

بررسی پیش بینی قطعی سرعت باد با استفاده پس پردازش برون داد یک سامانه همادی

مسعود ده ملانی^۱، مریم رضازاده^{۲*} و مجید آزادی^۳

^۱ دانشجوی دکتری هواشناسی، گروه علوم غیرزیستی جوی و اقیانوسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان، ایران

^{۲*} استادیار، گروه علوم غیرزیستی جوی و اقیانوسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان، ایران

^۳ دانشیار، پژوهشگاه هواشناسی ایران، تهران، ایران

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۳۰، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۸)

چکیده

در این پژوهش با استفاده از دو روش BMA و EMOS برای پس پردازش برون داد خام سامانه های همادی، پیش بینی قطعی سرعت باد ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته روی ایران تولید شده است. هدف اصلی مقاله، مقایسه پیش بینی قطعی حاصل از اعمال دو روش یاد شده با اعضای خام و میانگین خام اعضا است. سامانه همادی مورد استفاده شامل هشت پیکربندی مختلف، با تغییر در طرح واره لایه مرزی از مدل WRF است. هر عضو شامل پیش بینی های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته سرعت باد ۱۰ متری با تفکیک ۲۱ کیلومتر روی ایران است. بازه زمانی اجرای مدل، از اول مارس تا ۳۱ اوت ۲۰۱۷ است و نتایج بازه ۱۱ آوریل تا ۳۱ اوت ۲۰۱۷، دوره آزمون فرض شده است. پس از بررسی خطا با دوره های آموزش مختلف، دوره آموزش برای پیش بینی در هر دو روش، سی روز در نظر گرفته شد. درستی سنجی به روش های مختلف برای آستانه های سرعت باد کمتر از ۳ و بیشتر از ۵، ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه برای هر دو روش و برای همه سن های پیش بینی انجام شد. بهبود سه برابری در امتیاز سنجه های دقت، ۲/۲ برابری در امتیاز سنجه های اطمینان پذیری و تفکیک پذیری، ۳/۴ برابری در امتیاز سنجه های مهارتی و کاهش ۲۴ درصدی خطا در سنجه های آماری (MAE و RMSE) نسبت به میانگین اعضا سامانه همادی مشاهده شد. همچنین بررسی نتایج درستی سنجی برای مناطق مختلف اقلیمی در کشور به صورت مجزا نشان داد در همه اقلیم ها سنجه RMSE، برای روش های BMA و EMOS بهترین عملکرد را دارد و این دو روش به ترتیب باعث کاهش ۲۱ درصدی و ۲۳ درصدی خطا نسبت به خطای میانگین اعضا همادی شدند. دو روش یاد شده در اقلیم گرم و مرطوب توانایی بیشتری برای بهبود پیش بینی داشتند و به ترتیب خطا را در مقایسه با میانگین خطای اعضا در همان اقلیم، ۴۴ درصد و ۴۶ درصد کاهش دادند.

واژه های کلیدی: پیش بینی همادی، پس پردازش، سرعت باد

۱ مقدمه

پیش‌بینی دقیق سرعت باد در بسیاری از کاربردهای اجتماعی مانند هشدارها و اخطارهای وضع هوا برای ارزیابی ریسک و تصمیم‌گیری‌های مناسب در هوانوردی، مسیریابی کشتی‌ها، قایقرانی تفریحی و کشاورزی اهمیت حیاتی دارد. انرژی باد که یکی از منابع انرژی پاک است، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. طوفان‌ها اغلب منجر به قطع برق می‌شوند و می‌توانند با وارد کردن آسیب‌های جدی، تهدیدی برای زندگی بشر باشند. سرعت باد در افزایش یا کاهش آلودگی و در نتیجه، سلامت مردم تأثیر زیادی دارد. وزش باد شدید ۱۲ خرداد سال ۹۳ تهران باعث کشته شدن تعدادی از هموطنان و ایجاد خسارت‌های سنگین مالی شد.

برای پیش‌بینی سرعت باد به مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا نیاز است. این مدل‌ها شامل معادلات دیفرانسیلی هستند که قوانین فیزیکی و دینامیکی جو را توصیف می‌کنند. این معادلات دیفرانسیل با استفاده از روش‌های عددی حل می‌شوند. به دلیل راه‌حل‌های تقریبی در روش‌های عددی، جواب به‌دست آمده از اجرای مدل‌های عددی، تقریبی از جواب واقعی است و همواره با خطا همراه است. البته استفاده از روش‌های عددی در مدل‌ها، تنها علت بروز خطا در خروجی مدل نیست، بلکه به عواملی مانند وجود خطا در مقادیر اولیه مرزی، ناتوانی مدل در لحاظ کردن همه فرایندهای جو، کمبود داده‌های اولیه در برخی مناطق، ناتوانی مدل در شبیه‌سازی موفق پدیده‌های زیرشبکه‌ای و آشوبی بودن سامانه دینامیکی جو نیز می‌توان اشاره کرد؛ بنابراین پیش‌بینی در چنین سامانه‌ای با عدم قطعیت زیاد همراه خواهد بود.

برای تشخیص چگونگی وضع هوای آینده با لحاظ کردن عدم قطعیت یادشده، رویکردی به نام پیش‌بینی احتمالاتی وجود دارد. لورنز (۱۹۶۳) بحث پیش‌بینی احتمالاتی را با اثبات آشوبناکی سامانه دینامیکی جو آغاز

کرد. در این روش وضعیت آینده جو بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت ذاتی آن به‌طور قطعی پیش‌بینی نمی‌شود، بلکه با صدور پیش‌بینی احتمالاتی، شانس وقوع حالات ممکن آینده جو را محاسبه می‌کند، عدم قطعیت کمی می‌شود و می‌توان به اطلاعات بیشتر و دقیق‌تری دست یافت. در روش گفته‌شده علاوه بر یک مدل با یک مقدار اولیه، یک طرح‌واره فیزیکی و یک هسته دینامیکی نیز در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین در این سامانه همادی به جای یک پیش‌بینی قطعی، با تغییر در شرایط اولیه، تغییر در طرح‌واره فیزیکی مدل عددی یا تغییر هسته دینامیکی، تعداد متناهی مدل پیش‌بینی تشکیل می‌شود. در این مقاله با تغییر در طرح‌واره فیزیکی مدل، عدم قطعیت ناشی از فیزیک مدل لحاظ شده است و هر پیش‌بینی تولیدشده که یک عضو سامانه تلقی می‌شود، با دیگری متفاوت است. با اعمال روش‌های آماری بر اعضای سامانه همادی، یک تابع توزیع احتمال (Probability Distribution Function) یا به اختصار، PDF) به‌دست خواهد آمد که در آن پس‌پردازش انجام شده است. این تابع توزیع، عدم قطعیت وضعیت آینده جو را توصیف می‌کند و شامل اطلاعات کافی برای نیازهای کاربران مختلف است.

از آنجاکه کاربری اراضی و پستی و بلندی در مدل‌ها و واقعیت تفاوت دارد و خطاهای زیادی در فیزیک مدل وجود دارد، خروجی مدل‌های عددی پیش‌بینی هوا خطای سامانمند دارد؛ بنابراین خروجی سامانه همادی که مجموعه خروجی مدل‌های پیش‌بینی عددی متفاوت است نیز خطای پراکندگی و میانه توزیع خواهد داشت (ویلکس، ۲۰۱۱). برای رفع نواقص و کاهش خطا و به‌دست آوردن تابع توزیع احتمال، روش‌های پس‌پردازش آماری گوناگونی مانند بافت‌نگار رتبه‌ای (همیل و کلوجی، ۱۹۹۸)، برازش لجستیک (همیل و ویتاگر، ۲۰۰۴)، روش درسینگ (رولستون و اسمیت، ۲۰۰۳)، میانگین‌گیری بیزی (Bayesian Model Averaging یا به اختصار، BMA)

فراابتکاری برای کمینه کردن CRPS (محمدی، ۲۰۱۶) اشاره کرد. در تمام مقالات مشاهده شده، نتیجه مقایسه روش های پس پردازش EMOS و BMA با سایر روش ها، برتری روش های EMOS و BMA بوده است و روش BMA را فقط اندکی که آن هم در حد چشم پوشی است، بهتر از EMOS ارزیابی کرده اند. پیش بینی همادی در مقیاس میانی و همدیدی در بعضی از مراکز دنیا عملیاتی است. در سال های اخیر، تلاش زیادی برای ایجاد سامانه همادی پس پردازش شده در ایران انجام شده است که از جمله می توان به پیش بینی احتمالاتی بارش با استفاده از پس پردازش برون داد یک سامانه همادی (آزادی و همکاران، ۱۳۹۱)، پیش بینی عددی دمای سطح زمین به صورت قطعی و احتمالاتی (محمدی، ۱۳۹۵)، واسنجی پیش بینی احتمالاتی بارش به روش میانگین گیری بیزی روی ایران (فتحی و همکاران، ۱۳۹۸)، پیش بینی احتمالاتی دمای بیشینه و کمینه با استفاده از سامانه همادی دو عضوی (آزادی و محمدی، ۱۳۹۸) اشاره کرد.

در این مطالعه برای به دست آوردن تابع چگالی احتمال از دو روش BMA و EMOS استفاده شده است. در روش BMA تابع چگالی احتمال از میانگین گیری وزنی هر یک از اعضای سامانه همادی به دست می آید. در این روش با بیشینه کردن درست نمایی، ضرایب و وزن ها در دوره آموزش تخمین زده می شوند. تابع توزیع احتمال برای پیش بینی سرعت باد در BMA، توزیع گاما است. در روش EMOS تابع چگالی احتمال از ترکیب خطی اعضای سامانه همادی و واریانس آنها به دست می آید. در این روش تخمین ضرایب با کمینه کردن امتیاز احتمالی رتبه پیوسته (CRPS) انجام می گیرد. توزیع بریده نرمال، تابع توزیع احتمال برای پیش بینی سرعت باد در EMOS است.

هدف اصلی این مقاله صدور پیش بینی یقینی سرعت باد ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته در کل ایستگاه های کشور با استفاده از دو روش BMA و EMOS و مقایسه خروجی این دو روش

(رافتری و همکاران، ۲۰۰۵)، آماره برون داد مدل همادی (Ensemble Model Output Statistics) یا به اختصار، EMOS (نیتینگ و همکاران، ۲۰۰۵)، رگرسیون همادی (آنگر و همکاران، ۲۰۰۹)، روش تورم واریانس (جانسون و بولر، ۲۰۰۹)، کالیبره انتقال و کشش (اکل و همکاران، ۲۰۱۲) و روش Ensemble-Kernel Density Model Output statistics یا به اختصار، EKDMOS (گلان و همکاران، ۲۰۰۹) ارائه شده است. در سال های اخیر، پژوهش ها و مقالات زیادی درباره پس پردازش همادی انجام شده است که می توان به مقایسه مدل های رگرسیون غیرمستقرن برای پیش بینی احتمالاتی سرعت باد (لرچ و ترارینسدتیر، ۲۰۱۳)، مقایسه روش های پس پردازش EMOS و BMA برای پیش بینی دما و سرعت باد (باران و همکاران، ۲۰۱۴)، پس پردازش پیش بینی همادی با استفاده از روش درسینگ (جی و فرانسوس، ۲۰۱۴)، استفاده از روش تورم در سامانه مدل گردش عمومی جو (القرامتی و همکاران، ۲۰۱۹)، استفاده از رگرسیون همادی برای پیش بینی پوشش ابر (باران و همکاران، ۲۰۲۰)، استفاده از بافت نگار رتبه ای برای تأیید پیش بینی همادی با وابستگی سریالی (جوچن و زیدبن، ۲۰۲۰)، مقایسه شش روش پس پردازش آماری (هان و چوی، ۲۰۱۸)، مقایسه روش های پس پردازش همادی رگرسیون لجستیک و آنالوگک پیش بینی بارش در برزیل (مدینا و تیان، ۲۰۱۹)، ارتقاء سامانه چندمدلی پیش بینی شدت سیکلون های حاره ای با استفاده از BMA (سونگ و ژو، ۲۰۱۸)، توصیف مشخصات باد سطح زمین در مقیاس جهانی (مارکوس و گنزالس، ۲۰۱۸)، پس پردازش آماری برای پیش بینی سرعت باد در سواحل (گیلبرت و همکاران، ۲۰۱۹)، پیش بینی سرعت باد با استفاده از پس پردازش پیش بینی عددی به روش تقویت گرادیان الگوریتم درختی (ژو و همکاران، ۲۰۲۰)، پس پردازش پیش بینی عددی برای پیش بینی باد (کنستانتین و همکاران، ۲۰۲۰) و ارائه الگوریتم

$$\sum_{k=1}^K w_k = 1 \quad (2)$$

اسلاتر و همکاران (۲۰۱۰) پس از برازش توزیع گاما برای پیش‌بینی سرعت باد، نشان دادند این توزیع می‌تواند برازش مناسبی برای پیش‌بینی سرعت باد باشد. تابع چگالی احتمال با پارامتر شکل (α) و پارامتر مقیاس (β) به صورت زیر است:

$$\begin{cases} g(y) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} y^{\alpha-1} \exp(-y/\beta) & y \geq \\ g(y) = 0 & y < \end{cases} \quad (3)$$

میانگین این توزیع $\mu = \alpha\beta$ و واریانس آن $\sigma^2 = \alpha\beta^2$ است.

