تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال هفتم، شماره ۳، پائیز ۱۳۹۰
Volume 7, No. 3, Fall 2011 (IR-WRR)
۷۱-۸۱

انجمن علوم و مهندسی منابع آب

پس پردازش برونداد مدل WRF برای بارندگی روزانه در ایران

مجید آزادی[۱*]، محمدرضا شیرغلامی[۲]، سهراب حجام[۳] و فاطمه صحراییان[۴]

چکیده

با اینکه امروزه مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا پیشرفت قابل توجهی کرده‌اند اما هنوز پیش‌بینی دقیق بارش نقطه‌ای، بسیار مشکل و چالش‌برانگیز است. همواره تلاش بر این بوده است که پیش‌بینی بارش به صورت دقیق‌تری با بهبود شرایط اولیه و پیکربندی مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا به دست آید. به این منظور تصحیح برونداد مدل یکی از راه‌هایی است که می‌توان انجام داد. در این پژوهش مدل میان‌مقیاس WRF با دو دامنه با گام‌های شبکه‌ای ۴۵ و ۱۵ کیلومتر برای یک دوره ۶ ماهه از اول نوامبر ۲۰۰۸ تا ۳۰ آوریل ۲۰۰۹ اجرا شده است. سپس برونداد مدل برای بارندگی‌های ۲۴ ساعته با دو روش بهترین برآوردگر ساده و روش میانگین متحرک برای ۲۰۵ ایستگاه هواشناسی همدید کشور تصحیح و پس‌پردازش شده است. داده‌های سه ماه اول برای آموزش و بقیه داده‌ها برای آزمون و مقایسه استفاده شده است. نمایه‌های آماری مانند درجه موازنه جرم، میانگین مطلق خطا و امتیاز مهارتی متناظر با آن برای پیش‌بینی‌های خام و بهبود یافته برای نشان دادن بهبود نتایج، محاسبه و مقایسه شده است. نتایج نشان داد که هر دو روش پس‌پردازش، برونداد مستقیم مدل را بهبود می‌بخشند؛ به گونه‌ای که میانگین مطلق خطا برای ایستگاه‌های مختلف در روش میانگین متحرک، بین ۵ تا ۵۰ درصد (با میانگین در حدود ۲۵٪) و در روش بهترین برآوردگر ساده به طور میانگین در حدود ۱۳٪ بهبود یافته است.

کلمات کلیدی: پس‌پردازش، راستی‌آزمایی، میانگین متحرک، بهترین برآوردگر ساده، مدل میان‌مقیاس WRF .

تاریخ دریافت مقاله: ۲۱ مهر ۱۳۸۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۵ آبان ۱۳۹۰

WRF Model Output Postprocessing for Daily Precipitation over Iran

M. Azadi[1*], *M. R. Shirgholami*[2], *S. Hajjam*[3] *and F. Sahraian*[4]

Abstract

Despite the fact that the quality of forecasts from numerical weather prediction (NWP) models has increased in recent years, yet exact forecast of precipitation is a difficult and challenging task. In order to obtain more accurate precipitation forecasts, efforts have been made to improve the models, formulations, and the accuracy of the initial conditions. One important alternative is to improve the model output via postprocessing.

In this paper, the WRF model was applied for a six month period from 1 November 2008 to 30 April 2009 with two nests using 45 and 15 Km grid. The model outputs were then postprocessed for 24-hour precipitation forecasts for 205 synoptic stations over Iran using two methods of the moving average (MA) and the best easy systematic estimator (BES). Data for the first three months were used for training and the rest of data were used for the test and comparison. Statistical scores including degree of mass balance (DMB), mean absolute error (MAE) and its corresponding skill score were calculated for both direct and postprocessed outputs.

Results showed that both methods improve the direct outputs of the model. The MA method decreased MAE for different stations from 5 to 50 percent. The mean of MAE decrease for all stations was about %25. In the BES method the average value of MAE for all stations is around 13 percent.

Keywords: Postprocessing, Verification, Moving average, Best easy systematic estimator, WRF model.

Received: October 13, 2010
Accepted: November 6, 2011

۱- استادیار پژوهشکده هواشناسی، تهران.
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران.
۳- دانشیار دانشگاه آزاد اسلامی ، واحد علوم و تحقیقات، تهران.
۴- مربی پژوهشکده هواشناسی، تهران.
*- نویسنده مسئول

1- Assistant Professor, Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran, Email: azadi68@ hotmail.com
2- M.Sc. Student in Meteorology, Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
3- Associate Professor, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
4- Faculty member, Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran.
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

پیش‌بینی وضع هوا از دیرباز اهمیت بسیار زیادی داشته است. یکی از قدیمی‌ترین و چالش برانگیزترین مسائل در پیش‌بینی وضع هوا پیش‌بینی کمّی بارش است. پیش‌بینی بارش عاملی مهم در کاربردهای هیدرولوژیکی و پیش‌بینی سیلاب‌ها محسوب می‌شود. مدیریت بهینه منابع آب برای بارش‌های سیل‌آسا با استفاده از پیش‌بینی‌های کمّی بارش، وابسته به دقت پیش‌بینی‌هایی است که با مدل‌های هواشناسی انجام می‌شود اما از آنجا که برونداد مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا همواره در پیش‌بینی کمیت هواشناسی سطح زمین و نزدیک آن دارای خطا هستند، برونداد مستقیم مدل را نمی‌توان به صورت خام در اختیار کاربران قرار داد. به همین دلیل باید پس پردازش بر روی آن پیش از ارائه و استفاده، صورت گیرد. روش‌های گوناگون پس پردازش برای کاهش خطاهای نظام‌مند و استفاده کاربردی از برونداد مدل وجود دارد که می‌توان به روش‌های متداول آماره‌ی برونداد مدل (MOS[1]) و روش پیش‌یابی کامل (PPM[2]) اشاره کرد (Glahn and Lowry, 1972 و Klein et al., 1959). برای به دست آوردن نتایج بهینه در دو روش MOS و PPM به داده‌های طولانی مدت چندساله نیاز است اما در عمل این داده‌ها همیشه به راحتی در دسترس نیستند.

