

بررسی پیش‌بینی احتمالاتی سرعت باد ده متری با استفاده از دو روش پس‌پردازش همادی

مسعود ده‌ملایی^۱، مجید آزادی^۲، مریم رضازاده^{۳*}

۱- دانشجوی دکترای هواشناسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۲- دانشیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

چکیده

در این پژوهش، پیش‌بینی‌های احتمالاتی سرعت باد پس از اعمال دو روش **BMA** و **NGR** بر روی برونداد خام سامانه همادی برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته تولید و با پیش‌بینی احتمالاتی خام سامانه که به روش انتخاب آزاد ایجاد شده است، مقایسه شده‌اند. سامانه همادی مورد استفاده شامل ۸ پیکربندی مختلف با تغییر گزینه‌های لایه مرزی از مدل **WRF** همگی با تفکیک ۲۱ کیلومتر روی ایران در نظر گرفته شده است. برای مقادیر اولیه و مرزی از پیش‌بینی‌های **GFS** استفاده و ساعت شروع پیش‌بینی **12 UTC** انتخاب شده است. داده‌های پیش‌بینی برای ۳۱ ایستگاه همدمی در مراکز استان‌ها درون‌یابی شده است. بازه زمانی اجرای مدل، از اول مارس تا ۳۱ آگوست سال ۲۰۱۷ و نتایج برای بازه زمانی ۱۱ آوریل تا ۳۱ آگوست سال ۲۰۱۷ به عنوان دوره آزمون در دو روش پس‌پردازش در نظر گرفته شده است. پس از بررسی خطا با دوره‌های آموزش مختلف، دوره آموزش برای پیش‌بینی در هر دو روش ۳۰ روز در نظر گرفته شد. درستی‌سنجی پیش‌بینی‌ها برای آستانه‌های سرعت باد با مقادیر کمتر از ۳ و بیشتر از ۵، ۱۰ و ۱۳ متر بر ثانیه برای هر دو روش پس‌پردازش و پیش‌بینی احتمالاتی خام سامانه برای همه سن‌های پیش‌بینی انجام گرفت. در آستانه‌های سرعت باد یاد شده امتیاز بریر پیش‌بینی‌های پس‌پردازش شده نسبت به امتیاز بریر پیش‌بینی‌های خام از ۳۳ صدم تا ۴۶ صدم، عبارت اطمینان‌پذیری از ۷۸ صدم تا ۹۷ صدم و تفکیک‌پذیری نیز بین ۱۲ تا ۳۰ برابر بهبود یافته است. نمودار اطمینان‌پذیری و نمودار **ROC** روش‌های **NGR** و **BMA** بهبود قابل توجهی نسبت به نمودار روش خام نشان می‌دهند. نمودار ارزش اقتصادی نیز حاکی از بهبود روش‌های پس‌پردازش شده می‌باشد. در آستانه باد ۱۰ متر بر ثانیه در روش‌های **BMA** و **NGR** بیشینه ارزش اقتصادی برای نسبت هزینه به ضرر ۰.۲ به ترتیب مقدار ۰.۵ و ۰.۵۲ می‌باشد.

کلید واژه‌ها: سامانه همادی، پیش‌بینی احتمالاتی، سرعت باد، درستی‌سنجی.

مقدمه

برای تشخیص چگونگی وضع هوای آینده با لحاظ کردن عدم قطعیت یاد شده، رویکردی تحت عنوان پیش‌بینی احتمالاتی وجود دارد. بحث پیش‌بینی احتمالاتی با اثبات آشوبناکی سیستم دینامیکی جو توسط لورنز (۱۹۶۳) آغاز شد. در این رویکرد بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت ذاتی جو از پیش‌بینی یقینی وضعیت آینده آن پرهیز و به جای آن، شانس وقوع حالات ممکن در آینده جو محاسبه می‌شود که در نهایت می‌توان با کمی‌سازی عدم قطعیت به اطلاعات بیشتر و دقیق‌تری از آینده دست یافت. روش کار به این ترتیب است که به جای در نظر گرفتن فقط یک مدل با یک مقدار اولیه، یک طرح‌واره فیزیکی و یک هسته دینامیکی، می‌توان با تغییر هر کدام از این سه مورد، تعداد متناهی مدل پیش‌بینی ایجاد کرد. بنابراین در این سامانه همادی به جای یک پیش‌بینی قطعی، با تغییر در شرایط اولیه، تغییر در طرح-واره فیزیکی مدل عددی و یا تغییر هسته دینامیکی، مدل پیش‌بینی تشکیل می‌شود. در این مقاله با تغییر در طرح‌واره فیزیکی مدل، عدم قطعیت ناشی از فیزیک مدل لحاظ شده و بر این اساس هر پیش‌بینی تولید شده که به عنوان یک عضو سامانه همادی تلقی می‌شود با دیگری متفاوت است. با اعمال روش‌های آماری بر اعضای سامانه همادی یک تابع توزیع احتمال به دست خواهد آمد که بعد از انجام عملیات پس‌پردازش و توصیف عدم قطعیت وضعیت آینده جو، محصولی تولید خواهد شد که شامل اطلاعات کافی برای پاسخ به نیاز کاربران مختلف است.

از آنجا که کاربری اراضی و پستی و بلندی در مدل‌ها و واقعیت تفاوت دارند و خطاهای زیاد در فیزیک مدل وجود دارد در نتیجه خروجی مدل‌های عددی پیش‌بینی هوا دارای خطای سامانمند می‌باشد، بنابراین خروجی سامانه همادی که مجموعه خروجی مدل‌های پیش‌بینی عددی متفاوت است نیز دارای خطای پراکندگی و میانه توزیع خواهد بود (ویلکس ۲۰۱۱). برای رفع نواقص و کاهش خطا و بدست آوردن تابع توزیع احتمال PDF، میانگین‌گیری بیزی به اختصار، BMA (رافتری و همکاران ۲۰۰۵)، رگرسیون گوسی غیرهمگن به اختصار، NGR (نیتینگ و همکاران ۲۰۰۵)، رگرسیون همادی (آنگر ۲۰۰۹)، تکنیک تورم واریانس

امروزه انرژی باد به عنوان یکی از منابع انرژی پاک مورد توجه قرار گرفته است که در این رابطه با توجه به تغییرپذیری سرعت باد و اثرگذاری آن بر توان تولید نیروگاه‌های بادی، روش‌های پیش‌بینی باد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند، بنا به گزارش REN21^۱ در سال ۲۰۱۴ میلادی نزدیک به ۲۰ درصد از کل الکتریسیته تولیدی دنیا توسط انرژی باد تولید شده است. انجمن انرژی بادی اروپا (EWEA) نیز پیش‌بینی کرده است که در سال ۲۰۳۰ میلادی میزان ۲۴.۴ درصد از برق مصرفی شبکه جهانی توسط انرژی بادی تأمین شود. سرعت باد در افزایش یا کاهش آلودگی و در نتیجه سلامت مردم تأثیر زیادی دارد. پیش‌بینی دقیق سرعت باد در خلال انتشار هشدارها و اخطارهای وضع هوا به منظور ارزیابی ریسک و کمک به تصمیم‌گیری‌های مناسب در بسیاری از فعالیت‌های اجتماعی از جمله حمل و نقل، ورزش، کشاورزی و همچنین امور نظامی دارای اهمیتی حیاتی است.

از اوائل دهه ۱۹۵۰ میلادی با پیشرفت رایانه‌ها و ایجاد توانمندی در انجام سریع محاسبات، امکان اجرای مدل‌های پیش‌بینی وضع هوا فراهم شد. در ابتدا نگاه به پیش‌بینی وضع هوا، صرفاً پیش‌بینی قطعی بود یعنی مدل از داده‌های ورودی، پیش‌بینی یقینی وضع هوا را ارائه می‌کرد. اگرچه کماکان در مراکز هواشناسی، پیش‌بینی یقینی انجام و ارائه می‌شود ولی از آنجا که مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا که قوانین فیزیکی و دینامیکی جو را توصیف می‌کنند شامل معادلات دیفرانسیلی هستند که با استفاده از روش‌های عددی حل شده و راه‌حل‌های تقریبی دارند، جواب به دست آمده از اجرای این مدل‌ها تقریبی از جواب واقعی بوده و همواره دارای خطا است. البته استفاده از روش‌های عددی در مدل‌ها، تنها علت بروز خطا در خروجی مدل نیست؛ بلکه به عواملی مانند دقیق نبودن مقادیر اولیه مرزی، عدم توانایی مدل در لحاظ کردن همه‌ی فرایندهای جوی، کمبود داده‌های اولیه در برخی مناطق، عدم توانایی مدل در شبیه‌سازی موفق پدیده-های زیر شبکه‌ای و آشوبی بودن سیستم دینامیکی جو نیز در بروز آن مؤثرند. بنابراین، پیش‌بینی وضع هوا در چنین سیستمی با عدم قطعیت بالا همراه خواهد بود.

عنوان تابع توزیع احتمال برای پیش‌بینی سرعت باد در NGR استفاده شده است.

