



Calibrated Probabilistic Precipitation Forecast Using the WRF and MM5 Ensemble over Iran

M. Azadi^{1*}, N. Kafashzadeh²
and Z. Zakeri³

Abstract

The output of an ensemble for country-wide daily precipitation probabilistic forecasts were calibrated with two models of WRF and MM5 with respectively 5 and 3 different configurations. The cumulative precipitation of 257 synoptic stations in the country has been used from 1st of November 2008 to 30th of April 2009. These data have been divided into two three-month periods which has been used for training and evaluating. The ensemble's rank histogram in training period, has been divided into two sets with the standard deviations of ($0 < s < 0.45$) and ($s > 0.45$). Finally, daily precipitation forecast has been calibrated for thresholds $p \leq 0.1$, $0.1 \leq p < 10$, and $p > 10$ millimeters at each day of the evaluating period. This was done by means of the rank histogram produced by training period and probabilistic precipitation standard deviation in the same day. For different verification tools it has been shown that calibration with rank histogram leads to an improvement in probabilistic forecasts of daily precipitation (especially in heavy precipitation categories).

Keywords: Ensemble, Calibration, Rank Histogram, Probability Forecast, 24-hours Precipitation.

Received: October 26, 2010

Accepted: July 26, 2011

پیش‌بینی احتمالی بارش واسنجیده با سامانه پیش‌بینی همادی (گروهی) WRF و MM5 در ایران

مجید آزادی^{۱*}، نجمه کفاش‌زاده^۲
و زینب ذاکری^۳

چکیده

برونداد یک سامانه پیش‌بینی همادی برای انجام پیش‌بینی‌های احتمالی بارش روزانه در سطح کشور با دو مدل WRF و MM5 به ترتیب با پنج و سه پیکربندی متفاوت واسنجی و ارزیابی شده است. بارندگی تجمعی ۲۵۷ ایستگاه همدید در سطح کشور در بازه‌ی زمانی اول نوامبر ۲۰۰۸ تا سی آوریل ۲۰۰۹ استفاده شده است. این داده‌ها به دو دوره سه ماهه تقسیم و برای آموزش استفاده و ارزیابی شده است. بافت نگاررتبه‌ای حاصل از سامانه همادی در دوره آموزش، به دو دسته با انحراف معیار ($0 < s \leq 0.45$) و ($s > 0.45$) تقسیم شده است. در نهایت پیش‌بینی بارندگی روزانه برای آستانه‌های ($0.1 \leq p < 10$ ، $0.1 < p \leq 10$ و $p > 10$) میلی‌متر برای هر روز در دوره ارزیابی با استفاده از بافت‌نگار حاصل از دوره آموزش و انحراف معیار پیش‌بینی بارندگی مربوط به اعضای سامانه در همان روز واسنجی شده است. نتایج حاصل از سنجه‌های راست‌آزمایی متداول، نشان می‌دهد که واسنجی به روش بافت نگاررتبه‌ای سبب بهبود پیش‌بینی‌های احتمالی بارش روزانه (به ویژه در آستانه بارش‌های سنگین) می‌شود.

کلمات کلیدی: سامانه پیش‌بینی همادی، واسنجی، بافت‌نگاررتبه‌ای، پیش‌بینی احتمالی، بارش ۲۴ ساعته.

تاریخ دریافت مقاله: ۴ آبان ۱۳۸۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۴ مرداد ۱۳۹۰

1- Assistant professor of meteorology research institute (MRI), Tehran, Iran, Email: azadi68@hotmail.com

2- M.S.c. student in meteorology, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

3- Expert, Information and Dispatching, Meteorology Organization, Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

۱- عضو هیأت علمی پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان (بندرعباس)، ایران.

۳- کارشناس ارشد بخش اطلاعات و مخابرات سازمان هواشناسی، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول

۱- مقدمه

بارش از جنبه‌های مختلف اهمیت فراوانی دارد. مسائل مربوط به خشکسالی، کشاورزی، آب‌شناسی و پیش‌بینی سیلاب‌ها از کلیدی‌ترین عناصر جوی به‌شمار می‌آید، از این رو پیش‌بینی دقیق آن اهمیت بسزایی دارد. مدل‌های پیش‌بینی عددی بارش در مقایسه با دیگر فراسنج‌ها نظیر دما خطای بیشتری دارند. از این رو پس‌پردازش برون‌داد مستقیم این مدل‌ها در مورد بارش و کاهش خطای نظام‌مند مدل با استفاده از روش‌های گوناگون موضوع مطالعات بسیار زیادی در مراکز معتبر پیش‌بینی وضع هواست.

برون‌دادهای مربوط به پیش‌بینی کمی بارندگی بهتر است در چارچوب احتمالی بیان شوند. چون باید عدم قطعیتی که از طبیعت آشوبناک جو و محدودیت مدل‌ها و سامانه‌های دیدبانی سرچشمه می‌گیرد را لحاظ کنند (Fritsch et al., 1998). سه معیار خوب بودن پیش‌بینی کیفیت، سازگاری و ارزش است (Murphy, 1993). مروری بر مطالعات پیش‌بینی احتمالی بارش نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌های احتمالی نسبت به پیش‌بینی‌های قطعی متناظر خود از سازگاری، کیفیت و ارزش اقتصادی بیشتری، برخوردارند و از آنها برتراند.

