

واسنجی پیش‌بینی احتمالاتی بارش برون‌داد سامانه همدادی به روش میانگین‌گیری بایزی بر روی ایران

مائه فتحی^۱، مجید آزادی^{۲*}، غلامعلی کمالی^۱، امیرحسین مشکوتی^۱

^۱ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

^۲ پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۷/۱/۲۵، تاریخ پذیرش: ۹۷/۴/۲۳

چکیده

در این پژوهش، نتایج حاصل از توسعه یک سامانه همدادی برای تولید پیش‌بینی احتمالاتی با استفاده از مدل WRF جهت پیش‌بینی بارش روی ایران ارائه می‌شود. سامانه همدادی که در این تحقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد، از اجرای مدل WRF با هشت پیکر بندی فیزیکی متفاوت تشکیل شده است. برای شرایط مرزی و اولیه مدل‌ها از داده‌های جهانی GFS با تفکیک افقی ۰/۵ درجه استفاده شده است. روش میانگین‌گیری بایزی (BMA) برای واسنجی پیش‌بینی‌های احتمالاتی بارش ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته در پاییز و زمستان ۲۰۱۶-۲۰۱۵ مورد استفاده قرار گرفت. داده‌ها شامل دو دوره آموزش اول سپتامبر ۲۰۱۵ تا اول دسامبر ۲۰۱۵ و ارزیابی اول دسامبر ۲۰۱۵ تا ۳۰ فوریه ۲۰۱۶ می‌باشند. پیش‌بینی احتمالاتی بارش تجمعی ۲۴ ساعته با استفاده از نمودار اطمینان‌پذیری، نمودار ROC، امتیاز بریر و امتیاز RPS در آستانه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. هم‌چنین نمودار ارزش اقتصادی پیش‌بینی در این مقاله بررسی شد. نتایج نشان داد که پیش‌بینی احتمالاتی سامانه همدادی به روش BMA اعتمادپذیرتر و تفکیک‌پذیرتر است، بطوری که پس از واسنجی، نمودار اطمینان‌سنجی و نمودار ROC بهبود قابل توجهی داشته است. نتایج حاصل از درستی‌سنجی نشان داد که با واسنجیده نمودن امتیاز بریر برای پیش‌بینی ۲۴ ساعته در آستانه‌های ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۱۵ و ۲۵ به ترتیب ۲۴، ۳۰، ۳۲، ۳۶، ۳۹ و ۶۵ درصد کاهش یافته است، برای پیش‌بینی‌های ۴۸ و ۷۲ ساعته نیز امتیاز بریر کاهش یافته است. امتیاز RPS برای پیش‌بینی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته به ترتیب ۴۵، ۴۰ و ۳۸ درصد کاهش نشان داده است.

کلمات کلیدی: سامانه همدادی، مدل WRF، پیش‌بینی احتمالاتی، میانگین‌گیری بایزی، درستی‌سنجی

مسائل مربوط به خشکسالی، آب‌شناسی، هواشناسی کشاورزی و پیش‌بینی سیل‌ها از کلیدی‌ترین مسائل کاربرد هواشناسی به شمار می‌آیند. پیش‌بینی کمیت‌های هواشناسی برای مدیریت صحیح چنین مسائلی ضروری به نظر می‌رسد. به ویژه پیش‌بینی دقیق بارش که یکی از مهمترین متغیرهای هواشناسی در بسیاری از زمینه‌های کاربردی است، اهمیت بسزایی دارد. یکی از ابزارهای اساسی در پیش‌بینی کمیت‌های مختلف هواشناسی، مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا است که در پیش‌بینی وضع هوا پیشرفت قابل توجهی داشته است. با این حال، همچنان پیش‌بینی بارش با دقت و تفکیک بالا بسیار دشوار است. در خروجی مدل‌ها چندین منبع عدم قطعیت وجود دارد که حذف آن‌ها تقریباً غیر ممکن است. از مهمترین منابع خطا، رفتار آشوبناک سامانه جوّی و خطای دیدبانی و داده‌گذاری و در نتیجه خطا در شرایط اولیه است (چی^۱ و همکاران، ۲۰۱۲).

اولین تجربه در زمینه سامانه‌های پیش‌بینی همدی برای لحاظ کردن عدم قطعیت‌ها به چند سال پس از آنکه برای نخستین بار رهیافت پیش‌بینی‌های احتمالی مطرح شد، بر می‌گردد. از این مطالعات اولیه می‌توان به مطالعات اپشتاین^۱ (۱۹۶۹) و لیت^۲ (۱۹۷۴) اشاره کرد. سامانه همدی یک روش پیش‌بینی عددی است که عدم قطعیت در شرایط اولیه مدل و نحوه گسسته‌سازی عددی معادلات حاکم بر جوّ و سایر منابع عدم قطعیت را در نظر می‌گیرد. بنابراین، سامانه همدی به جای یک پیش‌بینی قطعی منفرد، از چند پیش‌بینی حاصل از تغییر در شرایط اولیه، تغییر در طرحواره‌های فیزیکی مدل عددی یا تغییر هسته دینامیکی مدل پیش‌بینی تشکیل می‌شود. با اعمال عدم قطعیت‌ها، می‌توان پیش‌بینی‌ها را در بازه زمانی مورد نظر بهبود بخشید. برای بررسی بیشتر سامانه همدی می‌توان به پژوهش ژو^۴ (۲۰۰۵) مراجعه کرد.

با استفاده از سامانه همدی می‌توان یک تابع توزیع احتمال^۵ (PDF) برای پیش‌بینی احتمالاتی کمیت مورد نظر ایجاد کرد. استفاده از رفتار تابع توزیع احتمال پیش‌بینی برای صدور هشدار سیل و یا پیش‌بینی احتمال رویداد بارش‌های حدی اهمیت بالایی دارد. با وجود مهارت تقریباً زیاد پیش‌بینی‌های همدی، این پیش‌بینی‌ها به ویژه برای کمیت‌های هواشناسی سطح زمین دارای فروپراکنش^۶ و بنابراین غیر واسنجیده هستند. روش‌های آماری گوناگونی مانند بافت نگار رتبه‌ای^۷ (همیل^۸ و کلوچی^۹، ۱۹۹۸)، برازش لجستیک (ویلکس^{۱۰}، ۲۰۰۶)، میانگین‌گیری بایزی (رافتری^{۱۱} و همکاران، ۲۰۰۵) و درسینگ^{۱۲} همدی گوسی (نتینگ^{۱۳} و همکاران، ۲۰۰۵) برای پس‌پردازش و واسنجی کردن برون‌داد خام یک سامانه همدی ارائه شده است. در کشور ما نیز در سال‌های اخیر تلاش برای توسعه سامانه همدی برای مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا شروع شده است. از جمله این موارد می‌توان به پژوهش آزادی و همکاران (۱۳۸۸ و ۱۳۹۱)، اشاره نمود. پیش‌بینی همدی به صورت عملیاتی در مقیاس همدیدی (توت^{۱۴} و کالنی^{۱۵}، ۱۹۹۳؛ هوتک‌امر^{۱۶}، ۱۹۹۵؛ مولتنی^{۱۷}، ۱۹۹۶) و در مقیاس میانی (استنشرد^{۱۸} و همکاران، ۱۹۹۹؛ وندیشین^{۱۹} و همکاران، ۲۰۰۱؛ گریمیت^{۲۰} و مس^{۲۱}، ۲۰۰۲؛ اکل^{۲۲} و مس، ۲۰۰۵) استفاده شده است.