هدف اصلی این مقاله صدور پیش‌بینی احتمالاتی سرعت باد ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته در کل ایستگاه‌های کشور با استفاده از دو روش BMA و NGR و مقایسه خروجی این دو روش با پیش‌بینی خام سامانه همادی (که به روش انتخاب آزاد بدست آمده است) می‌باشد. در بخش دوم این مقاله داده‌ها و روش کار شامل داده‌ها و منطقه مورد مطالعه و روش‌های تجزیه و تحلیل اطلاعات برای ایجاد دو پیش‌بینی به روش BMA و NGR مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش سوم نتایج و بحث مطرح شده است که عملکرد پیش‌بینی احتمالاتی واسنجیده این دو روش و پیش‌بینی خام سامانه همادی توسط نمودارهای اطمینان‌پذیری، ROC و ارزش اقتصادی و همچنین امتیاز بریر و امتیاز مهارتی بریر مورد ارزشیابی قرار گرفته‌اند و در بخش چهارم نیز نتیجه‌گیری بیان شده است.

مواد و روش‌ها

داده‌ها و محدوده مورد مطالعه پژوهش

داده‌های هر عضو، پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته سرعت باد ده متری با تفکیک ۲۱ کیلومتر روی ایران است. برای پیش‌بینی‌ها، مدل WRF با مقادیر اولیه داده‌های GFS، مورد استفاده قرار گرفته است و ساعت شروع پیش‌بینی UTC ۱۲ است. برای تولید اعضای سامانه همادی از ۸ طرح‌واره فیزیکی لایه مرزی متفاوت بهره‌گیری شده است. سایر طرح‌واره‌های فیزیکی برای همه اعضای سامانه همادی یکسان هستند. داده‌های دیدبانی در سازمان هواشناسی کشور برای ۳۱ ایستگاه همدیدی واقع در مراکز استان‌های ایران در دسترس بوده است و مقدار پیش‌بینی‌ها بر روی این ایستگاه-ها با روش دو خطی درون‌یابی شده‌اند. بازه زمانی اجرای مدل، از اول مارس تا ۳۱ آگوست سال ۲۰۱۷ است که کل روزها از ۱۱ آوریل تا ۳۱

(جانسون و بولر ۲۰۰۹)، کالیبره انتقال و کشش (اکل و همکاران ۲۰۱۲) و روش EKDMOS (گلان ۲۰۰۹) ارائه شده‌است. در سال‌های اخیر پژوهش‌ها و مقالات زیادی در زمینه پس‌پردازش همادی انجام شده است که می‌توان به مقایسه روش‌های پس‌پردازش NGR و BMA برای پیش‌بینی دما و سرعت باد (باران و همکاران ۲۰۱۳)، استفاده از رگرسیون همادی برای پیش‌بینی پوشش ابر (باران و همکاران ۲۰۲۰)، مقایسه ۶ روش پس‌پردازش آماری (کن‌هی‌هان و همکاران ۲۰۱۸)، ارتقاء سامانه چند مدلی پیش‌بینی شدت سیکلون‌های حاره‌ای با استفاده از BMA (سونگ و همکاران ۲۰۱۸)، توصیف مشخصات باد سطح زمین در مقیاس جهانی (مارکوس و همکاران ۲۰۱۸)، پس‌پردازش آماری برای پیش‌بینی سرعت باد در سواحل (گیلبرت و همکاران ۲۰۱۹)، پس‌پردازش پیش‌بینی عددی برای پیش‌بینی باد (کنستانتین و همکاران ۲۰۲۰) و ارائه الگوریتم فرا ابتکاری برای کمینه کردن CRPS (محمدی و همکاران ۲۰۱۶) اشاره کرد. اخیراً نیز تلاش زیادی برای ایجاد سامانه همادی پس‌پردازش شده در ایران انجام شده است که از جمله می‌توان به پیش‌بینی احتمالاتی بارش با استفاده از پس‌پردازش برون‌داد یک سامانه همادی (آزادی و همکاران ۱۳۹۱)، پیش‌بینی عددی دمای سطح زمین به صورت قطعی و احتمالاتی (محمدی ۱۳۹۵)، واسنجی پیش‌بینی احتمالاتی بارش به روش میانگین‌گیری بیزی روی ایران (فتحی و همکاران ۱۳۹۸)، پیش‌بینی احتمالاتی دمای بیشینه و کمینه با استفاده از سامانه همادی دو عضوی (آزادی و محمدی ۱۳۹۸) اشاره کرد.

در این مقاله برای بدست آوردن تابع چگالی احتمال از دو روش BMA و NGR استفاده شده است. در روش BMA تابع چگالی احتمال از میانگین‌گیری وزنی هر یک از اعضای سامانه همادی بدست می‌آید که با بیشینه کردن درست‌نمایی ضرائب و وزن‌ها در دوره آموزش تخمین زده می‌شوند. از توزیع گاما به عنوان تابع توزیع احتمال برای پیش‌بینی سرعت باد در BMA بهره‌گیری شده است. در روش NGR تابع چگالی احتمال از ترکیب خطی اعضای سامانه همادی و واریانس آنها بدست می‌آید. در این روش تخمین ضرائب با کمینه کردن امتیاز احتمالی رتبه پیوسته (CRPS) انجام می‌گیرد. از توزیع بریده نرمال به

جدول ۱- پیکربندی‌های مختلف اعضا سامانه

عضو همادی	فیزیک تابش موج بلند/ موج کوتاه	خرد فیزیک	فیزیک همرفت	سطح زمین	لایه سطحی	لایه مرزی
۱	Dudhia/rrtm	WSM 3-class	KF	UnifiedNoah	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

آموزش بهینه، با سرعت باد دوره آموزش ۳۰ روزه محاسبه و سپس مقایسه شدند، نتایج نشان داد که سرعت باد فقط در حد چند صدم تغییر می‌کرد و با توجه به اینکه سرعت باد دیدبانی با اعداد طبیعی و بدون اعشار اندازه‌گیری می‌شود، تصمیم گرفته شد دوره آموزش برای پیش‌بینی هر دو روش BMA و NGR، ۳۰ روزه در نظر گرفته شود تا در شرایط یکسان، درستی‌سنجی آنها مقایسه شود. از مزایای دوره آموزش کوتاه‌مدت می‌توان به توانایی سازگاری سریع با تغییرات فصلی در الگوی اریبی مدل، سرعت و همچنین سهولت در محاسبات اشاره کرد. ولی از طرف دیگر، در دوره آموزش بلندمدت تغییرپذیری آماری کاهش می‌یابد.

پس‌پردازش پیش‌بینی احتمالاتی به روش BMA با استفاده از توزیع گاما

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 بدست می‌آید:

$$p(y|f_1, \dots, f_k) = \sum_{k=1}^K w_k g_k(y|f_k) \quad (۳)$$

آگوست سال ۲۰۱۷ به عنوان دوره آزمون در نظر گرفته شده است. پیکربندی اعضای سامانه به شرح جدول ۱ است: CRPS یک ابزار راستی‌آزمایی برای ارزیابی پیش‌بینی‌های احتمالاتی است. فرض کنید که F تابع توزیع تجمعی پیش‌بینی و y داده مشاهداتی باشد، تابع CRPS به صورت زیر تعریف می‌شود:

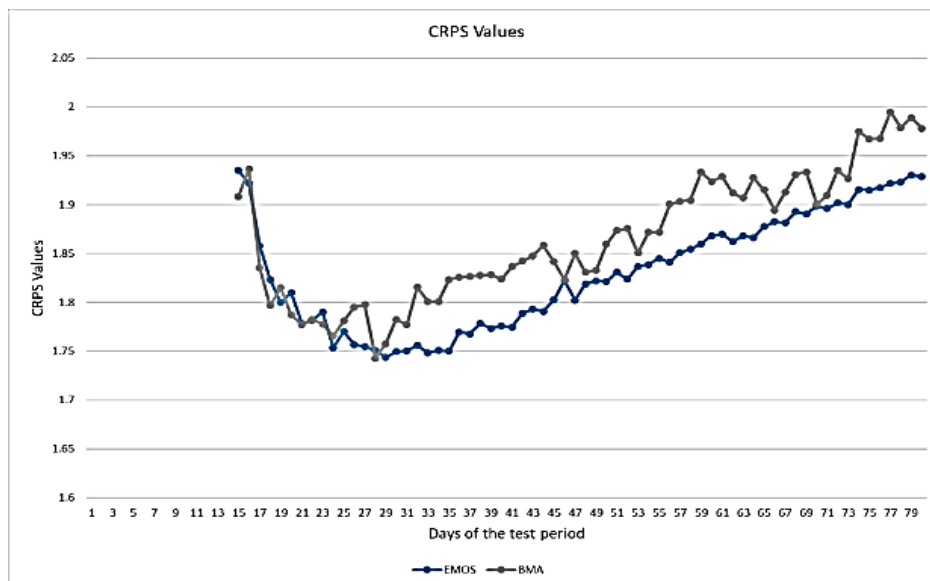
$$crps(F, y) = \int_{-\infty}^{\infty} (F(t) - H(t - y))^2 dt \quad (۱)$$

که $H(t - y)$ تابع هویساید به صورت زیر است:

$$H(t - y) = \begin{cases} 1, & t \geq y \\ 0, & t < y \end{cases} \quad (۲)$$

هر چه مقدار CRPS کوچک‌تر باشد، پیش‌بینی احتمالاتی دقیق‌تر است.