حال باید رابطه‌ای بین پارامترهای توزیع گاما و پیش‌بینی‌های همادی برقرار کرد. برای این منظور اسلاتر و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند سرعت باد مشاهداتی تقریباً رابطه خطی با پیش‌بینی‌های سرعت باد دارد و انحراف معیار آن هم تابعی خطی از پیش‌بینی‌های همادی است. به این ترتیب، تابع چگالی احتمال توزیع گاما برای پیش‌بینی سرعت باد به صورت زیر مدل می‌شود:

$$g_k(y|f_k) = \frac{1}{\beta_k^{\alpha_k} \Gamma(\alpha_k)} y^{\alpha_k-1} \exp(-y/\beta_k) \quad (4)$$

رابطه بین پارامترهای توزیع گاما و هر عضو همادی f_k به صورت زیر است:

$$\mu_k = b_{0k} + b_{1k} f_k \quad (5)$$

$$\sigma_k = c_{0k} + c_{1k} f_k \quad (6)$$

که $\mu_k = \alpha_k \beta_k$ میانگین توزیع و $\sigma_k = \sqrt{\alpha_k \beta_k}$ انحراف معیار آن است. در راستای کاهش پارامترهای تخمین‌زده شده، محاسبات کمتر برای تخمین پارامترها و کاهش بیش از اندازه تعداد متغیر مستقل در رگرسیون (over fitting)، مقدار انحراف معیار برای همه اعضای همادی یکسان فرض شده است (اسلاتر و همکاران ۲۰۱۰). گفتنی است این موضوع تأثیری در کیفیت عملکرد پیش‌بینی ندارد؛ بنابراین c_{0k} و c_{1k} در معادله (۶) با c_0 و c_1 جایگزین می‌شوند.

با اعضای خام و میانگین خام اعضا است. خروجی یقینی پیش‌بینی سرعت باد، میانه برون‌داد توابع این دو روش است. درستی سنجی پیش‌بینی‌های یقینی این دو روش با سنجنده‌های دقت شامل نسبت صحیح، نمره موفقیت بحرانی و نسبت شانس؛ سنجنده اطمینان‌پذیری و تفکیک‌پذیری شامل نسبت هشدارهای نادرست، آهنگ هشدارهای تقلبی و آهنگ برخورد؛ امتیازهای مهارتی شامل امتیاز مهارتی هایدکه، امتیاز مهارتی پیرس، امتیاز مهارتی کلایتون، امتیاز مهارتی گیلبرت و امتیاز مهارتی Q و درنهایت، سنجنده آماری شامل خطای جذر میانگین مربعات و میانگین خطای مطلق انجام گرفته است. در بخش دوم این مطالعه، روش‌های تجزیه و تحلیل اطلاعات برای ایجاد دو پیش‌بینی به روش BMA و EMOS بررسی شده است. در بخش سوم، داده‌ها و منطقه مورد مطالعه شرح داده شده است. در بخش چهارم، روش‌های صحت‌سنجی و نتایج آن ارائه و در بخش پایانی، نتیجه‌گیری بیان شده است.

۲ روش‌های BMA و EMOS

در این بخش به اختصار روش‌های BMA و EMOS برای به‌دست‌آوردن پیش‌بینی توصیف می‌شوند.

۱-۲ روش BMA

رافتری و همکاران (۲۰۰۵) روش BMA را برای پس‌پردازش برون‌داد خام سامانه‌های همادی معرفی کردند. در روش BMA به هر عضو همادی f_k یک تابع چگالی احتمال $g_k(y|f_k)$ تخصیص داده می‌شود و تابع چگالی احتمال BMA برای کمیت هواشناسی y به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$p(y|f_1, \dots, f_k) = \sum_{k=1}^K w_k g_k(y|f_k) \quad (1)$$

که k تعداد اعضای سامانه همادی و وزن w_k مبتنی بر عملکرد k آمین پیش‌بینی در دوره آموزش است. w_k ها مثبت هستند و جمع آنها برابر با یک است:

EMOS برای کمیت پیش بینی y به شکل زیر تعریف می شود:

$$f(y) = \left[\frac{1}{\sigma} \varphi \left(\frac{y-\mu}{\sigma} \right) \right] / \Phi \left(\frac{\mu}{\sigma} \right) \quad (۹)$$

$f(y)$ برای $y > 0$ برابر صفر است و برعکس Φ و Φ به ترتیب تابع چگالی نرمال استاندارد و تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد هستند. برای اینکه رابطه (۱) تابع توزیع درستی باشد، نباید c و d منفی باشند. منفی نبودن ضرایب رگرسیونی b_1, \dots, b_k ، محدودیت اعمال شده بعدی است. این اعمال محدودیت ها نه تنها ارزش پیش بینی ها را کاهش نمی دهد، بلکه تفسیرپذیری و پایداری تخمین ها را افزایش می دهد (نیتینگ و همکاران، ۲۰۰۵). اگر این محدودیت ها در مدل EMOS اضافه شود:

$$b_1 = \beta_1^2, \dots, b_k = \beta_k^2, \quad c = \gamma^2, \quad d = \delta^2 \quad (۱۰)$$

از آنجا که بر پارامترهای β_1, \dots, β_k و γ و δ محدودیتی اعمال نشده است، توزیع نرمال بریده رابطه (۱) برای پیش بینی چگالی EMOS مناسب است.

۳ داده ها و منطقه مورد مطالعه

داده های هر عضو، پیش بینی های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته سرعت باد ۱۰ متری با تفکیک ۲۱ کیلومتر روی ایران است. برای پیش بینی ها از مدل WRF با مقادیر اولیه داده های GFS استفاده شده است و ساعت شروع پیش بینی ۱۲ UTC است. برای تولید اعضای سامانه همادی از هشت طرحواره فیزیکی لایه مرزی متفاوت استفاده شده است. سایر طرحواره های فیزیکی برای همه اعضای سامانه همادی یکسان هستند. داده های دیدبانی در سازمان هواشناسی کشور برای ۳۱ ایستگاه همیدی واقع در مراکز استان های ایران در دسترس بود و مقدار پیش بینی ها در این ایستگاه ها با روش دوخطی درون یابی شده است. بازه زمانی اجرای مدل، از اول مارس تا ۳۱ اوت ۲۰۱۷ است که کل روزها از ۱۱ آوریل تا ۳۱ اوت ۲۰۱۷، دوره آزمون فرض شده است. پیکربندی اعضای سامانه به شرح جدول ۱ است.

تخمین پارامترها با استفاده از مقادیر پیش بینی و مشاهداتی در دوره آموزش انجام می شود که دقیقاً N روز قبل از روز پیش بینی است. دوره آموزش، لغزان است و پارامترها در هر روز پیش بینی، دوباره تخمین زده می شوند. پارامترهای میانگین b_{0k} و b_{1k} با رگرسیون خطی تخمین زده می شوند؛ یعنی برای هر عضو همادی، جداگانه یک رگرسیون خطی برازش می شود که سرعت باد مشاهداتی، متغیر وابسته و سرعت باد پیش بینی شده، متغیر مستقل فرض می شود. سایر پارامترهای w_1, \dots, w_k ، c_0 و c_1 با بیشینه درست نمایی در دوره آموزش تخمین زده می شوند (رافتری و همکاران، ۲۰۰۵).

۲-۲ پس پردازش پیش بینی احتمالاتی به روش EMOS با استفاده از توزیع نرمال بریده

فرض کنید X_1, \dots, X_k اعضای مجموعه همادی k عضوی و Y کمیت هواشناسی (در اینجا سرعت باد) باشد که مقدار آن منفی نیست. تابع چگالی احتمال توزیع نرمال بریده سامانه همادی در نقطه صفر به شکل زیر تعریف می شود (تورارینز دو تیر و نیتینگ، ۲۰۱۰):

$$N^0(\mu, \sigma^2) = N^0(a + b_1 X_1 + \dots + b_k X_k, c + d S^2) \quad (۷)$$

که $\mu = a + b_1 X_1 + \dots + b_k X_k$ میانگین وزنی مجموعه همادی با اریبی تصحیح شده است. واریانس تابع چگالی پیش بینی $\sigma^2 = c + d S^2$ تابعی خطی از واریانس همادی است. ضرایب b_1, \dots, b_k نشان دهنده عملکرد اعضای همادی با توجه به داده های دوره آموزش هستند. ضرایب واریانس c و d به ترتیب معرف پراکندگی همادی و عملکرد پیش بینی میانگین همادی هستند (نیتینگ و همکاران، ۲۰۰۷). همچنین تابع وابسته واریانس همادی S^2 برابر است با:

$$S^2 = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (X_i - \bar{X})^2 \quad (۸)$$

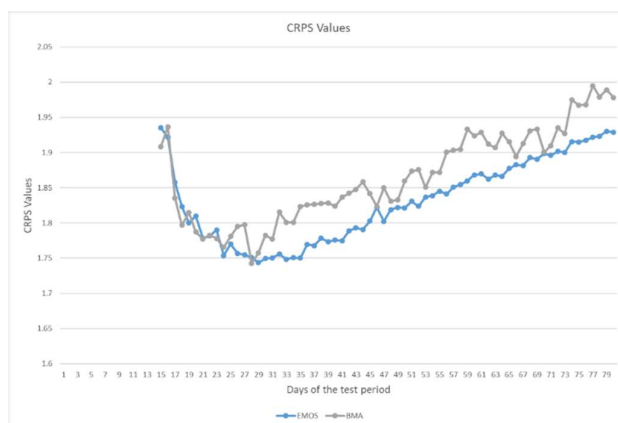
که $\bar{X} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K X_i$ است؛ بنابراین تابع چگالی پیش بینی

پیش‌بینی هر دو روش BMA و EMOS، سی روزه در نظر گرفته شد تا در شرایط یکسان، درستی‌سنجی آنها مقایسه شود. از مزایای دوره آموزش کوتاه‌مدت، توانایی سازگاری سریع با تغییرات فصلی در الگوی اریبی مدل و سرعت و سهولت در محاسبات است. گفتنی است در دوره آموزش بلندمدت، تغییرپذیری آماری کاهش می‌یابد.

برای به‌دست‌آوردن دوره آموزش بهینه، مدت دوره آموزش برای پیش‌بینی هر دو روش BMA و EMOS بین پانزده تا هشتاد روز تغییر داده شد. کمترین CRPS برای BMA در روز بیست و هشتم و برای EMOS در روز بیست و نهم به‌دست‌آمد و با CRPS روز سی‌ام مقایسه شد. سرعت باد فقط در حد چند صدم تغییر کرد که با توجه به اینکه سرعت باد دیدبانی عدد طبیعی است، دوره آموزش برای

جدول ۱. پیکربندی‌های مختلف اعضای سامانه.

عضو همادی	فیزیک تابش موج بلند/موج کوتاه	خررد فیزیک	فیزیک همرفت	سطح زمین	لایه سطحی	لایه مرزی
۱	Dudhia/rrtm	WSM 3-class	KF	Noah Unified	MM5 MO	YSU
۲	Dudhia/rrtm	WSM 3-class	KF	Unified Noah	MM5 MO	MYNN 2.5
۳	Dudhia/rrtm	WSM 3-class	KF	Unified Noah	MM5 MO	MYNN 3rd
۴	Dudhia/rrtm	WSM 3-class	KF	Unified Noah	MM5 MO	ACM2
۵	Dudhia/rrtm	WSM 3-class	KF	Unified Noah	MM5 MO	BL
۶	Dudhia/rrtm	WSM 3-class	KF	Unified Noah	MM5 MO	UW
۷	Dudhia/rrtm	WSM 3-class	KF	Unified Noah	MM5 MO	TEMF
۸	Dudhia/rrtm	WSM 3-class	KF	Unified Noah	MM5 MO	MRF



شکل ۱. مقادیر CRPS روش‌های پس‌پردازش EMOS و BMA در روزهای مختلف.

۴ روش‌ها و نتایج درستی سنجی

۴-۱ شرح مختصر روش‌های مورد استفاده جهت درستی سنجی

منظور از فرایند درستی سنجی، ارزیابی کیفیت پیش‌بینی‌های هواشناسی است و در آن، نتایج فرایند پیش‌بینی با دیدبانی متناظر مقایسه می‌شود. از نظر مدیریتی، سامانه پیش‌بینی باید کنترل شود؛ یعنی بررسی شود آیا روند کار و سامانه پیش‌بینی با گذشت زمان بهبود می‌یابد یا نه. از نظر علمی، باید موارد قوت و ضعف سامانه پیش‌بینی شناسایی شود تا از بازخورد آن در بهبود سامانه پیش‌بینی بهره‌گیری شود. از دیدگاه اقتصادی، کاربران و سرمایه‌گذاران همواره انتظار توجیه شدن نسبت به درستی پیش‌بینی‌های دریافت شده را دارند تا بتوانند عملکرد سامانه‌های مختلف پیش‌بینی را با هم مقایسه کنند. برای نمونه اگر کاربران، مبلغی را در ازای دریافت خدمات پیش‌بینی وضع هوا می‌پردازند، ضروری است آنها را از درصد درستی آنچه دریافت کرده‌اند، با اجرای فرایند درستی سنجی مطمئن کرد. تمام اعضای سامانه و برون‌داد روش‌ها با چهار گروه سنجنده زیر ارزیابی شده‌اند:

الف- دقت (accuracy): مقدار همخوانی بین پیش‌بینی و دیدبانی است. تفاوت بین پیش‌بینی و دیدبانی، خطای پیش‌بینی است و هر چه این خطا کمتر باشد، پیش‌بینی دقیق‌تر است؛

ب- اطمینان‌پذیری و تفکیک‌پذیری (reliability and resolution): میانگین همخوانی بین مقادیر پیش‌بینی و دیدبانی است و تفکیک‌پذیری، توانایی پیش‌بینی در دسته‌های متفاوت فراوانی دیدبانی است؛

ج- مهارت (skill): دقت نسبی پیش‌بینی نسبت به یک پیش‌بینی مرجع است. پیش‌بینی مرجع می‌تواند میانگین اقلیمی، یک پیش‌بینی شانس یا مقدار دیدبانی در روز گذشته در همان ساعت باشد؛

د- سنجه‌های متداول آماری برای درستی سنجی: محاسبه

خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE).

