



Verification of WRF Precipitation Forecast
Over Iran Country During
Nov. 2008-Jun. 2009

M. Azadi^{1*}, E. Taghizadeh²
and M. H. Memarian³

Abstract

This study presents verification of the Weather Research and Forecasting (WRF) model for the 24-h accumulated precipitation forecasts in Iran for the period of November 2008 to June 2009 for 24, 48, and 72.houre-ranges. Verification is done separately for three precipitation ranges and nine different regions in the country via 2×2 contingency table and quantities attributed to it. Though precipitation is the most difficult parameter to forecast, results show the good skill of WRF Forecasts. However regarding the bias, the model has over-forecasting. In northern parts of Iran with the highest rainfall rate, the value of TS is more than 0.50 and shows the highest accuracy of precipitation forecasts in different regions. In the regions with the lowest rainfall rates (east and southeast of Iran) TS is less than 0.40 and the model results show the least accuracy. Economic value of the forecasts reaches 60% for the cost to loss ratios of less than 0.40. This recommends the operational use of this model.

Keywords: WRF model, Verification, Contingency table, Precipitation forecast.

Received: December 6, 2010

Accepted: August 1, 2012

راست آزمایی پیش‌بینی بارش مدل تحقیقات آب و
هوایی و پیش‌بینی وضع هوا (WRF) روی کشور ایران
در دوره هشت ماهه نوامبر ۲۰۰۸ تا ژوئن ۲۰۰۹

مجید آزادی^{۱*}، احسان تقی‌زاده^۲
و محمدحسین معماریان^۳

چکیده

در این مطالعه کارایی مدل تحقیقاتی و پیش‌بینی وضع هوا (WRF) برای پیش‌بینی‌های بارندگی تجمعی ۲۴ ساعته در کشور ایران تعیین شده است. پیش‌بینی‌های روزانه برای دوره اول نوامبر ۲۰۰۸ تا ۳۰ ژوئن ۲۰۰۹ برای بردهای ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته راست آزمایی شده‌اند. فرایند راست آزمایی به طور جداگانه برای سه گستره بارش و نیز ۹ منطقه مختلف کشور با استفاده از جدول توافقی ۲×۲ و کمیت‌های راست آزمایی وابسته به این جدول انجام شده است. با این‌که بارش مشکل‌ترین پارامتر برای پیش‌بینی است نتایج راست آزمایی مهارت قابل قبولی را از پیش‌بینی‌های مدل WRF نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر بزرگ‌تر از یک کمیت اریبی نتایج نشان می‌دهد که به طور کلی مدل فرایند پیش‌بینی دارد. در شمال کشور که پربارش‌ترین مناطق هستند مقدار کمیت TS بیش از ۰/۵۰ است که بالاترین دقت مدل را برای پیش‌بینی بارش در بین مناطق مختلف نشان می‌دهد و در مناطق کم بارش شرق و جنوب شرق کشور کمیت TS با مقادیر کمتر از ۰/۴۰ کمترین دقت مدل را در بین مناطق مختلف کشور نشان می‌دهد. همچنین ارزش اقتصادی پیش‌بینی‌های این مدل برای نسبت‌های هزینه به ضرر کمتر از ۰/۴۰ به بیش از ۰/۶۰ نیز رسیده است که استفاده عملیاتی پیش‌بینی‌های این مدل را توصیه پذیر می‌سازد.

کلمات کلیدی: مدل WRF، راست آزمایی، جدول توافقی، پیش‌بینی بارش.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۵ آذر ۱۳۸۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۱ مرداد ۱۳۹۱

1- Assistant Professor, Dynamic and Synoptic Meteorology Research Department, Atmospheric science and Meteorology Research Center, Tehran, Iran, Email: azadi68@hotmail.com

2- M.Sc. student of Meteorology, Physics Department, university of Yazd, Iran, Email: ehasntaghizadeh@yahoo.com

3- Assistant Professor, Physics Department, university of Yazd, Iran, Email: mhmemarian@yahoo.com

*- Corresponding Author

۱- استادیار، گروه پژوهشی هواشناسی دینامیکی و همدیدی، پژوهشکده هواشناسی و علوم جو تهران، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی، گروه فیزیک، دانشگاه یزد، ایران.

۳- استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه یزد، ایران.

*- نویسنده مسئول

میان مقیاس نسل پنجم ($MM5^A$; Grell et al. 1995) دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا-مرکز ملی برای تحقیقات جوی (PSU-NCAR) را در فصل سرد برای شمال غربی اقیانوس آرام ارزیابی کردند و دریافتند که بارش در شیب‌های رو به باد مانع‌های مهم فرایزش بینی و در شیب‌های پشت به باد فرویش بینی می‌شود. Chien et al. (2002) پیش‌بینی بارش $MM5$ را در منطقه تایوان برای دو ماه از سال ۱۹۹۸ راست آزمایی کردند و دریافتند که مدل بارش شبانه را خیلی بهتر از بارش در هنگام روز شبیه سازی می‌کند و همچنین برای ارتفاعات بالاتر از ۱۲۰۰ متر فرایزش بینی دارد. Ferro (2007) یک مدل احتمالی را برای راست آزمایی پیش‌بینی‌های بارش دو مدل UM^Y و $ALADIN^A$ به کار برد. این مدل به کاهش عدم قطعیت در کمیت‌های راست آزمایی و شناخت دو پارامتر کلیدی برای توصیف کیفیت سامانه‌های پیش‌بینی برای رویدادهای حدی کمک کرد. Roberts and Lean (2008) بررسی کردند که آیا افزایش تفکیک مدل به تنهایی می‌تواند پیش‌بینی‌های بارش با مهارت بیشتری را تولید کند و نیز این که چطور مهارت با مقیاس فضایی تغییر می‌کند. در روش راست آزمایی آن‌ها مهارت از مقایسه پیش‌بینی‌های بارش با رادار تعیین می‌شود. این روش برای تعیین کارایی نسخه‌های ۱۲-، ۴- و ۱-km از مدل UM استفاده شد. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل ۱-km بیشترین مهارت را داشت و مدل ۴-km بهبود ناچیز و یا عدم بهبود را نسبت به مدل ۱۲-km نشان می‌داد.

در ایران نیز هدایتی و آزادی (۱۳۸۶) خروجی‌های بارش مدل $MM5$ را در مناطق مختلف ایران در یک فصل زمستان (دسامبر ۲۰۰۴ - مارس ۲۰۰۵) راست آزمایی کردند. مطالعه آن‌ها نشان داد که مهارت مدل در پیش‌بینی بارش برای آستانه‌های بارش بسیار کم ($mm \leq 1$) و زیاد ($mm > 10$) بیشتر است به طوری که برای آستانه‌های کم بارش در مناطق جنوبی و برای آستانه‌های زیاد بارش در مناطق شمالی و مرتفع کشور خروجی مدل از دقت بالاتری برخوردار است.

