا نزدیک به صفر شود.

۲-۳-۲- میانگین خطای مطلق^۳

میانگین خطای مطلق برای یک پیش‌بینی از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_i - O_i| \quad (7)$$

که در آن F_i مقدار پیش‌بینی شده متغیر مورد نظر و O_i مقدار دیدبانی شده (مشاهده شده) متناظر با آن است. این شاخص نسبت به میانگین خطا، برتری دارد. زیرا در مورد شاخص میانگین خطا گفته شد، که این احتمال وجود دارد که مقادیر پیش‌بینی شده دارای خطای زیادی باشند؛ ولی تفاضل مقدار دیدبانی شده از آنها، گاهی مثبت و گاهی منفی شود و در نتیجه مقدار میانگین خطای پیش‌بینی صفر یا نزدیک به صفر شود، ولی در اینجا با در نظر گرفتن قدر مطلق تفاضل مقادیر دیدبانی و پیش‌بینی این عیب برطرف شده و از صفر شدن میانگین خطای مطلق جلوگیری شده است.

۲-۳-۳- جذر میانگین مربع خطاها^۴

مقدار عددی جذر میانگین مربع خطاها از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

باید توجه کرد که RMSE در مقایسه با MAE برای خطاهای بزرگتر جریمه بیشتری قائل می‌شود، چون در این شاخص مقادیر خطا به توان ۲ رسانده می‌شود. به عبارت دیگر این کمیت به پیش‌بینی‌های پرت حساس است. RMSE نیز مانند MAE مقدار خطا را برحسب همان یکای کمیت مورد سنجش بیان می‌کند.

داده‌های پیش‌بینی (fc)، به گونه‌ای اصلاح شده است که همان میانگین (μ) و انحراف معیار (σ) داده‌های دیدبانی شده (obs) را داشته باشد. در این روش ابتداء، انحراف معیار fc تصحیح شد که از طریق رابطه ۳ بدست می‌آید.

$$fc_2 = \left(\frac{\sigma_{obs}}{\sigma_{fc}} \right) fc \quad (3)$$

آنگاه میانگین اصلاح می‌شود.

$$fc_3 = fc_2 + (\mu_{obs} - \mu_{fc}) \quad (4)$$

fc_3 اکنون همان میانگین و انحراف معیار obs را دارد. اگر میانگین و انحراف معیار تندی باد پیش‌بینی شده و دیدبانی شده در طول دوره آموزش محاسبه شود، می‌تواند به عنوان برآوردی از مقادیر درست بکار رود و پیش‌بینی فعلی می‌تواند به مانند بالا پیش‌بینی MAV را ایجاد نماید.

۲-۴- روش ترکیبی

این روش ترکیبی از سه روش قبلی می‌باشد. بدین صورت که پیش‌بینی پس‌پردازش شده توسط سه روش قبلی را با هم جمع و میانگین آن‌ها را به دست می‌آوریم.

$$AVG = \frac{DRL+LLS+MAV}{3} \quad (5)$$

۲-۳- سنجش‌های آماری مورد استفاده برای راستی آزمایی

راستی آزمایی یک پیش‌بینی، فرآیندی است که کیفیت پیش‌بینی را تعیین می‌کند. در این فرآیند پیش‌بینی با دیدبانی متناظر، که واقعاً اتفاق افتاده است یا با برخی برآوردهای خوب از برون‌داد مدل مقایسه می‌شود.

برای ارزیابی و راستی آزمایی پیش‌بینی‌ها، از شاخص‌ها و کمیت‌های راستی آزمایی گوناگونی استفاده شده است. برخی از آنها عبارتند از:

۲-۳-۱- میانگین خطا^۱

میانگین خطا؛ نشان‌دهنده بخش سامان‌مند خطا است و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$mean\ error = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i) \quad (6)$$

که در آن F_i مقدار پیش‌بینی شده متغیر مورد نظر و O_i مقدار دیدبانی شده (مشاهده شده) متناظر با آن است. این کمیت که گاهی اریبی جمعی^۲ نیز نامیده می‌شود، نمی‌تواند بزرگی و اندازه‌ی خطاها را اندازه‌گیری کند، همچنین نمی‌تواند رابطه و تناظر بین مقادیر پیش‌بینی و