برای به دست آوردن دوره آموزش بهینه، مدت دوره آموزش برای پیش‌بینی هر دو روش BMA و NGR بین ۱۵ تا ۸۰ روز تغییر داده شد، کمترین CRPS برای BMA در روز ۲۸ام و برای NGR در روز ۲۹ام بدست آمد. (در شکل ۱ مقادیر CRPS روش‌های پس‌پردازش NGR و BMA در روزهای مختلف نشان داده شده است). در هر دو روش BMA و NGR بصورت مستقل، سرعت باد با دوره



شکل ۱- مقادیر CRPS روش‌های پس‌پردازش NGR(EMOS) و BMA در روزهای مختلف

$$g_k(y|f_k) = \frac{1}{\beta_k^{\alpha_k} \Gamma(\alpha_k)} y^{\alpha_k-1} \exp(-y/\beta_k) \quad (5)$$

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

$$\mu_k = b_{0k} + b_{1k}f_k \quad (6)$$

$$\sigma_k = c_{0k} + c_{1k}f_k \quad (7)$$

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 تخمین زده 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 در نظر گرفته شده است (اسلاتر و همکاران ۲۰۱۰). قابل ذکر است که این امر تأثیری در کیفیت عملکرد پیش‌بینی ندارد. بنابراین c_{0k} و c_{1k} در معادله (۶) با c_0 و c_1 جایگزین می‌شوند.

تخمین پارامترها با استفاده از مقادیر پیش‌بینی و مشاهداتی در دوره آموزش که دقیقاً N روز قبل از روز پیش‌بینی است انجام می‌شود. در واقع دوره آموزش به صورت لغزان است و پارامترها در هر روز پیش‌بینی مجدد تخمین زده می‌شوند.

پارامترهای میانگین b_{0k} و b_{1k} به وسیله رگرسیون خطی تخمین زده می‌شوند. به این صورت که برای هر عضو همادی به صورت جداگانه یک رگرسیون خطی برازش می‌شود و سرعت باد مشاهداتی به عنوان متغیر وابسته و

که در رابطه (۱) k تعداد اعضای سامانه همادی و وزن w_k مبتنی بر عملکرد k امین پیش‌بینی در دوره آموزش است. w_k ها مثبت بوده و جمع آنها برابر با یک است:

$$\sum_{k=1}^K w_k = 1.$$

اسلاتر و همکاران (۲۰۱۰) توزیع گاما را برای پیش‌بینی سرعت باد برازش کردند و نشان دادند که 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:

$$g(y) = \begin{cases} \frac{1}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} y^{\alpha-1} \exp(-y/\beta) & y \geq 0 \\ 0 & y < 0 \end{cases} \quad (8)$$

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 که سرعت باد مشاهداتی تقریباً یک رابطه خطی با پیش‌بینی‌های سرعت باد داشته و از انحراف معیاری برخوردار است که 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:

پذیری و پایداری تخمین‌ها را افزایش می‌دهد (نیتینگ و همکاران ۲۰۰۵).

برای اضافه کردن این محدودیت‌ها در مدل NGR می‌نویسیم:

(۱۱)

$$b_1 = \beta_1^2, \dots, b_k = \beta_k^2, \\ c = \gamma^2, \\ d = \delta^2$$

از آنجا که بر پارامترهای β_1, \dots, β_k و γ و δ محدودیتی اعمال نشده، در نتیجه توزیع نرمال بریده (۱) برای پیش‌بینی چگالی NGR مناسب می‌باشد.

نتایج و بحث

در ارزیابی یک سامانه همادی واسنجیده، هدف ارزیابی کیفیت تابع یا توابع توزیع احتمال تولید شده می‌باشد. تمام اعضای سامانه همادی و برونداد روش‌ها، توسط سنجنده‌هایی که قبلاً شرح داده شده‌اند، در زیر مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج مورد بحث قرار می‌گیرند:

امتیاز بریر

یک روش متداول در درستی‌سنجی دودویی پیش‌بینی احتمالی، امتیاز بریر می‌باشد که با فرض اینکه تعداد I تا دسته پیش‌بینی احتمالی y_i در مجموعه داده‌های راستی‌آزمایی وجود دارد، امتیاز بریر به صورت معادله زیر نوشته می‌شود:

(۱۲)

$$BS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^I N_i (y_i - \bar{o}_i)^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^I N_i (\bar{o}_i - \bar{o})^2 + \bar{o}(1 - \bar{o})$$

در معادله (۱۲) از چپ به راست به ترتیب عبارت‌های قابلیت اطمینان، تفکیک‌پذیری و عدم قطعیت مؤلفه‌های امتیاز بریر می‌باشند. با سنجنده امتیاز بریر، پیش‌بینی‌های تولید شده دو روش پس‌پردازش BMA و NGR، مورد راستی‌آزمایی قرار گرفته است. در امتیاز بریر $0 \leq BS \leq 1$ است که در پیش‌بینی‌های کامل $BS = 0$ می‌باشد. در این سنجده پیش‌بینی خروجی دو روش یاد شده بالا با پیش‌بینی خام سامانه همادی که به روش انتخاب آزاد انجام گرفته است، مورد مقایسه قرار گرفته اند. در همه آستانه‌های باد

پیش‌بینی سرعت باد به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شده و سایر پارامترها W_1, \dots, W_k, C_0 و C_1 با بیشینه درست‌نمایی در دوره آموزش تخمین زده می‌شوند (رافتری و همکاران، ۲۰۰۵).

پس‌پردازش پیش‌بینی احتمالاتی به روش NGR با

استفاده از توزیع نرمال بریده

فرض کنیم X_1, \dots, X_k اعضای مجموعه همادی k عضوی و Y کمیت هواشناسی (در اینجا سرعت باد) که مقدار نامنفی را می‌گیرد. تابع چگالی احتمال توزیع نرمال بریده سامانه همادی در نقطه صفر را به شکل زیر تعریف می‌کنیم (نیتینگ و تورارینزوتیر، ۲۰۰۸).

(۸)

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

که در آن $\mu = a + b_1 X_1 + \dots + b_k X_k$ میانگین وزنی مجموعه همادی با اربیی تصحیح شده است. واریانس تابع چگالی پیش‌بینی $\sigma^2 = c + dS^2$ ، تابعی خطی از واریانس همادی است. ضرایب b_1, \dots, b_k نشان‌دهنده عملکرد اعضای همادی با توجه به داده‌های دوره آموزش می‌باشند. ضرایب واریانس c و d نشان دهنده پراکندگی همادی و عملکرد پیش‌بینی میانگین همادی است (نیتینگ و همکاران، ۲۰۰۷). همچنین تابع وابسته واریانس همادی S^2 به شرح زیر می‌باشد:

$$S^2 = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (X_i - \bar{X})^2 \quad (۹)$$

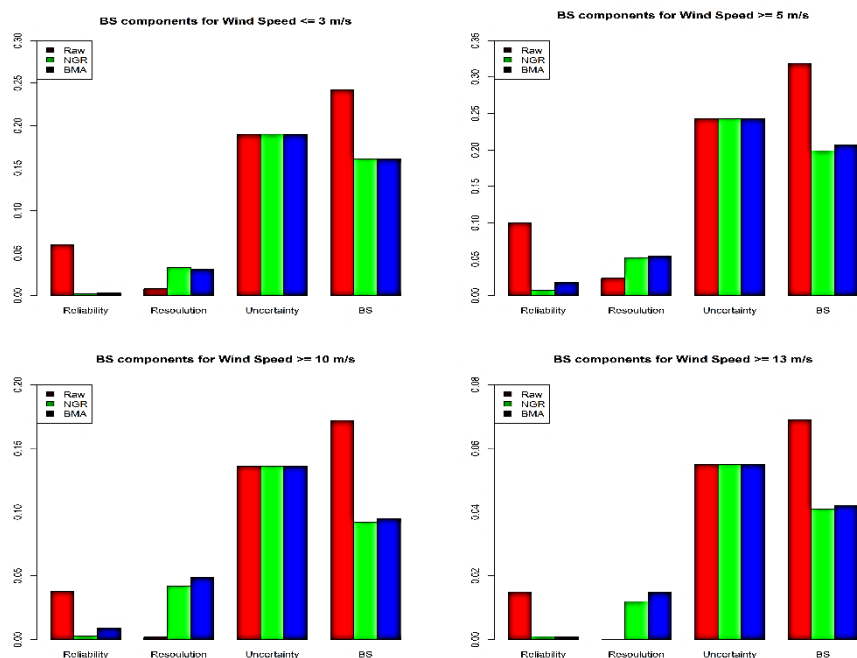
که در آن $\bar{X} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K X_i$ می‌باشد. بنابراین تابع چگالی پیش‌بینی NGR برای کمیت پیش‌بینی Y به شرح زیر تبدیل می‌شود:

$$f(y) = \left[\frac{1}{\sigma} \varphi \left(\frac{y - \mu}{\sigma} \right) \right] / \Phi \left(\frac{\mu}{\sigma} \right) \quad (۱۰)$$