یکی از روش‌های واسنجی برون‌داد سامانه‌های همدی استفاده از روش‌های آماری برای پس‌پردازش

- 5-Probability Density Function
- 6-under-dispersion
- 7-Rank Histograms
- 8-Hamill
- 9-Colucci
- 10-Wilks
- 11-Raftery
- 12-Dressing
- 13-Gneiting
- 14-Toth
- 15-Kalnay
- 16-Houtekamer
- 17-Molteni
- 18-Stensrud
- 19-Wandishin
- 20-Grimt
- 21-Mass
- 22-Eckel

- 1-Chi
- 2-Epstein
- 3-Leith
- 4-Zhu

برونداد خام سامانه همادی است. یکی از مهمترین این روش ها، روش میانگین گیری بایزی²³ (BMA) است که توسط رافتری²⁴ و همکاران (2005) معرفی شد. در روش BMA تابع توزیع احتمال پیش بینی بر اساس میانگین وزنی از توابع توزیع احتمال پیش بینی هر یک از اعضای سامانه بدست می آید. وزن ها بر اساس مهارت عضو های سامانه همادی در دوره آموزش تخمین زده می شوند. این روش برای واسنجی برونداد خام سامانه همادی برای پارامترهای دما، جهت باد و بارش در برخی نقاط جهان مورد بررسی قرار گرفته است. برای مثال ویلسون²⁵ (2007) روش BMA را برای واسنجی برونداد خام سامانه همادی ۱۶ عضوی برای پارامتر دمای سطحی به کار برد؛ دوره آموزش در آن مطالعه ۴۰ روز و نتایج بدست آمده قابل قبول بود. روش BMA اساساً برای کمیت های هواشناسی که توزیع آن ها توسط توزیع نرمال تخمین زده می شوند (مانند دما و فشار سطح دریا)، توسعه داده شده است. اما بعدها این روش برای کمیت های دیگر (غیر نرمال) در معرض توسعه قرار گرفت. برای مثال بائو²⁶ و همکاران (۲۰۱۰) روش BMA را برای پیش بینی ۴۸ ساعته جهت باد به کار بردند. آنها از چگالی های وُن-میسز²⁷ که توزیع مؤلفه های آن در هر عضو همادی با اربیی تصحیح شده متمرکز بود استفاده کردند و پیش بینی های سازگارتری را به دست آوردند. اسلوتر²⁸ و همکاران (۲۰۰۷) از ترکیبی از یک مؤلفه گسسته در صفر و یک توزیع گاما به عنوان تابع توزیع احتمال پیش بینی برای اعضای سامانه همادی استفاده کردند و روش BMA را برای پیش بینی های ۴۸ ساعته بارش تجمعی ۲۴ ساعته در شمال غربی اقیانوس آرام واقع در آمریکای شمالی در دوره سال های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۴ با استفاده از سامانه همادی میان مقیاس دانشگاه واشنگتن به کار بردند. آن ها توانستند توابع توزیع احتمال را برای پیش بینی های احتمالاتی بارش به دست آورند که

دارای واسنجی بسیار بهتری نسبت به برونداد انتخاب اجماعی^{۲۹} اعضای سامانه همادی بود. همچنین، نتایج روش BMA تخمین های بهتری از احتمال رخداد های پربارش نسبت به روش وایزش لجستیک روی ریشه سوم میانگین همادی داشت.

هدف اصلی در این مطالعه صدور پیش بینی های احتمالاتی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته بارش تجمعی ۲۴ ساعته در کل کشور به روش BMA است. در این پژوهش یک سامانه همادی ۸ عضوی با طرحواره های فیزیکی مختلف ایجاد شده است. برای واسنجی برونداد خام بارش تجمعی ۲۴ ساعته حاصل از سامانه همادی در ۳۹۴ ایستگاه همدیدی کشور در پاییز و زمستان ۲۰۱۵-۲۰۱۶، از روش BMA استفاده شده است. در روش BMA، متغیر ها (وزن ها و واریانس ها) برای توزیع گاما (توزیع مناسب برای پیش بینی بارش) با استفاده از داده های دیدبانی و پیش بینی ها در دوره آموزش تخمین زده می شوند. این متغیر ها با استفاده از روش درست نمایی بیشینه^{۳۰} تخمین زده می شوند (هرشباخ^{۳۱}، ۲۰۰۰).

عملکرد پیش بینی واسنجیده به روش BMA با نمودار اطمینان پذیری^{۳۲}، نمودار ROC^{۳۳}، امتیاز بریر و امتیاز RPS^{۳۴} ارزیابی شده اند. همچنین ارزش اقتصادی پیش بینی با استفاده از نمودار ارزش اقتصادی مورد بررسی قرار می گیرد.

== داده و روش ها

روش BMA یک روش آماری برای پیش بینی احتمالاتی با استفاده از برونداد یک سامانه همادی است که با ترکیب استنتاج ها و پیش بینی های هر یک از اعضای سامانه همادی یک پیش بینی احتمالاتی اطمینان پذیرتر و با مهارت بالاتر تولید می کند. رافتری و همکاران (۲۰۰۵) BMA را برای سامانه های همادی

29-consensus voting

30-log-likelihood

31-Hersbach

32-Reliability diagram

33-Relative Operating Characteristics

34-ranked probability score

23-Bayesian Model Averaging

24-Raftery

25-Wilson

26-Bao

27-von Mises

28-Slougher

همکاران، ۲۰۰۶):

$$g(y) = \begin{cases} \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} y^{\alpha-1} \exp(-y/\beta) & y > 0 \\ 0 & y \leq 0 \end{cases}$$

پارامترهای توزیع گاما شامل μ_k و σ_k^2 هستند که از رابطه‌های زیر بدست می‌آید.

$$\mu_k = b_{0k} + b_{1k} f_k^{1/3}$$

$$\sigma_k^2 = c_{0k} + c_{1k} f_k$$

که $\mu_k = \alpha_k \beta_k$ میانگین و $\sigma_k^2 = \alpha_k \beta_k^2$ واریانس توزیع است.

پارامترهای b_0, b_1, c_0, c_1 و w_k برای $k = 1, \dots, K$ از روی داده‌های دوره آموزش شامل پیش‌بینی‌های اعضای سامانه همادی و مشاهدات تخمین زده می‌شود. برای تخمین پارامترهای b_0 و b_1 از وایزش خطی بین y و f_k و برای تخمین c_0, c_1 و w_k از بیشینه درست‌نمایی از روی داده‌های دوره آموزش استفاده می‌شود. از آنجا که بیشینه کردن حالت لگاریتمی تابع درست‌نمایی ساده‌تر است، بنابراین در عمل لگاریتم تابع درست‌نمایی بیشینه می‌شود:

$$L(w_1, \dots, w_K; c_0, c_1) = \sum_{s,f} \log p(y_{st} | f_{1st}, \dots, f_{Kst}) \quad (2)$$

که در آن $p(y_{st} | f_{1st}, \dots, f_{Kst})$ از رابطه (۱) به دست می‌آید. بیشینه کردن این تابع با استفاده از روش‌های عددی مانند روش نیوتن-رافسون بسیار پیچیده است. بنابراین اسلاتر و همکاران (۲۰۰۶) از الگوریتم بیشینه انتظار EM^{41} برای بیشینه کردن تابع درست‌نمایی استفاده کردند.

در این پژوهش از داده‌های مشاهداتی بارش تجمعی در ۳۹۴ ایستگاه همدیدی در سطح کشور، در یک بازه زمانی شش ماهه (اول سپتامبر ۲۰۱۵ تا سی فوریه ۲۰۱۶) استفاده شده است. این داده‌ها در ساعت 06 UTC اندازه‌گیری شده‌اند.

مدل‌های دینامیکی بسط و نشان داد که چطور این روش می‌تواند به عنوان یک روش پس‌پردازش آماری برای سامانه‌های همادی استفاده شود. اگر فرض کنیم که تابع توزیع احتمال پیش‌بینی یک متغیر هواشناسی مانند y برای عضو k ام (f_k) از سامانه همادی برابر $h_k(y | f_k)$ باشد، در این صورت، تابع توزیع احتمال پیش‌بینی BMA به صورت زیر خواهد بود.

$$p(y | f_1, f_2, \dots, f_K) = \sum_{k=1}^K w_k h_k(y | f_k) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، w_k احتمال اینکه در پیش‌بینی‌های صورت گرفته عضو k ام از سامانه همادی در دوره آموزشی، بهترین نتیجه را با توجه به مقادیر دیدبانی نسبت به سایر اعضا داشته است نشان می‌دهد و مجموع این احتمالات برای همه اعضای سامانه همادی برابر یک می‌باشد یعنی $\sum_{k=1}^K w_k = 1$.

برای کمیت‌هایی مانند دما و فشار سطح دریا، تابع توزیع احتمال شرطی می‌تواند با استفاده از میانگین وزنی چند توزیع نرمال ایجاد شود. تعداد توزیع‌ها مساوی تعداد اعضای سامانه است به گونه‌ای که یک توزیع نرمال به ازای هر عضو سامانه همادی در ترکیب وزنی وجود دارد و میانگین توزیع نرمال برابر پیش‌بینی تصحیح شده همان عضو سامانه است (رافتری، ۲۰۰۵). اما برای بارش توزیع نرمال مناسب نیست. پژوهش‌های گذشته (کو^{۳۵} و استرن^{۳۶}، ۱۹۸۲؛ ویلکس، ۱۹۹۰؛ همیل و کلوجی، ۱۹۹۸؛ ویلسون^{۳۷} و همکاران، ۱۹۹۹) نشان داده‌اند توزیع گاما برای بارش مناسب است. از این رو ما نیز در این مطالعه مشابه کار اسلاتر^{۳۸} و همکاران (۲۰۰۶) از توزیع گاما استفاده کرده ایم.

