تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال هفتم، شماره ۳، پائیز ۱۳۹۰
Volume 7, No. 3, Fall 2011 (IR-WRR)
۵۳-۶۱

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 نگار رتبه‌ای حاصل از سامانه همادی در دوره آموزش، به دو دسته با انحراف معیار (۰/۴۵ ≥ s >۰) و (s>۰/۴۵) تقسیم شده است. در نهایت پیش‌بینی بارندگی روزانه برای آستانه‌های (p≤۰/۱، ۰/۱ < p≤۱۰ و p>۱۰) میلی‌متر برای هر روز در دوره ارزیابی با استفاده از بافت‌نگار حاصل از دوره آموزش و انحراف‌معیار 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 نگار رتبه‌ای سبب بهبود پیش‌بینی‌های احتمالی بارش روزانه (به ویژه در آستانه بارش‌های سنگین) می‌شود.

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

تاریخ دریافت مقاله: ۴ آبان ۱۳۸۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۴ مرداد ۱۳۹۰

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

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

M. Azadi [1], N. Kafashzadeh [2] and Z. Zakeri [3]*

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≤0.1, 0.1≤ 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

1- Assistant professor of meteorology research institute (MRI), Tehran, Iran, Email: azadi68@ hotmail.com
2- MS.c. student in meteorology, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.
3- Expert, Information and Dispatching, Meteorology Organization, Tehran, Iran.
*- Corresponding Author

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 این‌رو 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 پیش بینی کیفیت، سازگاری و ارزش است (Murphy, 1993). مروری بر مطالعات پیش‌بینی احتمالی بارش نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌های احتمالی نسبت به پیش‌بینی‌های‌قطعی متناظر خود از سازگاری، کیفیت و ارزش‌اقتصادی بیشتری، برخوردارند و از آنها برتراند.

یکی از روش‌های مناسب برای تولید پیش‌بینی احتمالی یک کمیت، استفاده از پیش‌بینی سامانه همادی[1] 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 (معمولا بین ۵ تا۱۰۰). آنها در شرایط‌اولیه و یا نحوه بیان عددی معادلات حاکم بر جو (دو منبع‌اصلی 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[2] 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[3] (MOS) است (Glahn and Lowry,1972؛ Krishnamurti et al., 1999). اخیرا روش‌های متعددی برای واسنجی پیش‌بینی‌های احتمالی ابداع شده است؛ مانند: روش بافت‌نگار رتبه‌ای[4] (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)، برازش گوسی غیرهمگن (Gal et neiting., 2005)، برازش‌لاجستیک (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 سامانه‌همادی واسنجی نموده‌اند. این کار تا حدود زیادی از خطای پیش‌بینی‌همادی کاسته است. آن‌ها نشان داده‌اند که پیش‌بینی‌های احتمالی واسنجیده نسبت به پیش‌بینی‌های احتمالی ناواسنجیده مهارت بیشتری دارند. Eckel et al. (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[5] MM5 و مدل عددی میان‌مقیاس[6] WRF، با تغییر در پیکربندی‌های مدل‌ها اعضای سامانه همادی مورد نظر تهیه شده است. پیکربندی‌های مختلف مدل‌منطقه ای 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 مدل‌منطقه ای MM5 با تغییر در فراسنج‌های همرفت به‌دست 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