روش‌های دیگری در سال‌های اخیر توسعه یافته و مورد استفاده قرار گرفته‌اند که می‌توان برونداد مدل را بدون نیاز به داده‌های طولانی مدت تصحیح کرد. از آن جمله می‌توان به روش‌های پالایه کالمن (KF[3]) (Homleid, 1995) و (آزادی و همکاران، ۱۳۸۵)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN[4]) (Hsieh and Tang, 1998)، میانگین متحرک (MA[5]) (McCollor and Stull, 2008) و بهترین برآوردگر ساده (BES[6]) (Woodcock and Engle, 2005) اشاره کرد. در ادامه به نمونه‌هایی از کاربست این روش‌ها برای پس‌پردازش پیش‌بینی‌های خام بارش اشاره می‌شود.

Stensrud and Yussouf (2005) نشان دادند که پیش‌بینی‌های خام نقطه‌ای مدل را یک نمونه ۷ و۱۲ روزه از محاسبه خطا به روش میانگین متحرک، به خوبی بهبود می‌بخشد به گونه‌ای که پس از اعمال پس- پردازش استفاده از برونداد مدل در چارچوب عملیاتی ممکن می‌شود. Eckel and Mass (2005) روش میانگین متحرک را برای کاهش خطای نظام‌مند برونداد مدل برای پیش‌بینی‌های دما به عنوان یک روش پس‌پردازش با موفقیت به کار بردند. Woodcock and Engle (2005) نشان دادند که یک پنجره تصحیح ۱۵-۳۰ روزه به عنوان دوره آموزش به طور موثری خطای برونداد مدل را با استفاده از روش بهترین برآوردگر ساده (BES) برطرف می‌سازد.

McCollor and Stull (2008)، سه روش پس‌پردازش SNL[7] و MA و BES را برای بهبود پیش‌بینی مقادیر کمّی بارش ۲۴ ساعته با هم مقایسه کردند. هر سه روش پس‌پردازش در کوهستان‌های غربی کانادا برای مقادیر کمی بارش۲۴ ساعته در برونداد مدل بهبود ایجاد کردند، اما دو روش MA و BES کاهش خطای بیشتری را نشان دادند. این مقاله با استفاده از روش‌های پس‌پردازش میانگین متحرک و بهترین برآوردگر ساده به پس‌پردازش کمیت بارندگی پرداخته است. همچنین چندین شاخص راستی‌آزمایی[8] برای مشاهده اثر پس‌پردازش انجام شده در بهبود پیش‌بینی‌ها، برای پیش‌بینی‌های خام و پس‌پردازش شده، محاسبه و بررسی شده است.

۲- پیکربندی مدل مورد استفاده

در این پژوهش مدل میان مقیاس WRF[9] (Skamarock et al., 2008) مورد استفاده قرارگرفته است. مدل WRF یک مدل غیرهیدروستاتیک (با گزینه اختیاری هیدروستاتیک در حین اجرا) است که شبکه‌بندی افقی آن شبکه- C آراکاوا[10] است. در این مدل از طرحواره‌های انتگرال‌گیری مرتبه دوم و سوم زمانی رانگ-کوتا[11] و طرحواره‌های مرتبه دو تا شش برای فرارفت در دو راستای افقی و قائم استفاده می‌شود. این مدل از گام‌های زمانی کوچک برای مدهای اکوستیک و امواج گرانشی استفاده می‌کند. هسته اصلی مدل شامل چندین برنامه مقدماتی اجرایی یعنی ideal.exe و real.exe و نیز یک برنامه انتگرال‌گیری عددی wrf.exe و یک برنامه برای انجام آشیانه‌سازی یک‌سویه ndown.exe است.

پیکر بندی مورد استفاده در اجرای مدل به شرح زیر است:

تعداد نقاط شبکه‌ای: ۹۸ در ۹۰ برای حوضه اول و ۱۲۷در ۱۱۸ برای حوضه دوم؛

تفکیک افقی: ۴۵ و ۱۵ کیلومتر به ترتیب برای حوضه اول و دوم؛

تعداد ترازهای قائم: ۲۷ تراز؛

خردفیزیک [12]: طرحواره لین (Lin et al., 1983)؛

همرفت: طرحواره کین- فریتز (Kain and Fritsch 1990, 1993)؛

فرایندهای لایه مرزی: طرحواره ملور – یامادا – یانیچ (Mellor and Yamada, 1982)؛

تابش موج بلند: طرحواره RRTM (Mlawer et al. , 1997)؛

تابش موج کوتاه: طرحواره گودارد (Chou and Suarez, 1994)؛

مدت زمان اجرا: ۱۰۲ ساعت؛

گام زمانی در دسترس بودن پیش‌بینی‌ها: ۳ ساعته؛

زمان شروع اجرا: ساعت 1200UTC[۱۳] هر روز (۱۵:۳۰ محلی)؛

زمان پایان اجرا: ساعت 1800 UTC چهار روز بعد (۲۱:۳۰ محلی).

شرایط مرزی و اولیه مدل از داده‌های اجرای ساعت ۱۲ UTC سامانه مدل سازی تمام کره‌ای موسوم به GFS از مرکز ملی پیش‌بینی‌های محیطی (NCEP[۱۴]) گرفته شده است. زمان انتگرال‌گیری مدل منطقه‌ای WRF یک دوره شش ماهه از اول نوامبر ۲۰۰۸ تا سی آوریل ۲۰۰۹ بوده است. مدل در دو حوضه اجرا شده است. حوضه بزرگ تر با تفکیک افقی ۴۵ کیلومتر، محدوده ۱۰ تا ۵۱ درجه شمالی و ۲۰ تا ۸۰ درجه شرقی را می‌پوشاند. حوضه کوچک‌تر که داده‌های پیش‌بینی آن در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است، با تفکیک افقی ۱۵ کیلومتر، محدوده ۲۳ تا ۴۱ درجه شمالی و ۴۲ تا ۴۵ درجه شرقی (کشور ایران) را می‌پوشاند.

اجرای مدل به صورت روزانه و برای ساعت ۱۲ UTC بوده و در هر اجرا پیش‌بینی تا ۷۲ ساعت آینده تولید شده است. تفکیک افقی داده‌های ناهمواری و کاربری زمین که در مدل استفاده شده برابر۲ دقیقه (حدود ۴ کیلومتر) است. از طرحواره‌های همرفت کومه‌ای، خرد فیزیک، تابش طول موج کوتاه، تابش طول موج بلند، شرایط سطح زمین، لایه سطحی و لایه مرزی سیاره‌ای برای پیکربندی مدل منطقه‌ای WRF استفاده شده است (آزادی و همکاران، ۱۳۸۸) .