3- Mean Absolute Error
4- Root mean square error

1 - Mean Error
2- Additive Bias

۲-۳-۴- امتیاز مهارتی میانگین خطای مطلق^۱

برای محاسبه امتیاز مهارتی میانگین خطای مطلق از رابطه زیر استفاده می‌شود:

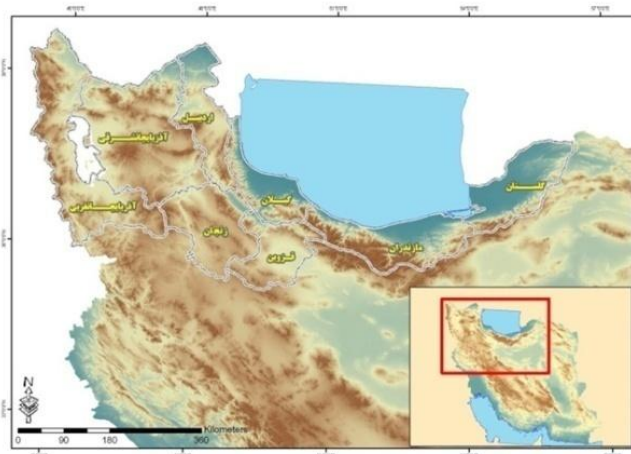
$$\text{MAEskill score} = 1 - \frac{\text{MAE}_{\text{PP}}}{\text{MAE}_{\text{DMO}}} \quad (9)$$

که در آن MAE_{DMO} میانگین خطای مطلق قبل از پس پردازش و MAE_{PP} میانگین خطای مطلق پس از پس پردازش می‌باشد. این شاخص اشاره به اطلاعاتی درباره مقدار یا ارزش یک پیش‌بینی نسبت به یک پیش‌بینی جایگزین (مرجع) دارد.

۳- منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

۳-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه از هشت استان با مساحتی بالغ بر ۲۲۴۹۴۳/۴ کیلومتر مربع بین ۴۴ درجه و ۳ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۲۲ دقیقه شرقی و ۳۵ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۶ دقیقه شمالی واقع شده است. این منطقه از شمال به کشور ترکمنستان، دریای کاسپین (خزر)، جمهوری آذربایجان، جمهوری ارمنستان و قسمتی از ترکیه، از جنوب به استان‌های سمنان، تهران، البرز، مرکزی، همدان و کردستان، از شرق به استان خراسان شمالی و از غرب به کشورهای ترکیه و عراق محدود می‌باشد (شکل ۱).



شکل شماره ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

۳-۲- داده‌ها

کلی داده‌های دیدبانی و پیش‌بینی استفاده شده برای هر ایستگاه حدود ۱۸۲-۱۷۳ روز بوده است. پس از مرتب کردن پیش‌بینی‌ها و دیدبانی‌های متناظر با آن، روزهایی که هر یک از داده‌های پیش‌بینی یا دیدبانی موجود نبوده، حذف شده است. به همین دلیل همان‌گونه که ذکر گردید تعداد روزهای شامل داده، کمتر از شش ماه شده است. داده‌های پیش‌بینی و دیدبانی، به دو دوره تقسیم شد که دوره‌ی اول که ۴۰ روز می‌باشد (از اول نوامبر ۲۰۱۱ تا ۱۱ دسامبر ۲۰۱۱) برای آموزش و مابقی روزها برای آزمون روش و ارزیابی مورد استفاده قرار گرفته است.

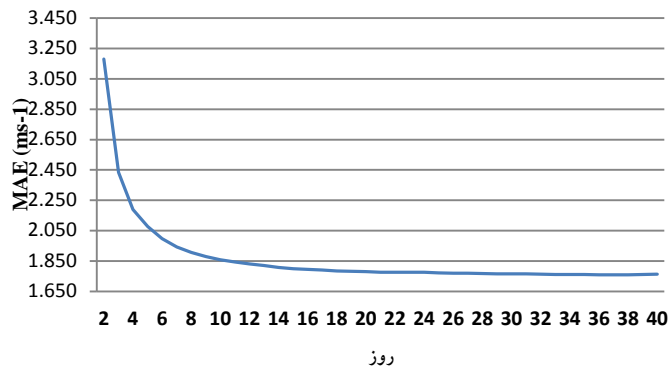
اجرای مدل‌ها به صورت روزانه از ساعت UTC ۱۲ (۱۵:۳۰ به وقت محلی) بوده و در هر اجراء پیش‌بینی تا ۱۲۰