توزیع گاما با پارامتر شکل α ^{۳۹} و پارامتر مقیاس^{۴۰} β دارای تابع توزیع احتمال بصورت زیر است (اسلاتر و

35-Coe

36-Stern

37-Wilson

38-Slaughter

39- shape parameter

40-scale parameter

41-Expectation Maximization

جدول ۱. طرحواره های فیزیکی انتخاب شده برای مدل WRF

Ensemble Member	Boundary layer	Surface layer	Land surface	Cumulus physics	Microphysics	Shortwave/ Long wave radiation
member #1	YSU scheme	Monin-Obukhov-Janjic scheme	RUC land-surface model	Grell-Freitas ensemble scheme	Ferrier (new Eta) microphysics	Ferrier (new Eta) microphysics
member #2	Mellor-Yamada-Janjic TKE scheme	Monin-Obukhov-Janjic scheme	Unified Noah land-surface model	Betts-Miller-Janjic scheme	Ferrier (new Eta) microphysics	Dudhia/ RRTM scheme
member #3	Mellor-Yamada-Janjic TKE scheme	Monin-Obukhov-Janjic scheme	Unified Noah land-surface model	Grell-Freitas ensemble scheme	Kessler scheme	Dudhia/ RRTM scheme
member #4	YSU scheme	MM5 Monin-Obukhov scheme	Unified Noah land-surface model	Kain-Fritsch (new Eta) scheme	WSM 5- class scheme	Dudhia/ RRTM scheme
member #5	Mellor-Yamada-Janjic TKE scheme	Monin-Obukhov-Janjic scheme	Unified Noah land-surface model	Betts-Miller-Janjic scheme	WSM 5- class scheme	Dudhia/ RRTM scheme
member #6	Mellor-Yamada-Janjic TKE scheme	Monin-Obukhov-Janjic scheme	Unified Noah land-surface model	Kain-Fritsch (new Eta) scheme	Lin et al. scheme	Goddard/ RRTM scheme
member #7	MRF	MM5 Monin-Obukhov scheme	Unified Noah land-surface model	Modified Kain-Fritsch scheme	Kessler scheme	Dudhia/ RRTM scheme
member #8	Mellor-Yamada-Janjic TKE scheme	Monin-Obukhov-Janjic scheme	Unified Noah land-surface model	Kain-Fritsch (new Eta) scheme	WSM 5- class scheme	Dudhia/ RRTM scheme

شد. از آنجا که پژوهش حاضر مربوط به پیش بینی کمیت بارش است، بنابراین اجرای سامانه و بررسی و ارایه نتایج برای فصل های پر بارش سال انجام شده است. در کار انجام شده، ابتدا دوره آموزش بهینه بدست آمده است، بدین ترتیب که مدت دوره آموزش از ۳۰ تا ۱۲۰ روز تغییر داده شد و پس از واسنجی کردن بارش و محاسبه امتیاز احتمالی رتبه‌ای پیوسته (CRPS⁴⁴) بهترین دوره آموزش در روش BMA، معادل ۸۷ روز تعیین شد. نمودار CRPS برای تعیین بهترین دوره آموزش در ارائه شکل ۱ شده است.

نتایج و بحث

پس از تولید پیش بینی های احتمالاتی واسنجیده، روش های مختلف درستی‌سنجی به کار برده تا دقت آن ها ارزیابی شوند. منظور از درستی‌سنجی همان ارزیابی کیفیت پیش بینی های هواشناسی است که در آن نتایج فرآیند پیش بینی با دیدبانی متناظر مقایسه می شود. پیش بینی‌های احتمالاتی خوب شامل چند ویژگی هستند از جمله اطمینان‌پذیری⁴⁵ و تفکیک‌پذیری⁴⁶. اطمینان‌پذیری، میانگین توافق بین مقادیر پیش‌بینی و دیدبانی است. اگر تابع توزیع چگالی احتمال⁴⁷ (PDF) پیش‌بینی و دیدبانی انطباق کمی داشته باشند، در این

در این مطالعه، داده های پیش بینی بارش تجمعی ۲۴ ساعته با استفاده از مدل WRF⁴² بدست آمده است. زمان شروع اجرای مدل 12 UTC هر روز از ۱ سپتامبر ۲۰۱۵ تا ۳۰ فوریه ۲۰۱۶ است. برای شرایط مرزی و اولیه مدل ها از داده‌های جهانی GFS⁴³ با تفکیک افقی ۰/۵ درجه استفاده شده است. مدل WRF با دو حوزه اجرا می شود. حوزه بزرگ دارای تفکیک افقی 15 کیلومتر می باشد و محدوده ۵۱-۱۰ درجه شمالی و ۸۰-۲۰ درجه شرقی (منطقه خاورمیانه) را می‌پوشاند و حوزه کوچک دارای تفکیک افقی ۵ کیلومتر می باشد و محدوده ۴۱-۲۳ درجه شمالی و ۶۵-۴۲ درجه شرقی (کشور ایران) را می‌پوشاند.

سامانه همادی مورد مطالعه در این پژوهش از هشت پیکر بندی مختلف مدل WRF تشکیل شده است. به گونه ای که هر عضو سامانه پارامتر سازی های فیزیکی (خردفیزیک، همرفت، لایه مرزی، سطح زمین و طرحواره‌های مربوط به تابش موج کوتاه در مدل WRF) مربوط به خود را دارد. پیکر بندی های انتخاب شده برای مدل WRF در جدول ۱ خلاصه شده است.

داده های دیدبانی و پیش بینی به دو دوره تقسیم شدند به گونه ای که دوره ی اول (۱ سپتامبر ۲۰۱۵ تا ۱ دسامبر ۲۰۱۵) برای آموزش و دوره ی دوم (۱ دسامبر ۲۰۱۵ تا ۳۰ فوریه ۲۰۱۶) برای ارزیابی (آزمون)، استفاده

44-Continuous Ranked Probability Score

45-Reliability

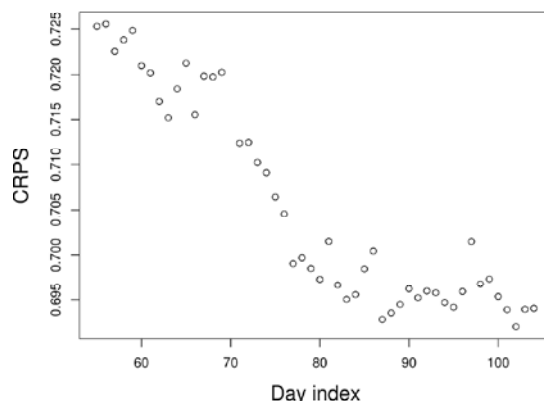
46-resolution

47-Probability Desity Function

42-Weather Research and Forecasting

43-Global Forecast System

امتیاز احتمالی رتبه‌ای پیوسته



شکل ۱. نمودار CRPS برای دوره های آموزشی متفاوت

نمایش تصویری فراوانی نسبی دیدبانی شده (0_k) بر حسب احتمال های پیش بینی (p_k) می باشد که 0_k به عنوان محور x و p_k به عنوان محور y رسم می شود با توجه به تعریف قابلیت اطمینان، هرچه نقاط به نیمساز نمودار نزدیک تر باشد پیش بینی احتمالاتی قابلیت اطمینان بیشتری دارد. نمودار اطمینان پذیری برای پیش بینی های احتمالاتی بارش تجمعی ۲۴ ساعته با استفاده از برون‌داد خام سامانه همدی و روش BMA برای پیش بینی های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته در آستانه های مختلف ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵، ۱/۰، ۱/۵ و ۲/۵ میلی متر در شکل ۲، شکل ۳ و شکل ۴ آورده شده است. در رسم نمودار اطمینان پذیری پیش بینی همدی خام، از روش انتخاب آزاد^{۴۹} برای محاسبه احتمال پیش بینی ها استفاده شده است. همان گونه که از شکل ۲، شکل ۳ و شکل ۴ آشکار است، منحنی اطمینان پذیری پس از واسنجیده کردن پیش بینی ها در آستانه های ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵ و ۱/۰ بسیار به خط نیمساز نزدیک شده است؛ به بیان دیگر در آستانه های مربوط به بارش های سبک و متوسط پیش بینی های احتمالاتی واسنجیده بارش تجمعی ۲۴ ساعته، از اطمینان پذیری بسیار بالایی برخوردار هستند، همچنین در آستانه های ۱/۵ و ۲/۵ پس از واسنجی منحنی اطمینان پذیری در روش BMA نسبت به منحنی اطمینان پذیری خام به نیمساز نزدیک تر است، یعنی