مدل تحقیقاتی و پیش‌بینی وضع هوا (WRF) (Skamarock et al. 2008) به عنوان نسل بعد سامانه مدل سازی میان مقیاس هم برای پیش‌بینی عملیاتی و هم برای تحقیقات جوی توسعه داده شده است. مدل غیرایستایی WRF (اطلاعات اینترنتی در دسترس در <http://www.wrf-model.org/index.php>) به طور تقریبی بیشترین کاربر را در میان مدل‌های میان مقیاس جاری دارد و جانشین $MM5$ در جامعه کاربران شده است. این مدل توسط بسیاری

پیش‌بینی وضع هوا، هوایی را که در یک دوره زمانی کوتاه از شش ساعت تا دو هفته آینده رخ خواهد داد پیش‌بینی می‌کند (Malmberg, 2008). پیش‌بین‌ها به منظور افزایش کیفیت پیش‌بینی، آن‌ها را از نظر دقت و این که کدام روش پیش‌بینی بهتر است و چرا، به صورت مداوم پایش می‌کنند (IVMW 2007). پیش‌بینی دقیق بارش یکی از چالش‌انگیزترین فعالیت‌ها در هواشناسی است. بعد از شروع پیش‌بینی عددی وضع هوا در نیمه دهه ۱۹۵۰، سرعت بهبود دقت پیش‌بینی برای دما، فشار و باد خوب بوده است (Landis 1994; Kalnay et al. 1990). اما فرایند بهبود در مهارت پیش‌بینی بارش کم سرعت بوده (Olson et al. 1995)، که ناشی از این حقیقت است که فرایندهای فیزیکی مربوط به تولید بارش بسیار پیچیده‌تر از فرایندهایی هستند که مربوط به تحول دما، فشار و باد می‌شوند. برهمکنش پیچیده و مشکل از نظر فهم ویژگی‌های سطح زمین مانند ناهمواری، مرزهای خشکی-آب، پوشش گیاهی و رطوبت خاک تنها بخشی از عوامل افزایش پیچیدگی پیش‌بینی بارش است.

به هر حال با وجود دشواری، پیش‌بینی دقیق بارش برای جامعه بسیار مهم است. چون بارش می‌تواند در فعالیت‌های روزانه مردم، اموال و حتی زندگی آن‌ها بسیار موثر عمل کند، پیش‌بینی کمیت بارش (QPF)^۲ توسط کمیته مشاوره علوم برنامه تحقیقاتی وضع هوا ایالات متحده (USWRP)^۳ به عنوان یکی از مهم‌ترین اولویت‌ها برای تحقیقات وضع هوا انتخاب شده است (Fritsch et al. 1998). در گزارش USWRP توضیح داده شده است که QPF به دلیل توسعه فن آوری جدید دیدبانی، کاربرد فیزیک‌های پیچیده‌تر مدل و افزایش قدرت محاسباتی یک حوزه تحقیقاتی مفید برای آینده قابل پیش‌بینی خواهد بود.

در سال‌های اخیر پژوهشگران زیادی دقت مدل‌های عددی را در QPF ارزیابی کرده‌اند. زیرا راست آزمایی پیش‌بینی علاوه بر اهمیت علمی از جنبه مدیریتی و نیز از منظر کاربران با اهمیت و ضروری است (Jollieff and Stephenson 2003). برای مثال Mesinger (1996) نشان داد که افزایش تفکیک افقی شبکه در مدل Eta مراکز ملی برای پیش‌بینی محیطی (NCEP)^۴ منجر به افزایش در دقت QPF می‌شود. Kato et al. (1998) پیش‌بینی‌های بارش تولید شده توسط مدل میان مقیاس غیر ایستایی ۱۰ کیلومتری موسسه تحقیقات هواشناسی در ژاپن را راست‌آزمایی کردند. Colle et al. (1999) پیش‌بینی‌های بارش تولید شده توسط مدل

مراکز پیش‌بینی در دنیا استفاده می‌شود در حالی که کاربردهای تحقیقاتی آن از شبیه‌سازی‌های پیچک بزرگ تا وضع هوای بد در تفکیک همرفت - مجاز، تا چرخندزایی حاره‌ای، تا مدل‌سازی اقلیمی منطقه‌ای گسترده می‌شود (برای مثال Moeng et al. 2007; Done et al. 2006; Davis et al. 2006).

به هر حال قبل از به کار بردن این مدل در چارچوب عملیاتی لازم است که از صحت نتایج آن اطمینان حاصل شود. در این پژوهش تلاش شده است تا با کمیت‌های راست آزمایی رایج دقت و مهارت پیش‌بینی‌های این مدل در کشور ایران ارزیابی شود. به این منظور در این مطالعه پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته این مدل برای کمیت بارش در بازه زمانی اول نوامبر ۲۰۰۸ تا آخر ژوئن ۲۰۰۹ (۱۰ آبان ۱۳۸۷ تا ۹ تیر ۱۳۸۸) با دیدبانی متناظر ایستگاه‌های همدیدی کشور مقایسه شده‌اند. انتخاب این بازه زمانی به این علت بوده است که بیشتر بارندگی‌های کشور به خصوص در منطقه جنوب غرب در همین زمان از سال رخ می‌دهد.

در بخش ۲ این مقاله داده‌ها، روش راست آزمایی و کمیت‌های مورد استفاده توضیح داده شده است. در بخش ۳ آماره‌های محاسبه شده روی ایران بدون منطقه‌بندی و با منطقه‌بندی، و همچنین در آستانه‌های متفاوت ارائه شده و بحث روی این آمارها انجام شده است. بخش آخر نیز جمع‌بندی نتایج را بیان می‌کند.

۲- داده‌ها و روش کار

بدیهی است که چون فرایند راست آزمایی براساس مقایسه داده‌های پیش‌بینی و دیدبانی انجام می‌شود برای این کار به هر دو دسته از داده‌ها برای بارش نیاز است. در ادامه نحوه جمع‌آوری و مقایسه این داده‌ها توضیح داده شده است.

۲-۱- داده‌های دیدبانی

داده‌های کمیت‌های دیدبانی و کنترل کیفی شده در ایستگاه‌های همدیدی در سطح ایران برای دوره مورد نظر (نوامبر ۲۰۰۸-ژوئن ۲۰۰۹) (۲۴۲ روز) از سازمان هواشناسی کل کشور تهیه شد. شکل ۱ پراکندگی ایستگاه‌های در دسترس را نشان می‌دهد. در بیشتر ایستگاه‌ها دیدبانی‌های بارندگی به صورت تجمعی شش ساعته در ساعت‌های ۰۰، ۰۶، ۱۲، و ۱۸ UTC بودند. در مواردی نیز دیدبانی‌های بارندگی به صورت تجمعی ۱۸ ساعته در ساعت ۰۶ و ۶ ساعته در ساعت ۱۲ UTC گزارش شده بودند. اما آنچه که در این

پژوهش مورد استفاده قرار می‌گرفت بارندگی تجمعی ۲۴ ساعته بود، که با توجه به این که اجرای مدل‌های برای ساعت UTC ۱۲ بوده است، این بارندگی تجمعی نیز باید از ساعت UTC ۱۲ یک روز تا UTC ۱۲ روز بعد رخ داده باشد. لذا برحسب داده‌های در دسترس برنامه‌های لازم با زبان برنامه‌نویسی فرترن ۹۰ نوشته شد تا داده‌های ۲۴ ساعته مورد نیاز آماده شوند. پیش‌بینی‌های بارش تجمعی ۲۴ ساعته برای سه برد پیش‌بینی ۲۴، ۴۸، و ۷۲ ساعته در ۲۷۰ ایستگاه همدیدی در سطح کشور مقایسه شده است. در واقع تعداد ایستگاه‌های همدیدی حدود ۳۱۴ ایستگاه بود که از این میان ایستگاه‌های با تعداد داده کم‌تر از ۲۰۰ روز حذف شدند.