یکی از روش‌های مناسب برای تولید پیش‌بینی احتمالی یک کمیت، استفاده از پیش‌بینی سامانه همادی^۱ آن کمیت است (Tracton and Kalnay, 1993 ; Molteni et al., 1996). مطالعات مختلف بهبود را برای پیش‌بینی‌های میان‌مدت در مهارت پیش‌بینی‌های احتمالی با استفاده از سامانه همادی نشان می‌دهد. یک پیش‌بینی همادی در برگیرنده چندین اجرای مدل‌های عددی وضع هواست (معمولاً بین ۵ تا ۱۰). آنها در شرایط اولیه و یا نحوه بیان عددی معادلات حاکم بر جو (دو منبع اصلی عدم قطعیت یا خطا در پیش‌بینی) با یکدیگر متفاوت هستند (Edward Lorenz, 1963). بنابراین سهم اعضای سامانه در پیش‌بینی در هر مورد و برای هر پارامتر با یکدیگر متفاوت است.

عدم توانایی در تعیین دقیق سهم اعضای سامانه یکی از منابع خطا در پیش‌بینی‌های سامانه همادی است. به همین سبب روش‌های گوناگونی برای واسنجی نمودن^۲ پیش‌بینی‌های احتمالی سامانه‌های همادی پیشنهاد شده است. اکثر این روش‌ها پیش‌بینی‌های جاری را با استفاده از خطاهای پیش‌بینی‌های گذشته تصحیح می‌کنند. این کار مشابه پیش‌بینی‌های قطعی با استفاده از روش آماره برون‌داد مدل^۳ (MOS) است (Glahn and Lowry, 1972)؛ (Krishnamurti et al., 1999). اخیراً روش‌های متعددی برای

واسنجی پیش‌بینی‌های احتمالی ابداع شده است؛ مانند: روش بافت‌نگار رتبه‌ای^۴ (Eckel et al., 1998; Hamill and Colucci, 1996)، روش درسینگ سامانه همادی (Roulston and Smith, 2003)؛ (Wang et al., 2005)؛ میانگین‌گیری بی‌زی (Raftery et al., 2005)، برآزش گوسی غیرهمگن (Gal et al., 2005)، برآزش لاجستیک (Hamill et al., 2004)، روش‌های قیاسی (Hamill et al., 2006)، شبیه‌سازی پیش‌بینی (al et Stephenson., 2005) است (Wilks and Hamill, 2006).

آزادی و همکاران (۱۳۸۸) در ایران به روش میانگین‌گیری بی‌زی، پیش‌بینی‌های سامانه همادی را برای کمیت دما واسنجی کرده‌اند. نتایج کار آن‌ها نشان می‌دهد که کاربست این روش بهبود چشمگیری در مورد درصد پیش‌بینی‌های موافق و همچنین کاهش بیشینه خطا دارد.

(Hamill and Colucci, 1996) این پیش‌بینی‌ها را با استفاده از بافت‌نگار رتبه‌ای مربوط به سامانه همادی واسنجی نموده‌اند. این کار تا حدود زیادی از خطای پیش‌بینی همادی کاسته است. آن‌ها نشان داده‌اند که پیش‌بینی‌های احتمالی واسنجیده نسبت به پیش‌بینی‌های احتمالی ناواسنجیده مهارت بیشتری دارند. (al et Eckel, 1998) نیز پیش‌بینی‌های همادی بارش را به همین روش با طول دوره‌های مختلف (از یک و نیم روزه تا پانزده و نیم روزه) در آستانه‌های متفاوت (۲/۵۴، ۶/۳۵، ۱۲/۷ و ۲۵/۴ میلی‌متر) واسنجی کرده‌اند. آن‌ها علاوه بر نتیجه بالا نشان دادند که این مهارت با افزایش طول دوره کاهش می‌یابد. در واقع این روش برای پیش‌بینی بارش روزانه و همچنین آستانه‌های پایین‌تر، بسیار خوب عمل کرده است.

پیش‌بینی‌های احتمالی یک سامانه همادی به روش بافت‌نگار رتبه‌ای برای دستیابی به پیش‌بینی دقیق‌تر مقدار کمی بارش در این پژوهش واسنجی شده است. بدین منظور با به‌کارگیری مدل میان‌مقیاس پیش‌بینی وضع هوا^۵ MM5 و مدل عددی میان‌مقیاس^۶ WRF، با تغییر در پیکربندی‌های مدل‌ها اعضای سامانه همادی مورد نظر تهیه شده است. پیکربندی‌های مختلف مدل منطقه‌ای WRF با تغییر در فراسنج‌های میکروفیزیکی و همرفت و لایه مرزی و سطح زمین و طرحواره‌های مربوط به تابش موج کوتاه به دست آمده است. پیکربندی‌های مختلف مدل منطقه‌ای MM5 با تغییر در فراسنج‌های همرفت به دست آمده است. سپس برون‌داد این سامانه پیش‌بینی همادی برای صدور پیش‌بینی‌های احتمالی بارش روزانه در تمام کشور، واسنجی و ارزیابی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش کشور ایران است و محدوده ۲۳-۴۱ درجه شمالی و ۴۲-۶۵ درجه شرقی را می‌پوشاند. در این پژوهش داده‌های دیدبانی بارش روزانه ایستگاه‌های همدید در سطح کشور در یک بازه زمانی شش‌ماهه (اول نوامبر ۲۰۰۸ تا سی آوریل ۲۰۰۹) استفاده شده است. چون پژوهش حاضر مربوط به پیش‌بینی کمیت بارش است، لذا فصول پر بارش سال برای تحلیل بهتر نتایج مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱ پراکنده‌گی ایستگاه‌های همدید سطح کشور را نشان می‌دهد. تعداد آنها ۳۱۴ ایستگاه است. داده‌های ۲۸۷ ایستگاه قابل استفاده است. ایستگاه‌هایی که تا ۸۰٪ بازه‌ی زمانی مورد نظر (حدود ۱۶۰-۱۵۰ روز) شامل داده بوده در نظر گرفته شده است.