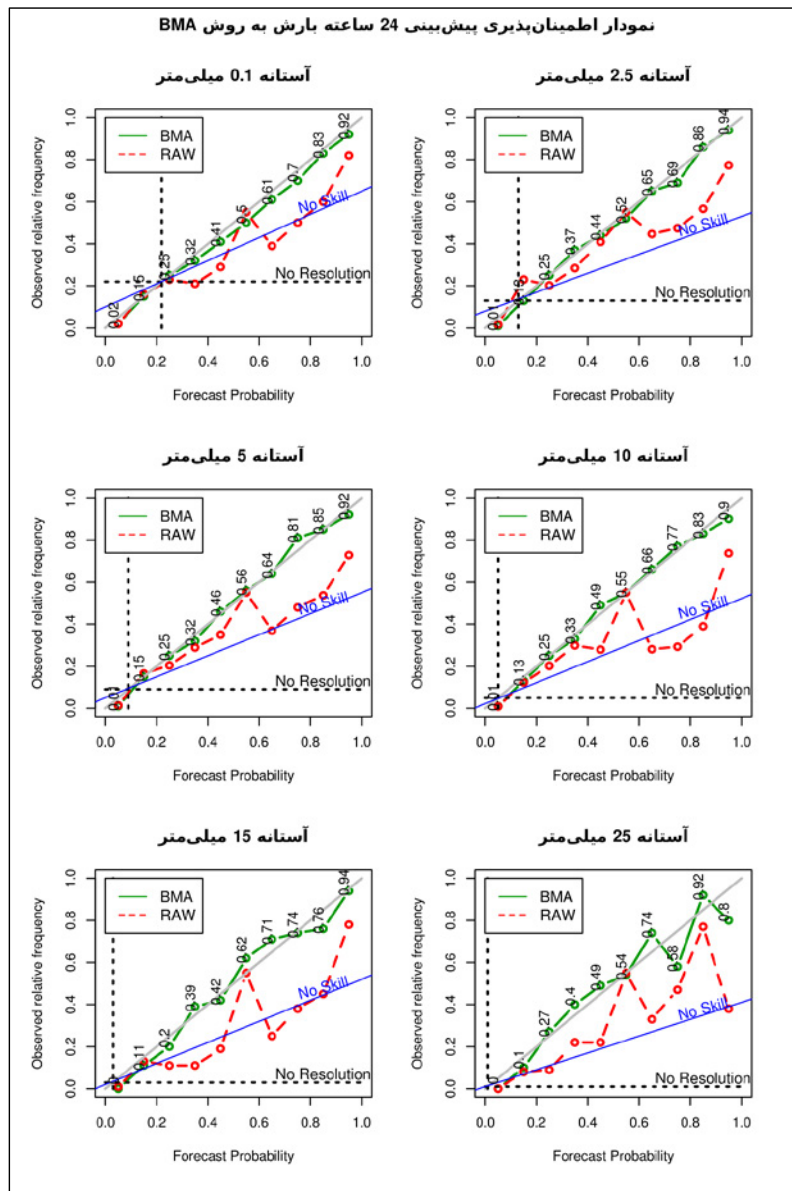
حالت اطمینان پذیری کم می باشد. تفکیک پذیری توانایی پیش بینی در تقسیم بندی یا تفکیک دیدبانی ها برای فراوانی های متفاوت است. این بدین معنی است که توزیع خروجی ها هنگامی که "A" پیش بینی باشد متفاوت از توزیع خروجی هاست در زمانی که "B" پیش بینی است. اگر پیش بینی ها اشتباه هم باشند، و سیستم پیش بینی بتواند نوعی از خروجی را از نوعی دیگر مجزا کند دارای تفکیک است.

همان طور که برای پیش بینی روش های مختلفی وجود دارد، درستی سنجی نیز به روش های متفاوتی انجام می شود. سنجه های آماری متفاوتی برای تعیین اطمینان پذیری و تفکیک پذیری توزیع احتمالاتی پیش بینی همدی در دسترس هستند. روش های استفاده شده درستی سنجی برای تعیین اطمینان پذیری و تفکیک پذیری شامل امتیاز بریر، امتیاز مهارتی بریر، امتیاز RPS، امتیاز مهارتی RPS و نمودار اطمینان پذیری هستند و نمودار ROC روشی برای تعیین تفکیک پذیری است که در این پژوهش به کار رفته شده است.

نمودار اطمینان پذیری^{۴۸}، یک نمودار متداول برای ارزیابی پیش بینی های احتمالاتی است. این نمودار احتمال پیش بینی یک رخداد را در مقابل فراوانی نسبی مشاهدات آن رخداد نشان می دهد. نمودار اطمینان پذیری

49-Democrating voting

48-Reliability diagram



شکل ۲. نمودار اطمینان‌پذیری برای پیش‌بینی ۲۴ ساعته بارش تجمعی ۲۴ ساعته با استفاده از برونداد خام سامانه همدادی (قرمز) و روش BMA (سبز)

برخورد⁵¹ (H)، بر حسب آهنگ هشدارهای نادرست⁵² (F) است که F به عنوان محور x و H به عنوان محور y رسم می‌شود.

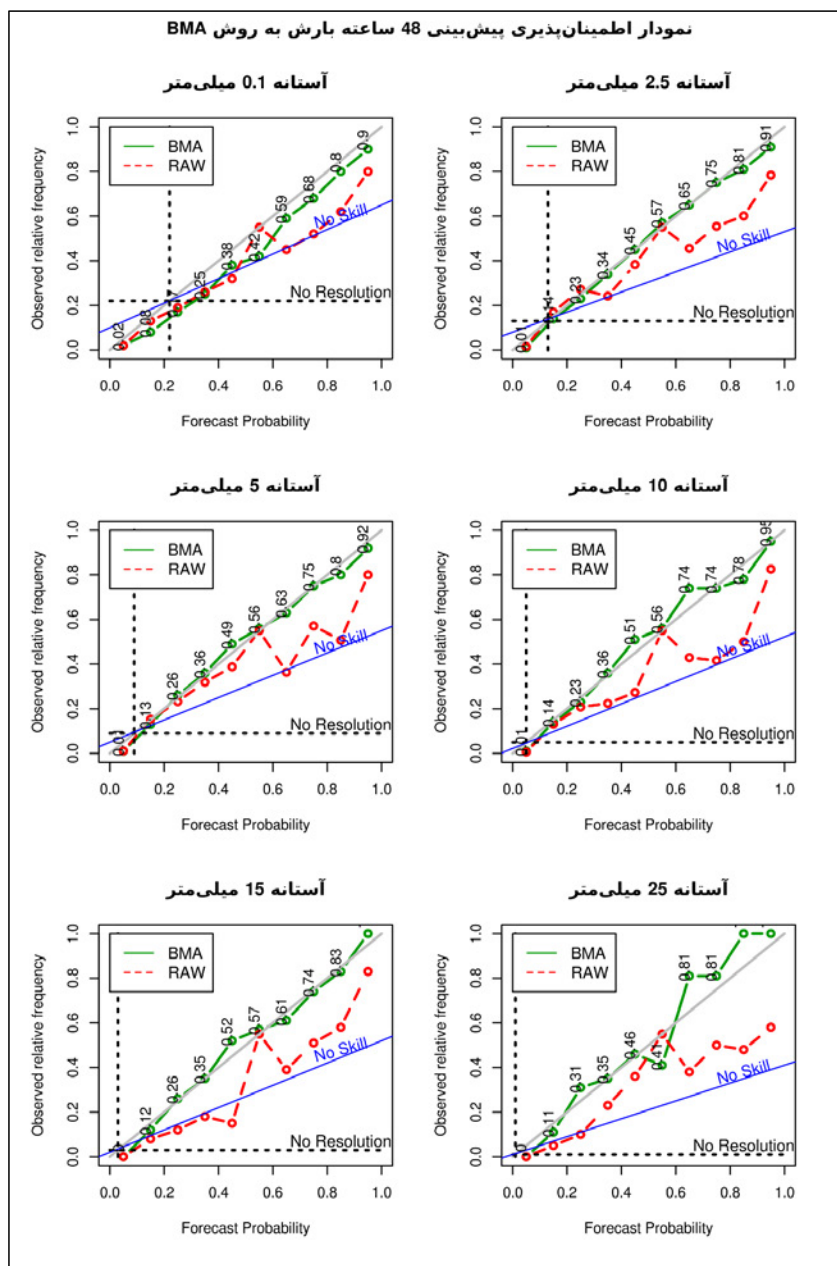
جفت‌های متناظر (F, H) بر روی نمودار تصویر و با پاره خط‌هایی به یکدیگر وصل می‌شوند؛ و به جفت (۰، ۰)

در این آستانه‌ها نیز پیش‌بینی احتمالاتی واسنجیده اطمینان‌پذیر می‌باشند. همانطور که در نمودارها مشاهده می‌شود روش BMA برای پیش‌بینی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته می‌تواند پیش‌بینی احتمالاتی قابل اطمینان و با مهارتی روی کشور تولید کند.