سه دسته امتیازات اول بر اساس جدول دودویی (جدول ۲) محاسبه می‌شوند که در توضیحات جدول یادشده به اختصار شرح داده شده‌اند.

جدول ۲. جدول توافقی ۲*۲. y و o به ترتیب اشاره به پیش‌بینی و دیدبانی دارند.

		دیدبانی شده		
		o_1	o_2	
y_1	a	a	b	$a+b$
	c	c	d	$c+d$
		$a+c$	$b+d$	$n=a+b+c+d$

متغیرهای جدول به ترتیب عبارت‌اند از:

o_1 تعداد دفعاتی که باد در آستانه مورد نظر دیدبانی شده است؛ o_2 تعداد دفعاتی که باد در آستانه مورد نظر دیدبانی نشده است؛ y_1 تعداد دفعاتی که باد در آستانه مورد نظر پیش‌بینی شده است؛ y_2 تعداد دفعاتی که باد در آستانه مورد نظر پیش‌بینی نشده است؛ a تعداد دفعات وقوع باد در آستانه مورد نظر که وقوع آن درست پیش‌بینی شده بود؛ b تعداد دفعات به وقوع نپیوستن باد در آستانه مورد نظر که به اشتباه وقوع آن نیز پیش‌بینی شده بود؛ c تعداد دفعات وقوع باد در آستانه مورد نظر که به اشتباه وقوع آن پیش‌بینی نشده بود؛ d تعداد دفعات به وقوع نپیوستن باد در آستانه مورد نظر که به وقوع نپیوستن آن درست پیش‌بینی شده بود.

جدول ۳. احتمال مشروط.

	o_1	o_2	
y_1	a/n	b/n	$(a+b)/n$
y_2	c/n	d/n	$(c+d)/n$
	$(a+c)/n$	$(b+d)/n$	1

۴-۲ بررسی نتایج پس پردازش سامانه همدادی

در ابتدا لازم است بیان شود هر دو پیش‌بینی تولیدشده به روش‌های EMOS و BMA برای پیش‌بینی سرعت باد ۱۰ متری، تابع چگالی احتمال پس پردازش شده روزانه دارند و از آنجاکه هدف این مقاله، درستی سنجی یقینی خروجی دو پیش‌بینی تولیدشده است؛ لذا میانه تابع چگالی احتمال آن دو، پیش‌بینی یقینی در نظر گرفته شده و همراه با سرعت باد ۱۰ متری اعضای همدادی در این درستی سنجی بررسی شده است.

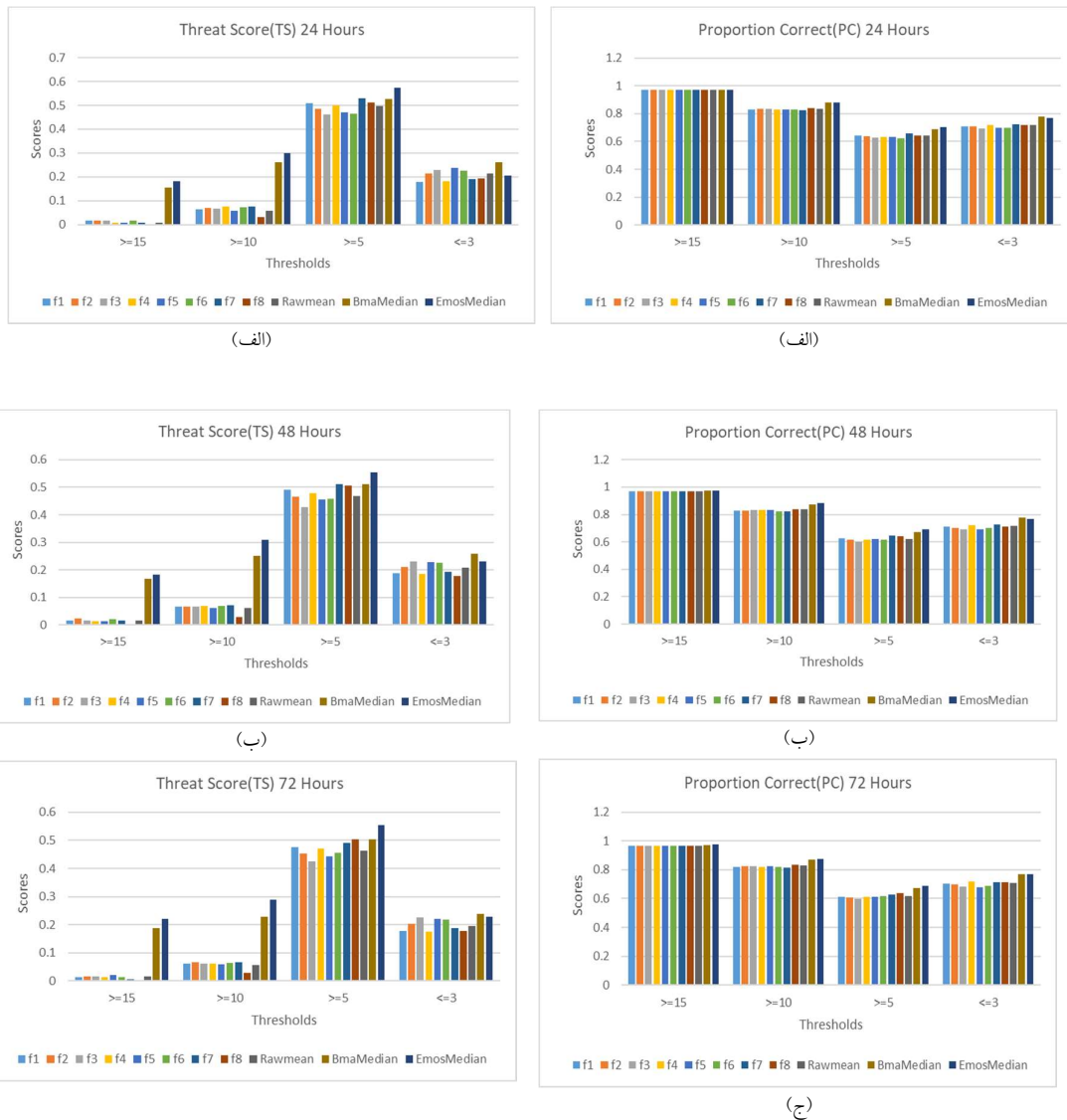
جدول ۴. معرفی سنجه‌های استفاده‌شده برای درستی‌سنجی.

مقدار کمیت برای پیش‌بینی کامل	مقدار کمیت برای بدترین پیش‌بینی	فرمول سنجه	نام سنجه	دسته‌بندی سنجه
۱	۰	$\frac{a+d}{n}$	Proportion Correct (PC)	سنجه‌های دقت
۱	۰	$\frac{a}{a+b+c}$	Threat Score (Critical Success Index) (TS)	
بی‌نهایت	۱	$\frac{ad}{bc}$	Odds Ratio (OR)	
۰	۱	$\frac{b}{a+b}$	False Alarm Ratio (FAR)	سنجه‌های اطمینان‌پذیری و تفکیک‌پذیری
۰	۱	$\frac{b+d}{a}$	False Alarm Rate (F or POFD)	
۱	۰	$\frac{a+c}{a}$	Hit Rate (H)	
۱	۰	$\frac{2(ad-bc)}{(a+c)(c+d+(a+b)(b+d))}$	HSS	سنجه‌های امتیازهای مهارتی
۱	۰	$\frac{ad-bc}{(a+c)(b+d)}$	PSS	
۱	۰	$\frac{\frac{a}{a+b} - \frac{c}{c+d}}{\frac{a}{a+b} + \frac{c}{c+d}}$	CSS	
۱	۰	$\frac{a-a_{ref}}{a-a_{ref}+b+c}, a_{ref} = \frac{(a+b)(a+c)}{n}$	GSS	
۱	۰	$\frac{ad-bc}{ad+bc}$	Q	
۰		$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i - O_i $	MAE	سنجه‌های متداول آماری
۰		$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2}$	RMSE	

۴-۲-۱ بررسی خروجی سنجه‌های دقت

سنجه‌های منتخب برای بررسی دقت پیش‌بینی‌ها PC، TS و Odds Ratio هستند. نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) شکل ۲ نشان‌دهنده مقدار کمیت PC برای سرعت باد ۱۰ متری اعضای همادی، میانگین اعضا و میانه توابع چگالی احتمال BMA و EMOS به ترتیب برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته هستند. در آستانه‌های باد با سرعت کمتر از ۳ و بیش از ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه، پیش‌بینی BMA امتیاز PC را نسبت به میانگین اعضا همادی به ترتیب ۸، ۷ و ۴ درصد و پیش‌بینی EMOS این امتیاز را در آستانه‌های بیان‌شده به ترتیب ۷، ۱۰ و ۵ درصد نسبت به امتیاز میانگین اعضا سامانه بهبود داده است. این بهبود برای بادهای بیش از ۱۵ متر بر ثانیه در هر دو روش، ناچیز و کمتر از یک درصد

بوده است. PC سنجه مناسبی برای پدیده‌های نادر نیست (بادهای با سرعت بیش از ۱۵ متر ثانیه در این مطالعه به‌ندرت اتفاق افتاده است). نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) شکل ۳ نشان‌دهنده مقدار کمیت TS برای اعضای همادی، میانگین اعضا و میانه‌های روش‌های پس‌پردازش BMA و EMOS به ترتیب برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته هستند. در آستانه‌های باد با سرعت کمتر از ۳، بیش از ۵، ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه، پیش‌بینی BMA امتیاز TS را نسبت به میانگین اعضا همادی به ترتیب ۲۲، ۷، ۳۲۱ و ۱۲۴۰ درصد بهبود داده است و پیش‌بینی EMOS این امتیاز را در آستانه‌های بیان‌شده به ترتیب ۷، ۱۷، ۴۰۷ و ۱۴۴۵ درصد نسبت به امتیاز میانگین اعضا سامانه بهبود داده است.



شکل ۲. نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) نشان دهنده امتیاز سنجنده PC
 به ترتیب برای پیش بینی های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته هستند.

شکل ۳. نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) نشان دهنده امتیاز سنجنده TS
 به ترتیب برای پیش بینی های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته هستند.

بر ثانیه، پیش بینی BMA امتیاز OR را نسبت به میانگین اعضای همادی به ترتیب ۱۴۳، ۸۶، ۱۵۵۷ و ۳۵۴ درصد و پیش بینی EMOS این امتیاز را در آستانه های بیان شده به ترتیب ۱۶۰، ۷۱، ۹۱۵ و ۲۶۰ درصد نسبت به امتیاز میانگین اعضای سامانه بهبود داده است.

نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) شکل ۴ نشان دهنده مقدار کمیت OR (Odds Ratio) برای اعضای همادی، میانگین اعضا و میانه های روش های پس پردازش BMA و EMOS به ترتیب برای پیش بینی های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته هستند. در آستانه های باد با سرعت کمتر از ۳، بیش از ۵، ۱۰ و ۱۵ متر

یادآوری می شود هرچه نسبت هشدار خطا (پیش بینی غلط وقوع پدیده) کمتر باشد، کیفیت پیش بینی بهتر است. در آستانه های باد با سرعت کمتر از ۳، بیش از ۵، ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه، پیش بینی BMA امتیاز FAR را نسبت به میانگین اعضا همادی به ترتیب ۳۲، ۳۰، ۸۰ و ۵۸ درصد و پیش بینی EMOS این امتیاز را در آستانه های بیان شده به ترتیب ۳۸، ۱۶، ۶۸ و ۴۴ درصد نسبت به امتیاز میانگین اعضای سامانه بهبود داده است. همچنان که مشاهده می شود، برای آستانه های سرعت باد ۵، ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه، کمیت FAR، پیش بینی تولید شده به روش BMA را بهتر و برای بادهای با سرعت کمتر از ۳ متر بر ثانیه پیش بینی تولید شده به روش EMOS را بهتر ارزیابی کرده است.

نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) شکل ۶ نشان دهنده مقدار کمیت آهنگ هشدار نادرست (POFD) برای اعضای همادی، میانگین اعضا و میانه های روش های پس پردازش BMA و EMOS به ترتیب برای پیش بینی های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته هستند. یادآوری می شود هرچه نسبت آهنگ هشدار نادرست (POFD) کمتر باشد، کیفیت پیش بینی بهتر است. اعضای همادی در تمام سن های پیش بینی و همچنین روش های پس پردازش BMA و EMOS برای آستانه باد بیش از ۱۵ متر بر ثانیه هشدار تقلبی صادر نکرده بودند؛ بنابراین در این آستانه POFD ارزشیابی انجام نداده است. در آستانه های باد با سرعت کمتر از ۳ و بیش از ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه، پیش بینی BMA امتیاز POFD را نسبت به میانگین اعضای همادی به ترتیب ۵۲، ۳۷ و ۶۹ درصد و پیش بینی EMOS این امتیاز را در آستانه های بیان شده به ترتیب ۶۸، ۸ و ۳۱ درصد نسبت به امتیاز میانگین اعضای سامانه بهبود داده است.

جدول ۵. درصد بهبود پیش بینی های سرعت باد به روش پس پردازش BMA و EMOS در مقایسه با میانگین خام اعضای سامانه همادی بر اساس سنجه TS.

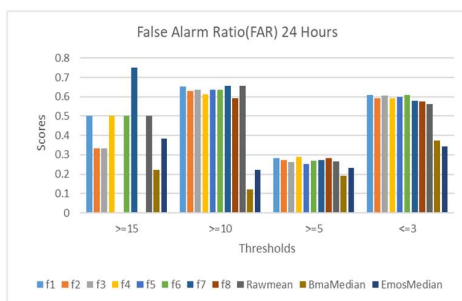
	پیش بینی ۲۴ ساعته		پیش بینی ۴۸ ساعته		پیش بینی ۷۲ ساعته	
	BM A	EMO S	BM A	EMO S	BM A	EMO S
>= ۱۵M/S	۱۸۳۵	۲۱۴۵	۱۰۰۷	۱۰۹۵	۱۱۷۸	۱۳۹۴
>= ۱۰M/S	۴۵۶	۵۱۶	۴۰۳	۴۹۵	۴۰۳	۵۱۰

جدول ۶. درصد بهبود پیش بینی های سرعت باد روش های پس پردازش BMA و EMOS در مقایسه با میانگین خام اعضای سامانه همادی بر اساس سنجه OR.