برای پس پردازش و ارزیابی پیش‌بینی‌ها، از داده‌های باد روزانه ایستگاه‌های همدیدی در منطقه شمال و شمال غرب ایران، شامل استان‌های گلستان، مازندران، گیلان، قزوین، زنجان، اردبیل، آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی در یک بازه‌ی زمانی شش ماهه از اول نوامبر ۲۰۱۱ لغایت سی‌ام آوریل ۲۰۱۲ استفاده شده است. تعداد ایستگاه‌های سینوپتیک اصلی و سینوپتیک تکمیلی موجود در منطقه ۸۸ ایستگاه می‌باشد که در این پژوهش از داده‌های ۸۵ ایستگاه استفاده شده است. از آنجا که داده‌های دیدبانی در برخی از روزها طی این شش ماه برای ۳ ایستگاه دیگر دارای نقص بوده است، داده‌های آن ۳ ایستگاه حذف شد. بنابراین به طور

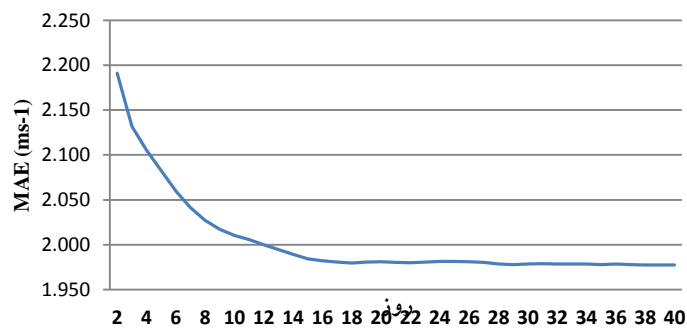
۴- بحث و نتایج**۴-۱- تعیین دوره آموزش مناسب**

به منظور برآورد بهترین طول دوره آموزش برای هر کدام از روش‌های مورد استفاده در پس‌پردازش، آزمایش‌هایی با تغییر طول دوره آموزشی از ۲ تا ۴۰ روز انجام شد. شکل‌های ۲ تا ۴ میانگین مطلق خطا را برای تعیین دوره آموزشی برای ۳ روش پس‌پردازشی نشان می‌دهد.

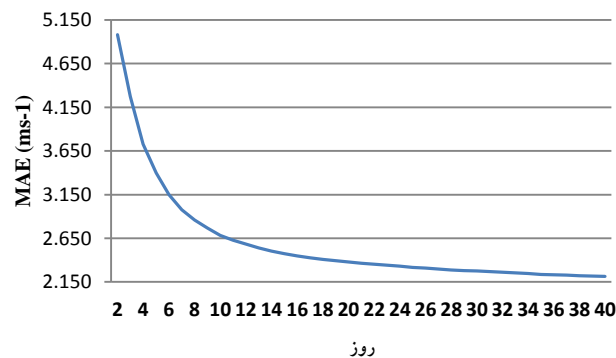
ساعت آینده تولید شده است. با توجه به اینکه تعداد ایستگاه‌های سینوپتیک تکمیلی بیشتر از ایستگاه‌های سینوپتیک اصلی بود و در این ایستگاه‌ها فقط از ساعت UTC ۰۳ تا UTC ۱۵ دیدبانی انجام می‌شود؛ در نتیجه برد پیش‌بینی به ۱۰ برد ۳، ۱۵، ۲۷، ۳۹، ۵۱، ۶۳، ۷۵، ۸۷، ۹۹ و ۱۱۱ ساعته تقسیم شد. داده‌های دیدبانی متناظر نیز در ساعت‌های ۰۳ و ۱۵ گریجویچ جمع‌آوری شد.