۳- داده‌ها

داده‌های دیدبانی بارندگی روزانه ۲۰۵ ایستگاه همدید (سینوپتیک) هواشناسی درسطح کشور برای پس‌پردازش و ارزیابی پیش‌بینی‌ها در بازه زمانی شش ماهه از اول نوامبر ۲۰۰۸ تا سی آوریل ۲۰۰۹ استفاده شده است. داده‌های دیدبانی با استفاده از روش‌های متداول کنترل کیفی شده است. داده‌های پیش‌بینی برای حوضه کوچک‌تر در دوره شش ماهه یاد شده از برونداد مدلWRF به دست آمده است. داده‌های پیش‌بینی و دیدبانی به دو دوره سه ماهه تقسیم شده است. دوره سه ماهه اول (نوامبر ۲۰۰۸ تا ژانویه ۲۰۰۹) برای آموزش و مابقی روزها برای آزمون روش و ارزیابی در نظرگرفته شده است.

۴- روش کار

۴-۱- سنجه‌های مورد استفاده در ارزیابی پیش‌بینی

نمایه‌های راستی‌آزمایی زیر برای ارزیابی پیش‌بینی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است:

الف) **اریبی حاصلضربی** این شاخص میانگین پیش بینی‌ها را با میانگین دیدبانی‌های متناظر مقایسه می کند.

$$multiplicative\,bias=\frac{\overline{F}}{\overline{O}}=\frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(F_i)}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(O_i)} \qquad (۱)$$

که در آن، F_i مقدار پیش‌بینی شده بارش، O_i مقدار دیدبانی شده متناظر با آن و N تعداد روزهاست. مقدار این کمیت برای پیش‌بینی کامل یک است.

ب) **میانگین خطای مطلق**[۱۵] مقدار این شاخص از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$MAE=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|F_i-O_i\right| \qquad (۲)$$

هر چه مقادیر به دست آمده این کمیت به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده نتایج بهتری می‌باشد.

ج) **امتیاز مهارتی میانگین خطای مطلق** این شاخص اشاره به اطلاعاتی درباره ارزش یک پیش‌بینی نسبت به یک پیش‌بینی مرجع دارد. هرچه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد نشان دهنده نتایج بهتری است.

$$\mathrm{MAE\,skill\,score}=1-\frac{\mathrm{MAE_{PP}}}{\mathrm{MAE_{DMO}}} \qquad (۳)$$

که $\mathrm{MAE_{DMO}}$ و $\mathrm{MAE_{PP}}$ به ترتیب میانگین خطای مطلق قبل و بعد از پس‌پردازش است.

۴-۲- روش میانگین متحرک(MA)[۱۶]

روش میانگین متحرک مبتنی بر میانگین وزنی و فرمول‌های بازگشتی زوج داده‌های دیدبانی- پیش‌بینی است. این روش خطای برونداد مدل را بدون نیاز به مدیریت داده‌های طولانی مدت، کاهش می‌دهد. مک‌کالر و استال (۲۰۰۸) یک روش جدید و ابداعی را برای

روش میانگین متحرک پیشنهاد کردند. این روش، سنجه‌ای به نام درجه موازنه جرمDMB[17]، برای اصلاح پیش‌بینی‌های مستقیم مقادیر کمّی بارش بین برونداد مستقیم مدل و مقدار دیدبانی پیشنهاد می‌کند. درجه موازنه جرم بیانگر نسبت آب خالص پیش‌بینی شده به مقدار دیدبانی شده در بازه زمانی موردنظر است که مطابق رابطه (۴) است.

$$\mathrm{DMB}_N = \frac{\sum_{k=1}^{N} x_k^f}{\sum_{k=1}^{N} y_k^o} \quad (۴)$$

DMB_N، درجه موازنه جرم برای بازه N روز، x_k^f پیش بینی بارندگی برای روزk ام و y_k^o دیدبانی متناظر برای روز k ام است.

درجه موازنه جرم برای یک زوج داده دیدبانی- پیش‌بینی منفرد مناسب نیست. زیرا در روزهایی که بارندگی دیدبانی نشده باشد، مخرج رابطه (۴) صفر می‌شود. درجه موازنه جرم باید یک دوره زمانی معین را که در آن دوره بارندگی دیدبانی شده است پوشش دهد. در این پژوهش یک دوره ۳۰ روزه برای اطمینان از وقوع بارش و نیز اطمینان از محاسبه و ارزیابی کمیت درجه موازنه جرم در نظر گرفته شده است.

پیش‌بینی‌های کمّی تصحیح شده بارش با استفاده از رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$\mathrm{QPF}_C = \frac{\mathrm{DMO}}{\mathrm{DMB}_N} \quad (۵)$$

QPF_C پیش‌بینی‌های تصحیح شده، DMO برونداد مستقیم مدلWRF برای بارش و DMB_N درجه موازنه جرم برای روز Nام است.

۴-۳- بهترین برآوردگر ساده

اساس کار در روش برآوردگر ساده (Woodcock and Engle, 2005) استفاده از چارک‌ها است. این روش هنگام مواجه با مقادیر حدی، بسیار توانمند و کارا است و بخش بزرگی از توزیع خطای میانگین را پوشش می‌دهد. مقادیر چارک‌ها مطابق رابطه (۶) می‌باشد.

$$\mathrm{BES} = \frac{\mathrm{Q}_1 + 2\,\mathrm{Q}_2 + \mathrm{Q}_3}{4} \quad (۶)$$

Q_1، Q_2 و Q_3 به ترتیب چارک‌های اول، دوم و سوم است.

۵- نتایج و تحلیل نتایج

۵-۱- تعیین دوره آموزش

شکل ۱ مقادیر میانگین درجه موازنه جرم پیش‌بینی بارش‌های ۲۴ساعته را با تغییر طول پنجره میانگین‌گیری از ۳۰ تا ۹۰ روز برای ۲۰۵ ایستگاه همدید (سینوپتیک) کشور و به روش میانگین متحرک نشان می‌دهد. روش میانگین متحرک، مقدارDMB را مطابق شکل در بازه تصحیح ۴۰ تا ۵۰ روزه، در حدود ۱۰٪ بهبود می‌بخشد. نمودار در حدود چهل و پنجمین روز به بعد تقریباً به مقدار ثابتی می‌رسد.