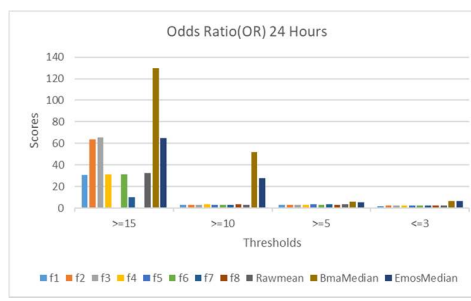
	پیش بینی ۲۴ ساعته		پیش بینی ۴۸ ساعته		پیش بینی ۷۲ ساعته	
	BM A	EMO S	BM A	EMO S	BM A	EMO S
>= ۱۵M/S	۳۹۸	۱۹۸	۴۳۶	۳۵۰	۵۲۹	۵۳۱
>= ۱۰M/S	۱۷۲۱	۹۳۲	۱۲۹۴	۹۰۸	۱۹۵۷	۱۲۰۴

۲-۲-۴ بررسی خروجی سنجه های اطمینان پذیری و تفکیک پذیری سنجه های منتخب برای بررسی اطمینان پذیری و تفکیک پذیری خروجی اعضای سامانه همادی شامل FAR (False Alarm Ratio)، F یا (False Alarm Rate) POFD و Hit Rate هستند.

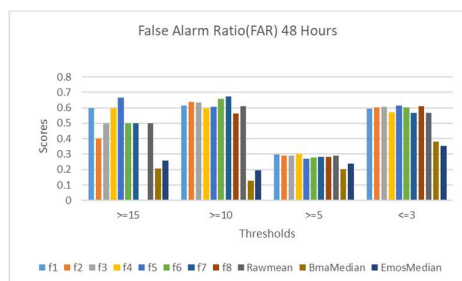
نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) شکل ۵ نشان دهنده مقدار کمیت FAR برای اعضای همادی، میانگین اعضا و میانه های روش های پس پردازش BMA و EMOS به ترتیب برای پیش بینی های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته هستند.



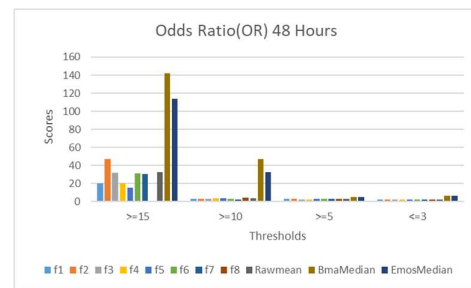
(الف)



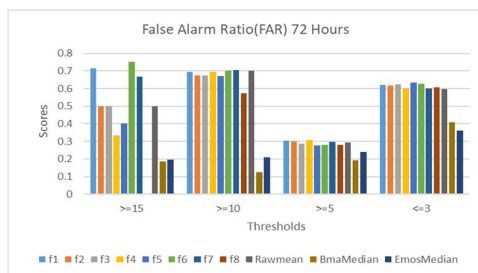
(ب)



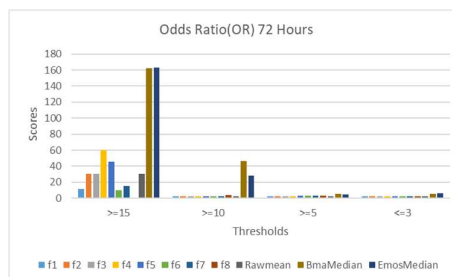
(ب)



(ب)



(ج)



(ج)

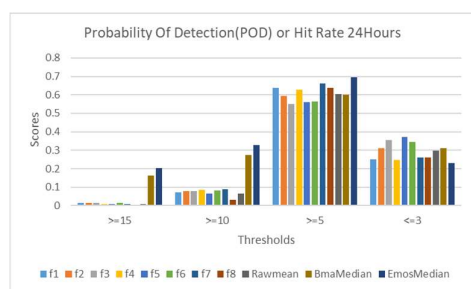
شکل ۴. نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) نشان دهنده امتیاز سنجنده OR به ترتیب برای پیش بینی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته هستند. شکل ۵. نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) نشان دهنده امتیاز سنجنده FAR به ترتیب برای پیش بینی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته هستند.

پیش بینی نتوانستند به صورت مؤثر نسبت به اصلاح پیش بینی وقوع سرعت باد عمل کنند. POD در آستانه باد بیش از ۵ متر بر ثانیه، کیفیت باد اعضای همدادی را خوب ارزیابی کرده است. شاید یکی از دلایل مؤثر نبودن روش-های BMA و EMOS در این آستانه، فراهم نبودن فضا برای ارتقای کیفیت پیش بینی است. در آستانه های سرعت باد بیش از ۱۵ و ۱۰ متر بر ثانیه، بر اساس سنجه POD، کیفیت پیش بینی اعضای همدادی ضعیف بود؛ لذا فضای کافی برای بهبود کیفیت پیش بینی ها با روش های پس پردازش BMA و EMOS فراهم بوده است. در آستانه های باد با سرعت

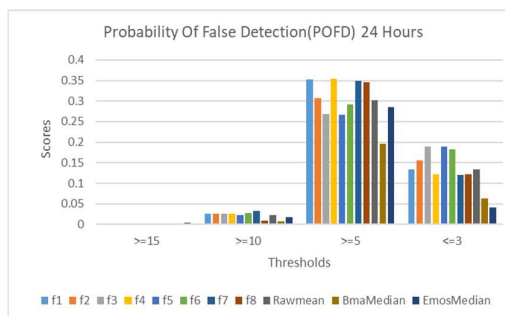
نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) شکل ۷ نشان دهنده مقدار کمیت آهنگ برخورد برای اعضای همدادی، میانگین اعضا و میانه های روش های پس پردازش BMA و EMOS به ترتیب برای پیش بینی های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته هستند. برعکس دو سنجه قبلی اطمینان پذیری و تفکیک پذیری، هرچه مقدار این سنجه بیشتر باشد، کیفیت پیش بینی بهتر است. بر اساس نمودارهای اشاره شده، در کمیت POD نشانی از بهبود پیش بینی به روش BMA و EMOS در مقایسه با اعضا برای آستانه های بیش از ۵ و کمتر از ۳ متر بر ثانیه دیده نمی شود؛ یعنی در این دو آستانه، این دو روش

نسبت به امتیاز میانگین اعضای سامانه نشان می‌دهد. در جدول ۷ بهبود پیش‌بینی به روش‌های BMA و EMOS در مقایسه با میانگین پیش‌بینی اعضا بر اساس سنجه POD آمده است.

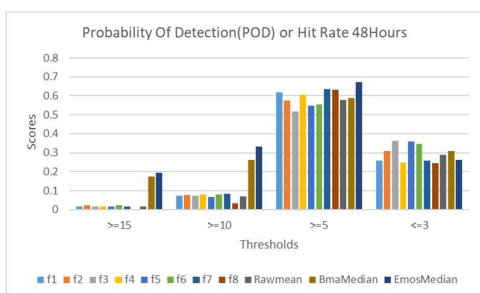
کمتر از ۳، بیش از ۵، ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه، پیش‌بینی BMA امتیاز POD را نسبت به میانگین اعضای همادی به ترتیب ۴، ۲۸۷، ۰ و ۱۲۸۴ درصد و پیش‌بینی EMOS این امتیاز را در آستانه‌های بیان‌شده به ترتیب ۱۲-، ۱۵، ۳۸۸ و ۱۵۶۷ درصد



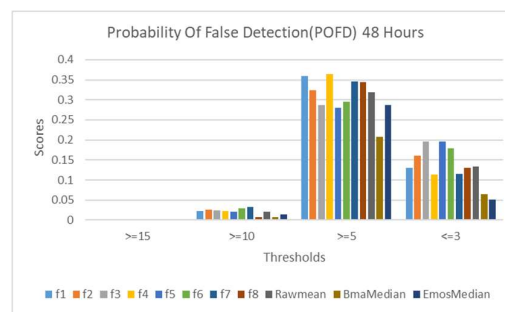
(الف)



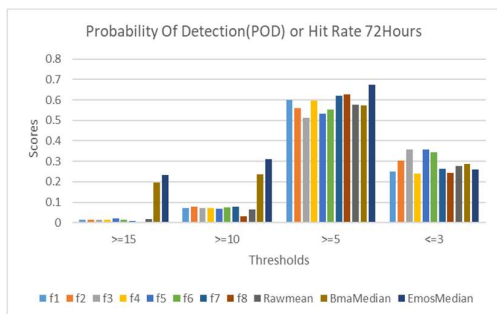
(ب)



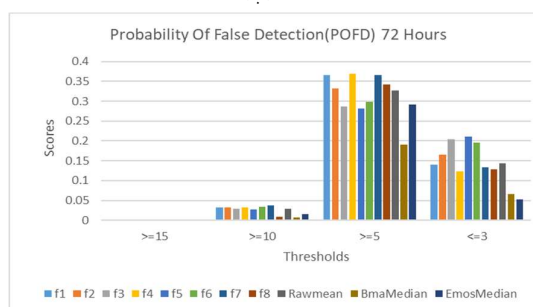
(ب)



(ب)



(ج)



(ج)

شکل ۷. نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) نشان‌دهنده امتیاز سنجه POD به ترتیب برای پیش‌بینی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته هستند.

شکل ۶. نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) نشان‌دهنده امتیاز سنجه POD به ترتیب برای پیش‌بینی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته هستند.

سامانه HSS، PSS، GSS، CSS و Q هستند. به دلیل اینکه امتیازهای مهارتی فوق تقریباً نتایج مشابهی دارند، به روش

۳-۲-۴ بررسی سنجه‌های امتیازهای مهارتی
سنجه‌های منتخب برای بررسی امتیازهای مهارتی خروجی

مشابه استخراج شده‌اند و مقادیر آنها بین صفر تا یک به ترتیب برای پیش‌بینی بی‌مهارت تا پیش‌بینی کامل است؛ لذا این پنج کمیت بر اساس نمودارها و جدول زیر شرح داده شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نمودارهای ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ به ترتیب نشان‌دهنده امتیازهای مهارتی HSS، PSS، CSS، GSS و Q هستند.

جدول ۷. درصد بهبود پیش‌بینی‌های سرعت باد روش‌های پس پردازش BMA و EMOS در مقایسه با میانگین خام اعضای سامانه همادی بر اساس سنجه POD

	پیش‌بینی ۲۴ ساعته		پیش‌بینی ۴۸ ساعته		پیش‌بینی ۷۲ ساعته	
	BMA	EMOS	BMA	EMOS	BMA	EMOS
>=۱۵ M/S	۱۹۰۴	۲۴۰۰	۱۰۳۵	۱۱۵۰	۱۲۱۲	۱۴۵۰
>=۱۰ M/S	۴۲۱	۵۰۵	۳۷۸	۴۸۰	۳۶۲	۴۸۰

جدول ۸. درصد بهبود پیش‌بینی‌های سرعت باد روش‌های پس پردازش BMA و EMOS در مقایسه با میانگین خام اعضای سامانه همادی بر اساس سنجه‌های امتیازهای مهارتی برای پیش‌بینی ۲۴ ساعته.

Thresholds	HSS		PSS		CSS		GSS		Q	
	BMA	EMOS	BMA	EMOS	BMA	EMOS	BMA	EMOS	BMA	EMOS
>=۱۵ M/S	۱۵۵۲	۱۷۷۹	۱۸۴۷	۲۳۲۸	۵۹	۲۵	۱۷۸۵	۲۰۸۹	۴	۳
>=۱۰ M/S	۴۸۳	۵۲۳	۵۲۹	۶۳۴	۲۸۵	۲۴۰	۵۹۲	۶۸۱	۹۲	۸۶
>=۵ M/S	۳۰	۳۶	۳۳	۳۴	۳۵	۳۴	۳۸	۴۵	۲۸	۲۵
<=۳ M/S	۶۱	۲۹	۵۰	۱۴	۹۴	۱۰۰	۷۱	۳۳	۵۷	۵۸

جدول ۹. درصد بهبود پیش‌بینی‌های سرعت باد روش‌های پس پردازش BMA و EMOS در مقایسه با میانگین خام اعضای سامانه همادی بر اساس سنجه‌های امتیازهای مهارتی برای پیش‌بینی ۴۸ ساعته.

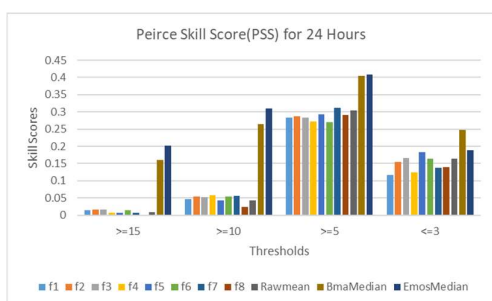
Thresholds	HSS		PSS		CSS		GSS		Q	
	BMA	EMOS	BMA	EMOS	BMA	EMOS	BMA	EMOS	BMA	EMOS
>=۱۵ M/S	۸۰۴	۸۷۱	۹۶۰	۱۰۷۴	۶۳	۵۲	۹۳۵	۱۰۲۵	۴	۴
>=۱۰ M/S	۳۷۹	۴۶۶	۴۱۷	۵۴۷	۲۱۱	۱۸۹	۴۶۱	۵۸۹	۶۹	۶۶
>=۵ M/S	۴۲	۴۹	۴۵	۴۷	۴۶	۴۶	۵۱	۶۰	۳۹	۳۵
<=۳ M/S	۶۷	۵۱	۵۶	۳۷	۱۰۰	۱۰۷	۷۹	۵۹	۶۲	۶۴

جدول ۱۰. درصد بهبود پیش‌بینی‌های سرعت باد روش‌های پس پردازش BMA و EMOS در مقایسه با میانگین خام اعضای سامانه همادی بر اساس سنجه‌های امتیازهای مهارتی برای پیش‌بینی ۷۲ ساعته.