برای $y > 0$ و $f(y) = 0$ و برعکس، Φ و φ بترتیب تابع چگالی نرمال استاندارد و تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد هستند. برای اینکه (۱) تابع توزیع درستی باشد باید c و d غیرمنفی باشند. منفی نبودن ضرایب رگرسیونی b_1, \dots, b_k محدودیت اعمال شده بعدی است. این اعمال محدودیت‌ها نه تنها ارزش پیش‌بینی‌ها را کاهش نمی‌دهد بلکه تفصیر

بستگی داشته و تحت تأثیر پیش‌بینی نیست، بنابراین در مقدار این عبارت در هیچ آستانه و روش پیش‌بینی تغییری نسبت به پیش‌بینی خام مشاهده نشده است. امتیاز بریر برای آستانه‌های باد کمتر از ۳، بیش از ۵، ۱۰ و ۱۳ متر بر ثانیه به ترتیب برای NGR و BMA، ۳۳ و ۳۳ درصد، ۳۸ و ۳۵ درصد، ۴۶ و ۴۵ درصد و در نهایت ۴۰ و ۴۰ درصد نسبت به امتیاز بریر خام بهبود یافته‌اند. شکل ۲ نشان‌دهنده نمودار میانگین (۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته) امتیاز بریر و عبارت‌های آن در آستانه‌های مختلف سرعت باد می‌باشد.

کمتر از ۳، بیش از ۵، ۱۰ و ۱۳ متر بر ثانیه عبارت اطمینان-پذیری در پیش‌بینی دو روش پس‌پردازش NGR و BMA نسبت به پیش‌بینی خام سامانه همادی بهبود یافته است. این بهبود برای آستانه‌های باد کمتر از ۳، بیش از ۵، ۱۰ و ۱۳ متر بر ثانیه به ترتیب برای NGR و BMA، ۹۷ و ۹۴ درصد، ۹۳ و ۸۲ درصد، ۹۳ و ۷۸ درصد و در نهایت ۹۴ و ۹۲ درصد می‌باشد. افزایش عبارت تفکیک‌پذیری برای آستانه‌های باد کمتر از ۳، بیش از ۵، ۱۰ و ۱۳ متر بر ثانیه به ترتیب برای NGR و BMA، ۳۰ و ۲۸ برابر، ۱۲ و ۱۳ برابر، ۲۲ و ۲۶ برابر و در نهایت ۲۶ و ۳۰ برابر می‌باشد. عبارت عدم قطعیت فقط به فراوانی نسبی دیده‌بانی پدیده



شکل ۲- نمودار میانگین (۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته) مولفه‌های امتیاز بریر برای آستانه‌های مختلف سرعت باد

بترتیب ۳۳ درصد و ۳۳ درصد، برای آستانه باد بیش از ۵ متر بر ثانیه بترتیب ۳۸ درصد و ۳۵ درصد، برای آستانه باد بیش از ۱۰ متر بر ثانیه بترتیب ۴۶ درصد و ۴۵ درصد و در نهایت برای آستانه باد بیش از ۱۳ متر بر ثانیه بترتیب ۴۰ درصد و ۴۰ درصد می‌باشد. از آنجا که امتیاز مهارتی بریر - برای پیش‌بینی

خام صفر می‌باشد، مقادیر بالا نشان‌دهنده رشد پیش‌بینی‌های NGR و BMA در همه آستانه‌های سرعت باد می‌باشند. براساس شکل ۳، برتری و کاستی پیش‌بینی‌های هر دو روش

امتیاز مهارتی بریر

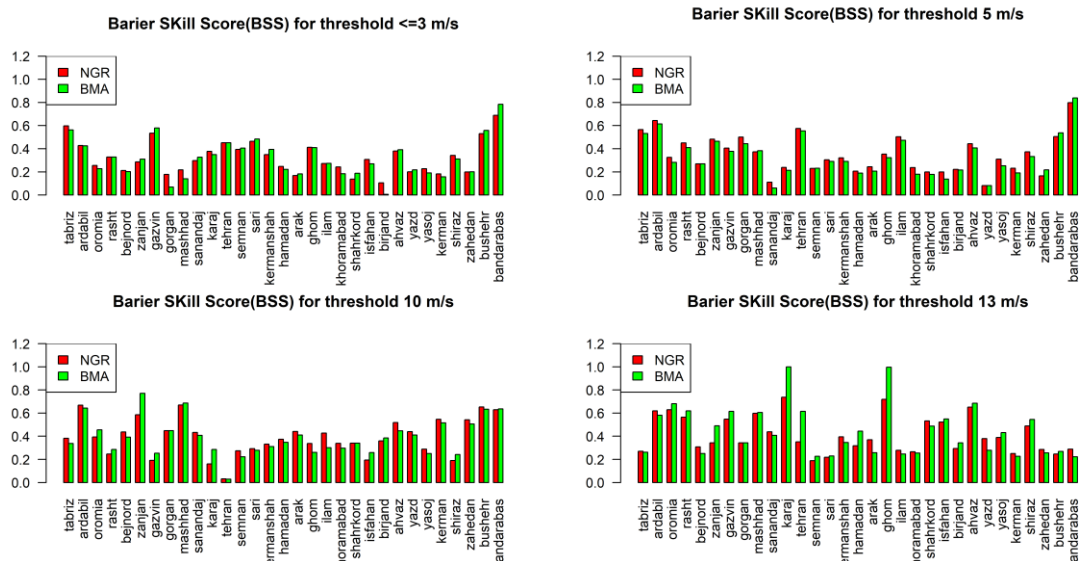
امتیاز مهارتی بریر همان امتیاز بریر است که نسبت به یک پیش‌بینی مرجع سنجیده شده است. در این مقایسه پیش‌بینی مرجع، پیش‌بینی خام است که به روش انتخاب آزاد محاسبه شده است. شکل ۳، نمودار میانگین (۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته) امتیاز مهارتی بریر در مورد پیش‌بینی‌های تولیدی به روش NGR و BMA را برای آستانه‌های مختلف سرعت باد در همه ایستگاه‌های مراکز استان‌ها نشان می‌دهد. امتیاز مهارتی بریر NGR و BMA، برای آستانه باد کمتر از ۳ متر بر ثانیه

منحنی در هر نمودار رسم شده است و مقادیر بر روی هم‌دیگر قرار می‌گرفتند و نامفهوم بودند لذا نمودار کمکی sharpness مربوط به هر نمودار، در کنار آن قرار گرفته است که مقادیر فراوانی نسبی تعداد λ_m هر نمودار را نشان می‌دهد. در همه شکل‌ها، نمودارهای اطمینان‌پذیری پیش‌بینی برون‌داد روش‌های NGR و BMA در همه آستانه‌ها، به خط نیمساز نزدیک هستند، بنابراین پیش‌بینی‌ها از اطمینان-پذیری بالائی برخوردار هستند و در محدوده با مهارت و تفکیک‌پذیری نیز قرار دارند بنابراین پیش‌بینی‌های تولیدی و اسنجیده به روش‌های NGR و BMA در تمام آستانه‌ها و در تمام سن‌های پیش‌بینی از این نمودار ارزیابی، نمره قابل قبول گرفته‌اند ولی نمودارهای اطمینان‌پذیری پیش‌بینی‌های خام در محدوده‌های بی‌مهارت، بدون تفکیک‌پذیری قرار گرفته‌اند و از خط نیمساز نیز فاصله داشته و بی‌نظم هستند.

نسبت به یکدیگر در هر ایستگاه و در آستانه‌های مختلف بر اساس امتیاز مهارتی بریر نشان داده می‌شود.