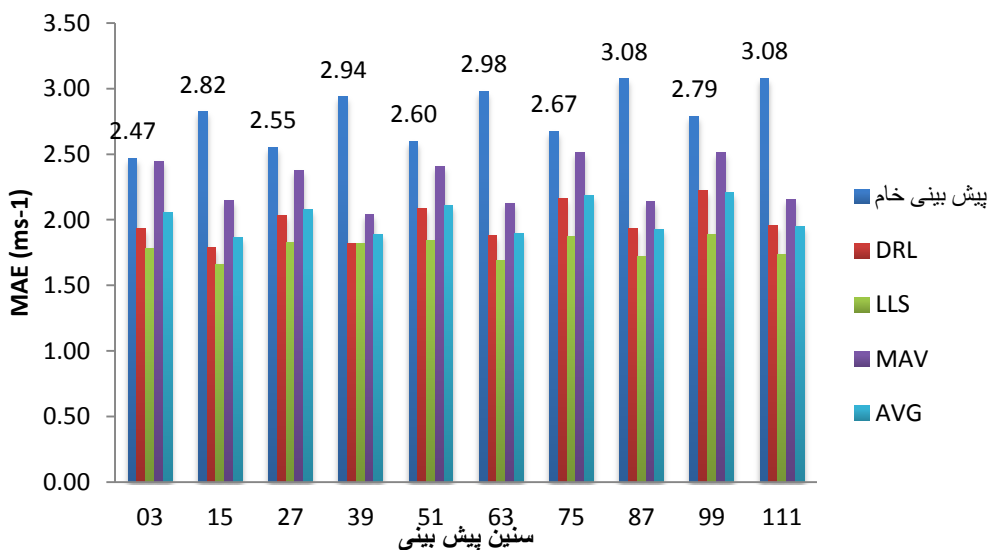
شکل شماره ۲: میانگین خطای مطلق برحسب متر بر ثانیه برای تعیین دوره آموزش در روش LLS.



شکل شماره ۳: میانگین خطای مطلق برحسب متر بر ثانیه برای تعیین دوره آموزش در روش DRL.



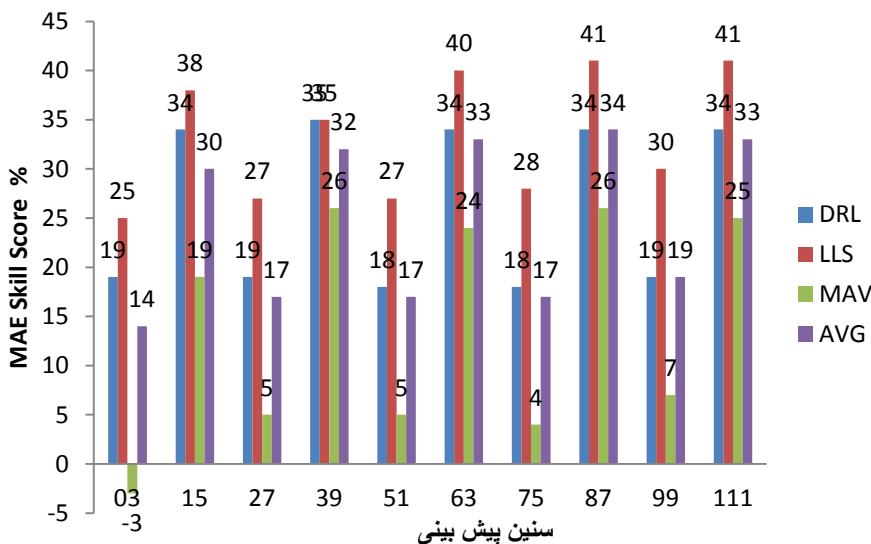
شکل شماره ۴: میانگین خطای مطلق برحسب متر بر ثانیه برای تعیین دوره آموزش در روش MAV.



شکل شماره ۵: میانگین خطای مطلق برای برونداد مستقیم و پس پردازش شده مدل.

می‌دهد. طبق نتایج به دست آمده بیشترین کاهش میانگین خطای مطلق برای پیش بینی ۱۵ ساعته در روش پیش بینی اصلاح شده کمینه مربعات خطی می‌باشد که ۱/۶۶ متر بر ثانیه است و کمترین کاهش میانگین خطای مطلق در این روش برای پیش بینی ۹۹ ساعته با ۱/۸۹ متر بر ثانیه می‌باشد.