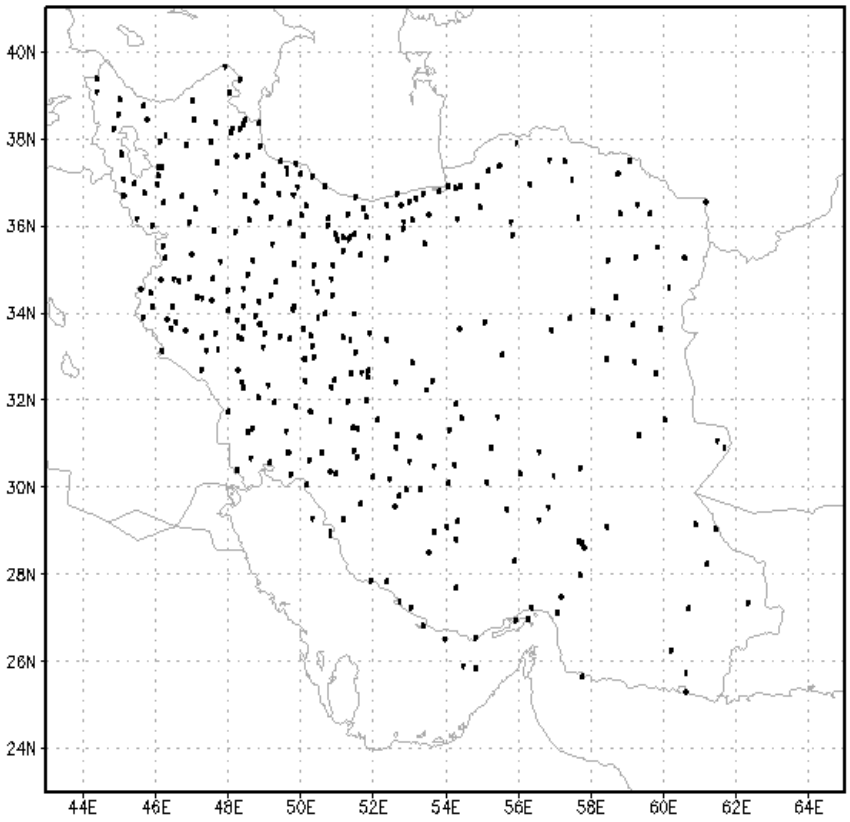
منطقه مورد مطالعه در این پژوهش کشور ایران است و محدوده ۴۱-۲۳ درجه شمالی و ۶۵-۴۲ درجه شرقی را می‌پوشاند. در این پژوهش داده‌های دیدبانی بارش روزانه ایستگاه‌های همدید در سطح کشور در یک بازه زمانی شش‌ماهه (اول نوامبر ۲۰۰۸ تا سی آوریل ۲۰۰۹) استفاده شده است. چون پژوهش حاضر مربوط به پیش‌بینی کمیت بارش است، لذا فصول پربارش سال برای تحلیل بهتر نتایج مورد بررسی قرارگرفته است. شکل ۱ پراکندگی 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 (حدود۱۶۰-۱۵۰روز) 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 (اول‌نوامبر ۲۰۰۸ تا سی آوریل ۲۰۰۹) اجرا شده است. بدین منظور پنج پیکربندی مختلف برای مدل WRF (جدول۱) و سه پیکربندی مختلف برای مدل MM5 (جدول۲) در نظرگرفته 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 درجه‌شرقی را می‌پوشاند. دامنه کوچک دارای تفکیک افقی ۱۵کیلومتر و محدوده ۴۱-۲۳ درجه شمالی و ۶۵-۴۲ درجه‌شرقی (کشور ایران) را می‌پوشاند. طرحواره‌های انتخاب شده برای فیزیک مدل‌ها در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است.

اجرای مدل‌ها به‌صورت 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 ۱۵کیلومتر مورد استفاده قرارگرفته است.