شکل ۲ میانگین خطای مطلق پیش‌بینی بارندگی‌های ۲۴ ساعته را برای ۲۰۵ ایستگاه همدید کشور به عنوان تابعی از طول پنجره میانگین‌گیری و با استفاده از روش میانگین متحرک نشان می‌دهد. هر دو شکل ۱ و ۲ نشان می‌دهند که در بازه حدود ۴۰ تا ۵۰ روز منحنی‌ها تقریباً به مقدار ثابت مجانبی می‌رسند. بنابراین در این مطالعه دوره آموزش ۴۵ روز برای آموزش پالایه انتخاب شد. با استفاده از روش BES نیز نتایجی مشابه روش MA به دست می‌آید.

۵-۲- نتایج حاصل از پس‌پردازش به روش میانگین متحرک

نمودار خطای مطلق برای داده‌های خام و داده‌های پس‌پردازش شده مدل برای سه ایستگاه همدید اردبیل و زاهدان و یاسوج به منظور بررسی میزان تاثیر پس‌پردازش بر برونداد مستقیم مدل به عنوان نمونه ارایه شده است. علت انتخاب دو ایستگاه اردبیل و زاهدان این است که پس‌پردازش در این دو ایستگاه به ترتیب دارای بیشترین و کمترین اثر بوده است. میزان تصحیح به دست آمده در ایستگاه یاسوج نیز نشان‌دهنده مقادیر نوعی تصحیح پس از اعمال پس پردازش با روش MA است.

شکل ۳ خطای مطلق پیش‌بینی خام (رنگ روشن) و پس‌پردازش شده مدل (رنگ تیره) را برای سه ایستگاه اردبیل، یاسوج و زاهدان با استفاده از روش میانگین لغزان نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۳ - الف می‌توان دید خطای پیش‌بینی پس‌پردازش شده در بیشتر روزها بویژه در تعداد روزهای پایین تر، کمتر از خطای پیش‌بینی خام است. میانگین خطاهای مطلق قبل و بعد از پس‌پردازش به ترتیب برابر ۱/۴۱ و ۷۸/. است. بنابراین مشاهده می‌شود که استفاده از روش میانگین متحرک برای پس‌پردازش

برونداد مستقیم مدل در ایستگاه هواشناسی اردبیل، خطای پیش‌بینی مدل را در حدود ۴۵٪ بهبود می‌بخشد که قابل ملاحظه است.
میانگین خطای مطلق، برای ایستگاه یاسوج قبل و بعد از پس‌پردازش به ترتیب برابر ۳/۲۸ و ۲/۳۳ است. همان‌گونه که در شکل ۳- ب مشاهده می‌شود در برخی روزها اختلاف بین دیدبانی و برونداد خام (مستقیم) مدل زیاد است. همچنین مدل در تعدادی از روزها با وجود عدم بارش، پیش‌بینی بارش داشته است که این امر باعث بزرگ‌تر شدن مقدار میانگین خطای مطلق شده است. اما با این وجود روش میانگین متحرک توانسته است به نحو مطلوبی خطای پیش‌بینی مدل را کاهش دهد.

تعداد روزهای بدون بارندگی درایستگاه زاهدان زیاد است. چون پیش‌بینی مدل نیز برای بیشتر این روزها عدم وقوع بارندگی دارد، بنابراین میانگین خطای مطلق آن نسبت به دو ایستگاه قبلی کوچک‌تر است. میانگین خطای مطلق قبل و بعد از پس‌پردازش به ترتیب برابر ۰/۴۶ و ۰/۴۳ است. بنابراین، استفاده از روش میانگین متحرک، خطای پیش‌بینی مدل را به میزان بسیار کمی (در حدود ۷ ٪) بهبود بخشیده است.

۵-۳- نتایج حاصل از پس‌پردازش به روش بهترین برآوردگر ساده

شکل ۴ خطای مطلق پیش‌بینی خام (رنگ روشن) و پس‌پردازش شده مدل (رنگ تیره) را برای سه ایستگاه اردبیل، یاسوج و زاهدان با استفاده از روش بهترین برآوردگر ساده بعنوان نمونه نشان می‌دهد. بررسی شکل ۴ نشان می‌دهد که روش BES، خطای پیش‌بینی مدل را در مقایسه با روش MA به میزان کمتری کاهش می‌دهد، به گونه‌ای که کاهش خطای پیش‌بینی مدل با استفاده از روش BES برای ایستگاه‌های اردبیل، یاسوج و زاهدان به ترتیب در حدود ۱۷، ۹ و ۴ درصد (در مقابل ۴۵، ۲۹ و ۷ درصد برای میانگین متحرک) است.

۵-۴- راستی‌آزمایی پیش‌بینی‌ها

شاخص‌های راستی‌آزمایی برای بررسی میزان مهارت هر یک از روش‌های پس‌پردازش در کاهش خطای پیش‌بینی مدل، ارایه شده در بخش (۳-۱) برای داده‌های خام مدل و داده‌های تصحیح شده مدل محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده اند. شکل‌های ۵ و ۶ شاخص‌های اریبی حاصل‌ضربی و میانگین خطای مطلق را برای برونداد خام مدل و برونداد پس پردازش شده با استفاده از دو روش MA و BES برای ۲۰۵ ایستگاه مورد بررسی نشان می‌دهند. همچنین شکل ۷ امتیاز مهارتی میانگین خطای مطلق را برای برونداد پس‌پردازش شده با استفاده از دو روش MA و BES برای همان ۲۰۵ ایستگاه نشان می‌دهد.

شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نشان می‌دهند که هر دو روش پس‌پردازش مورد استفاده توانسته‌اند خطای پیش‌بینی مدل را کاهش دهند. اما روش میانگین متحرک نسبت به روش بهترین برآوردگر ساده مهارت و توانایی بیشتری را در کاهش خطای نظام‌مند مدل در پیش‌بینی بارش دارد.