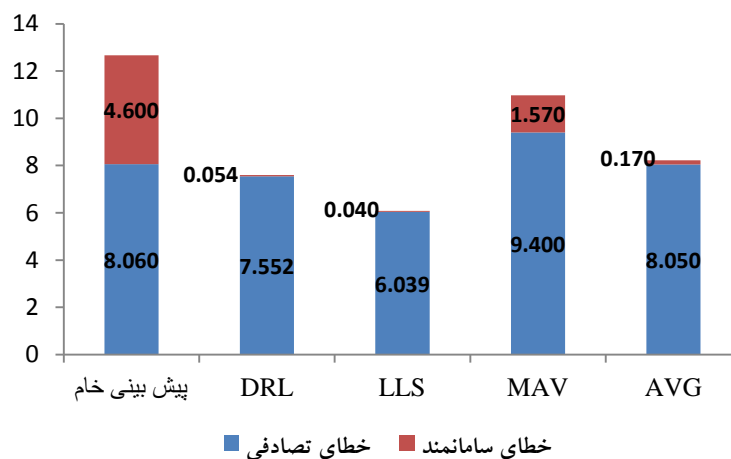
همان گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، همه روش‌های پس پردازشی توانسته‌اند میانگین خطای مطلق را برای تندی باد ده متری در همه بردهای پیش بینی کاهش دهند، اما روش پیش بینی اصلاح شده کمینه مربعات خطی (LLS)، نتایج بهتری را نسبت به سه روش دیگر نشان



شکل شماره ۶: میانگین درصد امتیاز مهارتی با چهار روش پس پردازشی DRL، LLS، MAV و AVG برای کلیه سنین پیش بینی.

شکل ۶، درصد امتیاز مهارتی چهار روش پس پردازش اصلاح چرخه پیش بینی روزانه، پیش بینی اصلاح شده کمینه مربعات خطی، پیش بینی با میانگین و انحراف معیار تصحیح شده و میانگین سه روش قبلی به تفکیک بردهای مختلف پیش بینی را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، روش پیش بینی اصلاح شده کمینه مربعات خطی به طور میانگین با ۳۳٫۲ درصد بیشترین بهبود را برای تمامی بردهای پیش بینی دارد و روش اصلاح چرخه پیش بینی روزانه، میانگین سه روش و پیش بینی با میانگین و انحراف معیار تصحیح شده به ترتیب با میانگین ۲۶/۴، ۲۴/۶ و ۱۳/۸ درصد، پیش بینی خام مدل را برای تندی باد ده متری بهبود دادند. البته در روش پیش بینی با میانگین و انحراف معیار تصحیح

شده در پیش بینی ۳ ساعته نه تنها بهبودی حاصل نشد بلکه به میزان ۳ درصد به خطای پیش بینی اضافه گردید. طبق نتایج به دست آمده در روش پیش بینی اصلاح شده کمینه مربعات خطی بیشترین بهبود با ۴۱ درصد در پیش بینی های ۸۷ و ۱۱۱ ساعته و کمترین بهبود با ۲۵ درصد در پیش بینی ۳ ساعته رخ داده است. همچنین بهترین بهبود به ترتیب برای سه روش اصلاح چرخه پیش بینی روزانه، میانگین سه روش و پیش بینی با میانگین و انحراف معیار تصحیح شده ۳۵، ۳۴ و ۲۶ درصد بوده که در پیش بینی های ۳۹، ۸۷ و ۱۴ ساعته رخ داده است. کمترین بهبود نیز به ترتیب با ۱۴ و ۳- درصد برای پیش بینی های ۷۵، ۳ و ۳ ساعته رخ داده است.



شکل شماره ۷: میانگین خطای سامانمند و تصادفی مدل، جهت باد ده متری قبل و بعد از پس پردازش به روش DRL، LLS، MAV و AVG برای کلیه پیش بینی ها.