۲-۲- داده‌های پیش‌بینی

مدل WRF یک مدل میان مقیاس با دینامیک غیرایستایی و مختصه سیگما در راستای قائم است. این سامانه مدل‌سازی شامل برنامه‌های اصلی زیر است:

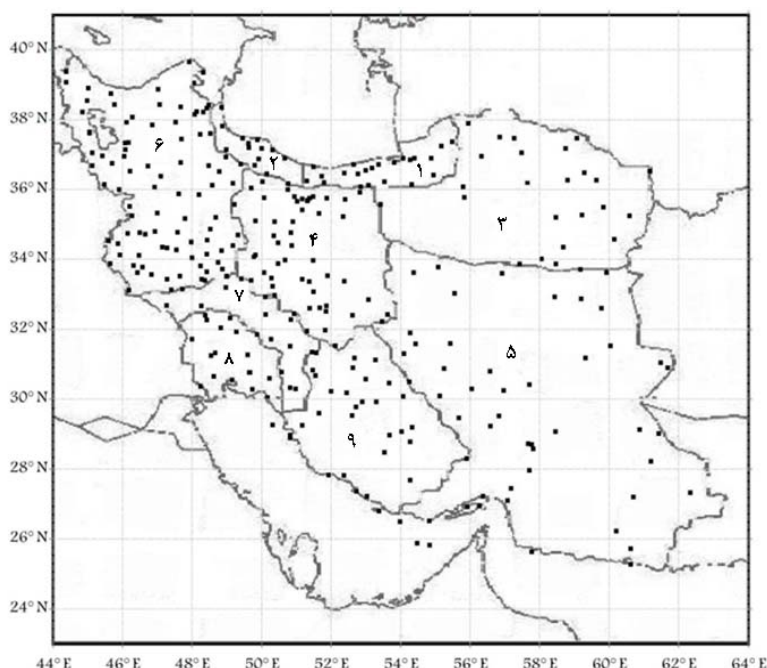
سامانه پیش پردازش WRF (WPS): که برای تعریف کردن شبکه (های) شبیه‌سازی، درون‌یابی میدان‌های ثابت شامل ناهموازی و کاربری اراضی به شبکه مدل و نیز استخراج میدانهای پیش‌بینی یک مدل تمام کره‌ای به منظور فراهم کردن شرایط اولیه و مرزی مدل استفاده می‌شود.

WRF-Var^{۱۰}: که اختیاری است، اما می‌تواند برای داخل کردن مشاهدات به تحلیل‌های درون‌یابی شده ایجاد شده توسط WPS و نیز به روز کردن شرایط اولیه WRF زمانی که مدل WRF در حالت چرخه‌ای اجرا می‌شود استفاده شود.

حل کننده ARW^{۱۱}: که مولفه کلیدی سامانه مدل‌سازی است و از چندین برنامه مقداردهی اولیه برای شبیه‌سازی‌های ایده‌آل شده، و داده‌واقعی، و برنامه انتگرال‌گیری عددی ترکیب شده است. این برنامه همچنین شامل یک برنامه برای آشیانه سازی یک طرفه است.

ابزارهای گرافیکی: خروجی‌های WPS و مدل WRF که به شکل NetCDF (یکی از فرمت‌های IWR^{۱۲}/O^{۱۳}) هستند، توسط اغلب ابزارهای گرافیکی نمایش داده می‌شوند. این برنامه‌ها شامل: ۱۴ RIP4، زبان دستوری گرافیکی ۱۵ NCAR (NCL) و ۱۶ GrADS می‌شوند.

در این مطالعه برای اجرای مدل دو دامنه با مشخصات زیر در نظر گرفته شده است:



شکل ۱- پراکندگی ایستگاه‌های دیدبانی همدیدی و تقسیم‌بندی کشور به ۹ منطقه. (هدایتی و آزادی، ۱۳۸۶)

با استفاده از رویکرد جدول توافقی به دست آمده‌اند (جدول ۱). برای توضیح کامل‌تر این کمیت‌ها می‌توان به مراجع مرتبط مانند Jolliffe and Stephenson (2003) و Wilks (2006) رجوع نمود. جدول ۱ ساختار نوعی جدول توافقی ۲×۲ را نشان می‌دهد که برای راست آزمایی بارش استفاده شده است. برای یک آستانه مفروض (برای مثال 1 mm day^{-1}) تعداد پیش‌بینی‌های صحیح بارش یا برخوردها، b تعداد هشدارهای نادرست، c تعداد از دست رفته‌ها، و d تعداد دفعاتی است که بارش رخ نداده و پیش‌بینی هم نشده است.

نسبت صحیح (PC) که توسط Finley (1884) ارائه شده است به‌سادگی برابر است با کسری از n مورد پیش‌بینی که برای آن پیش‌بینی غیر احتمالی به درستی وقوع یا عدم وقوع را پیش‌بینی کرده است و با رابطه زیر داده می‌شود

$$PC = \frac{a + d}{n} \quad (1)$$

کمیت نرده‌ای دیگری که به‌ویژه برای مواقعی که فراوانی پدیده مورد نظر کوچک باشد (پدیده نادر)، بسیار مناسب است، امتیاز تهدید (TS) است. امتیاز تهدید با استفاده از جدول ۱ به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$TS = \frac{a}{a + b + c} \quad (2)$$

دامنه بزرگ دارای تفکیک افقی ۴۵ کیلومتر است و محدوده ۵۱-۱۰ درجه شمالی و ۸۰-۲۰ درجه شرقی را می‌پوشاند.

دامنه کوچک‌تر که در این مطالعه استفاده شده است دارای تفکیک افقی ۱۵ کیلومتر است و محدوده ۴۱-۲۳ درجه شمالی و ۶۵-۴۲ 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 برابر ۲ دقیقه (حدود ۴ کیلومتر) است.

پیکربندی WRF اجرا شده در این مطالعه عبارت است از: طرح‌واره میکروفیزیک Lin et al. (1983)، طرح‌واره تابش موج بلند RRTM¹⁷، طرح‌واره تابش موج کوتاه Goddard، طرح‌واره لایه سطحی Monin-Obukhov (JanjicEta)، طرح‌واره سطح زمین Noah LSM¹⁸، طرح‌واره لایه مرزی Mellor-Yamada-Janjic، طرح‌واره همرفتی Kain-Fritsch (new Eta).

۳-۲- کمیت‌های راست آزمایی

برخی از امتیازهای راست آزمایی استفاده شده در این مطالعه، که در ادامه شرح مختصری از آنها بیان شده است،

دوره زمانی قبل) یا پیش‌بینی‌های تصادفی (نسبت به فراوانی نسبی اقلیمی پیش‌بینی پدیده‌ها) هستند. یکی از پرکاربردترین امتیازهای مهارتی، امتیاز مهارتی پیرس (PSS) است که با رابطه زیر تعیین می‌شود

$$PSS = \frac{(ad - bc)}{(a + c)(b + d)} \quad (7)$$

کمیت دیگر، میانگین خطای مطلق برابر است با

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |y_k - o_k| \quad (8)$$

که (y_k, o_k) عبارت است از k^{th} جفت از n جفت پیش‌بینی و دیدبانی. MAE میانگین حسابی قدر مطلق اختلاف بین اعضای جفت است.

نمودار ROC (مشخصه عملکرد نسبی) نمایشی تصویری از راست آزمایی پیش‌بینی است. با افزایش آستانه بارش پیش‌بینی‌های عدم رخداد پدیده بیشتر و پیش‌بینی‌های وقوع پدیده کمتر می‌شوند و در نتیجه به‌طور متناظر هر دو مقدار F و H کاهش می‌یابد. سپس جفت‌های متناظر (F, H) تصویر شده و با پاره خط‌هایی به یکدیگر وصل می‌شوند؛ و به جفت $(0, 0)$ متناظر با عدم پیش‌بینی رویداد^۱، و جفت $(1, 1)$ متناظر با پیش‌بینی همیشگی^۲ رویداد وصل می‌شود (Wilks, 2006). واضح است که هر چه سطح زیر نمودار بیشتر باشد نشان دهنده مهارت بیشتر مدل است.