۶- بحث و بررسی

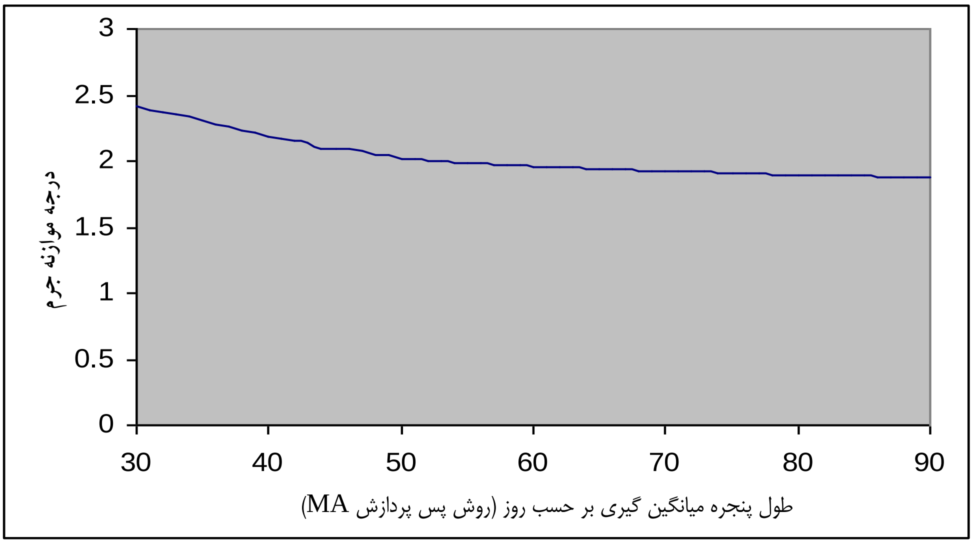
به طور کلی نتایج نشان می‌دهد که روش‌های پس‌پردازش مورد استفاده توانسته است خطای نظام‌مند پیش‌بینی بارش توسط مدل WRF را کاهش دهد. به گونه‌ای که میانگین خطای مطلق برای ایستگاه‌های مختلف در روش میانگین متحرک، بین ۵ تا ۵۰ درصد (به طور میانگین در حدود ۲۵٪) و در روش بهترین برآوردگر ساده به طور میانگین در حدود ۱۳٪ بهبود یافته است.

اختلاف بین مقادیر دیدبانی و پیش‌بینی برای ایستگاه‌هایی که در مناطق کم بارش واقع شده‌اند، کم است. در نتیجه میانگین خطای مطلق در آن‌ها نسبت به ایستگاه‌های پرباران کوچک‌تر است. برای نمونه میانگین خطای مطلق بارش برای ایستگاه‌های زاهدان و سمنان که در مناطق کم بارش واقع شده‌اند، در دوره مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۰/۷۸ و۰/۷۳ است؛ در حالی‌که میانگین خطای مطلق بارش ایستگاه‌های ساری و تبریز که در مناطق پربارش واقع شده‌اند به ترتیب برابر با ۱/۷۶ و ۱/۷۱ است.

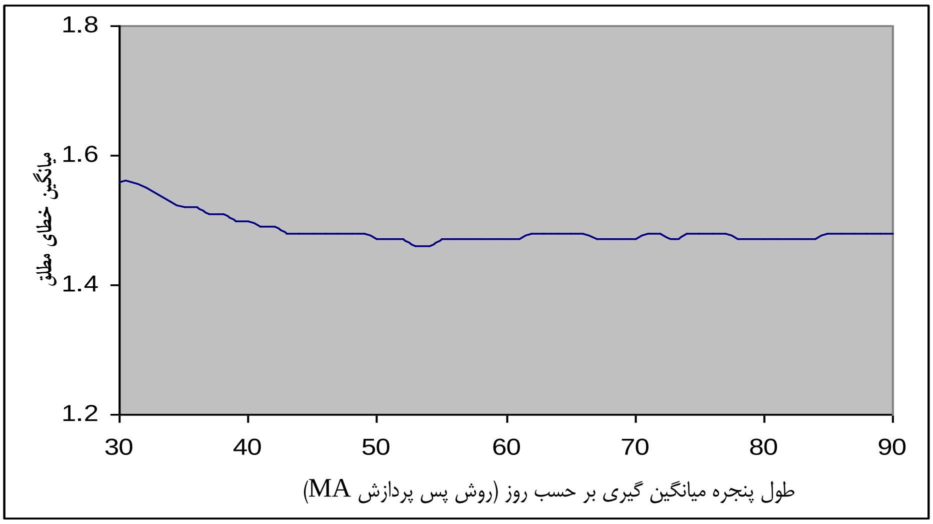
به طور کلی پس‌پردازش تاثیر چندانی برروی برونداد مدل در بیشتر ایستگاه‌هایی که مقدار پیش‌بینی خام مدل به مقدار دیدبانی شده خیلی نزدیک است ندارد. دلیل آن را می‌توان کم بودن خطاهای نظام‌مند دانست. برای نمونه خطای میانگین مطلق ایستگاه کرمان که در منطقه کم‌باران واقع شده است، برای داده‌های خام مدل ۱/۲۷ و خطای میانگین مطلق آن بعد از پس‌پردازش ۱/۲۱ است؛ در حالی که این مقادیر برای ایستگاه اردبیل به ترتیب برابر ۱/۴۱ و۰/۷۸ است. چون روش‌های پس پردازش نمی‌توانند تمامی اثرات محلی را لحاظ کنند و تنها بخشی از اثرات محلی را به حساب می‌آورند، این

تفاوت را می‌توان ناشی از تغییرپذیری خطای نظام‌مند مدل در نقاط مختلف نیز دانست.