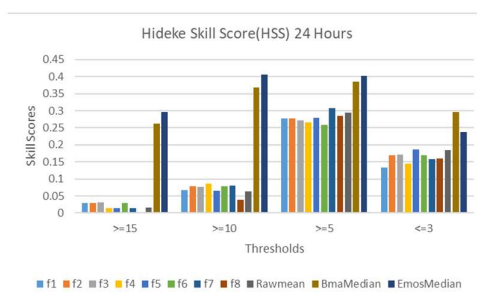
Thresholds	HSS		PSS		CSS		GSS		Q	
	BMA	EMOS	BMA	EMOS	BMA	EMOS	BMA	EMOS	BMA	EMOS
>=۱۵ M/S	۹۴۶	۱۱۰۵	۱۱۴۴	۱۳۸۷	۶۷	۶۶	۱۱۱۷	۱۳۴۲	۵	۵
>=۱۰ M/S	۵۰۹	۶۳۷	۵۳۰	۷۱۵	۴۰۷	۳۵۹	۶۰۸	۷۹۲	۱۳۷	۱۳۰
>=۵ M/S	۴۹	۵۵	۵۳	۵۴	۵۷	۵۳	۶۰	۶۸	۴۸	۴۱
<=۳ M/S	۷۸	۷۴	۶۴	۵۶	۱۱۹	۱۴۱	۹۰	۸۵	۷۷	۸۶

EMOS را نسبت به مهارت میانگین خام اعضا بین ۱۵ تا ۲۳ برابر برای آستانه باد با سرعت بیش از ۱۵ متر بر ثانیه و پنج تا هفت برابر برای آستانه سرعت باد بیش از ۱۰ متر بر ثانیه نشان می‌دهند. با همین مقایسه، سه سنجه گفته شده، بهبود پیش‌بینی ۴۸ ساعته را برای آستانه سرعت باد بیش از ۱۵ متر بر ثانیه، هشت تا یازده برابر و برای آستانه سرعت باد بیش از ۱۰ متر بر ثانیه، چهار تا شش برابر نشان می‌دهند. بهبود پیش‌بینی ۷۲ ساعته به

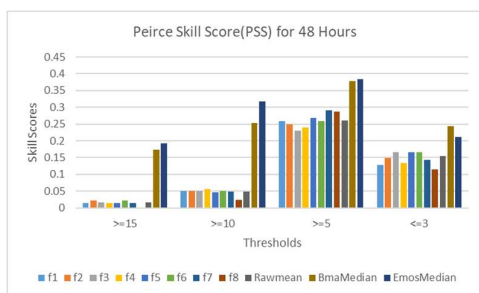
با مراجعه به جداول امتیازهای مهارتی که درصد امتیازهای پیش‌بینی به روش BMA و EMOS را نسبت به امتیاز میانگین اعضا در هر آستانه سرعت باد نشان می‌دهد و همچنین نمودارهای هر سنجه که در آن مهارت تمام اعضا به تفکیک و پیش‌بینی به روش BMA و EMOS آمده است، برتری مهارت پیش‌بینی‌ها به روش BMA و EMOS بر مهارت اعضای سامانه مشهود است. برای پیش‌بینی ۲۴ ساعته سنجه‌های HSS، PSS و GSS مهارت BMA و



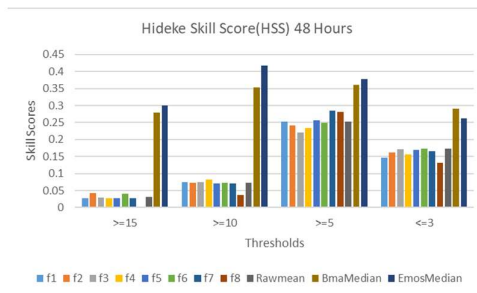
(الف)



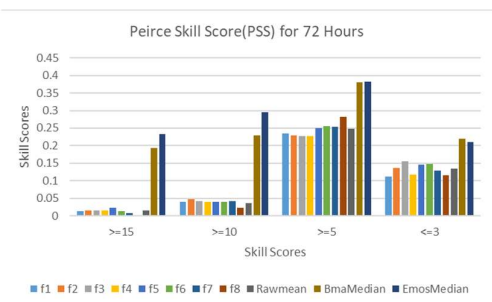
(الف)



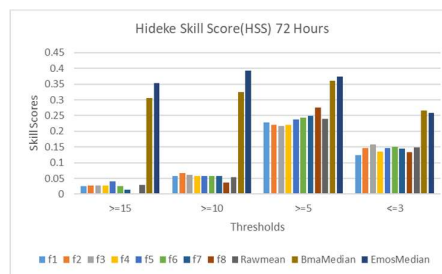
(ب)



(ب)



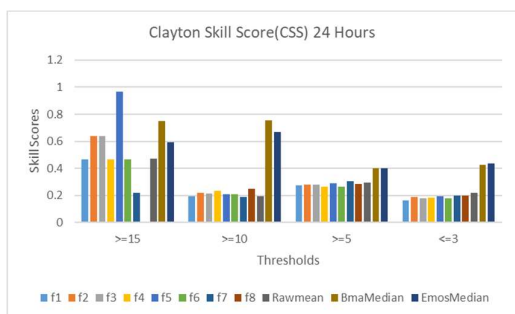
(ج)



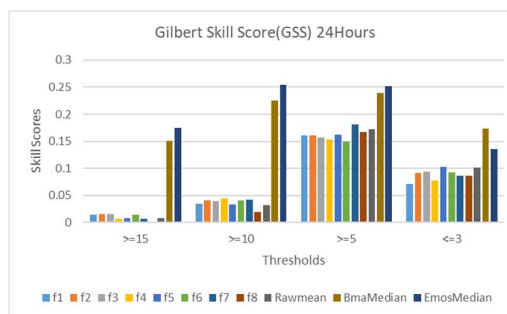
(ج)

شکل ۹. نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) نشان‌دهنده امتیاز مهارتی سنجنده PSS به ترتیب برای پیش‌بینی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته هستند.

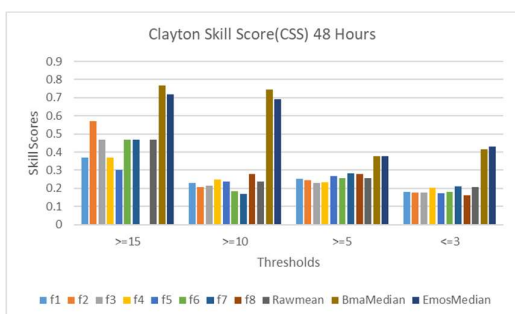
شکل ۸. نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) نشان‌دهنده امتیاز مهارتی سنجنده HSS به ترتیب برای پیش‌بینی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته هستند.



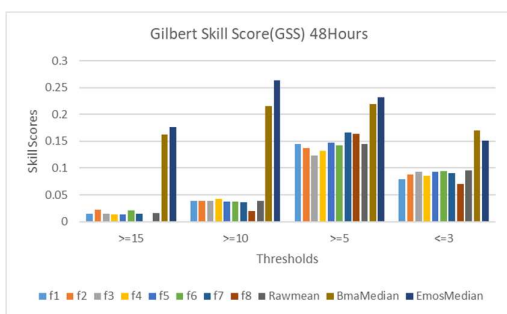
(الف)



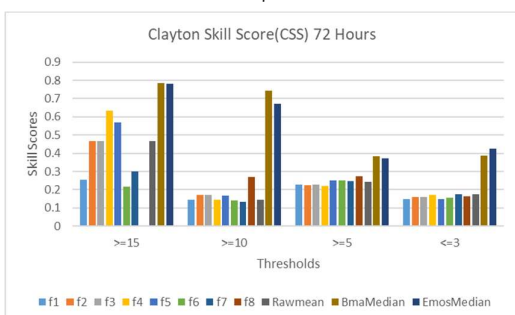
(الف)



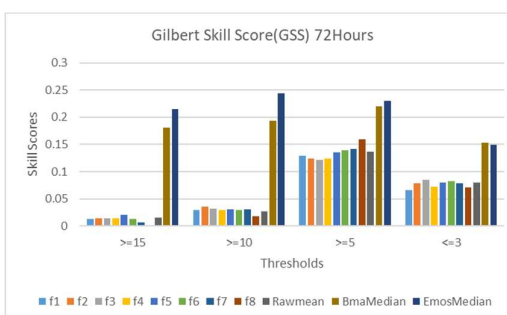
(ب)



(ب)



(ج)



(ج)

شکل ۱۱. نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) نشان دهنده امتیاز مهارتی سنجنده CSS به ترتیب برای پیش بینی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته هستند.

شکل ۱۰. نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) نشان دهنده امتیاز مهارتی سنجنده GSS به ترتیب برای پیش بینی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته هستند.

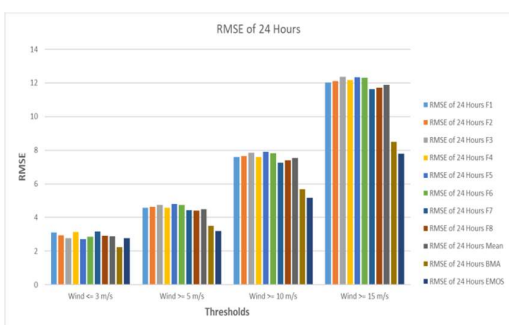
میانگین BMA و EMOS را نسبت به میانگین اعضا به ترتیب ۶۰ و ۴ درصد نشان می دهند. برای آستانه های سرعت باد بیش از ۵ و کمتر از ۳ متر بر ثانیه تمام پنج سنجه مهارتی HSS، PSS، GSS، CSS و Q بهبود پیش بینی به روش BMA و EMOS را نسبت به میانگین اعضا در تمام سن های پیش بینی بین ۳۴ تا ۱۱۶ درصد نشان می دهند. در کل پیش بینی به روش EMOS مهارت بهتری را

روش BMA و EMOS نسبت به میانگین اعضا با سه سنجه فوق برای آستانه سرعت باد بیش از ۱۵ متر بر ثانیه، نه تا چهارده برابر و برای آستانه سرعت باد بیش از ۱۰ متر بر ثانیه، پنج تا هشت برابر است. نمودارهای CSS و Q نشان می دهند ارزیابی این سنجه ها برای آستانه باد بیش از ۱۵ متر بر ثانیه اعضا خوب بوده است. ارزیابی CSS و Q برای میانگین اعضا به ترتیب ۰/۵ و ۰/۹ از ۱ است. با این حال، این دو سنجه امتیاز مهارتی

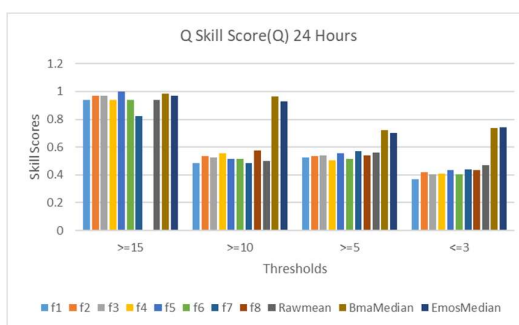
میانگین مربعات RMSE و نمودارهای الف، ب و ج شکل ۱۴ میانگین خطای مطلق MAE را نشان می دهند. در تمام سن‌های پیش‌بینی همچنان که سرعت باد آستانه‌های انتخابی افزایش می‌یابد، مقدار RMSE و MAE نیز افزایش می‌یابد، ولی در تمام آستانه‌ها و برای تمام سن‌های پیش‌بینی، مقدار RMSE و MAE دو روش تولیدی از میانگین خام اعضا و هر کدام از هشت عضو کمتر است. در

نسبت به پیش‌بینی به روش BMA برای آستانه‌های بادهای بیش از ۱۵ و ۱۰ متر بر ثانیه (۱۷ درصد) دارد ولی برای بادهای بیش از ۵ و کمتر از ۳ متر بر ثانیه تفاوت معناداری در مقایسه این دو روش با یکدیگر مشاهده نمی‌شود.