هنگام مقایسه مدل‌ها بهتر است یک بزرگی از عدم قطعیت در اختلاف‌های امتیاز تعیین شود. فاصله‌های اطمینان فاصله‌های ایجاد شده‌ای هستند با پهنای کافی تا با یک احتمال مشخص کمیت جامعه (اغلب یک پارامتر توزیع) متناظر با آماره نمونه را دربرگیرند. یک کاربرد نوعی از فاصله‌های اطمینان ایجاد میله‌های خطا در اطراف آماره‌های نمونه رسم شده در یک نمایش گرافیکی است.

یک کمیت دیگر برای ارزیابی کیفیت پیش‌بینی، ارزش اقتصادی پیش‌بینی است که در مدل‌های تحلیلی تصمیم‌گیری مورد بحث قرار می‌گیرد (Murphy, 1977, Katz and Murphy, 1997). یک تصمیم‌گیرنده (کاربر پیش‌بینی) برای اتخاذ تصمیم تعدادی انتخاب در پیش رو دارد و انتخاب او تا حدی تحت تاثیر پیش‌بینی است. هر اقدامی هزینه‌ای به همراه دارد که بسته به این که رویداد رخ دهد یا خیر منجر به سود یا ضرر اقتصادی می‌شود. وظیفه تصمیم‌گیرنده انتخاب اقدامی مناسب است تا ضرر مورد انتظار در بلند مدت کمینه

بهترین مقدار کمیت امتیاز تهدید برای پیش‌بینی‌های کامل و برابر با یک و بدترین مقدار آن برابر با صفر است.

جدول ۱- ساختار جدول توافقی ۲×۲ که برای راست آزمایی

بارش استفاده شده است. (McBride and Ebert, 2000)

دیدبانی		
بدون بارش	بارش	پیش‌بینی
b	a	بارش
d	c	بدون بارش

اریبی، یا مقایسه میانگین پیش‌بینی با میانگین دیدبانی، معمولاً به‌عنوان نسبتی برای راست آزمایی جدول توافقی بیان می‌شود. با استفاده از جدول ۲×۲ (جدول ۱) نسبت اریبی برابر است با

$$B = \frac{a + b}{a + c} \quad (3)$$

برای پیش‌بینی‌های غیراریب $B = 1$ است. اریبی بزرگ‌تر از یک دلالت بر این دارد که رویداد بیشتر از دیدبانی، پیش‌بینی شده است و فرآیند پیش‌بینی گفته می‌شود. بالعکس، اریبی کمتر از یک دلالت بر این دارد که پیش‌بینی پدیده کمتر از دیدبانی یا فروپیش‌بینی است.

نسبت هشدارهای نادرست (FAR) کسر پیش‌بینی‌های مثبت است که نتیجه اشتباه داده‌اند، یا نسبت پیش‌بینی رویدادها که نتوانستند صورت خارجی پیدا کنند و با رابطه زیر داده می‌شود

$$FAR = \frac{b}{a + b} \quad (4)$$

تنها با در نظر گرفتن وقوع رویداد، آهنگ برخورد (H) نسبت پیش‌بینی‌های درست است به تعداد دفعاتی که این پدیده رخ داده است. آهنگ برخورد به‌صورت زیر محاسبه می‌شود

$$H = \frac{a}{a + c} \quad (5)$$

کمیت دیگری که مورد استفاده قرار گرفته است آهنگ هشدارهای نادرست (F) است که برابر است با نسبت هشدارهای نادرست به تعداد کل عدم رخداد پدیده

$$F = \frac{b}{b + d} \quad (6)$$

مهارت پیش‌بینی معمولاً به‌عنوان امتیاز مهارتی معرفی می‌شود که به‌صورت درصد بهبود نسبت به پیش‌بینی مرجع تفسیر می‌شود. انتخاب‌های رایج برای پیش‌بینی‌های مرجع مقادیر متوسط اقلیمی پیش‌بینی شونده، پیش‌بینی‌های پایدار (مقادیر پیش‌بینی شونده در

منطقه مجزا تقسیم بندی شده است (شکل ۱) (هدایتی و آزادی (۱۳۸۶).

۳-۱- راست آزمایی پیش‌بینی وقوع بارش روی کشور

در این بخش آستانه 1 mm (24h)^{-1} به عنوان آستانه وقوع بارش در نظر گرفته شده است. در جدول ۲ مقادیر کمیت‌های جدول توافقی و همچنین کمیت‌های راست آزمایی محاسبه شده برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته مدل WRF آورده شده است. با توجه به مقادیر این جدول برای پیش‌بینی‌های ۲۴ ساعته کمیت PC که نسبت پیش‌بینی‌های صحیح را به تعداد کل موارد نشان می‌دهد حدود ۸۰٪ است. کمیت TS نیز که مانند PC معیاری برای دقت پیش‌بینی‌هاست نشان می‌دهد که در بیش از ۴۰٪ مواردی که پدیده پیش‌بینی و/یا مشاهده شده است به درستی وقوع بارش پیش‌بینی شده است که مقدار خوبی است. مقدار کمیاریبی (B) بیانگر آن است که تعداد پیش‌بینی‌های وقوع بارش ۸۵٪ بیشتر از مواردی است که بارش اتفاق افتاده است. با توجه به مقدار کمیت FAR بیش از ۵۰٪ از پیش‌بینی‌های وقوع بارش رخ نداده است. مقدار آهنگ برخورد نشان می‌دهد که نزدیک به ۹۰٪ مواردی که بارش رخ داده است مدل موفق به پیش‌بینی آن‌ها شده است. کمیت F بیانگر آن است که بیش از ۲۰٪ از مواردی که بارش رخ نداده است مدل به اشتباه پیش‌بینی وقوع داده است. امتیاز مهارتی پیرس هم بهبود بیش از ۶۰ درصدی را نسبت به پیش‌بینی‌های مرجع نشان می‌دهد. در پیش‌بینی‌های ۴۸ و ۷۲ ساعته کمیت‌های با گرایش مثبت و منفی به ترتیب مقادیر کمتر و بیشتری نسبت به پیش‌بینی‌های ۲۴ ساعته به دست آورده‌اند که پایین آمدن کیفیت پیش‌بینی‌ها را با افزایش سن پیش‌بینی نشان می‌دهد.

شود (یا سود مورد انتظار 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 وارد می‌شود، در صورتی که واقعه اتفاق بیافتد 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، L و C 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 کاهشی 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 که پیش از این بیان شدند ارزش نسبی پیش‌بینی می‌تواند به صورت زیر نوشته شود