نمودار ROC⁵⁰ یک نموداری برای ارزیابی تفکیک‌پذیری پیش‌بینی احتمالاتی است و نمودار آهنگ

51-Hit Rate
52-False Alarm Rate

50-Relative Operating Characteristic



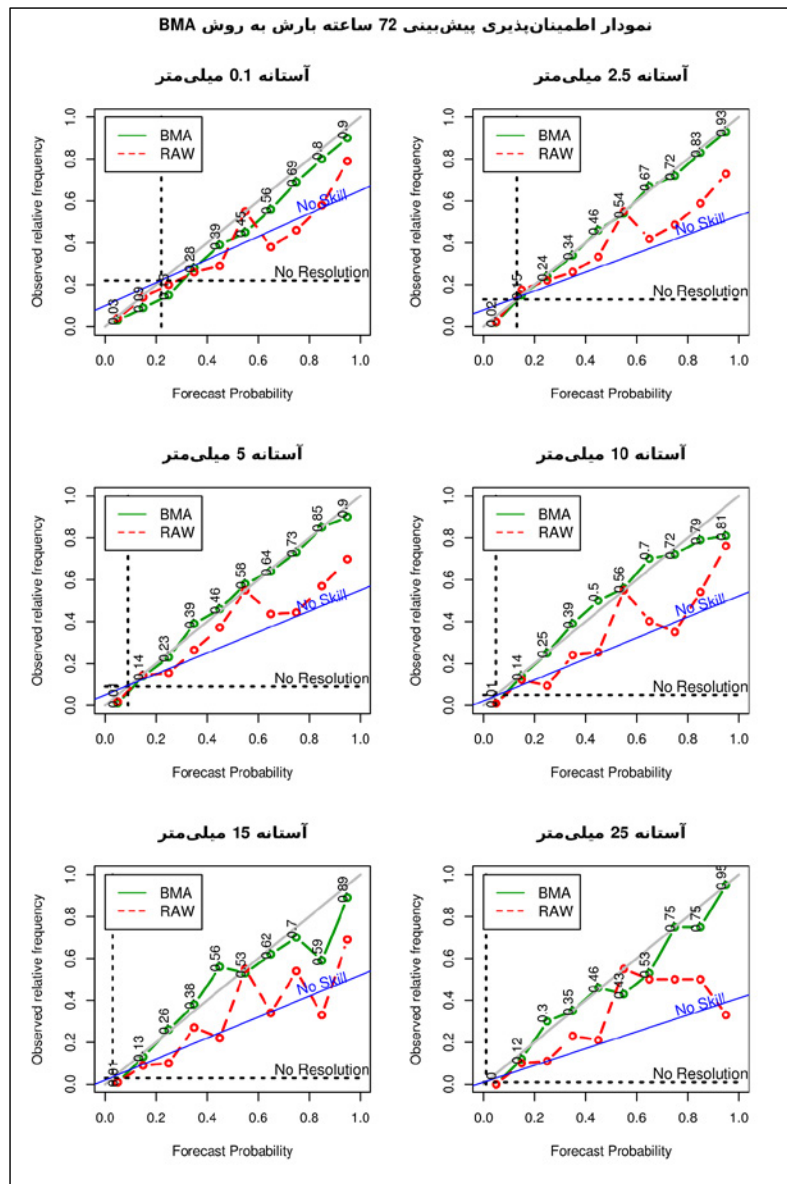
شکل ۳. نمودار اطمینان پذیری برای پیش‌بینی ۴۸ ساعته بارش تجمعی ۲۴ ساعته با استفاده از برونداد خام سامانه همدی (قرمز) و روش BMA (سبز)

می‌کند. در پیش‌بینی‌های با تفکیک بالاتر، منحنی‌های ROC به گوشه بالا سمت چپ نزدیک می‌شوند، در صورتی‌که در پیش‌بینی‌هایی با توانایی خیلی اندک در تمیز دادن وقوع یا عدم وقوع رویداد منحنی‌های ROC به قطر $F=H$ خیلی نزدیک می‌شود (ویلیکس ۲۰۰۶). شایان

متناظر با عدم پیش‌بینی رویداد^{۵۳}، و جفت (۱،۱) متناظر با پیش‌بینی همیشگی^{۵۴} رویداد وصل می‌شود. این نمودار محدب است؛ یعنی نمودار روی یا بالای پاره خط‌های مستقیمی است که هر دو نقطه روی آن را به هم وصل

53-never forecasting

54-always forecasting

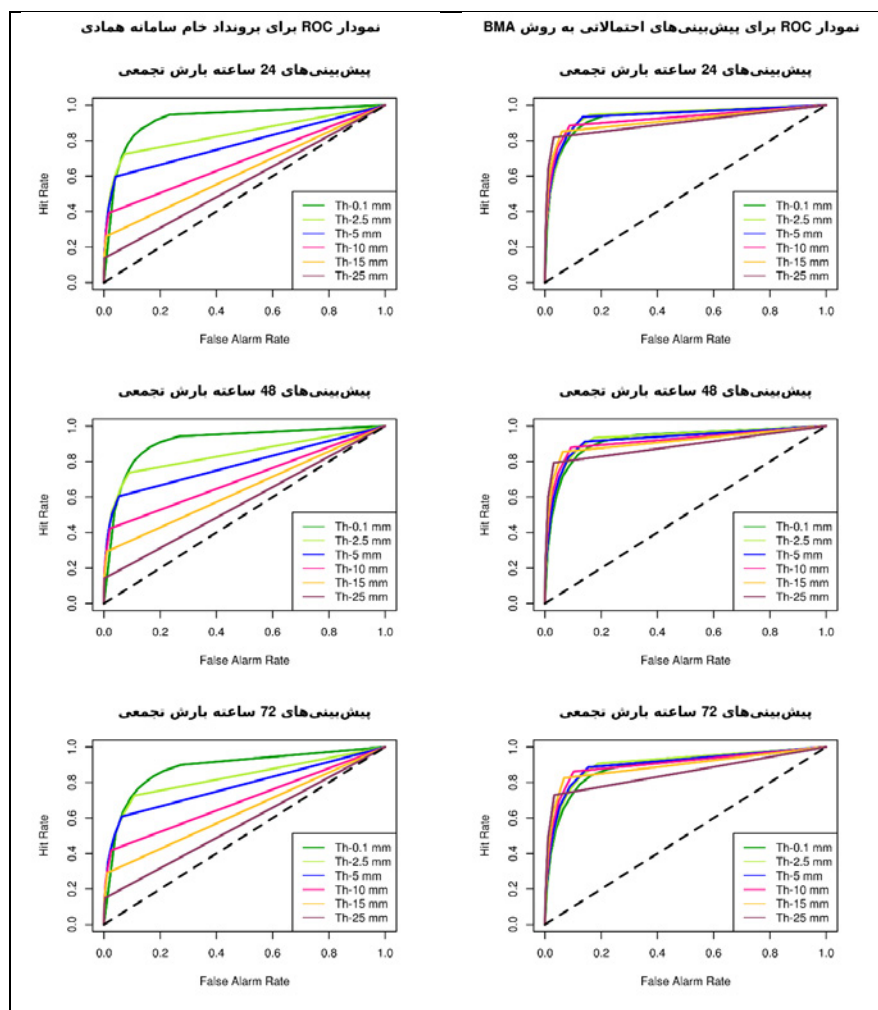


شکل ۴. نمودار اطمینان‌پذیری برای پیش‌بینی ۷۲ ساعته بارش تجمعی ۲۴ ساعته با استفاده از برون‌داد خام سامانه همدادی (قرمز) و روش BMA (سبز)

متفاوت در شکل ۵ رسم شده است. هر چه منحنی ROC از قطر ۴۵ درجه دورتر باشد نشان‌دهنده پیش‌بینی با تفکیک‌پذیری بالاتر است. در روش میانگین‌گیری بایزی، نمودار ROC در پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته در آستانه‌های مختلف بهبود یافته است، به طوری که پس از واسنجی منحنی بالاتر از حالت پیش‌بینی خام قرار دارد یعنی پیش‌بینی به روش میانگین‌گیری بایزی

گفتن است که نمودار ROC تفکیک‌پذیری پیش‌بینی را اندازه می‌گیرد. از آنجا که این نمودار به ارزیابی حساس نیست بنابراین هیچ اطلاعی از اطمینان‌پذیری پیش‌بینی فراهم نمی‌کند.