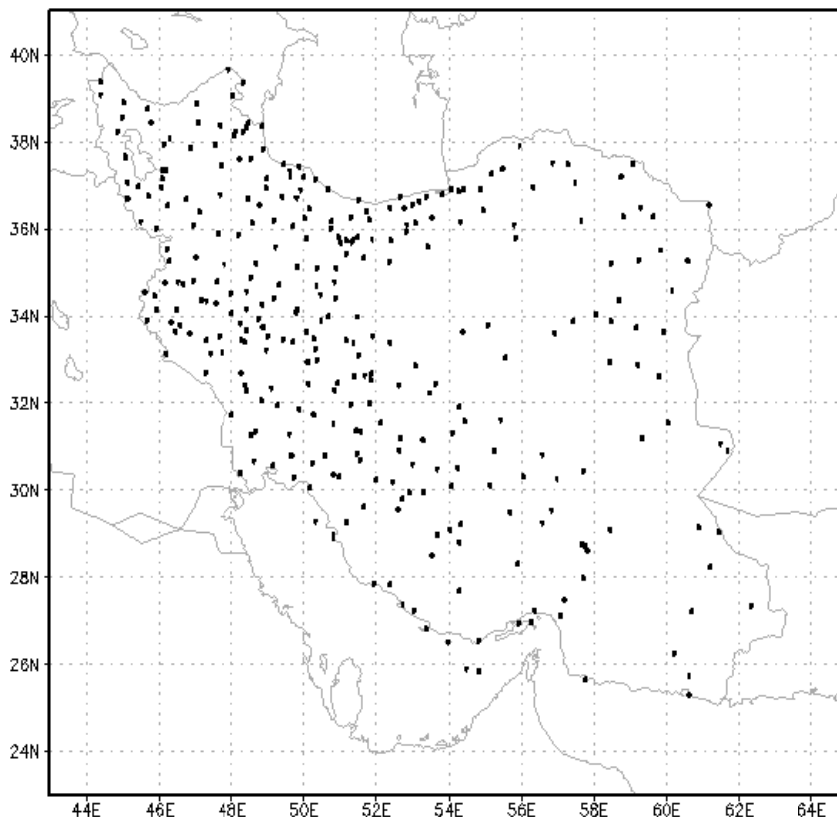
سامانه همادی مورد استفاده از دو مدل WRF و MM5 تشکیل شده که این مدل‌ها برای یک دوره شش‌ماهه (اول نوامبر ۲۰۰۸ تا سی آوریل ۲۰۰۹) اجرا شده است. بدین منظور پنج پیکربندی مختلف

برای مدل WRF (جدول ۱) و سه پیکربندی مختلف برای مدل MM5 (جدول ۲) در نظر گرفته شده است. تفاوت این پیکربندی‌ها در فیزیک مدل است (واشانی، ۱۳۸۹).

دو دامنه در اجرای مدل‌ها در نظر گرفته شده است. مشخصات آن به شرح زیر است:

دامنه بزرگ دارای تفکیک افقی ۴۵ کیلومتر و محدوده ۵۱-۱۰ درجه شمالی و ۸۰-۲۰ درجه شرقی را می‌پوشاند. دامنه کوچک دارای تفکیک افقی ۱۵ کیلومتر و محدوده ۴۱-۲۳ درجه شمالی و ۶۵-۴۲ درجه شرقی (کشور ایران) را می‌پوشاند. طرحواره‌های انتخاب شده برای فیزیک مدل‌ها در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است.

اجرای مدل‌ها به صورت روزانه و برای ساعت ۱۲ UTC بوده و در هر اجرا پیش‌بینی تا ۱۲۰ ساعت آینده تولید شده است. تفکیک افقی داده‌های ناهمواری و کاربری زمین برابر ۲ دقیقه (حدود ۴ کیلومتر) می‌باشد. در این پژوهش برون‌داد مدل‌ها برای دامنه کوچکتر با تفکیک افقی ۱۵ کیلومتر مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۱- پراکنده‌گی ایستگاه‌های دیدبانی همدید روی کشور ایران

جدول ۱- طرح‌واره‌های فیزیکی انتخاب شده برای مدل‌های WRF

| | WRF 1 | WRF 2 | WRF 3 | WRF 4 | WRF 5 |
|-------------------------------------|--------------------------------------|---|---|---|--|
| Microphysics | Ferrier (new Eta) microphysics | WSM 6- class graupel scheme | WSM 5- class scheme | WSM 5- class scheme | Lin et al. scheme |
| Shortwave Radiation | CAM scheme | Dudhia scheme | Dudhia scheme | Dudhia scheme | Goddard short wave |
| Surface Layer | Monin- Obukhov scheme | Monin- Obukhov (Janjic Eta) scheme | Monin- Obukhov (Janjic Eta) scheme | Monin- Obukhov (JanjicEta) scheme | Monin- Obukhov (JanjicEta) scheme |
| Land Surface | RUC Land-surface model | thermal diffusion scheme | Noah land- surface model | Noahland- surface model | Noahland- surface model |
| Planetary Boundary layer | YSU scheme | Mellor- Yamada- Janjic (Eta) TKE scheme | YSU scheme | Mellor- Yamada- Janjic (Eta) TKE scheme | Mellor- Yamada- Janjic (Eta) TKE scheme |
| Cumulus Parameterization | Betts -Miller -Janjic scheme | Kain Fritsch (new Eta) scheme | Kain Fritsch (new Eta) scheme | Grell- Devenyi ensemble scheme | Kain Fritsch (new Eta) scheme |