همان گونه که در شکل ۷ مشاهده می شود، تمامی روش های پس پردازشی مورد استفاده در این تحقیق برای کلیه بردهای پیش بینی، خطای سامانمند برون داد مدل WRF را برای تندی باد ده متری کاهش داده اند، به طوریکه روش پیش بینی اصلاح شده کمینه مربعات خطی با ۹۸/۹ درصد کاهش خطای سامانمند، بهترین بهبود را در کاهش این خطا داشته است. روش اصلاح چرخه پیش بینی روزانه با ۹۸/۸ درصد، روش میانگین سه روش با ۹۵/۵ درصد و روش

پیش بینی با میانگین و انحراف معیار تصحیح شده با ۵۷ درصد به ترتیب در جایگاه بعدی قرار دارند. البته روش پیش بینی اصلاح شده کمینه مربعات خطی علاوه بر کاهش خطای سامانمند، خطای تصادفی را نیز به میزان ۲۴/۴ درصد کاهش داده است. همچنین میزان کاهش خطای تصادفی برای روش اصلاح چرخه پیش بینی روزانه، ۶/۳ درصد بوده است. روش های میانگین سه روش و روش پیش بینی با میانگین و انحراف معیار تصحیح شده نه تنها

ساعته با امتیاز مهارتی ۴۱ درصد و در پیش‌بینی ۳ ساعته با امتیاز مهارتی ۲۵ درصد به ترتیب بیشترین و کمترین بهبود را برای تندی باد ده متری سطح زمین در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. متوسط امتیاز مهارتی میانگین خطای مطلق برای کلیه بردهای پیش‌بینی با روش پیش‌بینی اصلاح‌شده کمینه مربعات خطی، $۳۳/۲$ درصد می‌باشد.

میزان متوسط کاهش خطای سامان‌مند روش پیش‌بینی اصلاح‌شده کمینه مربعات خطی برای کلیه بازه‌های پیش‌بینی $۹۸/۹$ درصد و میزان کاهش خطای تصادفی این روش نیز $۲۴/۴$ درصد می‌باشد.

با بررسی یکایک ایستگاه‌ها مشاهده شده است که با استفاده از روش پیش‌بینی اصلاح‌شده کمینه مربعات خطی، ایستگاه‌های لاهیجان، آلاشت و بلده مازندران و قزوین با ۶۵ درصد بهبود پیش‌بینی، بیشترین بهبود و ایستگاه‌های اردبیل و نیر از استان اردبیل و خدابنده زنجان با ۱ درصد بهبود پیش‌بینی کمترین بهبود را داشته‌اند (شکل ۸).

یکی از دلایل اصلی وجود خطای سامان‌مند در برونداد مدل برای کمیته‌های سطح زمین شامل تندی باد، اختلاف در ناهمواری و کاربری اراضی مدل و واقعیت است. بنابراین بطور کلی انتظار می‌رود که خطای سامان‌مند در ایستگاه‌های واقع در مناطق با ناهمواری خوش‌رفتارتر دارای خطای سامان‌مند کمتری باشد. از طرفی در ایستگاه‌های واقع در مناطق با ناهمواری پیچیده (مثل ایستگاه‌های خدابنده، نیر و اردبیل) تندی باد بسیار متغیر است و علاوه بر سامانه‌های هم‌مدیدی، عوامل کوچک مقیاس محلی نیز به شدت در جهت و تندی باد تأثیر می‌گذارد. بنابراین انتظار می‌رود در نهایت خطای مدل در این ایستگاه‌ها بیشتر از دیگر نقاط باشد.

باعث کاهش خطای تصادفی بطور میانگین برای کلیه بردهای پیش‌بینی نشده‌اند، بلکه باعث افزایش این خطا شده‌اند؛ به طوریکه روش میانگین سه روش، $۰/۳$ درصد و روش پیش‌بینی با میانگین و انحراف معیار تصحیح شده، $۱۶/۸$ درصد میزان خطای تصادفی را افزایش داده‌اند.