نمودار ROC برای پیش‌بینی‌های واسنجیده به روش میانگین‌گیری بایزی و برون‌داد خام سامانه همدادی در پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته در آستانه‌های



شکل ۵. نمودارهای ROC برای پیش‌بینی‌های احتمالاتی بارش تجمعی ۲۴ ساعته با استفاده از برون‌داد خام سامانه همادی و روش BMA برای پیش‌بینی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته

نسبت به پیش‌بینی خام تفکیک‌پذیری بالاتری دارد. زیر نیز محاسبه کرد.

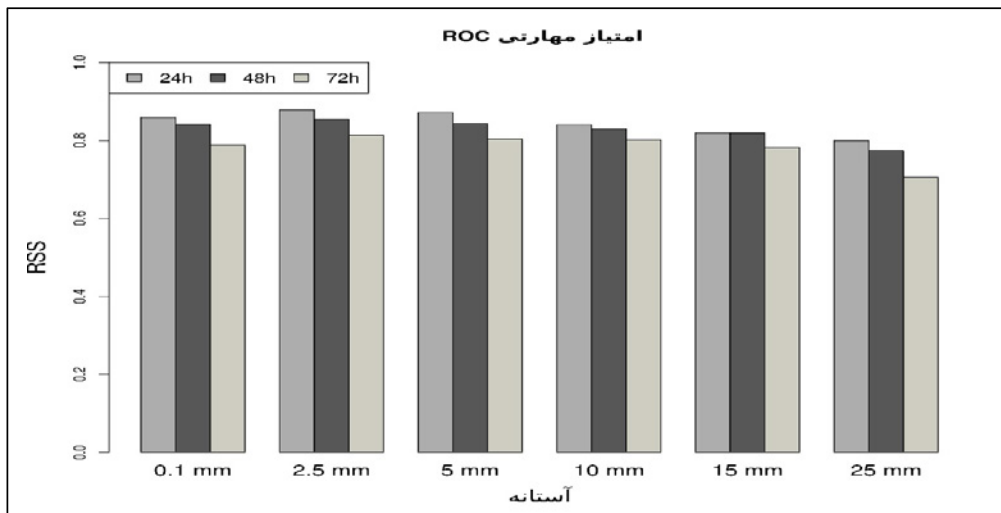
امتیاز مهارتی RSS، امتیاز ROC پیش‌بینی را با امتیاز ROC برای یک پیش‌بینی مرجع مقایسه می‌کند. RSS به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$RSS = \frac{A - 0.5}{1 - 0.5} = 2A - 1 \quad (4)$$

$$RSS = \frac{A - A(\text{refrence})}{A(\text{perfect}) - A(\text{refrence})} \quad (3)$$

نمودار امتیاز مهارتی ROC (RSS) برای پیش‌بینی واسنجیده به روش میانگین‌گیری بایزی در آستانه‌های متفاوت برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته بارش تجمعی ۲۴ ساعته در شکل ۶ نشان داده شده است. مقادیر بالاتر RSS نشان‌دهنده تفکیک‌پذیری بیشتر است. مقدار امتیاز مهارتی روش میانگین‌گیری بایزی در هر یک از آستانه‌ها برای هر سه بازه پیش‌بینی

که در این رابطه A مساحت زیر منحنی ROC است، A (refrence) مساحت زیر خط نیمساز می‌باشد و برابر ۰/۵ است و A(perfect) برابر مساحت کل مربع و مقدار آن مساوی یک است، در نتیجه RSS را می‌توان از رابطه



شکل ۶. نمودار امتیاز مهارتی ROC (RSS) برای پیش بینی های احتمالاتی بارش تجمعی ۲۴ ساعته در روش BMA در آستانه های مختلف برای پیش بینی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته

پیش بینی کامل امتیاز بریر برابر صفر است.

امتیاز بریر برای پیش بینی های واسنجیده به روش میانگین گیری بایزی و برون داد خام سامانه همدادی در آستانه های مختلف برای پیش بینی های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته به تفکیک در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که گفته شد مقادیر کمتر BS بیان گر اطمینان پذیری و تفکیک پذیری بالاتر پیش بینی است. آنچه که از شکل ۷ قابل استنباط است، این است که در همه آستانه ها برای پیش بینی های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته در روش میانگین گیری بایزی مقدار امتیاز بریر کمتر از پیش بینی خام می باشد، یعنی بعد از واسنجی به روش بریر پیش بینی ها به طور قابل توجهی بهبود یافتند. برای پیش بینی های ۲۴ ساعته در آستانه های مختلف ۱/۰، ۵/۲، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۵ پیش بینی احتمالاتی به روش میانگین گیری بایزی نسبت به پیش بینی خام به ترتیب ۲۴، ۳۰، ۳۲، ۳۶، ۳۹ و ۶۵ درصد بهبود یافته است.

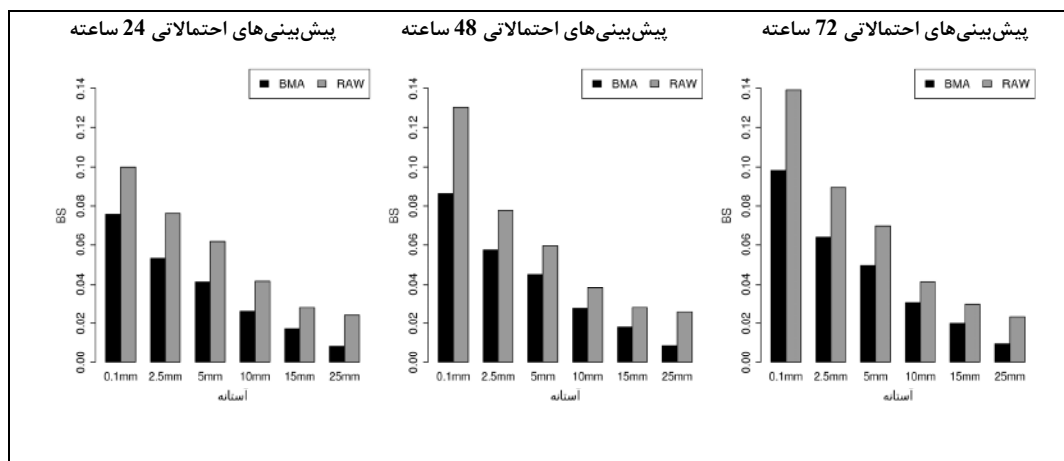
امتیاز مهارتی بریر (BSS) در واقع سنجه ای برای بهبود پیش بینی نسبت به پیش بینی مرجع است. پیش بینی مرجع در اینجا برون داد خام سامانه همدادی در نظر گرفته می شود تا مهارت پیش بینی احتمالاتی نسبت به آن سنجه شود. این امتیاز از یک تا صفر تغییر

دارای مقداری مثبت است. مقدار RSS در همه آستانه ها برای پیش بینی های ۲۴ ساعته بیشتر است، در نتیجه پیش بینی های ۲۴ ساعته تفکیک پذیری بالاتری دارد به طوری که مقدار RSS در آستانه های ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۵ به ترتیب ۰/۸۵، ۰/۸۷، ۰/۸۷، ۰/۸۳، ۰/۸۱ و ۰/۷۹ است، همانطور که آشکار است در آستانه های بالاتر تفکیک پذیری کمتر است.

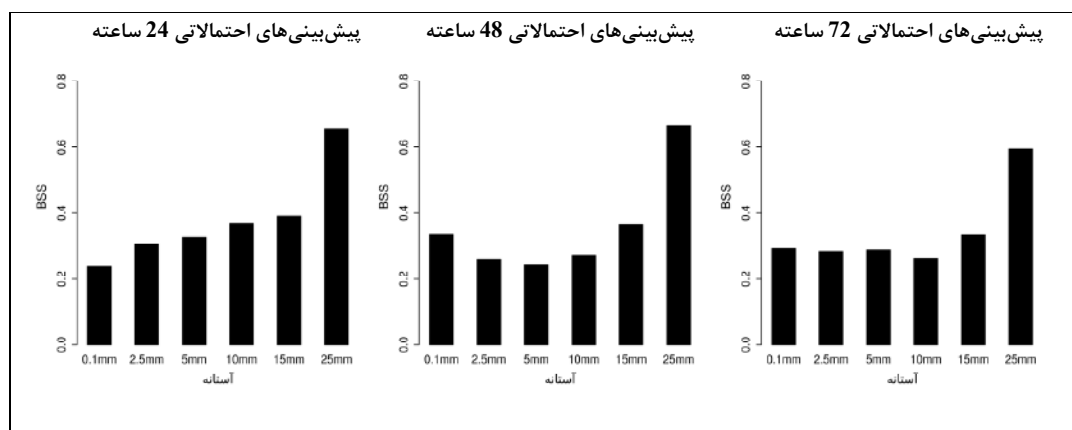
امتیاز بریر (BS^{55}) یکی از متداول ترین روش های درستی سنجی پیش بینی های احتمالاتی پیشامد های دودوئی است. این امتیاز، میانگین مربع تفاضلات بین احتمالات پیش بینی و مشاهده دودوئی مربوط به آن پیش بینی است.