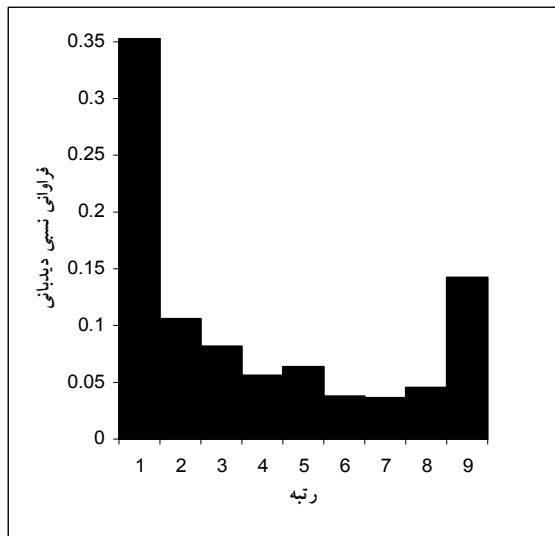
جدول ۲- طرح‌واره‌های فیزیکی انتخاب شده برای مدل‌های MM5

| | MM5 1 | MM5 2 | MM5 3 |
|---|--------------|----------|------------------|
| Cumulus parameterization schemes | Betts-Miller | Grell | New Kain-Fritsch |

۲-۲- روش تحقیق

می‌توان اولین عدد پیشای تولید شده را به عنوان دیدبانی و بقیه اعداد را به عنوان اعضای سامانه فرض کرد. مرتبه این دیدبانی در این سامانه به عنوان رتبه دیدبانی در نظر گرفته می‌شود. شکل بافت‌نگارهای رتبه‌ای در بیشتر موارد یکنواخت نیست. علت می‌تواند ناشی از خطای نظام‌مند اعضای سامانه و در نتیجه واسنجی نبودن سامانه، ناکافی بودن تغییر بین اعضای سامانه و یا دیدبانی‌های غیرصحیح باشد. در این پژوهش با استفاده از داده‌های دوره آموزش، برای داده‌های با انحراف معیار کم ($0 < s \leq 0.45$) بافت‌نگار شکل ۲ و برای داده‌های با انحراف معیار زیاد ($s > 0.45$) بافت‌نگار شکل ۳ حاصل شده است. شکل‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهد که بافت‌نگارهای به‌دست آمده

ابتدا داده‌های سامانه همادی و دیدبانی به دو دوره تقریباً سه ماهه تقسیم شده‌اند. دوره اول (اول نوامبر ۲۰۰۸ تا سی ژانویه ۲۰۰۹) برای آموزش و دوره دوم (اول فوریه ۲۰۰۹ تا سی آوریل ۲۰۰۹) برای ارزیابی است. سپس بافت‌نگار رتبه‌ای در دوره آموزش با استفاده از داده‌ها تشکیل شده است. از آنجا که سامانه شامل هشت عضو است، پس نه مکان برای تعیین مرتبه دیدبانی وجود دارد. در مواردی که دیدبانی با مقادیر اعضای سامانه برابر است قاعده‌ی خاصی برای تعیین مرتبه آن وجود دارد. به این صورت که به تعداد اعضای سامانه که با دیدبانی برابر است به‌اضافه یک، عدد پیشا تولید می‌شود. سپس



شکل ۳- بافت‌نگار رتبه‌ای پیش‌بینی برای انحراف معیار بزرگتر از ۰/۴۵

در این رابطه، n تعداد اعضای سامانه همادی و $Rank(q)$ نشان‌دهنده رتبه q در بین اعضای سامانه است. سهم اعضای سامانه در پیش‌بینی احتمالی ناواسنجیده یکسان در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که سهم اعضای سامانه در پیش‌بینی واسنجی شده به روش بافت‌نگار رتبه‌ای متفاوت است که در ادامه به صورت خلاصه تشریح می‌شود. فرض کنید X بردار پیش‌بینی همادی بارندگی با N عضو و R بردار فراوانی نسبی دیدبانی در هر یک از مرتبه‌ها برای داده‌های دوره آموزش است، احتمال وقوع بارش برای آستانه‌های مختلف با توجه به روابط ارائه شده توسط Hamill et al. (1997) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

۱- احتمال وقوع بارش برای آستانه کمتر از عضو i ام سامانه (X_i) :

$$\Pr(V < X_i) = \sum_{j=1}^i R_j \quad (2)$$

۲- احتمال وقوع بارش بین دو عضو متوالی سامانه $(X_i$ و $X_{i-1})$:

$$\Pr(X_{i-1} \leq V < X_i) = R_i \quad (3)$$

۳- احتمال وقوع بارش کمتر از X_1 و بیشتر از صفر:

$$\Pr(0 \leq V < T) = \left(\frac{T}{X_1}\right) R_1 \quad (4)$$

$0 < T < X_1$

۴- احتمال وقوع بارش بین یک عضو سامانه X_i و آستانه کمتر از عضو بعدی سامانه:

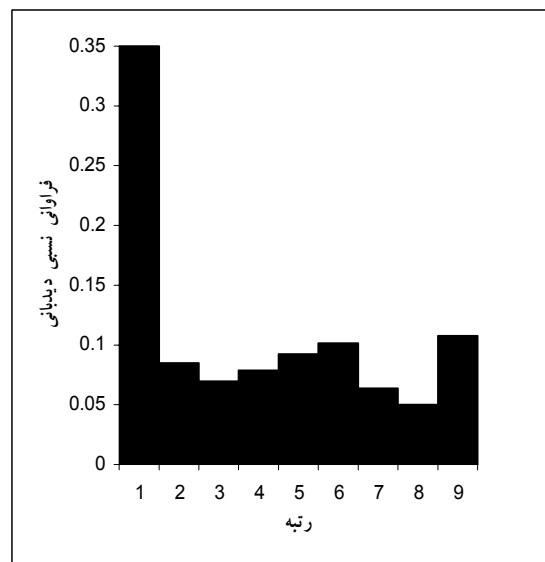
$$\Pr(X_i \leq V < T) = \left(\frac{T - X_i}{X_{i+1} + X_i}\right) R_{i+1} \quad (5)$$

یکنواخت نیستند. در بافت‌نگار شکل ۲ در ۳۵ درصد موارد دیدبانی کمتر از کمترین عضو و در ۱۲ درصد موارد دیدبانی بزرگتر از بزرگترین عضو سامانه است. همچنین در بافت‌نگار شکل ۳ در ۴۳ درصد موارد دیدبانی کمتر از کمترین عضو و در ۱۵ درصد موارد دیدبانی بزرگتر از بزرگترین عضو سامانه است.

با استفاده از داده‌های دوره ارزیابی و بافت‌نگارهای رتبه‌ای حاصله در دوره آموزش، پیش‌بینی‌های احتمالی ناواسنجیده و واسنجیده به روش همیل محاسبه و با هم مقایسه شده است. در هر دو روش نیاز است که در ابتدا مشخص شود از کدام بافت‌نگار (شکل ۲ یا شکل ۳) استفاده شود. لذا برای هر روز در دوره ارزیابی باید انحراف معیار محاسبه و براساس انحراف معیار به دست آمده، از بافت‌نگار مناسب آن روز استفاده شود، یعنی برای $(0 < s \leq 0/45)$ بافت‌نگار شکل ۲ و برای $(s > 0/45)$ بافت‌نگار شکل ۳ استفاده می‌شود.

روش موسوم به انتخابات آزاد^۷ برای محاسبه پیش‌بینی احتمالی ناواسنجیده در پژوهش حاضر استفاده شده است. احتمال وقوع تجربی رویداد برای آستانه‌های کمتر یا مساوی q در روش یاد شده مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Wilks, 1995).

$$\Pr(v \leq q) \approx \frac{Rank(q)-1}{n} \quad (1)$$



شکل ۲- بافت‌نگار رتبه‌ای پیش‌بینی برای انحراف معیار بین ۰ و ۰/۴۵

تجمعی محاسبه می‌شود. این امتیاز به صورت زیر تعریف می‌شود (Epstein, 1969; Murphy, 1971).

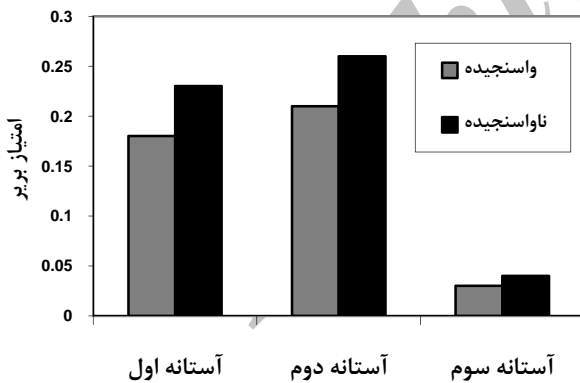
$$RPS = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (p_k - o_k)^2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K B_k \quad (9)$$

k تعداد آستانه‌ها، p_k احتمال تجمعی رخداد پیش‌بینی در آستانه k ام و o_k دیدبانی تجمعی متناظرش است. مقدار این امتیاز برای پیش‌بینی‌های کامل صفر است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی بر اساس امتیاز بریر

شکل ۴ نمودار امتیاز بریر را برای پیش‌بینی‌های احتمالی بارش و اسنجیده و ناواسنجیده نشان می‌دهد. مقدار این امتیاز همانگونه که از شکل پیداست برای پیش‌بینی و اسنجیده در تمامی آستانه‌ها کمتر از پیش‌بینی ناواسنجیده است. یعنی فرآیند و اسنجی سبب بهبود در نتایج پیش‌بینی‌های احتمالی شده است. همچنین با توجه به مقادیر بسیار کم این امتیاز در آستانه سوم می‌توان نتیجه گرفت که کاربست روش و اسنجی در برخی از آستانه‌ها مانند آستانه سوم بسیار موفقیت آمیز بوده است. زیرا مقدار امتیاز بریر برای پیش‌بینی و اسنجیده در این آستانه نسبت به پیش‌بینی و اسنجی نشده ۴۰٪ کاهش یافته است؛ در حالی که این امتیاز در دو آستانه اول و دوم به ترتیب ۲۳٪ و ۱۹٪ درصد کاهش یافته است.