نمودار اطمینان‌پذیری

نمودار اطمینان‌پذیری، یک گراف متداول برای ارزیابی پیش‌بینی احتمالی است که احتمال پیش‌بینی یک رخداد (محور افقی نمودار) را در مقابل فراوانی نسبی مشاهدات آن رخداد (محور عمودی نمودار) نشان می‌دهد. در این نمودار، مؤلفه‌های امتیاز بریر شامل قابلیت اطمینان، تفکیک‌پذیری و امتیاز مهارتی نشان داده می‌شود. شکل‌های ۴، ۵ و ۶ به ترتیب نمودارهای اطمینان‌پذیری ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته پیش‌بینی‌های برون‌داد روش‌های NGR ، BMA و خام که به طریق انتخاب آزاد محاسبه شده است را نشان می‌دهند. بطور معمول فراوانی نسبی تعداد دفعات λ_m احتمال پیش‌بینی $p(y_i)$ روی هر نقطه نمودار قرار می‌گیرد ولی بدلیل اینکه سه



شکل ۳ - نمودار میانگین (۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته) امتیاز مهارتی بریر NGR و BMA برای آستانه‌های مختلف سرعت باد در ایستگاه‌های مراکز استان‌ها

آهنگ برخورد H می‌باشد. بنابراین فضای ROC بوسیله دو شاخص F روی محور افقی و H روی محور عمودی شکل داده می‌شود. شکل ۷ نمودارهای مشخصه عملکرد ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته پیش‌بینی‌های برون‌داد روش‌های NGR ، BMA و خام که به طریق انتخاب آزاد محاسبه شده است را نشان

نمودار مشخصه عملکرد ROC

یکی دیگر از سنجه‌های ارزیابی پیش‌بینی احتمالاتی، نمودار مشخصه عملکرد به اختصار ROC می‌باشد که آن را به عنوان نمودار مشخصه نسبی عملکرد نیز می‌شناسند زیرا مقایسه‌ای بین دو نحوه عملکرد آهنگ هشدار نادرست F و

با تفکیک ۲۱ کیلومتر روی ایران است. برای تولید پیش‌بینی‌های هر عضو از مدل WRF با مقادیر اولیه داده‌های GFS، استفاده شده است و ساعت شروع پیش‌بینی UTC ۱۲ است. پیش‌بینی‌های احتمالاتی را به دو روش BMA و NGR ایجاد شد. برای راستی‌آزمایی پیش‌بینی‌های احتمالاتی تولید شده از روش‌های صحت‌سنجی احتمالاتی بهره‌گیری شد. علاوه بر این پیش‌بینی خام نیز به روش انتخاب آزاد ایجاد تا به عنوان مرجعی برای راستی‌آزمایی پیش‌بینی‌های احتمالاتی تولید شده برونداد دو روش مذکور در اختیار قرار گیرد.

امتیاز بربر برای آستانه‌های باد کمتر از ۳، بیش از ۵، ۱۰ و ۱۳ متر بر ثانیه به ترتیب برای NGR و BMA، ۳۳ صدم و ۳۳ صدم، ۳۸ صدم و ۳۵ صدم، ۴۶ صدم و ۴۵ صدم و در نهایت ۴۰ صدم و ۴۰ صدم نسبت به امتیاز بربر خام کاهش یافته است. عبارت اطمینان‌پذیری برای همین آستانه‌های باد به ترتیب برای NGR و BMA، ۹۷ صدم و ۹۴ صدم، ۹۳ صدم و ۸۲ صدم، ۹۳ صدم و ۷۸ صدم و در نهایت ۹۴ صدم و ۹۲ صدم کاهش یافته است. افزایش عبارت تفکیک‌پذیری برای آستانه‌های باد کمتر از ۳، بیش از ۵، ۱۰ و ۱۳ متر بر ثانیه به ترتیب برای NGR و BMA، ۳۰ و ۲۸ برابر، ۱۲ و ۱۳ برابر، ۲۲ و ۲۶ برابر و در نهایت ۲۶ و ۳۰ برابر می‌باشد. در نتیجه پیش‌بینی‌های NGR و BMA در همه آستانه‌های سرعت باد، اطمینان‌پذیری و تفکیک‌پذیری قابل قبولی نسبت به پیش‌بینی خام دارند. در این راستی‌آزمایی کیفیت NGR بهتر از BMA می‌باشد.

می‌دهند. چنانکه مشاهده می‌شود حتی نمودارهای پیش‌بینی خام نیز در ناحیه مطلوب و بر روی نیمساز قرار دارند ولی نمودارهای مشخصه عملکرد پیش‌بینی‌های برونداد روش‌های BMA و NGR دارای تحذب بیشتر می‌باشند و سطح زیر منحنی بیشتری را نسبت به خط نیمساز نشان می‌دهند. نمودارها نشان می‌دهند پیش‌بینی‌های برونداد روش‌های BMA و NGR در آستانه باد ۱۰ متر بر ثانیه در همه سن-های پیش‌بینی بهترین عملکرد را نسبت به سایر آستانه‌ها داشته‌اند.

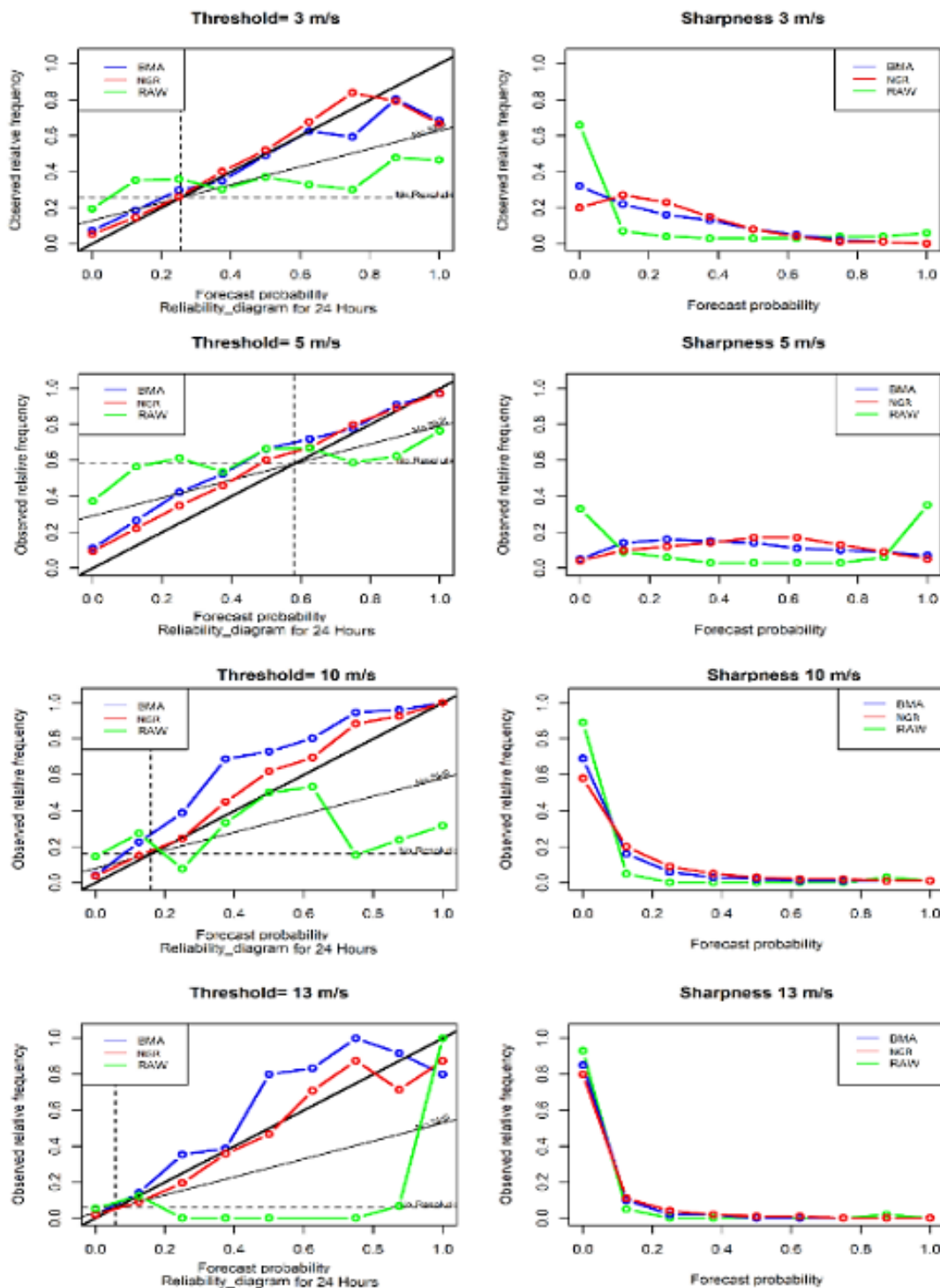
راستی‌آزمایی بر اساس نمودار ارزش اقتصادی

شکل ۸ نمودارهای ارزش اقتصادی را به عنوان تابعی از C/L برای همه آستانه‌ها و سن‌های پیش‌بینی برونداد روش-های BMA و NGR و خام نشان می‌دهد. نمودارهای پیش‌بینی‌های واسنجیده، به طور آشکار کارتر بودن پیش‌بینی‌های مربوطه را در هر آستانه و سن پیش‌بینی نسبت به پیش‌بینی خام نشان می‌دهند. به عنوان مثال در آستانه باد ۱۰ متر بر ثانیه در همه سن‌های پیش‌بینی، بیشینه ارزش اقتصادی پیش‌بینی خام ۰.۱ می‌باشد که برابر با نسبت هزینه-ضرر ۰.۱ می‌باشد و در دیگر نسبت‌های هزینه-ضرر پیش‌بینی خام توجیه اقتصادی ندارد ولی در همین آستانه سرعت باد در روش BMA و NGR، بیشینه ارزش اقتصادی برای نسبت هزینه-ضرر ۰.۲۵ به ترتیب مقدار ۰.۵ و ۰.۵۲ می‌باشد. همچنانکه مشاهده می‌شود پس از بیشینه ارزش اقتصادی با افزایش نسبت هزینه-ضرر به سرعت از ارزش اقتصادی پیش‌بینی‌ها کاسته می‌شود. نمودارها بهترین عملکرد پیش‌بینی‌های واسنجیده را در آستانه‌های سرعت باد ۱۰ و ۱۳ متر بر ثانیه نشان می‌دهند و در آستانه‌های باد با سرعت ۳ و ۵ متر بر ثانیه، پیش‌بینی‌های واسنجیده ارزش اقتصادی کمتری دارند. نمودار ارزش اقتصادی معیار سنجش مناسبی برای ارزشیابی پیش‌بینی پدیده‌های مخرب می‌باشد.