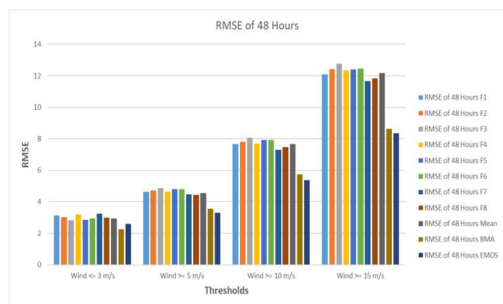
۴-۲-۴ سنجه‌های متداول آماری برای درستی سنجی نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) شکل ۱۳ خطای جذر



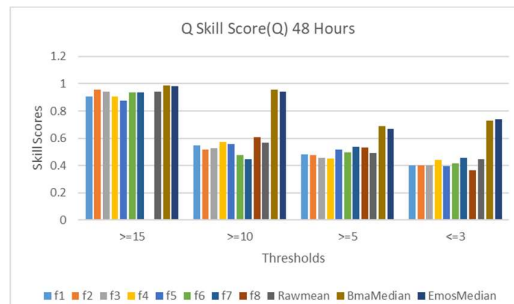
(الف)



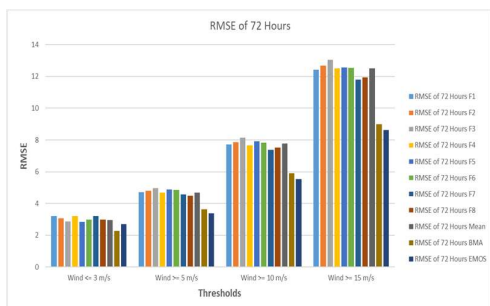
(الف)



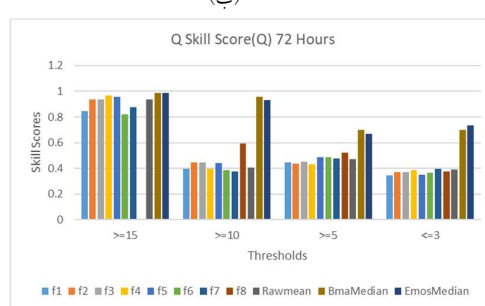
(ب)



(ب)



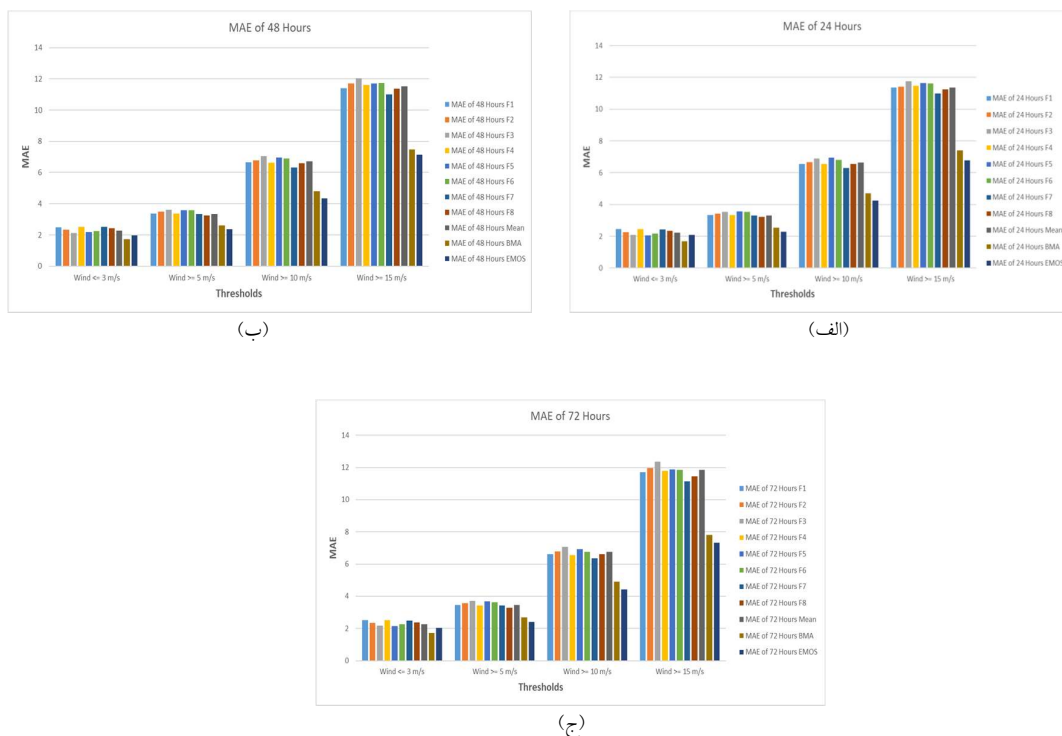
(ج)



(ج)

شکل ۱۳. نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) نشان‌دهنده خطای جذر میانگین مربعات RMSE به ترتیب برای پیش‌بینی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته هستند.

شکل ۱۲. نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) نشان‌دهنده امتیاز مهارتی سنجه Q به ترتیب برای پیش‌بینی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته هستند.



شکل ۱۴. نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) نشان دهنده خطای مطلق میانگین MAE به ترتیب برای پیش بینی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته هستند.

اقلیم سرد شامل اقلیم های سرد و خیلی سرد؛
 اقلیم خشک داغ شامل اقلیم های خشک داغ و
 خیلی خشک داغ؛
 اقلیم معتدل بارانی شامل اقلیم های معتدل بارانی و
 نیمه معتدل بارانی؛
 اقلیم نیمه خشک؛
 اقلیم داغ و مرطوب.

نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) شکل ۱۶ خطای جذر میانگین مربعات RMSE و نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) شکل ۱۷ میانگین خطای مطلق MAE تمام اعضای سامانه، میانگین اعضا و برون داد روش های BMA و EMOS را در اقلیم های متفاوت کشور نشان می دهند.

در اقلیم های سرد، نیمه خشک، خشک داغ، داغ و مرطوب و در نهایت، معتدل بارانی در پیش بینی BMA مقدار سنجه RMSE و MAE نسبت به میانگین اعضا

آستانه های باد با سرعت کمتر از ۳، بیش از ۵، ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه، در پیش بینی BMA مقدار سنجه RMSE نسبت به میانگین اعضا همادی به ترتیب ۲۳، ۲۲، ۲۵ و ۲۹ درصد و در پیش بینی EMOS این امتیاز در آستانه های بیان شده به ترتیب ۸، ۲۸، ۳۰ و ۳۲ درصد نسبت به امتیاز میانگین اعضا سامانه کاهش یافته است؛ بنابراین در آستانه باد با سرعت کمتر از ۳ متر بر ثانیه، BMA و در سایر آستانه ها، EMOS عملکرد به نسبت بهتری داشته است.

۴-۲-۵ درستی سنجی برون داد روش های پس پردازش BMA و EMOS با RMSE برای اقلیم های متفاوت کشور

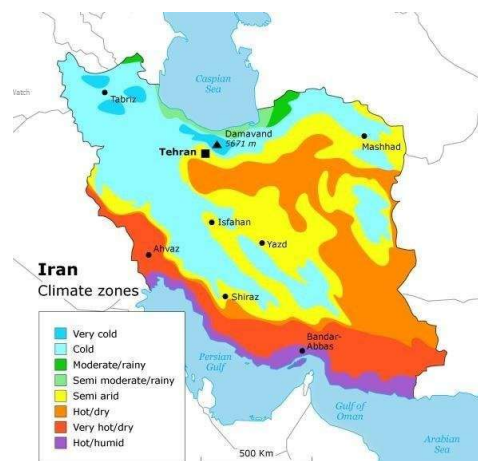
ایران به هشت اقلیم متفاوت به شرح شکل ۱۵ تقسیم بندی شده است (علیزاده، ۲۰۱۴). در این مطالعه اقلیم های نزدیک به هم در یک دسته قرار گرفته اند؛ بنابراین هشت اقلیم به پنج دسته به شرح زیر تبدیل شده اند:

سرد و کوهستانی و بهترین عملکرد آنها در مناطق گرم و مرطوب (سواحل جنوبی کشور) بوده است.

۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

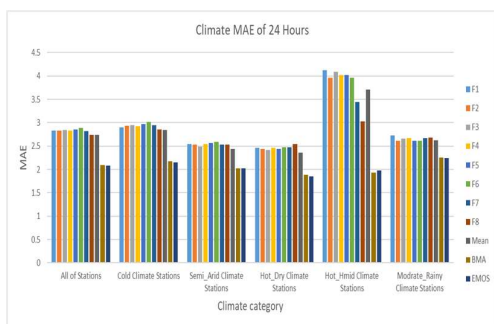
هدف از نگارش این مقاله ارائه خروجی یقینی یک پژوهش همادی پس‌پردازش‌شده به دو روش EMOS و BMA و بررسی کیفیت آنها در مقایسه با اعضای همادی، که هر کدام یک پیش‌بینی تولیدشده با WRF هستند، با روش‌های مختلف صحت‌سنجی است. با توجه به کمینه CRPS برای هر دو روش BMA و EMOS، دوره آموزش سی‌روزه انتخاب شده است. این دوره لغزان است؛ به این معنی که برای ایجاد هر تابع چگالی احتمال و صدور پیش‌بینی احتمالاتی هر دو روش در هر روز، دوره آموزش شامل سی‌روز قبل از روز پیش‌بینی است. تابع چگالی احتمال EMOS، نرمال بریده و تابع چگالی BMA، تابع گاما است. توابع چگالی احتمال در هر کدام از دو روش BMA و EMOS برای هر روز پیش‌بینی طوری تعریف می‌شوند که مرکز توزیع، کمترین فاصله را با داده دیدبانی در همان زمان پیش‌بینی داشته باشد و در اطراف نقطه دیدبانی متمرکز باشد. هر دو پیش‌بینی به روش BMA و EMOS توانایی ارائه تمام محصولات پیش‌بینی احتمالاتی را دارند، ولی چون هدف در این مقاله، صحت‌سنجی پیش‌بینی یقینی این دو روش است؛ لذا میانه هر دو روش به‌عنوان پیش‌بینی یقینی آنها انتخاب شده است و به همراه پیش‌بینی، هشت عضو همادی و میانگین خام آنها درستی‌سنجی شدند و کیفیت پیش‌بینی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته آنها نقد و بررسی شد. تمام اعضای سامانه، میانگین خام اعضا و برون‌داد مدل‌ها با چهار دسته سنجه دقت، اطمینان‌پذیری و تفکیک‌پذیری، مهارت و سنجه‌های آماری درستی‌سنجی شدند. در ارزیابی سنجنده‌های دقت، سنجه PC گویای این مطلب بود که برای آستانه‌های سرعت باد کمتر از ۳ و

همادی در همان اقلیم‌ها به ترتیب ۲۲، ۲۳، ۱۲، ۱۰، ۴۴ و ۱۶ درصد و در پیش‌بینی EMOS این امتیاز در آستانه‌های بیان‌شده به ترتیب ۲۴، ۲۴، ۱۵، ۱۳، ۴۶ و ۱۸ درصد نسبت به امتیاز میانگین اعضای سامانه در همان اقلیم‌ها کاهش یافته است.

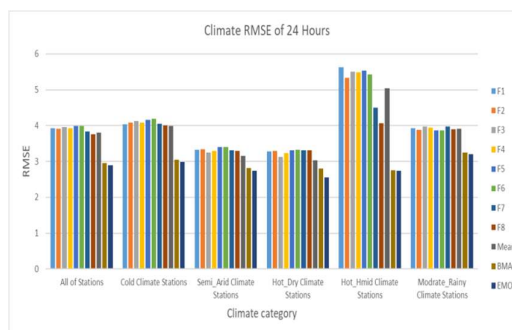


شکل ۱۵. دسته‌بندی اقلیم‌های متفاوت کشور.

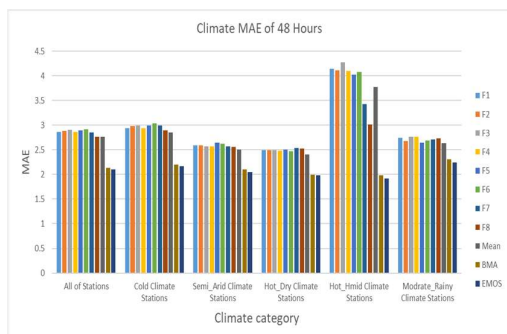
مجموع شکل‌های ۱۸، ۱۹ و ۲۰ خطای جذر میانگین مربعات را به ترتیب برای پیش‌بینی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته اعضای همادی و روش‌های پس‌پردازش BMA و EMOS روی نقشه ایران نشان می‌دهد. این شکل‌ها عملکرد اعضا و روش‌های پس‌پردازش تولیدی را علاوه بر اقلیم‌های شرح داده شده که بر اساس دما و رطوبت بودند، روی پستی و بلندی‌های کشور نیز نشان می‌دهند. درباره میزان کاهش خطای جذر میانگین مربعات هر دو روش نسبت به جذر میانگین مربعات میانگین اعضا در هر اقلیم پیش از این صحبت شده است و مقادیر خطای جذر میانگین مربعات میانگین خطای مطلق هر اقلیم در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ آورده شده است. بر اساس تطبیق داده‌های RMSE بر نقشه کشور مشخص شد کمترین بهبود عملکرد این دو روش در مناطق



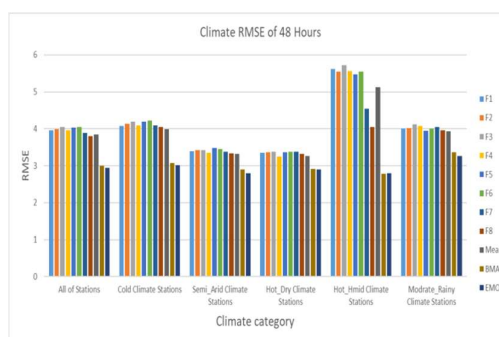
(الف)



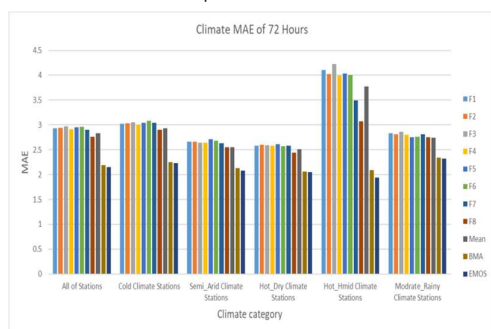
(الف)



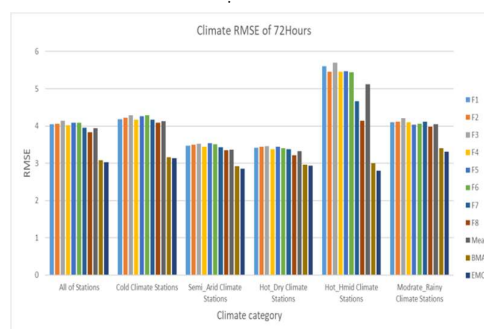
(ب)



(ب)