شکل ۴- نمودار امتیاز بریر

۳-۲- ارزیابی بر اساس نمودار اطمینان‌پذیری

شکل ۵ نتایج ارزیابی سامانه را برای آستانه‌های مختلف با استفاده از نمودار اطمینان‌پذیری نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل ۵ پیداست، منحنی اطمینان‌پذیری، مربوط به پیش‌بینی احتمالی و اسنجیده نسبت به پیش‌بینی ناواسنجیده، در تمام آستانه‌های

$$X_i < T \leq X_{i+1}$$

۵- احتمال وقوع بارش بین دو آستانه بزرگتر از بزرگ‌ترین عضو سامانه (X_N):

$$\Pr(T_1 < V < T_2) = \frac{F(T_2) - F(T_1)}{1.0 - F(X_N)} R_{n+1} \quad (6)$$

$$T_2 > T_1 \geq X_N$$

که F تابع توزیع گامبل مطابق رابطه (۷) است (Wilks, 1995):

$$F(x) = \exp\left\{-\exp\left[\frac{-(x-\alpha)}{\beta}\right]\right\} \quad (7)$$

برآورد روش گشتاوری پارامترها $\beta = \frac{s\sqrt{6}}{\pi}$ و $\alpha = \bar{x} - \gamma\beta$ است. s انحراف معیار، \bar{x} میانگین و γ ثابت اولر (۰/۰۵۷۷۲۱) است.

۳-۲- سنجه‌های راست‌آزمایی مورد استفاده

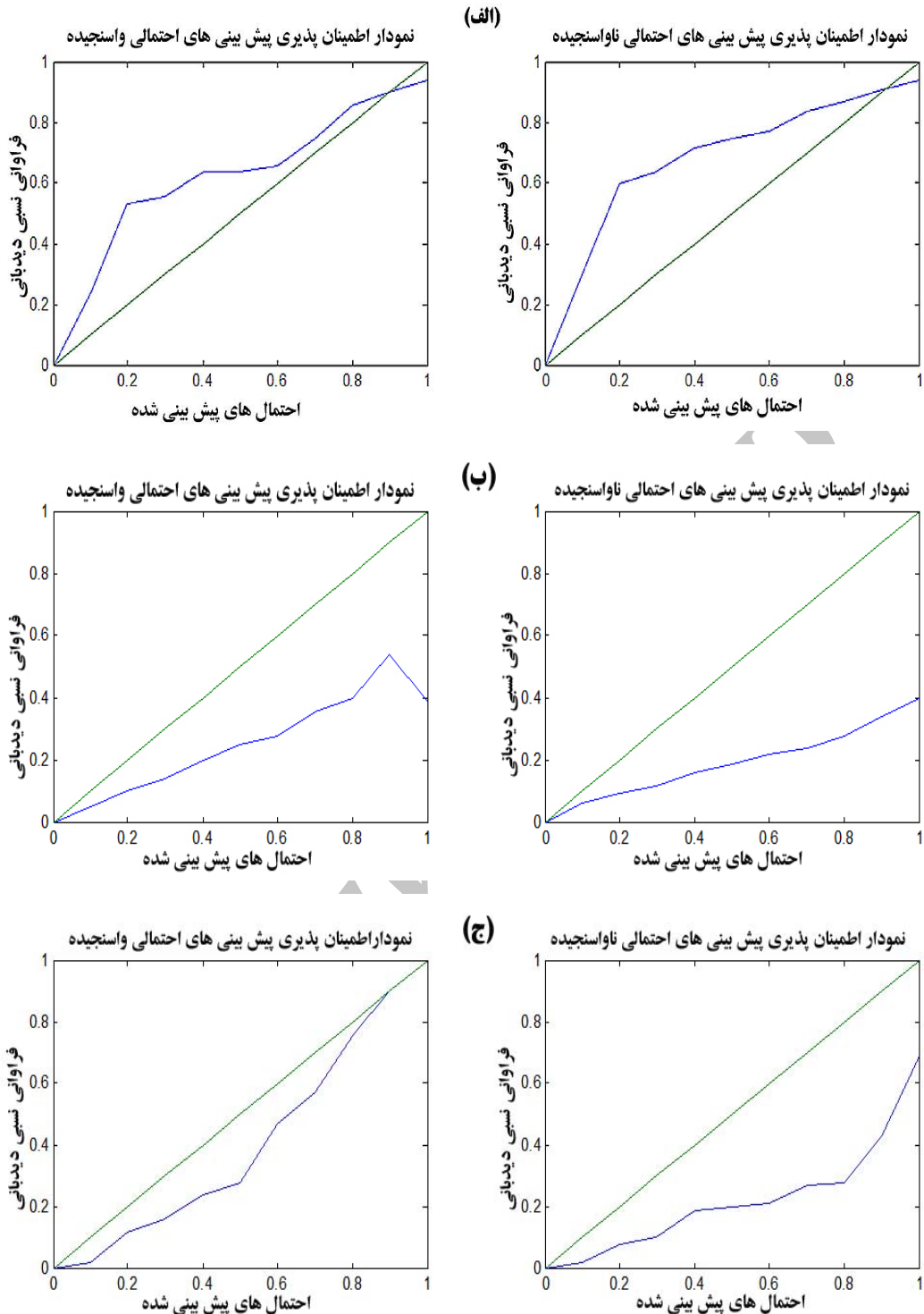
نتایج پیش‌بینی سامانه قبل و بعد از و اسنجی با استفاده از برخی سنجه‌های راست‌آزمایی^۸ شامل امتیاز بریر^۹، نمودار اطمینان‌پذیری^{۱۰} و امتیاز مرتب شده احتمالی^{۱۱} (RPS) ارزیابی شد. امتیاز بریر در واقع میانگین مربع خطای پیش‌بینی احتمالی است و به صورت زیر تعریف می‌شود (Brier et al., 1951).

$$BS = \frac{1}{n} \sum_{k=i}^n (F_k - O_k)^2 \quad (8)$$

که در آن n تعداد پیش‌بینی‌های موجود، F_k احتمال وقوع پیش‌بینی و O_k دیدبانی متناظر برای روز k ام است. دیدبانی بر اساس اینکه آیا پیش‌بینی متناظر اتفاق می‌افتد یا خیر، به ترتیب با مقادیر یک یا صفر تعیین می‌شود. بدیهی است که مقدار امتیاز بریر برای پیش‌بینی‌های کامل برابر صفر می‌شود.