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

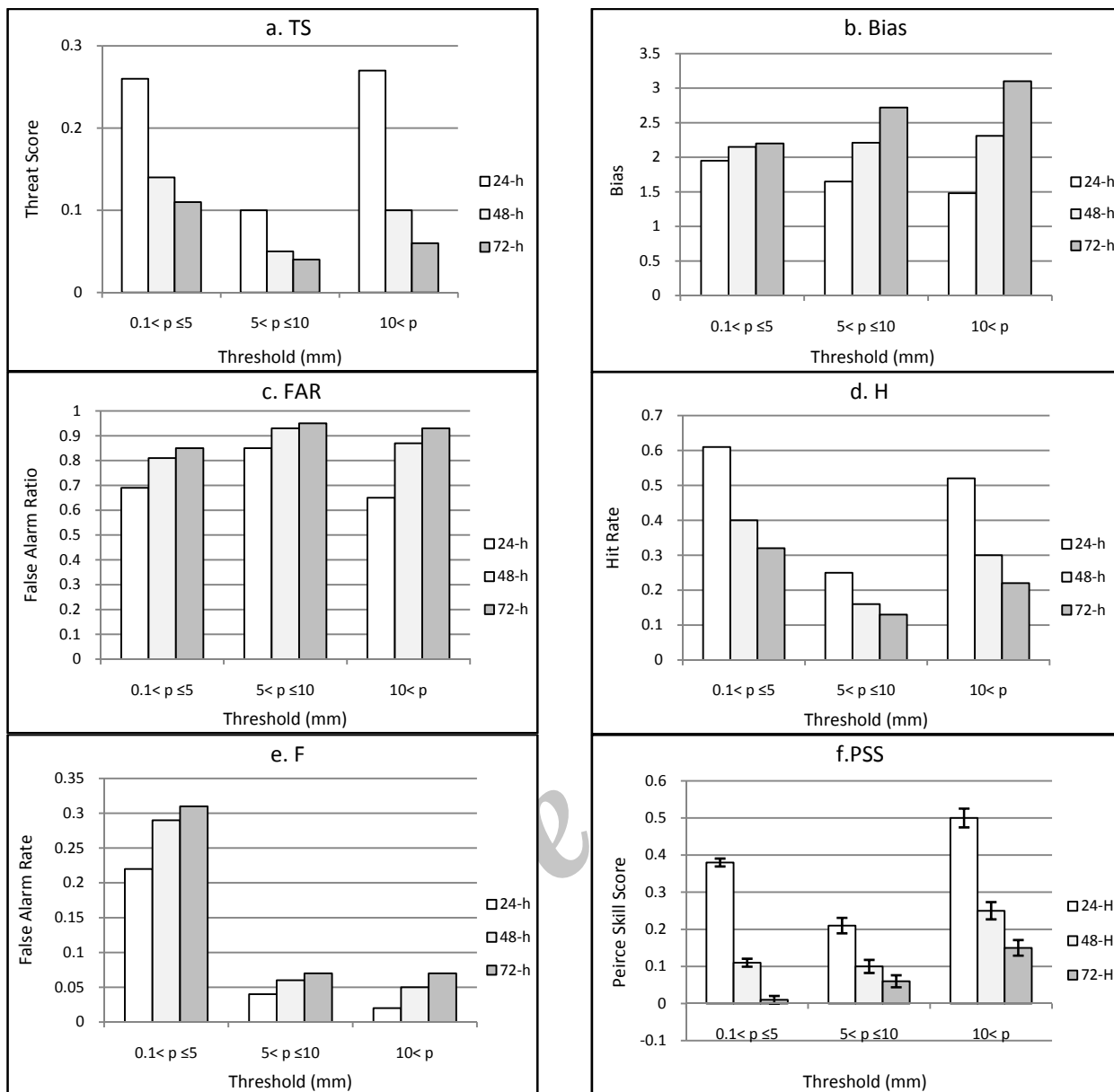
که در آن $\alpha = C/L$ نسبت "هزینه/ضرر" و تعیین کننده کاربر است (Jolliffe and Stephenson 2003).

۳- نتایج

در این بررسی مهارت سه مدل برای مناطق مختلف و گستره‌های متفاوت بارش به طور جداگانه مقایسه شده است. گستره‌های بارش در نظر گرفته شده ۵-۱۰، ۱۰-۵، و بیشتر از 1 mm (24h)^{-1} هستند. کشور ایران بر حسب ویژگی‌های اقلیمی و میانگین بارش به ۹

جدول ۲- کمیت‌های محاسبه شده برای پیش‌بینی وقوع بارش روی کشور ایران

PSS	F	H	FAR	B	TS	PC	n	d	c	b	A	کمیت مدل	سن پیش‌بینی
۰/۶۴	۰/۲۳	۰/۸۷	۰/۵۳	۱/۸۵	۰/۴۴	۰/۷۹	۶۳۴۴۳	۳۹۳۱۹	۱۵۴۷	۱۱۹۲۶	۱۰۶۵۱	WRF	۲۴ ساعته
۰/۳۱	۰/۳۶	۰/۶۷	۰/۶۹	۲/۱۸	۰/۲۷	۰/۶۵	۶۳۴۵۳	۳۲۸۵۶	۴۰۴۷	۱۸۴۰۸	۸۱۴۲	WRF	۴۸ ساعته
۰/۱۴	۰/۴۳	۰/۵۷	۰/۷۶	۲/۳۸	۰/۲	۰/۵۷	۶۳۹۳۷	۲۹۴۹۴	۵۲۸۲	۲۲۲۰۸	۶۹۵۳	WRF	۷۲ ساعته



شکل ۲- کمیت‌های راست آزمایی محاسبه شده برای سه آستانه در نظر گرفته شده.

متوسط حدود ۰/۱ است (شکل (a)). از کمیت B فراییش‌بینی مدل در سه گستره بارش مشاهده می‌شود (شکل (b)). متناظر با بیشتر بودن کمیت B از یک، کمیت FAR نشان می‌دهد که بیش از ۶۰٪ پیش‌بینی‌ها در آستانه‌های گفته شده رخ نداده است (شکل (c)). کمیت H نیز نشان می‌دهد که مدل در گستره‌های بارش سبک، متوسط و سنگین به ترتیب موفق به پیش‌بینی بیش از ۶۰٪ و ۲۰ و ۵۰ درصد از موارد وقوع بارش شده است (شکل (d)). با توجه به کمیت F دیده می‌شود که در گستره بارش سبک بیش از ۲۰٪ از مواردی که این بارش رخ نداده است مدل به اشتباه پیش‌بینی وقوع در این آستانه را داده است (شکل (e)). این مقدار در دو گستره دیگر کمتر از ۵٪

۲-۳- راست آزمایی پیش‌بینی بارش برای گستره‌های متفاوت بارش روی کشور

گستره‌های بارش در نظر گرفته شده در این بخش ۵-۱۰، ۰/۱-۵ و بیشتر از ۱۰ میلی‌متر در روز به ترتیب به عنوان بارش سبک، متوسط و سنگین هستند. در شکل ۲ نمودار کمیت‌های راست آزمایی محاسبه شده برای پیش‌بینی‌های ۲۴ ساعته (ستون‌های سفید)، ۴۸ ساعته (ستون‌های خاکستری روشن) و ۷۲ ساعته (ستون‌های خاکستری تیره) در گستره‌های گفته شده آورده شده است. p در این شکل میزان بارش را نشان می‌دهد. با توجه به کمیت TS دقت پیش‌بینی‌ها برای بارش سبک و سنگین حدود ۰/۳ و برای بارش

کمیت H تقریباً در تمام مناطق بیشتر از ۸۰٪ موارد وقوع بارش پیش‌بینی شده‌اند. کمیت F در مناطق مختلف مقادیر متفاوتی دارد به طوری که در منطقه جنوب غرب کشور (منطقه ۸) کمترین مقدار را دارد و تقریباً برابر با ۰/۱ است و در منطقه شمال غرب کشور (منطقه ۶) دارای بیشترین مقدار بوده و حدود ۰/۳۵ است. امتیاز مهارتی پیرس در اکثر مناطق بهبود حدود ۶۰ درصدی را نسبت به پیش‌بینی مرجع نشان می‌دهد. در اینجا نیز فاصله اطمینان ۹۵٪ برای کمیت PSS رسم شده است. می‌توان گفت اختلاف این کمیت برای مناطقی که در نیمه بالایی کشور قرار دارند (۱، ۲، ۳، ۴ و ۶) با مناطقی که در نیمه پایینی کشور قرار دارند (۵، ۷، ۸ و ۹) معنادار است.

است. کمیت PSS نیز برای بارش سبک، متوسط و سنگین به ترتیب حدود ۴۰، ۲۰ و ۵۰ درصد بهبود پیش‌بینی‌های این مدل را نسبت به پیش‌بینی مرجع نشان می‌دهد. برای این کمیت فاصله اطمینان ۹۵٪ نیز رسم شده است. با توجه به فاصله‌های اطمینان رسم شده در تراز ۰/۰۵ برای کمیت PSS تفاوت معنی‌داری بین آستانه‌های مختلف بارش وجود دارد. روی هم رفته با توجه به شکل ۲ برای بارش سبک و سنگین پیش‌بینی‌های بهتری نسبت به بارش متوسط مشاهده می‌شود. در نهایت با افزایش سن پیش‌بینی مقادیر کمیت‌های با گرایش مثبت کاهش و کمیت‌های با گرایش منفی افزایش یافته است.