شکل ۱- پراکندگی ایستگاه‌های دیدبانی همدید روی کشور ایران

جدول۱- 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

جدول۲- 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

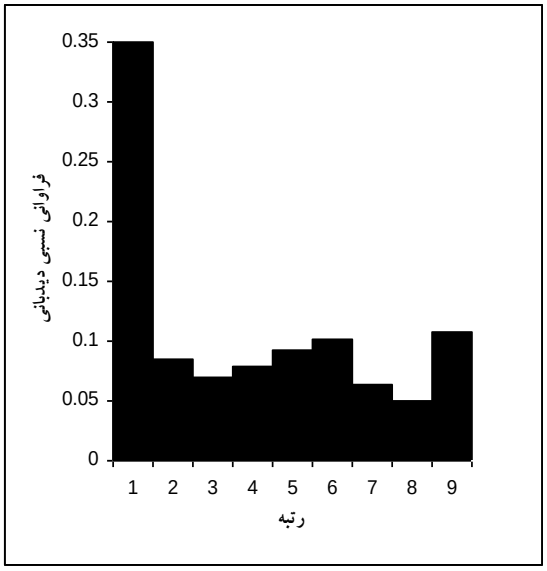
ابتدا داده‌های سامانه همادی و دیدبانی به دو دوره تقریبا سه ماهه تقسیم شده‌اند. دوره اول (اول‌نوامبر ۲۰۰۸ تا سی‌ژانویه ۲۰۰۹) برای آموزش و دوره دوم (اول فوریه ۲۰۰۹ تا سی آوریل۲۰۰۹) برای ارزیابی است. سپس بافت‌نگار رتبه‌ای در دوره آموزش با استفاده از داده‌ها تشکیل شده است. از آنجا که سامانه شامل هشت عضو 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 می‌توان اولین عدد پیشای تولید شده را به عنوان دیدبانی و بقیه اعداد را به‌عنوان اعضای سامانه فرض کرد. مرتبه این دیدبانی در این سامانه به عنوان رتبه دیدبانی در نظر گرفته می‌شود. شکل بافت‌نگار های رتبه‌ای در بیشتر موارد یکنواخت نیست. علت می‌تواند ناشی از خطای نظام‌مند اعضای سامانه و در نتیجه واسنجی نبودن سامانه، ناکافی بودن تغییر بین اعضای‌سامانه و یا دیدبانی‌های غیرصحیح باشد. دراین 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

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.

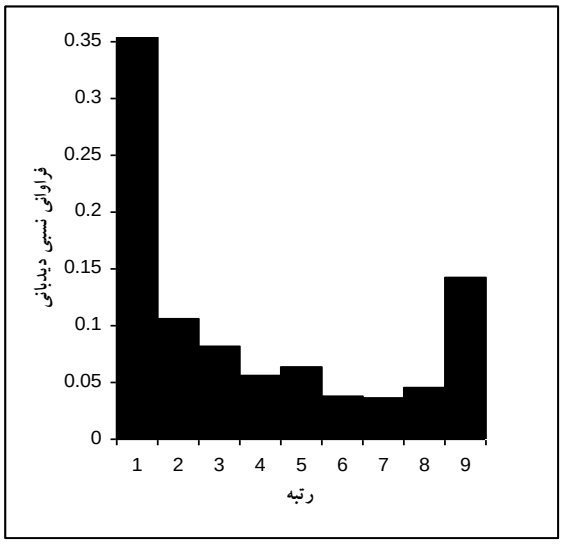
با استفاده از داده‌های دوره ارزیابی و بافت‌نگارهای رتبه‌ای حاصله در دوره آموزش، پیش‌بینی‌های احتمالی ناواسنجیده و واسنجیده به روش همیل محاسبه و با هم مقایسه شده است. در هر دو روش نیاز است که در ابتدا مشخص شود از کدام بافت‌نگار (شکل۲ یا شکل۳) استفاده شود. لذا برای هر روز در دوره ارزیابی باید انحراف‌معیار محاسبه و براساس انحراف‌معیار به‌دست آمده، از بافت‌نگار مناسب آن روز استفاده شود، یعنی برای (۰/۴۵≥ s >۰) بافت‌نگار شکل ۲ و برای (s>۰/۴۵) بافت‌نگار شکل ۳ استفاده می‌شود.