نمودار اطمینان‌پذیری نمایش تصویری فراوانی نسبی دیدبانی شده O_k (محور طول‌ها) برحسب احتمال‌های پیش‌بینی p_k (محور عرض‌ها) است. هرچه منحنی در این نمودار به نیمساز نزدیک‌تر باشد اطمینان‌پذیری بیشتر و انحراف از نیمساز نشانگر اریبی شرطی است. بخش‌هایی از منحنی که در زیر نیمساز قرار می‌گیرند نشان‌دهنده فرآیند پیش‌بینی در این احتمال‌ها هستند. برعکس آن بخش‌هایی از منحنی که بر فراز نیمساز قرار دارند نشان‌دهنده فرو پیش‌بینی در آن احتمال‌ها هستند. همچنین یکنواختی منحنی نشان‌دهنده تفکیک‌پذیری پایین است.

امتیاز مرتب شده احتمالی نیز مشابه امتیاز بریر است با این تفاوت که امتیاز مرتب شده احتمالی برای آستانه‌های مختلف توزیع احتمالی



شکل ۵- آستانه‌های (الف) کمتر از ۰/۱ (ب) بین ۰/۱ و ۱۰ (ج) بیشتر از ۱۰ میلی‌متر

نسبت به دو آستانه دیگر، بسیار به خطچین نزدیک شده است؛ می‌توان نتیجه گرفت که پیش‌بینی‌های احتمالی و اسنجیده بارش در آستانه بارش‌های سنگین، از اطمینان‌پذیری بسیار بالایی برخوردار هستند. همچنین باتوجه به شکل ۵ بر اساس منحنی‌های

پیش‌بینی به خطچین نزدیک‌تر است. پس می‌توان گفت که کاربست روش واسنجی بافت نگار رتبه‌ای برای صدور پیش‌بینی احتمالی (بارش جمعی ۲۴ ساعته) با دقت بالاتر، موفق بوده است. با توجه به اینکه منحنی اطمینان‌پذیری پس از واسنجی پیش‌بینی‌ها در آستانه سوم

۵- سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی سازمان هواشناسی کشور به انجام رسیده است که بدین وسیله از مسئولین مربوطه سپاسگزاری می‌شود. همچنین از زحمات خانم مهندس فاطمه صحرائیان که ما را در انجام این پژوهش یاری نمودند سپاسگزاری می‌نمایم.

پی نوشت

- 1- Ensemble Forecast
- 2- Calibration
- 3- Model Output Statistics (MOS)
- 4- Rank Histogram
- 5- 5th generation Pennsylvania State University-National Center for Atmospheric Research Mesoscale Model (MM5)
- 6- The Weather Research and Forecasting Model (WRF)
- 7- Democratic Voting
- 8- Verification
- 9- Brier Score
- 10- Reliability Diagram
- 11- Ranked Probability Score

۶- مراجع

آزادی، م. و همکاران، (۱۳۸۸)، "کالیبره کردن برون داد یک سامانه همدادی به روش میانگین گیری بیزی"، پروژه پژوهشکده هواشناسی و علوم جو، ۷۳ص.

واشانی، س. (۱۳۸۹)، "پس پردازش برون داد یک سامانه همدادی با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی و راست آزمایی این سامانه روی منطقه شمال ایران"، پایان نامه دکتری هواشناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ۱۲۵ص.

Brier, G. W., and Allen, R. A. (1951), "Verification of weather forecast," *Compendium of Meteorology*, American Meteorology Society, 1953pp.

Eckel, F. A., and Walters, M. K. (1998), "Calibrated probabilistic quantitative precipitation forecast based on the MRF ensemble," *Weather and Forecasting*, 13(4), pp. 1132-1147.

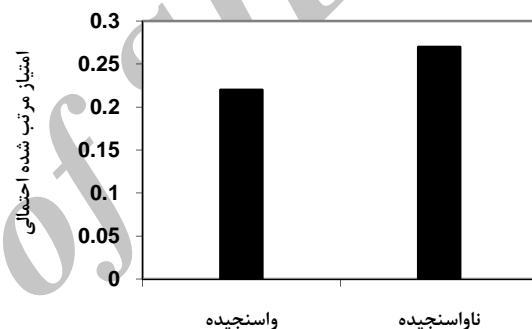
Epstein, E. S. (1969), "Stochastic-dynamic prediction," *Tellus*, 21(6), pp. 739-759.

Fritsch, J. M., Houze, J., Adler, R., Bluestein, H., Bosart, L., Brown, J., Carr, F., Davis, C., Johnson, R. H., Junker, N., kou, Y. H., Rutledge, S., Smith, J., Toth, Z., Wilson, J. W., Zipser, E., and Zrnica, D. (1998), "Quantitative Precipitation forecasting,"

اطمینان پذیری می‌توان گفت که سامانه در آستانه اول (بدون بارش) برای پیش بینی وقوع بارش، فرای پیش بینی دارد. در حالی که در آستانه بارش های متوسط و سنگین فرو پیش بینی دارد.