۳-۳- راست‌آزمایی پیش‌بینی بارش برای مناطق مختلف

در این بخش با جدا کردن مناطق با رژیم‌های متفاوت بارش از یکدیگر (شکل ۱) فرایند راست‌آزمایی برای پیش‌بینی وقوع بارش (بارش بیشتر از $(0.1 \text{ mm } (24\text{h})^{-1})$) برای هر منطقه به صورت جداگانه انجام شده است و نتایج آن در شکل ۳ آورده شده است. در این نمودارها محور قائم مقادیر کمیت مورد نظر را نشان می‌دهد. محور افقی نیز نشان دهنده منطقه است، به طوری که هر شماره روی این محور، شماره منطقه را مطابق با شکل ۱ نشان می‌دهد. درصد رخداد بارش $((a+c)/n)$ در بازه زمانی بررسی شده در مناطق ۱ و ۲ (شمال کشور) با مقدار حدود ۰/۳۰ دارای بیشترین مقدار است. مناطق ۵، ۸ و ۹ (شرق، جنوب شرق، جنوب و جنوب غرب کشور) با مقدار حدود ۰/۱۰ کمترین درصد رخداد بارش را دارند. در دیگر مناطق نیز درصد رخداد بارش حدود ۰/۲۰ است. با توجه به جدول ۲ در این بازه زمانی مقدار متوسط درصد رخداد بارش در سطح کشور نیز حدود ۰/۲۰ است.

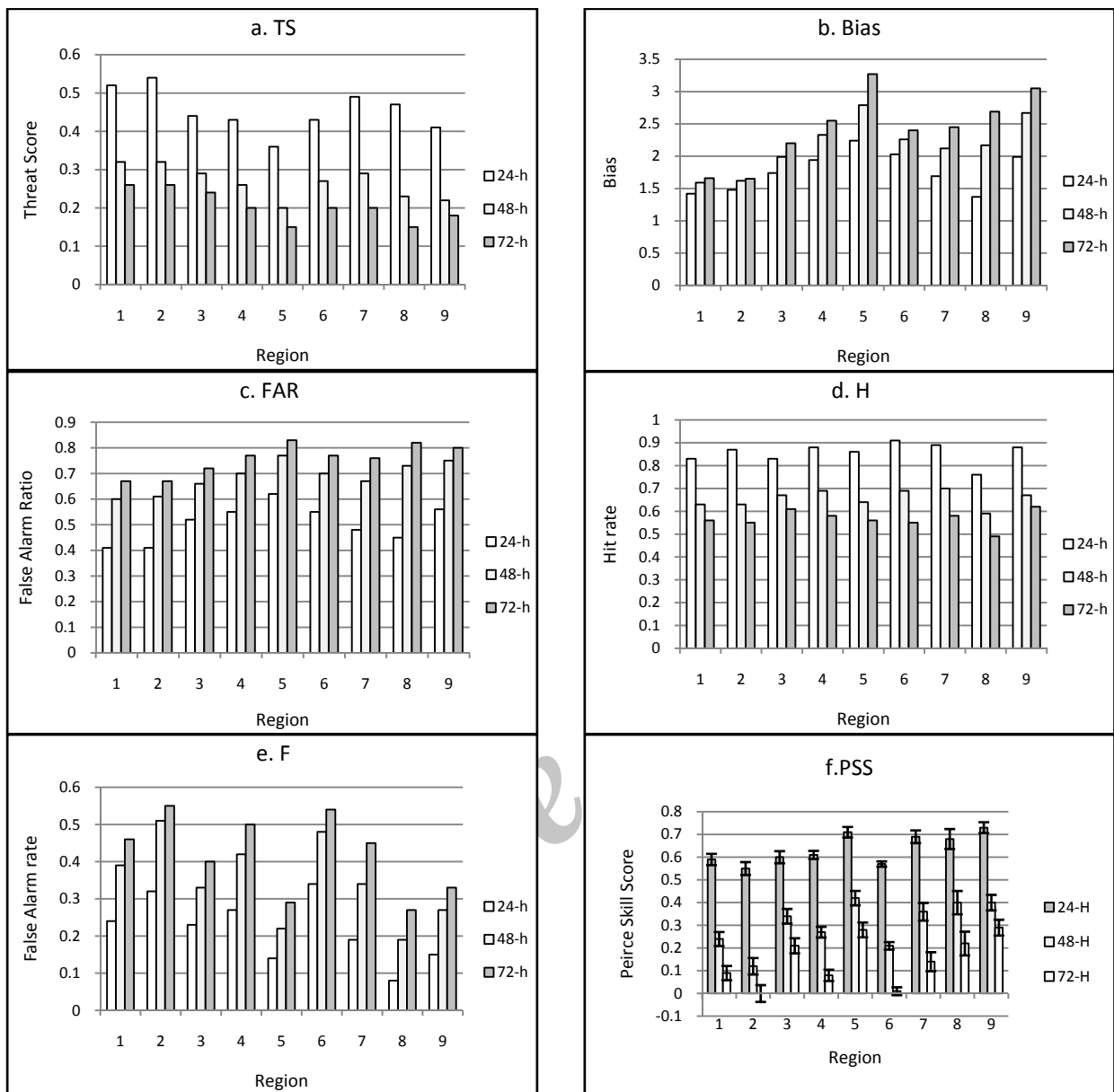
۳-۴- میانگین خطای مطلق پیش‌بینی بارش روی ایران

شکل ۴ میانگین خطای مطلق پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته مدل WRF را برای سه گستره بارش بررسی شده نشان می‌دهد. با توجه به این شکل قدر مطلق اختلاف بین مقادیر دیدبانی و پیش‌بینی ۲۴ ساعته برای هر ایستگاه و در هر تاریخ برای بارش سبک به طور میانگین حدود سه میلی‌متر است. این اختلاف برای بارش‌های متوسط و سنگین به ترتیب مقادیر تقریبی ۵/۵ و ۱۴/۲ میلی‌متر را دارد. این مقادیر اختلاف‌های قابل قبولی را بین مقادیر دیدبانی و پیش‌بینی شده نشان می‌دهد و کاربرد عملیاتی پیش‌بینی‌های این مدل توجیه پذیر است. MAE برای بردهای پیش‌بینی ۴۸ و ۷۲ ساعته مقادیر بالاتری دارد. در این شکل همچنین فاصله اطمینان ۹۵٪ برای پیش‌بینی‌های ۲۴ و ۴۸ ساعته آورده شده است که نشان می‌دهد در تراز ۰/۰۵ بین پیش‌بینی ۲۴ ساعته با پیش‌بینی‌های ۴۸ و ۷۲ ساعته اختلاف معناداری وجود دارد اما بین پیش‌بینی‌های ۴۸ و ۷۲ ساعته اختلاف معناداری دیده نمی‌شود.