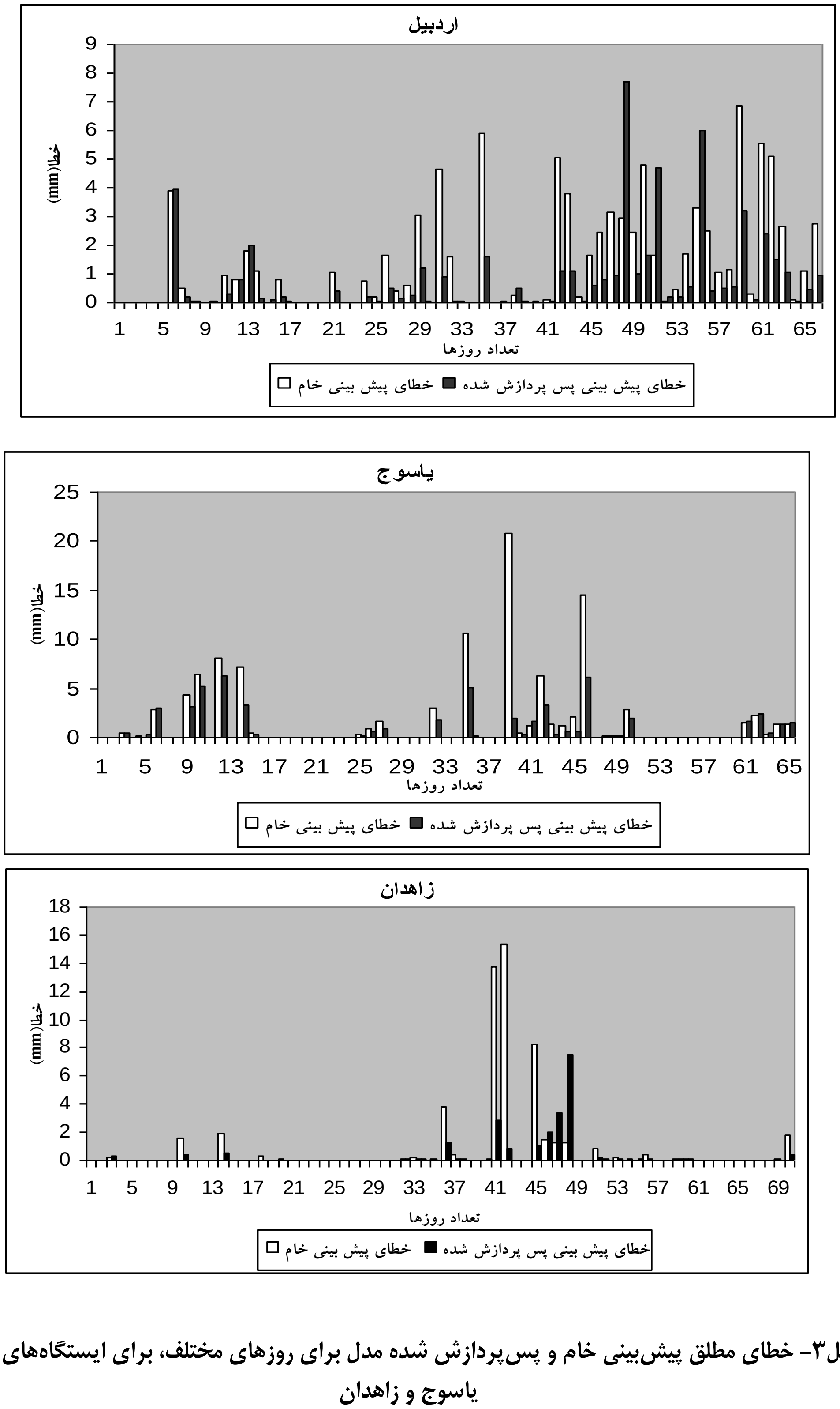
نتایج نشان می‌دهد که اعمال پس‌پردازش در برخی ایستگاه‌ها و برای روزهایی که بارندگی‌های همرفتی و رگباری وجود داشته است تاثیر چندانی نداشته است. برای مثال مقدار بارندگی دیدبانی شده در ایستگاه یاسوج در روز ۲۰۰۹/۴/۱۰ نزدیک به ۹۰mm بوده در حالی که برونداد مستقیم مدل نزدیک به ۳۰mm و برونداد تصحیح شده مدل نزدیک به ۲۳ mm بوده است که اختلاف زیادی با مقدار دیدبانی دارد. با توجه به مقدار زیاد بارندگی دیدبانی شده در این روز برای تعداد محدودی از ایستگاه‌های مجاور، احتمالاً ساز و کار تولید این بارش پدیده‌های کوچک‌مقیاس محلی بوده و بنابراین مدل میان مقیاس WRF به خوبی قادر به پیش‌بینی این بارش‌ها نبوده است. احتمالاً علت این امر تأثیر واداشت بسیار قوی شرایط مرزی از مدل تمام‌کره‌ای روی مدل منطقه‌ای است. به همین دلیل باید قدرت واداشت شرایط مرزی را علاوه بر بهبود در شرایط اولیه مدل منطقه‌ای با زیاد کردن فواصل زمانی به روزآوری شرایط مرزی مدل منطقه‌ای از ۳ ساعت به ۶ یا ۱۲ ساعت، کم کرد تا مدل منطقه‌ای بهتر بتواند بارش ناشی از ساز و کارهای میان‌مقیاس و مقیاس‌های کوچک‌تر را پیش‌بینی کند.



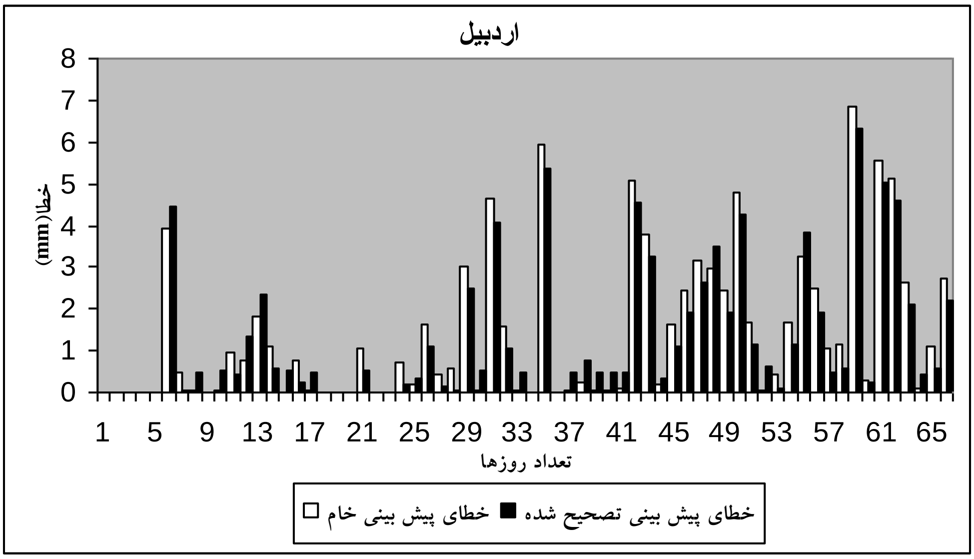
شکل ۱- میانگین درجه موازنه جرم برای بارش‌های ۲۴ ساعته برای ۲۰۵ ایستگاه همدید کشور