۳-۳- ارزیابی بر اساس امتیاز مرتب شده احتمالی

شکل ۶ نمودار امتیاز مرتب شده احتمالی را برای پیش بینی های احتمالی بارش واسنجیده و ناواسنجیده نشان می‌دهد. بررسی نتایج این امتیاز نشان می‌دهد که این کمیت برای پیش بینی های واسنجیده کمتر از پیش بینی های ناواسنجیده است. یعنی کاربست روش واسنجی بافت نگار رتبه ای برای صدور پیش بینی های احتمالی سبب شده است که امتیاز مرتب شده احتمالی، ۲۰٪ کاهش یابد.



شکل ۶- نمودار امتیاز مرتب شده احتمالی

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

پیش بینی بارش با توجه به اثرات مطلوب و نامطلوب آن بر زندگی انسان، از اهمیت زیادی برخوردار است. امروزه پیش بینی اغلب کمیت های هواشناسی برای بسیاری کاربردها، از جمله مقدار بارندگی از طریق مدل های پیش بینی عددی وضع هوا برآورد می‌شوند، اما این مدل ها خطا دارند. در این پژوهش روش بافت نگار رتبه ای برای کاستن خطاهای نظام مند (واسنجی نمودن) برون داد مدل های پیش بینی عددی وضع هوا ارائه و نتایج پیش بینی های سامانه قبل و بعد از واسنجی ارزیابی شده است. به طور کلی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که واسنجی به روش بافت نگار رتبه ای توانسته است خطای نظام مند موجود در برون داد خام مدل ها را کاهش دهد. این روشی ساده برای به دست آوردن پیش بینی احتمالی بارش دقیق تر در ایران به شمار می‌آید.

- Molteni, F., Buizza, R., Palmer, T. N., and Petroloagis, T. (1996), "The new ECMWF Ensemble Prediction System: Methodology and validation," *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 122(529), pp. 73-119.
- Murphy, A. H. (1971), "a note on the ranked probability score," *Journal of Applied Meteorology*, 10(1), pp. 155-156.
- Murphy, A. H. (1993), "What is a good forecast? An essay on the nature of goodness in weather forecasting," *Weather and Forecasting*, 8(2), pp. 281-293.
- Raftery, A. E., Gneiting, T., Balabdaoui, F., and Polakowski, M. (2005), "Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensemble," *Mon. Wea. Rev.*, 133(5), pp. 1155-1174.
- Roulston, M. S., and Smith, L. A. (2003), "Combining dynamical and statistical ensemble," *Tellus*, 55(1), pp. 16-30.
- Stephenson, D. B., Coelho, C. A. S., Balmaseda, M., and Doblas-Reyes, F. J. (2005), "Forecast assimilation: A unified framework for the combination of multi-model weather and climate predictions," *Tellus*, 57(3), pp. 253-264.
- Theis, S. E., Hense, A., and Damrath, U. (2005), "Probabilistic precipitation forecasts from a deterministic model a pragmatic approach," *Meteorol. Appl.*, 12(3), pp. 257-268.
- Tracton, M. S., and Kalnay, E. (1993), "Ensemble forecasting at NMC: Practical aspects," *Wea. Forecasting*, 8(3), pp. 379-398.
- Wang, X., and Bishop, C. H. (2005), "Improvement of ensemble reliability with a new dressing kernel," *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131(607), pp. 965-986.
- Wilks, D. S., and Hamill, T. M. (2006), "Comparison of ensemble-MOS methods using GFS reforecasts," *Mon. Wea. Rev.*, 135(6), pp. 2379-2390.
- Wilks, D. S., (2006), *Statistical Method in the Atmospheric Sciences*, Academic Press, 91, 467p.
- report of eight prospectus development team, *US weather research program, Bull. Am. Met. Soc.*, 79(1), pp. 285-299.
- Glahn, H. R., and Lowry, D. A. (1972), "The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting," *J. Appl. Meteor.*, 11(8), pp. 1203-1211.
- Gneiting, T., Raftery, A. E., Westveld III, A. H., and Goldman, T. (2005), "Calibrated probabilistic forecasting using ensemble model output statistics and minimum CRPS estimation," *Mon. Wea. Rev.*, 133, pp. 1098-1118.
- Hamill, T. M. (1997), "Reliability diagram for multicategory probabilistic forecast," *Weather and Forecasting*, 12(4), pp. 736-741.
- Hamill, T. M., and Colucci, S. J. (1996), "Verification of ETA-RSM short-range ensemble forecast," *Mon. Wea. Rev.*, 125(6), pp. 1312-1327.
- Hamill, T. M., and Colucci, S. J. (1998), "Evaluation of Eta-RSM ensemble probabilistic precipitation forecast," *Mon. Wea. Rev.*, 126(3), pp. 711-724.
- Hamill, T. M., Colucci, S. J., Whitakar, J. S., and Wei, X. (2004), "Ensemble forecasting improvement medium-range forecast skill using retrospective forecasts," *Mon. Wea. Rev.*, 132(6), pp. 1434-1447.
- Hamill, T. M., Colucci, S. J., and Whitakar, J. S. (2006), "Probabilistic quantitative precipitation forecasts based on reforecast analogs: Theory and application," *Mon. Wea. Rev.*, 134(11), pp. 3209-3229.
- Krishnamurti, T. N., Kiashtawal, T. E., Bachiochi, D. R., Zhan, Z., Williford, C. E., Gadgil, S., and Surendran, S. (1999), "Improved weather and seasonal climate forecasts from a multimodel superensemble," *science*, 285(5433), pp. 1548-1550.
- Lorenz, E. N. (1963), "Deterministic non-periodic flow," *J. Atoms. Sci.*, 20(2), pp. 130-141.