۴-۲- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تندی باد ده متری سطح زمین برای شمال و شمال‌غرب ایران، با برونداد مدل WRF در برد پیش‌بینی ۳، ۱۵، ۲۷، ۳۹، ۵۱، ۶۳، ۷۵، ۸۷، ۹۹ و ۱۱۱ ساعته بررسی شد. جهت پس‌پردازش از روش‌های آماری اصلاح چرخه پیش‌بینی روزانه، پیش‌بینی اصلاح‌شده کمینه مربعات خطی، پیش‌بینی با میانگین و انحراف معیار تصحیح شده و میانگین سه روش قبلی استفاده گردید.

سنجه‌های آماری میانگین خطا، میانگین خطای مطلق و جذر میانگین مربع خطاها و امتیاز مهارتی میانگین خطای مطلق، برای راستی‌آزمایی روش‌های پس‌پردازشی مورد استفاده و نتایج حاصل مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روش پیش‌بینی اصلاح شده کمینه مربعات خطی نسبت به سه روش دیگر، میانگین خطای مطلق برونداد مدل WRF را برای تندی باد ده متری منطقه شمال و شمال‌غرب ایران بیشتر کاهش داده و روش‌های دیگر بهبود پیش‌بینی کمتری نسبت به این روش داشته است، به طوریکه باعث کاهش ۳۶ درصدی میانگین خطای مطلق شده است.

بیشترین کاهش میانگین خطای مطلق برای پیش‌بینی ۸۷ ساعته با $۴۴/۱$ درصد و کمترین کاهش برای پیش‌بینی ۳ ساعته با $۲۷/۷$ درصد بهبود می‌باشد. روش پیش‌بینی اصلاح‌شده کمینه مربعات خطی در پیش‌بینی‌های ۸۷ و ۱۱۱



شکل شماره ۸: ایستگاه‌های دارای کمینه و بیشینه بهبود پیش‌بینی.

منابع

- ۱- آزادی، م.، س. جعفری، ا. میرزایی، پ. عربلی، ۱۳۸۵، پس‌پردازش برون‌داد مدل میان‌مقیاس MM5 برای دمای بیشینه و کمینه با استفاده از فیلتر کالمن، مجله فیزیک زمین و فضا، ۱، ۴۵-۶۱.
- ۲- آزادی، م.، س. جعفری، ز. کلاته سیفری، ۱۳۸۸، ارزیابی عملکرد مدل WRF در ایران برای پیش‌بینی بارش با استفاده از طرحواره‌های فیزیکی مختلف: مطالعه موردی، دوازدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران.
- ۳- آزادی، م.، پ. عربلی، ۱۳۸۸، مقایسه پیش‌بینی‌های رسمی و پیش‌بینی‌های مدل WRF برای دمای بیشینه و کمینه روزانه در ایستگاه‌های هم‌مدیدی مراکز استان‌ها، هشتمین همایش پیش‌بینی عددی وضع هوا، تهران، ایران.
- ۴- اداره کل هواشناسی استان آذربایجان شرقی، داده‌های دیدبانی (SC DATA) روزانه ایستگاه‌های هواشناسی هم‌مدیدی استان آذربایجان شرقی.
- ۵- اداره کل هواشناسی استان آذربایجان غربی، داده‌های دیدبانی (SC DATA) روزانه ایستگاه‌های هواشناسی هم‌مدیدی استان آذربایجان غربی.
- ۶- اداره کل هواشناسی استان اردبیل، داده‌های دیدبانی (SC DATA) روزانه ایستگاه‌های هواشناسی هم‌مدیدی استان اردبیل.
- ۷- اداره کل هواشناسی استان زنجان، داده‌های دیدبانی (SC DATA) روزانه ایستگاه‌های هواشناسی هم‌مدیدی استان زنجان.
- ۸- اداره کل هواشناسی استان قزوین، داده‌های دیدبانی (SC DATA) روزانه ایستگاه‌های هواشناسی هم‌مدیدی استان قزوین.
- ۹- اداره کل هواشناسی استان گلستان، داده‌های دیدبانی (SC DATA) روزانه ایستگاه‌های هواشناسی هم‌مدیدی استان گلستان.
- ۱۰- اداره کل هواشناسی استان گیلان، داده‌های دیدبانی (SC DATA) روزانه ایستگاه‌های هواشناسی هم‌مدیدی استان گیلان.
- ۱۱- اداره کل هواشناسی استان مازندران، داده‌های دیدبانی (SC DATA) روزانه ایستگاه‌های هواشناسی هم‌مدیدی استان مازندران.
- ۱۲- راستگو، ز.، م. آزادی، س. حجام، ۱۳۹۰، پس‌پردازش برون‌داد مدل WRF برای تندی باد بر روی خلیج بوشهر با استفاده از روش پالایه کالمن غیرخطی.