$$BS = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (y_n - o_n)^2 \quad (5)$$

در این رابطه N تعداد پیشامد ها، y_n احتمال پیش بینی و o_n مشاهده دودوئی رخداد n ام هستند. $o_n = 1$ اگر پیشامد رخ دهد و $o_n = 0$ اگر پیشامد رخ ندهد. امتیاز بریر هر چه مقدار کمتری داشته باشد، دقت پیش بینی بیشتر خواهد بود، به طوری که برای



شکل ۷. نمودارهای امتیاز بریر برای پیش‌بینی‌های احتمالاتی بارش تجمعی ۲۴ ساعته برون‌داد خام سامانه همدی و میانگین‌گیری بایزی در آستانه‌های مختلف



شکل ۸. نمودارهای امتیاز مهارتی بریر برای پیش‌بینی‌های احتمالاتی بارش تجمعی ۲۴ ساعته به روش میانگین‌گیری بایزی در آستانه‌های مختلف

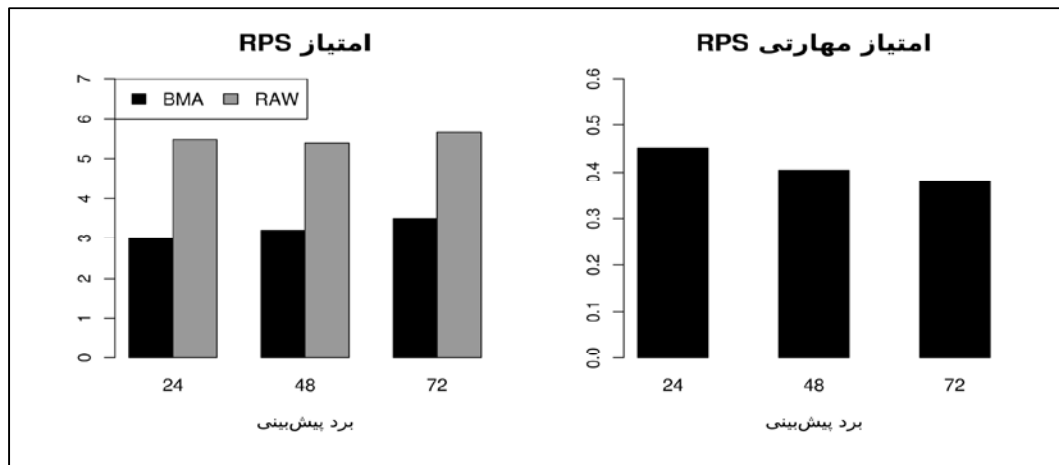
نظر گرفته شده است. مقدار امتیاز مهارتی در هر سه پیش‌بینی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته به روش میانگین‌گیری بایزی در آستانه‌های مختلف دارای مقداری مثبت است. یعنی در همه آستانه‌ها برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته پیش‌بینی به روش میانگین‌گیری بایزی نسبت به پیش‌بینی مرجع بهبود قابل توجهی داشته است.

امتیاز RPS نیز مشابه امتیاز BS می‌باشد با این تفاوت که این امتیاز برای آستانه‌های مختلف توزیع احتمالی تجمعی محاسبه می‌شود. این امتیاز به صورت زیر تعریف می‌شود:

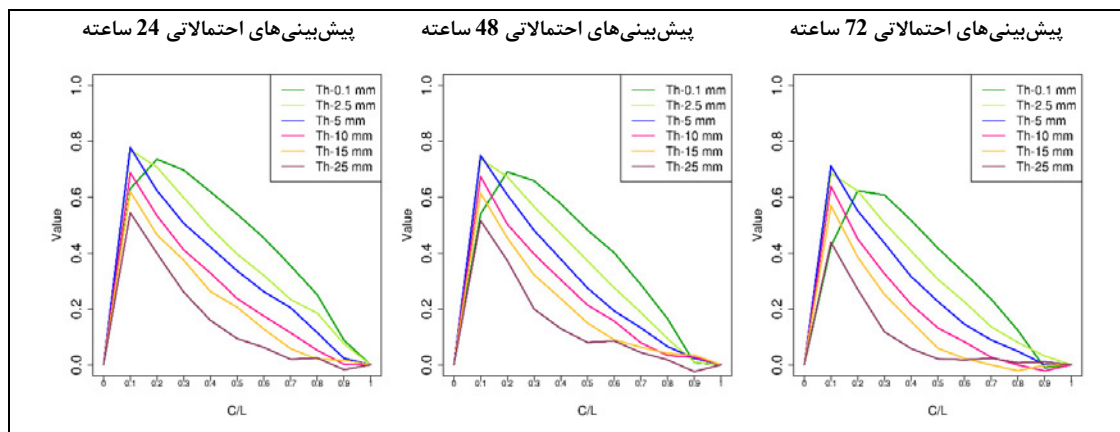
می‌کند که در بهترین حالت برابر یک و در بدترین حالت برابر صفر است.

$$BSS = \frac{BS - BS(\text{reference})}{BS(\text{perfect}) - BS(\text{reference})} = 1 - \frac{BS}{BS(\text{reference})} \quad (6)$$

امتیاز مهارتی بریر برای پیش‌بینی واسنجیده به روش میانگین‌گیری بایزی در آستانه‌های متفاوت برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته در شکل ۸ نشان داده شده است. برای محاسبه امتیاز مهارتی بریر پیش‌بینی خام به روش انتخاب آزاد به عنوان پیش‌بینی مرجع در



شکل ۹. نمودارهای امتیاز RPS و RPSS برای پیش‌بینی‌های احتمالاتی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته بارش تجمعی ۲۴ ساعته برون‌داد خام سامانه همادی و روش میانگین‌گیری بایزی



شکل ۱۰. نمودارهای ارزش اقتصادی به عنوان تابعی از برای پیش‌بینی‌های احتمالاتی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته بارش تجمعی ۲۴ ساعته به روش میانگین‌گیری بایزی در آستانه‌های مختلف

این امتیاز در بهترین حالت برابر یک و در بدترین حالت برابر صفر است.

$$RPSS = \frac{RPS - RPS(\text{reference})}{RPS(\text{perfect}) - RPS(\text{reference})} = 1 - \frac{RPS}{RPS(\text{reference})} \quad (۸)$$

نتایج حاصل از محاسبه امتیاز RPS و امتیاز مهارتی RPS برای پیش‌بینی‌های احتمالاتی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته بارش تجمعی ۲۴ ساعته با استفاده از برون‌داد خام

$$RPS = \frac{1}{K} \sum_{K=1}^K (P_K - O_K)^2 = \frac{1}{K} \sum_{K=1}^K B_K \quad (۷)$$

که در آن k تعداد آستانه‌ها، p_k احتمال تجمعی رخداد پیش‌بینی در آستانه k ام و o_k دیدبانی تجمعی متناظرش می‌باشد. مقدار RPS در بهترین حالت صفر خواهد بود.

امتیاز مهارتی RPSS، امتیاز RPS پیش‌بینی را با امتیاز یک پیش‌بینی مرجع (معمولاً پیش‌بینی اقلیمی) مقایسه می‌کند و به صورت معادله (۸) تعریف می‌شود.

وارد می‌شود، در صورتی که واقعه اتفاق بیفتد و او اقدام حفاظتی در برابر آن انجام نداده باشد L و در صورتی که اقدام حفاظتی را انجام دهد باید هزینه C (اضافه بر هزینه معمول) را برای این اقدام بپردازد. در حالت کلی C و L برابر نیستند و بنابراین برای کمینه کردن هزینه‌ها بهتر است تا تصمیم گیرنده استراتژی با کمترین هزینه متوسط را انتخاب نماید.

ارزش یک سامانه پیش‌بینی (V)، می‌تواند به صورت کاهش در هزینه متوسط نسبت به کاهش که با دستیابی به پیش‌بینی کامل به دست می‌آید تعریف شود. در واقع ارزش پیش‌بینی مبلغی است که کاربر در صورت استفاده از پیش‌بینی صرفه جویی خواهد کرد. با کمک H و F ، ارزش نسبی پیش‌بینی می‌تواند به صورت زیر تعریف شود.

$$V = \frac{\min(\alpha, s) - F(1-s)\alpha + Hs(1-\alpha) - s}{\min(\alpha, s) - s\alpha} \quad (9)$$

که در آن $\alpha = C/L$ نسبت و تعیین کننده کاربر است (جولیف^{۵۷} و استفنسون^{۵۸}، ۲۰۰۳).