کمیت TS نشان می‌دهد که دقت مدل WRF تقریباً در تمام مناطق بالاتر از ۴۰٪ است، حتی در منطقه شرق و جنوب شرق کشور (منطقه ۵) که منطقه کم بارش بوده و پراکندگی ایستگاه‌ها نیز در این منطقه کم است دقت اندکی کمتر از ۴۰٪ است. در شمال کشور (مناطق ۱ و ۲) که پربارش‌ترین منطقه است دقت بالاتر از ۵۰٪ به دست آمده است. کمیت B فراییش‌بینی این مدل را در تمام مناطق نشان می‌دهد اما این فراییش‌بینی در مناطق پربارش شمالی (منطقه‌های ۱ و ۲) و نیز در منطقه ۸ کمترین و در منطقه کم بارش شرق و جنوب شرق کشور (منطقه ۵) بیشترین مقدار را دارد. کمیت FAR نیز در شمال کشور کمترین و در شرق و جنوب شرق کشور بیشترین نسبت هشدارهای نادرست را نشان می‌دهد. با توجه به

۳-۵- نمودار ROC پیش‌بینی بارش در کشور ایران

همان‌گونه که در بخش ۲ بیان شد، ROC نمودار H برحسب F است، که در اینجا برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته مدل WRF رسم شده است (شکل ۵). چنان‌که در شکل دیده می‌شود نزدیک بودن منحنی ROC پیش‌بینی ۲۴ ساعته به مرز چپ و مرز بالای نمودار کارایی بالای این مدل را در تمیز دادن وقوع یا عدم وقوع رویداد نشان می‌دهد. با افزایش سن پیش‌بینی اگرچه نزدیک شدن منحنی ROC به قطر ۴۵° نمودار که نشان دهنده کاهش کارایی پیش‌بینی‌ها با افزایش سن پیش‌بینی است، قابل مشاهده



شکل ۳- کمیت‌های راست آزمایی محاسبه شده برای پیش‌بینی وقوع بارش مدل WRF در مناطق مختلف

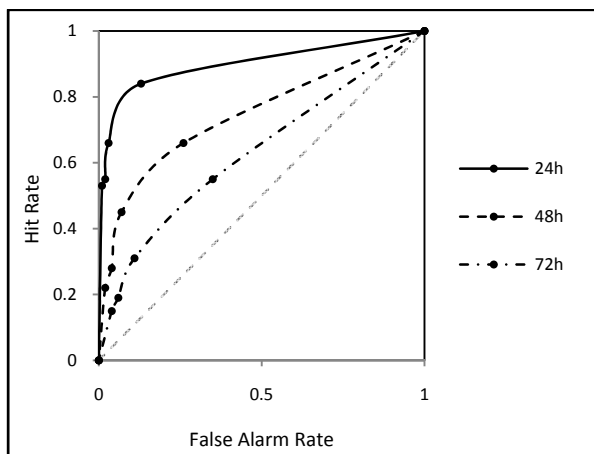
۰/۱ بیشینه مقدار ارزش برای نسبت هزینه-ضرر ۰/۲ و حدود ۰/۶۳ است، یعنی در صورت استفاده از پیش‌بینی این کاربر می‌تواند بیش از ۶۰٪ در هزینه خود صرفه جویی کند. بیشینه این ارزش در آستانه ۵ میلی‌متر برای نسبت ۰/۱ و حدود ۰/۵۰ و برای دو آستانه دیگر نیز در همین نسبت و حدود ۰/۴۰ است.

برای نسبت هزینه-ضرر تا حدود ۰/۰۵ ارزش اقتصادی برای آستانه‌های ۰/۱ و ۵ میلی‌متر به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار را دارد. برای نسبت‌های بالاتر از ۰/۱۵ مقدار ارزش برای آستانه ۰/۱ بیشترین مقدار را دارد. اختلاف بین آستانه‌های ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر

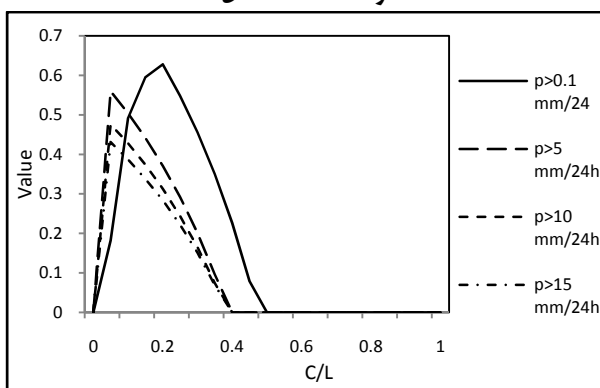
است اما همچنان منحنی‌های مربوط به پیش‌بینی‌های ۴۸ و ۷۲ ساعته بالاتر از قطر نمودار قرار گرفته‌اند.

۳-۶- ارزش اقتصادی پیش‌بینی بارش برای کشور ایران

در شکل ۶ نمودار ارزش اقتصادی پیش‌بینی‌های ۲۴ ساعته مدل WRF برای آستانه‌های بارش بیشتر از ۰/۱، ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر در روز آورده شده است. در این شکل محور قائم مقادیر ارزش اقتصادی را نشان می‌دهد و محور افقی نشان دهنده کاربر است و نسبت هزینه-ضرر، C/L ، را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل در آستانه



شکل ۵- مشخصه عملکرد نسبی (ROC) برای پیش‌بینی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته مدل WRF



شکل ۶- ارزش اقتصادی به عنوان تابعی از C/L برای پیش‌بینی‌های ۲۴ ساعته برای آستانه‌های ۰/۱، ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر در روز

میزان بارش پیش‌بینی‌های بهتری از مدل مشاهده شده است. کمیت‌های ROC و ارزش اقتصادی استفاده از پیش‌بینی‌های این مدل را توصیه پذیر نشان می‌دهند. همچنین باز بین بردن آریبی پیش‌بینی‌های مدل و اجرای منطقه‌ای آن براساس ویژگی‌های اقلیمی هر منطقه انتظار نتایجی با کارایی بالاتر می‌رود.

پی‌نوشت‌ها

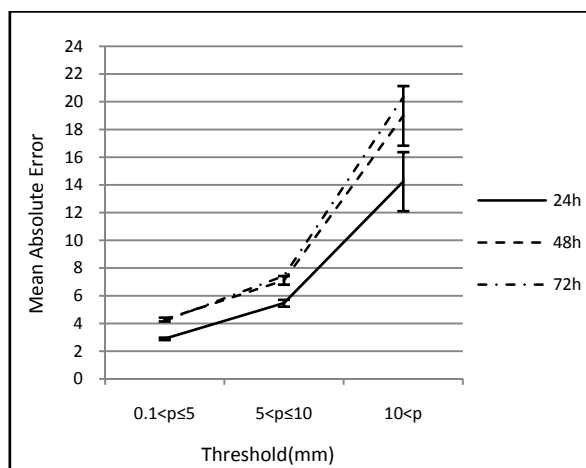
- 1- Weather Research and Forecasting Model
- 2- Quantitative precipitation forecasting
- 3- U.S. Weather Research Program
- 4- National Centers for Environmental Prediction
- 5- Fifth-Generation Mesoscale Model
- 6- Pennsylvania State University-National Center for Atmospheric Research
- 7- Mesoscale Unified Model (UM) of the Met Office
- 8- AireLimitée Adaptation Dynamique Développement International (ALADIN) model of Météo-France

تقریباً در تمام نسبت‌ها ناچیز است و تا نسبت حدود ۰/۳ ارزش اقتصادی آستانه ۵ میلی‌متر تا حدودی بیشتر از این دو آستانه است. در آستانه ۰/۱ تقریباً برای نسبت‌های بالاتر از ۰/۴۵ و در دیگر آستانه‌ها برای نسبت‌های بالاتر از ۰/۳۵ مقدار ارزش اقتصادی صفر می‌شود.