نتیجه‌گیری

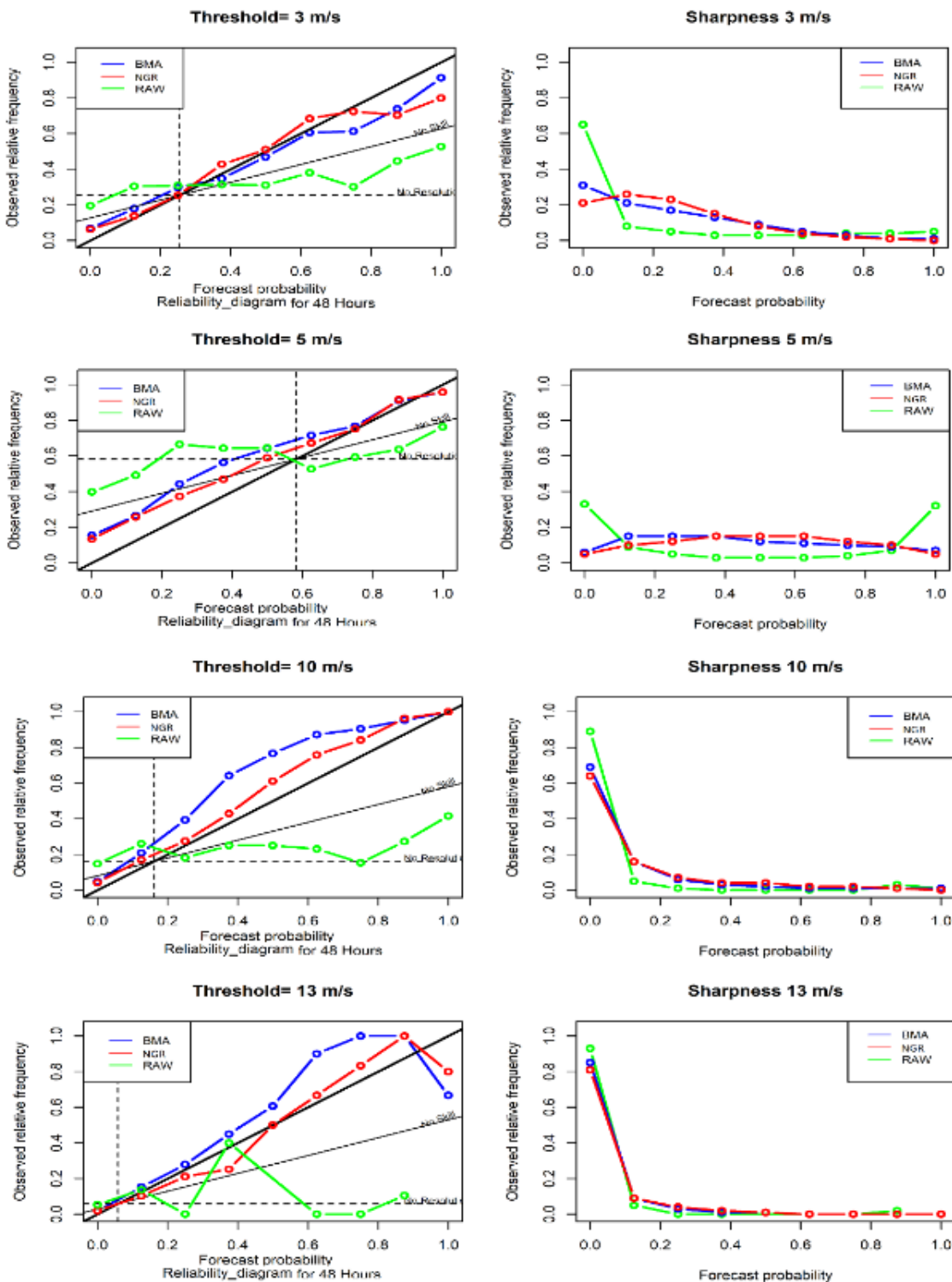
در این مقاله یک سامانه ۸ عضوی همادی با استفاده از ۸ طرح‌واره فیزیکی لایه مرزی متفاوت ایجاد شد. داده‌های هر عضو، پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته سرعت باد ده متری

Raw, BMA and NGR Reliability of 3m/s(≤ 3 m/s), 5 m/s, 10 m/s and 13 m/s for 24 Hours



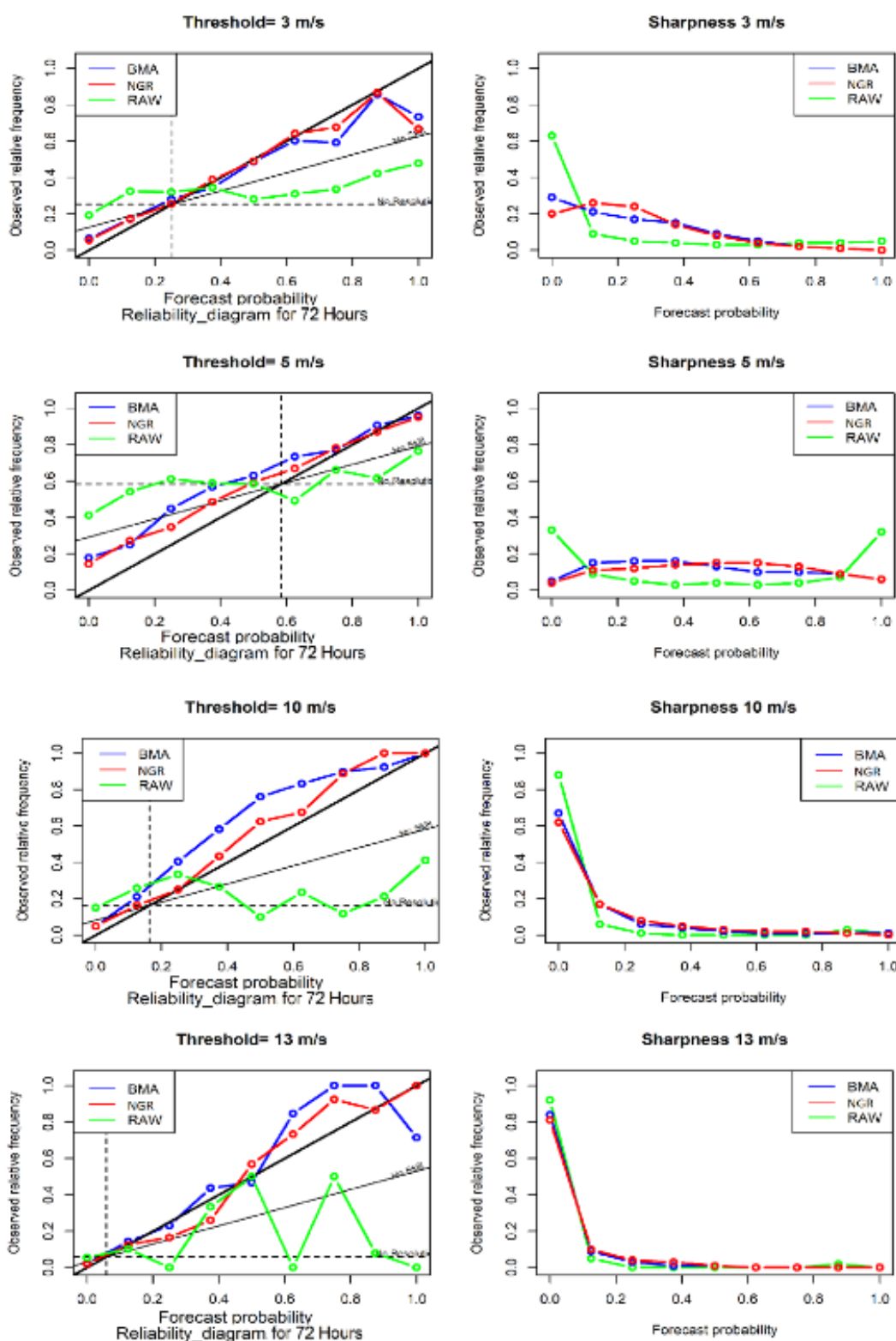
شکل ۴- نمودار اطمینان‌پذیری پیش‌بینی ۲۴ ساعته برون‌داد روش‌های NGR.BMA و روش خام