(ج)



(ج)

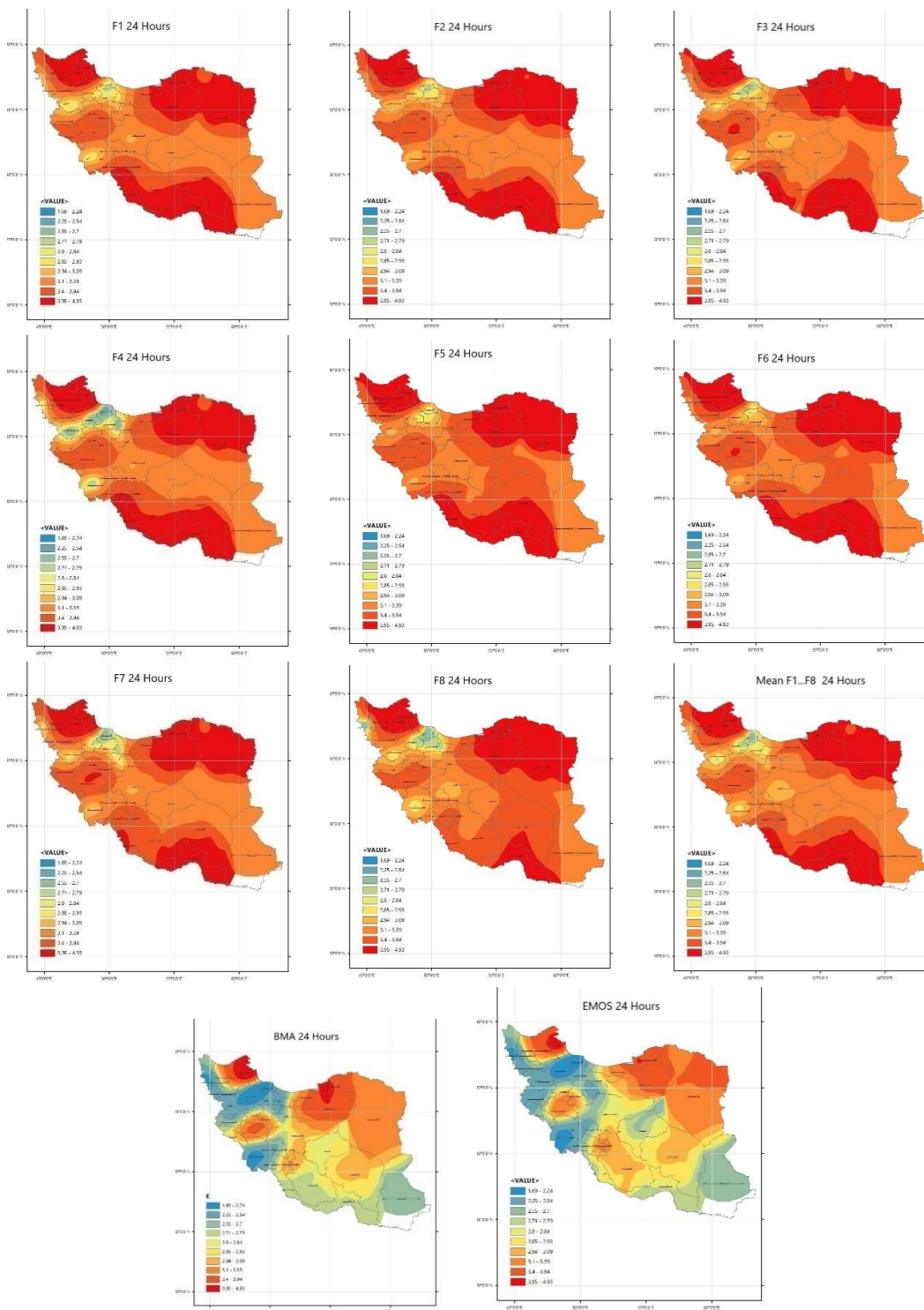
شکل ۱۷. نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) نشان دهنده میانگین خطای مطلق به ترتیب برای پیش بینی ۴۸، ۷۲ و ۲۴ ساعت در اقلیم های متفاوت ایران هستند.

شکل ۱۶. نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) نشان دهنده خطای جذر میانگین مربعات به ترتیب برای پیش بینی ۴۸، ۷۲ و ۲۴ ساعت در اقلیم های متفاوت ایران هستند.

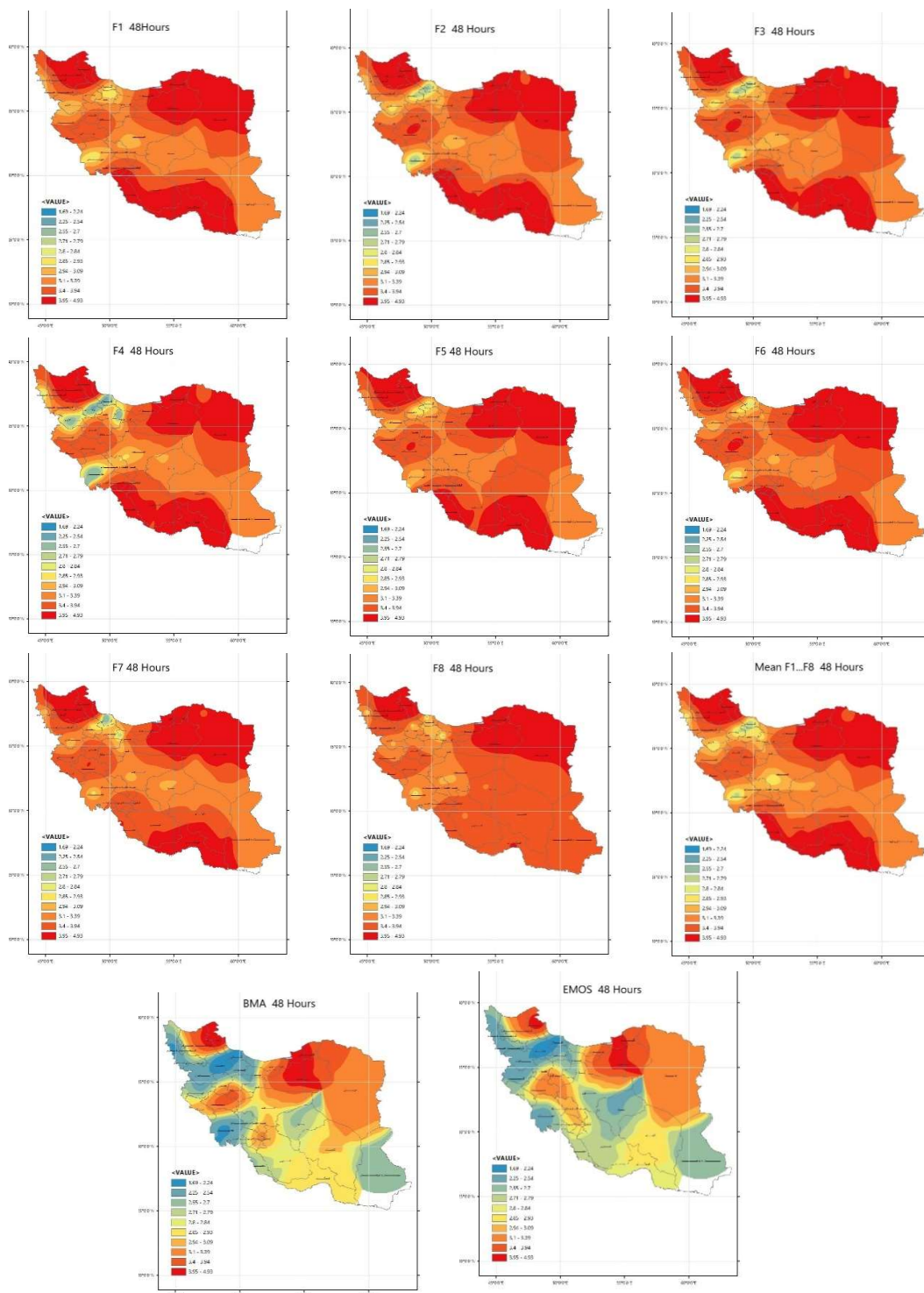
پیش بینی به روش BMA و EMOS از دقت به مراتب بهتری نسبت به اعضا به خصوص در بادهای با سرعت بیش از ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه در همه سن های پیش بینی برخوردار است.

در بخش اطمینان پذیری و تفکیک پذیری، سنجنده FAR نشان می دهد پیش بینی غلط وقوع باد در همه

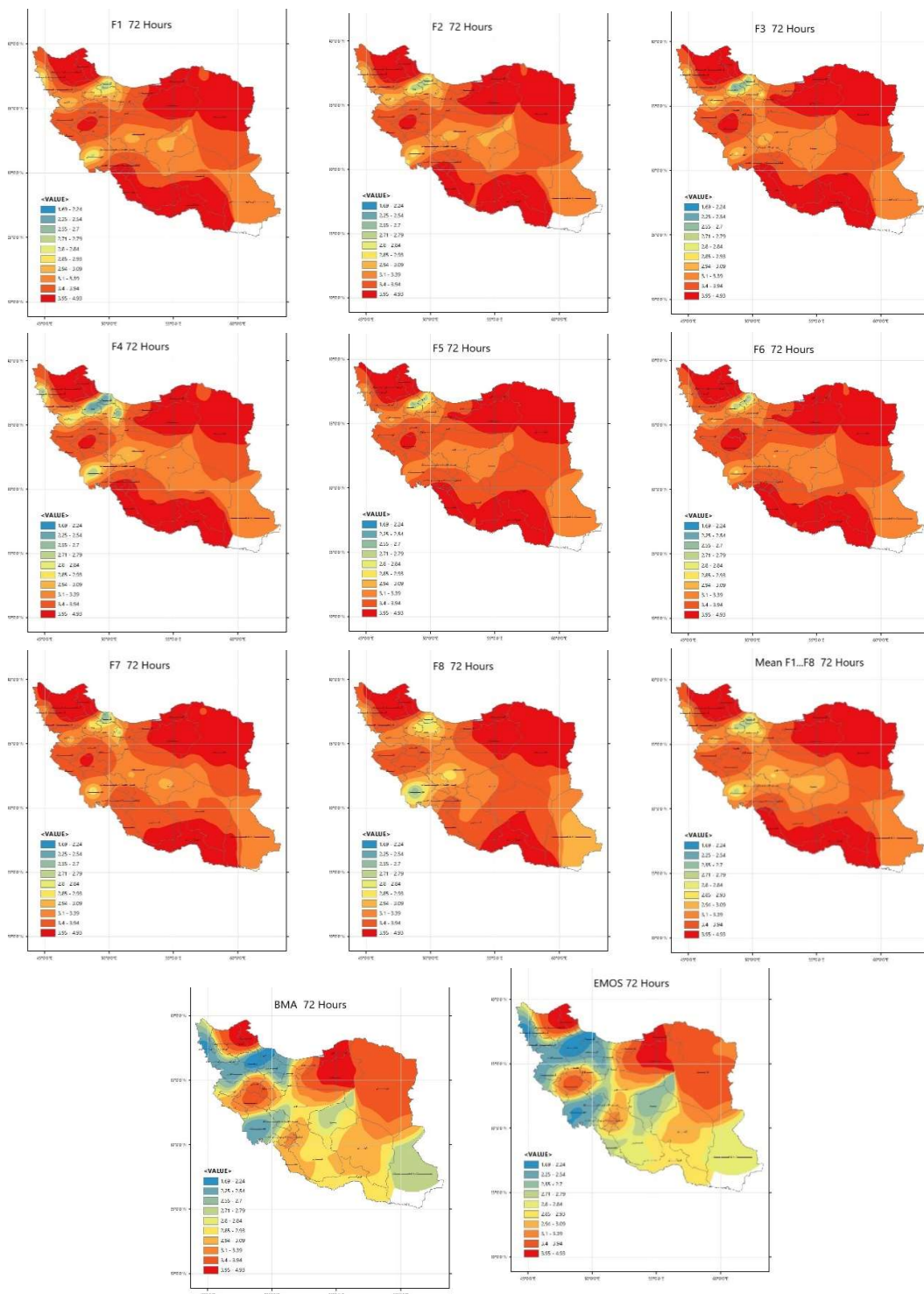
بیش از ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه، BMA و EMOS نسبت به همه اعضای همادی در همه روزهای پیش بینی (۴۸، ۷۲ و ۲۴ ساعت) بهتر بودند. سنجه های TS و OR نیز از بهبود چشمگیر پیش بینی های BMA و EMOS نسبت به اعضا سامانه در آستانه های سرعت باد بیش از ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه اشاره دارند. در مجموع، سنجنده های دقت نشان می دهند



شکل ۱۸. درستی سنجی خطای جذر میانگین مربعات ۲۴ ساعته در ایران به تفکیک برای اعضا سامانه همادی، میانگین خام سامانه و خروجی روش‌های پس‌پردازش BMA و EMOS.



شکل ۱۹. درستی سنجی خطای جذر میانگین مربعات ۴۸ ساعته در ایران به تفکیک برای اعضا سامانه همادی، میانگین خام سامانه و خروجی روش های پس پردازش BMA و EMOS.



شکل ۲۰. درستی‌سنجی خطای جذر میانگین مربعات ۷۲ ساعته در ایران به تفکیک برای اعضا سامانه همدادی، میانگین خام سامانه و خروجی روش‌های پس‌پردازش BMA و EMOS.