۴- جمع‌بندی

در این پژوهش با استفاده از تعدادی از کمیت‌های راست آزمایی پیش‌بینی بارش مدل WRF روی کشور ایران به طور جداگانه برای مناطق مختلف و همچنین گستره‌های متفاوت بارش راست آزمایی شده است. با استفاده از کمیت‌های مربوط به دقت (PC و TS)، دقت بیش از ۴۰ درصدی این مدل مشاهده شده که دقت خوبی است. حتی با در نظر گرفتن گستره‌های متفاوت برای بارش تنها در گستره بارش متوسط مقدار کمیت TS حدود ۰/۱ شده است و برای بارش سبک و سنگین تقریباً ۰/۳ است. علاوه بر این دقت بالاتر مدل در مناطق پر بارش شمالی قابل توجه است. کمیت آریبی هم فراییش‌بینی مدل را در حالت‌های بررسی شده نشان می‌دهد که این فراییش‌بینی در مناطق شمالی کمترین مقدار را دارد. امتیاز مهارتی پیرس نیز به طور متوسط بیش از ۵۰ درصد بهبود را برای حالت‌های مختلف نشان می‌دهد.

به طور کلی در آستانه بارش متوسط و همین‌طور در شرق و جنوب شرق کشور که منطقه‌ای کم بارش و با پراکندگی کم ایستگاه‌های دیدبانی است پیش‌بینی‌های ضعیف‌تر و در شمال کشور با بیشترین



شکل ۴- میانگین خطای مطلق پیش‌بینی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته و فاصله اطمینان ۹۵٪ برای بردهای ۲۴ و ۴۸ ساعته

- State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Tech. Note TN-398+STR, 122 pp. [Available from UCAR Communications, P.O. Box 3000, Boulder, CO 80307.]
- Janjic, Z. I., (1990): The step-mountain coordinate: physical package, *Mon. Wea. Rev.*, 118, pp. 1429–1443.
- Janjic, Z. I., (1996): The surface layer in the NCEP Eta Model, *Eleventh Conference on Numerical Weather Prediction*, Norfolk, VA, 19–23 August; Amer. Meteor. Soc., Boston, MA, 354–355.
- Janjic, Z. I., (2002): Nonsingular Implementation of the Mellor–Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model, *NCEP Office Note*, 437, 61 pp.
- Jolliffe, I.T., and D.B. Stephenson, (2003). *Forecast Verification*. Wiley, 240 pp.
- Kain, J. S., (2004): The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, 43, 170–181.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, and W. E. Baker, (1990): Global numerical weather prediction at the National Meteorological Center. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 71, pp. 1410–1428.
- Kato, T., K. Kurihara, H. Seko, and K. Saito, (1998): Verification of the MRI-nonhydrostatic-model predicted rainfall during the 1996 Baiu season. *J. Meteor. Soc. Japan*, 76, pp. 719–735.
- Katz, R.W. and Murphy, A.H. (1997). Forecast value: prototype decision-making models. In: *Economic Value of Weather and Climate Forecasts* (eds. R.W. Katz and A.H. Murphy). Cambridge: Cambridge University Press, pp. 183–217.
- Landis, R. C., (1994): Comments on “Forecasting in meteorology.” *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 75, pp. 823–827.
- Lin, Y.L., R. D. Farley, and H. D. Orville, (1983): Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Climate Appl. Meteor.*, 22, pp. 1065–1092.
- Malmberg, J., 2008: Forecast Verification: Past, Present, and Future. *Intermountain West Climate Summary*, 4(1), pp. 2-4.
- McBride, J. L., & E. E. Ebert, (2000): Verification of Quantitative Precipitation Forecasts from Operational Numerical Weather Prediction Models over Australia. *Wea. Forecasting*, 15, pp. 103-121.
- Mellor, G. L., and T. Yamada, (1982): Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, pp. 851–875.
- 9- WRF Pre-Processing System
10- WRF-Variational
11- Advanced Research WRF
12- Input
13- Output
14- Read/Interpolate/Plot
15- NCAR Command Language
16- Grid Analysis and Display System
17- Rapid Radiative Transfer Model
18- Land surface modal
19- Never forecasting
20- Always forecasting

۵- مراجع

هدایتی دزفولی، ا.، م. آزادی، (۱۳۸۶): راست آزمایی پیش‌بینی بارش مدل منطقه‌ای MM5 بر روی ایران. مجموعه مقالات هفتمین همایش پیش‌بینی عددی وضع هوا، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران.

Chien, Fang-Ching, Ying-Hwa Kuo, Ming-Jen Yang, (2002): Precipitation Forecast of MM5 in the Taiwan Area during the 1998 Mei-yu Season. *Wea. Forecasting*, 17, pp. 739–754.

Colle B. A., K. J. Westrick, and C. F. Mass, (1999): Evaluation of MM5 and Eta-10 precipitation forecasts over the Pacific Northwest during the cool season. *Wea. Forecasting*, 14, pp. 137–154.

Davis, C. A., and Coauthors, (2006): Advanced Research WRF developments for hurricane prediction. *Extended Abstracts, Seventh WRF Users' Workshop*, Boulder, CO, National Center for Atmospheric Research.

Done, J. M., L. R. Leung, and B. Kuo, (2006): Understanding error in the long-term simulation of warm season rainfall using the WRF model. *Extended Abstracts, Seventh WRF Users' Workshop*, Boulder, CO, National Center for Atmospheric Research.

Ferro, C. A. T., (2007): A Probability Model for Verifying Deterministic Forecasts of Extreme Events. *Wea. Forecasting*, 22, pp. 1089–1100.

Finley, J.P., (1884): Tornado prediction. *Amer. Meteor. J.*, 1, 85–88.

Fritsch, J. M., Coauthors, (1998): Quantitative precipitation forecasting: Report of the eighth prospectus development team, U.S. Weather Research Program. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79, pp. 285–299.

Grell, G. A., J. Dudhia, and D. R. Stauffer (1995): A description of the fifth-generation Penn

- Olson, D. A., N. W. Junker, and B. Korty, (1995): Evaluation of 33 years of quantitative precipitation forecasting at the NMC. *Wea. Forecasting*, 10, pp. 498–511.
- Roberts, Nigel M., Humphrey W. Lean, (2008): Scale-Selective Verification of Rainfall Accumulations from High-Resolution Forecasts of Convective Events. *Mon. Wea. Rev.*, 136, pp. 78–97.
- Shuman, F. G., (1989): History of numerical weather prediction at the National Meteorological Center. *Wea. Forecasting*, 4, pp. 286–296.
- Skamarock, W.C., J.B. Klemp, J. Dudhia, D. Gill, D. Barker, W. Wang, J.G. Powers, (2008): A description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR.
- Wilks, D. S., (2006): *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, 627 pp.
- Third International Verification Methods Workshop (IVMW): (2007), Reading, UK. Available online: [Http://www.bom.gov.au/bmrc.wefor/staff/eee/verif/verif_web_page.html](http://www.bom.gov.au/bmrc.wefor/staff/eee/verif/verif_web_page.html).
- Mesinger, F., (1996): Improvements in quantitative precipitation forecasts with the Eta Regional Model at the National Centers for Environment Prediction: The 48-km upgrade. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, pp. 2637–2649.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, (1997): Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the long wave. *J. Geophys. Res.*, 102 (D14), pp. 16663–16682.
- Moeng, C.-H., J. Dudhia, J. B. Klemp, and P. P. Sullivan, (2007): Examining two-way grid nesting for large eddy simulation of the PBL using the WRF model. *Mon. Wea. Rev.*, 135, pp. 2295–2311
- Monin, A.S. and A.M. Obukhov, 1954: Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci., USSR*, (151), pp. 163–187 (in Russian).
- Murphy, A.H., (1977): The value of climatological, categorical and probabilistic forecasts in the cost-loss ratio situation. *Mon. Weather Rev.*, 105, pp. 803–816.
- Murphy, A.H., (1993): What is a good forecast? An essay on the nature of goodness in weather forecasting. *Wea. Forecasting*, 8, pp. 281-293.

Archive