روش موسوم به انتخابات‌آزاد[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).

$$\Pr(v \le q) \approx \frac{Rank(q)-1}{n} \qquad (۱)$$



شکل۲- بافت‌نگار رتبه‌ای پیش‌بینی برای انحراف‌معیار بین ۰ و ۰/۴۵



شکل۳- بافت‌نگار رتبه‌ای پیش‌بینی برای انحراف‌معیار 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 درنظر گرفته می‌شود. در صورتی که سهم اعضای سامانه در پیش‌بینی واسنجی‌شده به روش بافت‌نگار رتبه‌ای متفاوت است که در ادامه به‌صورت خلاصه تشریح می‌شود. فرض کنید X بردار پیش‌بینی‌همادی 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) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

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

$$\Pr(V < X_i) = \sum_{j=1}^{i} R_j \qquad (۲)$$

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

$$\Pr(X_{i-1} \le V < X_i) = R_i \qquad (۳)$$

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

$$\Pr(0 \le V < T) = \left(\frac{T}{X1}\right) R_1 \qquad (۴)$$
$$0 < T < X_1$$

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

$$\Pr(X_i \le V < T) = \left(\frac{T - X_i}{X_{i+1} + X_i}\right) R_{i+1} \qquad (۵)$$

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

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

$$\Pr(T1 < V < T_2) = R_{n+1}\frac{F(T_2)-F(T_1)}{1.0-F(X_N)} \quad (۶)$$

$T_2 > T_1 \geq X_N$

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

$$F(x) = exp\left\{-exp\left[\frac{-(x-\alpha)}{\beta}\right]\right\} \quad (۷)$$

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

۳-۲- سنجه‌های راست‌آزمایی مورد استفاده

نتایج پیش‌بینی سامانه قبل و بعد از واسنجی با استفاده از برخی سنجه‌های راست‌آزمایی[۸] شامل امتیاز بریر[۹]، نمودار اطمینان پذیری[۱۰] و امتیاز مرتب شده احتمالی[۱۱](RPS) ارزیابی شد. امتیاز بریر در واقع میانگین مربع خطای پیش بینی احتمالی است و به صورت زیر تعریف می‌شود (Brier et al., 1951).

$$BS = \frac{1}{n}\sum_{k=i}^{n}(F_k - O_k)^z \quad (۸)$$

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 فراوانی‌نسبی دیدبانی شده o_k (محور طول‌ها) برحسب احتمال های پیش بینی 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 فراپیش‌بینی در این احتمال ها هستند. برعکس آن بخش هایی از منحنی که بر فراز نیمساز قرار دارند نشان دهنده فرو پیش‌بینی در آن احتمال‌ها هستند. همچنین یکنواختی منحنی نشان‌دهنده تفکیک‌پذیری پایین است.

امتیاز مرتب‌شده احتمالی نیز مشابه امتیاز بریر است با این تفاوت که امتیاز مرتب شده احتمالی برای آستانه‌های مختلف توزیع احتمالی تجمعی محاسبه می‌شود. این امتیاز به‌صورت زیر تعریف می‌شود (Epstein, 1969; Murphy, 1971).

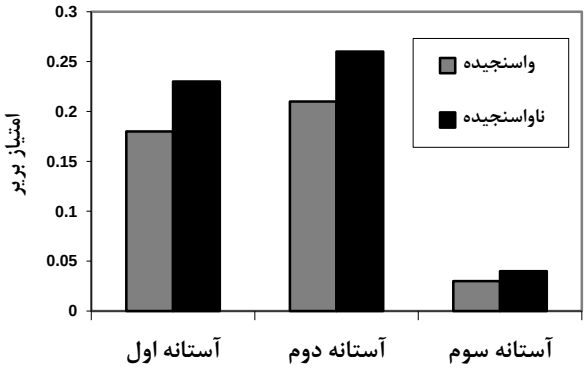
$$RPS = \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}(p_k - o_k)^2 = \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}B_k \quad (۹)$$

k تعداد آستانه‌ها، p_k احتمال‌تجمعی 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