به اعضای همادی داشته اند. با توجه به سنجنده های آماری مورد نظر، عملکرد هر دو روش در اقلیم های متفاوت تقریباً یکسان بوده است و نسبت به یکدیگر برتری نداشتند. در این نمودارها، اعضای همادی در اقلیم داغ و مرطوب بیشترین خطا را در مقایسه با سایر اقلیم ها داشته اند. علت این موضوع نامشخص است. جالب آنکه روش های EMOS و BMA بیشترین بهبود را در اقلیم داغ و مرطوب ایجاد کرده اند و در نتیجه، این اقلیم کمترین خطای RMSE و MAE را در مقایسه با سایر اقلیم ها دارد. به نظر می رسد این موضوع به مطالعه ای فراتر از پس پردازش و روش های به کاررفته در این مقاله نیاز داشته باشد. همچنین با ترسیم داده های RMSE اعضای همادی، میانگین خام اعضا و پیش بینی به روش های EMOS و BMA برای پستی و بلندی ایران، مشاهده شد عملکرد اعضا و پیش بینی به روش BMA و EMOS در مناطق کوهستانی نسبت به مناطق پست و هموار و سواحل جنوب کشور ضعیف تر بوده است. نظر به اینکه توانایی روش های BMA و EMOS در بهبود عملکرد پیش بینی ها محدود است؛ لذا ضعف اعضا در پیش بینی مطلوب در مناطق کوهستانی باعث شده است قدرت روش های BMA و EMOS در این مناطق زیاد محسوس نباشد. تنها استثناء، سواحل خلیج فارس است که علی رغم کیفیت ضعیف پیش بینی اعضای همادی، بر اساس ارزیابی سنجنده های آماری، روش های EMOS و BMA باعث بهبود پیش بینی ها فراتر از حد انتظار در این منطقه شده اند.

منابع

آزادی، م.، محمدی، س. ع.، ۱۳۹۸، پیش بینی احتمالاتی دمای کمینه و بیشینه روزانه روی ایران با استفاده از سامانه همادی دو عضوی: مجله نیوار، ۴۳(۱)، ۵۷-۶۶.

آزادی، م.، واشانی، س.، حجام، س.، ۱۳۹۱، پیش بینی احتمالی بارش با استفاده از پس پردازش (Post Processing) برون داد یک سامانه همادی: مجله

آستانه ها به طور مطلوب کاهش یافته است. این کمیت برای آستانه های باد با سرعت بیش از ۵، ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه پیش بینی به روش BMA و برای بادهای با سرعت کمتر از ۳ متر بر ثانیه، پیش بینی به روش EMOS را بهتر ارزیابی کرده است. POFD برای هیچ عضوی در آستانه بادهای با سرعت بیش از ۱۵ متر بر ثانیه هشدار تقابلی صادر نکرده است و کمیت خوبی برای بادهای با سرعت کمتر از ۳ متر بر ثانیه است. هر دو پیش بینی به روش BMA و EMOS خطای پیش بینی در هشدار غلط را کاهش داده اند و عملکرد EMOS از BMA بهتر بوده است. سنج Hit Rate بهبود کیفیت پیش بینی به روش BMA و EMOS را نسبت به میانگین اعضا در آستانه های سرعت باد بیش از ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه، تا ۲۴ برابر نشان می دهد. در این دو روش، EMOS عملکرد بهتری نسبت به BMA داشته است. در مجموع، در بخش اطمینان پذیری و تفکیک پذیری، هر دو پیش بینی به روش BMA و EMOS عملکرد بهتری نسبت به اعضا داشته اند و در آستانه بادهای شدید، این اطمینان پذیری و تفکیک پذیری به مراتب بهتر بوده است. در قسمت مهارت همان طور که جداول ۷، ۸ و ۹ به ترتیب برای پیش بینی های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ نشان می دهند، همه سنجنده های مهارت در همه آستانه ها بهبود عملکرد EMOS و BMA را تأیید می کنند. روش EMOS مهارت بهتری را نسبت به روش BMA برای آستانه های سرعت باد بیش از ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه نشان می دهد. در ارزیابی از دید سنجنده های آماری در همه آستانه ها و سن های پیش بینی، عملکرد EMOS و BMA بهتر از همه اعضای همادی بوده است. برای بادهای آرام، روش BMA و برای آستانه های باد با سرعت بیش از ۵، ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه، روش EMOS عملکرد بهتری داشته است.

بر اساس نمودارهای ۱۶-الف، ۱۶-ب و ۱۶-ج و نمودارهای ۱۷-الف، ۱۷-ب و ۱۷-ج در تمام اقلیم ها، پیش بینی به روش BMA و EMOS عملکرد بهتری نسبت

- atmospheric general circulation model: *Monthly Weather Review*, **147**(7), 2535–2553.
- Gilbert, C., J., Messner, W., Pinson, P., Trombe, P. J., Verzijlbergh, R., Dorp, P., and Jonker, H., 2019, Statistical post-processing of turbulence-resolving weather forecasts for offshore wind power forecasting: *Wind Energy*, <https://doi.org/10.1002/we.2456>.
- Glahn, B., Peroutka, M., Wiedefeld, J., Wagner, J., Zylstra, G., Schuknecht, B., and Jackson, B., 2009, MOS uncertainty estimates in an ensemble framework: *Monthly Weather Review*, **137**(1), 246–268.
- Gneiting, T., Balabdaoui, F., and Raftery, A., 2007, Probabilistic forecasts, calibration and sharpness: *Royal Statistical Society*, **69**(2), 243–268.
- Gneiting, T., Raftery, A., Westveld, A., and Goldman, T., 2005, Calibrated probabilistic forecasting using ensemble model output statistics and minimum CRPS estimation: *Monthly Weather Review*, **133**(5), 1098–1118.
- Hamill, T., and Colucci, A. S., 1998, Evaluation of Eta-RSM ensemble probabilistic precipitation forecast: *Monthly Weather Review*, **126**(3), 711–724.
- Hamill, T., and Whitaker, J. S., 2004: Ensemble reforecasting: Improving medium-range forecast skill using retrospective forecasts: *Monthly Weather Review*, **132**(6), 1434–1447.
- Han, K., and Choi, J. T., 2018, Comparison of statistical post-processing methods for probabilistic wind speed forecasting: *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, **54**(1), 91–101.
- Jie, C., François, P., 2014, Post processing of ensemble weather forecasts using a stochastic weather generator: *Monthly Weather Review*, **142**(3), 1106–1124.
- Jochen, B., and Zied Ben, B., 2020, Stratified rank histograms for ensemble forecast verification under serial dependence: *Royal Meteorological Society*, **146**(729), 1976–1990.
- Johnson, C., and Bowler, N., 2009, On the reliability and calibration of ensemble forecasts: *Monthly Weather Review*, **137**(5), 1717–1720.
- Konstantinou, T., Savvopoulos, N., and Hatzigaryriou, N., 2020, Post-processing numerical weather prediction for probabilistic wind forecasting: *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*, 18–21 Aug. 2020, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9183641>.
- Lerch, S., and Thorarindottir, T., 2013, *فیزیک زمین و فضا*، **۳۸**(۳)، ۲۰۳–۲۱۶.
- فتحی، م.، آزادی، م.، کمالی، غ.، مشکاتی، ا.، ۱۳۹۸، *واسنجی پیشبینی احتمالاتی بارش برونداد سامانه همدادی به روش میانگین گیری بایزی روی ایران: نشریه هواشناسی و علوم جو*، **۱**(۲)، ۱۱۴–۱۲۹.
- محمدی، س.ع.، ۱۳۹۵، *پیش بینی عددی دمای سطح زمین به صورت قطعی و احتمالی روی ایران در فصل های پاییز و زمستان: پژوهشکده توسعه تکنولوژی جهاد دانشگاهی، پایان نامه دکترای تخصصی*.
- Alizadeh, Y., 2014, Multi temporal Change Detection On Urmia lake and its Catchment Area Using Remote Sensing and Geographical Information Systems: Thesis for Master of Engineering, Istanbul Technical University.
- Baran, S., Hor'anyi, A., and Nemda, D., 2014, Comparison of BMA and EMOS statistical calibration methods for temperature and wind speed ensemble weather prediction: *Időjárás*, **118**(3), 217–241, <https://arxiv.org/abs/1312.3763v1>.
- Baran, A., Lerch, S., El Ayari, M., and Baran, S., 2020, Machine learning for total cloud cover prediction: *Neural Computing and Applications*, **33**(2021), 2605–2620, <https://link.springer.com/article/10.1007/s00521-020-05139-4>.
- Eckel, F., Allen, M., and Sittel, M., 2012, Estimation of ambiguity in ensemble forecasts: *Weather and Forecasting*, **27**(1), 50–69.
- ElGharamti, M., Raeder, K., and Anderson, J., 2019, Comparing adaptive prior and posterior inflation for ensemble filters using an Comparison of non-homogeneous regression models for probabilistic wind speed forecasting: *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, <https://doi.org/10.3402/tellusa.v65i0.21206>.
- Lorenz, E. N. The essence of chaos, University of Washington Press, 1963.
- Marcos, R., and Gonzales, N., 2018, Characterization of the near surface wind speed distribution at global scale: ERA-Interim reanalysis and ECMWF seasonal forecasting system 4: *Climate Dynamics*, **52**, 3307–3319, <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-018-4338-5>.
- Medina, H., and Tian, D., 2019, Comparing GEFS,

- ECMWF, and Post-processing methods for ensemble precipitation forecasts over Brazil: *Journal of Hydrometeorology*, **20**(4), 773–790, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0125>.
- Mohammadi, S., A., 2016, Meta-heuristic CRPS minimization for the calibration of short-range probabilistic forecasts: *Meteorology and Atmospheric Physics*, **128**(4), 429-440.
- Raftery, A., Gneiting, T., and Balabdaoui, F., 2005: Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensemble: *Monthly Weather Review*, **133**(5), 1155-1174.
- Roulston, M. S., and Smith, L. A., 2003, Combining dynamical and statistical ensembles: *Tellus A*, **55**, 16-30, <https://doi.org/10.3402/tellusa.v55i1.12082>.
- Sloughter, J. M., Gneiting, T., and Raftery, A. E., 2010, Probabilistic wind forecasting using ensembles and Bayesian model averaging: *Journal of the American Statistical Association*, **105**(489), 25–35.
- Song, X., and Zhu, Y., 2018, Improving multi-model ensemble forecasts of tropical Cyclone intensity using Bayesian model averaging: *Journal of Meteorological Research*, **32**, 794–803, <https://link.springer.com/article/10.1007/s13351-018-7117-7>.
- Thorarinsdottir, L. T., and Gneiting, T., 2010, Probabilistic forecasts of wind speed: ensemble model output statistics by using heteroscedastic censored regression: *Royal Statistical Society*, **173**(2), 371-388.
- Unger, D. A., 1985, A method to estimate the continuous ranked probability score: Ninth Conference on Probability and Statistics in Atmospheric Sciences, Virginia Beach.
- Unger, D., Van Den Dool, H., and O'Lenic, E., 2009, Ensemble regression: *Monthly Weather Review*, **137**(7), 2365-2379.
- Wilks, D., 2011, *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*: Academic Press, New York.
- Xu, W., and Ning, L., and Luo, Y., 2020, Wind speed forecast based on post-processing of numerical weather predictions using a gradient boosting decision tree algorithm: *Atmosphere*, **11**(7), 738, <https://doi.org/10.3390/atmos11070738>.

Evaluation of Deterministic Wind Speed Forecasting Output of Two Ensemble Post-Processing Methods

Masoud Dehmolaie¹, Maryam Rezazadeh^{2*} and Majid Azadi³

¹Ph.D Student, Department of Marine and Atmospheric Science (Non-Biologic), Faculty of Marine Science and Technology, University of Hormozgan, Hormozgan, Iran

² Assistant Professor, Department of Marine and Atmospheric Science (Non-Biologic), Faculty of Marine Science and Technology, University of Hormozgan, Hormozgan, Iran

³Associate Professor, Institute of Meteorological Research, tehran, Iran

(Received: 20 November 2020, Accepted: 08 May 2021)

Summary

In this study, deterministic forecasts of 10-meter wind speed for the next 24, 48 and 72 hours have been produced and analyzed over Iran using BMA and EMOS methods for post-processing of raw outputs of the ensemble systems. The main purpose of this article is to compare deterministic forecasts based on these two methods with each raw ensemble members and the mean of the raw ensemble members. The applied ensemble system consists of eight members with different boundary layer schemes in the Weather Research and Forecasting (WRF) model. Other physical schemes remained the same in the ensemble members. For each ensemble member, the 24, 48 and 72-hour forecasts of 10-meter wind speed have been conducted over Iran, with a horizontal resolution of 21 km. The Global Forecast System (GFS) is used for initial and boundary conditions of forecasts starting at 1200 UTC for each case. Observational data of 31 synoptic meteorological stations located in provincial capitals have been used for model evaluation, in which model outputs are interpolated to the locations of these stations by a bilinear method. The WRF model is run from 1 March to 31 August 2017, but the results from 11 April to 31 August 2017 are considered as the spin-up period. Indeed, after careful examination of the forecast errors using different spin-up periods, the first 30 days of the simulation are considered as the spin-up for both BMA and EMOS methods. Verification is performed by different methods (accuracy: PC, TS and OR; reliability and resolution: FAR, POFD and POD; skill: CSS, HSS, PSS, GSS and Q; statistical errors: RMSE and MAE) for 10-meter wind speed thresholds less than 3 m/s and more than 5, 10 and 15 m/s for both methods for all forecast lead times. Results indicate significant improvements in accuracy scores (300%), reliability and resolution scores (220%), skill scores (340%). Statistical error scores are also reduced by 24%. Furthermore, applying verification for different climatic regions of Iran (cold, semi-arid, hot-dry, hot-humid and moderate-rainy climate) indicates that in all climatic regions, the best performance in terms of RMSE is for BMA and EMOS methods, with the average reduction of error by 21% and 23%, respectively. Particularly, in hot and humid climates, these two methods better improve predictions, and hence, are more promising as they reduce the error by 44% and 46%, respectively.

Keywords: Ensemble forecasting, post-processing, wind speed

*Corresponding author:

rezazadeh@hormozgan.ac.ir