- 23- Marzban, C., Sadgath S., and Kalnay E., 2005, MOS, Perfect prog and Reanalysis, *Mon. Weat. Rev.*, vol. 134, No. 2, 657-663.
- 24- Ross, G., 1989, Model output statistics using an updatable scheme, *proc. 11th Conf. on probability and Statistics in Atmospheric*, Monterey, CA, Amer. Meteor. Soc., 93-97.
- 25- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers, 2006, A description of the Advanced Research WRF version 2. NCAR Tech. Note NCAR/ TN-468 1STR, 88 pp.
- 26- Stensrud, D. J., and J. A. Skindlov, 1996, Gridpoint predictions of high temperature from a mesoscale model. *Wea. Forecasting*, 11, 103–110.
- 27- Stensrud, D. J., and Yussouf, N., 2003, Short-range ensemble predictions of 2-m temperature and dewpoint temperature over New England. *Mon. Wea. Rev.*, 131, 2510–2524.
- 28- Stensrud, D. J., and Yussouf, N., 2005, Bias-corrected short-range ensemble forecasts of near surface variables. *Meteor. Appl.*, 12, 217–230.
- 29- Sweeney, C., and Lynch, P., 2011, Adaptive post-processing of short-term wind forecasts for energy applications. *Wind Energy* 14(3): 317 – 325, DOI: 10.1002/we.420.
- 30- Sweeney, C., and Lynch, P., 2011, Reducing errors of wind speed forecasts by an optimal combination of post-processing methods. *Meteorol. Appl.* 20: 32 – 40 (2013), DOI: 10.1002/met.294
- 31- Wilks, D. S., 2013, *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. San Diego, London: Academic Press.
- 32- Woodcock, F., and C. Engel, 2005, Operational consensus forecasts. *Wea. Forecasting*, 20, 101–111.
- ۱۳- غیبی، ا، م. آزادی، م. جمشیدی، ر. رضوانی، ۱۳۸۶، پس پردازش پیش بینی های مدل MM5 برای دمای دو متری سطح زمین با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی، هفتمین همایش پیش بینی عددی وضع هوا، سازمان هواشناسی کشور.
- 14- Eckel, F. A., and C. F. Mass, 2005, Aspects of effective mesoscale, short-range ensemble forecasting. *Wea. Forecasting*, 20, 328– 350
- 15- Galanis, G., Louka, P., Katsafados, P., Kallos, G., Pytharoulis, I., 2006, Applications of Kalman filter based on non-linear functions to numerical weather predictions. *Ann. Geophys.* 24, 2451-2460.
- 16- Gelb, A., 1974, *Applied Optimal Estimation*, MIT Press, 374pp.
- 17- Glahn, H., and R. Lowry, 1972, The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting. *J. Appl. Meteor.*, 11, 1203–1211.
- 18- Joshua P. Hacker and Daran L. Rife, 2007, A Practical Approach to Sequential Estimation of Systematic Error on Near-Surface Mesoscale Grids. *Wea. Forecasting*, 22, 1257–1273.
- 19- Kalman, R.E., 1960, A new approach to linear filtering and Prediction Problems, *Trans. ASME, Ser.D.82* , 34-45.
- 20- Kalman, R. E. and R.S. Bucy , 1961, New result in linear filtering and prediction problems, *Trans. ASME. Ser.D.83* , 95-108.
- 21- Karl, T. R., M. E. Schlesinger, and W. C. Wang, 1989, A method of relating general circulation model simulated climate to the observed local climate. Part I: Central tendencies and dispersion. Preprints, Sixth Conference on Applied Climatology, Amer. Meteor. Soc., 188–196.
- 22- Klein, W. H., B. M. Lewis, and I. Enger, 1959, Objective prediction of five-day mean temperatures during winter. *J. Atmos. Sci.*, 16, 672–682.