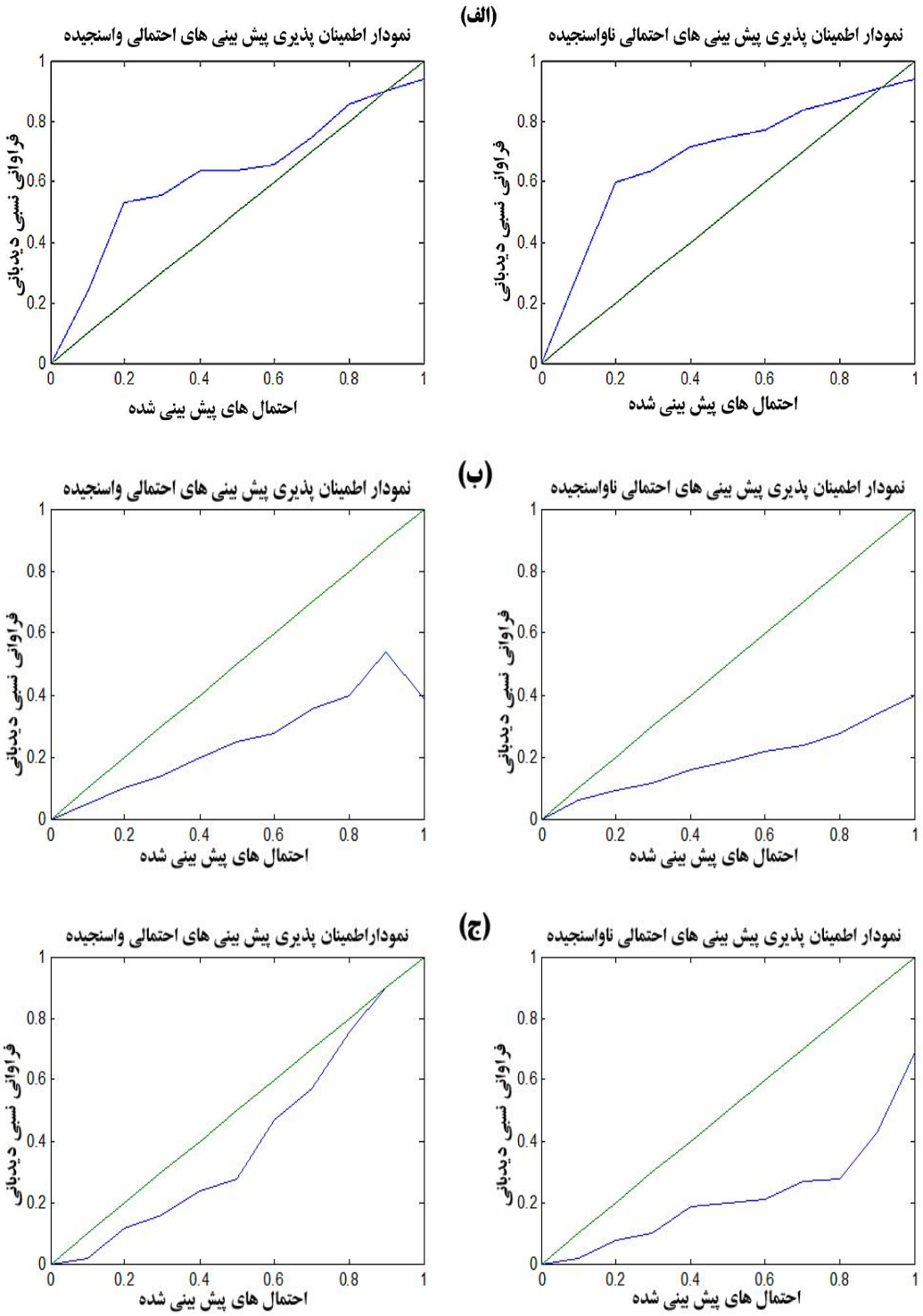
شکل ۴ نمودار امتیاز بریر را برای پیش‌بینی‌های احتمالی بارش واسنجیده و ناواسنجیده نشان می‌دهد. مقدار این امتیاز همانگونه که از شکل پیداست برای پیش‌بینی واسنجیده در تمامی آستانه‌ها کمتر از پیش‌بینی ناواسنجیده است. یعنی فرآیند واسنجی سبب بهبود در نتایج پیش‌بینی‌های‌احتمالی شده است. همچنین با توجه به مقادیر بسیارکم این امتیاز در آستانه‌سوم می‌توان نتیجه گرفت که کاربست روش واسنجی در برخی از آستانه‌ها مانند آستانه‌سوم بسیار موفقیت آمیز بوده است. زیرا مقدار امتیاز بریر برای پیش‌بینی واسنجیده در این آستانه نسبت به پیش‌بینی واسنجی 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.