Raw, BMA and NGR Reliability of 3m/s(≤ 3 m/s), 5 m/s, 10 m/s and 13 m/s for 48 Hours

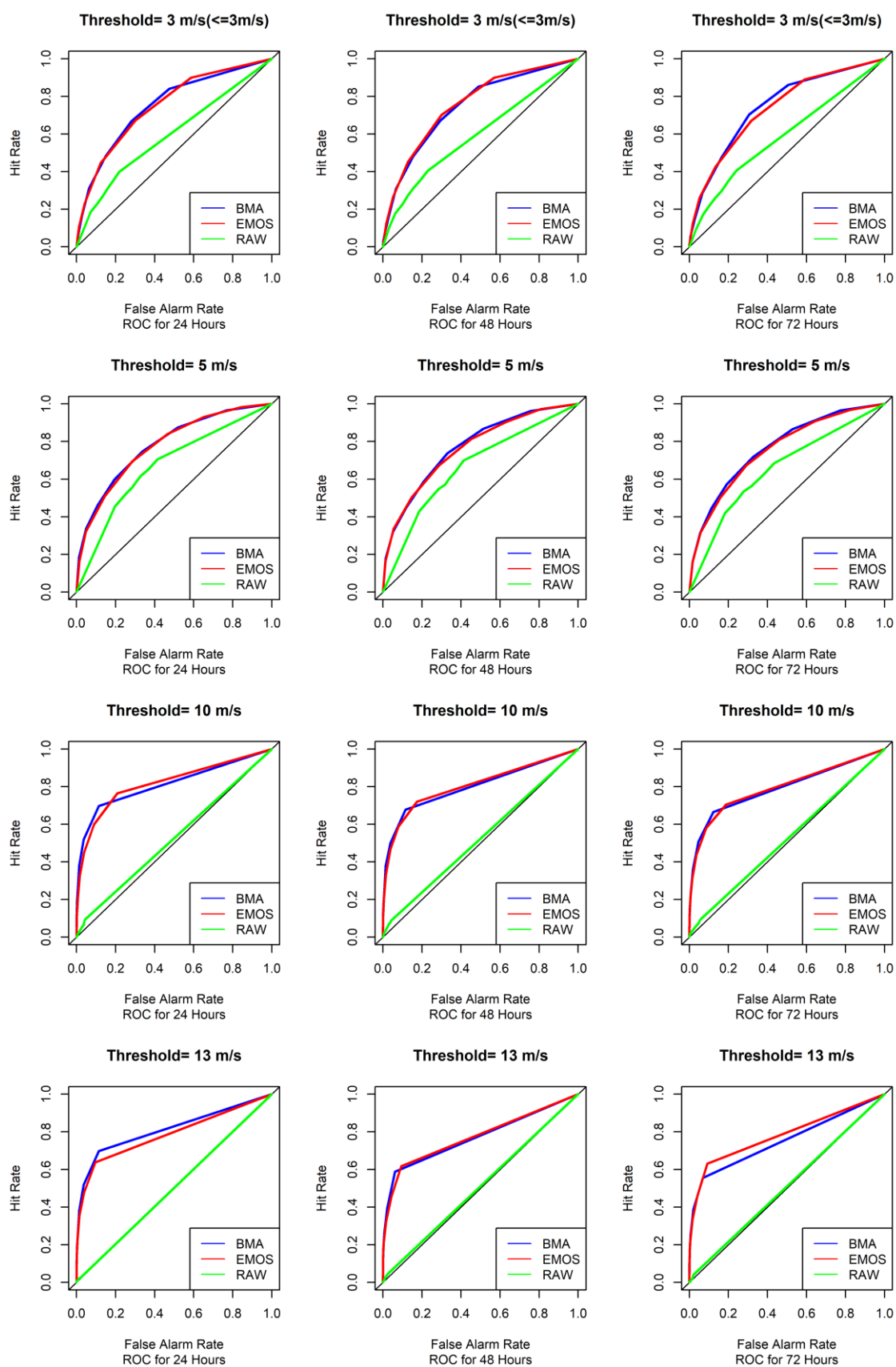


شکل ۵- نمودار اطمینان‌پذیری پیش‌بینی ۴۸ ساعته برونداد روش‌های NGR.BMA و روش خام

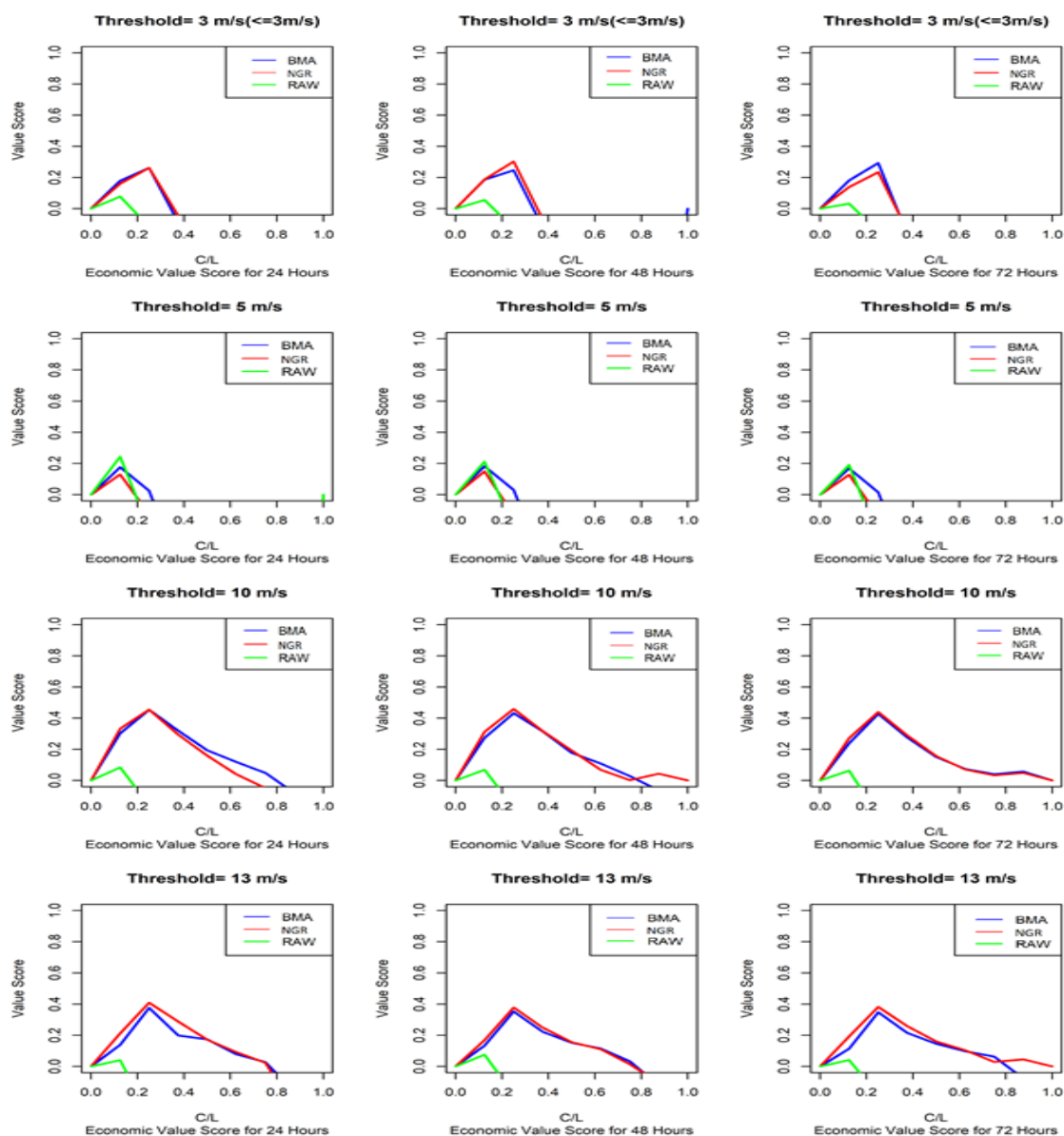
Raw, BMA and NGR Reliability of 3m/s(≤ 3 m/s), 5 m/s, 10 m/s and 13 m/s for 72 Hours



شکل ۶ - نمودار اطمینان‌پذیری پیش‌بینی ۷۲ ساعته برون‌داد روش‌های BMA, NGR و روش خام



شکل ۷ - نمودار مشخصه عملکرد ROC برای همه آستانه‌ها و سن‌های پیش‌بینی برونداد روش‌های NGR.BMA و خام



شکل ۸- نمودارهای ارزش اقتصادی به عنوان تابعی از C/L برای همه آستانه‌ها و سن‌های پیش‌بینی برون‌داد روش‌های BMA و NGR و خام

بینی خام می‌باشد. در این راستی آزمائی تفاوت محسوسی بین کیفیت BMA و NGR مشاهده نشد.