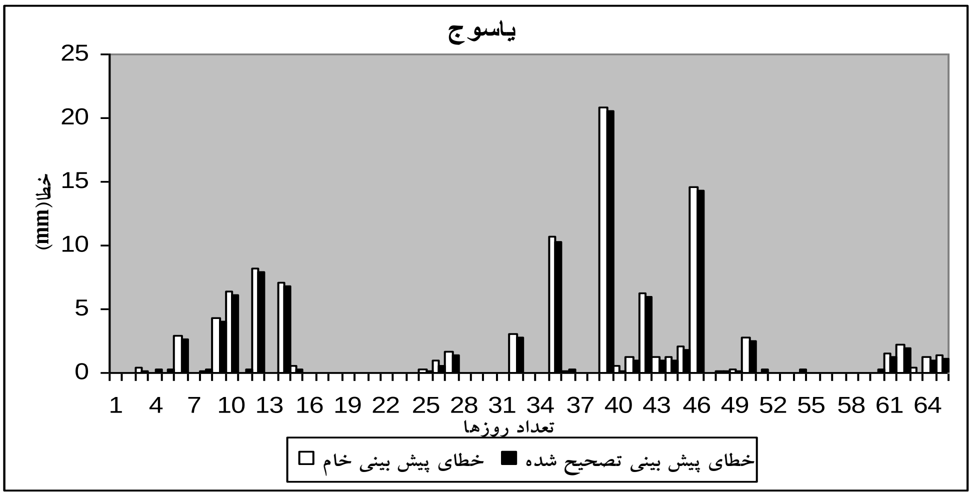


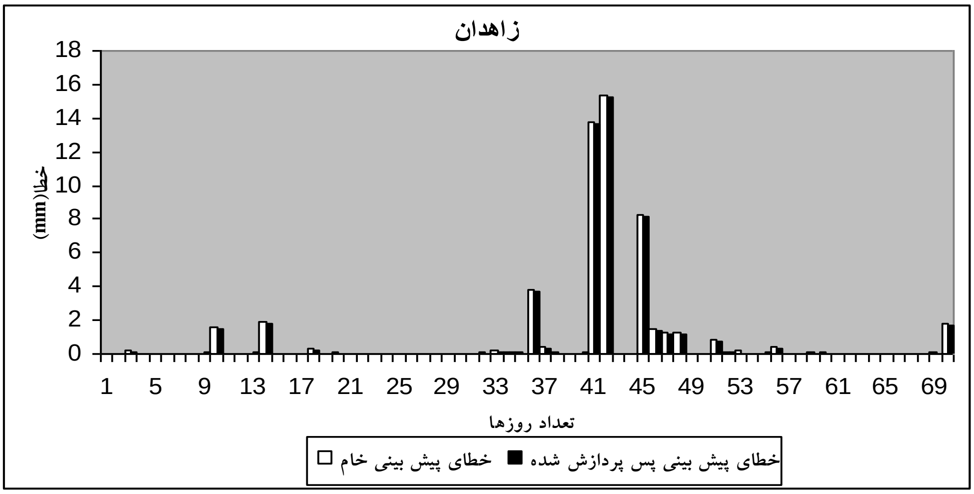
شکل ۲- میانگین خطای مطلق پیش‌بینی بارندگی‌های ۲۴ ساعته(برحسب میلی‌متر) ، به عنوان تابعی از طول پنجره میانگین‌گیری



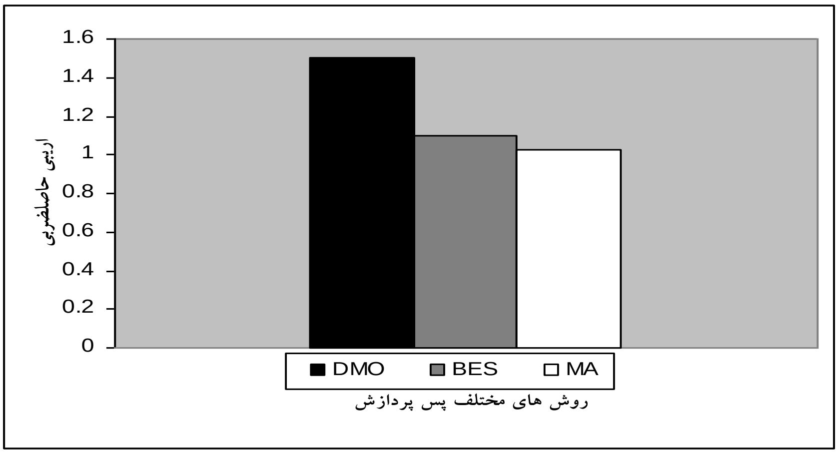
شکل۳- خطای مطلق پیش‌بینی خام و پس‌پردازش شده مدل برای روزهای مختلف، برای ایستگاه‌های همدید اردبیل، یاسوج و زاهدان



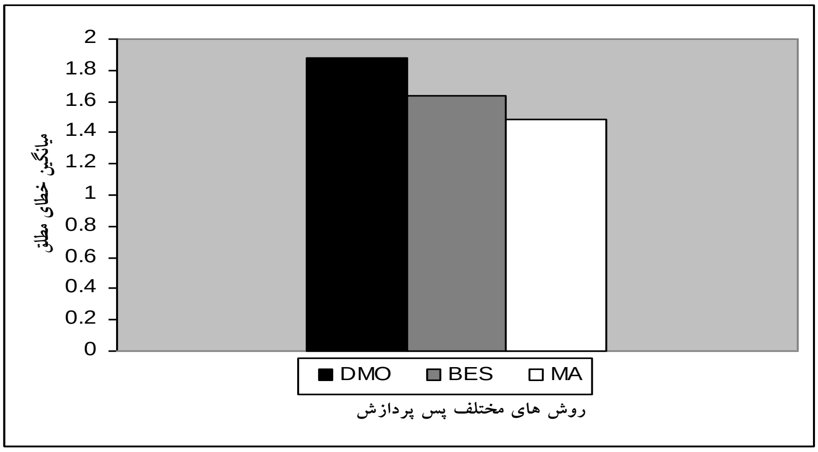




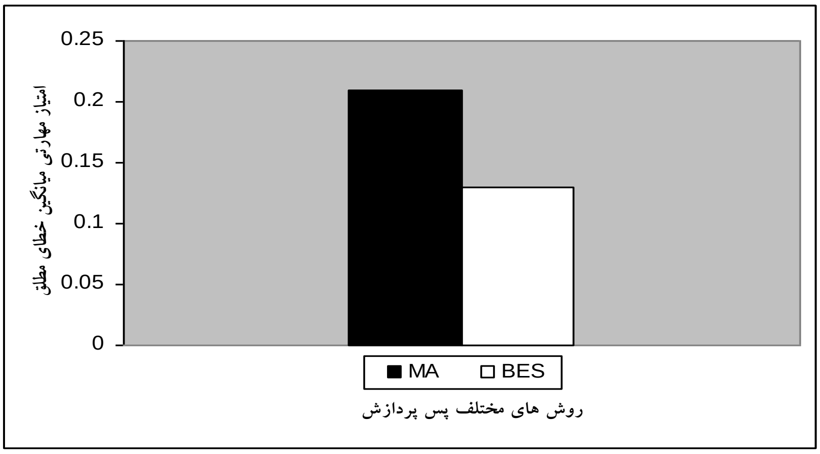
شکل ۴- خطای مطلق پیش‌بینی خام و پس‌پردازش شده مدل برای روزهای مختلف، برای ایستگاه‌های همدید اردبیل، یاسوج و زاهدان با استفاده از روش بهترین برآوردگر ساده