شکل۴- نمودار امتیاز بریر

۳-۲- ارزیابی براساس 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 واسنجیده نسبت به پیش‌بینی ناواسنجیده، در تمام آستانه‌های



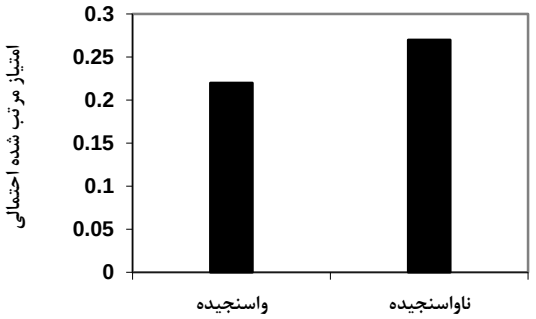
شکل ۵- آستانه‌های (الف) کمتر از ۰/۱ (ب) بین ۰/۱ و ۱۰ (ج) بیشتر از ۱۰ میلی‌متر

پیش‌بینی به خط‌چین نزدیک‌تر است. پس می‌توان گفت که کاربست روش واسنجی بافت نگار رتبه‌ای برای صدور پیش‌بینی‌احتمالی (بارش تجمعی ۲۴ ساعته) با دقت بالاتر، موفق بوده است. با توجه به اینکه منحنی اطمینان‌پذیری پس از واسنجی پیش‌بینی‌ها در آستانه سوم نسبت به دو آستانه دیگر، بسیار به خط‌چین نزدیک شده است؛ می‌توان نتیجه گرفت که پیش‌بینی‌های احتمالی واسنجیده بارش در آستانه بارش‌های سنگین، از اطمینان‌پذیری بسیار بالایی برخوردار هستند. همچنین باتوجه به شکل ۵ بر اساس منحنی‌های

اطمینان‌پذیری می‌توان گفت که سامانه در آستانه اول (بدون بارش) برای پیش‌بینی وقوع بارش، فرا پیش‌بینی دارد. در حالی‌که در آستانه بارش‌های متوسط و سنگین فرو پیش‌بینی دارد.

۳-۳- ارزیابی بر اساس امتیاز مرتب‌شده‌احتمالی

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



شکل۶- نمودار امتیاز مرتب شده احتمالی

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

پیش‌بینی بارش با توجه به اثرات مطلوب و نامطلوب آن بر زندگی انسان، از اهمیت زیادی برخوردار است. امروزه پیش‌بینی اغلب کمیت‌های هواشناسی برای بسیاری کاربردها، از جمله مقدار بارندگی از طریق مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا برآورد می‌شوند، اما این مدل‌ها خطا دارند. در این پژوهش روش بافت‌نگار رتبه‌ای برای کاستن خطاهای نظام‌مند (واسنجی نمودن) برونداد مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا ارائه و نتایج پیش‌بینی‌های سامانه قبل و بعد از واسنجی ارزیابی شده است. به‌طورکلی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که واسنجی به روش بافت‌نگار رتبه‌ای توانسته است خطای نظام‌مند موجود در برونداد خام مدل‌ها را کاهش دهد. این روشی ساده برای به‌دست آوردن پیش‌بینی‌احتمالی بارش دقیق‌تر در ایران به‌شمار می‌آید.

۵- سپاسگزاری

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

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)، "کالیبره‌کردن برونداد یک سامانه همادی به روش میانگین‌گیری بیزی"، *پروژه پژوهشکده هواشناسی و علوم جو*، ۷۳ص.

واشانی، س. (۱۳۸۹)، "پس‌پردازش برونداد یک سامانه همادی با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی و راست‌آزمایی این سامانه روی منطقه شمال‌ایران"، پایان‌نامه 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 Zrnic, D. (1998), "Quantitative Precipitation forecasting,"

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., Gmeiting, 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.