نمودارهای اطمینان‌پذیری پیش‌بینی‌های برون‌داد روش‌های BMA و NGR در همه آستانه‌ها نسبت به نمودار اطمینان‌پذیری پیش‌بینی‌های خام، به خط نیمساز نزدیک‌تر هستند و در محدوده با مهارت و تفکیک‌پذیر نیز قرار دارند. بنابراین اطمینان‌پذیری پیش‌بینی‌های برون‌داد روش‌های BMA و NGR در همه آستانه‌ها نسبت به پیش‌بینی‌های خام از مهارت و تفکیک‌پذیری بیشتری

امتیاز مهارتی بریر BMA و NGR برای آستانه باد کمتر از ۳ متر بر ثانیه بترتیب ۳۳ صدم و ۳۳ صدم، برای آستانه باد بیش از ۵ متر بر ثانیه بترتیب ۳۸ صدم و ۳۵ صدم، برای آستانه باد بیش از ۱۰ متر بر ثانیه بترتیب ۴۶ صدم و ۴۵ صدم و در نهایت برای آستانه باد بیش از ۱۰ متر بر ثانیه بترتیب ۴۰ صدم و ۴۰ صدم می‌باشد. از آنجا که امتیاز مهارتی بریر پیش‌بینی خام صفر می‌باشد، مقادیر بالا نشان دهنده رشد پیش‌بینی‌های BMA و NGR نسبت به پیش

بیکربندی مختلف است که تنها با تغییر گزینه‌های لایه مرزی از مدل WRF ایجاد شده‌اند. طبیعی است که برای ایجاد یک سامانه همادی کارا، بهتر است هر چه بیشتر منابع عدم قطعیت لحاظ شوند تا پیش‌بینی اعضای سامانه نیز کمترین تفاوت را با داده‌های دیدبانی داشته باشند و در نتیجه تابع توزیع احتمالی که بدست می‌آید بتواند با لحاظ نمودن تمام منابع عدم قطعیت و آشوب‌ناکی جو، پیش‌بینی احتمالاتی کاراتری به کاربر ارائه نماید.

منابع

1. Azadi, M., Mohamadi, S.A., 2019, Probabilistic forecasting of diurnal maximum and minimum temperature using a 2-member ensemble system over Iran. *Nivar* 43(1), 57-66
2. Fathi, M., Azadi, M., Kamali, G., Meshkatee, A., 2018, Calibration of probabilistic precipitation forecasts based on ensemble output using bayesian model averaging over Iran. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science* 1(2), 114-129
3. Mohamadi, S.A., 2016, Deterministic and prognostic numerical prediction of near-surface temperature over Iran in autumn and winter. PhD Thesis. Academic Center for Education, Culture and Research
4. Baran, S., Hor, A., 2013, Comparison of BMA and EMOS statistical calibration methods for temperature and wind speed ensemble weather prediction, submitted on 13 Dec 2013, *Idojaras*, 118(2014), 217-241.
5. Baran, Á., Lerch, S., El Ayari, M., & Baran, S. (2021). Machine learning for total cloud cover prediction. *Neural Computing and Applications*, 33(7), 2605-2620.
6. Eckel, F., Allen, M., and Sittel, M., 2012: Estimation of ambiguity in ensemble forecasts, *Weather and Forecasting*, 27(1), 50-69.
7. François, B., Hugo, M., 2020, Probabilistic thunderstorm forecasting by blending multiple ensembles, *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 72(1), 1-19
8. Gilbert, C., Messner, J. W., Pinson, P., Trombe, P. J., Verzijlbergh, R., van Dorp, P., & Jonker, H. (2020). Statistical post-processing of turbulence-resolving weather forecasts for offshore wind power forecasting. *Wind Energy*, 23(4), 884-897.
9. Glahn, B., Peroutka, M., Wiedenfeld, J., Wagner, J., Zylstra, G., Schuknecht, B., and B., Jackson, 2009: MOS uncertainty

برخوردار هستند ولی نمودارهای اطمینان‌پذیری پیش‌بینی های خام در محدوده‌های بی‌مهارت، بدون تفکیک‌پذیری قرار گرفته‌اند و از خط نیمساز نیز فاصله داشته و بی‌نظم هستند. از آنجا که نمودارهای NGR نسبت به نمودارهای BMA به نیمساز نزدیک‌تر هستند، لذا در این ارزیابی دارای کیفیت بهتری هستند.

نمودارهای مشخصه عملکرد پیش‌بینی‌های برونداد روش‌های BMA و NGR در مقایسه با نمودارهای مشابه پیش‌بینی خام دارای تحذب بیشتر و سطح زیر منحنی بیشتری نسبت به خط نیمساز هستند. روش‌های BMA و NGR در آستانه باد ۱۰ متر بر ثانیه در همه سن‌های پیش‌بینی، بهترین عملکرد را نسبت به سایر آستانه‌ها داشته‌اند. در این صحت‌سنجی دو روش BMA و NGR دارای مزیت یکسان می‌باشند.

نمودار ارزش اقتصادی، بهترین عملکرد پیش‌بینی‌های برونداد روش‌های BMA و NGR را در آستانه باد ۱۰ متر بر ثانیه نسبت به سایر آستانه‌ها نشان می‌دهد. در آستانه باد ۱۰ متر بر ثانیه، بیشینه ارزش اقتصادی پیش‌بینی خام ۰.۱ می‌باشد که برابر با نسبت هزینه-ضرر ۰.۱ می‌باشد و در دیگر نسبت‌های هزینه-ضرر پیش‌بینی خام توجیه اقتصادی ندارد ولی در همین آستانه سرعت باد در روش BMA و NGR، بیشینه ارزش اقتصادی برای نسبت هزینه-ضرر ۰.۲۵ به ترتیب مقدار ۰.۵ و ۰.۵۲ می‌باشد. در این صحت‌سنجی نیز دو روش BMA و NGR دارای مزیت یکسان می‌باشند.

کارآمدی تابع چگالی به کیفیت اعضای سامانه همادی بستگی دارد. به طور کلی برای ساختن یک سامانه همادی روش‌های مختلفی وجود دارد. از جمله این روش‌ها استفاده از یک مدل و چند شرایط اولیه مختلف که با هم اختلاف اولیه کمی داشته باشند، یا استفاده از یک مدل با resolution و تفکیک‌های مختلف، یا استفاده از چند مدل با فیزیک مختلف و یا استفاده از یک مدل با چند فیزیک مختلف می‌باشد. بطورکلی اصل در ساختن یک سامانه همادی، نمونه‌گیری از منابع عدم قطعیت برای تعریف یک سامانه همادی است. منابع عدم قطعیت اصلی در مدل‌سازی عبارت است از عدم قطعیت در شرایط اولیه، عدم قطعیت در شرایط مرزی، عدم قطعیت در شرایط مرزی سطحی، عدم قطعیت در الگوریتم‌های عددی، عدم قطعیت در فرآیندهای فیزیکی. در این مقاله سامانه همادی مورد استفاده شامل ۸

16. Mohammadi, S., A., 2016, Meta-heuristic CRPS minimization for the calibration of short-range probabilistic forecasts, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 128(4), 429-440.
17. Raftery, A., Gneiting, T., Balabdaoui, F., 2005, Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensemble, *Monthly Weather Review*, 133(5), 1155-1174.
18. Slughter, J. M., Gneiting, T., Raftery, A. E., 2010: Probabilistic wind forecasting forecasting using ensembles and Bayesian model averaging., *Journal of the American Statistical Association*, 105(489), 25-35.
19. Unger, D. A., 1985, A method to estimate the continuous ranked probability score, in *Preprints, Ninth Conf. on Probability and Statistics in Atmospheric Sciences*, Virginia Beach.
20. Unger, D., Van Den Dool, H., O'Lenic E., 2009, Ensemble regression, *Monthly Weather Review*, 137(7), 2365-2379.
21. Wilks, D., 2006: Comparison of ensemble-MOS methods in the Lorenz '96 setting, *Meteorol. Appl.*, 13, 243-256.
22. Wilks, D., 2011, *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, New York: Academic Press.
23. Xu, W., Ning, L., & 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.
- estimates in an ensemble framework, *Monthly Weather Review*, 137(1), 246-268.
10. Gneiting, T., Balabdaoui, F., and A., Raftery, 2007: Probabilistic forecasts, calibration and sharpness, *Royal Statistical Society*, 69(2), 243-268.
11. Gneiting, T., Raftery, A., Westveld, A., and T., Goldman, 2005: Calibrated probabilistic forecasting using ensemble model output statistics and minimum CRPS estimation, *Monthly Weather Review*, 133(5), 1098-1118.
12. Han, K., Choi, JT., 2018, Comparison of Statistical Post-Processing Methods for Probabilistic Wind Speed Forecasting, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 54(1): 91-101
13. Konstantinou, T., Savvopoulos, N., Hatzargyriou, N., 2020, Post-processing Numerical Weather Prediction for Probabilistic Wind Forecasting, published in: 2020 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAAPS), Date of Conference: 18-21 Aug. 2020
14. Lorenz, E., 1996: Predictability: A problem partly solved, In *Proc. Seminar on Predictability*, Conference Location Shinfield Park-Reading, 10829, 1-18
15. Marcos, R., 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.