شکل ۵- اریبی حاصلضربی برونداد خام مدل و برونداد پس پردازش شده



شکل ۶- میانگین خطای مطلق برونداد خام مدل و برونداد پس پردازش شده برای ۲۰۵ ایستگاه همدید کشور



شکل ۷- امتیاز مهارتی میانگین خطای مطلق برونداد پس پردازش شده برای ۲۰۵ ایستگاه همدید کشور

محاسبه برخی شاخص‌های راستی‌آزمایی متداول مانند اریبی حاصلضربی، میانگین خطای مطلق و امتیاز مهارتی متناظر با آن نشان می‌دهد که هر دو روش پس‌پردازش میانگین متحرک و بهترین برآوردگر ساده به طور قطع خطای برونداد مدل را بهبود می‌بخشند. همچنین نتایج به دست آمده از این شاخص‌ها نشان می‌دهد که روش پس‌پردازش میانگین متحرک خطای پیش‌بینی مدل را نسبت به روش برآوردگر ساده بیشتر کاهش می‌دهد.

۷- نتیجه گیری

براساس نتایج بدست آمده در این تحقیق روش‌های پس‌پردازش مورد استفاده، خطای نظام‌مند پیش‌بینی بارش توسط مدل WRF را کاهش داده است. به گونه‌ای که میانگین خطای مطلق برای ایستگاه‌های مختلف در روش میانگین متحرک، بین ۵ تا ۵۰ درصد (به طور میانگین در حدود ۲۵٪) و در روش بهترین برآوردگر ساده به طور میانگین در حدود ۱۳٪ بهبود یافته است. بنا بر این روش پس‌پردازش میانگین متحرک خطای پیش‌بینی مدل را نسبت به روش برآوردگر ساده بیشتر کاهش داده است و استفاده عملیاتی از این روش در پیش بینی را ممکن می‌سازد.

پی نوشت‌ها

1- Model Output Statistics (MOS)
2- Perfect Prognosis Method (PPM)
3- Kalman Filtering
4- Artifical Neural Network
5- Moving Average
6- Best Easy Estimator
7- Seasonal Average
8- Verification
9- Weather Research and Forecasting
10- Arakawa C-grid
11- Runge-Kutta
12- Microphysics
13- Universal Time Coordinated
14- National Center for Environmental Prediction
15- Mean Absolute Error
16- Moving Average
17- Degree of Mass Balance

۸- مراجع

آزادی، م.، جعفری، س.، میرزایی، ا. و عربلی، پ. (۱۳۸۵)، "پس پردازش برونداد مدل میان مقیاسMM5 برای دمای بیشینه وکمینه با استفاده از فیلترکالمن"، نشریه فیزیک زمین و فضا، ۱، ۱۳۸۷، صص. ۴۵-۶۱

آزادی، م.، جعفری، س. و کلاته سیفری، ز. (۱۳۸۸)، "ارزیابی عملکرد مدل WRF در ایران برای پیش‌بینی بارش با استفاده از طرحواره‌های فیزیکی مختلف: مطالعه موردی"، دوازدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران.

شیرغلامی، م. (۱۳۸۹)، "پس پردازش برونداد مدل WRF برای بارندگی در ایران"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم وتحقیقات تهران.

Chou, M. D. and Suarez, M. J. (1994), "An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models", NASA Tech. Memo. 104606, 3, 85p.

Eckel, F. A. and Mass, C. F. (2005), "Aspects of effective mesoscale, short-range ensemble forecasting", *Wea. Forecasting,* 20, pp. 328– 350.

Glahn, H. and Lowry, R. (1972), "The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting", *J. Appl. Meteor.,* 11, pp.1203–1211.

Homleid, M. (1995), "Diurnal corrections of short-term surface temperature forecasts using the Kalman filter", *Wea. Forecasting,* 10, pp. 689–707.

Hsieh, W. W. and Tang, B. (1998), "Applying neural network models to prediction and data analysis in meteorology and oceanography. *Bull", Amer. Meteor. Soc.*, 79, pp. 1855– 1870.

Klein, W. H., Lewis, B. M. and Enger, I. (1959), "Objective prediction of five-day mean temperatures during winter", *J. Atmos. Sci.*, 16, pp. 672–682.

Kain, J. S. and Fritsch, J. M. (1990), "A one-dimensional entraining/ detraining plume model and its application in convective parameterization", *J. Atmos. Sci.,* 47, pp. 2784-2802.

Kain, J. S. and Fritsch, J. M. (1993), "Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritcsh scheme. The representation of cumulus convection in numerical models, K. A. Emanuel and D.J. Raymond, Eds., *Amer. Meteor. Soc*., 246 p.

Lin, Y. L., Farley, R. D. and Orville, H. D. (1983), "Bulk parameterization of the snow field in a cloud model", *J. Climate Appl. Meteor*., 22, pp. 1065-1092.

Mccollor, D. and Stull, R. (2008), "Hydrometeoro-logical accuracy enhancement via postprocessing of

Stensrud, D. J. and Yussouf, N. (2005), "Bias-corrected short-range ensemble forecasts of near surface variables", *Meteor. Appl.*, 12, pp. 217–230.

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M., Huang, X.-Y., Wang, W. and Powers, J. G. (2008), "A Description of the Advanced Research WRF Version 3 ", *NCAR Technical Note*.

Woodcock, F. and Engel, C. (2005), "Operational consensus forecasts", *Wea. Forecasting*, 20, pp. 101–111.

numerical weather forecasts in complex terrain", *Wea. Forecasting*. 23, pp. 131-144.

Mellor, G. L. and Yamada, T. (1982), "Developement of a turbulence closure model for geophysical fluid problems", *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, pp. 851-875.

Mlawer, E. J., Taubman, S. J. Brown, P. D., Iacono, M. J. and Clough, S. A. (1997), "Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere", RRTM, a validated correlated-k model for the long-wave. *J. Geophys. Res.*, 102(D14), pp. 16663-16682.