در شکل ۱۰ نمودارهای ارزش اقتصادی پیش‌بینی‌های احتمالاتی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته واسنجیده به روش BMA برای آستانه‌های مختلف آورده شده است. در این شکل محور قائم مقادیر ارزش اقتصادی را نشان می‌دهد و محور افقی نشان‌دهنده کاربر است و نسبت هزینه به ضرر (α) را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل در آستانه ۵ میلی متر بیشینه مقدار ارزش در هر سه پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته برای نسبت هزینه-ضرر ۰/۱ با مقدار به ترتیب ۰/۷۷، ۰/۷۴ و ۰/۷۱ است، یعنی در صورت استفاده از پیش‌بینی این کاربر می‌تواند بیش از ۷۰ درصد در هزینه خود صرفه جویی کند. همچنین همانطور که در شکل نشان داده شده است، با بالا رفتن آستانه‌ها، از ارزش اقتصادی آن کاسته می‌شود، به طوری که در آستانه ۲۵ میلی متر در پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته برای نسبت هزینه-ضرر ۰/۱ با مقدار به ترتیب

سامانه همادی و روش میانگین‌گیری بایزی در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌گونه که پیش از این نیز گفته شد مقادیر کمتر RPS بیان‌گر اطمینان‌پذیری و تفکیک‌پذیری بالاتر پیش‌بینی است. بررسی مقادیر این امتیاز نشان می‌دهد که این کمیت در همه بازه‌های پیش‌بینی برای پیش‌بینی‌های واسنجیده کمتر از پیش‌بینی‌های خام است. یعنی روش میانگین‌گیری بایزی برای صدور پیش‌بینی‌های احتمالاتی سبب شده است که امتیاز RPS برای بارش تجمعی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته به ترتیب ۴۵ درصد، ۴۰ درصد و ۳۸ درصد کاهش یابد. مطلب دیگری که مشاهده می‌شود، این است که مقدار این امتیاز در تمام بازه‌های پیش‌بینی تقریباً یکسان است. یعنی این امتیاز تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین پیش‌بینی با بردهای متفاوت قائل نمی‌شود.

برای محاسبه امتیاز مهارتی RPS پیش‌بینی واسنجیده، امتیاز RPS پیش‌بینی خام به عنوان پیش‌بینی مرجع در نظر گرفته شده است. آنچه که از این شکل مشهود است این است که مقدار امتیاز مهارتی برای هر سه پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته مثبت است. به عبارتی کاربرد این روش‌ها توانسته اطمینان‌پذیری و تفکیک‌پذیری پیش‌بینی‌های سامانه همادی را افزایش دهد.

یک کمیت دیگر برای ارزیابی کیفیت پیش‌بینی، ارزش اقتصادی پیش‌بینی است که در مدل‌های تحلیلی تصمیم‌گیری مورد بحث قرار می‌گیرد (مورفی^{۶۱}، ۱۹۹۷). یک تصمیم‌گیرنده (کاربر پیش‌بینی) برای اتخاذ تصمیم تعدادی انتخاب دارد و انتخاب او تا حدی تحت تاثیر پیش‌بینی است. هر اقدامی هزینه‌ای به همراه دارد که بسته به اینکه رویداد رخ دهد یا خیر منجر به سود یا ضرر اقتصادی می‌شود. وظیفه تصمیم‌گیرنده انتخاب اقدامی مناسب است تا ضرر مورد انتظار در بلندمدت کمینه شود (یا سود مورد نظر بیشینه شود). کاربری را در نظر بگیرید که نسبت به یک واقعه خاص وضع هوا، برای مثال وقوع بارش، حساس باشد. فرض کنید خسارتی که به این کاربر

- of the American Statistical Association, 105:25–35.
- Soltanzadeh, I., Azadi, M., and Vakili, G. A., 2011: Using Bayesian Model Averaging (BMA) to calibrate probabilistic surface temperature forecasts over Iran, *Ann. Geophys.*, 29, 1295–1303.
- Toth, Z. and Kalnay, E., 1993: Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 74, 2317–2330.
- Wandishin, M. S., S. L. Mullen, D. J. Stensrud, and H. E. Brooks, 2001: Evaluation of a short-range multimodel ensemble system. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 729–747.
- Wilks, D. S., 1990: Maximum likelihood estimation for the gamma distribution using data containing zeros. *J. Climate*, 3, 1495–1501.
- Wilks, D. S., 2006: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, 2nd Edition, Academic Press, 627 pp.
- Wilson, L. J., W. R. Burrows, and A. Lanzinger, 1999: A strategy for verifying weather element forecasts from an ensemble prediction system. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 956–970.
- Wilson, L. J., Beauregard, S., Raftery, A. E., and Verret, R., 2007: Calibrated surface temperature forecasts from the Canadian ensemble prediction system using Bayesian model averaging, *Mon. Weather Rev.*, 135, 1364–1385.
- Zhu, Y., 2005: Ensemble forecast: A new approach to uncertainty and predictability. *Adv. Atmos. Sci.*, 22(6), 781–788.
- forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, 102: 409–418.
- Molteni, F., R. Buizza, T. N. Palmer, and T. Petroliagis, 1996: The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 122, 73–119.
- Murphy, A. H., 1966: A note on the utility of probabilistic predictions and the probability score in the cost–loss ratio decision situation. *J. Appl. Meteor.*, 5, 534–537.
- Murphy, A. H., 1971: A note on the ranked probability score. *J. Appl. Meteor.*, 10, 155–156.
- Murphy, A. H., 1997: Forecast verification. *Economic Value of Weather and Climate Forecasts*, A. H. Murphy and R. W. Katz, Eds., Cambridge University Press, 19–70.
- Raftery, A. E., Gneiting, T., Balabdaoui, F., and Polakowski, M., 2005: Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles, *Mon. Weather Rev.*, 133, 1155–1174.
- Stensrud, D. J., Brooks, H. E., Du, J., Tracton, M. S., and Rogers, E., 1999: Using ensembles for short-range forecasting, *Mon. Weather Rev.*, 127, 433–446.
- Sloughter, J. M., Raftery, A. E., Gneiting, T., and Fraley, C., 2007: Probabilistic quantitative precipitation forecasting using Bayesian model averaging, *Mon. Weather Rev.*, 135, 3209–3220.
- Sloughter, J. M., Gneiting, T., Raftery, A. E., 2010: Probabilistic wind speed forecasting using ensembles and Bayesian model averaging, *Journal*

Probabilistic Precipitation Forecasting Based on an Ensemble Output Using Bayesian Model Averaging

Maede Fathi¹, Majid Azadi^{2,*}, Gholamali Kamali¹, Amirhossein Meshkatee¹

¹ Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

² Atmospheric Science and Meteorological Research Center, Tehran, Iran

*Corresponding Author Email: azadi68@hotmail.com

Received: 14 April 2018, accepted: 14 July 2018

ABSTRACT

In this study, an ensemble system is developed using the WRF model to produce probabilistic precipitation forecasts over Iran. The ensemble system consists of WRF model simulations with eight different physical configurations. Initial and boundary conditions for WRF are provided from the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Global Forecast System (GFS) forecasts with a horizontal resolution of 0.5. The Bayesian model averaging (BMA) method is used to calibrate the probabilistic forecasts of rainfall in the fall and winter of 2016-2015. The 24, 48 and 72-hours raw ensemble outputs were calibrated using the BMA technique for 90 days as the test period with 87 training days of forecasts. The calibrated probabilistic forecasts are assessed using reliability diagram, ROC diagram, Brier score and RPS. In addition, the forecast economic value has been investigated. The results show that the application of the BMA has improved the reliability of the raw ensemble, such that the reliability and ROC diagrams have been improved significantly. For 24-hour forecasts, the Brier score is reduced by 24, 30, 32, 36, 39 and 65 percent at the thresholds of 0.1, 2.5, 5, 10, 15 and 25 mm, respectively. Similar results were achieved in 48 and 72-hour forecasts. The RPS score for the 24, 48 and 72-hour forecasts are reduced by 45, 40 and 38 percent, respectively.

Keywords: Ensemble System, WRF Model, Probabilistic Forecast, Bayesian Model Averaging (BMA), Verification

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Fathi, M.; Azadi, M.; Kamali, G.; Meshkatee, A. (2018). Probabilistic Precipitation Forecasting Based on an Ensemble Output Using Bayesian Model Averaging. *J. Meteorol. Atmos. Sci.*, 1(2): 114-129.

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the JMAS Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

